

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

LUCAS AVILA NETO SUED

**ANÁLISE DA QUALIDADE DE ENERGIA EM UMA
UNIDADE INDUSTRIAL**

Porto Alegre

2017

LUCAS AVILA NETO SUED

ANÁLISE DA QUALIDADE DE ENERGIA EM UMA UNIDADE INDUSTRIAL

Projeto de Diplomação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, apresentado ao Departamento de Engenharia Elétrica para adquirir o título de Engenheiro Eletricista.

ORIENTADOR: Prof. Roberto Chouhy Leborgne

Porto Alegre

2017

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

Reitor: Rui Vicente Oppermann

Vice-Reitor: Jane Fraga Tutikian

ESCOLA DE ENGENHARIA

Diretor: Luis Carlos Pinto da Silva Filho

Vice-Diretora: Carla Schwengberten Caten

Ficha Catalográfica

S944a Sued, Lucas Avila Neto
Análise da qualidade de energia em uma unidade industrial / Lucas Avila Neto Sued. – 2017.
54 f. : il. color.
Trabalho de conclusão (especialização) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Porto Alegre, BR-RS, 2017.
Orientador: Roberto Chouhy Leborgne.

1. Energia elétrica. 2. Qualidade. I. Leborgne, Roberto Chouhy, orient.
II. Título.

CDU: 621.31(043)

LUCAS AVILA NETO SUED

ANÁLISE DA QUALIDADE DE ENERGIA EM UMA UNIDADE INDUSTRIAL

Este projeto de diplomação foi julgado adequado para fazer jus aos créditos da Disciplina de “Projeto de Diplomação”, do Departamento de Engenharia Elétrica e aprovado em sua forma final pelo Orientador e pela Banca Examinadora.

Orientador: _____

Prof. Dr. Roberto Chouhy Leborgne, UFRGS

Doutor pela Chalmers University of Technology – Göteborg, Suécia.

Aprovado em: ____/____/____

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. Roberto Chouhy Leborgne, UFRGS (Doutor) - Chalmers University of Technology
– Göteborg, Suécia _____

Eng. Roger Alves de Oliveira (Mestrando) – UFRGS _____

Prof. Dr. Gladis Bordin (Doutora) – UFSC _____

Dedico este trabalho aos meus pais, professores e em especial para a Thays, pelo apoio incondicional durante toda a graduação.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a meus pais pelo apoio incondicional em todos os momentos.

Agradeço ao professor Dr. Roberto Chouhy Leborgne pela orientação neste presente trabalho e pelas conversas diversas durante o curso.

Agradeço a todos os amigos e colegas que me apoiaram durante este período.

Agradeço principalmente a Thays com quem divido a vida e todos os momentos.

RESUMO

O projeto de diplomação apresenta uma análise da qualidade de energia em uma unidade industrial do setor de bebidas. Os distúrbios analisados são: tensão de regime permanente e variações de tensão de curta duração, estes distúrbios foram escolhidos devido ao impacto no processo produtivo. A tensão de regime permanente indica a condição geral do sistema e níveis adequados garantem confiabilidade ao processo e conservação dos equipamentos. Variações de tensão de curta duração são as principais causas de paradas do processo na indústria. Gerando custos de manutenção e custos relacionados ao processo.

O estudo de caso ilustra dados obtidos através de medições feitas com um analisador de qualidade de energia e dados do processo produtivo analisados de forma unificada. Finalizando o trabalho são apresentados dados históricos do processo e propõe-se a continuação do estudo com intuito de analisar de forma mais ampla a correlação da qualidade de energia e o processo produtivo em um momento de maior demanda.

Palavras-chaves: Engenharia Elétrica. Qualidade de Energia Elétrica. Tensão de Regime Permanente. Variações de tensão de curta duração.

ABSTRACT

The graduation project is an power quality analysis of an industrial site of the consumer goods industry. The disturbances analyzed are: long-duration voltage variations and transient voltage, these aspects were chosen because of the impact on the production process. The long-duration voltage variations indicates the general condition of the system and its adequate levels guarantee process reliability and equipment conservation. transient voltage are the main causes of production downtime in factories, and this generates maintenance and process-related costs.

The case study shows data obtained through power quality analyzer measurements and production process data, both databases were analyzed in a unified way. At the end, some historical process data are presented and it is proposed a continuation of the study, proposing a more broad analysis of the correlation between energy quality and a productive process in a higher demand period.

Keywords: Electrical Engineering. Power Quality. Long-Duration Voltage Variations. Transient Voltage.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Faixas de tensão em relação a tensão de referência.....	16
Figura 2: Curva de transformadores ferrossonantes	21
Figura 3: Classificação de eventos de variação de tensão de curta duração.....	22
Figura 4: Variação de tensão de curta duração na forma de onda senoidal.....	23
Figura 5: Variação de tensão de curta duração no valor eficaz.....	24
Figura 6: Variação de tensão de curta duração simulado no software ATP Draw.....	24
Figura 7: Conceitos de duração e magnitude de uma VTCD.....	25
Figura 8: Afundamento causado por partida de motores.....	26
Figura 9: Afundamento causado por magnetização de transformadores.	26
Figura 10: Afundamento causado por uma falta no sistema.	27
Figura 11: Gráfico de magnitude e duração definindo origem de um VTCD..	27
Figura 12: Terminologia definida pelo PRODIST.	28
Figura 13: Regiões para VTCD definidas pelo PRODIST.	29
Figura 14: Fatores de impacto definidos pelo PRODIST..	30
Figura 15: Curva de sensibilidade CBEMA	31
Figura 16: Curva de sensibilidade ITIC.....	32
Figura 17: Curva de sensibilidade SEMI F47.....	32
Figura 18: Analisador de qualidade de energia usado.....	35
Figura 19: Conexão do analisador ao sistema	37
Figura 20: Tensões de regime permanente na fase A.....	39
Figura 21: Tensões de regime permanente na fase B..	39
Figura 22: Tensões de regime permanente na fase C	40
Figura 23: Tensões mínimas na fase A	42
Figura 24: Tensões mínimas na fase B..	42

Figura 25: Tensões mínimas na fase C	43
Figura 26: Tensões máximas nas fases A, B e C	44
Figura 27: Classificação das VTCD em regiões de sensibilidade.....	47

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
1.1.	MOTIVAÇÃO.....	11
1.2.	OBJETIVO	12
1.3.	ESTRUTURA DO TRABALHO	12
2	QUALIDADE DE ENERGIA ELÉTRICA.....	14
2.1.	TENSÃO DE REGIME PERMANENTE.....	15
2.2.	VARIAÇÕES DE CURTA DURAÇÃO.....	22
2.3.	CARGAS SENSÍVEIS	31
3	ESTUDO DE CASO	34
3.1.	A UNIDADE INDUSTRIAL	33
3.2.	O ANALISADOR	34
3.3.	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	37
3.3.1	Tensão de regime permanente.....	38
3.3.2	Variações de tensão de curta duração	45
3.3.3	Análise da produção	47
4.	CONCLUSÃO.....	51
	REFERÊNCIAS.....	54

1. INTRODUÇÃO

Processos produtivos de indústrias de grande porte são dependentes do sistema elétrico, seja para movimentar uma esteira ou garantir o funcionamento do sistema de comunicação. A qualidade de energia elétrica é um fator indispensável para assegurar um bom funcionamento dos processos, reduzindo custos, paradas de processos, desgaste de equipamentos e manutenção corretiva.

A crescente demanda por energia nos últimos anos, investimentos nos sistemas de transmissão e distribuição insuficientes e aumento do uso de equipamentos baseados em eletrônica de potência são fatores que influenciam na qualidade de energia elétrica. Localização, configuração da unidade industrial e a demanda de energia da cidade em que a indústria está instalada também podem influenciar na qualidade de energia.

O custo da qualidade de energia é elevado e difícil de quantificar devido à complexidade dos processos industriais analisados. Sem um monitoramento constante da qualidade de energia é impossível avaliar se o problema detectado em um equipamento foi causado por desgaste do próprio equipamento ou por algum distúrbio da qualidade de energia. A própria variação da carga ao longo do tempo, devido a partida ou parada de uma parte do processo, ou funcionamento simultâneo de dois processos diferentes na mesma unidade fabril pode causar variações de tensão.

1.1. MOTIVAÇÃO

Ao estudar os problemas decorrentes da qualidade de energia e sabendo que a indústria em questão não conhece seus indicadores de qualidade e nunca correlacionou qualidade de energia com paradas de processo ou problema em equipamentos o estudo da qualidade de energia ilustra-se indispensável para conhecer melhor as limitações do sistema de potência e dos equipamentos da unidade industrial.

1.2. OBJETIVOS

O objetivo é medir e analisar variações de tensão de curta duração e variações de tensão longa duração. Apresentar os indicadores relacionados a estes distúrbios e analisar como o sistema se comporta ao longo do tempo.

Com os dados da qualidade de energia obtidos, analisar as paradas de processos na unidade industrial e correlacionar estas paradas com os distúrbios da qualidade de energia. Finalmente determinando possíveis causas e soluções para estes distúrbios. Definir os processos sensíveis e propor soluções para redução dos impactos da qualidade de energia nos processos analisados.

1.3. ESTRUTURA

A motivação e objetivos do projeto de diplomação são abordados no capítulo introdutório como justificativa para o tema escolhido. Uma abordagem simples da correlação de qualidade de energia e processos industriais apresenta o principal objetivo do estudo.

Para fundamentar as discussões sobre qualidade de energia elétrica os principais conceitos da sobre o tema são apresentados no capítulo intitulado qualidade de energia elétrica. Os dois distúrbios foco de análise são abordados em diversos aspectos como: conceito, causas, efeito, valores de referência, métodos de obtenção de dados e métodos de mitigação. Neste capítulo ainda é abordado o conceito de sensibilidade de carga e as principais curvas relacionadas ao tema.

O capítulo de estudo de caso ilustra os dados obtidos durante o período de medições na unidade industrial, além de apresentar a unidade e os equipamentos utilizados. Os dados são abordados e os indicadores de qualidade apresentados conceitualmente no capítulo anterior são calculados com base nos valores obtidos durante os testes. Dados do processo produtivo são analisados em conjunto com os dados de qualidade de energia com o propósito de correlacionar qualidade de energia com paradas de processo. Ainda no capítulo do estudo

de caso alguns dados históricos do processo industrial são abordados para ilustrar que é interessante uma análise da qualidade de energia na unidade industrial com maior tempo de coleta de dados e diferentes momentos de demanda para garantir que os distúrbios estudados não impactam no processo produtivo.

Por fim, uma discussão sobre os resultados obtidos e interpretações para estes resultados são apresentados no capítulo de conclusões.

2. QUALIDADE DE ENERGIA ELÉTRICA

A qualidade de energia elétrica é definida de diferentes maneiras dependendo da referência ou análise. Dugan (2012), define qualidade de energia como qualquer distúrbio/problema presente na tensão, corrente ou frequência que resulte em falha ou mau funcionamento dos equipamentos dos clientes/consumidores. Bollen (2003), em seu artigo *What is power quality?* Define qualidade de energia como a união dos conceitos de qualidade de tensão e qualidade de corrente. Problema na qualidade de tensão é o desvio da tensão ideal (senoidal de frequência e amplitude constante) e problema da qualidade de corrente são desvios da corrente ideal (senoidal de frequência e amplitude constante).

Sabendo do conceito de qualidade de energia é indispensável definições e valores de referência para garantir que a energia entregue ao consumidor tenha parâmetros de qualidade. Com esta finalidade a ANEEL define no documento PRODIST Módulo 8 que aborda os procedimentos relativos a qualidade de energia em relação a qualidade do produto e dos serviços prestados. É no PRODIST que estão os parâmetros e valores de referência que são utilizados em todo o país para garantir qualidade de energia nos sistemas de distribuição. Quando trata da qualidade dos serviços prestados o documento estabelece uma metodologia para apuração de indicadores que é utilizada para obter os dados do estudo de caso presentes neste projeto de diplomação.

Os distúrbios da qualidade de energia elétrica são normalmente classificados em sete grupos dependendo de suas características principais. Destes sete grupos, dois analisados com atenção no estudo de caso, tensão de regime permanente e variações de tensão de curta duração e abordadas de maneira mais aprofundada na teoria e parâmetros segundo o PRODIST. Os outros cinco grupos são: fator de potência, desequilíbrio de tensão, distorções harmônicas, flutuação de tensão e variação de frequência. A escolha destes dois distúrbios

deve-se ao fato de que as variações de tensão são diretamente relacionadas ao funcionamento adequado dos equipamentos e paradas de processo.

2.1. TENSÃO DE REGIME PERMANENTE

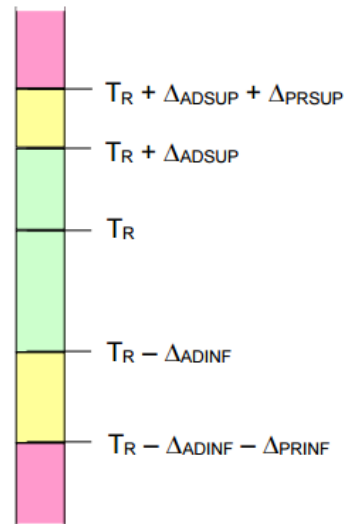
Tensão de regime permanente ou variações de tensão de longa duração são distúrbios relacionados a tensão rms e podem ser de dois tipos: sobretensão ou subtensão. O fenômeno conhecido como sobretensão ocorre quando a tensão medida é maior que o limite superior da faixa de tensão adequada. O fenômeno de subtensão ocorre quando a tensão medida é menor que o limite inferior da faixa de tensão adequada. A tensão eficaz (V_{rms}) ou valor quadrático médio é calculada segundo a equação (1), para N valores $\{V_1, V_2, \dots, V_N\}$.

$$V_{rms} = \sqrt{\frac{1}{N} * \sum_{i=1}^N V_i^2} \quad (1)$$

Problemas relacionados a tensão de regime permanente são normalmente causados pela magnitude da carga ligada ao sistema de distribuição. Subtensões ocorrem quando o sistema está sob forte demanda (alta impedância ou carga elevada) e o sistema de alimentação não tem a potência suficiente para alimentar a carga conectada ou quando ocorre a entrada de grandes cargas, desconexão de capacitores ou regulação inadequada de tensão. Por outro lado, quando sistema de potência está sobredimensionado para a carga, pode ocorrer uma sobretensão devido à baixa impedância do sistema. Isto acontece normalmente ao desconectar-se grandes cargas do sistema ou operação de banco de capacitores. Em muitos casos operar com valor eficaz menor que a tensão nominal, porém dentro da faixa adequada de tensão, pode ser uma decisão da distribuidora para reduzir a demanda. Segundo o

PRODIST sobretensões e subtensões podem ser classificadas por faixas em torno da tensão de referência ou nominal, conforme a figura (1).

Figura 1: Faixas de tensão em relação a tensão de referência.



Fonte: PRODIST, Módulo 8 - revisão 8 (2017).

Onde:

Tensão de referência (T_R).

Faixa adequada de tensão ($T_R - \Delta_{ADINF}$, $T_R + \Delta_{ADSUP}$).

Faixas precária de tensão ($T_R - \Delta_{ADINF} - \Delta_{PRINF}$, $T_R - \Delta_{ADINF}$ ou $T_R + \Delta_{ADSUP}$, $T_R + \Delta_{ADINF} + \Delta_{PRSUP}$).

Faixas críticas de tensão ($>T_R + \Delta_{ADINF} + \Delta_{PRSUP}$ ou $<T_R - \Delta_{ADINF} - \Delta_{PRINF}$).

Assim toda medida que se encontra fora da faixa adequada de tensão está nas faixas precárias ou críticas. Os valores que definem as faixas precárias e críticas são estabelecidos no PRODIST e estes valores dependem da tensão nominal do ponto a ser medido. Para tensões inferiores a 1 kV a tabela 1 define os valores em pu para as faixas de tensão.

Tabela 2: Faixas de tensão em relação a tensão nominal.

Tensão de atendimento	Faixa de variação da leitura TL em relação a tensão nominal (TN)
Adequada	$0,92 \text{ TN} \leq \text{TL} \leq 1,05 \text{ TN}$
Precária	$0,87 \text{ TN} \leq \text{TL} \leq 0,92 \text{ TN}$ ou $1,05 \text{ TN} \leq \text{TL} \leq 1,06 \text{ TN}$
Crítica	$\text{TL} < 0,87 \text{ TN}$ ou $\text{TL} > 1,06 \text{ TN}$

Fonte: PRODIST (2017).

Através da medida da tensão em um determinado ponto é possível identificar quando a tensão fornecida está dentro da faixa adequada, precária ou crítica. Note que a tensão está dentro da faixa adequada quando está no máximo 5% maior que a tensão nominal e 8% menor que a tensão nominal. A região crítica compreende valores acima de 6% da tensão nominal ou menores que 13% da tensão nominal.

Indicadores individuais e coletivos de tensão de regime permanente são definidos no PRODIST junto aos procedimentos de medição. O conjunto de leituras para obter os dados para cálculo dos indicadores deve conter mil e oito leituras válidas obtidas em intervalos consecutivos de 10 minutos cada. Os indicadores individuais chamados de índice de duração relativa da transgressão para tensão precária (DRP) e índice de duração relativa da transgressão para tensão crítica (DRC) são calculados seguindo as equações (2) e (3) respectivamente.

$$DRP = \frac{nlp}{1008} * 100[\%] \quad (2)$$

$$DRC = \frac{nlc}{1008} * 100[\%] \quad (3)$$

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

regime permanente expressam o percentual de leituras que estão nas faixas determinadas como precária e crítica para o conjunto de 1008 leituras e são associados a um mês civil.

O PRODIST estabelece limites para os indicadores de tensão de regime permanente. O valor limite da duração relativa da transgressão máxima de tensão precária (DRP) é de 3%, ou seja, para o padrão de 1008 leituras apenas 30 leituras podem estar na faixa precária. Para o indicador de duração relativa da transgressão máxima de tensão crítica (DRC) o limite é de 0,5%, então para as 1008 leituras, apenas 5 leituras podem estar na faixa estabelecida como crítica. Através destes limites existe um cálculo para compensação financeira a consumidores que estiverem submetidos a tensões de atendimento com transgressão dos indicadores DRP E DRC. O cálculo para esta compensação é feito através da formula 4.

$$Valor = \left[\left(\frac{DRP - DRP_M}{100} \right) * K_1 + \left(\frac{DRC - DRC_M}{100} \right) * K_2 \right] * EUSD \quad (4)$$

Onde:

$K_1 = 0$, se $DRP \leq DRP_M$;

$K_1 = 3$, se $DRP > DRP_M$;

$K_2 = 0$, se $DRC \leq DRC_M$;

$K_2 = 7$, para unidades consumidoras de baixa tensão, se $DRC > DRC_M$;

$K_2 = 5$, para unidades consumidoras de média tensão, se $DRC > DRC_M$;

$K_2 = 3$, para unidades consumidoras de alta tensão, se $DRC > DRC_M$;

DRP = Valor do DRP expresso em % apurado na última medição válida;

$DRP_M = 3\%$

DRC = Valor do DRC expresso em % apurado na última medição válida;

$DRC_M = 0,5\%$

$EUSU$ = Valor do encargo de uso do sistema de distribuição correspondente ao mês de referência da última medição válida.

Como dito anteriormente, os problemas de tensão de regime permanente estão relacionados principalmente a variação da impedância total do sistema. Assim, a regulação de tensão pode ser feita usando reguladores de tensão, afim de garantir a tensão nominal nos pontos medidos ou então adicionando ao sistema dispositivos que possam modificar as características da impedância do sistema.

Dugan (2012) agrupa os reguladores de tensão em três grupos dependendo de suas principais características. No primeiro grupo estão os transformadores com comutadores de tapes. Estes transformadores podem ser mecânicos ou eletrônicos e regulam a tensão através da mudança da sua relação de transformação. São normalmente encontrados na subestação. O segundo grupo, de dispositivos isoladores, a carga está isolada da fonte de energia e a regulação de tensão é feita através de algum tipo de conversão de energia. Usando por exemplo motores/geradores que garantem tensões mais estáveis para a carga independente da tensão do sistema. O terceiro grupo é composto por dispositivos de compensadores de impedância, estes são os dispositivos que alteram a característica da impedância do sistema como capacitores shunt que fornecem potência reativa a carga e diminuem a corrente do alimentador.

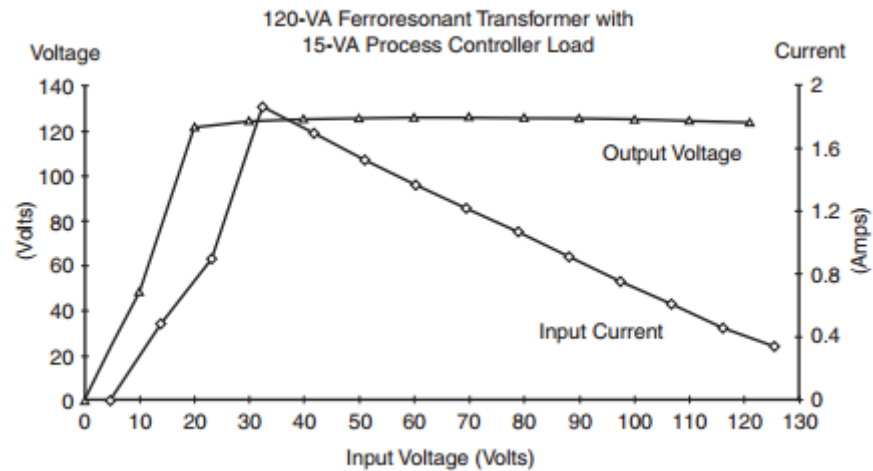
Transformadores com comutador de tapes instalados nas subestações possuem comutadores trifásicos que operam de forma igual para as três fases. Já transformadores instalados ao longo do alimentador são do tipo monofásicos e a regulação é independente em cada fase. Com estes transformadores é possível variar a tensão em 10%. O sistema dos comutadores pode ser eletrônico ou eletromecânico. Os dispositivos que usam eletrônica de potência podem realizar comutações rápidas na ordem milissegundos o que permitem que

estes transformadores sejam usados também para regular variações de tensão de curta duração. Já dispositivos eletromecânicos têm tempo de resposta de pelo menos 15 segundos para sistemas mais sofisticados e de 30 a 45 segundos para sistemas mais usuais. Assim a aplicação destes transformadores é principalmente para regular tensão em sistemas com longos alimentadores em que a tensão varia lentamente. Para alimentadores muito longos a regulação feita através de transformadores pode ser insuficiente para pontos muito distantes do transformador. Assim transformadores intermediários podem ser necessários para garantir regulação de tensão para consumidores localizados na ponta do alimentador.

Os reguladores que utilizam armazenamento de energia em baterias são caros para sistemas com potência significativa e são normalmente usados para pequenas cargas como computadores ou sistemas de comunicação. Estes reguladores introduzem perdas e distorções harmônicas no sistema devido a eletrônica de potência. Já os conjuntos motor/gerador isolam eletricamente a carga do sistema e esse acoplamento é feito mecanicamente, assim a energia cinética do sistema permite reduzir as variações de tensão na carga.

Estes dispositivos têm como desvantagem o elevado tempo de resposta para grandes variações na carga que dependendo da característica do sistema pode chegar a alguns segundos. Ainda nos dispositivos isoladores cabe citar os transformadores ferrossonantes que atuam na região de saturação da curva de magnetização, assim a tensão no secundário permanece constante quando a tensão no primário é alterada. Este transformador é útil para regulação de tensão, mas não apresenta bom comportamento para tensão muito abaixo da nominal, podendo entrar em colapso como ilustrado na figura (2) que apresenta este comportamento em relação a tensão de primário e secundário, além de evidenciar o fato deste dispositivo apresentar corrente elevada para garantir esta regulação de tensão.

Figura 2: Curva de transformadores ferroresonantes



Fonte: Dugan (1996)

Os capacitores shunt fornecem potência reativa a carga resultando em uma redução na componente reativa da corrente no alimentador e reduzindo a queda de tensão no mesmo. Os compensadores estáticos são dispositivos com rápida resposta a variação de tensão. Dois tipos de compensadores estáticos são encontrados, o reator controlado a tiristor e o capacitor controlado a tiristor. O reator é o mais utilizado e possui bancos de capacitores e indutores para filtrar harmônicos oriundos do chaveamento do tiristor. O compensador do tipo capacitor controlado por tiristor não produz harmônicos pois a função do tiristor é apenas chavear os capacitores e garantir uma compensação da potência reativa de forma controlada e assim diminuir as sobretensões transitórias causadas pelo chaveamento.

2.2. VARIAÇÕES DE TENSÃO DE CURTA DURAÇÃO

PRODIST define variações de tensão de curta duração como desvios significativos no valor eficaz da tensão em curtos intervalos de tempo. O que diferencia variações de tensão de curta duração dos distúrbios da tensão de regime permanente é basicamente o tempo de duração do evento. A classificação dos eventos de variação de curta duração feita pela ANEEL pode ser observado na figura (3).

Não são atribuídos padrões de desempenho para distúrbios da qualidade referentes a variações de tensão de curta duração. Porém é sabido que estes fenômenos podem interferir em diversos processos produtivos em que cargas sensíveis a tais variações estejam envolvidas.

Figura 3: Classificação de eventos de variação de tensão de curta duração.

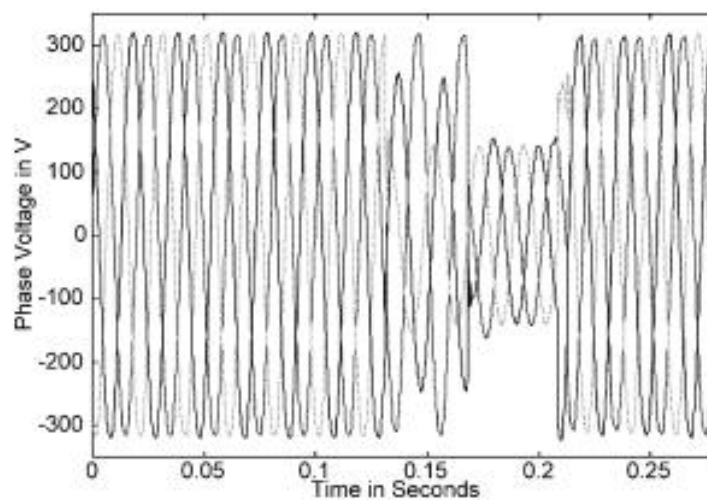
Classificação	Denominação	Duração da Variação	Amplitude da tensão (valor eficaz) em relação à tensão de referência
Variação Momentânea de Tensão	Interrupção Momentânea de Tensão	Inferior ou igual a três segundos	Inferior a 0,1 p.u
	Afundamento Momentâneo de Tensão	Superior ou igual a um ciclo e inferior ou igual a três segundos	Superior ou igual a 0,1 e inferior a 0,9 p.u
	Elevação Momentânea de Tensão	Superior ou igual a um ciclo e inferior ou igual a três segundos	Superior a 1,1 p.u
Variação Temporária de Tensão	Interrupção Temporária de Tensão	Superior a três segundos e inferior a três minutos	Inferior a 0,1 p.u
	Afundamento Temporário de Tensão	Superior a três segundos e inferior a três minutos	Superior ou igual a 0,1 e inferior a 0,9 p.u
	Elevação Temporária de Tensão	Superior a três segundos e inferior a três minutos	Superior a 1,1 p.u

Fonte: PRODIST (2017).

Como pode-se observar na tabela que classifica os eventos, a duração máxima para um fenômeno ser considerado de curta duração é de 3 minutos, tempos superiores a 3 minutos são considerados variações de tensão de regime permanente ou interrupções de longa duração. Ainda dentro das variações de curta duração os fenômenos podem ser classificados como momentâneos quando tem duração de até três segundos ou então temporários quando tem duração entre três segundos e três minutos.

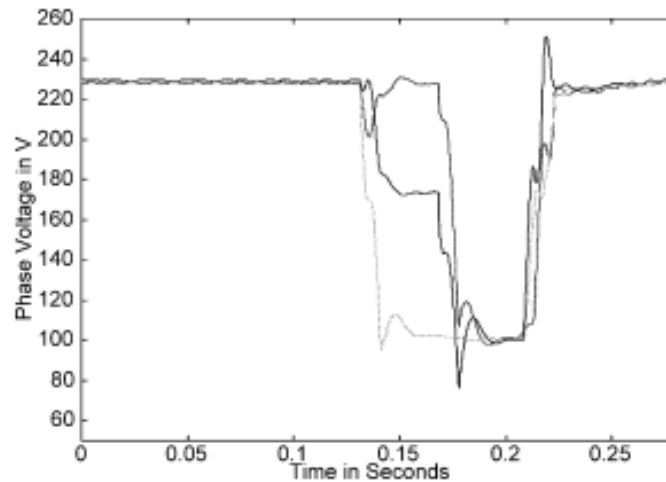
Uma variação de tensão de curta duração pode ser observada graficamente tanto na forma de onda senoidal da tensão quanto na tensão eficaz. Bollen (2003), no artigo *What is power quality?*, faz esta observação e apresenta a figura (4) que representa um afundamento nas 3 fases observado na forma de onda e a figura (5) que representa o mesmo afundamento visto na tensão eficaz das fases.

Figura 4: Variação de tensão de curta duração na forma de onda senoidal.



Fonte: Bollen (2003)

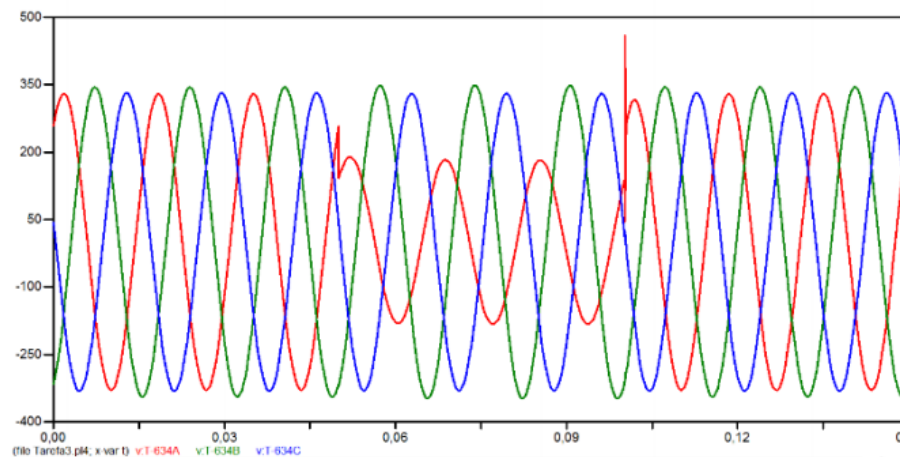
Figura 5: Variação de tensão de curta duração no valor eficaz.



Fonte: Bollen (2003)

Na figura (6) pode-se observar um afundamento monofásico simulado usando um sistema de distribuição adaptado do IEEE13 simulado no software ATP Draw.

Figura 6: Variação de tensão de curta duração simulado no software ATP Draw.

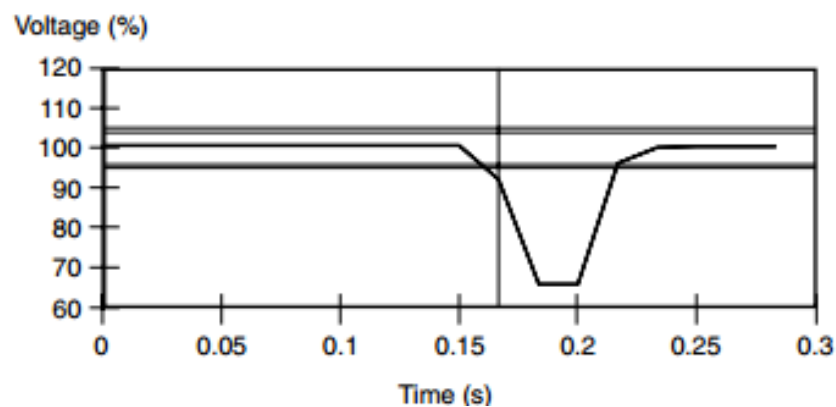


Fonte: Autor (2017).

É definido que o tempo de duração de um afundamento ou elevação de tensão é o período em que uma das três fases está com o valor eficaz da tensão inferior a 0,9 pu para um afundamento e superiores a 1,1pu para elevações. Valores dentro do intervalo de 0,9 pu e 1,1 pu não são considerados no tempo do evento.

Outra característica importante é em relação a magnitude de evento. Para afundamentos a magnitude é o menor valor eficaz ocorrido durante o evento, considerando as três fases. Para uma elevação a magnitude considerada é o maior valor eficaz do evento. A magnitude depende de diversos fatores como características elétricas do sistema, do evento que causou o distúrbio ou mesmo da posição relativa do ponto de medição e da origem do evento. A figura (7) ilustra os conceitos de duração e magnitude de um afundamento.

Figura 7: Conceitos de duração e magnitude de uma VTCD.

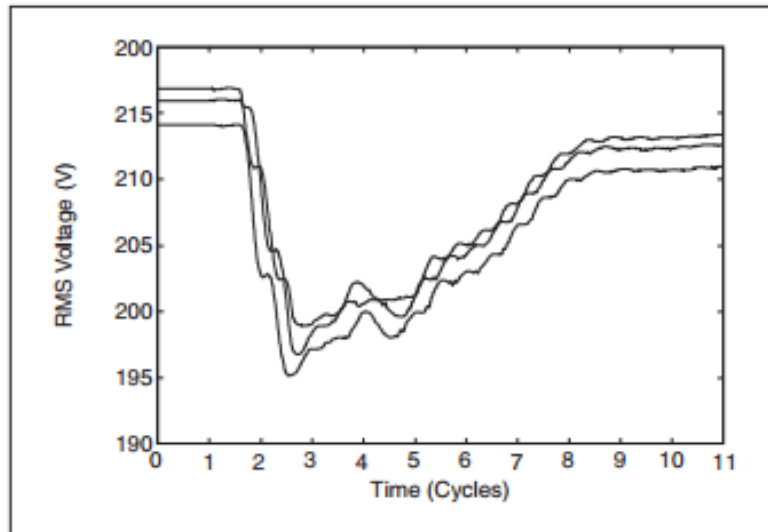


Fonte: Dugan (2012).

Na figura (7) o tempo de duração do afundamento é de 0,5 segundos (atingindo valores menores que 0,9 pu aproximadamente em 0,17 segundo e voltando a valores maiores que 0,9 pu aproximadamente em 0,22 segundos) e a magnitude do afundamento é de 65,8 % que é o valor mínimo da tensão eficaz que ocorre por volta de 0,19 segundos.

A principal causa dos fundamentos de tensão é uma variação abrupta da corrente. A característica do afundamento permite inferir a causa do mesmo. Faltas, partida de motores e energização de transformadores produzem curvas de tensão em função do tempo com características bem definidas e são as principais causas de afundamentos. Bollen (2001), no artigo *Voltage Sags in Three-Phase Systems* apresenta as formas de onda dos afundamentos de tensão para as três principais causas de afundamento. A figura (8) ilustra um afundamento causado pela partida de um motor.

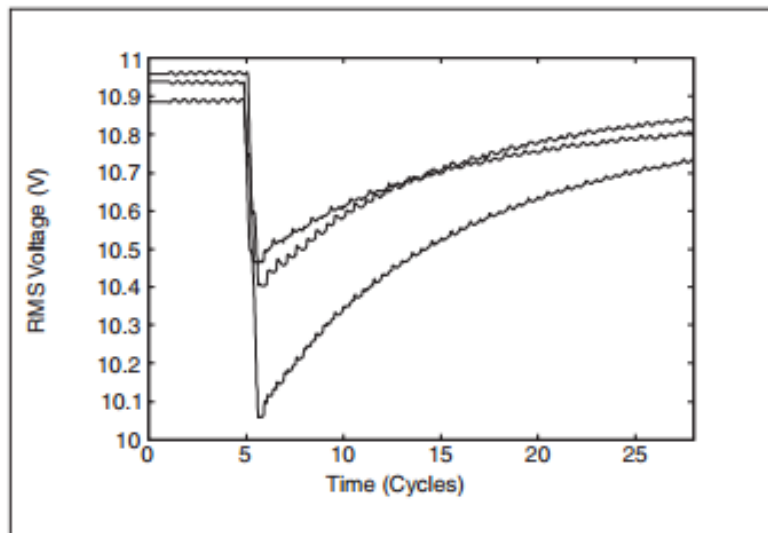
Figura 8: Afundamento causado por partida de motores.



Fonte: Bollen (2001)

A figura (9) ilustra o afundamento originado pela magnetização de um transformador.

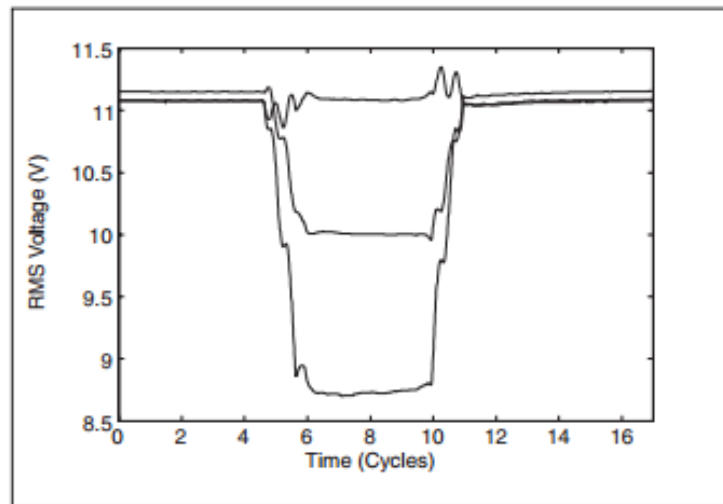
Figura 9: Afundamento causado por magnetização de transformadores.



Fonte: Bollen (2001)

A figura (10) ilustra o afundamento originado por uma falta.

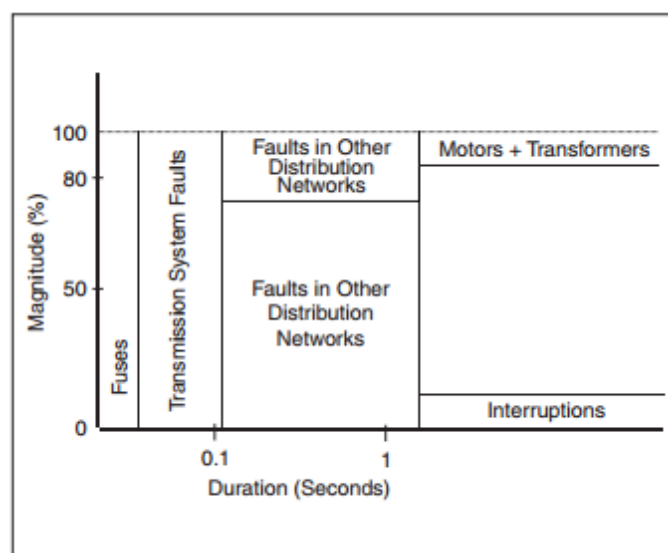
Figura 10: Afundamento causado por uma falta no sistema.



Fonte: Bollen (2001)

As três figuras ilustram afundamentos trifásicos e o eixo de tempo está indicando o número de ciclos. Além do perfil da tensão durante o afundamento pode-se usar magnitude e duração para estimar a causa do afundamento. Bollen (2001) define ainda neste artigo áreas em um gráfico que representam a causa do afundamento em relação a sua magnitude e duração. Este gráfico é muito similar aos gráficos que representam sensibilidade de cargas. A figura (11) ilustra este gráfico que relaciona magnitude e duração do afundamento a origem do mesmo.

Figura 11: Gráfico de magnitude e duração definindo origem de um VTCD.



Fonte: Bollen (2001).

Nesta figura é possível notar que a principal característica dos afundamentos causados por motores e transformadores é o longo tempo de duração e que eventos causados por interrupções são eventos com longa duração e baixa magnitude. Quando as faltas ocorrem no sistema de transmissão o tempo é curto quando comparadas a faltas no sistema de distribuição.

O PRODIST apresenta terminologias aplicáveis aos cálculos de variação de curta duração e a síntese destas terminologias é apresentada na tabela figura (12).

Figura 12: Terminologia definida pelo PRODIST.

Identificação da Terminologia	Sigla
Varição de Tensão de Curta Duração	VTCD
Interrupção Momentânea de Tensão	IMT
Afundamento Momentâneo de Tensão	AMT
Elevação Momentânea de Tensão	EMT
Interrupção Temporária de Tensão	ITT
Afundamento Temporário de Tensão	ATT
Elevação Temporária de Tensão	ETT
Amplitude do evento de VTCD	V_e
Duração do evento de VTCD	Δt_e
Frequência de ocorrência de eventos de VTCD	f_e
Fator de Impacto	FI
Fator de Impacto base	FI_{BASE}

Fonte: PRODIST (2017).

A oitava revisão do PRODIST apresenta indicadores para variações de tensão de curta duração. As expressões para o cálculo destes indicadores são:

$$V_e = \frac{V_{res}}{V_{ref}} * 100[\%] \quad (4)$$

Onde:

V_e = amplitude do evento de VTCD (em %);

V_{res} = tensão residual do evento de VTCD (em Volts);

V_{ref} = tensão de referência (em Volts).

$$\Delta t_e = t_f - t_i \quad (5)$$

Onde:

Δt_e = duração do evento VTCD (em milissegundos);

t_f = instante final do evento de VTCD;

t_i = ante inicial do evento de VTCD.

$$f_e = n \quad (6)$$

Onde:

f_e = frequência de ocorrência de eventos de VTCD;

n = quantidade de eventos de VTDC registrados no período de avaliação.

A figura 13 ilustra as regiões de sensibilidade definidas pelo PRODIST. O evento é classificado em uma região dependendo de sua magnitude e duração baseado no nível de sensibilidade de diferentes cargas conectadas ao sistema. Esta região defini o fator de ponderação que será usado no cálculo do fator de impacto do estudo de caso.

Figura 13: Regiões para VTCD definidas pelo PRODIST.

Amplitude (pu)	Duração						
	[16,67 ms - 100 ms]	(100 ms - 300 ms]	(300 ms - 600 ms]	(600 ms - 1 seg]	(1 seg - 3 seg]	(3 seg - 1 min]	(1 min - 3 min]
> 1,15	REGIÃO H			REGIÃO I			
(1,10 - 1,15]	REGIÃO H			REGIÃO I			
(0,85 - 0,90]	REGIÃO A						
(0,80 - 0,85]	REGIÃO A						
(0,70 - 0,80]	REGIÃO B	REGIÃO D		REGIÃO G			
(0,60 - 0,70]	REGIÃO B	REGIÃO D		REGIÃO G			
(0,50 - 0,60]	REGIÃO C	REGIÃO D		REGIÃO G			
(0,40 - 0,50]	REGIÃO C	REGIÃO D		REGIÃO G			
(0,30 - 0,40]	REGIÃO E			REGIÃO F			
(0,20 - 0,30]	REGIÃO E			REGIÃO F			
(0,10 - 0,20]	REGIÃO E			REGIÃO F			
< 0,10	REGIÃO E			REGIÃO F			

Fonte: PRODIST (2017).

Sabendo a região em que o evento está inserido pode-se definir o fator de ponderação e o fator de impacto base para o cálculo do fator de impacto seguindo a figura (14), retirada do PRODIST.

Figura 14: Fatores de impacto definidos pelo PRODIST.

Região de Sensibilidade	Fator de Ponderação (f_p)	Fator de Impacto Base (FI_{BASE})	
		1,0 kV < Vn < 69 kV	69 kV ≤ Vn < 230kV
A	0,00	2,13	1,42
B	0,04		
C	0,07		
D	0,15		
E	0,25		
F	0,36		
G	0,07		
H	0,02		
I	0,04		

Fonte: PRODIST (2017).

Assim o fator de impacto é calculado:

$$FI = \frac{\sum_{i=A}^I (f_{ei} \times f_{pi})}{FI_{BASE}} \quad (7)$$

Onde:

f_{ei} = frequência de ocorrência de eventos de VTCD, apuradas por meio de medição apropriada, em um período de 30 dias consecutivos, para cada região de sensibilidade i , sendo $i = A, B, C, D, E, F, G, H$ e I .

f_{pi} = fator de ponderação para cada região de sensibilidade i , estabelecido de acordo com a relevância do evento, correlacionando sua amplitude e duração.

FI_{BASE} = Fator de Impacto base, obtido do somatório dos produtos dos fatores de ponderação pelas frequências máximas de ocorrência em um período de 30 (trinta) dias de VTCD para cada região de sensibilidade.

2.3. CARGAS SENSÍVEIS

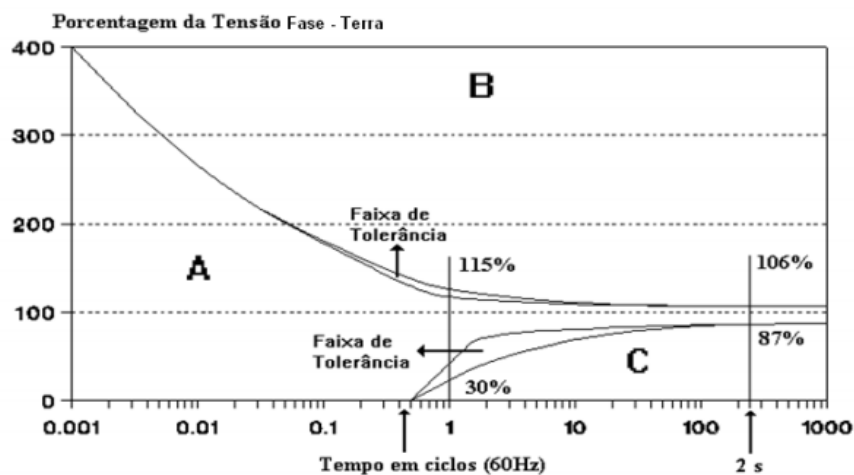
Cada equipamento é atingido de forma diferente por distúrbios da qualidade de energia. Um processo produtivo pode sofrer uma parada devido a um afundamento de grande magnitude e tempo curto ou sofrer uma parada devido a um afundamento de pequena magnitude e com um tempo elevado.

O custo relacionado a estas paradas de processo pode ser grande dependendo da complexidade para o religar do processo industrial. Por isto é muito importante conhecer a sensibilidade de cada equipamento associado ao processo afim de garantir anomalias recorrentes no sistema não causem paradas.

A sensibilidade das cargas pode ser representada em um gráfico do tipo magnitude versus duração do afundamento. Três curvas padronizadas para sensibilidade de carga apresentadas.

A curva CBEMA foi originalmente proposta para caracterizar a sensibilidade de computadores mainframe e hoje em dia é usado para caracterizar microprocessadores e equipamentos microprocessados. Na região A (região de imunidade) o equipamento está protegido de falhas ou danos. Na região B e C o equipamento pode sofrer danos devido a sobretensões ou falhas devido a afundamentos, respectivamente.

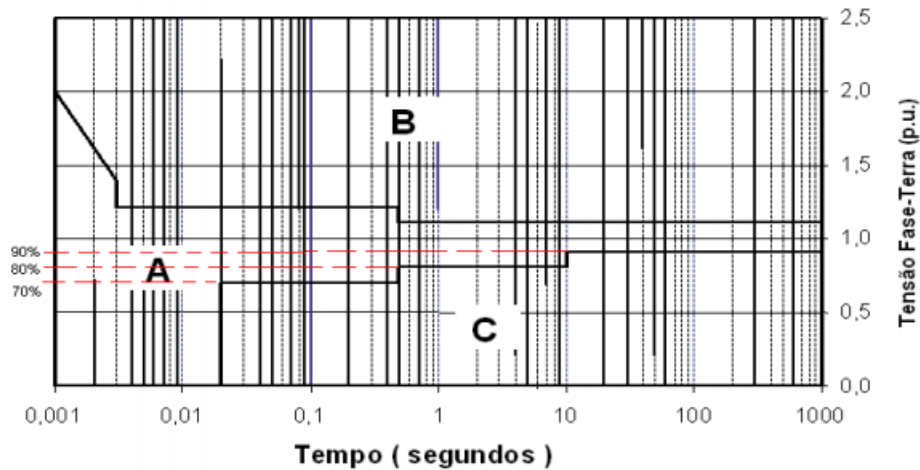
Figura 15: Curva de sensibilidade CBEMA.



Fonte: Menezes (2007).

A curva CBEMA foi modificada para representar melhor os diversos dispositivos eletrônicos. Esta curva é a ITIC e apresenta as mesmas características nas áreas A, B e C que a CBEMA.

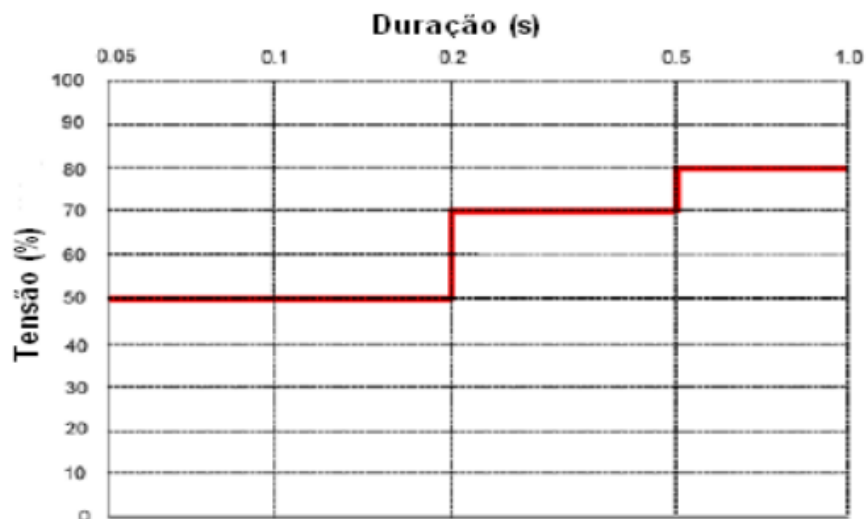
Figura 16: Curva de sensibilidade ITIC.



Fonte: Menezes (2007)

A curva que representa a sensibilidade de equipamentos desenvolvida por uma associação internacional de fabricantes de semicondutores e define padrões de tolerância para afundamentos de tensão para processos industriais onde são fabricados equipamentos semicondutores. Esta curva é conhecida como SEMI F47 e é ilustrada na figura (17).

Figura 17: Curva de sensibilidade SEMI F47.



Fonte: Menezes (2007)

3. ESTUDO DE CASO

3.1. A UNIDADE INDUSTRIAL

A indústria em que foram realizadas as medidas de qualidade de energia é uma unidade de uma multinacional de bebidas situada no distrito de Águas Claras do Sul, pertencente a cidade de Viamão.

A fábrica é composta de seis linhas de produção. Cada linha é dedicada a uma embalagem e produz diversas marcas. Em função do arranjo elétrico da unidade e das características do analisador de qualidade utilizado, as medidas foram feitas no secundário do transformador de uma única linha de produção.

A unidade está conectada a Subestação de Energia de Águas Claras, localizada na estrada do Cartório em Viamão distante três quilômetros da fábrica e distante cinco quilômetros da RS-040. Opera com um transformador de 25 MVA de potência, além de dois módulos de linha de transmissão (LT) e quatro de alimentadores (redes de média tensão), com uma extensão na atual linha de transmissão de 69 kV. Esta linha de transmissão de 69 kV chega na unidade industrial e é rebaixada em uma subestação interna para 13,8 kV. Por fim, existem outras 5 subestações que rebaixam a tensão de 13,8 kV para 220 V.

As medidas foram feitas no secundário do transformador a seco tipo GEAFOL da fabricante Siemens com potência de 1500 kVA, trifásico e com frequência de 60 Hz.

Devido a característica do analisador de qualidade que precisa ser instalado em um ponto em que a tensão de fase seja de 220 V apenas o secundário de um transformador 13,8 kV – 220 V pode ser medido. Assim foi escolhida a linha L512 que é a principal linha de produção em volume e capacidade da unidade.

A linha L512 é dedicada a produção de latas 473 ml, principal produto da unidade. Operando na maioria do tempo para produzir cerveja da marca Polar, foi escolhida por ser a

linha de produção responsável por aproximadamente 25% do volume produzido na unidade e ainda representa o principal produto/marca produzido no estado. A capacidade diária de produção é de 7000 hectolitros ou 1.479.900 latas de cerveja. A linha de produção opera normalmente entre 5 e 6,5 dias por semana, tendo 12 horas (0,5 dias) na semana reservado para o procedimento de manutenção programado (PCM). Em períodos de grande demanda de venda, a linha deve produzir em sua capacidade máxima parando apenas para o PCM e para manutenções corretivas.

3.2. O ANALISADOR

O analisador de qualidade utilizado para as medidas foi o Metrel MI2292 concebido de acordo com os padrões europeus de segurança (EN 61010-1), eletromagnetismo (EN 50081-1 e EN 61000-6-1) e medições (EN 60160).

O analisador contém diversas funções como:

- Tensão rms
- Corrente rms
- Potência (Watt, var e VA)
- Fator de Potência.
- Energia.
- Análise de harmônicos
- Análise estatística
- Flicker
- Anomalias de tensão

Figura 18: Analisador de qualidade de energia usado.



Fonte: Manual de instruções analisador de qualidade de energia MI2292.

Nas medidas feitas para o projeto de diplomação foram usadas as funções de gravação de tensão e corrente rms e gravação de anomalias. Como os dados foram obtidos e armazenados na memória do aparelho o número de parâmetros e grandezas foram escolhidos para garantir um uso eficiente da memória disponível.

Algumas especificações técnicas importantes:

Escala de tensão de entrada: 10 – 550 Vrms;

Resolução de tensão: 0,1V;

Precisão de tensão: $\pm 0,5\%$ da leitura ± 2 dígitos;

Faixa de frequência: 43 – 68 Hz fundamental;

Escala de corrente de entrada: 20 – 1000 A (relação 1000 A/1 V);

Resolução de corrente: 03 A (relação 1000 A/1 V);

Precisão de corrente: $\pm 0,5\%$ da leitura ± 6 dígitos mais precisão do transformador de corrente;

Período de integração: 10ms (meio ciclo de 50 Hz);

Conversor A/ de 14 bits com 128 amlustras por canal por período.

Memória não volátil de 2048 KB SRAM.

Os métodos de medição são baseados em amostras digitais dos sinais de entrada. Cada entrada (3 para tensão e 3 para corrente) é testada 128 vezes em cada ciclo de entrada. A duração deste ciclo depende da frequência na entrada da sincronização. Em 60 Hz como utilizado para o projeto o ciclo de entrada é de 16 ms. Os valores medidos são calculados no fim de cada período testado e os resultados ficam disponíveis ou gravados. As equações (8) e (9) são usadas para calcular as grandezas dadas.

Equação para tensão:

$$U_x = \sqrt{\frac{1}{128} \sum_{i=1}^{128} u_{x_i}^2} \quad (8)$$

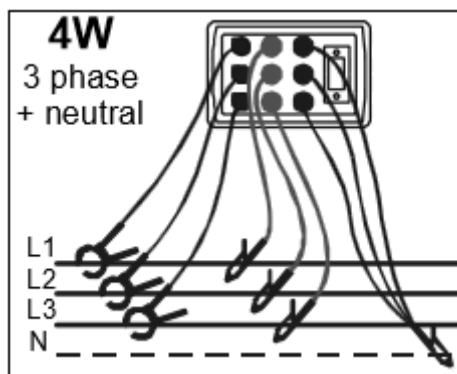
Equação para corrente:

$$I_x = \sqrt{\frac{1}{128} \sum_{i=1}^{128} i_{x_i}^2} \quad (9)$$

O analisador foi configurado no modo gravação na função periódico com a opção de anomalias ativada. Configurações como tempo de integração e tempo de sub integração foram feitas respeitando o PRODIST. Para integração o tempo configurado foi de 10 minutos e 0,2 segundos para subintegração. A opção anomalia foi configurada para armazenar toda e anomalia em que a tensão exceda 10% acima ou abaixo da tensão nominal.

O sistema medido era do tipo 4 fios com condutor neutro. O esquemático de conexão do aparelho com o sistema é ilustrado na figura (19).

Figura 19: Conexão do analisador com o sistema.



Fonte: Manual de instruções analisador de qualidade de energia MI2292.

3.3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta seção são apresentados os resultados das medidas feitas na unidade industrial iniciadas no dia 10/5/2017, interrompidas no dia 26/5/2017 devido a um erro aleatório no equipamento que interrompeu a aquisição de dados. Reiniciado no dia 29/5/2017 e finalizado no dia 07/6/2017.

O erro apresentado pelo equipamento durante a primeira leitura causou interrupção automática da gravação da função periódica que é responsável por aquisição dos valores de tensão de regime permanente. Foi necessário recolher o equipamento da subestação para observar os dados obtidos até o momento, verificar a falha e corrigir as configurações do aparelho.

Como as configurações feitas estavam corretas e não foram alteradas para o segundo período de medidas, a falha na aquisição de dados foi atribuído a uma falha do próprio aparelho, já que nenhuma anomalia foi detectada pelo modo de gravação anomalia que continuou funcionando ao longo de todo tempo em que o equipamento ficou conectado ao sistema.

3.3.1 Tensão de regime permanente

A análise de tensão de regime permanente teve início no dia 29/5/2017 às 10 horas e 49 minutos e foi finalizada no dia 07/6/2017 às 10 horas e 49 minutos. Foram obtidos no total 1296 leituras afim de garantir o número correto de leituras mesmo após possíveis expurgos.

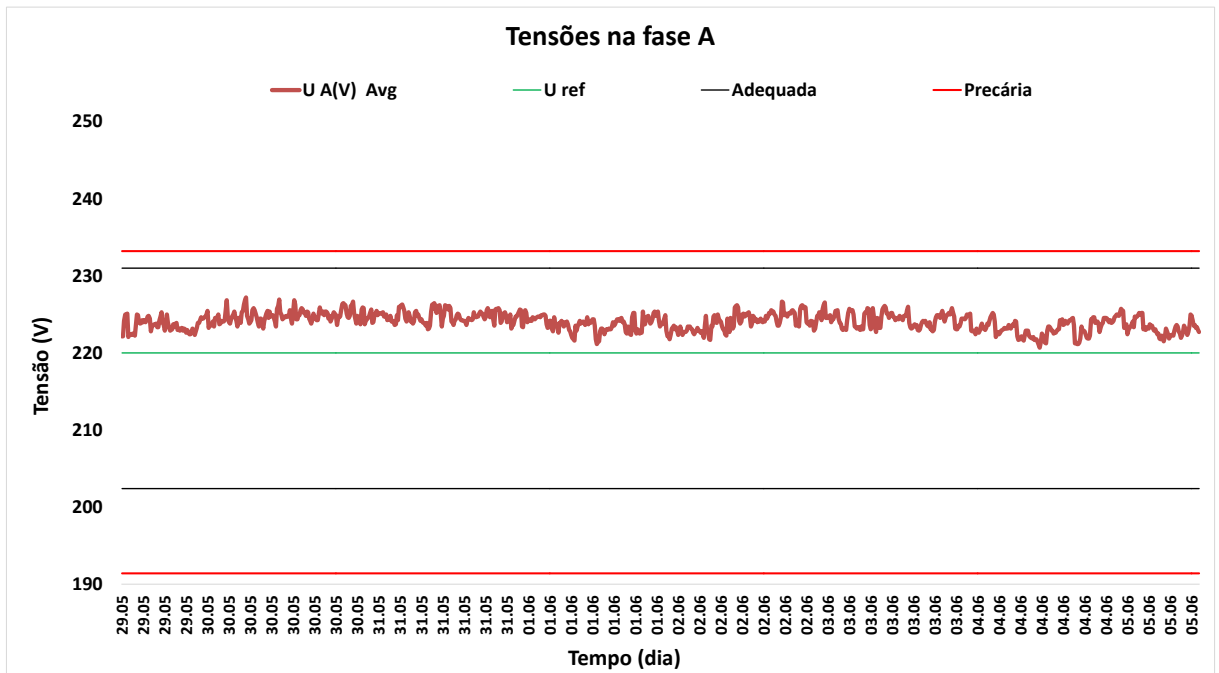
Segundo o PRODIST o conjunto de leituras para gerar indicadores da qualidade do produto de regime permanente deve compreender o registro de 1008 leituras válidas obtidas em intervalos consecutivos de 10 minutos (período de agregação ou integração) com período de subintegração entre 12 ciclos (0,2 segundos), respeitando o período definido pelo PRODIST que é de 12 a 15 períodos. Ainda define que devem ser expurgadas leituras em que ocorra variações de temporárias ou interrupções de longa duração. Durante as 1296 leituras foram detectadas 5 anomalias de tensão. Estas anomalias devem ser expurgadas da análise de regime permanente. Duas anomalias ocorreram do dia 29 de abril dentro do mesmo intervalo de análise de regime permanente e as outras 3 ocorreram no dia 04 de junho em dois períodos seguidos de análise de regime permanente.

Assim, estes 3 períodos foram exportados das análises de qualidade de regime permanente e os 3 períodos subsequentes foram adicionados a análise

Desta forma o conjunto de 1008 leituras válidas tem início 29/5/2017 às 10 horas e 49 minutos e foi fim no dia 05/6/2017 às 10 horas e 19 minutos com 3 períodos expurgados. O PRODIST define que para medições de nível de tensão de regime permanente devem ser expurgados os intervalos de medições de 10 minutos que apresentem variações temporárias de tensão e que estes intervalos devem ser substituídos por igual número de leituras válidas subsequentes. Os períodos de 29/5 às 18:29 minutos, 04/5 às 18:49 minutos e 04/5 às 18:59 minutos foram expurgados por anomalias de tensão.

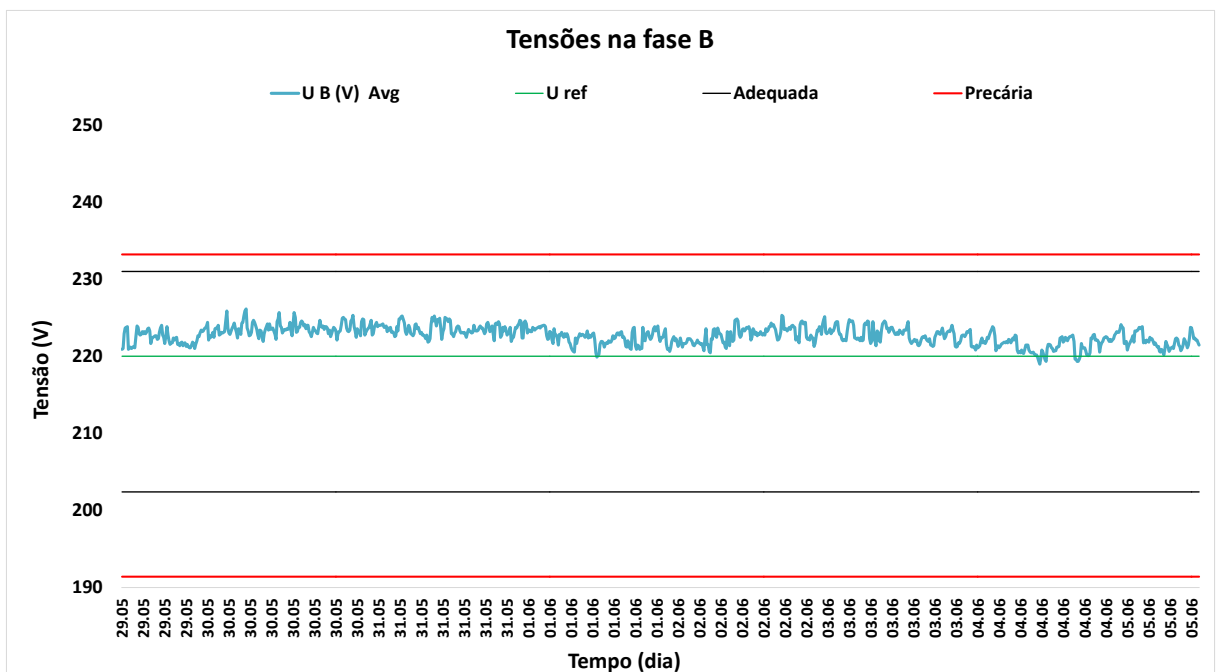
O gráfico das tensões medidas nas fazes A, B e C podem ser observados nas figuras (20), (21) e (22).

Figura 20: Tensões de regime permanente na fase A.



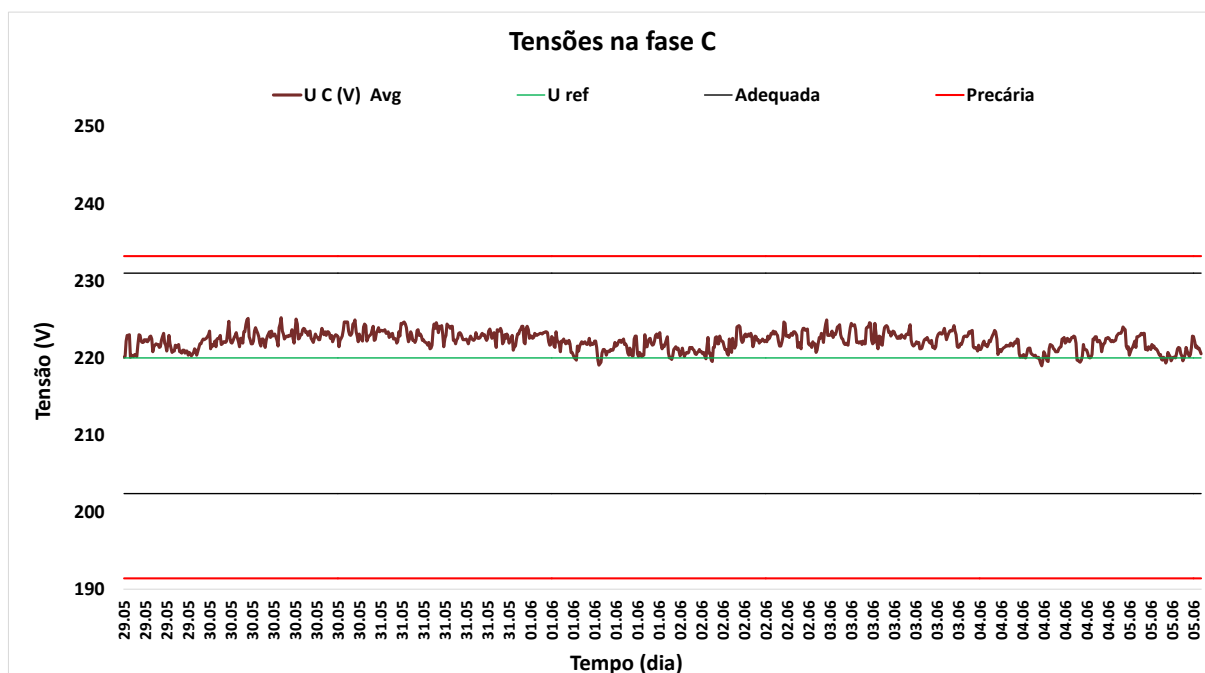
Fonte: Autor (2017).

Figura 21: Tensões de regime permanente na fase B.



Fonte: Autor (2017).

Figura 22: Tensões de regime permanente na fase C.



Fonte: Autor (2017).

É possível observar que em nenhum momento a tensão medida ficou fora da faixa adequada de tensão. O índice de duração relativa da transgressão para tensão precária (DRP) e índice de duração relativa da transgressão para tensão crítica (DRC) que dependem do número de leituras na faixa precária e crítica são facilmente calculados já que nenhuma leitura está fora da faixa adequada, ou seja, é menor que 92% ou maior que 105% do valor nominal (220 V).

Ainda é importante ressaltar que como os valores de DRP e DRC são iguais a zero o cálculo que estabelece uma compensação financeira para clientes em caso de problemas de qualidade de tensão de regime permanente é também igual a zero, conforme equações (10) e (11).

$$DRP = 0\% \quad (10)$$

$$DRC = 0\% \quad (11)$$

A média e desvio padrão dos 1008 valores são apresentados na tabela (2).

Tabela 2: Valores estatísticos das medidas de regime permanente.

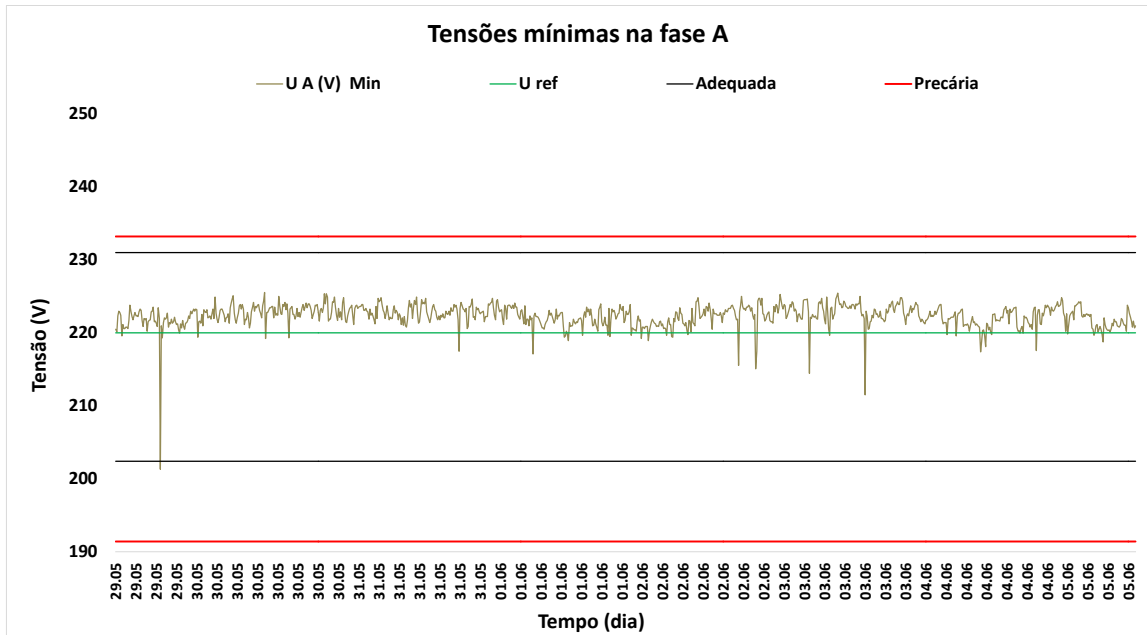
Fase	Média	Desvio Padrão
A	224,0	1,12
B	222,7	1,17
C	222,2	1,17

Fonte: Autor (2017).

Os valores médios estão acima da tensão nominal de 220 V e a não apresentam muita variação em relação à média como ilustra o baixo desvio padrão. A maior diferença entre máximo e mínimo ocorre na fase B e é de apenas 3,16%

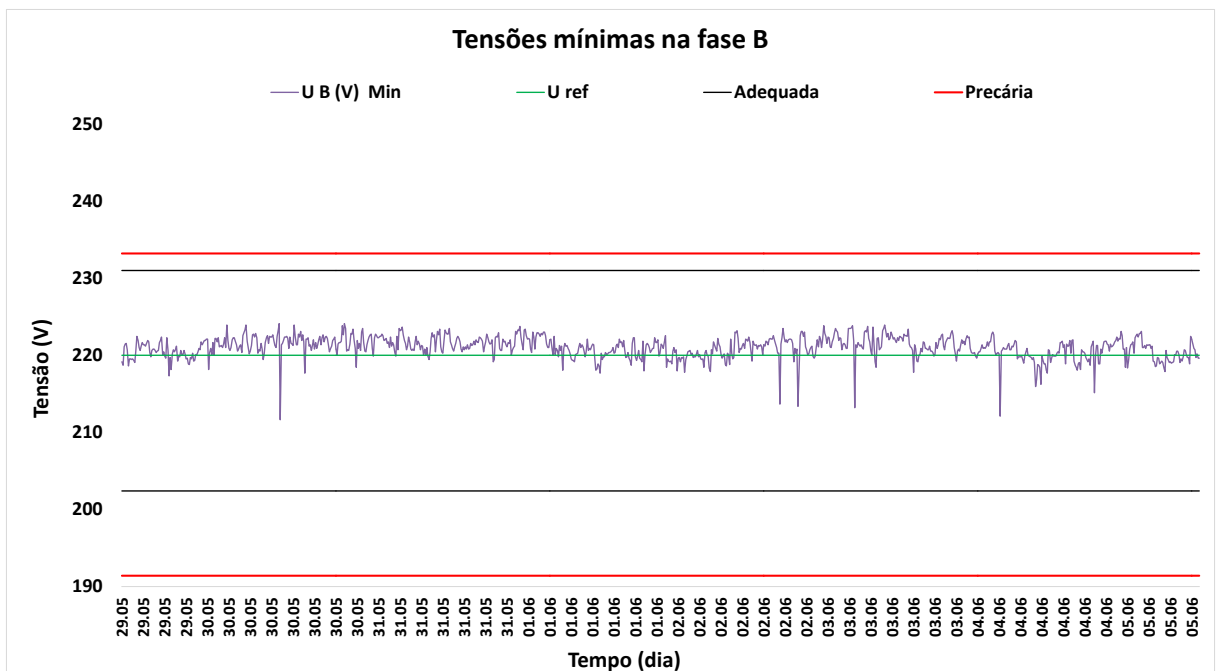
O analisador de qualidade usado para obter os dados disponibiliza no relatório de tensão de regime permanente os valores médios, máximos e mínimos. Analisar o comportamento dos valores mínimos e máximos é interessante para entender o comportamento da tensão em função do tempo e ilustrar que além de estável na média o valor de tensão no caso analisado apresenta pouca variabilidade dentro das análises de 10 minutos.

Figura 23: Tensões mínimas na fase A.



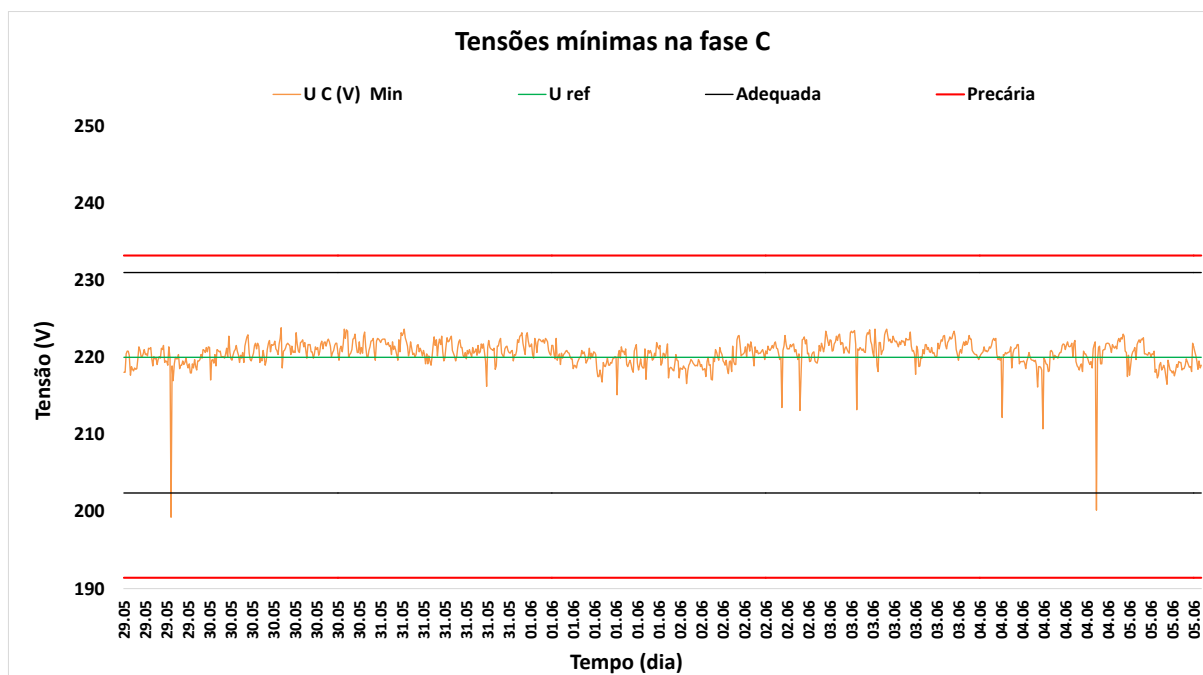
Fonte: Autor (2017).

Figura 24: Tensões mínimas na fase B.



Fonte: Autor (2017).

Figura 25: Tensões mínimas na fase C.

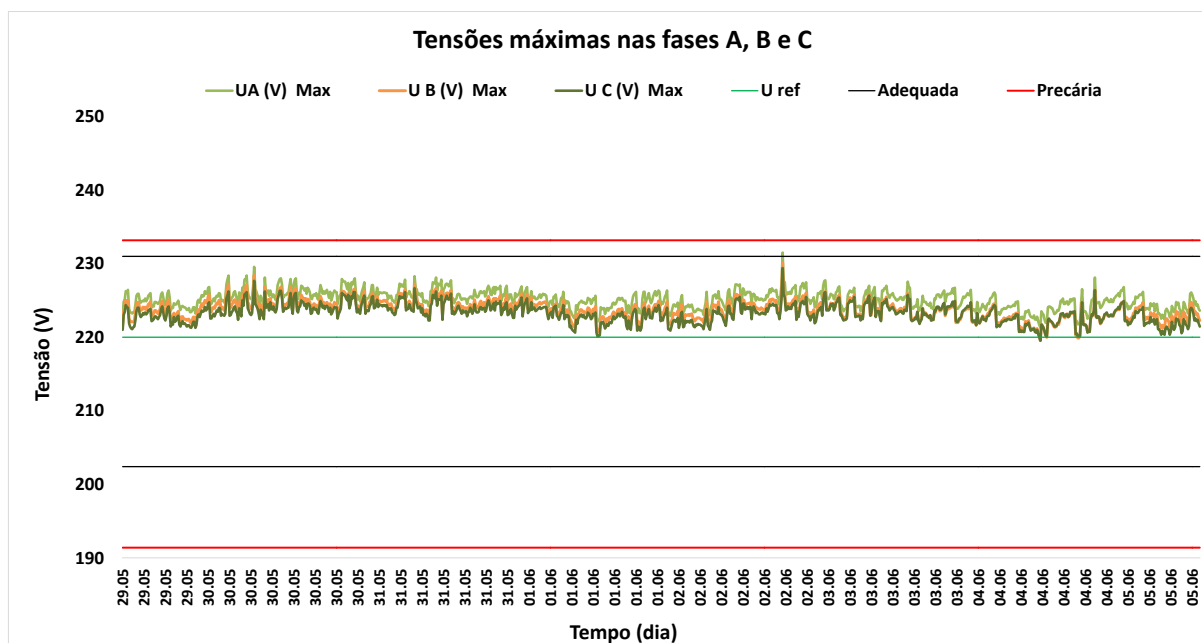


Fonte: Autor (2017).

Note que mesmo quando os valores mínimos são comparados com os valores precários e críticos apenas em 3 instantes a tensão mínima encontra-se fora da faixa adequada. Isto ilustra que a tensão é estável ao longo do tempo e não sofre grandes variações. As tensões mínimas foram registradas em 29/5 às 18 horas e 19 minutos para fase A e fase C e 04/6 às 18 horas e 39 minutos também para a fase C. Importante ressaltar que mesmo com o expurgo dos períodos em que anomalias foram observadas ainda foram encontrados mínimos que rompem o limite de tensão adequado. Isto deve-se ao fato de que o limite de tensão adequada admite um desvio de 8% da tensão nominal de 220 e as anomalias são caracterizadas por um desvio superior a 10% da tensão nominal (tensão nominal flutuante).

Uma análise das tensões máximas ilustra que não ocorreram grandes variações de tensão neste sentido. O gráfico ilustra as tensões máximas nas 3 fases ao longo do tempo.

Figura 26: Tensões máximas nas fases A, B e C.



Fonte: Autor (2017).

Na análise das tensões máximas observa-se que em apenas uma medida a tensão máxima rompe a faixa de tensão adequada. Esta tensão medida foi de 231,51 V, no período medido entre 17 horas e 49 minutos e 17 horas e 59 minutos do dia 2 de junho e ilustra que mesmo que o sistema tenha sido configurado para trabalhar com tensão média superior a 220 V não existem ocorrência de sobretensão e possíveis paradas relacionadas a este fenômeno.

Mesmo que não tenham sido observadas variações medidas de tensão máxima acima da faixa adequada de tensão de regime permanente não foram detectados eventos de elevação de tensão durante a gravação das anomalias. Isto deve-se ao fato que a faixa adequada de tensão de regime permanente aceita uma variação de até 5% da tensão nominal, enquanto o evento só é caracterizado como uma variação de tensão de curto duração caso exceda 10% do valor da tensão nominal.

3.3.2 Variações de tensão de curta duração

As medidas de variações de tensão de curta duração foram obtidas usando tensão nominal de referência variável seguindo as orientações do PRODIST. Desta forma as variações de tensão de curta duração apresentadas na tabela 3 têm diferentes tensão de referência que depender do momento em que foram obtidas.

Tabela 3: Variações de tensão de curta duração.

Evento	Instante inicial	Duração	Tipo de evento	Tensão de referência	Tensão mínima	Variação
Anom. Ph. A	26.05.2017. 06:32:02.07	0,08 s	down	226,19	186,62	82,5%
Anom. Ph. A	29.05.2017. 18:24:10.63	0,10 s	down	226,37	201,13	88,9%
Anom. Ph. C	29.05.2017. 18:24:10.63	0,10 s	down	224,11	199,17	88,9%
Anom. Ph. C	04.06.2017. 18:45:34.58	0,36 s	down	225,95	199,9	88,5%
Anom. Ph. C	04.06.2017. 18:51:52.38	0,35 s	down	224,48	200,82	89,5%
Anom. Ph. C	04.06.2017. 18:52:25.13	0,36 s	down	225,12	200,91	89,2%

Fonte: Autor (2017).

O aparelho foi configurado para armazenar variações de tensão de curta duração com tolerância de 5% devido a disponibilidade de memória e para possíveis estudos futuros. A tabela apresenta apenas eventos em que a tensão teve variação superior a 10% como definido pelo PRODIST. O Módulo 8 define também formas de agregação de eventos de variação de curta duração. Eventos simultâneos em diferentes fases devem ser agrupados e um único evento que tem a duração definida como o intervalo de tempo decorrido entre o instante em que o primeiro dos eventos transpõe determinado limite e o instante em que o último dos eventos retorna para determinado limite.

Ainda existe a agregação de eventos consecutivos, assim o evento que representa o intervalo de 3 minutos é aquele com maior diferença absoluta da tensão nominal. Seguindo os critérios definidos no PRODIST a tabela 4 apresenta os eventos de variações de tensão de curta duração atualizados segundo regras de agregação.

Tabela 4: Variações de tensão de curta duração agregadas.

N	Evento	Instante inicial	Duração	Tipo de evento	Tensão de referência	Tensão mínima	Variação
1	Anom. Ph. A	26.05.2017. 06:32:02.07	0,08 s	down	226,19	186,62	82,5%
2	Anom. Ph. A	29.05.2017. 18:24:10.63	0,10 s	down	226,37	201,13	88,9%
3	Anom. Ph. C	04.06.2017. 18:45:34.58	0,36 s	down	225,95	199,9	88,5%
4	Anom. Ph. C	04.06.2017. 18:52:25.13	0,36 s	down	225,12	200,91	89,2%

Fonte: Autor (2017).

Todos os eventos registrados durante a análise são classificados como variações momentâneas de tensão e denominados como afundamentos momentâneos de tensão devido a suas características, duração superior ou igual a um ciclo e inferior ou igual a 3 segundos e com magnitude entre 0,1 e 0,9 pu. Como dito anteriormente as medidas de VTCD foram feitas durante dois períodos e o tempo total de medição foi de 25 dias. Como o PRODIST define indicadores baseado em medições de 30 dias todos os indicadores apresentados neste estudo são normalizados afim de ajustar a diferença de dias medidos.

A frequência de eventos de VTCD definido anteriormente como o número de eventos no período seria igual a 4 se o período medido fosse de 30 dias. Para uma análise de 25 dias a frequência de 3,33.

Os eventos foram classificados segundo sua magnitude e duração como definido no PRODIST. Mesmo com eventos de duração e magnitudes consideravelmente diferentes todos os 4 eventos pertencem à região A e a figura 26 ilustra a localização de cada evento dentro da própria região. Note que os eventos 1 e 2 estão contidos na mesma subdivisão de tempo e com diferentes magnitudes, enquanto os eventos 2, 3 e 4 apresentam faixa de magnitude coincidente.

Figura 27: Classificação das VTCD em regiões de sensibilidade.

Amplitude (pu)	Duração						
	[16,67 ms - 100 ms]	(100 ms - 300 ms)	(300 ms - 600 ms)	(600 ms - 1 seg)	(1 seg - 3 seg]	(3 seg - 1 min]	(1 min - 3 min]
> 1,15	Região H			Região I			
(1,10 - 1,15]	Região H			Região I			
(0,85 - 0,90]	Evento 2	Região A		Evento 3 e 4			
(0,80 - 0,85]	Evento 1	Região A		Evento 3 e 4			
(0,70 - 0,80]	Região B	Região D		Região G			
(0,60 - 0,70]	Região B	Região D		Região G			
(0,50 - 0,60]	Região C	Região D		Região F			
(0,40 - 0,50]	Região C	Região D		Região F			
(0,30 - 0,40]	Região E		Região F				
(0,20 - 0,30]	Região E		Região F				
(0,10 - 0,20]	Região E		Região F				
<0,10	Região E		Região F				

Fonte: Autor (2017).

Como todos eventos estão na região A o fator de impacto é igual a zero devido ao fator de ponderação de eventos na região A ser igual a zero e estar como multiplicador do numerador da expressão de fator de impacto. Isto ilustra que os eventos analisados não devem causar impacto no processo produtivo já que todos estão localizados na região de imunidade das curvas de sensibilidade como CBEMA, ITIC e SEMI F47.

3.3.3 Análise da produção

É muito importante analisar como comportou-se o processo produtivo durante o período em que as medições foram realizadas. Dados relevantes do processo produtivo são apresentados para demonstrar a variação e como isto pode ter influenciado nos resultados apresentados anteriormente. Para isto são comparados alguns indicadores da linha de produção analisada durante o período medido e indicadores da linha durante o mês de dezembro de 2016 normalizado para as mesmas horas medidas.

Estes indicadores evidenciam que o momento escolhido para as medidas teve relação direta com os resultados. Ao comparar os dois períodos é fácil inferir que para entender o real impacto das VTCD no processo industrial devemos fazer medições constantes e que capturem o maior número de dados possíveis.

Tabela 5: Dados da linha de produção 512.

Indicador	Período medido	Dezembro de 2016	Dezembro de 2016 (normalizado)
Volume produzido (HL)	74657	161065	139590
Disponibilidade de linha (%)	76,64%	80,50%	80,50%
Eficiência de linha (%)	78,96%	86,28%	86,28%
Horas disponíveis (horas)	224,14	598,93	519,07
Horas de produção líquida (horas)	175,37	502,44	435,45
Horas paradas por utilidades (horas)	0,72	13,45	11,66
Horas por Conces. EE (horas)	0	8,98	7,78
Ocorrências Dist. QEE	0	12	10,40

Fonte: Autor (2017).

O comparativo entre os dois períodos é claro em relação ao período da linha de produção. No mês de dezembro, mês que tradicionalmente apresenta maior volume de produção no ano, o volume total é mais que o dobro do volume produzido no período analisado. Mesmo quando os tempos são normalizados o volume produzido ainda é aproximadamente 86% superior ao período analisado.

Ainda assim o indicador que mais diferencia os dois períodos é o de horas de produção líquida, o seja, o número de horas em que a linha de produção estava funcionando e produzindo em condições normais. No período analisado este tempo foi de 175,37 horas, enquanto no período de dezembro normalizado este tempo foi de 435,45 horas. Esta variação de demanda é proporcional para todas as linhas de produção da unidade industrial e a outra unidade industrial alimentada pela mesma subestação de transmissão é uma produtora de insumos usados na fabricação de cerveja. Desta forma com a redução de demanda da unidade analisada a outra fábrica que utiliza o sistema também apresenta significativa redução de produção.

Isto deixa claro que a demanda por energia na região durante o período analisado estava relativamente baixa. Como sabe-se, distúrbios da qualidade de energia elétrica têm diversas origens e são facilmente agravadas quando o sistema está sob forte demanda. Prova disto são as horas que a linha de produção ficou indisponível por problemas relacionados a qualidade

de energia elétrica durante o período de dezembro de 2016. A decisão de análise da qualidade de energia para o projeto de diplomação foi baseada na necessidade de explorar as características destes distúrbios e traçar estratégias para minimizar estes impactos relacionados a qualidade de energia.

Durante o mês de dezembro o tempo indisponível por problema de qualidade de energia elétrica identificado como indisponibilidade de concessionária de EE, foi de 8,98 horas. Este tempo de indisponibilidade deve-se a 12 eventos discriminados na tabela 6.

Tabela 6: Dados de indisponibilidade de EE em dezembro de 2016 na linha 512.

Data	Hora	Tempo (m)	Tipo	Descrição
13/12/2016	19:00	100	Concessionária de EE	Pico de energia
25/12/2016	23:00	6,45	Concessionária de EE	Pico de energia(parada de baixa vel.)
26/12/2016	1:05	33,33	Concessionária de EE	Falta de energia elétrica
26/12/2016	2:10	33,33	Concessionária de EE	Pico de energia
26/12/2016	3:00	60	Concessionária de EE	Pico de energia
26/12/2016	4:12	46,67	Concessionária de EE	Pico de energia
26/12/2016	5:10	46,67	Concessionária de EE	Pico de energia
26/12/2016	6:10	40	Concessionária de EE	Pico de energia
27/12/2016	20:10	6,67	Concessionária de EE	Pico de energia
28/12/2016	16:30	14,70	Concessionária de EE	Pico de energia
29/12/2016	16:28	30	Concessionária de EE	Pico de energia
30/12/2016	14:00	121	Concessionária de EE	Pico de energia

Fonte: Autor (2017).

A tabela 6 ilustra os dados apontados na unidade industrial e deixam evidente que uma análise mais profunda deveria ser feita para caracterizar os problemas de qualidade. A descrição do evento é inserida no sistema de eficiência de linha por um operador que caracteriza o evento. Os eventos descritos como pico de energia de fato podem ser afundamentos ou elevações de tensão e somente através de uma análise como a que foi feita para o projeto de diplomação que os problemas são corretamente caracterizados.

Caracterizar os eventos e determinar as principais características como tempo de duração e magnitude são essenciais para proteger o processo e evitar que no próximo momento de grande demanda a unidade industrial sofra com problemas de qualidade. O período analisado

não apresentou os problemas que são recorrentes na unidade industrial e a análise dos problemas ocorridos em dezembro de 2016 ilustra que o monitoramento da qualidade de energia elétrica deve ser constante na unidade industrial.

4. CONCLUSÃO

A qualidade de energia elétrica afeta o processo produtivo de diversas maneiras. Neste trabalho foram escolhidas tensão de regime permanente e variações de tensão de curta duração para entender o impacto destes indicadores de qualidade do produto no processo industrial. As medidas de tensão de regime permanente obtidas durante o período disponível para a aquisição de dados ilustram grande estabilidade no indicador que em nenhum período deixou a região adequada de tensão. Quando analisados os valores mínimos e máximos de tensão as medidas ilustram pouca variabilidade e reforçam a análise de que a qualidade de produto em relação a tensão de regime permanente é adequada e não representa problemas para o processo.

Uma observação importante a ser feita sobre as medidas de tensão de regime permanente é em relação ao valor médio de tensão ao longo do tempo. Mesmo estando sempre dentro da região adequada de tensão e apresentando pouca variabilidade a tensão média é de 222,2 V para a fase C, 222,7 V para fase B e 224 V para fase A. Todas estas médias são superiores aos 220 V de tensão nominal. Isto reforça a condição de baixa demanda do sistema no período analisado. Em condições normais de demanda a tensão de regime permanente tende a ser mais próxima do valor nominal e tendendo ao limite inferior.

A carga média em maio de 2017 segundo o boletim de carga mensal divulgado pelo Operador Nacional do Sistema no subsistema Sul foi de 10,624 MW médio. No boletim referente ao mês de dezembro de 2016 a carga mensal no subsistema Sul foi de 11,225 MW médio ilustrando a redução de demanda. A tensão de regime permanente ilustra-se estável ao longo do tempo analisado este indicador de qualidade não ilustra impacto durante o período analisado nem possível impacto para momentos de grande demanda de energia ou mesmo de grande volume de produção.

A análise de variações de curta duração demonstrou que durante o período medido as variações detectadas não influenciaram no processo industrial. Poucos eventos foram detectados, metade dos eventos ocorreram em instantes em que a linha de produção não estava ativa e todos os eventos foram de baixa magnitude e fator de impacto igual a zero. Entretanto a análise e comparação do período medido com um período de grande demanda produtiva ilustra que um estudo mais detalhado deve ser feito para proteger o processo de problemas de qualidade deste tipo.

Um período maior de medidas de variações de tensão de curta duração seria essencial para obter dados mais precisos sobre o comportamento do sistema produtivo na presença destes eventos. Caracterizar os eventos em épocas de grande demanda como o verão e encontrar os equipamentos sensíveis dentro da linha de produção pode garantir que pequenos ajustes nestes equipamentos tornem o processo imune as variações mais comuns nestes períodos. O estudo foi realizado com foco na linha de produção mais importante da unidade, seria importante também expandir o estudo para as linhas de envase e ainda para as áreas do processo da produção de cerveja que também são impactadas por variações da qualidade de energia elétrica.

Em uma análise mais detalhada com medidas individuais de cada linha de produção e célula de processo pode oferecer uma resposta para a origem dos eventos. O estudo focou em uma única linha de produção, assim fica impossível analisar a influência da partida de uma linha ou processo na variação da qualidade de energia dos outros processos. O Módulo 8 do PROSDIST ilustra-se adequado para procedimentos envolvendo consumidores residenciais ou de baixa demanda. Um estudo que visa garantir confiabilidade a processos produtivos de indústrias de grande porte precisa ser mais profundo e principalmente compreender períodos maiores de análise que os indicados no PRODIST para análise de variações de regime permanente. Em um estado como o Rio Grande do Sul que apresenta grande variação de

demanda de energia ao longo do ano por influência do clima e uma indústria como a analisada que também experimenta grande variação dependente do clima e época do ano o estudo de 30 dias como indicado não é suficiente para garantir imunidade ao sistema produtivo em relação a variações de tensão de curta duração.

O estudo feito mostrou que a tensão de regime permanente não influencia no processo produtivo e é estável no sistema analisado, porém deixa em aberto a possibilidade de um estudo mais detalhado em relação a variações de tensão de curta duração e o impacto destes eventos no processo produtivo. A complexidade de uma grande indústria não permite que um estudo de curta duração apresente resultado conclusivo em relação a variações de tensão de curta duração.

REFERÊNCIAS

- [1] DUGAN, R. Electrical power systems quality. New York: McGraw-Hill, 2012.
- [2] BOLLEN, M. What is power quality?. Electric Power Systems Research, v. 66, n. 1, p. 5-14, 2003.
- [3] ANEEL. Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST: Módulo 8 Agência Nacional de Energia Elétrica. 90 p. 2017.
- [4] SOARES JR., A.; SCHROEDER, M.; VISACRO, S. Transient Voltages in Transmission Lines Caused by Direct Lightning Strikes. IEEE Transactions on Power Delivery, v. 20, n. 2, p. 1447-1452, 2005.
- [5] BOLLEN, M. Voltage sags: effects, mitigation and prediction. Power Engineering Journal, v. 10, n. 3, p. 129-135, 1996.
- [6] MCGRANAGHAN, M. et al. Impact of utility switched capacitors on customer systems-magnification at low voltage capacitors. IEEE Transactions on Power Delivery, v. 7, n. 2, p. 862-868, 1992.
- [7] VILELA MENEZES, T. Estratégia para análise de afundamento de tensão no planejamento do sistema elétrico. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Minas Gerais, 2007.
- [8] FREANKLIM MARQUES DE CAMPOS, A. Cálculo de sobretensões causadas por descargas atmosféricas indiretas em linhas de distribuição aéreas considerando falhas de isolamento. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Minas Gerais, 2012.
- [9] BOLLEN, M. Voltage sags: effects, mitigation and prediction. Power Engineering Journal, v. 10, n. 3, p. 129-135, 1996.
- [10] CONRAD, L.; LITTLE, K.; GRIGG, C. Predicting and preventing problems associated with remote fault-clearing voltage dips. IEEE Transactions on Industry Applications, v. 27, n. 1, p. 167-172, 1991.
- [11] BOLLEN, M. Fast assessment methods for voltage sags in distribution systems. IEEE Transactions on Industry Applications, v. 32, n. 6, p. 1414-1423, 1996.
- [12] ONS - Boletim de Carga. Disponível em: <http://www.ons.org.br/analise_carga_demanda/index.aspx>. Acesso em: 10 jun. 2017.
- [13] CEEE Distribuição coloca em operação a nova Subestação Águas Claras - Secretaria de Minas e Energia. Disponível em: <<http://minasenergia.rs.gov.br/ceee-distribuicao-coloca-em-operacao-a-nova-subestacao-aguas-claras>>. Acesso em: 3 ago. 2017.