

CENTRO UNIVERSITÁRIO DO SUL DE MINAS - UNIS/MG
ENGENHARIA ELÉTRICA
GUSTAVO DIXINI CAMPOS

ANÁLISE DA QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA:
Um estudo de caso

Varginha
2016

GUSTAVO DIXINI CAMPOS

ANÁLISE DA QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA:

Um estudo de caso

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado para avaliação do Centro Universitário do Sul de Minas UNIS-MG, como pré-requisito para obtenção do grau de bacharel em Engenharia Elétrica, sob orientação do Prof. Me. Eduardo Henrique Ferroni.

Varginha

2016

GUSTAVO DIXINI CAMPOS

ANÁLISE DA QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA:

Um estudo de caso

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado para apreciação do Centro Universitário do Sul de Minas UNIS-MG, como pré-requisito para obtenção do grau de bacharel em Engenharia Elétrica, sendo avaliado pela banca examinadora composta pelos membros:

Aprovado em: / /

Prof. Me. Eduardo Henrique Ferroni

Prof. Me. Hugo Rodrigues Vieira

Eng. Luiz Antônio da Silva Silvério

OBS:

Dedico este trabalho aos colegas deste e de outros tempos, aos professores e amigos que investiram em mim um pouco de seu tempo, me direcionando ou aconselhando.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao professor Mestre Eduardo Henrique Ferroni e ao colega Luís Antônio da Silva Silvério, que generosamente me ensinaram e permitiram a realização deste trabalho. Aos meus pais, pelo apoio financeiro desde os primeiros anos de minha formação até hoje.

“As habilidades de comunicação são as mais importantes que qualquer engenheiro pode ter. Um elemento muito importante neste conjunto de ferramentas é a capacidade de fazer uma pergunta e entender a resposta, que é uma coisa muito simples e pode fazer a diferença entre sucesso e fracasso.” James A. Watson

RESUMO

A análise da qualidade de energia elétrica abordada no trabalho tem por objetivo verificar a conformidade dos valores de tensão, fator de potência e harmônicos no quadro geral de distribuição do Hospital da Unimed da cidade de Três Corações – MG com os parâmetros de qualidade da energia em regime permanente definidos no módulo 8 dos Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST). Utiliza-se para as medições o analisador de qualidade de energia Fluke 435, que fornece um registro completo do monitoramento da energia. A partir do tratamento e comparação dos dados desse registro com os valores de referência, é possível evidenciar ocorrências indesejáveis na instalação, relatando anormalidades e atestar a qualidade da energia.

Palavras-chave: Energia. Elétrica. Qualidade de Energia. Análise.

ABSTRACT

The analysis of power quality addressed in this paper aims to check the suitability of the values of voltage, power factor and harmonics in the overall distribution switchboard of Unimed Hospital in Três Corações city with the power quality parameters in steady state defined in the module 8 of the Electricity Distribution Procedures in the National Electricity System (PRODIST). The power quality analyzer Fluke 435 was used for measuring, which provided a complete record of monitoring of energy. From the treatment and comparison of these data with the reference values, it was possible to see undesirable occurrences at the facility, reporting abnormalities, and certify the power quality.

Keywords: Energy. Electric. Power Quality. Analysis.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Energia armazenada em nas regiões SE e CO	14
Figura 2 – Tensão x corrente no resistor	18
Figura 3 – Tensão x corrente no indutor.....	19
Figura 4 – Triângulo das potências.	20
Figura 5 – Tipo de carga x fator de potência.....	21
Figura 6 – Utilização de para-raios para amortecimento das correntes transitórias.....	24
Figura 7 – Locais onde a descarga atmosférica pode incidir e ser conduzida até as cargas.....	25
Figura 8 – Acoplamento capacitivo.....	25
Figura 9 – Transitório impulsivo de corrente causado por descarga atmosférica.	26
Figura 10 – Transitório provocado por chaveamento de capacitor.	27
Figura 11 – Transitório de baixa frequência na energização de capacitores.	27
Figura 12 – Transitório provocado por ferrossonância.....	28
Figura 13 – Afundamento de tensão devido a uma falta fase-terra.	29
Figura 14 – Afundamento de tensão devido a partida de grande motor.....	30
Figura 15 – Curva CEBMA/ITI para contatores e ASDs.....	31
Figura 16 – Curva CEBMA/ITI para computadores	32
Figura 17 – Salto de tensão.....	33
Figura 18 – Interrupção de curta duração	34
Figura 19 – Desequilíbrio de tensão alimentador residencial.....	37
Figura 20 – Representação distorção harmônicos ímpares até a 13ª ordem.....	39
Figura 21 – Decomposição harmônica dispositivo de ajuste variável de velocidade.	39
Figura 22 – Interferência magnética de correntes harmônicas	40
Figura 23 – Tensão de recorte gerada por conversor DC trifásico	41
Figura 24 – Ruído em onda de tensão AC.....	42
Figura 25 – Flutuação da tensão característica dos <i>flickers</i>	42
Figura 26 – Variação de frequência durante 24 horas	43
Figura 27 – Analisador de qualidade de energia Fluke 435	47
Figura 28 – <i>Setup</i> de tensão RMS	48
Figura 29 – <i>Setup</i> de distorções harmônicas	48
Figura 30 – <i>Setup</i> de frequência	48
Figura 31 – <i>Setup</i> de desequilíbrio.	48
Figura 32 – Evolução temporal do fator de potência médio.	49
Figura 33 – Histograma do fator de potência total médio	50
Figura 34 – Tensões RMS mínimas, máximas e médias entre fases L1, L2, L3 e o neutro.....	51
Figura 35 – Registro de eventos do analisador Fluke 435.....	51
Figura 36 – Análise de tensões e correntes RMS nas fases L1 e L2 durante afundamentos....	53
Figura 37 – Histograma de tensão RMS mínima entre a fase L1 e neutro.....	53
Figura 38 – Histograma de tensão RMS máxima entre a fase L1 e neutro	54
Figura 39 – Histograma de tensão RMS mínima entre a fase L2 e neutro.....	54
Figura 40 – Histograma de tensão RMS máxima entre a fase L2 e neutro.	55
Figura 41 – Histograma de tensão RMS mínima entre a fase L3 e neutro.....	55
Figura 42 – Histograma de tensão RMS máxima entre a fase L3 e neutro	55
Figura 43 – Histograma de tensão RMS máxima entre o neutro e terra	56
Figura 44 – Porcentagem de distorções harmônicas totais de tensão.....	57

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	10
2 CONTEXTO E LEGISLAÇÃO NO BRASIL	13
2.1 Crise energética brasileira	13
2.2 Regulação e fiscalização	15
2.3 O módulo 8 do PRODIST	17
3 FENÔMENOS ELETROMAGNÉTICOS	18
3.1 Fator de potência	18
3.2 Categorias e características típicas de fenômenos eletromagnéticos	22
3.2.1 Transitórios ou transientes.....	23
3.2.1.1 Impulsivos	24
3.2.1.2 Oscilatórios.....	26
3.2.2.1 Afundamento de tensão	29
3.2.2.2 Salto de Tensão.....	33
3.2.2.3. Interrupção de curta duração	34
3.2.3 Variações de tensão de longa duração	35
3.2.3.1 Sobretensões	35
3.2.3.2 Subtensões	35
3.2.4 Desequilíbrio de tensão	37
3.2.5 Distorção na forma de onda.....	37
3.2.5.1 DC <i>offset</i>	38
3.2.5.3 Inter-harmônicos.....	40
3.2.5.4 Recorte.....	40
3.2.5.5 Ruído	41
3.2.6 Flutuação de tensão	42
3.2.7 Variações na frequência.....	42
4 METODOLOGIA DA MEDIÇÃO	44
4.1 Parâmetros de medição	44
4.1.1 Fator de potência	44
4.1.2 Nível de tensão	44
4.1.3 Harmônicos.....	45
4.2 Configuração do Equipamento de Medição.....	46
5 RESULTADOS	49
5.1 Fator de potência	49
5.2 Níveis de tensão RMS	50
5.3 Harmônicos	57
6 CONCLUSÃO.....	60
REFERÊNCIAS	61

1 INTRODUÇÃO

Desde os anos 80, a expressão qualidade de energia elétrica (QEE) foi largamente empregada da indústria de energia (DUGAN, 2002). Afirma-se ainda que as empresas de energia elétrica e também os consumidores estão se tornando cada vez mais envolvidos com as questões relacionadas à QEE.

Dependendo do estudo em questão e da bibliografia consultada, há diferentes abordagens para esse amplo tema, com diferentes definições. Considera-se neste trabalho acadêmico QEE como sendo uma medida de quão bem a energia elétrica pode ser utilizada pelos consumidores. Essa medida é baseada em características de continuidade de suprimento e de conformidade com certos parâmetros apropriados para a operação eficiente, tanto do ponto de vista do suprimento de energia como das cargas elétricas. Existe no Brasil documentação específica para os valores desses parâmetros, expedida pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). Um problema de qualidade de energia elétrica é definido como qualquer manifestação de desvios na tensão, corrente ou frequência, que resulte em falhas ou má operação de equipamentos. Utilizam-se índices estabelecidos pela ANEEL para identificar e classificar esses problemas.

Neste trabalho, portanto, adota-se a definição de Abreu (1996): qualidade de energia elétrica é a disponibilidade da energia elétrica, com forma de onda senoidal e pura, sem alterações na amplitude, proveniente de uma fonte de potência infinita.

Segundo Dugan (2002), a principal motivação da investigação da qualidade de energia elétrica é financeira. Há impactos econômicos para os fornecedores de energia elétrica, seus clientes e fornecedores de equipamentos, quando há alterações notáveis da QEE. Em se tratando de consumidores com grandes blocos de carga instalados, a qualidade do fornecimento de energia pode ter um impacto econômico mais acentuado.

No passado, de acordo com Dugan (2002), os problemas causados pela má qualidade no fornecimento de energia não eram tão expressivos, considerando que os equipamentos existentes eram relativamente pouco sensíveis aos efeitos dos distúrbios ocorridos. Além disso, não se observavam grandes quantidades de dispositivos que poderiam ocasionar perda de qualidade da energia.

Com o desenvolvimento tecnológico, lê-se em Ferreira (2010), principalmente da eletrônica de potência, consumidores e empresas de energia elétrica têm investido progressivamente em QEE por vários motivos, como:

- a) os equipamentos utilizados comumente hoje em dia, como computadores e eletrônicos em geral, são relativamente mais sensíveis às variações na qualidade da energia;
- b) os interesses cada vez maiores na eficiência e conservação da energia elétrica tem aumentado o uso de equipamentos de cargas não lineares, que podem ocasionar um aumento dos níveis de distorções harmônicas, o que pode desencadear uma situação de ressonância no sistema;
- c) crescente conscientização dos consumidores sobre os fenômenos ligados à qualidade da energia, na medida em que se tornam mais informados a respeito de fenômenos como interrupções, subtensões, transitórios de chaveamentos e passam a exigir qualidade do atendimento das concessionárias;
- d) integração dos processos, o que expõe o sistema produtivo, uma vez que a falha de qualquer componente pode ter consequências estendidas, paralisando total ou parcialmente a produção;
- e) comprometimento da vida útil de componentes elétricos como consequência de uma má QEE.

Para se estabelecerem índices que permitam avaliar o comprometimento das condições ideais de operação em relação aos distúrbios presentes em uma instalação, adota-se como critério para avaliar a QEE a divergência que o sistema real apresenta dessas condições ideais. O detalhamento desses índices é exposto no Capítulo 4, referente a metodologia, baseado na legislação vigente.

Considerando os parágrafos anteriores, pode-se perceber a importância de uma análise e diagnóstico da qualidade da energia elétrica, tanto nas instalações das empresas de energia elétrica quanto dos clientes, com o objetivo de identificar distúrbios e suas causas, apresentar as soluções mais viáveis, na busca por minimizar as consequências dos problemas de qualidade de energia. Na indústria, esses problemas podem ocasionar impactos financeiros tais como:

- a) perda de produção com a geração de sucata e refugo de materiais;
- b) custo de reiniciar operações;
- c) reparo e substituição de componentes danificados.

Neste trabalho acadêmico, tem-se como objetivo geral analisar a qualidade de energia em uma instalação elétrica de um hospital da cidade de Três Corações, MG, com vista a esclarecer as possíveis causas de um mau-funcionamento do equipamento de raio-x e de suas imediações quando esse é ligado. Avalia-se a adequação dos valores medidos de fator de potência, níveis de tensão e níveis de harmônicos com os valores de referência definidos no módulo 8 dos Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST). Para isso, efetua-se uma medição no quadro principal de distribuição da instalação

hospitalar, utilizando um analisador de qualidade de energia elétrica da marca Fluke, modelo 435. Esse equipamento permite o monitoramento de muitos parâmetros, no entanto, somente são analisados neste trabalho aqueles regulamentados na legislação brasileira. Além disso, de acordo com a anormalidade observada na instalação investigada, cuja mensagem de erro no painel do equipamento de raio-x informa problema no suprimento de energia, os níveis de tensão são tratados com maior rigor.

Neste estudo, definiram-se como referência os valores do PRODIST pelo fato de terem sido estabelecidos levando-se em consideração o sistema elétrico brasileiro, no qual a QEE deve ser garantida pelos valores impostos pela ANEEL.

Para análise e tratamento dos dados da medição utiliza-se o *software Power Log*, fornecido com o analisador de qualidade de energia, além de planilhas auxiliares.

A organização do presente trabalho é feita com o objetivo de situar o leitor no âmbito da qualidade da energia elétrica e justificar a necessidade de monitoramento da QEE no estudo de caso da instalação hospitalar em questão. Traz o objetivo do trabalho, considerações sobre a legislação vigente, parâmetros de medição, metodologia do estudo e análise dos resultados de acordo com o exposto a seguir. No Capítulo 1 encontra-se o texto introdutório às questões de qualidade da energia, com uma breve explicação acerca da abordagem do assunto neste estudo. Justifica-se a investigação de parâmetros de qualidade e se expõe a organização do trabalho. O Capítulo 2 expõe um breve panorama do cenário energético brasileiro, trazendo considerações sobre crise energética no país, tendência de se investir em eficiência e a necessidade de monitorar a interferência destas soluções na qualidade da energia elétrica. O Capítulo 3 detalha os principais fenômenos elétricos que interferem na qualidade da energia elétrica. O Capítulo 4 traz a metodologia utilizada, configuração do equipamento de medição e valores de referência para os parâmetros analisados. No Capítulo 5 são expostos os resultados da medição efetuada e sua análise, com base nos valores de referência impostos pela legislação vigente. O Capítulo 6 conclui a análise e atesta a qualidade de energia fornecida ao cliente com base na regulamentação expedida pela ANEEL.

2 CONTEXTO E LEGISLAÇÃO NO BRASIL

Este capítulo põe o leitor a par da situação atual no Brasil, no que se refere à crescente preocupação com o uso da energia elétrica, às medidas de redução do consumo, tal como o racionamento de energia, e aborda aspectos regulatórios e competências de fiscalização da qualidade da energia.

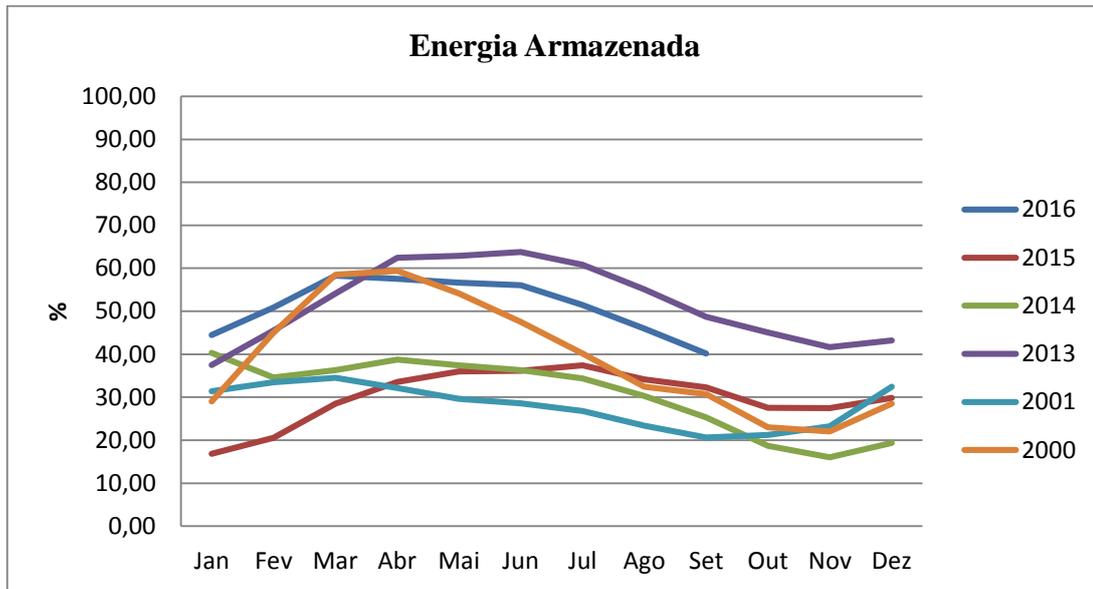
2.1 Crise Energética Brasileira

Lê-se em Silvério (2016) que a legislação brasileira permite reajustes extraordinários de tarifas como uma medida para compensar desequilíbrios econômicos e financeiros das empresas de energia elétrica. Diz-se que o aumento de preços pode ter também a finalidade de racionalização da energia, pois os consumidores tendem a evitar desperdícios e utilizar a energia disponível com alguma moderação.

Segundo registros do histórico do Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), houve baixas nos níveis dos reservatórios das usinas hidrelétricas do sudeste e centro-oeste brasileiro nos últimos anos, significando menor percentual de energia armazenada, que passou de um valor médio anual de 51% da capacidade total em 2013 para valores médios de 31% da capacidade máxima nos anos de 2014 e 2015. Neste período, foram necessários altos fatores de participação de usinas termelétricas, o que conseqüentemente elevou o custo da geração de energia elétrica. Em 2016, a média de janeiro a setembro da energia armazenada nos reservatórios da mesma região é de 52%.

A partir das informações ilustradas na Figura 1, nota-se que até começo de 2015 o nível dos reservatórios da região Sudeste e Centro Oeste esteve em torno de 20% da capacidade máxima de armazenamento, numa época em que a média anual esteve em 30% por dois anos consecutivos. Observa-se que nos anos 2000 e 2001, quando houve o racionamento de energia elétrica, a situação esteve semelhante, porém não tão crítica. As médias anuais situavam-se em 39% e 28% respectivamente. A partir da comparação desses panoramas, infere-se que o racionamento esteve próximo de ser necessário há menos de dois anos. Já no ano de 2016, a média registrada até o mês de setembro é de 51% da capacidade máxima de energia armazenada, o que diminui o risco de cortes de energia, oferece condições operacionais mais favoráveis à geração e diminui o acréscimo nas faturas de energia pelo sistema de bandeiras.

Figura 1 – Energia armazenada em nas regiões SE e CO



Fonte: O autor, adaptado de (ONS, 2016).

Os cenários desfavoráveis ao custo da geração energia, como escassez hídrica e o aumento do preço dos combustíveis das termelétricas, juntamente com um mercado cada vez mais exigente por qualidade de atendimento de energia elétrica são fatores que pressionam as empresas de energia a investir em eficiência energética, otimizando a utilização da energia, e almejando a competitividade.

Como exemplos de medidas que visam melhor eficiência energética pode-se citar, por exemplo, a adoção de lâmpadas LED ou a instalação de fontes alternativas de energia elétrica, como os painéis solares fotovoltaicos. Existem ainda estratégias de gerenciamento de energia que almejam suavizar os picos de consumo no SIN, denominadas gerenciamento pelo lado da demanda, que incluem programas tarifários alternativos (CHIA, 2011).

Numa época em que se busca, então, uma forma de otimização da utilização da energia, também se constata o aumento de dispositivos eletrônicos de alto desempenho que podem deteriorar a qualidade da energia gerando distúrbios na rede elétrica. Segundo Ferreira (2010), a própria lâmpada LED citada anteriormente como fonte de economia pela sua eficiência energética, que utiliza diodos semicondutores, ou ainda equipamentos que utilizam fontes chaveadas podem interferir no fator de potência ou gerar harmônicos na instalação, afetando diretamente a qualidade da energia. Nesses casos, os distúrbios são gerados nas cargas dos consumidores e podem se propagar pela rede das empresas de energia elétrica, estando sujeitos a análise e procedimentos por parte das mesmas, o que inclui a possibilidade de multas e outros encargos.

2.2 Regulação e Fiscalização

No Brasil, a responsabilidade pela observância dos parâmetros sob os quais a energia elétrica é fornecida aos consumidores é da ANEEL.

"A agência tem como atribuições regulares fiscalizar a geração, a transmissão, a distribuição e a comercialização da energia elétrica, atendendo reclamações de agentes e consumidores com equilíbrio entre as partes e em benefício da sociedade; mediar os conflitos de interesses entre os agentes do setor elétrico e entre estes e os consumidores; conceder, permitir e autorizar instalações e serviços de energia; garantir tarifas justas; zelar pela qualidade do serviço; exigir investimentos; estimular a competição entre os operadores e assegurar a universalização dos serviços." (ANEEL, 2016).

A ANEEL foi criada através da lei Lei 9.427 de 26 de Dezembro de 1996, com a missão de proporcionar condições favoráveis para que o mercado de energia elétrica se desenvolva com equilíbrio entre os agentes e em benefício da sociedade, para regulação técnica e econômica, atribuições de poder concedente para conferir outorgas de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica, titulação e fiscalização de atividades setoriais relacionadas com a cadeia produtiva da energia elétrica, regulação de tarifas de transmissão e distribuição de energia elétrica.

Atualmente (2016), a Resolução Normativa nº 414 de 09/09/2010 estabelece as Condições Gerais de Fornecimento de Energia Elétrica de forma atualizada e consolidada. Conforme o Art. 2º da referida resolução, a classificação das unidades consumidoras quanto ao nível de fornecimento se divide nos grupos A e B.

"[...] XXXVII – grupo A: grupamento composto de unidades consumidoras com fornecimento em tensão igual ou superior a 2,3 kV, ou atendidas a partir de sistema subterrâneo de distribuição em tensão secundária, caracterizado pela tarifa binômica e subdividido nos seguintes subgrupos:

- a) subgrupo A1 – tensão de fornecimento igual ou superior a 230 kV;
- b) subgrupo A2 – tensão de fornecimento de 88 kV a 138 kV;
- c) subgrupo A3 – tensão de fornecimento de 69 kV;
- d) subgrupo A3a – tensão de fornecimento de 30 kV a 44 kV;
- e) subgrupo A4 – tensão de fornecimento de 2,3 kV a 25 kV;
- f) subgrupo AS – tensão de fornecimento inferior a 2,3 kV, a partir de sistema subterrâneo de distribuição.

"[...]XXXVIII – grupo B: grupamento composto de unidades consumidoras com fornecimento em tensão inferior a 2,3 kV, caracterizado pela tarifa monômica e subdividido nos seguintes subgrupos:

- a) subgrupo B1 – residencial;
- b) subgrupo B2 – rural;
- c) subgrupo B3 – demais classes;
- d) subgrupo B4 – Iluminação Pública." (Resolução ANEEL 414, art. 2º).

Dependendo do consumo de energia elétrica e da demanda contratada define-se, ainda no Art. 2º da mesma resolução, conjuntos de tarifas denominados grupos:

- "a) modalidade tarifária convencional monômnia: aplicada às unidades consumidoras do grupo B, caracterizada por tarifas de consumo de energia elétrica, independentemente das horas de utilização do dia;
- b) modalidade tarifária horária branca: aplicada às unidades consumidoras do grupo B, exceto para o subgrupo B4 e para as subclasses Baixa Renda do subgrupo B1, caracterizada por tarifas diferenciadas de consumo de energia elétrica, de acordo com as horas de utilização do dia;
- c) modalidade tarifária convencional binômnia: aplicada às unidades consumidoras do grupo A, caracterizada por tarifas de consumo de energia elétrica e demanda de potência, independentemente das horas de utilização do dia;
- d) modalidade tarifária horária verde: aplicada às unidades consumidoras do grupo A, caracterizada por tarifas diferenciadas de consumo de energia elétrica, de acordo com as horas de utilização do dia, assim como de uma única tarifa de demanda de potência;
- e) modalidade tarifária horária azul: aplicada às unidades consumidoras do grupo A, caracterizada por tarifas diferenciadas de consumo de energia elétrica e de demanda de potência, de acordo com as horas de utilização do dia." (Resolução ANEEL 414, art. 2).

Conforme exposto no Art. 59 da Resolução Normativa nº 414 da ANEEL, as distribuidoras devem propor a definição dos horários de ponta, intermediário e fora de ponta para aprovação da ANEEL.

"§ 1º A aprovação dos postos tarifários ponta, intermediário e fora de ponta propostos pela distribuidora ocorre no momento da homologação de sua revisão tarifária periódica.

§ 2º A ANEEL pode autorizar a aplicação de diferentes postos tarifários de ponta, intermediário e fora de ponta para uma mesma distribuidora, em decorrência das características operacionais de cada subsistema elétrico ou da necessidade de estimular a mudança do perfil de carga de unidades consumidoras, considerando as seguintes condições." (Resolução ANEEL 414, art. 59).

O horário de ponta proposto pela CEMIG e aprovado pela ANEEL, para sua área de concessão, é entre 17 e 20 horas. Durante o horário de verão, altera-se para o intervalo entre 18 e 21 horas.

Em termos de fiscalização, a ANEEL audita concessionárias e monitora o desempenho das distribuidoras quanto à continuidade do serviço de energia prestado, com base em indicadores coletivos e individuais. Esta pauta é regulamentado através do Módulo 8 do PRODIST.

2.3 O Módulo 8 do PRODIST

Os Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional - PRODIST são documentos expedidos pela ANEEL desde a Resolução Normativa nº 345/2008, que normatizam e padronizam as atividades técnicas relacionadas ao funcionamento e desempenho dos sistemas de distribuição de energia elétrica. O PRODIST é composto por nove módulos, sendo que o módulo oito é o que apresenta parâmetros e procedimentos referentes a qualidade da energia elétrica, objeto de estudo deste trabalho. Esses documentos são a referência nacional em termos de qualidade de energia, mas são considerados menos rigorosos que as normas técnicas americanas ou europeias (SILVÉRIO, 2016).

A revisão sete do módulo oito do PRODIST tem vigência a partir do dia primeiro de janeiro de 2016. Através da Resolução Normativa nº 728/2016 foram aprovadas pela ANEEL aprimoramentos da Seção 8.1, que trata justamente da qualidade do produto, essencial para a precisão deste trabalho acadêmico. Por esta razão, foram utilizados os valores de referência vigentes na data da elaboração do estudo, portanto, anteriores às alterações homologadas pela Resolução Normativa nº 728 que entrarão em vigor somente no início de 2017.

O módulo oito aborda a qualidade do produto e a qualidade do serviço prestado. Para a qualidade do produto, a seção 8.1 do referido módulo estabelece terminologia, caracteriza os fenômenos, parâmetros e valores de referência relativos à tensão em regime permanente e às perturbações na forma de onda da tensão. Estabelece, ainda, métodos que permitem a ANEEL fixar padrões para os indicadores de QEE. Para a qualidade dos serviços prestados, a seção 8.2 do módulo oito define a metodologia para apuração dos indicadores de QEE relativos a continuidade do suprimento e tempos de atendimento às ocorrências. Define ainda na parte de qualidade dos serviços prestados os padrões e responsabilidades sobre causas e efeitos de eventuais distúrbios.

Os procedimentos relativos a qualidade de energia elétrica definidos no módulo em questão devem ser observados por consumidores com instalações conectadas em qualquer classe de tensão de distribuição, além dos produtores de energia, distribuidoras, agentes importadores ou exportadores de energia elétrica, transmissoras detentoras de Demais Instalações de Transmissão – DIT e o ONS.

Os valores de referência para os parâmetros analisados, bem como a metodologia específica são abordados no capítulo 4.

3 FENÔMENOS ELETROMAGNÉTICOS

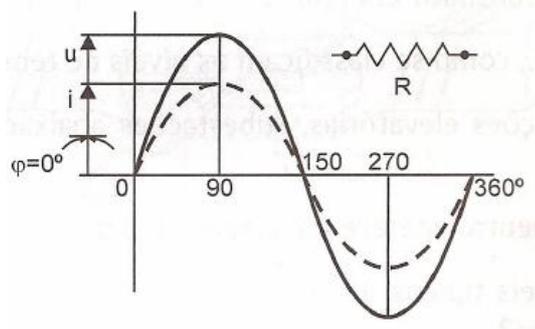
Para analisar a qualidade da energia elétrica é necessária uma introdução às propriedades e fenômenos eletromagnéticos associados aos parâmetros definidos para a análise. Neste trabalho esses parâmetros são o fator de potência, os níveis de harmônicos e de tensão.

3.1 Fator de potência

Primeiramente deve-se esclarecer o que são cargas lineares e não lineares.

Carga linear é aquela que obedece à lei de Ohm, a corrente é proporcional à tensão e inversamente proporcional à resistência (CAPELLI, 2008). O resistor é um exemplo de carga linear. A Figura 2 ilustra a corrente elétrica em fase com a tensão. Ao se aumentar a tensão aplicada no resistor, a corrente aumenta segundo a mesma proporção.

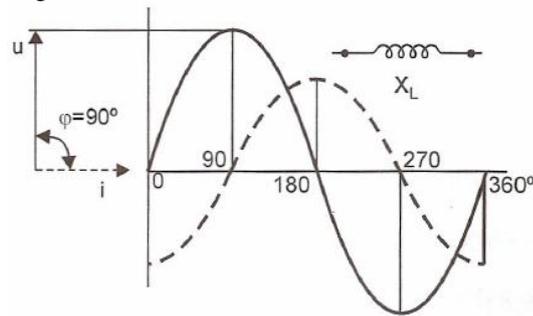
Figura 2 – Tensão X corrente no resistor



Fonte: (CAPELLI, 2013, p. 76).

Os indutores se comportam de maneira diferente. Esses componentes oferecem oposição às variações de corrente e então a tensão em um circuito puramente indutivo está 90° adiantada em relação à corrente ($\varphi = 90^\circ$), conforme a Figura 3. O indutor não é, portanto, uma carga linear.

Figura 3 – Tensão X Corrente no indutor



Fonte: (CAPELLI, 2013).

Segundo Capelli (2013), os capacitores também não são cargas lineares. Esses se opõem às variações de tensão, atrasando-a em relação à corrente elétrica ($\varphi = -90^\circ$).

Em se tratando de cargas não lineares, utiliza-se o termo impedância, e não somente sua parte real, a resistência. A resistência permanece constante com avariação da frequência, mas a impedância, no indutor, é alterada conforme Fórmula (1):

$$X_L = 2 \pi \cdot f \cdot L \quad (1)$$

Onde X_L é a reatância indutiva, L é a indutância dada em *Henrys*, f é a frequência em *Hertz*, e π é aproximadamente 3,14159.

A impedância do capacitor é dada pela Fórmula (2):

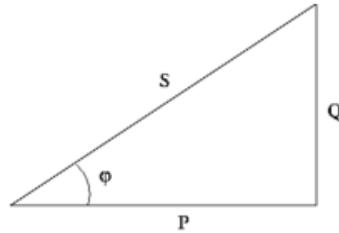
$$X_C = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot C} \quad (2)$$

Onde X_C é a reatância capacitiva, C é a capacitância, dada em *Farads*, f é a frequência em *Hertz* e π é aproximadamente 3,14159.

As cargas de uma instalação são comumente compostas por conjuntos de cargas resistivas, indutivas e capacitivas. A chamada energia reativa é parte da energia fornecida pela distribuidora. Essa não gera trabalho nem calor, sendo armazenada nas bobinas dos motores e nos capacitores, mas é devolvida para rede. O fator de potência relaciona a proporção de energia ativa e reativa em trânsito na instalação. Um valor de fator de potência 0,92 significa, simplificadamente, que 92% da energia fornecida pela distribuidora é utilizada em forma de energia ativa, e o restante compõe a parcela de energia reativa.

O chamado triângulo das potências, mostrado na Figura 4, ilustra a relação entre as potências ativa, aparente e reativa.

Figura 4 – Triângulo das potências.



Fonte: (CAPELLI, 2013).

Na Figura 4, S representa o valor da potência aparente, P a potência ativa, Q a potência reativa e φ é o ângulo de defasagem entre as potências aparente e ativa.

A potência aparente assume maior valor e corresponde à hipotenusa do triângulo-retângulo. Esta é a energia total drenada pela carga, porém a parte que realiza o trabalho denomina-se potência ativa ou potência útil.

É desejável, portanto, que a potência reativa tenha o menor valor possível. Quanto menos energia reativa, mais eficiente é o sistema. Aplicando-se o Teorema de Pitágoras, tem-se:

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad (3)$$

Pela relação trigonométrica, calcula-se a potência útil através do cosseno do ângulo de defasagem entre as potências aparente e ativa.

$$P = S \cdot \cos \varphi \quad (4)$$

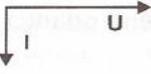
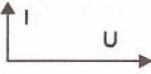
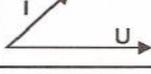
Onde $\cos \varphi$ é o que se chama de fator de potência (FP). Este pode também ser calculado a partir dos valores registrados de potência ativa (P) e potência reativa (Q) ou pelas energias ativa (EA) e energia reativa (ER) ou ainda pela razão entre as potência ativa (P) e potência aparente (S).

$$FP = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2}} = \frac{EA}{\sqrt{EA^2 + ER^2}} = \frac{P}{S} \quad (5)$$

Em um motor, a potência útil é aquela que se transforma em torque mecânico. A reativa gera os campos magnéticos e calor (perdas) nos enrolamentos, e a potência aparente é a soma da potência útil e da reativa. Segundo Capelli (2013), quanto menor a potência reativa, menor

o desperdício, ou seja, quanto maior o fator de potência, mais eficaz é o sistema. A Figura 5 mostra alguns exemplos do tipo de carga, de acordo com o fator de potência.

Figura 5 – Tipo de carga X Fator de Potência

Tipo de carga	Relação fasorial	Fase	Fator de potência	P Absorvido pela carga	Q Absorvido pela carga
Resistiva		$\varphi = 0$	$\text{COS}\varphi = 1$	$P > 0$	$Q = 0$
Indutiva		$\varphi = +90^\circ$	$\text{COS}\varphi = 0$	$P = 0$	$Q > 0$
Capacitiva		$\varphi = -90^\circ$	$\text{COS}\varphi = 0$	$P = 0$	$Q < 0$
Resistiva e Indutiva		$0 < \varphi < +90^\circ$	$1 > \text{COS}\varphi > 0$	$P > 0$	$Q > 0$
Resistiva e Capacitiva		$-90^\circ < \varphi < 0$	$0 < \text{COS}\varphi < 1$	$P > 0$	$Q < 0$

Fonte: (CAPELLI, 2013).

Baixos valores de fator de potência podem ocasionar mais problemas do que apenas desperdício na instalação. Ter baixo $\cos \varphi$ significa maior quantidade de energia reativa que circula pelas linhas de alimentação. Dessa forma, um baixo fator de potência prejudica não só a instalação, mas também a rede na qual ela está ligada. Por isso, as instalações com fator de potência menores que 0,92 estão sujeitas a multa na fatura de energia elétrica.

Lê-se em Capelli (2013) que as consequências mais significativas do baixo fator de potência são:

- a) acréscimo na conta de energia elétrica;
- b) limitação da capacidade dos transformadores;
- c) quedas e flutuação da tensão;
- d) sobrecarga nos dispositivos de manobra (chaves, contadores etc.) e consequente redução da vida útil dos mesmos;
- e) perdas na linha por efeito joule;
- f) necessidade de aumento dos condutores;
- g) necessidade de aumento dos equipamentos de proteção.

A correção do fator de potência consiste em equilibrar a quantidade de energia reativa indutiva com a energia reativa capacitiva de forma que uma neutralize a outra. A utilização de compensadores estáticos ainda é pouco utilizada devido ao custo maior, e o compensador síncrono, por ser uma máquina girante, tem como desvantagem a necessidade da manutenção periódica, sendo necessário parar o compensador, além de apresentar um custo maior que a instalação de bancos de capacitores (SILVÉRIO, 2016).

A utilização de capacitores para correção do fator de potência é uma das formas mais utilizadas na indústria, pela simplicidade e custo. No entanto, no momento da energização os capacitores tendem a manter a tensão zero e para isso a corrente passa pelo capacitor como se estivesse em curto. Essa variação de corrente num curto espaço de tempo carrega o capacitor com uma tensão elevada, que ao ser descarregada na rede pode provocar um transiente impulsivo que pode chegar a 1,3 a 1,5 Por Unidade (pu). (DUGAN, 2002).

3.2 Categorias e características típicas de fenômenos eletromagnéticos

As características dos principais fenômenos eletromagnéticos em sistemas de energia estão divididas em categorias de acordo com o espectro, duração e tensão típica, conforme o Quadro 1.

Quadro 1 – Categorias e características típicas de fenômenos eletromagnéticos em sistemas de energia elétrica

Categorias	Espectro típico	Duração típica	Tensão típica
1. Transitórios			
1.1 Impulsivos			
1.1.1 Nanossegundos	5ns ascensão	< 50ns	
1.1.2 Microssegundos	1µs ascensão	50ns – 1ms	
1.1.3 Milissegundos	0,1ms ascensão	> 1ms	
1.2 Oscilatórios			
1.2.1 Baixa Frequência	< 5 kHz	0,3 – 50ms	0 – 4 p.u.
1.2.2 Média Frequência	5 – 500 kHz	20µs	0 – 8 p.u.
1.2.3 Alta Frequência	0,5 – 5 MHz	5µs	0 – 4 p.u.
2. Variações de Tensão de Curta Duração			
2.1 Instantâneas			

2.1.1 <i>Sag</i> (Afundamento)	0,5 – 30 <i>ciclos</i>	0,1 – 0,9 p.u.
2.1.2 <i>Swell</i> (Elevação)	0,5 – 30 <i>ciclos</i>	1,1 – 1,8 p.u.
2.2 Momentâneas		
2.2.1 Interrupção	0,5 <i>ciclos</i> – 3s	< 0,1 p.u.
2.2.2 <i>Sag</i> (Afundamento)	30 <i>ciclos</i> – 3s	0,1 – 0,9 p.u.
2.2.3 <i>Swell</i> (Elevação)	30 <i>ciclos</i> – 3s	1,1 – 1,4 p.u.
2.3 Temporárias		
2.3.1 Interrupção	3s – 1 <i>min</i>	< 0,1 p.u.
2.3.2 <i>Sag</i> (Afundamento)	3s – 1 <i>min</i>	0,1 – 0,9 p.u.
2.3.3 <i>Swell</i> (Elevação)	3s – 1 <i>min</i>	1,1 – 1,2 p.u.
3. Variações de Tensão de Longa Duração		
3.1 Interrupção Sustentada	> 1 <i>min</i>	0,0 p.u.
3.2 Subtensão	> 1 <i>min</i>	0,8 – 0,9 p.u.
3.3 Sobretensão	> 1 <i>min</i>	1,1 – 1,2 p.u.
4. Desequilíbrio de Tensão	Estacionário	0,5 – 2%
5. Distorção da Forma de Onda		
5.1 <i>DC Offset</i>	Estacionário	0 – 0,1%
5.2 Harmônicas	Estacionário	0 – 20%
5.3 Inter-harmônicas	Estacionário	0 – 2%
5.4 <i>Notching</i> (Corte de Tensão)	Estacionário	
5.5 Ruído	Estacionário	0– 1%
6. Flutuação de Tensão	Intermitente	0,1 – 7%
7. Variação de Frequência	< 10s	

Fonte: Adaptado de (DUGAN, 2002).

3.2.1 Transitórios ou transientes

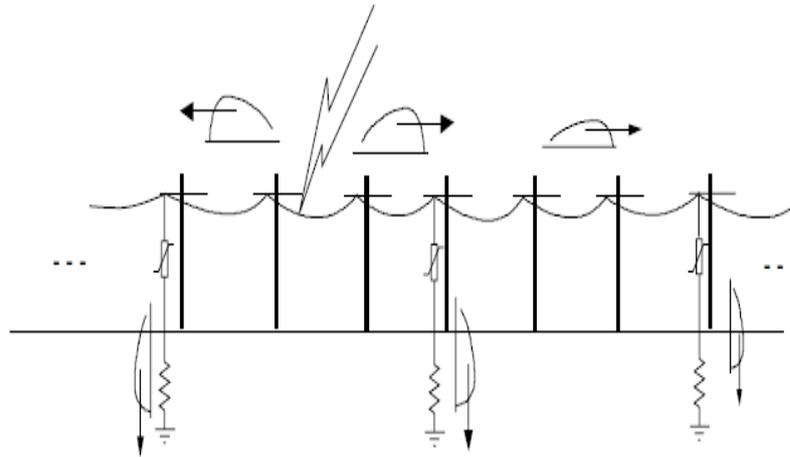
Diz-se em Dugan (2002) que muito se utiliza o termo transientes nas análises de variações do sistema de potência para indicar um evento indesejável ou a parte da mudança de uma variável que desaparece após a transição de um estado estacionário para outro.

Fenômenos transientes podem ser classificados entre impulsivos e oscilatórios. Eles podem ser originados, segundo Dugan (2002) tanto pelas empresas de energia elétrica quanto nas cargas das instalações dos consumidores.

3.2.1.1 Impulsivos

De acordo com Dugan (2002), um transiente impulsivo é uma mudança repentina, com frequência distinta daquela do sistema, unidirecional na polaridade (positiva ou negativa), na condição de regime permanente de tensão, corrente, ou ambos. Impulsivos são caracterizados por seus tempos de subida e descida e também podem ser expressos pelo seu conteúdo espectral (frequência predominante). Geralmente são causados por descargas atmosféricas e conduzidas para os circuitos de aterramento através de cabos supressores, comumente denominados para-raios, conforme ilustrado na Figura 06.

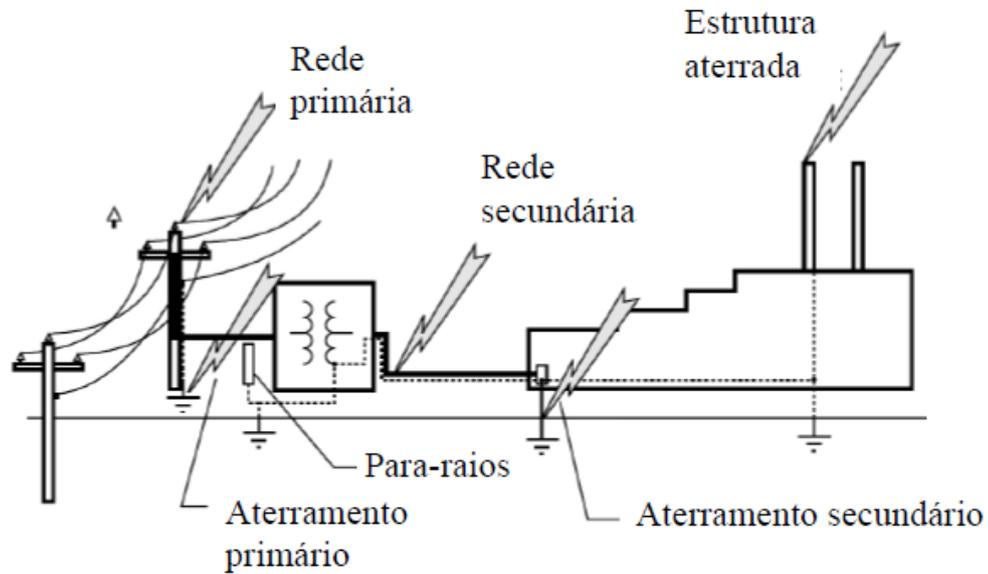
Figura 6 – Utilização de para-raios para amortecimento das correntes transitórias



Fonte: (DUGAN, 2002).

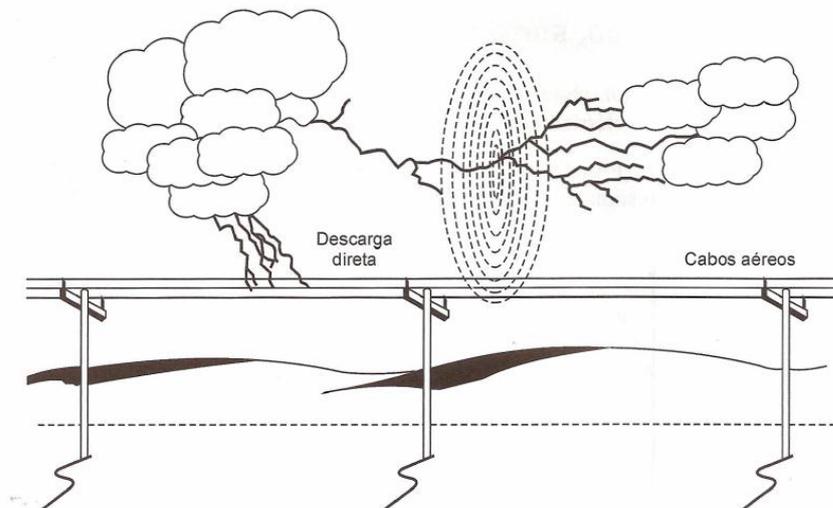
Descargas atmosféricas podem incidir na rede elétrica em diversos pontos, conforme ilustrado na Figura 7. Também podem provocar distúrbios por indução magnética de descargas a quilômetros de distância, conforme pode ser visto na Figura 8.

Figura 7 – Locais onde a descarga atmosférica pode incidir e ser conduzida até as cargas



Fonte: Adaptado de (DUGAN, 2002).

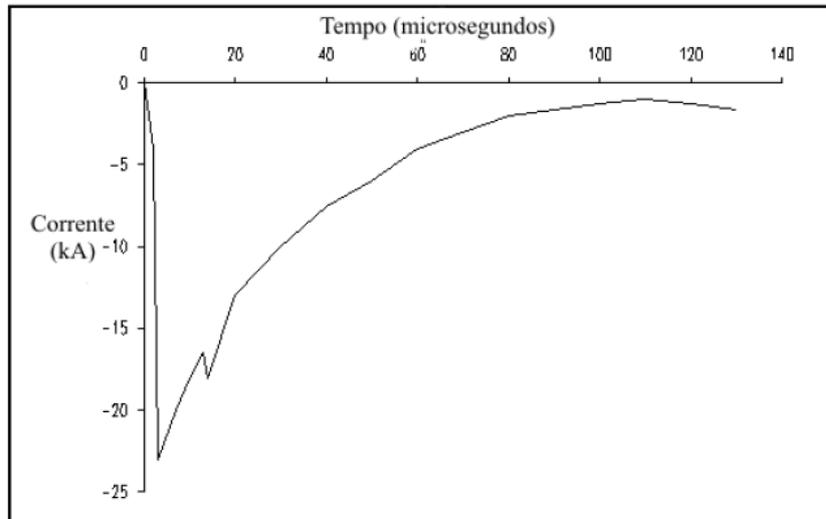
Figura 8 – Acoplamento capacitivo



Fonte: (CAPELLI, 2013).

Na Figura 9 pode-se ver um exemplo de transiente impulsivo que atinge seu valor máximo de mais de 20 kA em torno de 1,2 μ s e abaixa, em seguida, para menos da metade de seu valor máximo até os 50 μ s.

Figura 9 – Transitório impulsivo de corrente causado por descarga atmosférica.



Fonte: Adaptado de (DUGAN, 2002).

A frequência natural dos circuitos do sistema de potência pode ser excitada por transientes impulsivos e gerar transitórios oscilatórios (DUGAN, 2002,).

3.2.1.2 Oscilatórios

Segundo Dugan (2002), um transiente oscilatório é uma alteração súbita, com frequência distinta da natural do sistema, bidirecional na polaridade (positiva e negativa), na condição de regime permanente de tensão, corrente, ou ambos. São definidos em função do conteúdo espectral (frequência predominante), duração e magnitude da tensão, como baixa, média ou alta frequência, conforme o Quadro 2.

Quadro 2 - Classificação dos transitórios oscilatórios

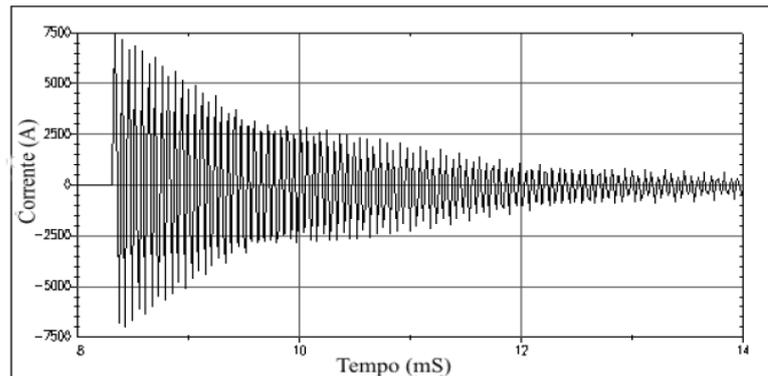
Categorias	Espectro típico	Duração típica	Tensão típica
1. Transitórios Oscilatórios			
1.2.1 Baixa Frequência	< 5 kHz	0,3 – 50ms	0 – 4 p.u.
1.2.2 Média Frequência	5 – 500 kHz	20 μ s	0 – 8 p.u.
1.2.3 Alta Frequência	0,5 – 5 MHz	5 μ s	0 – 4 p.u.

Fonte: Adaptado de (DUGAN, 2002).

Transientes oscilatórios de alta frequência geralmente resultam de uma reação do sistema a um transiente impulsivo. Em outras palavras, podem origem em descargas atmosféricas ou chaveamento de circuitos fortemente indutivos.

Transientes oscilatórios de média frequência têm origem, por exemplo, no chaveamento de capacitores “*back-to-back*”, que geram correntes transitórias de dezenas de kHz (Figura 10). Também podem ser originados pelo chaveamento de disjuntores para eliminação de faltas ou em resposta à transiente impulsivo (DUGAN, 2002).

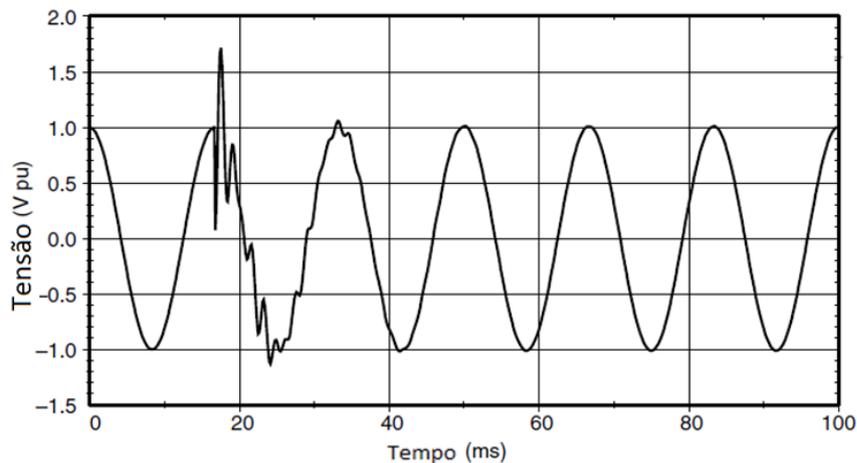
Figura 10 – Transitório provocado por chaveamento de capacitor.



Fonte: Adaptado (DUGAN, 2002).

Segundo Dugan (2002), os transientes oscilatórios de baixa frequência podem ter origem em diversos tipos de eventos, mas principalmente a energização de capacitores, conforme ilustrado pela Figura 11.

Figura 11 – Transitório de baixa frequência na energização de capacitores.



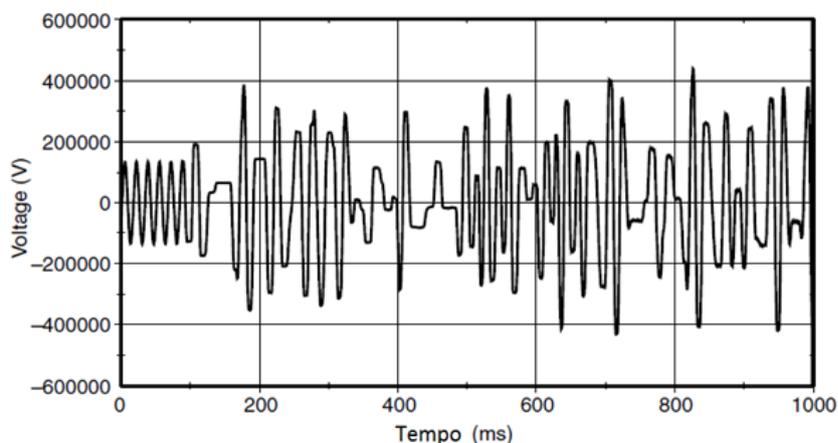
Fonte: Adaptado (DUGAN, 2002).

Lê-se em Dugan (2002) que os problemas ocasionados pelos transientes oscilatórios geralmente são disparos de controladores de ajuste de velocidade ou mau funcionamento de outros equipamentos sujeitos a controles eletrônicos.

Os transientes originados por chaveamento de capacitores no sistema elétrico são, geralmente, da ordem de 1,3 a 1,5 pu. Entretanto, a presença de capacitores do lado da carga podem ampliar a sobretensão do transiente na carga.

Transientes oscilatórios com frequências menores do que 300 Hz também podem acometer os sistemas de distribuição. Nesse caso, estarão geralmente atribuídos aos fenômenos de ferrorressonância e energização de transformadores a vazio, como ilustrado na Figura 12.

Figura 12 – Transitório provocado por ferrorressonância



Fonte: Adaptado (DUGAN, 2002).

Entre os problemas ocasionados pelos transitórios ressaltam-se a quebra da rigidez dielétrica dos materiais isolantes, provocando *flashover*, e a redução na vida útil de diversos equipamentos.

3.2.2 Variações de tensão de curta duração

Variações de tensão de curta duração (VTCD) são alterações no valor da tensão RMS, podendo ser caracterizadas, de acordo com o Quadro 1, em:

- a) Instantâneas: duração entre 0,5 e 30 ciclos
- b) Momentâneas: duração entre 30 ciclos e 3 segundos
- c) Temporárias: duração entre 3 segundos e 1 minuto

Variações de tensão são geralmente causadas por má conexão dos contatos dos cabos e energização repentina de grandes cargas ou blocos de cargas. Estes fenômenos podem provocar, na indústria, complicações em cascata, como o desligamento de cargas mais sensíveis,

paralisando a produção, com perda de materiais, geração de refugos, reparos nos equipamentos e perda de tempo no restabelecimento da produção.

No caso de falta provocada por curto circuito, pode ser observado afundamento na fase da falta, com simultâneo salto nas demais fases, seguida de uma interrupção do circuito.

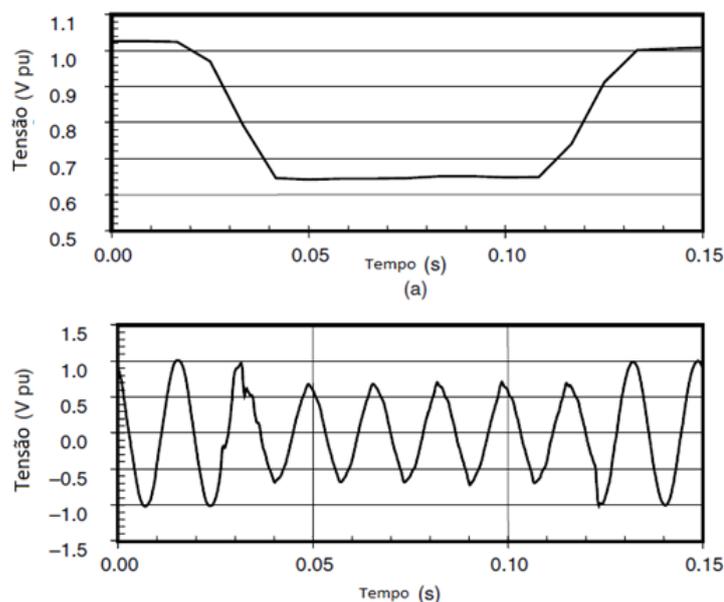
3.2.2.1 Afundamento de tensão

Segundo Dugan (2002), os afundamentos de tensão (*sag* ou *dip*) caracterizam-se pela sua amplitude, tempo de duração e frequência de ocorrência. Diante de uma falta, o número de afundamentos e suas características dependem de alguns fatores:

- a) tipo da falta: trifásica, fase-terra;
- b) sua posição relativa a outros consumidores conectados na rede: de acordo com a localização da falta, o afundamento de tensão pode afetar muitos ou poucos consumidores;
- c) impedância da falta: a amplitude do afundamento de tensão é relacionada à impedância de falta;
- d) tipo de conexão dos transformadores: influencia a tensão numa determinada carga no caso de afundamentos desequilibrados;
- e) proteção do sistema.

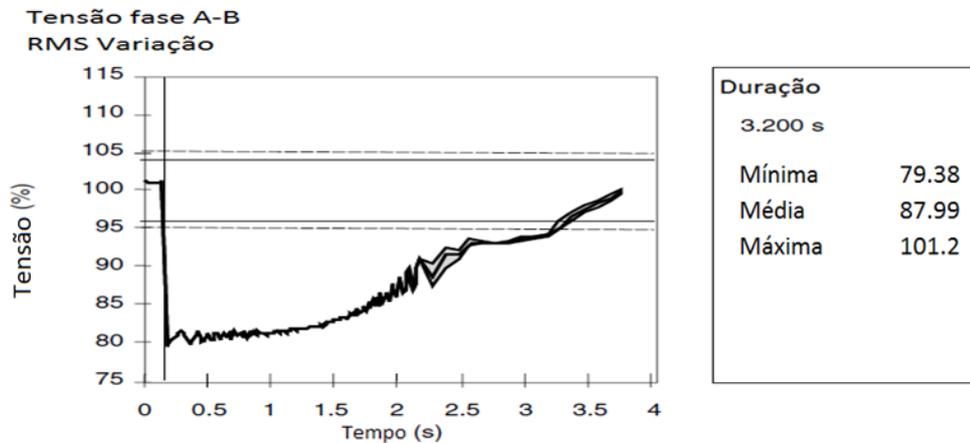
A Figura 13 ilustra um afundamento de tensão devido a uma falta simples fase-terra e a Figura 14 ilustra um afundamento de tensão devido à partida de um grande motor.

Figura 13 – Afundamento de tensão devido a uma falta fase-terra



Fonte: Adaptado (DUGAN, 2002).

Figura 14 – Afundamento de tensão devido à partida de grande motor



Fonte: Adaptado (DUGAN, 2002).

No caso de manobras na rede onde seja necessária transferência de carga entre os alimentadores, pode ser necessária a desconexão do regulador de tensão no momento da interligação dos alimentadores para fechamento do circuito em anel, antes de isolar o trecho que será trabalhado. Desta forma, pode-se interromper o fornecimento de energia ao menor número possível de clientes. Na ausência do regulador de tensão, também pode ocorrer afundamento de tensão.

A sensibilidade de um equipamento aos afundamentos de tensão depende do tipo específico de carga, configurações de controle e aplicações. Sendo assim, muitas vezes é difícil identificar quais características de um afundamento de tensão tem maior propensão a causar mau funcionamentos nos equipamentos.

As características mais investigadas nos *sags* são a duração e a amplitude do afundamento.

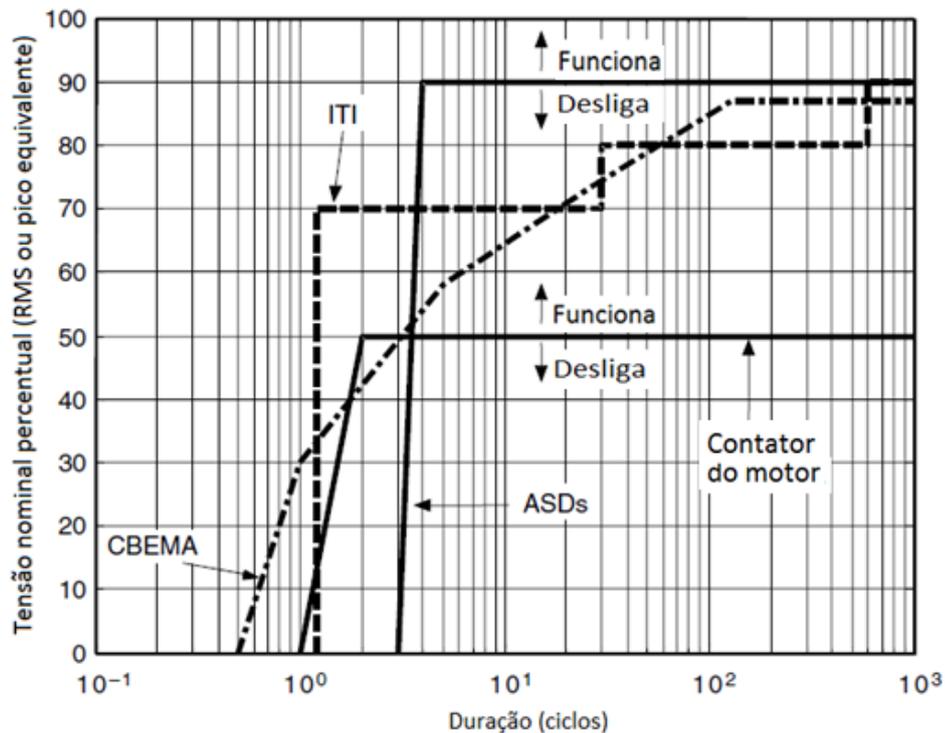
Segundo Dugan (2002), geralmente a sensibilidade do equipamento à afundamentos de tensão pode ser dividida em três categorias:

- Equipamentos sensíveis apenas à magnitude de um afundamento de tensão. Incluem-se neste grupo dispositivos como relés de subtensão, equipamentos de controle de processos, dispositivos de partida de motores e máquinas automatizadas de diversos tipos.
- Equipamentos sensíveis à magnitude e a duração de um afundamento de tensão. Este grupo inclui praticamente todos os equipamentos que usa fontes eletrônicas de alimentação.
- Equipamentos sensíveis a outras características. Há dispositivos sensíveis, por exemplo, ao desequilíbrio de fases do durante o afundamento, o ponto da curva que o afundamento é iniciado ou qualquer transiente oscilatório que ocorra durante a perturbação.

A *Computer and Business Equipment Manufacturers Association* (CBEMA), elaborou uma curva de tolerância dos equipamentos aos distúrbios, que foi posteriormente atualizada pelo *Information Technology Industry Council* (ITIC), ocasião em que foi renomeada como curva ITI, para níveis mais adequados, de acordo com as características atuais do sistema de distribuição de energia elétrica e a tolerância dos equipamentos aos distúrbios (DUGAN, 2002).

A Figura 15 representa a área de vulnerabilidade para contadores de motor, para as curvas CBEMA e ITI, indicando a possibilidade de falhas (parar) se a tensão na carga cair abaixo de 0,5 pu e para os dispositivos de ajuste de velocidade variável ASD (do inglês *Adjustable-speed drives*), se a tensão cair abaixo de 0,9 pu.

Figura 15 – Curva CEBMA/ITI para contadores e ASDs



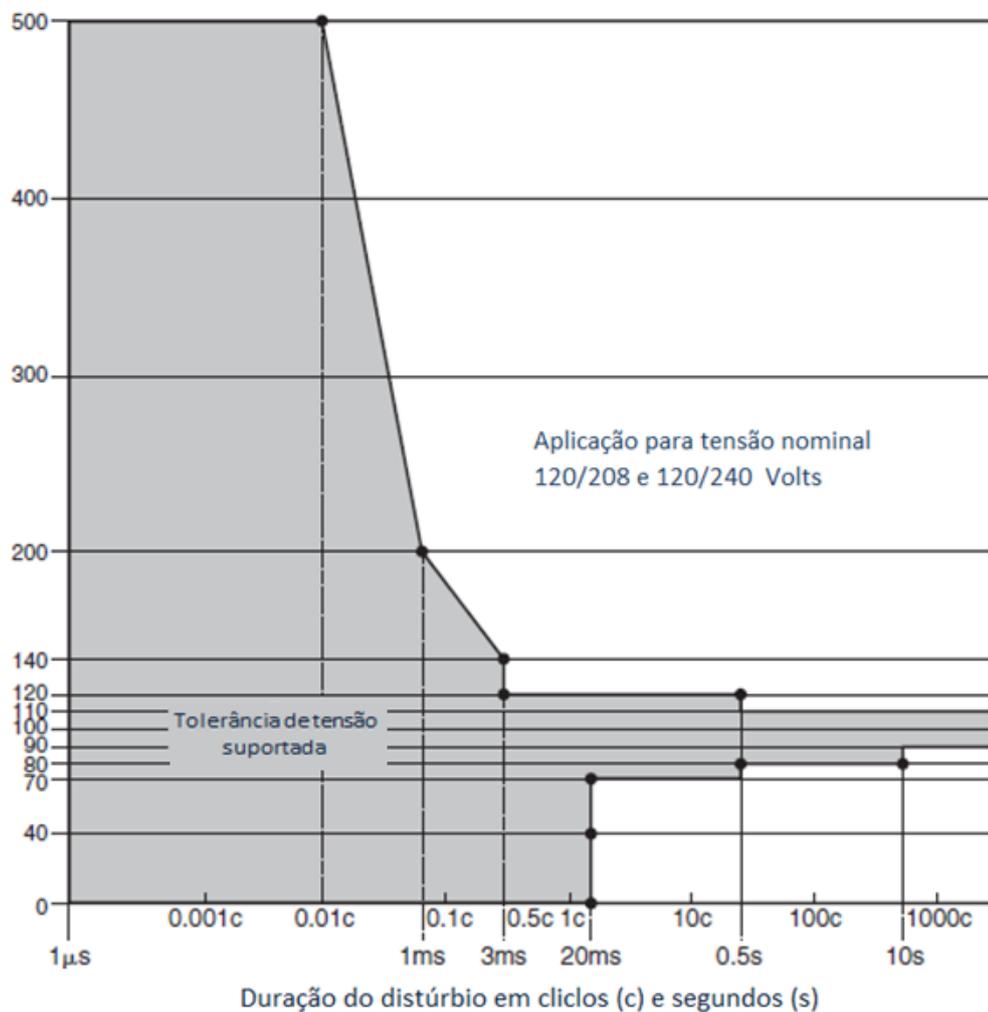
Fonte: Adaptado (DUGAN, 2002).

Entre as cargas mais vulneráveis aos afundamentos estão os equipamentos eletrônicos à base de microprocessadores (computadores), equipamentos de acionamento a velocidade variável (AVV) e os controladores lógicos programáveis (CLP).

Disfunções nos CLPs ou nos microprocessadores podem causar interrupções de parte ou de todo um processo, atuação da proteção dos AVVs e o seu desligamento, desenergização de bobinas de contadores, perda de programação nos relés auxiliares, entre outros efeitos. (DUGAN, 2002).

A Figura 16 expõe a sensibilidade com que respondem os equipamentos de informática às variações de tensão, em função da duração do distúrbio. Aplica-se aos equipamentos alimentados a 208/120 V e 120/240 V. Conforme a curva ITI, esses equipamentos podem suportar até 5 vezes a tensão nominal (5 pu), desde que o tempo seja inferior a 0.01 ciclos, mas podem apresentar falha com tensão acima de 10% da tensão nominal (1,1 pu) para tempos superiores a 0,5 s. De maneira geral, para eventos com duração inferior a 1 ms, os equipamentos toleram altos níveis de variações de tensão.

Figura 16 – Curva CEBMA/ITI para computadores



Fonte: Adaptado (DUGAN, 2002).

3.2.2.2 Salto de tensão

Define-se um salto de tensão (*Swell*) como um aumento entre 1,1 e 1,8 pu na tensão eficaz, na frequência da rede, com duração entre 0,5 ciclo a 1 minuto.

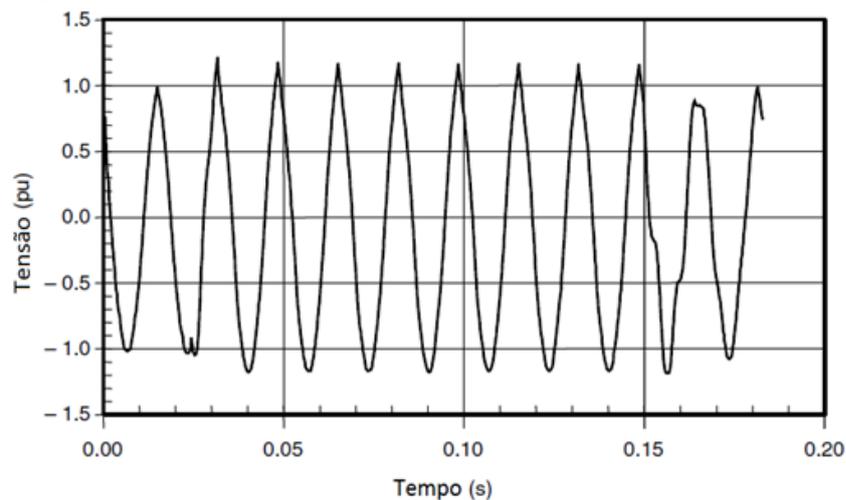
Atribuem-se os saltos de tensão a energização de bancos de capacitores e desconexões de grandes blocos de carga do sistema ou faltas em geral.

Quando da ocorrência de faltas no sistema, os saltos de tensão ocorrem na fase não envolvida na falta. Nestes casos, a severidade do salto de tensão durante a condição de falta é determinada pela localização da falta, impedância do sistema e do aterramento.

Segundo Dugan (2002), em sistema não aterrado, com impedância de sequência zero infinita, a tensão fase-neutro nas fases não aterradas podem chegar a 1,73 pu.

A Figura 17 ilustra um salto de tensão devido a uma falta simples fase-terra.

Figura 17 – Salto de tensão



Fonte: Adaptado (DUGAN, 2002).

Os saltos de tensão podem ocasionar conseqüências em equipamentos, como:

- a) falhas imediatas em dispositivos a base de microprocessador;
- b) redução na vida útil de cabos, transformadores, motores, TPs e TCs;
- c) aumento de curta duração na tensão em alguns relés pode resultar em má operação enquanto outros podem não ser afetados;
- d) Frequentemente causa danos em bancos de capacitores;
- e) para-raios do tipo “clamping” podem ser destruídos quando submetidos a um salto de tensão que excedam suas taxas de MCOV (Tensão de Operação Contínua Máxima).

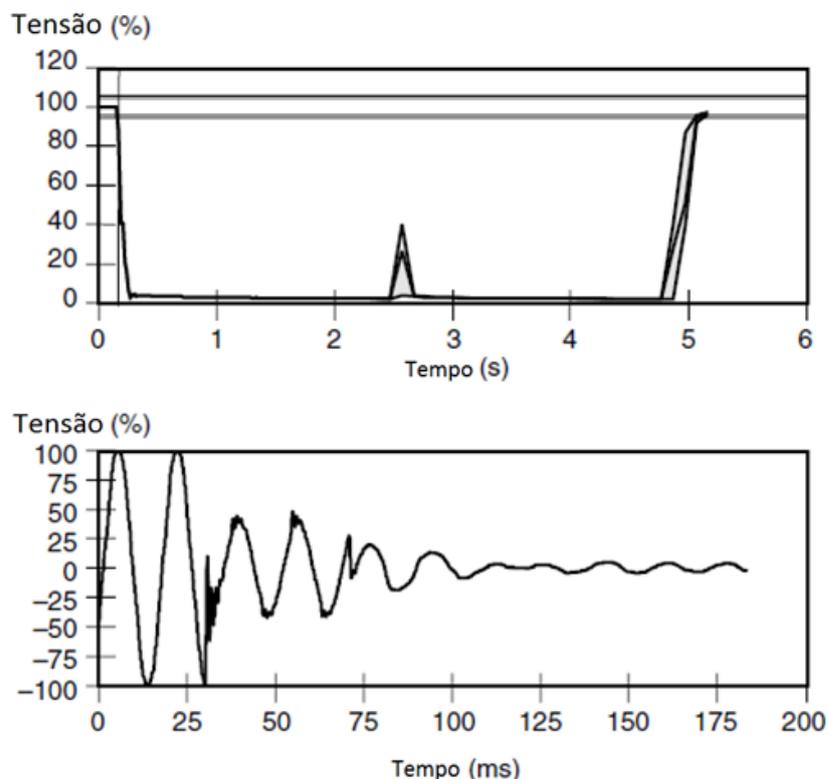
3.2.2.3. Interrupção de curta duração

Conforme o Quadro 1, uma interrupção de curta duração refere-se a situação em que a tensão de suprimento cai para um valor menor que 0,1 pu com duração entre 0,5 ciclo e 1 minuto. Pode ser causada por faltas no sistema de energia elétrica, falhas de equipamentos e mau funcionamento de sistemas de controle.

Segundo Dugan (2002), quando causadas por faltas no sistema da empresa de energia elétrica, tem seu tempo determinado pelo tempo de operação de dispositivos de proteção do sistema como religadores, que são programados para operar instantaneamente. Geralmente, esses dispositivos limitam a interrupção a tempos inferiores a 30 ciclos.

A Figura 18 representa uma interrupção de curta duração típica de falta onde o dispositivo de proteção interrompeu o fornecimento e fez a primeira religação automática no tempo de aproximadamente 2,5 segundos. Não sendo efetivo, reestabeleceu o fornecimento de energia com cerca de 5 segundos, na segunda religação.

Figura 18 – Interrupção de curta duração



Fonte: Adaptado (DUGAN, 2002).

Segundo Martinho (2009), a correção no nível do usuário final de energia envolve os chamados sistemas ininterruptos de energia. Baseiam-se em um gerador que têm o objetivo de

manter a tensão de alimentação de um equipamento ou sistema dentro de um valor especificado. São soluções caras, sendo necessário avaliar o retorno do investimento.

3.2.3 Variações de tensão de longa duração

São variações no valor RMS de tensão com duração superior a 1 minuto.

3.2.3.1 Sobretensões

Segundo Dugan (2002), as variações de longa duração estão na frequência do sistema, diferentemente de uma sobretensão transitória, que pode ser classificada pela frequência. São caracterizadas pelo aumento de tensão RMS superior a 1,1 pu com duração superior a 1 minuto.

As sobretensões geralmente são ocasionadas por:

- a) desconexão de cargas;
- b) energização de capacitores;
- c) variação de compensação de energia reativa;
- d) *taps* dos transformadores ajustados incorretamente.

A potência reativa fornecida pelos capacitores é proporcional ao quadrado da tensão, e por isso a sobretensão em bancos de capacitores pode causar:

- a) danos em dispositivos eletrônicos;
- b) comprometimento da vida útil de transformadores, cabos, disjuntores TCs TPs e máquinas rotativas, ainda que não apresentem falhas no curto prazo;
- c) falhas de operação de relés de proteção.

3.2.3.2 Subtensões

Segundo Dugan (2002), a subtensão é caracterizada pela queda na tensão RMS inferior a 0,9 pu com duração superior a 1 minuto. Normalmente, as subtensões são provocadas por:

- a) sobrecarga dos alimentadores ou equipamentos;
- b) desconexão de bancos de capacitores;
- c) baixo fator de potência.

A subtensão é função da corrente, do fator de potência e da impedância da rede. Por esse motivo, os consumidores mais distantes da subestação estão submetidos à tensão menor devido a maior impedância dos cabos e cargas ligadas ao longo do alimentador. Quanto menor o fator de potência do sistema, maiores são as perdas reativas e, por consequência, maior a queda de tensão.

Os problemas causados pela subtensão geralmente são:

- a) possível operação de equipamentos de proteção com interrupção de equipamentos eletrônicos microprocessados;
- b) aumento no tempo de partida de motores de indução;
- c) aumento da corrente no estator de motores, provocando aquecimento e redução da vida útil;
- d) redução da potência reativa produzida pelos capacitores.

3.2.3.3 Interrupções sustentadas

De acordo com Dugan (2002), as interrupções sustentadas são caracterizadas pela ausência de tensão RMS por mais de 1 minuto. Geralmente são provocadas por interrupções acidentais com atuação do sistema de proteção, como a queima de elos fusíveis e abertura de disjuntor. Também são ocasionadas por interrupções programadas destinadas a manutenção ou ampliação do sistema elétrico, conexões de novos clientes atendidos em média tensão ou ajustes nos sistemas de proteção.

No caso de interrupção provocada por falhas no sistema, o religador ou disjuntor equipado com dispositivos de religação automática pode ser religado automaticamente. Nos casos de eventos transitórios, como curtos circuitos causados por pássaros ou árvores, é eficiente, mas se a causa da falha não foi eliminada (como no caso de cabo partido no solo), o religador bloqueia após a tentativa de religação malsucedida e interrompe o fornecimento de energia, sendo necessária intervenção manual para inspeção do circuito, correção do defeito e restabelecimento. Isto pode demorar desde poucas horas até o pleno restabelecimento do sistema (SILVÉRIO, 2016).

Apesar dos problemas causados por interrupções de curta duração, o prejuízo nas empresas é maior no caso de interrupções sustentadas, devido à perda de produção e mão de obra parada, aguardando o restabelecimento do fornecimento.

Para amenizar os problemas de interrupção sustentada, geralmente são utilizados "*no breaks*" ou utilização de grupos geradores, para manter o funcionamento das cargas cuja falta de energia pode trazer elevados prejuízos. Um exemplo dessa situação ocorre no caso de fornos a indução. Em uma interrupção, o material deverá ser extraído rapidamente, evitando endurecer dentro do forno e dificultar o processo de recuperação do processo produtivo.

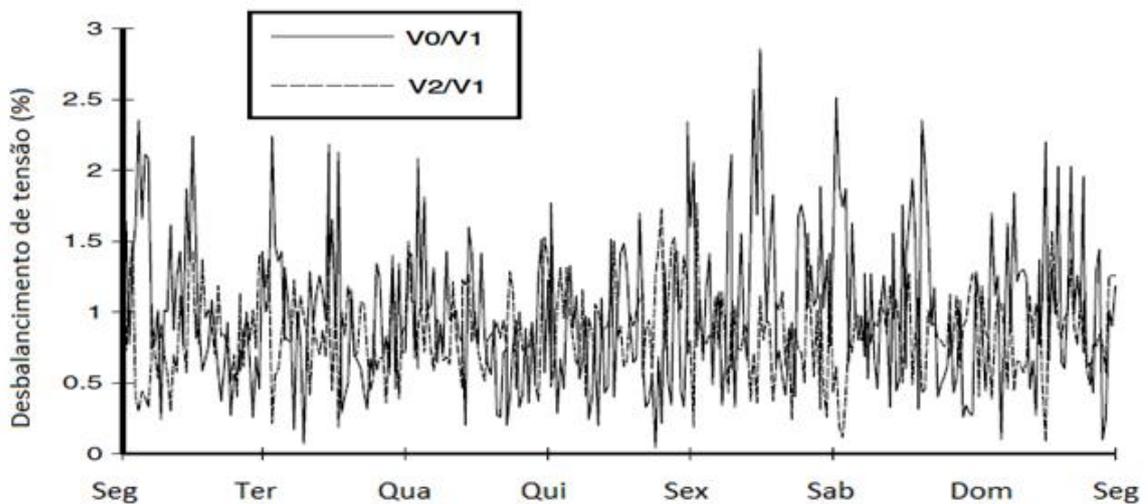
3.2.4 Desequilíbrio de tensão

Segundo Dugan (2002) o desequilíbrio de tensão pode ser definido como o desvio máximo da média das tensões trifásicas ou correntes, dividido pela média das tensões de fase ou de três correntes, expressa em porcentagem entre 0,5 a 2% em regime permanente provado principalmente pela distribuição das cartas monofásicas nos circuitos trifásicos de forma que a corrente elétrica que circula pelas fases sejam diferentes.

O desequilíbrio também pode ser definido pela razão entre os componentes de sequência negativa, ou zero, sobre o componente de sequência positiva das componentes simétricas.

A Figura 19 mostra um exemplo de desequilíbrio das componentes simétricas de um alimentador residencial no período de uma semana.

Figura 19 – Desequibrio de tensão alimentador residencial



Fonte: Adaptado (DUGAN, 2002).

3.2.5 Distorção na forma de onda

As distorções da forma de onda estão definidas, em Dugan (2002), como desvios de estado estacionário a partir de uma onda senoidal ideal de frequência de energia. São caracterizadas pelo conteúdo espectral do desvio e existem cinco tipos básicos de distorção da forma de onda:

- a) Nível de componente de Corrente Contínua (DC) em circuitos alternados (*DC offset*);
- b) Harmônicos;
- c) Inter-harmônicos;

d) Recorte (*Notching*);

e) Ruído (*Noise*).

3.2.5.1 DC offset

DC *offset* é a presença na rede de componente de corrente contínua, gerada em retificadores de meia onda. A corrente continua pode provocar saturação de transformador e a corrosão eletrolítica dos conectores de aterramento (DUGAN,2002).

3.2.5.2 Harmônicos

Harmônicos são ondas senoidais periódicas de frequência múltipla da frequência fundamental, gerados por cargas não lineares. Caracterizam-se no espectro harmônico principalmente pela magnitude de cada componente e as respectivas taxa de distorção harmônica, em relação à tensão nominal.

A Tabela 1 apresenta exemplos de ordens ímpares de harmônicos com suas frequências equivalentes, múltiplas de um sistema de 60 Hz.

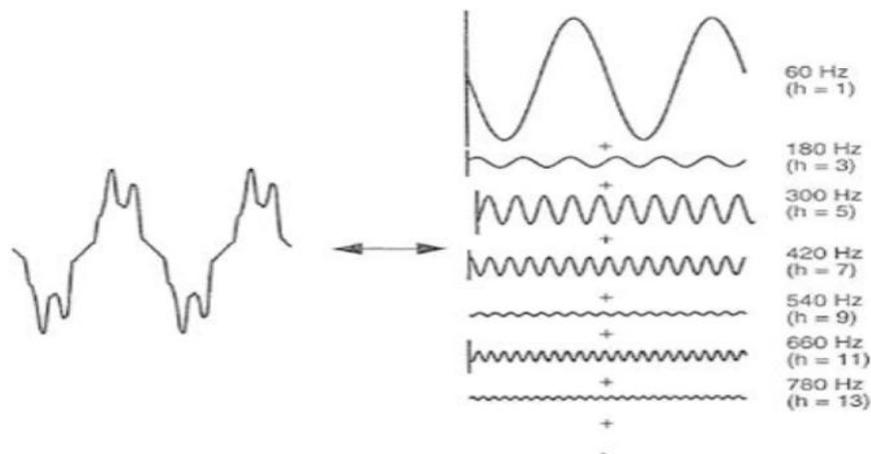
Tabela 1 – Sequência dos componentes harmônicos

Ordem	Frequência em Hz
Fundamental	60
3°	180
5°	300
7°	420
9°	540
11°	660
13°	780
15°	900

Fonte: O autor.

A distorção da forma da onda provocada pelos harmônicos pode ser representada como uma série de *Fourier* composta da somatória dos harmônicos presentes. A Figura 20 representa a distorção de onda da senoide fundamental de 60 Hz, em função da presença dos harmônicos ímpares até a 13ª ordem.

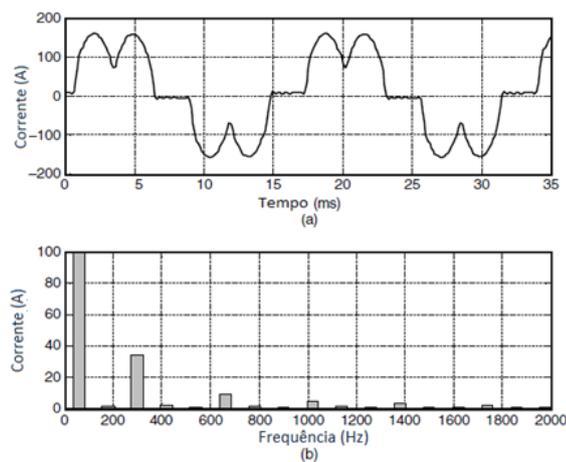
Figura 20 – Representação distorção harmônicos impares até a 13ª ordem.



Fonte: (DUGAN, 2002).

Para análise das componentes harmônicas presentes em uma determinada onda, é feito o processo inverso, ou seja, a decomposição espectral do sinal. A Figura 21 mostra o exemplo de distorção harmônica provocada por um dispositivo de ajuste variável de velocidade, utilizado na partida de um motor, em função do tempo e frequência. As distorções harmônicas são representadas como percentual da frequência fundamental. Neste caso, o harmônico de 5ª ordem (300 Hz) apresenta valores relativos mais significativos, com aproximadamente 35% da frequência fundamental. A faixa de 60 Hz é representada como 100%, uma vez que corresponde ao valor relativo sobre ela própria, a fundamental.

Figura 21 – Decomposição harmônica dispositivo de ajuste variável de velocidade.



Fonte: Adaptado (DUGAN, 2002).

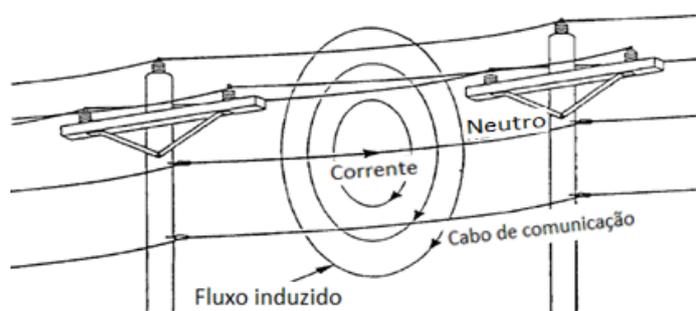
Os principais problemas causados pelas distorções harmônicas são:

a) aquecimento dos cabos;

- b) disparo de dispositivos de proteção;
- c) excitação da frequência natural provocando ressonância;
- d) interferências eletromagnéticas conduzidas pelos cabos ou irradiadas pelo ar;
- e) queda de tensão devido à redução do fator de potência;
- f) excesso de corrente de neutro;
- g) redução da vida útil dos equipamentos em geral.

A Figura 22 ilustra como as correntes harmônicas de neutro podem provocar indução magnética e interferência nos circuitos de telefone.

Figura 22 – Interferência magnética de correntes harmônicas



Fonte: Adaptado (DUGAN, 2002).

3.2.5.3 Inter-harmônicos

Inter-harmônicos são ondas periódicas com frequências não múltiplas da frequência fundamental. São produzidos, principalmente, por motores e fornos de indução, forno ou outros equipamentos que se utilizam de arco elétrico e conversores estáticos. Os inter-harmônicos podem excitar a frequência natural, com risco de ressonância no sistema, podendo provocar problemas graves nos equipamentos e no sistema elétrico em geral.

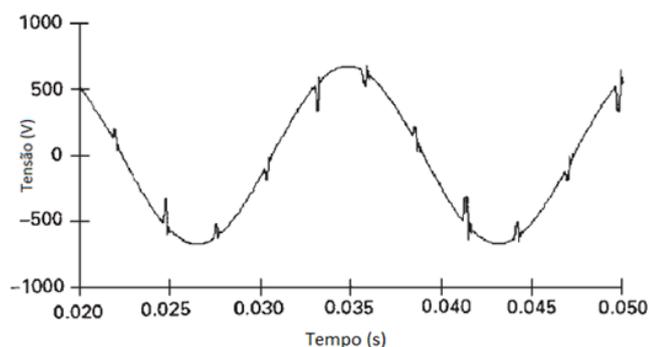
3.2.5.4 Recorte

Segundo Dugan (2002), o recorte ou *Notching* é uma perturbação periódica da tensão causada pelo típico funcionamento de dispositivos eletrônicos de energia, na ocasião da comutação da corrente de uma fase para outra.

Os componentes de frequências associadas podem ser bastante elevados e não podem ser facilmente caracterizados em equipamentos de medição normalmente utilizados para a análise de harmônicos.

A Figura 23 mostra um exemplo de conversor trifásico de corrente contínua que comuta uma fase para outra. Neste período há um curto circuito momentâneo entre duas fases, que afundam rapidamente a tensão com tendência para o zero. No caso ilustrado, as comutações ocorrem em intervalos de cerca de 3 ms.

Figura 23 – Tensão de recorte gerada por conversor DC trifásico



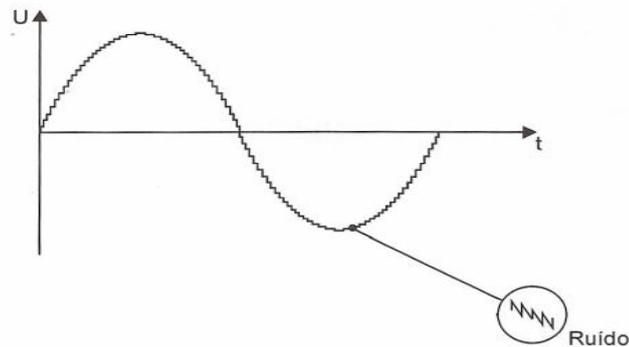
Fonte: Adaptado (DUGAN, 2002).

3.2.5.5 Ruído

Segundo Capelli (2013), o ruído, também chamado de *noise*, é definido como qualquer distorção indesejada nas ondas de tensão ou corrente, de baixa amplitude e sem frequência definida que se soma à forma da onda original. Geralmente são provocados dispositivos eletrônicos providos de retificadores e fornos a arco voltaico. Esses ruídos são amplificados em circuitos com mau aterramento e podem ser atenuados com utilização de filtros.

O ruído então consiste, simplificadamente, em qualquer distorção indevida de sinal que não seja classificado como distorção harmônica ou transiente e possam provocar perturbações no funcionamento de equipamentos eletrônicos microprocessadores. A Figura 24 ilustra um ruído em onda de tensão alternada.

Figura 24 – Ruído em onda de tensão AC

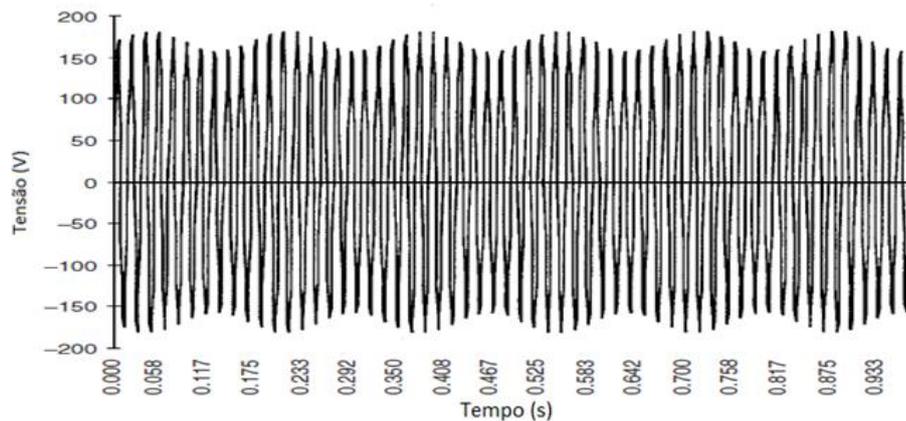


Fonte: (CAPELLI, 2013).

3.2.6 Flutuação de tensão

Flutuações de tensão são variações sistemáticas ou uma série de variações aleatórias de tensão, com diferenças menores que 10% da tensão nominal (0,9 a 1,1 pu).

A cintilação percebida na iluminação, conhecida como *flicker* é um efeito indesejado de uma flutuação de tensão. A Figura 25 mostra um exemplo de flutuação de tensão causadora de *flicker*.

Figura 25 – Flutuação da tensão característica do *flickers*

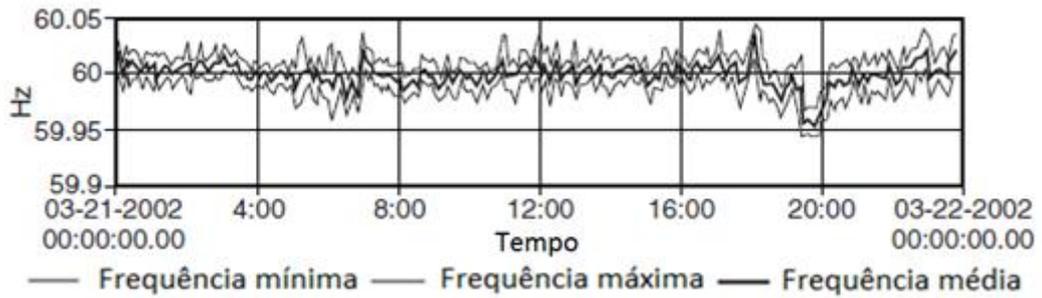
Fonte: Adaptado (DUGAN, 2002).

3.2.7 Variações na frequência

São desvios no valor da frequência fundamental do sistema supridor de energia, geralmente provocados pela perda de unidades geradoras ou acoplamento ou desacoplamento de grandes cargas no Sistema Interligado Nacional (SIN).

A Figura 26 ilustra um exemplo de variação na frequência no barramento de uma subestação de 13,8 kV durante um período de 24 horas.

Figura 26 – Variação de frequência durante 24 horas



Fonte: Adaptado de (DUGAN, 2002).

4 METODOLOGIA DA MEDIÇÃO

Conforme explicado na seção 2.3, o Módulo 8 de qualidade da energia elétrica dos Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST) define os indicadores referentes às análises do fator de potência, distorções harmônicas, variação de tensão, variação de frequência, duração e frequência de interrupções.

Neste trabalho, serão avaliados os indicadores de fator de potência, níveis de tensão e harmônicos, conforme metodologia e parâmetros definidos na revisão 7 do módulo do 8 do PRODIST, na seção 8.1 referente a qualidade do produto.

4.1 Parâmetros de medição

Expõe-se a metodologia específica para cada parâmetro analisado neste trabalho.

4.1.1 Fator de potência

Na medição serão feitas amostras consecutivas em intervalos de 10 minutos. Posteriormente, serão comparados os resultados com o valor de referência 0,92, estabelecido no Item 3.2.1 do Módulo 8 do PRODIST.

4.1.2 Níveis de tensão

Serão registradas pelo menos 1008 (mil e oito) leituras válidas, obtidas em intervalos consecutivos de 10 minutos e períodos de integralização de 12 ciclos, obedecendo o exigido no Item 2.7.1.1 do Módulo 8 do PRODIST.

A medição da tensão é feita no quadro geral de distribuição da instalação, em baixa tensão. Será feita classificação das faixas de tensão em adequada, precária ou crítica, comparando os valores medidos com os níveis de tensão de referência definidos no Quadro 3, para tensões abaixo de 1 kV.

Quadro 3 - Faixa de tensões em regime permanente para tensões nominais iguais ou inferiores a 1 kV

Tensão de Atendimento (TA)	Faixa de Variação da Tensão de Leitura (TL) em Volts
Adequada	$(202 \leq TL \leq 231) / (117 \leq TL \leq 133)$

Precária	(191 ≤ TL < 202 ou 231 < TL ≤ 233) (110 ≤ TL < 117 ou 133 < TL ≤ 135)
Crítica	(TL < 191 ou TL > 233) (TL < 110 ou TL > 135)

Fonte: (Tabela 4, Anexo 1, Módulo 8 do PRODIST, p 33).

Após a obtenção do conjunto de leituras válidas e sua classificação, caso necessário são calculados o índice de duração relativa da transgressão para tensão precária (DRP) e o índice para tensão crítica (DRC) de acordo com as seguintes fórmulas:

$$DRP = \frac{nlp}{1008} \cdot 100[\%] \quad (3)$$

$$DRC = \frac{nlc}{1008} \cdot 100[\%] \quad (4)$$

Onde nlp e nlc representam o maior valor entre as fases do número de leituras situadas nas faixas precária e crítica, respectivamente.

4.1.3 Harmônicos

O cálculo da distorção harmônica de ordem individual (DIT_h %) de ordem h, na relação percentual da tensão harmônica de ordem h (V_h) e tensão fundamental medida (V₁) é dada pela fórmula 5.

$$DIT_h \% = \frac{V_h}{V_1} \cdot 100 \quad (5)$$

Para fins do cálculo da distorção total, será considerado até a 50ª ordem harmônica, conforme o Item 4.5.2 do Módulo 8 do PRODIST que exige até pelo menos a 25ª ordem. O limite de distorção total permitido para faixas de tensão abaixo de 1kV é de 10% da tensão nominal, conforme o Item 4.6.1 do Módulo 8 do PRODIST.

Será feita ainda a comparação das medidas com os valores de referência das distorções harmônicas individuais para a faixa de tensão inferior a 1 kV expostos na Tabela 2.

Tabela 2 – Valores de referência para distorções harmônicas individuais de tensão (em percentagem da tensão fundamental V1)

Ordem Harmônica	Distorção Harmônica Individual de Tensão [%]		
	$V_h \leq 1 \text{ kV}$	$1 \text{ kv} < V_h \leq 13,8 \text{ kV}$	
Ímpares não múltiplas de 3	5	7.5	6
	7	6.5	5
	11	4.5	3.5
	13	4	3
	17	2.5	2
	19	2	1.5
	26	2	1.5
	25	2	1.5
	>25	1.5	1
Ímpares múltiplas de 3	3	6.5	5
	9	2	1.5
	15	1	0.5
	21	1	0.5
	>21	1	0.5
Pares	2	2.5	2
	4	1.5	1
	6	1	0.5
	8	1	0.5
	10	1	0.5
	12	1	0.5
	>12	1	0.5

Fonte: (Módulo 8 do PRODIST).

4.2 Configuração do Equipamento de Medição

Para a medição, será utilizado o analisador de qualidade de energia Fluke, modelo 435, mostrado na Figura 27.

Figura 27 – Analisador de qualidade de energia Fluke 435



Fonte: (SILVÉRIO, 2016).

O analisador Fluke modelo 435 vem configurado de fábrica com os parâmetros da norma americana EN50160. Sendo assim, é necessário alterar no *setup* os itens especificados no Módulo 8 do PRODIST, que serão utilizados como referência neste trabalho. Desta forma o aparelho pode registrar os chamados eventos, evidenciando, com simbologia própria, as transgressões diante dos parâmetros configurados.

O PRODIST não define valores de referência para afundamento de tensão de curta duração (*dip*), elevação de tensão (*Swell*), interrupção, mudança rápida de tensão e sinalização principal, sendo mantidos os valores default do analisador da norma EN50160.

Foram alterados os parâmetros com valores definidos no PRODIST de tensão em regime permanente conforme Figura 28, distorções harmônicas totais conforme Figura 29, variação de frequência conforme Figura 30 e desequilíbrio conforme Figura 31.

Figura 28 – Configuração de Tensão Vrms

SETUP LIMITS		FLUKE 435 U02.10	
Urms	TENSÃO	EDIT	
Nominal Voltage: 127 V ▾ 220 V ▴			
Not exceeding probability ◀ 95.0 % ▶			
Upper limit	+5.0 %	231 U	
Lower limit	-8.2 %	202 U	
Not exceeding probability 100 %			
Upper limit	+10.0 %	242 U	
Lower limit	-10.0 %	198 U	
PREV.	NEXT		OK

Fonte: (FLUKE) - Print de tela do analisador.

Figura 29 – Configuração das harmônicas

SETUP LIMITS		FLUKE 435 U02.10	
Harmonics	HARMÔNICOS	EDIT	
Reference: Fundamental Voltage			
Harmonic # ▶ THD ▶			
Not exceeding probability 95.0 %			
Upper limit	+10.0 %		
Not exceeding probability 100 %			
Upper limit	+10.0 %		
Harmonic relative setting			
	<input type="radio"/> Fundamental		
	<input checked="" type="radio"/> Unom		
PREV.	NEXT		OK

Fonte: (FLUKE) - Print de tela do analisador.

Figura 30 – Configuração de frequência

SETUP LIMITS		FLUKE 435 U02.10	
Hz	FREQUÊNCIA	EDIT	
Nominal Frequency:			
Not exceeding probability ◀ 99.5 % ▶			
Upper limit	+0.1 %	60.1 Hz	
Lower limit	-0.2 %	59.9 Hz	
Not exceeding probability 100 %			
Upper limit	+0.8 %	60.5 Hz	
Lower limit	-0.8 %	59.5 Hz	
PREV.	NEXT		OK

Fonte: (FLUKE) - Print de tela do analisador.

Figura 31 – Configuração de desequilíbrio

SETUP LIMITS		FLUKE 435 U02.10	
Unbalance	DESEQUILÍBRIO	EDIT	
Reference: Positive Sequence			
Not exceeding probability ◀ 95.0 % ▶			
Upper limit	2.0 %		
Not exceeding probability 100 %			
Upper limit	N/A		
PREV.	NEXT		OK

Fonte: (FLUKE) - Print de tela do analisador.

5 RESULTADOS

Na instalação elétrica onde são executadas as medições, é possível que algum dos parâmetros não esteja em conformidade com os valores definidos no PRODIST. A apreciação das não conformidades provê dados para se inferirem causas dos distúrbios relatados na instalação.

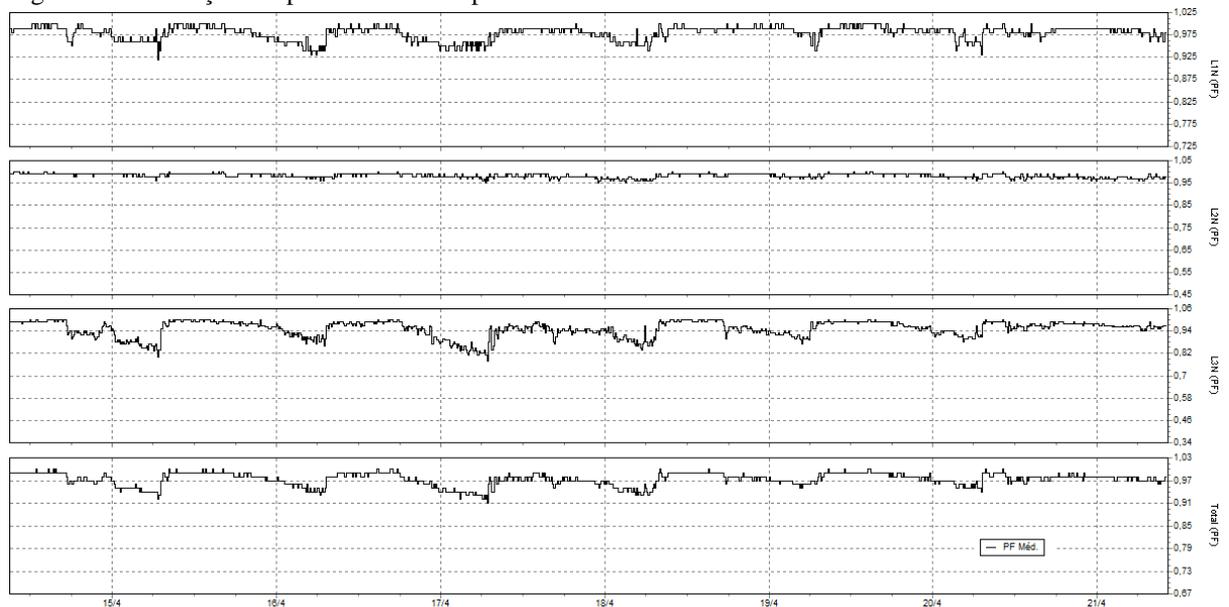
Durante as medições, não foi simulada a atuação de geradores.

Neste capítulo são apresentados os resultados encontrados para os parâmetros abordados, níveis de tensão, níveis de harmônicos, frequência e fator de potência.

5.1 Fator de Potência

A Figura 32 mostra os registros no tempo do fator de potência (FP) médio por fase e total.

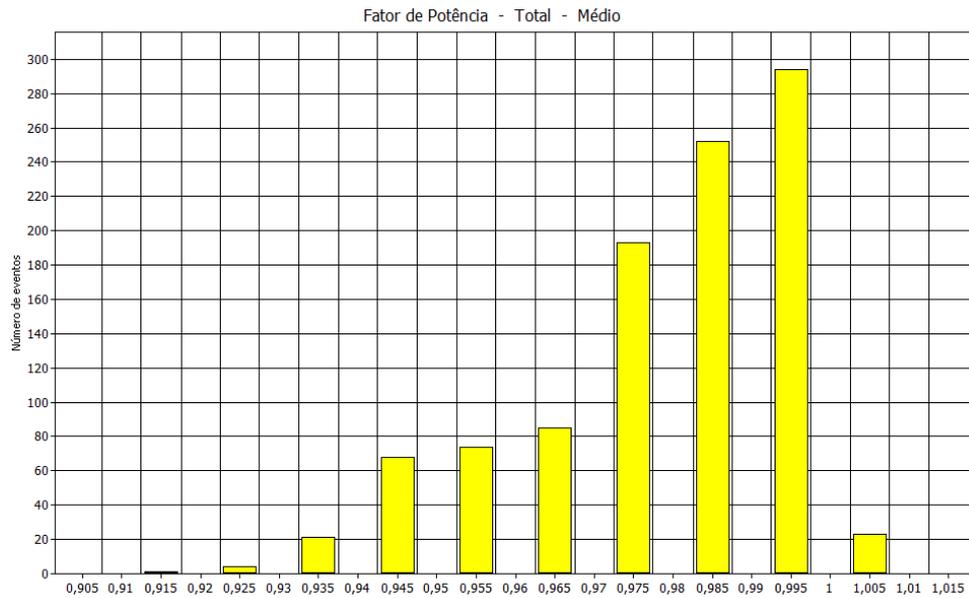
Figura 32 – Evolução temporal do fator de potência médio



Fonte: O autor, adaptado de Powerlog Versão 4.4.

Com a observação do último gráfico da Figura 32, notam-se amostras do FP total com valores próximos ou inferiores a 0,92. Para fins de esclarecimento exibe-se a Figura 33, que contém a distribuição das amostras do fator de potência total médio entre os valores medidos.

Figura 33 – Histograma do fator de potência total médio



Fonte: O autor, adaptado de Powerlog Versão 4.4.

A observação da Figura 33 permite inferir que não há problemas envolvendo fator de potência na instalação, considerando a baixa incidência de valores próximos ou abaixo de 0,92. A partir dos registros do analisador, extraiu-se a informação de que houve somente um único registro de FP com valor irregular, no dia 17/04/2016 às 7:00:27, medindo 0,91.

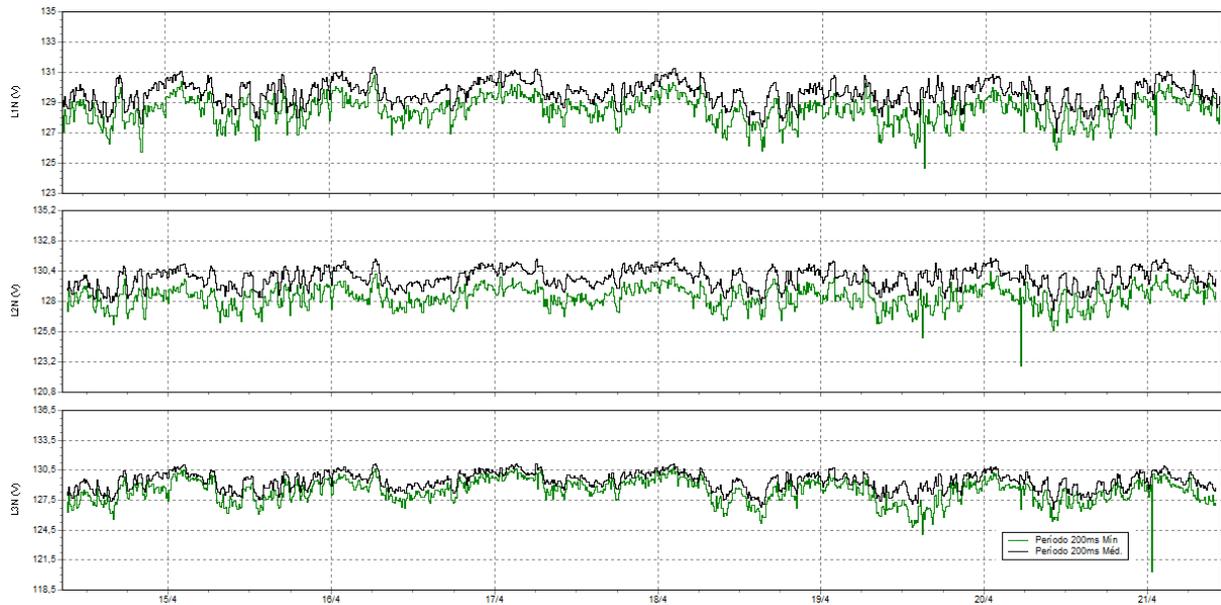
5.2 Níveis de tensão RMS

De acordo com a metodologia adotada e a correspondente configuração do analisador de qualidade de energia, a tensão RMS foi integralizada a cada 12 ciclos, ou seja, com período de 200 ms, a 60 Hertz.

O primeiro passo para a análise das leituras de tensões RMS é a seleção de 1008 amostras válidas, e em seguida classificam-se as amostras em três faixas de tensão, adequada, precária ou crítica, baseando-se no afastamento do valor da tensão de leitura (TL) em relação à tensão de referência, de acordo com o Quadro 3.

Ao manipular os registros das tensões, percebe-se que todas as 1015 amostras de tensão são válidas, e além disso situam-se na faixa adequada de tensão de atendimento, ou seja, a tensão de leitura situa-se, integralmente, na faixa entre 117 e 133 Volts, conforme pode ser visto na Figura 34.

Figura 34 – Tensões RMS médias e mínimas registradas entre fases L1, L2, L3 e o neutro



Fonte: O autor, adaptado de Powerlog versão 4.4.

Da observação da Figura 34, percebem-se dois afundamentos de tensão, que são comprovados pela Figura 35, que é uma captura de tela do instrumento, onde se visualizam eventos registrados na medição efetuada.

Figura 35 – Registro de eventos do analisador Fluke 435

EVENTOS LOGGER				
START 14/04/16 09:00:27			EVENT 4 / 8	
⊕ 169:10:39				
DATE	TIME	TYPE	LEVEL	DURATION
20/04/16	05:29:05:942	L2 DIP	105.6 U	0:00:00:041
20/04/16	05:29:05:942	L2 DIP	108.1 U	∞
20/04/16	05:29:05:983	L2 DIP	120.5 U	∞
21/04/16	00:41:36:402	L3 DIP	26.6 U	0:00:00:041
21/04/16	00:41:36:402	L3 DIP	114.0 U	∞
21/04/16	00:41:36:415	L1 DIP	109.0 U	∞
21/04/16	00:41:36:440	L1 DIP	121.1 U	∞
21/04/16	00:41:36:443	L3 DIP	125.3 U	∞
21/04/16 10:11:07		127V 60Hz 3Ø WYE		Prodíst_*
		NORMAL	METER	TREND
		DETAIL		

Fonte: O autor, captura da tela do analisador Fluke 435.

Foram registrados dois eventos com duração de 41 milissegundos. A primeira ocorrência foi em 20/04/2016 às 05:29:05, quando a tensão da fase L2 caiu de 120,5 V para 105,6 V, e a segunda ocorrência data de 21/04/2016 às 00:41:36, quando a tensão da fase L1 sofreu afundamento passando momentaneamente de 125,3 V para 26,6 V.

De acordo com o Quadro 1, esses eventos são classificados como variações de tensão de curta duração instantânea de afundamento, ou *sags*. Observa-se que apesar da ocorrência desses dois *sags*, todas as amostras de tensão (integralizadas em 200 ms) do período situam-se na faixa de tensão considerada adequada, como pode ser visto na Tabela 3, que mostra os valores limites mínimo e máximo medidos entre as fases L1, L2 e L3 e o neutro.

Tabela 3: Maiores e menores tensões registradas, em Volts

L1N min	L1N max	L2N min	L2N max	L3N min	L3N max	NG min	NG max
124,7	132,16	122,86	132,25	120,33	131,9	0,7	3,53
125,76	132,05	125,15	132,14	124,04	131,78	0,77	3,47
125,8	132,01	125,65	132,09	124,81	131,78	0,8	3,46
125,86	131,94	126	132,06	124,94	131,7	0,81	3,46
126,03	131,93	126,08	132,03	125,1	131,67	0,81	3,45
126,06	131,88	126,17	132,02	125,14	131,66	0,83	3,45
126,13	131,85	126,24	132,02	125,2	131,56	0,92	3,44
126,14	131,83	126,25	131,99	125,24	131,55	0,95	3,41
126,26	131,81	126,32	131,99	125,3	131,55	1,01	3,4
126,32	131,8	126,33	131,98	125,39	131,54	1,02	3,4

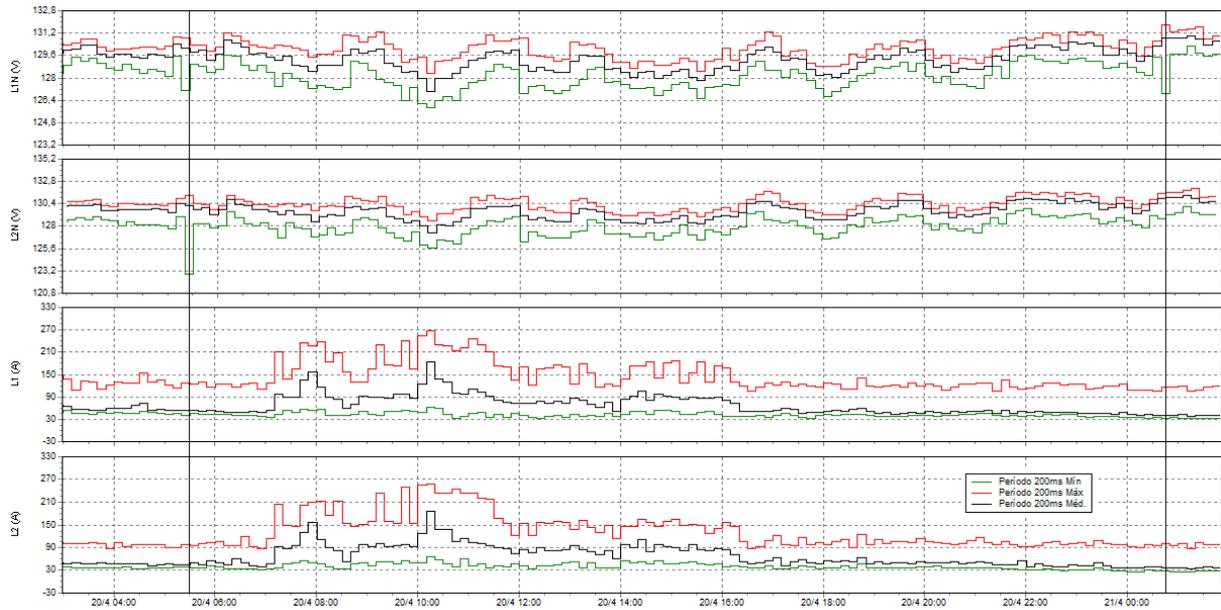
Fonte: O autor.

O módulo 8 do PRODIST não estabelece o valor limite de tensão entre o neutro e o aterramento, mas é conveniente que esta leitura seja próxima de zero. Durante o período monitorado o maior valor registrado foi de 3,53 V.

Considerando que todas as amostras de tensão entre as fases e neutro foram adequadas, o cálculo dos índices de duração relativa de transgressão para tensão precária (DPR_e) e de duração relativa de transgressão para tensão crítica equivalente (DRC_e) não são necessários, visto que de acordo com as Fórmulas 3 e 4 seus valores serão nulos.

Nota-se, a partir da análise da Figura 36, que não houve aumento de corrente simultaneamente aos afundamentos relatados. Isto sugere que os distúrbios não têm origem em curto-circuito interno, nem se relacionam com a conexão de grandes blocos de carga na instalação do hospital. Além disso, sabe-se que durante os horários dos *sags* registrados, por volta de 0:40 e 5:30, não há funcionamento das clínicas. Infere-se, portanto, que esses afundamentos têm origem em perturbações transitórias na rede de transmissão ou distribuição da Cemig.

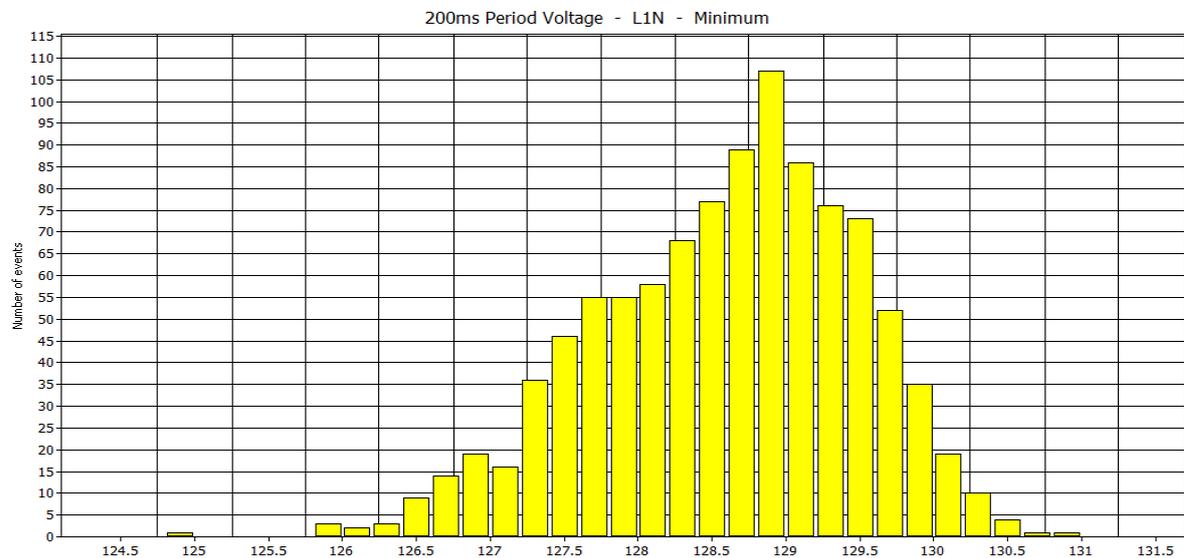
Figura 36 – Análise de tensões e correntes RMS nas fases L1 e L2 durante afundamentos



Fonte: O autor, adaptado de Powerlog versão 4.4.

As Figuras 37 a 42, geradas pela ferramenta estatística do *software* do analisador, mostram a distribuição das amostras das tensões mínimas e máximas, entre cada fase e neutro.

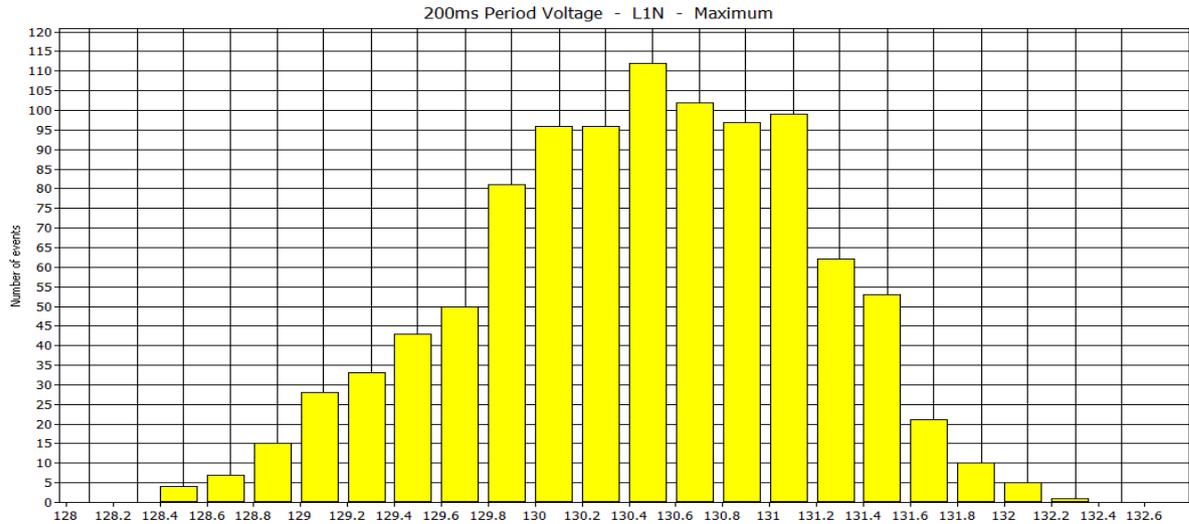
Figura 37 – Histograma de tensão RMS mínima entre a fase L1 e neutro



Fonte: O autor, adaptado de Powerlog Versão 4.4.

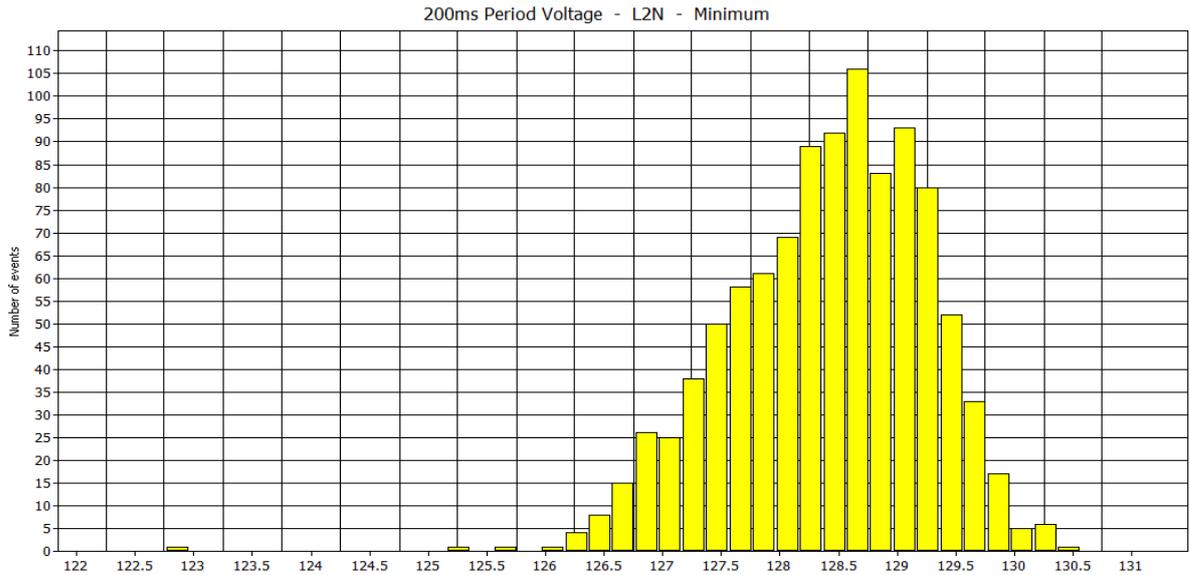
Confirma-se pela Figura 37 que os valores mínimos de tensão da fase L1 atendem à regulamentação do PRODIST, inclusive a menor amostra, que mediu 124,7 V.

Figura 38 – Histograma de tensão RMS máxima entre a fase L1 e neutro



Fonte: O autor, adaptado de Powerlog Versão 4.4.

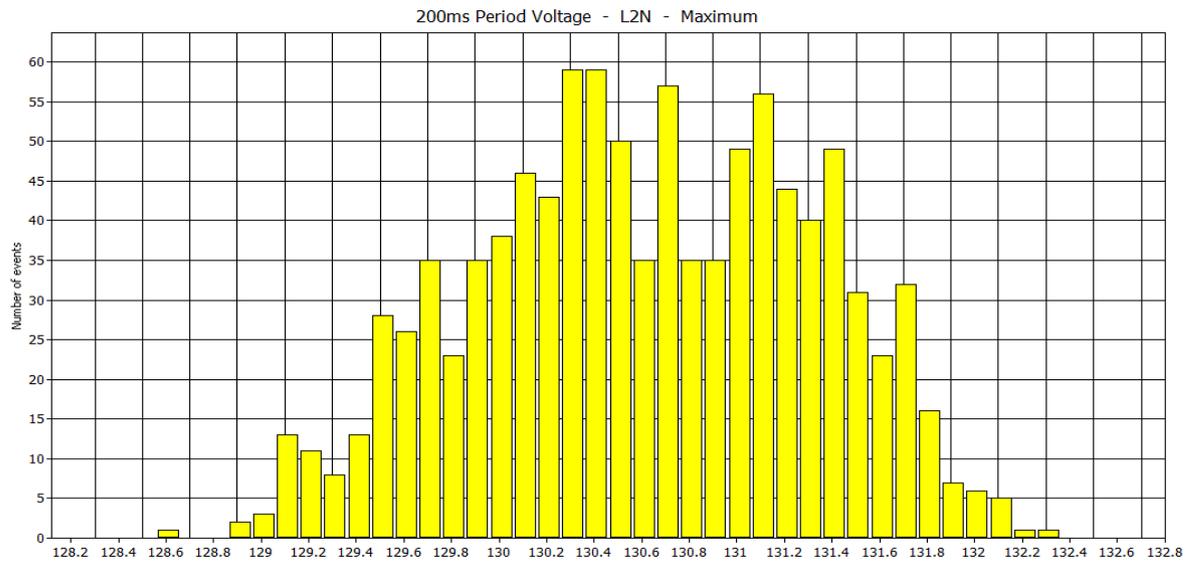
Figura 39 – Histograma de tensão RMS mínima entre a fase L2 e neutro



Fonte: O autor, adaptado de Powerlog Versão 4.4.

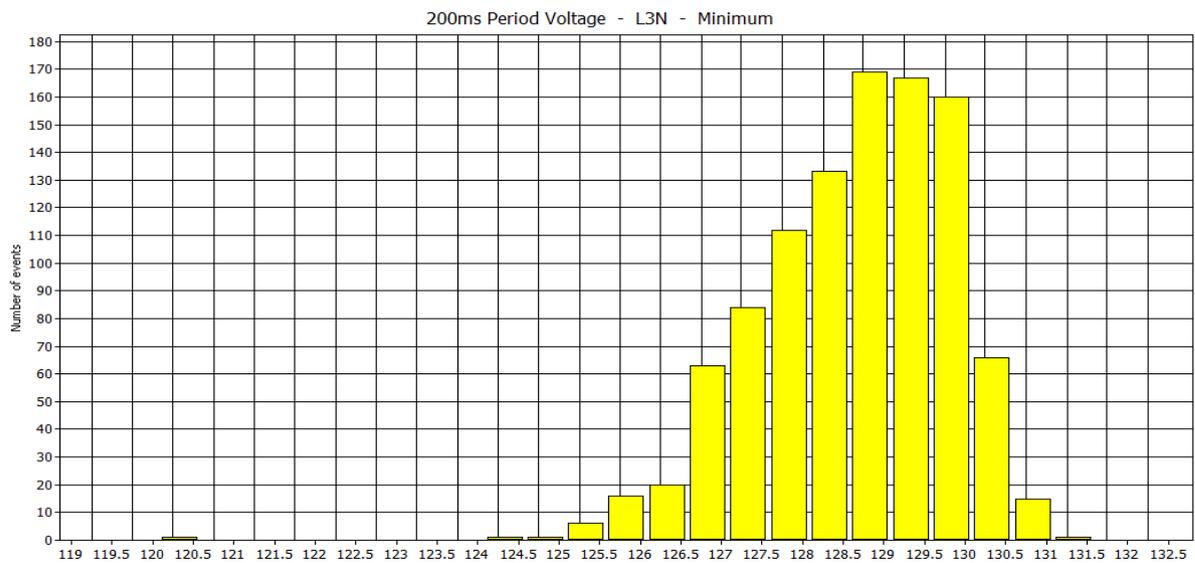
Na Figura 39 nota-se, isolada à esquerda da distribuição padrão, a amostra afetada pelo afundamento de tensão da fase L2 registrado no dia 20/04/2016, que mediu 122,86 V na integralização de 200 ms, com valor mínimo de 105,6 V de acordo com o exposto na Figura 35.

Figura 40 – Histograma de tensão RMS máxima entre a fase L2 e neutro



Fonte: O autor, adaptado de Powerlog Versão 4.4.

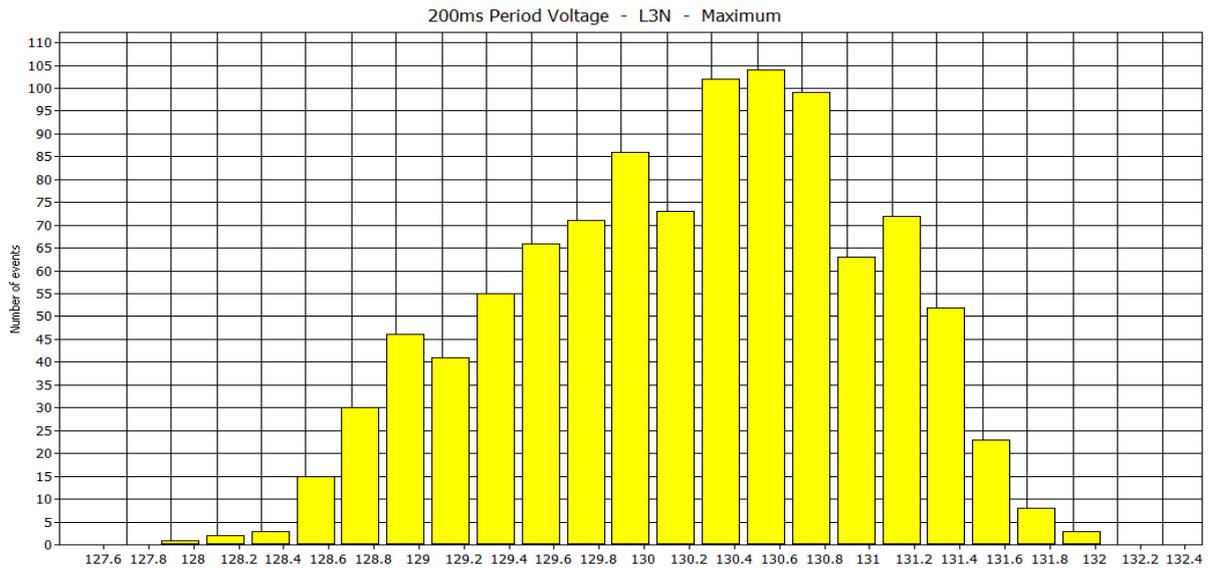
Figura 41 – Histograma de tensão RMS mínima entre a fase L3 e neutro



Fonte: O autor, adaptado de Powerlog Versão 4.4.

A Figura 41 permite a observação da amostra sensibilizada pelo afundamento de tensão da fase L3, ocorrida no dia 21/04/2016 e com valor mínimo registrado de 26,6 V, conforme exposto na Figura 35. Mesmo com este valor mínimo, após a integralização de 12 ciclos o valor da amostra mediu 120,33 V, encontrando-se deslocado à esquerda da distribuição normal.

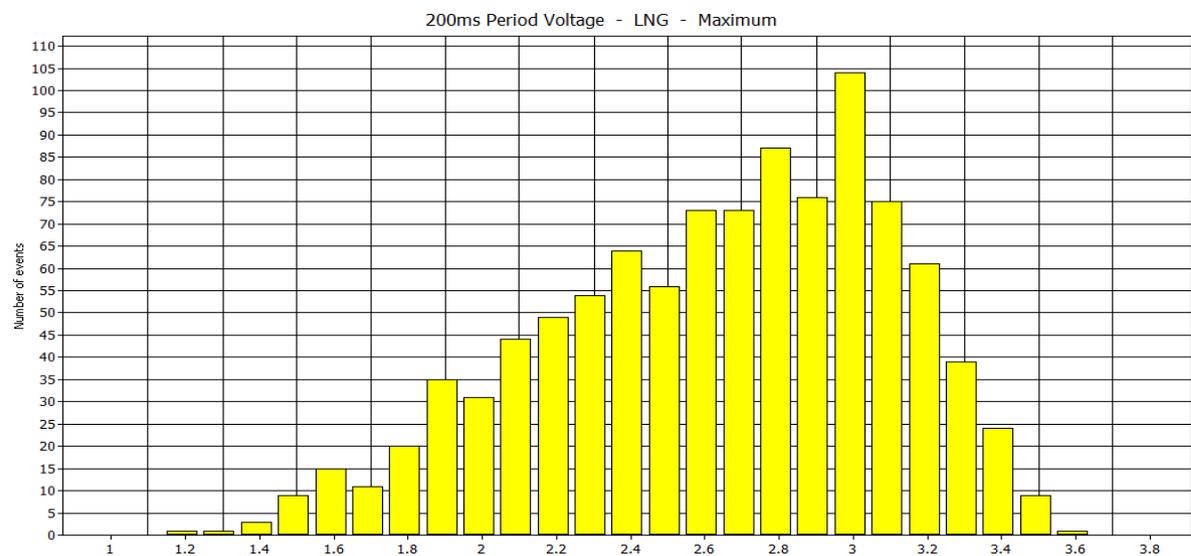
Figura 42 – Histograma de tensão RMS máxima entre a fase L3 e neutro



Fonte: O autor, adaptado de Powerlog Versão 4.4.

Finalmente, a Figura 43 mostra os máximos valores registrados para as amostras de tensão RMS entre o neutro e o aterramento.

Figura 43 – Histograma de tensão RMS máxima entre o neutro e o aterramento



Fonte: O autor, adaptado de Powerlog Versão 4.4.

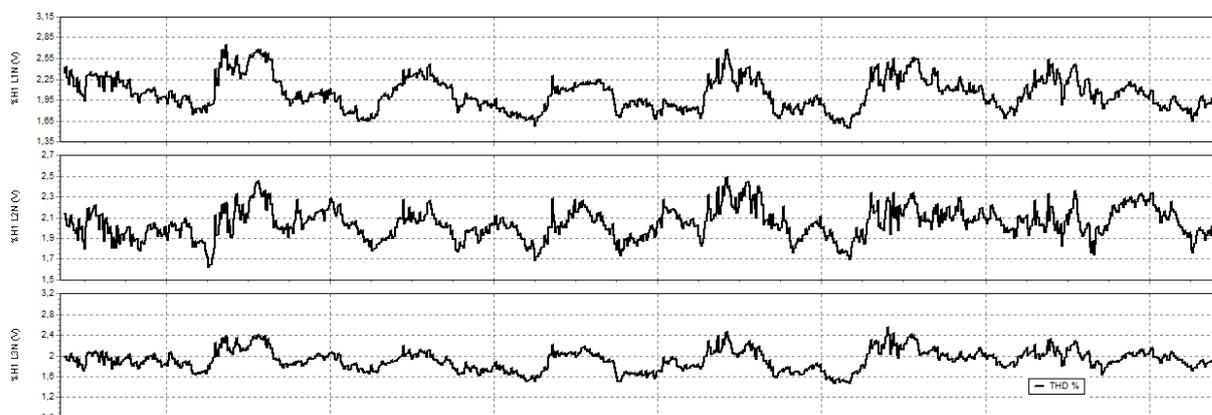
Como são desejáveis valores próximos ao zero para as tensões entre neutro e o aterramento, pode ser recomendável uma medição do aterramento da instalação.

5.3 Harmônicos

O item 4.5.2 da seção 8.1 do PRODIST exige que se considere na análise uma faixa de frequências que compreenda desde a componente fundamental até, pelo menos, a 25º ordem harmônica. Analisam-se nesta seção as harmônicas até a 50º ordem, em intervalos de amostragem de 10 minutos, com 1015 leituras.

A Figura 44 apresenta a evolução temporal das distorções harmônicas totais de tensão (DTT%), de onde se observa que todas as amostras estão em conformidade com o limite de 10% estabelecido no Item 4.6.1 da seção 8.1 do PRODIST, para faixas de tensão inferiores a 1 kV.

Figura 44 – Porcentagem de distorções harmônicas totais de tensão



Fonte: O autor, adaptado de Powerlog versão 4.4.

Nota-se periodicidade diária no perfil da distorção harmônica total, com valores mínimos observados por volta das 6 e 18 horas e máximos situados ao meio dia de cada dia. Esse perfil de distorções harmônicas coincide com a evolução temporal das potências registradas no *log* do analisador.

A Tabela 4 expõe as distorções harmônicas individuais de tensão (DITH%), adquiridos conforme a Fórmula 5, até a 25º ordem harmônica, juntamente com os valores de referência para cada ordem.

Tabela 4: Maiores distorções harmônicas individuais de tensão percentuais registradas por fase e respectivos valores máximos de referência.

Ordem Harmônica	Valores medidos de Vh em % de Vi			Maior valor	Valor de referência
	Fases L1	L2	L3		
2	0,21	0,19	0,19	0,21	2,5
3	1,1	1,3	0,97	1,3	6,5
4	0,16	0,14	0,16	0,16	1,5
5	2,32	2,13	2,22	2,32	7,5
6	0,16	0,16	0,15	0,16	1
7	1,35	1,41	1,34	1,41	6,5
8	0,13	0,11	0,11	0,13	1
9	0,63	0,51	0,51	0,63	2
10	0,15	0,13	0,15	0,15	1
11	0,59	0,53	0,53	0,59	4,5
12	0,18	0,15	0,18	0,18	1
13	0,37	0,33	0,33	0,37	4
14	0,11	0,09	0,11	0,11	1
15	0,37	0,44	0,41	0,44	1
16	0,1	0,08	0,09	0,1	1
17	0,29	0,21	0,2	0,29	2,5
18	0,09	0,07	0,09	0,09	1
19	0,14	0,22	0,14	0,22	2
20	0,08	0,06	0,08	0,08	1
21	0,15	0,15	0,19	0,19	1
22	0,09	0,06	0,09	0,09	1
23	0,15	0,1	0,15	0,15	2
24	0,09	0,07	0,08	0,09	1
25	0,13	0,16	0,12	0,16	2

Fonte: O autor.

Constata-se que os valores percentuais de tensão harmônica individual, dados pelo índice DITH%, encontram-se todos em conformidade com os valores limites referenciados na Tabela 2 para todas as ordens harmônicas.

Na Tabela 5, foram ordenados os registros dos 15 maiores valores relativos de DITH%, em relação ao valor limite de referência para cada ordem.

Tabela 5: Maiores valores de distorção harmônica individual em relação ao limite

Ordem	DITh%	Limite de referência	% do limite
15	0,44	1	44,0
9	0,63	2	31,5
5	2,32	7,5	30,9
7	1,41	6,5	21,7
3	1,3	6,5	20,0
21	0,19	1	19,0
12	0,18	1	18,0
6	0,16	1	16,0
10	0,15	1	15,0
11	0,59	4,5	13,1
8	0,13	1	13,0
28	0,13	1	13,0
17	0,29	2,5	11,6
14	0,11	1	11,0
19	0,22	2	11,0

Fonte: O autor.

Constata-se que o mais alto nível de distorção harmônica registrado é de 15° ordem, representando 44% do valor limite referenciado para esta ordem harmônica. Os outros maiores níveis estão de acordo com o esperado, coincidindo as maiores intensidades de distorção com as ordens cujos limites são relativamente altos, segundo a Tabela 2.

Observa-se que todos os níveis de distorções harmônicas, totais e individuais, estão muito abaixo dos valores limites de referência, e portanto em conformidade com a regulamentação do módulo 8 do PRODIST.

6 CONCLUSÃO

O registro das medições foi efetuado com sucesso pelo analisador de qualidade de energia Fluke. A análise desse registro foi objetiva, com confrontamento do mesmo com os valores de referência apresentados no Capítulo 4 e embasados na regulamentação vigente.

Durante o período analisado, o fator de potência da instalação se mostrou equilibrado, apresentando valores acima de 0,92.

Todas as amostras de tensão registradas durante a medição estão em conformidade com a faixa adequada de fornecimento, conforme valores da ANEEL utilizados como referência e expostos no Quadro 3.

Foram registrados dois afundamentos de tensão de curta duração, ocorridos durante a noite. Não foi observada elevação de corrente simultânea a esses afundamentos de tensão, que sugerissem curto-circuito ou conexão de grandes blocos de cargas internas do hospital. Atribuem-se estes eventos a perturbações transitórias da rede de distribuição ou transmissão.

A concessionária de energia Cemig foi consultada por meio de um agente especializado, que comunicou que é grande a probabilidade dos afundamentos terem sido originados na rede de distribuição ou transmissão, ocasionadas por motivos como:

- a) transferências de cargas de alimentadores para fins de execução de obras;
- b) manobras de manutenção de equipamentos na subestação;
- c) ampliação ou reforma da rede de distribuição;
- d) atuação de dispositivos de proteção como religadores automáticos, que são eventos inerentes a operação do sistema elétrico da distribuidora.

Foi registrada tensão de 3,53V entre o neutro e o aterramento. Apesar de ser um fenômeno frequentemente visualizado nas instalações, recomenda-se fazer a medição do aterramento, tendo em vista uma instalação elétrica de qualidade.

Foram coletadas amostras da distorção harmônicas de tensão até a 50ª ordem, não tendo sido observadas anormalidades que precisem de investigação mais detalhada.

Foi verificado, ainda, através do *software* Powerlog, que não houve distúrbios de frequência ou desbalanceamentos de corrente.

Após a análise dos resultados, conclui-se que não houve parâmetros inadequados de QEE na instalação durante o período monitorado. Desta forma, atesta-se a qualidade da energia fornecida pela Cemig nos padrões estabelecidos pela ANEEL por meio do módulo 8 do PRODIST, revisão 7.

REFERÊNCIAS

- ABREU, J.P, et al. **Reflexões Sobre Qualidade de Energia**, I SBQEE - Seminário Brasileiro da Qualidade da Energia Elétrica, v.1, p.1-5, 1996.
- ABREU, J.P, et al. **Impacto das Voltage Sags Sobre Equipamentos Eletrônicos**, II SBQEE – Seminário Brasileiro de Qualidade da Energia Elétrica, 1997.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). **Acesso à Informação**. Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/area.cfm?id_area=2>. Acesso em: 25 out. 2016.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). **Indicadores de Conformidade do Nível de Tensão em Regime Permanente**. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/Indicadores_de_conformidade_nivel_tensao/>. Acesso em: 30 out. 2016.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). **Legislação**. Disponível em: <<http://www3.ANEEL.gov.br/legibiblio.htm>>. Acesso em: 25 fev. 2016.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). **Módulo 8 – Qualidade da Energia Elétrica - Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST. Revisão 7. Disponível em:** <http://www2.aneel.gov.br/arquivos/PDF/M%C3%B3dulo8_Revis%C3%A3o_7.pdf>. Acesso em: 4 out. 2016.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). **Resolução Normativa nº 414 DE 9 de Setembro de 2010**. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/documents/656877/14486448/bren2010414.pdf/3bd33297-26f9-ddf-94c3-f01d76d6f14a?version=1.0>>. Acesso em: 25 out. 2016.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). **Resolução Normativa nº 547, de 16 de abril de 2013**, disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2013547.pdf> >. Acesso em: 1 nov. 2016.
- CALDAS, G. P. **Concessões de Serviços Públicos de Energia Elétrica face à Constituição Federal de 1988 e o Interesse Público**. 2ª ed. Curitiba: Juruá, 2006. 276 p.
- CÂMARA DE COMERCIALIZAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA (CCEE). **Legislação**. Disponível em: <<http://www.ccee.org.br>>. Acesso em: 11 set. 2015.
- CAPELLI, A. **Energia Elétrica: Qualidade E Eficiência Para Aplicações Industriais**. São Paulo: Erica, 2013. 272 p.
- CHIA, I.M. **Interface de Gestão Ativa de Consumo de Energia Elétrica para Smart Grids**. 2011. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Federal do Paraná, 2011.
- DUGAN, R. C, et al. **Electrical Power Systems Quality**. 2. ed. [S.l.]: McGrawHill *Professional*, 2002. 521 p.

FERREIRA, D. D. **Análise de Distúrbios Elétricos em Sistema de Potência**. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2010.

FLUKE, **Manual do Usuário**: Analisadores de Qualidade de Potência e Energia Trifásicos modelo 435. Janeiro de 2012, rev.1, 2012.

MARTINHO, E. **Distúrbios da Energia Elétrica**. 2. ed. São Paulo: Erica. 2009. 144 p.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA (MME), **Portaria nº 44, de 10 de março 2015**. Disponível em: < <http://www2.aneel.gov.br/cedoc/prt2015044mme.pdf> >. Acesso em: 20 out. 2015.

OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO (ONS), **Energias Armazenadas**. Disponível em: < http://www.ons.org.br/historico/energia_armazenada.aspx >. Acesso em: 25 out. 2016.

PRESIDÊNCIA DA REPÚBLICA. **Legislação**. Disponível em: <<http://www.planalto.gov.br>>. Acesso em: 11 set. 2016.

SILVÉRIO, L. A. S. **Análise da Qualidade de Energia Elétrica no Unis MG**. Trabalho de Conclusão de Curso. Centro Universitário do Sul de Minas Gerais, 2016.