UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO JOÃO DEL-REI PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO	CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS DIRETORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA – PPGEL	

AVALIAÇÃO DOS IMPACTOS DA QUALIDADE DE ENERGIA ELÉTRICA NO ATENDIMENTO ÀS CARGAS CRÍTICAS DA INDÚSTRIA DE SEMICONDUTORES

Lourenço Modesto dos Anjos

Orientador: Prof. Marco Aurélio de Oliveira Schroeder

Coorientador: Prof. Leonidas Chaves de Resende

Dissertação submetida ao PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA – PPGEL, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Dezembro de 2020

São João del-Rei – MG – BRASIL

Lourenço Modesto dos Anjos

AVALIAÇÃO DOS IMPACTOS DA QUALIDADE DE ENERGIA ELÉTRICA NO ATENDIMENTO ÀS CARGAS CRÍTICAS DA INDÚSTRIA DE SEMICONDUTORES

Banca Examinadora

Orientador: Prof. Marco Aurélio de Oliveira Schroeder

Coorientador: Prof. Leonidas Chaves de Resende

Prof. Anselmo Barbosa Rodrigues

Prof. Márcio Matias Afonso

São João del-Rei, 23 de dezembro de 2020

Dedico este trabalho à minha esposa

Tattiane, aos meu pais Maria José e Geraldo

e aos meus irmãos Loraidan e Maximira (in memoriam).

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus, por me oferecer a família que tenho e todas as oportunidades recebidas.

À Tattiane, minha esposa, agradeço por toda a paciência durante os momentos de ausência, palavras de incentivo quando tudo parecia perdido e principalmente por acreditar que seria capaz.

Aos meus pais Geraldo Lourenço e Maria José, por todo o suporte e dedicação na construção da minha educação voltada para o constante desenvolvimento próprio.

Aos meus irmãos Loraidan e Maximira, por sempre acreditarem em meu potencial.

A todos os professores e colaboradores do PPGEL, que foram de extrema importância na minha formação, em especial aos Professores Leonidas e Marco Aurélio e a secretária Mauricéia.

Agradeço também aos amigos do curso de mestrado, pela corriqueira contribuição no decorrer de cada etapa.

RESUMO

Devido à crescente utilização de automação em processos industriais, de equipamentos de cargas críticas, de computadores pessoais e de dispositivos controlados eletronicamente em instalações residenciais, atualmente há um maior interesse em relação a problemas de Qualidade de Energia Elétrica (QEE). Um aspecto importante relacionado à QEE é o afundamento de tensão da rede de distribuição. Ou seja, o produto entregue dentro dos limites especificados pelos órgãos reguladores. Devido aos problemas causados pelos distúrbios de tensão, onde podem-se citar, desligamento de equipamentos sensíveis, danos por sobretensões, aumento de perdas em vazio nos transformadores e operações com baixa eficiência dos equipamentos elétricos, existe esta preocupação com o afundamento de tensão. Este trabalho visa contribuir para os estudos de Variações de Tensão de Curta Duração (VTCD), buscando demonstrar o real impacto que causam em consumidores industriais, mesmo com o atendimento pleno aos padrões determinados em normas e resoluções. São apresentadas inicialmente, as principais normas nacionais e internacionais aplicáveis às VTCD, caracterização de eventos e verificação de impacto sobre as cargas, analisando suas similaridades e particularidades. O estudo sobre a implantação de uma fábrica de semicondutores no Brasil, tem como objetivo avaliar os impactos da baixa qualidade de energia desde a fase de estudos do sistema elétrico até a operação/produção final. Por fim, é apresentada uma proposta de avaliação mais detalhada de impactos de VTCD, no âmbito normativo.

ABSTRACT

Due to the increasing use of automation in industrial processes, critical load equipment, personal computers and electronically controlled devices in residential installations, there is currently a greater interest in relation to Power Quality (QEE) problems. An important aspect related to QEE is the voltage compliance of power system. That is, the product delivered within the limits specified by Organs regulatory agencies. Due to the problems caused by voltage disturbances, which can be mentioned, disconnection of sensitive equipment, damage from voltage swell, increased losses in transformers and low efficiency operations of electrical equipment, there is this concern with voltage compliance. This work aims to contribute to the studies of voltage sags and swells (VTCD), seeking to demonstrate the real impact they cause on industrial consumers, even with full compliance with the standards determined in norms and resolutions. Initially, the main national and international standards applicable to VTCD are presented, characterization of events and verification of impact on loads, analyzing their similarities and peculiarities. The study on the implantation of a semiconductor factory in Brazil, aims to evaluate the impacts of low power quality from the phase of studies of the electrical system to the final operation / production. Finally, a proposal for a more detailed assessment of VTCD impacts is presented, within the normative scope.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS ..... **I**
LISTA DE TABELAS ..... **IV**
LISTA DE ABREVIATURAS ..... **V**
LISTA DE SÍMBOLOS ..... **VII**
1. INTRODUÇÃO **9**
1.1 QUALIDADE DE ENERGIA ELÉTRICA 9
1.2 VARIAÇÕES DE TENSÃO DE CURTA DURAÇÃO 14
1.3 MOTIVAÇÃO E OBJETIVOS DO TRABALHO 15
1.4 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO 16
2. QUALIDADE DE ENERGIA ELÉTRICA **18**
2.1 PRODIST – SUBMÓDULO 8 18
2.2 PROCEDIMENTOS DE REDE – Submódulo 2.8 21
2.3 IEEE – STD. 1159 21
2.4 EN 50160 – NORMA EUROPEIA E SUL-AFRICANA NRS-048 23
2.5 CONCLUSÕES 25
3. VTCD NA INDÚSTRIA DE SEMICONDUTORES **26**
3.1 INTRODUÇÃO 26
3.2 TOLERÂNCIA DE EQUIPAMENTOS A VTCD 26
3.2.1 Limites CBEMA/ITIC 27
3.2.2 Limites – CURVA SEMI F47 29
3.3 ANÁLISE CRÍTICA DA METODOLOGIA DA M&D E SUA APLICAÇÃO A VTCD EM GERAL 32
3.3.1 Metodologia M&D para evento de curta duração 32
3.3.2 Metodologia de medição 32
3.3.3 Eventos distintos com mesma Magnitude e Duração 36
3.4 CONCLUSÕES 37
4. DESAFIOS NA IMPLANTAÇÃO DA INDÚSTRIA DE SEMICONDUTORES – CASE **38**
4.1 INTRODUÇÃO 38
4.2 ESTUDOS DE VIABILIDADE 38

4.2.1 Análise de afundamentos de tensão esperados no sistema de suprimento ao consumidor 40
4.2.2 Configuração do Sistema Elétrico 40
4.2.3 Legislação 42
4.2.4 Metodologia de Análise 42
4.2.4.1 I_{sev} – Índice de Desempenho de Subestações 42
4.2.4.2 Histograma de Frequência de Ocorrência 45
4.2.4.3 Região de Vulnerabilidade 45
4.2.5 Resultados 45
4.2.5.1 Histograma de Frequência de Ocorrência 45
4.2.5.2 Índice de Desempenho de SE – I_{sev} 47
4.2.5.3 Região de Vulnerabilidade 48
4.2.5.4 Análise dos Resultados 49
5. SISTEMAS PARA GARANTIR A QUALIDADE E ININTERRUPTABILIDADE DA ENERGIA 50
5.1 AVALIAÇÃO DOS SISTEMAS IMPLANTADOS 50
5.2 SISTEMA DE SUPRIMENTO (CONCESSIONÁRIA) 50
5.2.1 Medições 50
5.2.2 Resultado das medições 51
5.2.3 Comportamento da tensão fase-neutro 51
5.2.4 Comportamento da tensão fase-fase 53
5.2.5 Comportamento da frequência 54
5.2.6 Comportamento das harmônicas de tensão 55
5.2.7 Medições de grandezas elétricas 55
5.2.8 Conclusões 56
5.3 SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO INTERNO – SE DO CLIENTE 56
5.3.1 Qualidade de Energia e Ininterruptabilidade – Estudos 56
5.3.1.1 Recebimento e Transformação 58
5.3.1.2 Sistema Dinâmico 59
5.3.1.3 Grupo Motogeradores (GMGs) 63
5.3.2 Implantação 63
5.3.3 Operação 65
5.3.3.1 UPS 65
5.3.3.2 GMG 66

5.4 CONCLUSÕES.....66
6. PROPOSIÇÃO DE COMPENSAÇÕES FRENTE AS VTCD.....68
6.1 FREQUÊNCIA DE OCORRÊNCIAS DE EVENTOS VTCD (f_{ei}).....68
6.2 DURAÇÃO DE INTERRUPÇÃO INTERNA INDIVIDUAL POR UNIDADE CONSUMIDORA (DIIC).....69
6.3 CONCLUSÕES.....70
7. CONCLUSÕES 71
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....73

LISTA DE FIGURAS

Figura 1-1 – Ilustração dos principais distúrbios de Qualidade de Energia [SV12]. ..14

Figura 2-1 – Faixas de Tensão em Relação à de Referência (Fonte: [A20]).....19

Figura 2-2 – Caracterização de um Afundamento de Tensão Norma Americana (Fonte: [DP17]) 23

Figura 2-3 – Caracterização de “voltage dip” pela definição da Norma Europeia (Fonte: [DP17]) 25

Figura 3-1 – Custo de interrupções por distúrbios elétricos, por tipo de indústria (Adaptado de [AN02]).....26

Figura 3-2 – Curva CBEMA: Limites de duração de sub e sobretensões (Fonte: [DP17]) 28

Figura 3-3 – Limites de tolerância ITIC (Fonte: [DP17]). 29

Figura 3-4 – Limites de tolerância SEMI F47 (Fonte: [DP17]). 30

Figura 3-5 – Eventos de Afundamento de Tensão com mesma Magnitude e Duração (Fonte: [DP17]).....36

Figura 3-6 – Eventos 01 e 02 Distintos com mesma representação de M&D (Fonte: [DP17]) 37

Figura 4-1 – Processo pMOS do CCS/UNICAMP para fabricação do chip teste (Fonte: [D06]).....39

Figura 4-2 – Sistema de conexão da SE do Consumidor (Fonte: [C18]).....40

Figura 4-3 – Sistema Elétrico regional – SE do cliente (Fonte: [C18]).....41

Figura 4-4 – Densidade de Descargas Individuais/km^2/ano* (Fonte: [C18]).....43

Figura 4-5 – Sistema Elétrico x Densidade de Descargas Georreferenciados (Fonte: [C18])....44

Figura 4-6 – Sistema Elétrico Georreferenciado (GEOTRANS) (Fonte: [C18])....44

Figura 4-7 – Histograma de Frequência Estimada – Simulações Trifásicas (Fonte: [C18])....46

Figura 4-8 – Simulação de Frequência Estimada – Simulações Monofásicas Trifásicas (Fonte: [C18])....46

Figura 4-9 – Desempenho de SE de Consumidores – Índice I_{sev} Trifásicas (Fonte: [C18])....47

Figura 4-10 – Região de Vulnerabilidade de SE de consumidores Trifásicas (Fonte: [C18])....48

Figura 5-1 – Comportamento da tensão fase-neutro (Fonte: [U18])....51

Figura 5-2 – Comportamento da tensão fase-fase Trifásicas (Fonte: [U18])....53

Figura 5-3 – Comportamento da frequência Trifásicas (Fonte: [U18])....54

Figura 5-4 – Comportamento das harmônicas de tensão Trifásicas (Fonte: [U18])....55

Figura 5-5 – Soluções adotadas para eliminar ou mitigar os fenômenos de QEE em setores da sociedade em porcentagem da carga total instalada (Fonte: [B14])....58

Figura 5-6 – Esquema do relé regulador automático de tensão (Fonte: [U08])....59

Figura 5-7 – Volante de Inércia para armazenamento de energia cinética (Fonte: [C06])....60

Figura 5-8 – Volante de Inércia para armazenamento de energia cinética (Fonte: [C06])....60

Figura 5-9 – UPS em modo online, sem ausência total no suprimento de energia (Fonte: [C06])....61

Figura 5-10 – UPS em modo online, com ausência total no suprimento de energia (Fonte: [C06]) 62

Figura 5-11 – Unifilar Subestação Principal do Cliente (Criado pelo autor).....64

LISTA DE TABELAS

Tabela 2-1 – Classificação das VTCD segundo ANEEL 20

Tabela 2-2 – Classificação das VTCD segundo o ONS 21

Tabela 2-3 – Classificação segundo IEEE – Std 1159 (Adaptado de [I02]) 22

Tabela 2-4 – Classificação das V_{Dip} segundo EN 50160 [C99] e IEC TR 61000-2-8 (Adaptado de [I03]).....24

Tabela 2-5 – Classificação das *voltage swell* segundo EN 50160 (Fonte: Adaptado de [C99]).....24

Tabela 3-1 – Estratificação dos parâmetros para contabilização de eventos de VTCD segundo a ANEEL.....34

Tabela 3-2 – Estratificação das VTCD com base nos níveis de sensibilidade das diversas cargas segundo a ANEEL.....34

Tabela 3-3 – Fatores de ponderação e Fator de Impacto base de acordo com a tensão nominal segundo a ANEEL 35

Tabela 5-1 – Tabela resumo – Analisador EMBRASUL RE6000 (Fonte: [U18]).....52

Tabela 5-2 – Grandezas Elétricas (Fonte: [U18]).....55

Tabela 5-3 – Requisitos de Qualidade de Energia – Indústria de Semicondutores (Fonte: [C18]) 56

Tabela 5-4 – Custos aproximados para a implantação do sistema de energia ininterrupta (Criado pelo autor).....65

Tabela 6-1 - Limites de ocorrência de VTCD propostos, estratificado por amplitude e duração 69

LISTA DE ABREVIATURAS

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
ANSI	*American National Standards Institute*
CA	Corrente Alternada
CBEMA	*Computer Business Equipment Manufacturers Association*
CC	Corrente Contínua
Cemig	Companhia Energética de Minas Gerais
CENELEC	*European Committee for Electrotechnical Standardization*
CIGRÉ	*International Council on Large Electric Systems*
CPD	Centro de Processamento de Dados
CVD	*Chemical Vapor Deposition*
DIC	Duração de Interrupção Individual por Unidade Consumidora
EPRI	*Electric Power Research Institute*
EUA	Estados Unidos da América
GMG	Grupo Motogerador
IEC	*International Electrotechnical Commission*
IEEE	*Institute of Electrical and Electronics Engineers*
IGBT	*Insulated Gate Bipolar Transistor*
ITIC	*Information Technology Industry Council*
LD	Linha de Distribuição
LT	Linha de Transmissão
LTC	*Load Tap Changer*
M&D	Metodologia da Magnitude e Duração do Evento
OLTC	*On-Load Tap Changer*
ONS	Operador Nacional do Sistema Elétrico
PCMCIA	*Personal Computer Memory Card International Association*
PRODIST	Procedimentos de Distribuição
PVD	*Physical Vapor Deposition*
QEE	Qualidade da Energia Elétrica
SDAT	Sistema de Distribuição de Alta Tensão
SE	Subestação
SEMI	*Semiconductor Equipment and Materials Institute*

SEP	Sistema Elétrico de Potência
SIN	Sistema Interligado Internacional
TC	Transformador de Corrente
TI	Tecnologia da Informação
TP	Transformador de Potencial
UPS	*Uninterruptible Power Supply*
ZnO	Oxido de zinco
VTCD	Variações de Tensão de Curta Duração

LISTA DE SÍMBOLOS

DRC	Duração Relativa da Transgressão da Tensão Crítica
DRP	Duração Relativa da Transgressão da Tensão Primária
FD	Fator de Desequilíbrio de Tensão
fei	Frequência de ocorrência de VTCD
FI	Fator de Impacto
FI_{Base}	Fator de Impacto Base
fpi	Frequência de ponderação para cada região de sensibilidade
I_{sev}	Índice de Severidade
N	Número de amostras
nlc	Maior Valor entre as Fases do número de leituras na faixa Crítica
nlp	Maior Valor entre as Fases do número de leituras na faixa Precária
p.u	Valor por unidade
ta	Taxa de amostragem
tf	Tempo Final
ti	Tempo Inicial
TL	Tensão de Leitura
TR	Tensão de Referência
$V_{(12RMS)}$	Tensão Eficaz Média - 12 ciclos
V_{dip}	Tensão de Afundamento (*Voltage Dip*)
V_e	Amplitude da Tensão
V_{ef}	Tensão Eficaz
V_{maq}	Magnitude da Tensão
V_n	Tensão Nominal
V_{ref}	Tensão de Referência
V_{res}	Tensão remanescente
$V_{sr(n)}$	Tensão de Referência - Valor calculado
$V_{sr(n-1)}$	Tensão de Referência - Valor anterior ao calculado
Δ_{ADINF}	Variação da Faixa de Tensão Adequada Inferior
Δ_{ADSUP}	Variação da Faixa de Tensão Adequada Superior
Δ_{PRINF}	Variação da Faixa de Tensão Precária Inferior
Δ_{PRSUP}	Variação da Faixa de Tensão Precária Superior

Δt	Intervalo de tempo
Δte	Duração do evento

1. INTRODUÇÃO

1.1 QUALIDADE DE ENERGIA ELÉTRICA

O termo Qualidade de Energia Elétrica (QEE) tornou-se uma expressão corriqueira no setor elétrico nos últimos anos, visando expressar através de indicadores (de tensão, frequência, corrente e etc.), os padrões aceitáveis dos serviços e produtos entregues pelas concessionárias aos consumidores [A20].

É cada vez mais comum a inclusão em contratos de cláusulas contendo parâmetros mínimos de fornecimento de energia pelos fornecedores aos consumidores, prevendo multas por violação de tais condições. Isso aumenta a necessidade de se dispor de normas com limites adequados, os quais possam ser satisfeitos pelo lado do fornecedor, sem, no entanto, onerar os custos e que atendam ao consumidor, evitando assim prejuízos devido a perdas inaceitáveis [DP17].

Pode-se observar que a sensibilidade e dependência dos consumidores e seus equipamentos, estão cada vez mais ligados às condições de fornecimento do sistema de energia elétrica, tanto no nível de cargas domésticas, quanto aplicações industriais. E isto tem ocorrido, devido ao aumento da complexidade e da fragilidade das cargas.

A complexidade do problema da avaliação e controle da qualidade da energia suprida não resulta apenas da grande variedade de perturbações a que o sistema elétrico está sujeito. São relevantes também os variados efeitos que podem causar, os quais podem passar por: sobreaquecimento de máquinas elétricas devido às harmônicas; vibrações de motores devido a desequilíbrios; variações luminosas devidas a flutuações de tensão; oscilações de potência sustentadas entre as cargas e a rede durante a operação de cargas não lineares e variáveis; e interrupções momentâneas de tensão, cujas causas em geral são curtos-circuitos de difícil prevenção [DP17].

Aliado a isto, existe também a dificuldade de definir parâmetros únicos para mensurar a qualidade da energia elétrica, visto que cada país possui suas próprias normas de operação dos sistemas elétricos.

No Brasil a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), através do Procedimentos de Distribuição (PRODIST) – Submódulo 8 [A20], estabeleceu índices de desempenho para o fornecimento de energia com base em 3 (três) conceitos:

i. Qualidade do serviço: relaciona-se com a avaliação da continuidade do fornecimento de energia elétrica e dos tempos de atendimento a ocorrências emergenciais.
   Para a qualidade do fornecimento de energia elétrica, a norma estabelece a metodologia para apuração dos indicadores de continuidade e dos tempos de atendimento a ocorrências emergenciais, definindo padrões e responsabilidades.

ii. Qualidade do produto: a norma define a terminologia e os indicadores, caracteriza os fenômenos, estabelece os limites ou valores de referência, a metodologia de medição, a gestão das reclamações relativas à conformidade de tensão em regime permanente e às perturbações na forma de onda de tensão e os estudos específicos de qualidade da energia elétrica para fins de acesso aos sistemas de distribuição.

iii. Qualidade do tratamento de reclamações: estabelece a metodologia de cálculo dos limites do indicador de qualidade comercial FER.

Em linhas gerais, são avaliadas as características de continuidade do fornecimento e de conformidade, considerando alguns parâmetros, dentro eles têm-se:

- ✓ Harmônicas

As distorções harmônicas são fenômenos associados a deformações nas formas de onda das tensões e das correntes em relação à onda senoidal da frequência fundamental, causadas normalmente por dispositivos que apresentam relação não linear existentes no sistema [A20].

A utilização de cargas não lineares (controles de motores com frequência ajustável, lâmpadas fluorescentes com reatores magnéticos, fontes de alimentação de computadores, carregadores de telefones celulares, inversores, fornos a arco etc.)

provoca o aparecimento de correntes harmônicas, que são injetadas no sistema elétrico [SV12].

Nos equipamentos elétricos projetados para operar na frequência fundamental, as harmônicas podem causar o sobreaquecimento dos condutores e do núcleo, tendo como consequência, a diminuição da vida útil do mesmo.

- ✓ Flutuações de tensão ou Cintilação (*Flickers*)

A flutuação de tensão é um fenômeno caracterizado pela variação aleatória, repetitiva ou esporádica do valor eficaz ou de pico da tensão instantânea (faixa compreendida entre 0,95 pu e 1,05 pu).

A determinação da qualidade da tensão do sistema de distribuição quanto à flutuação de tensão tem por objetivo avaliar o incômodo provocado pelo efeito da cintilação luminosa no consumidor, que tenha em sua unidade consumidora pontos de iluminação alimentados em baixa tensão [A20].

Cargas industriais que exibem variações contínuas e rápidas na magnitude da corrente de carga podem causar variações na tensão que são frequentemente referidas como *flicker* ou oscilação. Dos itens de avaliação da qualidade da tensão, o efeito *flicker* apresenta destacada importância, uma vez que pesquisas mostram que seus principais efeitos se manifestam sobre as pessoas na forma de incômodo visual, irritação, perda de concentração e, nos casos extremos, sob a forma de problemas neurológicos [P13b].

- ✓ Variações de tensão de curta duração

Variações de tensão de curta duração (VTCD) são desvios significativos na amplitude do valor eficaz (± 10%) da tensão durante um intervalo de tempo inferior a três minutos [A20], sendo classificadas em função da magnitude do evento, como sendo: interrupções, afundamentos e elevações.

- ✓ Variações de tensão de longa duração

As variações de tensão de longa duração são definidas como eventos com duração superior a 3 minutos, sendo portando, consideradas como distúrbios de regime

permanente que podem ser caracterizados como desvios que ocorrem no valor eficaz da tensão, na frequência do sistema [P13a]. São usualmente classificadas como [F02]:

- Sobretensões: quando a magnitude do valor eficaz da tensão do evento for superior ao limite de 1,1 pu. Podem ser provocadas pela saída de cargas, curto-circuitos desequilibrados, variações na compensação de reativos na rede elétrica, ajuste incorreto do *tap* de transformadores. Os principais efeitos são ruptura de dielétricos, perdas excessivas ou redução da vida útil de equipamentos;
- Subtensões: quando a magnitude do valor eficaz da tensão do evento ficar compreendido entre os limites de 0,9 pu e 0,1 pu. Podem ser provocadas por curtos-circuitos, saída de banco de capacitores, partida de motores, sobrecarga dos circuitos e falta de suporte de reativos. Podem ocasionar sobrecorrentes em motores, falhas de operação em equipamentos e desligamento de cargas;
- Interrupções permanentes ou contingências: quando o valor eficaz da tensão do evento ficar abaixo do limite de 0,1 pu. Ocorrem principalmente devido às faltas no SEP e são medidas em termos da Duração de Interrupção Individual por Unidade Consumidora (DIC) e da Frequência de Interrupção Individual por Unidade Consumidora (FIC). Podem provocar o desligamento de equipamentos do consumidor.

✓ Variações de frequência

As variações de frequência são definidas como desvios do valor da frequência fundamental, superiores a ± 0,1Hz da frequência nominal.

Quando da ocorrência de distúrbios no sistema de distribuição, as instalações de geração devem garantir que a frequência retorne, no intervalo de tempo de 30 (trinta) segundos após a transgressão, para a faixa de 59,5 Hz a 60,5 Hz, para permitir a recuperação do equilíbrio carga-geração [A20].

Pequenas variações de frequência podem resultar em danos severos ao gerador e ao eixo da turbina, devido às oscilações do conjugado desenvolvido. Também podem

ocasionar erros em instrumentos de medida e em controladores eletrônicos, com sincronismo baseado na frequência fundamental fixa da rede [P13b].

- ✓ Desequilíbrio de sistemas trifásicos;

Os desequilíbrios de tensão são caracterizados por variações desiguais nas magnitudes de tensão e/ou por desvios do defasamento angular de 120º entre as fases de um sistema trifásico. Em geral são provocados por conexões desiguais de cargas mono ou bifásicas na rede elétrica, ou de cargas trifásicas assimétricas como, por exemplo, fornos a arco. Como consequência podem provocar sobretensões, sobrecorrentes, oscilações de potência e vibrações em máquinas girantes [P13].

- ✓ Transitórios rápidos.

O termo transitório tem sido aplicado à análise das variações do sistema de energia para denotar um evento que é momentâneo e indesejável. De outra forma, entende-se por transitórios eletromagnéticos as manifestações ou respostas elétricas locais ou nas adjacências, oriundas de alterações súbitas nas condições operacionais de um sistema de energia elétrica. Os sistemas elétricos estão sujeitos a inúmeros fenômenos transitórios, variando desde as oscilações eletromecânicas (baixas frequências) até as rápidas variações de tensões e correntes causadas por chaveamentos ou mudanças bruscas de estado. Geralmente, a duração de um transitório é muito pequena, mas de grande importância, uma vez que os equipamentos presentes nos sistemas elétricos estarão submetidos a grandes solicitações de tensão e/ou corrente [P13c].

Os fenômenos transitórios podem ser classificados em dois grupos, os chamados transitórios impulsivos (causados por descargas atmosféricas) e os transitórios oscilatórios (causados por chaveamentos) [P13c].

Os principais distúrbios de qualidade de energia são ilustrados na Figura 1-1.

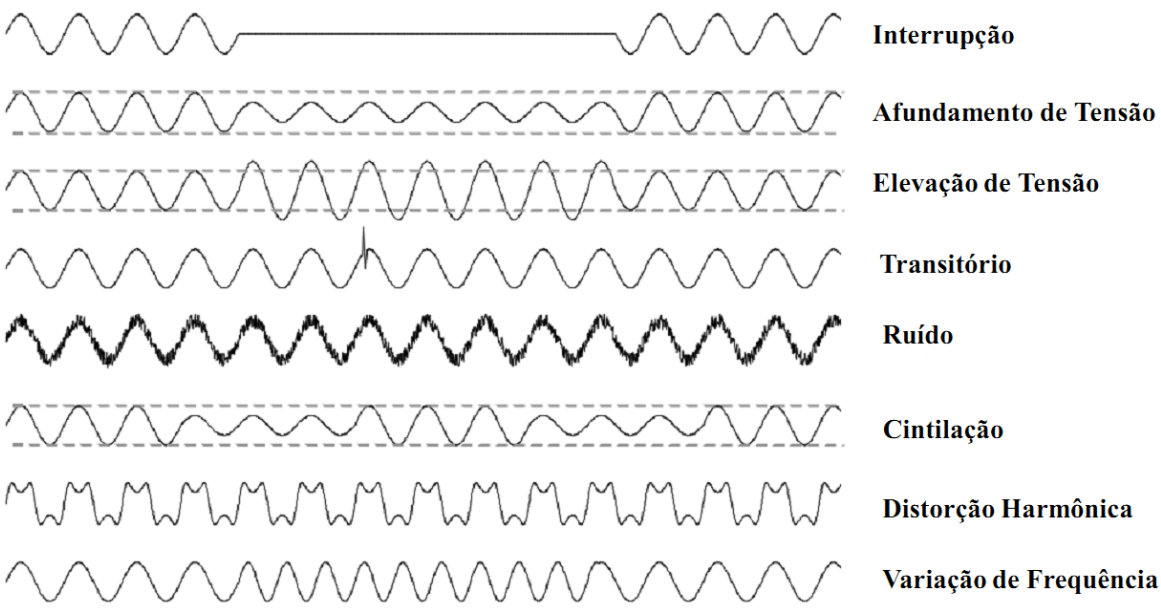

Figura 1-1 – Ilustração dos principais distúrbios de Qualidade de Energia [SV12].

Existem diversas abordagens para o tratamento de fenômenos de VTCD. Na próxima seção são apresentadas as principais definições e classificações adotadas pelo PRODIST [A20], pelo ONS [O02], pelo IEEE [I02] e pela norma europeia [C99] e sul-africana [A96], por estas serem o principal foco desta dissertação de mestrado.

1.2 VARIAÇÕES DE TENSÃO DE CURTA DURAÇÃO

As Variações de Tensão de Curta Duração (VTCD) são desvios significativos na amplitude do valor eficaz de tensão durante um intervalo de tempo inferior a três minutos [A20].

É importante a concentração dos estudos nas VTCD, pois de acordo com várias fontes literárias, dentre os diversos distúrbios que ocorrem nas redes elétricas, este apresenta a maior frequência de ocorrência, com impactos percebidos imediatamente pelos consumidores [DP17, SV12, F02, PIII].

Atualmente, até os consumidores residenciais são amplamente afetados pelas VTCD, pois cada vez mais os equipamentos de uso cotidiano têm-se modernizado apresentando a utilização de componentes mais sensíveis.

No âmbito industrial, dentre os consumidores mais afetados, por apresentarem plantas com processos sensíveis, citam-se: químicas, petroquímicas, farmacêuticas,

semicondutores, têxtil e, no setor comercial: empresas de TI, bancos, centrais de processamento de dados (CPDs).

Os consumidores industriais naturalmente observam os maiores prejuízos quando comparados com residenciais, pois as VTCD podem causar simples paradas na produção, levando de minutos a dias, com possível perdas de linhas completas de produção e queima de equipamentos.

Considerando que a maior parte das VTCD tem origem em eventos climáticos ou manobras de cargas não dependentes dos operadores e/ou consumidores, não há limites definidos de ocorrência nas normas.

Para mitigar o problema das VTCD, normalmente são empregadas técnicas custosas, o que obriga tais consumidores a protegerem parte dos seus processos que consideram mais críticos, deixando outros pontos vulneráveis às VTCD. A solução mais utilizada é o emprego de fonte de alimentação ininterrupta, também conhecida pelo acrônimo UPS (sigla em inglês de *Uninterruptible Power Supply*) ou *no-break* no Brasil, em conjunto com grupos motogeradores diesel, que atendem às cargas consideradas críticas [MR02].

1.3 MOTIVAÇÃO E OBJETIVOS DO TRABALHO

Da literatura e normas disponíveis, pode-se observar que nos estudos relacionados à VTCD, existe uma grande deficiência na avaliação dos reais impactos de tais distúrbios, nas cargas dos consumidores. Estes são muitas vezes caracterizados através de métodos empíricos, bem como estudos de enumeração estados e método de Monte Carlo, para avaliar a sensibilidade e limites de tolerância.

Por ter trabalhado na implantação e operação de uma indústria de semicondutores de grande porte no Brasil, o objetivo geral desta dissertação é a avaliação dos impactos da baixa qualidade de energia entregue pelas concessionárias, no funcionamento de cargas sensíveis e críticas na indústria de semicondutores.

Especificamente, pretende-se avaliar os parâmetros de VTCD estabelecidos pelo PRODIST – Módulo 8, abordando a qualidade do produto em regime transitório, demonstrando que o atendimento a tais requisitos, não garante os mínimos solicitados

na indústria de semicondutores e propondo indicadores os quais possam utilizados como parâmetros de continuidade e cálculo de compensações.

Adicionalmente, tem-se como outro objetivo específico, avaliar a solução adotada em uma indústria de semicondutores, para garantir o atendimento dos parâmetros mínimos requisitados pelas cargas críticas do sistema produtivo.

Deste modo, os principais objetivos do presente trabalho são:

1. Analisar e discutir as normas atuais, demonstrando as convergências e particularidades de cada uma;
2. Relacionar o comportamento das cargas com VTCD;
3. Avaliar as principais técnicas de mitigação dos impactos relacionados à distúrbios no fornecimento de energia elétrica;
4. Propor metodologia de avaliação do impacto de VTCD.

1.4 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Esta dissertação está dividida em 7 capítulos, incluindo este capítulo introdutório, da seguinte maneira:

O presente Capítulo 1 apresenta um panorama geral e a relevância dos estudos relacionados à VTCD e também apresentou as motivações e objetivos desse trabalho.

No Capítulo 2 são apresentadas as principais normas relacionadas à caracterização de VTCD e de verificação de impacto sobre uma família de cargas.

O Capítulo 3 aborda e verifica os impactos das VTCD sobre uma família de cargas.

O Capítulo 4 apresenta um estudo de caso para demonstrar os desafios e estudos necessários para a implantação de uma indústria de semicondutores no Brasil.

O Capítulo 5, apresenta a avaliação dos sistemas de suprimentos principais e os estudos para a definição e implantação dos auxiliares.

O Capítulo 6 discute a definição de novos parâmetros relacionados à qualidade do produto entregue pelas concessionárias, estabelecendo a metodologia proposta para a avaliação e cálculo das compensações.

Por fim, as principais conclusões desta dissertação e propostas de continuidade para trabalhos futuros são apresentadas no Capítulo 7.

2. QUALIDADE DE ENERGIA ELÉTRICA

Neste capítulo, o qual aborda a identificação e classificação das VTCD, são referenciadas algumas normas e recomendações utilizadas para tal, observando-se que diante das diferentes propostas e abordagens para a avaliação das VTCD, todas convergem para uma mesma metodologia.

Os estudos de impacto de VTCD já eram realizados muito antes de surgirem as atuais definições no contexto de qualidade de energia. Sua importância tornou-se crescente devido à necessidade dos consumidores e concessionárias de energia identificarem se as perdas ocorridas eram causadas por procedimentos e operações dos consumidores ou se eram advindas da rede elétrica das concessionárias, com a finalidade de atribuir responsabilidades [LE05].

2.1 PRODIST – SUBMÓDULO 8

O termo *variação*, considera como referência o valor nominal da tensão do alimentador.

O PRODIST – Submódulo 8 [A20] classifica, somente em regime permanente, as faixas em torno da tensão de referência (TR), conforme a Figura 2-1 a seguir:

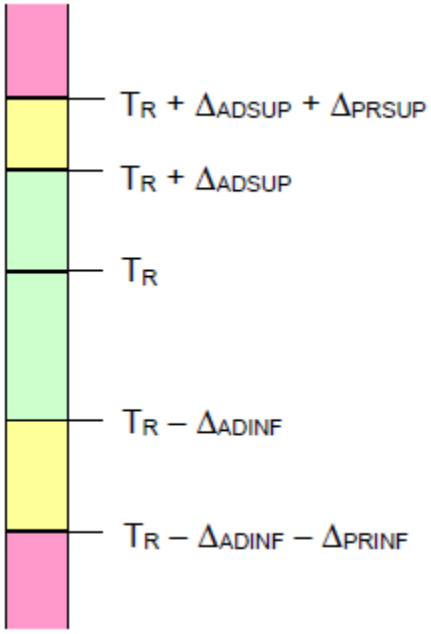

Figura 2-1 – Faixas de Tensão em Relação à de Referência (Fonte: [A20])

onde:

- ✓ TR é a tensão de referência;
- ✓ Δ_{ADINF} é a variação da faixa de tensão adequação inferior;
- ✓ Δ_{ADSUP} é a variação da faixa de tensão adequada superior;
- ✓ TR – Δ_{ADINF}, TR + Δ_{ADSUP} é a faixa adequada de tensão;
- ✓ TR + Δ_{ADSUP}, TR + Δ_{ADSUP} + Δ_{PRSUP} ou TR – Δ_{ADINF} – Δ_{PRINF}, TR – Δ_{ADINF} são as faixas precárias de tensão;
- ✓ >TR + Δ_{ADSUP} + Δ_{PRSUP} ou <TR – Δ_{ADINF} – Δ_{PRINF} são as faixas críticas de tensão.

Todos os valores de tensão medidos, deverão ser comparados à TR.

Para a definição e classificação das VTCD conforme o PRODIST – Submódulo 8 [A20], deve-se seguir conforme a Tabela 2-1.

Tabela 2-1 – Classificação das VTCD segundo ANEEL

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 p.u 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 Temporária de Tensão	Superior a três segundos e inferior a três minutos	Superior ou igual a 0,1 p.u 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

Para o cálculo dos indicadores associados às VTCD, têm-se:

$$V_e = \frac{V_{res}}{V_{ref}} x100 \tag{2.1}$$

Onde:

- ✓ V_e é a amplitude do evento de VTCD (em %);
- ✓ V_{res} é a tensão residual do evento de VTCD (em Volt);
- ✓ V_{ref} é a tensão de referência (em Volt).

$$\Delta t_e = t_f - t_i \tag{2.2}$$

Onde:

- ✓ Δt_e é a duração do evento de VTCD (em milissegundos);
- ✓ t_f é o instante final do evento de VTCD;
- ✓ t_i é o instante inicial do evento de VTCD.

$$f_e = n \tag{2.3}$$

Onde:

- ✓ f_e é a frequência de ocorrência de eventos de VTCD;
- ✓ n é a quantidade de eventos de VTCD registrados no período de avaliação.

2.2 PROCEDIMENTOS DE REDE – Submódulo 2.8

Por meio dos procedimentos de rede – submódulo 2.8, o Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) define as VTCD como eventos aleatórios de tensão caracterizados por desvios significativos do valor eficaz, por curto intervalo de tempo (de 1 ciclo até 1 min), referindo-se à tensão fase-neutro e descrita monofasicamente pelos parâmetros amplitude e duração. São classificadas conforme a Tabela 2-2 [O02].

Tabela 2-2 – Classificação das VTCD segundo o ONS

Tipos de VTCD	**Duração da VTCD**	**Amplitude da VTCD, em relação à tensão nominal**
Interrupção Momentânea de Tensão – IMT	Inferior ou igual a três segundos	Inferior a 0,1 p.u
Afundamento Momentâneo de Tensão – AMT	Igual ou superior a um ciclo e inferior ou igual a 3 (três) segundos	Igual ou superior a 0,1 e inferior a 0,9 p.u
Elevação Momentânea de Tensão – EMT	Igual ou superior a um ciclo e inferior ou igual a 3 (três) segundos	Superior a 1,1 p.u
Interrupção Temporária de Tensão – ITT	Superior a 3 (três) segundos e inferior a 1 (um) minuto	Inferior a 0,1 p.u
Afundamento Temporário de Tensão – ATT	Superior a 3 (três) segundos e inferior a 1 (um) minuto	Igual ou superior a 0,1 e inferior a 0,9 p.u
Elevação Temporária de Tensão – ETT	Superior a 3 (três) segundos e inferior a 1 (um) minuto	Superior a 1,1 p.u

2.3 IEEE – STD. 1159

É possível observar da IEEE – Std 1159 que não existe um equivalente direto para as VTCD, sendo apresentados os parâmetros denominados *voltage sag* (afundamento de tensão) e *voltage swell* (elevação de tensão), conforme Tabela 2-3:

Tabela 2-3 – Classificação segundo IEEE – Std 1159 (Adaptado de [I02])

Classificação	Denominação	Duração do Evento	Amplitude do Evento
Variações de Curta Duração (*Short duration variations*)	Afundamento Instantâneo (*Instantaneous sag*)	0,5 – 30 ciclos	0,1 – 0,9 p.u
	Elevação Instantânea (*Instataneous swell*)	0,5 – 30 ciclos	1,1 – 1,8 p.u
	Interrupção Momentâneo (*Momentary Interruption*)	0,5 ciclo – 3 segundos	< 0,1 p.u
	Afundamento Momentâneo (*Momentary sag*)	0,5 ciclo – 3 segundos	0,1 – 0,9 p.u
	Elevação Momentânea (*Momentary swell*)	0,5 ciclo – 3 segundos	1,1 – 1,4 p.u
	Interrupção Temporário (*Temporaty interruption*)	3 segundos – 1 minuto	< 0,1 p.u
	Afundamento Temporário (*Temporary sag*)	3 segundos – 1 minuto	0,1 – 0,9 p.u
	Elevação Temporária (*Temporary swell*)	3 segundos – 1 minuto	1,1 – 1,2 p.u
Variações de Longa Duração (*Long duration variations*)	Interrupção Sustentada (*Interruption sustained*)	> 1 minuto	0,0 p.u
	Subtensão (*Undervoltage*)	> 1 minuto	0,1 – 0,9 p.u
	Sobretensão (*Overvoltage*)	> 1 minuto	1,1 – 1,2 p.u

O desvio mais significativo da amplitude de tensão, conhecido com Magnitude (V_{Mag}), é definido como a razão entre o nível extremo do valor eficaz da tensão, tensão residual ou remanescente (V_{res}), e a tensão nominal (V_n) no ponto de observação, expresso em valor por unidade (p.u) ou porcentagem (%) [I02].

$$V_{Mag} = \frac{V_{res}}{V_n}(pu)\ ou\ V_{Mag}\% = \frac{V_{res}}{V_n}.100(\%) \tag{2.4}$$

A Duração (Δt) do evento é definida como o intervalo de tempo decorrido entre o instante (ti) em que o valor eficaz da tensão ultrapassa determinado limite de referência (Vref) e o instante (tf) em que a mesma variável volta a cruzar esse limite, expresso em segundos ou ciclos da fundamental [I02].

$$\Delta t = tf - ti\ (segundos\ ou\ ciclos) \tag{2.5}$$

Abaixo, apresenta-se na Figura 2-2, um exemplo de caracterização de um afundamento de tensão, com magnitude $\Delta V \cong 32{,}0$ % e duração de $\Delta t \cong 92{,}0$ ms.

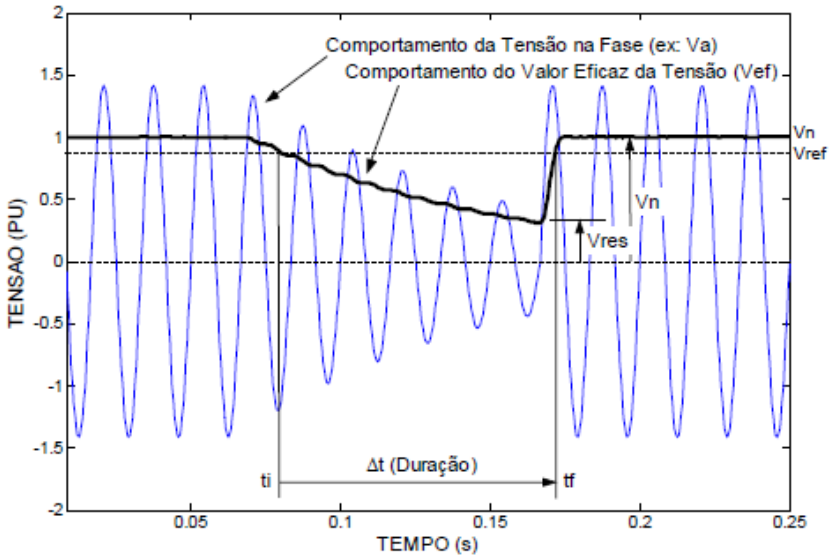

Figura 2-2 – Caracterização de um Afundamento de Tensão Norma Americana (Fonte: [DP17])

2.4 EN 50160 – NORMA EUROPEIA E SUL-AFRICANA NRS-048

A norma europeia [C99] com relação a VTCD apresenta abordagem para afundamentos de tensão (i.e., *voltage dips*) e elevações de tensão (i.e., *voltage swell*).

Considerando-se a caracterização dos eventos de VTCD, tanto a norma europeia quanto a sul-africana [A96], abordam pela Metodologia da Magnitude e Duração (M&D), mas de forma diferente das normas brasileira e americana (Equações 2.1 e 2.4, respectivamente). Elas tratam a magnitude como sendo a diferença entre o valor nominal da tensão (V_n) e o extremo do valor da tensão eficaz da tensão residual (V_{res}), normalmente expressa em valor por unidade ou (p.u) porcentagem (%).

$$V_{Mag} = \frac{V_n - V_{res}}{V_n}(pu) \; ou \; V_{Mag}\% = \frac{V_n - V_{res}}{V_n}.100(\%) \tag{2.6}$$

A diferença entre o valor nominal e o valor residual da tensão, também é definida como tensão de afundamento *Voltage Dip* (V_{Dip}).

$$V_{Dip} = V_n - V_{res}\ (V) \tag{2.7}$$

Para a classificação dos eventos, a norma propõe uma matriz que considera a severidade e duração dos mesmos, conforme demonstrado na Tabela 2-4.

O valor a ser colocado em cada célula corresponde à quantidade de eventos, avaliados de acordo com o tratamento estatístico definido na norma.

Análogo aos afundamentos de tensão, o tratamento das elevações segue a distribuição apresentada na Tabela 2-5, limitada à duração de 1 minuto por evento.

Tabela 2-4 – Classificação das V_{Dip} segundo EN 50160 [C99] e IEC TR 61000-2-8 (Adaptado de [I03])

Tensão Residual u *(Residual voltage u)* % de U_{ref}	**Duração** *(Duration)* s							
	0,01 < Δt ≤ 0,02	0,02 < Δt ≤ 0,1	0, 1 < Δt ≤ 0,5	0,5 < Δt ≤ 1	1 < Δt ≤ 3	3 < Δt ≤ 20	20 < Δt ≤ 60	60 < Δt ≤ 180
90 > u ≥ 85								
85 > u ≥ 70								
70 > u ≥ 40								
40 > u ≥ 10								
10 > u ≥ 0								

NOTA 1 – Os resultados da medição na primeira coluna e na primeira linha provavelmente serão inflados por transientes e flutuações de carga, respectivamente *(Measurement results in the first column and first row are likely to be inflated by transients and load fluctuations, respectively.).*
NOTA 2 – 0,01 e 0,02 s de duração nos dois primeiros cabeçalhos correspondem a meio período e a um período da tensão de 50 Hz. Para sistemas de 60 Hz, valores correspondentes seriam usados *(0,01 and 0,02 s in first two duration headings correspond to a half period and to one period of the 50 Hz voltage. For 60 Hz systems corresponding values would be used.).*

Tabela 2-5 – Classificação das *voltage swell* segundo EN 50160 (Fonte: Adaptado de [C99])

Elevações de Tensão *(Swell voltage)* **u** %	**Duração** *(Duration)* **t ms**		
	10 ≤ t ≤ 500	**500 < t ≤ 5000**	**500 < t ≤ 60000**
U ≥ 120	CELL S1	CELL S2	CELL S3
120 > u > 110	CELL T1	CELL T2	CELL T3

Na Figura 2-3 é apresentado o mesmo evento da Figura 2-2. A magnitude é determinada pela equação (2.5), assim $V_{Dip} \cong 68{,}0$ % ou $V_{Dip} \cong 0{,}68$ pu e duração de $\Delta t \cong 92{,}0$ ms (5,52 ciclos).

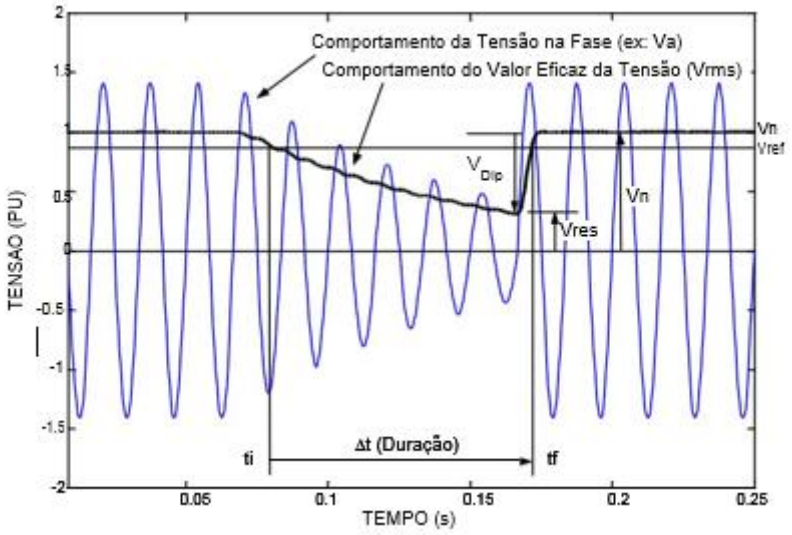

Figura 2-3 – Caracterização de “voltage dip” pela definição da Norma Europeia (Fonte: [DP17])

2.5 CONCLUSÕES

Conforme apresentada nesta Seção, há diferentes abordagens para a avaliação dos impactos das VTCD. Neste artigo, será adotado o que foi definido pelo PRODIST, em decorrência da necessidade de atendimento de requisitos mínimos definidos pela ANEEL, órgão regulador do setor elétrico brasileiro.

3. VTCD NA INDÚSTRIA DE SEMICONDUTORES

3.1 INTRODUÇÃO

A QEE causa grandes impactos na indústria em geral. Na Figura 3-1 são ilustradas as variações de custos de interrupção para diversos segmentos industriais. É possível perceber que a indústria de semicondutores se apresenta como a mais sensível aos distúrbios e interrupções ocorridas no fornecimento de energia, a qual pode alcançar custos de até € 10 milhões por interrupção.

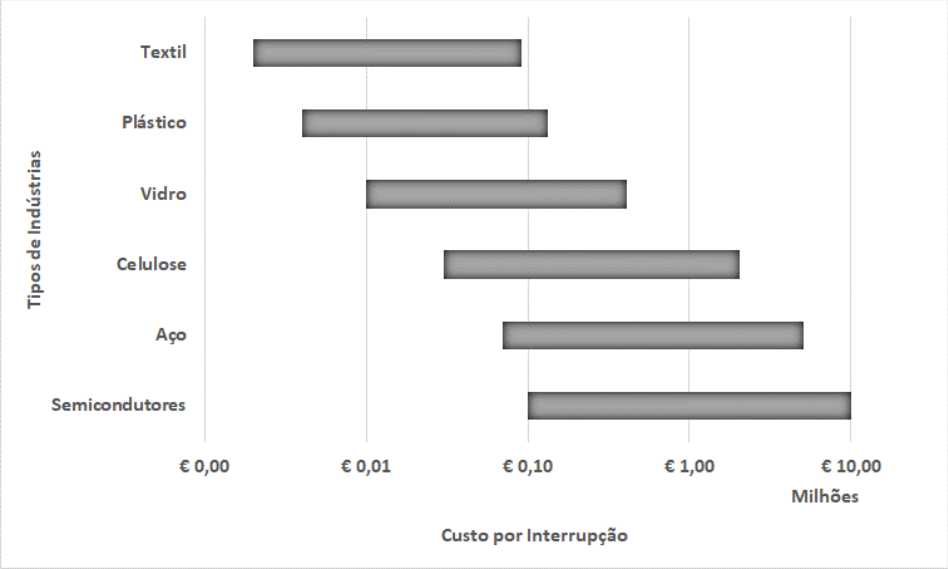

Figura 3-1 – Custo de interrupções por distúrbios elétricos, por tipo de indústria (Fonte: Adaptado de [AN02])

3.2 TOLERÂNCIA DE EQUIPAMENTOS A VTCD

Na literatura, existem poucos estudos relacionando VTCD e seus efeitos diretos sobre as diversas cargas, que determinam objetivamente qual a reação dos equipamentos à VTCD e quais os parâmetros das cargas e processos são determinantes para caracterizar se um evento de VTCD causa algum impacto sobre os consumidores.

Atualmente é comum encontrar na literatura a aplicação, de forma indevida, da metodologia da M&D com os limites de tolerância já definidos por normas, como por exemplo as curvas CBEMA/ITIC [ITIC00] e SEMI F47 [SEMI06].

A Metodologia da Magnitude e Duração do Evento (M&D) caracteriza um distúrbio de VTCD por dois parâmetros: a magnitude e a duração, sendo esta simplicidade a grande vantagem deste método. Esta mesma simplicidade em aplicação da metodologia, não se transfere para a confiabilidade da mesma em avaliações de impactos sobre as cargas, pois eventos totalmente diferentes podem ter a mesma magnitude e duração, mas com impactos completamente distintos.

A metodologia de M&D foi definida para caracterização do evento no contexto de QEE, já os limites de tolerâncias são para utilização específica de fabricantes dos equipamentos, que definem tais limites como critérios de projeto para condições mínimas de suportabilidade dos equipamentos por eles fabricados.

Para equipamentos eletrônicos, por exemplo, a caracterização pela metodologia de M&D considera que todo equipamento responde pelo valor eficaz da tensão, podendo não ser totalmente verdadeira esta situação.

Dentre as normas citadas, a americana caracterizou os limites de tolerância de equipamentos por meio das curvas CBEMA/ITIC e SEMI F47. As demais normas não indicam nem citam algo similar ao proposto pela norma americana.

3.2.1 Limites CBEMA/ITIC

Considerando a expansão do uso de equipamentos eletrônicos residenciais e de informática, os quais apresentam grande sensibilidade às variações de tensão, viu-se a necessidade de definir e padronizar as condições mínimas de teste para avaliar a suportabilidade dos equipamentos aos distúrbios da rede de alimentação.

Como guia para os fabricantes na área de informática, os EUA estabeleceram a norma ANSI/IEEE- Std. 446 [I95], aplicável a equipamentos eletrônicos e computadores, a qual propôs os limites a serem satisfeitos pelas fontes e dispositivos que alimentam computadores com relação às variações de tensão e durações suportáveis, desenvolvida pela *Computer Business Equipment Manufacturers Association* – CBEMA, atualmente denominada de *Information Tecnology Industry Council* – ITIC [ITIC00].

Esta norma trata somente de eventos isolados, onde não se é capaz avaliar os efeitos de flutuações de tensão. Foram estabelecidas curvas M&D para afundamentos e elevações de tensão, conforme ilustrado na Figura 3-2.

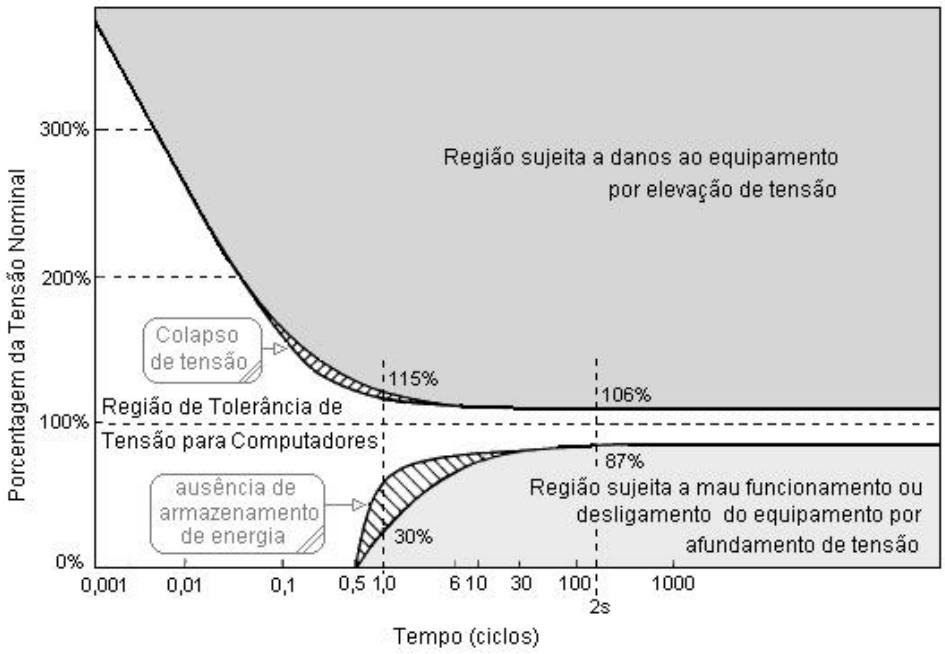

Figura 3-2 – Curva CBEMA: Limites de duração de sub e sobretensões (Fonte: [DP17])

Após algumas modificações, foi apresentada em 1997 uma nova versão para os limites de tolerância conhecida como CBEMA/ITIC ou simplesmente ITIC [ITIC00] e mostrada na Figura 3-3, sendo devidamente aprovada no ano 2000, com os limites definidos para serem aplicados a equipamentos eletrônicos e computadores relacionados à tecnologia da informação (TI).

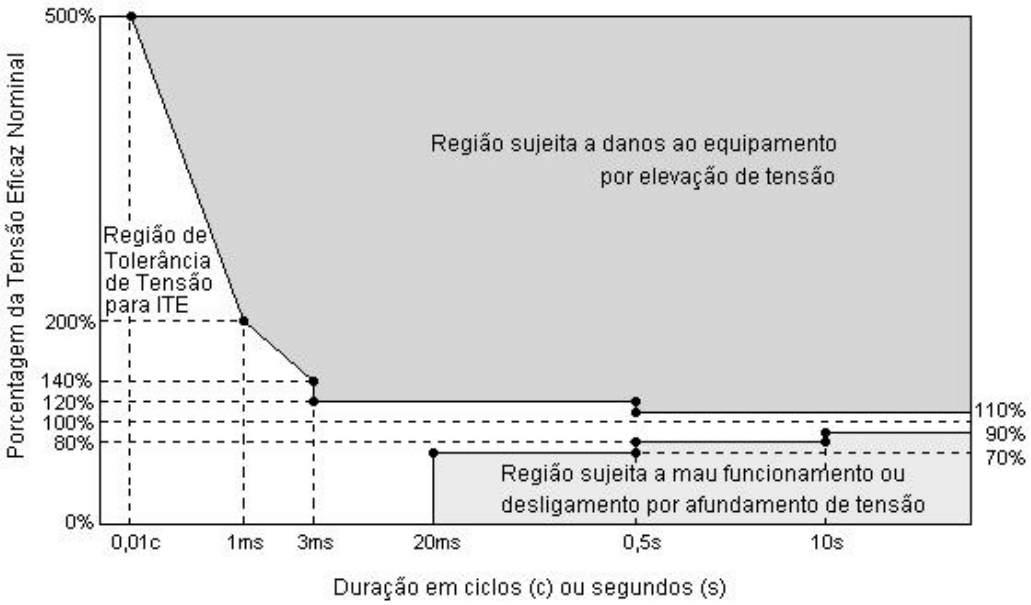

Figura 3-3 – Limites de tolerância ITIC (Fonte: [DP17]).

No setor industrial, (como por exemplo bancos, papel e celulose, petroquímica, química, entre outros), tem-se usado amplamente os limites de tolerância estabelecidos pela ITIC, por servirem de referência nas análises de falhas nos processos produtivos, determinando se uma parada ou dano pode ou não ter sido causado por distúrbios na rede de alimentação.

Estas análises de falhas, visam apurar as causas, motivos e responsabilidade de uma parada no processo ou quebra de equipamento, auxiliando na redução dos prejuízos e prevenção de outras ocorrências.

A norma IEEE Std. 446 [I95] é uma das poucas normas que apresenta limite para elevações de tensão.

3.2.2 Limites – CURVA SEMI F47

A curva SEMI F47, desenvolvida e apresentada pela *Semiconductor Equipment and Materials Institute* – SEMI, abrange somente os distúrbios de afundamento de tensão.

A curva SEMI F47 define os limites que um equipamento ou ferramenta semicondutora deve operar sem interrupção e também fornece parâmetros para as instalações e sistemas de utilidade. As fábricas de semicondutores exigem altos níveis de qualidade de energia devido à sensibilidade dos equipamentos e dos controles de processo e

que os equipamentos de fabricação de semicondutores são especialmente vulneráveis a quedas de tensão. A curva SEMI F47 define a capacidade de passagem de tensão necessária para processamento de semicondutores, metrologia e equipamento de teste automatizado.

A capacidade esperada de desempenho do equipamento é mostrada em um gráfico, conforme Figura 3-4, que representa a duração da queda de tensão e o desvio percentual da tensão nominal do equipamento. O foco principal desta especificação são os equipamentos de processamento de semicondutores, incluindo, mas não limitando aos seguintes tipos de ferramentas:

- ✓ Equipamento Etch (*Dry & Wet*);
- ✓ Equipamentos de deposição de filmes (CVD e PVD);
- ✓ Equipamentos térmicos;
- ✓ Preparação de superfície e limpeza;
- ✓ Equipamento de fotolitografia (*Stepper & Tracks*);
- ✓ Equipamento de Polimento Mecânico Químico;
- ✓ Equipamento para implantes iônicos;
- ✓ Equipamentos de metrologia;
- ✓ Equipamento de teste automatizado.

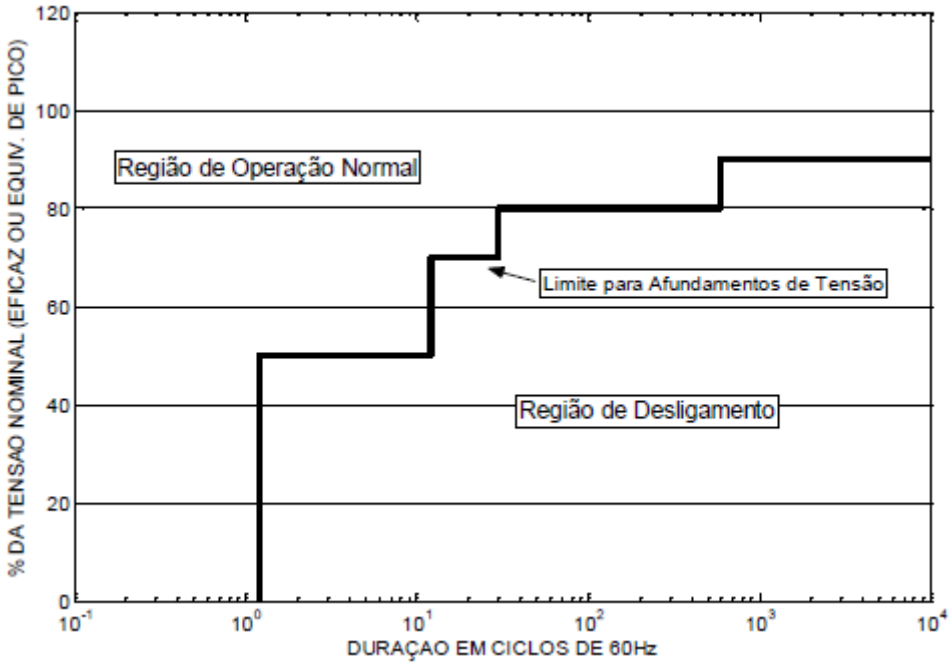

Figura 3-4 – Limites de tolerância SEMI F47 (Fonte: [DP17]).

Os requisitos deste padrão internacional foram desenvolvidos para satisfazer as necessidades da indústria de semicondutores. Mais rígida que os padrões genéricos existentes, essa norma específica do setor de semicondutores não está em conflito com regulamentações de equipamentos de outras regiões ou normas genéricas de equipamentos de outras organizações. A intenção deste padrão é fornecer especificações para equipamentos de processamento de semicondutores que levarão a critérios de seleção de subcomponentes e melhorias nos projetos de sistemas de equipamentos. Embora seja reconhecido que em certos casos extremos ou para funções específicas, os dispositivos de armazenamento de bateria podem ser apropriados, não é a intenção deste padrão aumentar o tamanho ou o uso de dispositivos de armazenamento de bateria fornecidos com o equipamento. Este concentra-se em melhorias nos componentes dos equipamentos e os projetos dos sistemas devem levar a uma redução ou eliminação no uso do armazenamento da bateria para obter confiabilidade do equipamento durante eventos de queda de tensão.

O padrão afirma que o processamento de semicondutores, metrologia e equipamentos de teste automatizados devem ser projetados e construídos de acordo com a capacidade de deslocamento da tensão de acordo com a curva definida. O equipamento deve continuar a operar sem interrupção durante as condições identificadas na área acima da linha definida. No contexto da SEMI F47, interrupção significa qualquer assistência ou falha. Uma assistência é definida como uma interrupção não planejada que ocorre durante um ciclo de equipamento onde todas as três condições seguintes se aplicam:

- ✓ o ciclo interrompido do equipamento é retomado através de intervenção externa (por exemplo, por um operador ou usuário, seja humano ou computador host);
- ✓ não há substituição de uma peça, exceto consumíveis especificados;
- ✓ não há variação na especificação da operação do equipamento.

Além disso, uma falha é qualquer interrupção ou variação não planejada das especificações de operação do equipamento, além de assistências. Embora nenhuma variação no processo do equipamento seja a meta, esse padrão aborda esses problemas relacionados apenas à operação do equipamento.

Um ponto peculiar nesta norma é que os processos dos fabricantes devem atender aos limites estabelecidos pela SEMI F47 sem a utilização de suprimento auxiliar de energia, como por exemplo, UPS (*Uninterruptable Power Supply* ou *no-breaks*).

3.3 ANÁLISE CRÍTICA DA METODOLOGIA DA M&D E SUA APLICAÇÃO A VTCD EM GERAL

3.3.1 Metodologia M&D para evento de curta duração

Para verificar-se o desvio mais significativo da tensão, definido como magnitude do evento, utiliza-se o valor eficaz da tensão (V_{ef}). Já a amplitude do evento (V_e) é definida conforme demonstrado na Equação 2.1.

Para a detecção e a caracterização dos distúrbios de VTCD, é necessária a utilização de instrumentos de medição, tendo como referência um valor fixo de tensão ou um valor médio deslizante, conforme observado na Equação 3.1:

$$V_{sr(n)} = 0{,}9967 x V_{sr(n-1)} + 0{,}0033 x V_{(12RMS)} \quad (3.1)$$

onde:

- ✓ $V_{sr(n)}$ é o valor calculado da tensão de referência;
- ✓ $V_{sr(n-1)}$ é o valor prévio da tensão de referência;
- ✓ $V_{(12RMS)}$ é o valor da tensão eficaz média de 12 (doze) ciclos mais recentes.

A Duração (Δt_e) do evento, conforme Equação 2.2 já demonstrada, é definida por:

$$\Delta t_e = tf - ti \ (segundos \ ou \ ciclos) \quad (2.2)$$

3.3.2 Metodologia de medição

Além dos parâmetros duração e amplitude já definidos, a severidade da VTCD, medida entre fase e neutro, de determinado barramento do sistema de distribuição é também caracterizada pela frequência de ocorrência. Esta corresponde à quantidade de vezes que cada combinação dos parâmetros duração e amplitude ocorrem em determinado período de tempo ao longo do qual o barramento tenha sido monitorado.

O indicador a ser utilizado para conhecimento do desempenho de um determinado barramento do sistema de distribuição com relação às VTCD corresponde ao número de eventos agrupados por faixas de amplitude e de duração, discretizados conforme critério estabelecido a partir de levantamento de medições.

Num determinado ponto de monitoração, uma VTCD é caracterizada a partir da agregação dos parâmetros amplitude e duração de cada evento fase-neutro. Assim sendo, eventos fase-neutro simultâneos são primeiramente agregados compondo um mesmo evento no ponto de monitoração (agregação de fases) [A20].

A agregação de fases deve ser feita pelo critério de união das fases. A duração do evento é definida como o intervalo de tempo decorrido entre o instante em que o primeiro dos eventos fase-neutro transpõe determinado limite e o instante em que o último dos eventos fase-neutro retorna para determinado limite [A20].

Os eventos consecutivos, em um período de três minutos, no mesmo ponto, são agregados compondo um único evento (agregação temporal) [A20].

O afundamento ou a elevação de tensão que representa o intervalo de três minutos é o de menor ou de maior amplitude da tensão, respectivamente [A20].

As seguintes formas alternativas de agregação de fases podem ser utilizadas [A20]:

a) Agregação por parâmetros críticos - a duração do evento é definida como a máxima duração entre os três eventos fase-neutro e o valor de magnitude que mais se distanciou da tensão de referência;
b) Agregação pela fase crítica - a duração do evento é definida como a duração do evento fase-neutro de amplitude crítica, ou seja, amplitude mínima para afundamento e máxima para elevação.

Na Tabela 3-1, indica-se como deve ser realizada a estratificação pela amplitude e duração, para a contabilização de eventos de VTCD, a partir das medições e agregações. Já na Tabela 3-2, são apresentadas as regiões de sensibilidade, as quais visam correlacionar a importância de cada evento de VTCD com os níveis de sensibilidade das diferentes cargas conectadas aos sistemas de distribuição em média e alta tensão. Esta segmentação aplica-se somente a consumidores de média e alta tensão [A20].

Tabela 3-1 – Estratificação dos parâmetros para contabilização de eventos de VTCD segundo a ANEEL

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							
(1,10 – 1,15]							
(0,85 – 0,90]							
(0,80 – 0,85]							
(0,70 – 0,80]							
(0,60 – 0,70]							
(0,50 – 0,60]							
(0,40 – 0,50]							
(0,30 – 0,40]							
(0,20 – 0,30]							
(0,10 – 0,20]							
< 0,10							

Tabela 3-2 – Estratificação das VTCD com base nos níveis de sensibilidade das diversas cargas segundo a ANEEL

<table>
<tr><th rowspan="2">Amplitude (pu)</th><th colspan="7">Duração</th></tr>
<tr><th>[16,67 ms – 100 ms]</th><th>[100 ms – 300 ms]</th><th>[300 ms – 600 ms]</th><th>[600 ms – 1 seg]</th><th>[1 seg – 3 seg]</th><th>[3 seg – 1 min]</th><th>[1 min – 3 min]</th></tr>
<tr><td>> 1,15</td><td colspan="3" rowspan="2">REGIÃO H</td><td colspan="4" rowspan="2">REGIÃO I</td></tr>
<tr><td>(1,10 – 1,15]</td></tr>
<tr><td>(0,85 – 0,90]</td><td colspan="3" rowspan="2">REGIÃO A</td><td colspan="4" rowspan="3"></td></tr>
<tr><td>(0,80 – 0,85]</td></tr>
<tr><td>(0,70 – 0,80]</td><td rowspan="2">REGIÃO B</td><td colspan="2" rowspan="4">REGIÃO D</td><td colspan="4" rowspan="2">REGIÃO G</td></tr>
<tr><td>(0,60 – 0,70]</td></tr>
<tr><td>(0,50 – 0,60]</td><td rowspan="2">REGIÃO C</td><td colspan="4" rowspan="4">REGIÃO F</td></tr>
<tr><td>(0,40 – 0,50]</td></tr>
<tr><td>(0,30 – 0,40]</td><td colspan="3" rowspan="3">REGIÃO E</td></tr>
<tr><td>(0,20 – 0,30]</td></tr>
<tr><td>(0,10 – 0,20]</td></tr>
<tr><td>< 0,10</td><td colspan="7"></td></tr>
</table>

O Fator de Impacto, para caracterização da severidade da incidência de eventos de VTCD, é calculado conforme a seguinte expressão:

$$FI = \frac{\sum_{i=A}^{I}(f_{ei} x fp_i)}{FI_{base}} \quad (3.2)$$

onde:

- ✓ f_{ei} é a 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} é o fator de ponderação para cada região de sensibilidade i, estabelecido de acordo com a relevância do evento, correlacionando sua amplitude e duração, cujos valores estão na Tabela 3-3.
- ✓ FI_{BASE} é o 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.

Tabela 3-3 – Fatores de ponderação e Fator de Impacto base de acordo com a tensão nominal segundo a ANEEL

Região de Sensibilidade	**Fator de Ponderação (*fp*)**	**Fator de Impacto Base (FI_{BASE})**	
		1,0 kV < V_n < 69 kV	**69 kV ≤ V_n < 230 kV**
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		

- ✓ O valor de referência do indicador Fator de Impacto para sistemas de distribuição de média e de alta tensão, apurado por medição no período de 30 dias consecutivos é de 1,0 pu.
- ✓ Para sistemas de distribuição de baixa tensão não são estabelecidos valores de referência para VTCD.

Os fatores de ponderação propostos na Tabela 3-3 foram definidos por uma consultoria contratada pela ANEEL, em acordo com os critérios empregados na NRS 048-2 e considerando a relevância dos eventos no sistema elétrico e suas unidades consumidoras.

O objetivo do Fator de Impacto, um indicador puramente qualitativo, é evitar os excessos por parte das distribuidoras, simplificando através da adoção de um número único, a gestão e fiscalização das partes envolvidas no processo (consumidores, Aneel e a própria distribuidora).

3.3.3 Eventos distintos com mesma Magnitude e Duração

Na Figura 3-5 tem-se dois eventos de afundamento de tensão com características bem distintas, mostrando a inadequação da medição por M&D para caracterização de distúrbios. O evento 01, Figura 3-5 (a) é um evento retangular, muito mais crítico que o evento 02, mostrado na Figura 3-5 (b), com abrupto decaimento e que se recupera ao longo do tempo. Pela metodologia da M&D os dois eventos seriam considerados iguais, mesma magnitude e duração (M = 40% e D = 6 ciclos), conforme se vê na Figura 3-6, mas dependendo da carga alimentada, o impacto da perturbação pode ser muito distinto, especialmente se for uma carga eletrônica [DP17].

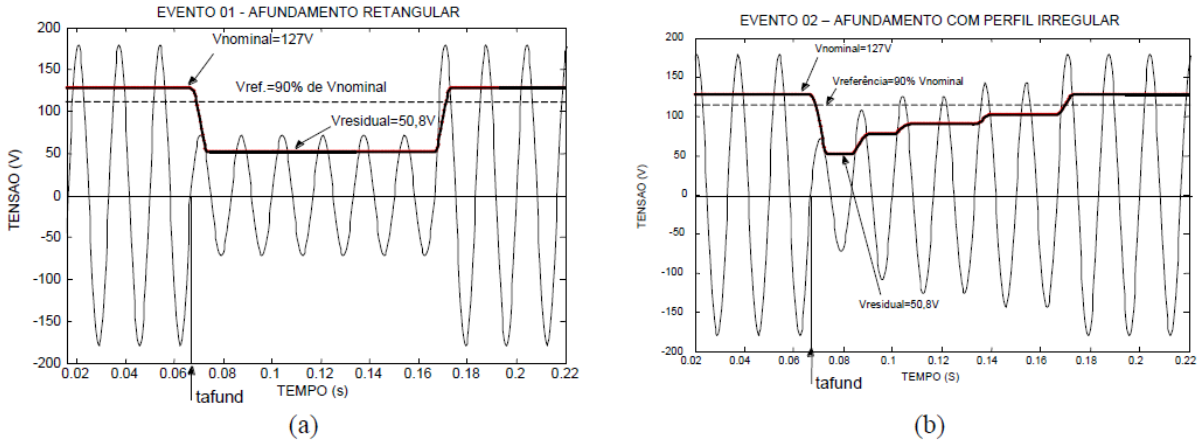

Figura 3-5 – Eventos de Afundamento de Tensão com mesma Magnitude e Duração (Fonte: [DP17])

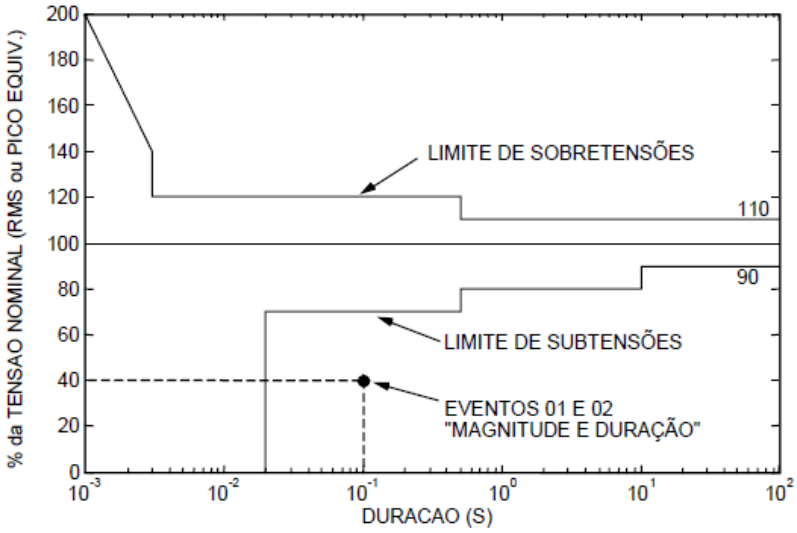

Figura 3-6 – Eventos 01 e 02 Distintos com mesma representação de M&D (Fonte: [DP17])

3.4 CONCLUSÕES

Pode-se observar que existem na literatura curvas e valores de referências para o fornecimento de energia elétrica e funcionamento de equipamentos, mas que estas são utilizadas de forma incorreta com o intuito de caracterizar os reais impactos gerados pela baixa qualidade do produto, sendo que, todos os valores encontrados são meramente qualitativos.

4. DESAFIOS NA IMPLANTAÇÃO DA INDÚSTRIA DE SEMICONDUTORES – CASE

4.1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo, será apresentado o processo de implantação de uma fábrica de semicondutores no Brasil, demonstrando os estudos realizados pela concessionária de energia, visando diminuir o impacto da baixa qualidade do seu produto no processo de produção dos semicondutores.

Serão apresentadas também as soluções estudadas para minimizar tais impactos, as implantadas, bem como a identificação de possíveis pontos falhos das mesmas, propondo melhorias.

4.2 ESTUDOS DE VIABILIDADE

Conforme já mencionado, a baixa qualidade de energia tem causado grandes impactos na indústria em geral. Como observado na Figura 3-1, a indústria de semicondutores apresenta-se como a mais sensível aos distúrbios e interrupções ocorridas no fornecimento de energia.

O processo de fabricação de dispositivos semicondutores (como por exemplo, chips de circuitos integrados), é realizado durante um período de aproximadamente 6 a 8 semanas, onde são realizados múltiplos processos fotográficos e químicos (divididos em 4 categorias gerais: deposição, remoção, modelagem e modificação das propriedades elétricas), conforme demonstrado na Figura 4-1 para a criação gradual dos *wafers* (lâmina redonda feita de material semicondutor puro, contendo os chips).

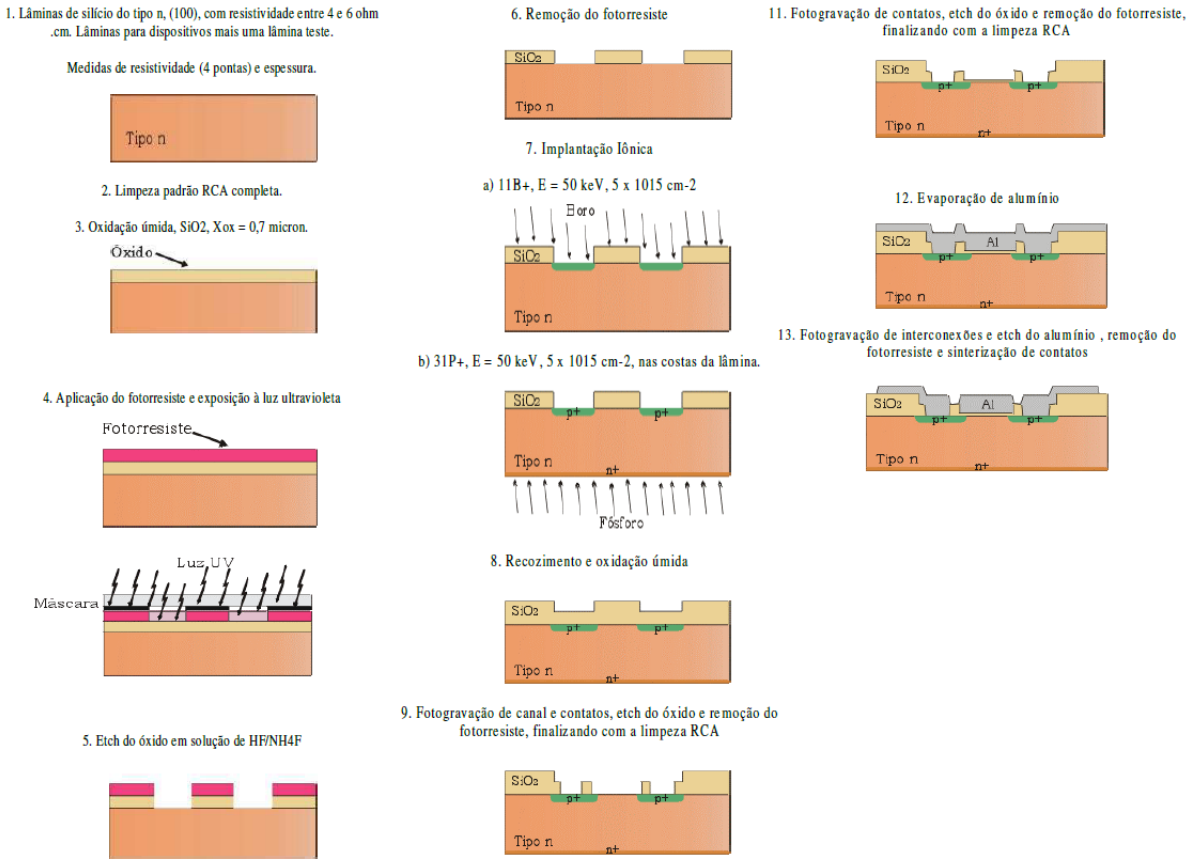

Figura 4-1 – Processo pMOS do CCS/UNICAMP para fabricação do chip teste (Fonte: [D06])

Considerando o sistema produtivo em funcionamento à plena carga (onde todos os equipamentos estão em sua utilização produtiva máxima) da fábrica em questão, e que um distúrbio e/ou interrupção no fornecimento de energia ocorra nas fases finais de processamento, poderá acarretar em perdas que giram em torno de € 4.300.000,00 (aproximadamente R$ 26 milhões). Para a composição dos custos relacionados às perdas, utilizou-se a capacidade produtiva de cada etapa, bem como o valor referencial do produto acabado.

Com isto, faz-se de extrema importância um estudo prévio das fontes de alimentação disponíveis, bem como as tecnologias aplicáveis para mitigar tais impactos. Tais estudos auxiliam inclusive, em conjunto com as demais informações multidisciplinares, na definição dos locais de implantação das indústrias.

4.2.1 Análise de afundamentos de tensão esperados no sistema de suprimento ao consumidor

A avaliação do desempenho do sistema de distribuição de alta tensão (SDAT) que atenderá a SE do cliente em questão, se caracteriza por ser uma análise comparativa com outras subestações existentes onde já estão conectados clientes de alta tensão da CEMIG Distribuição S.A (CEMIG D).

Ressalta-se que os dados absolutos gerados sobre o afundamento de tensão ainda requerem testes de prova com medições futuras, visando aferir os índices de desempenho utilizados na metodologia.

Em relação à legislação do setor elétrico, salienta-se não existem padrões de desempenho estabelecidos pela ANEEL para o sistema elétrico de Distribuição em relação aos afundamentos de tensão.

Neste sentido, o objetivo é que as informações do desempenho estimado do sistema elétrico da concessionária sobre os afundamentos de tensão permitam antecipar eventuais estudos na planta industrial, já na fase de projeto, para minimização de riscos de interrupções do processo produtivo associados à ocorrência do fenômeno.

4.2.2 Configuração do Sistema Elétrico

A Figura 4-2 mostra a configuração prevista do sistema de conexão da SE do cliente à rede da CEMIG D.

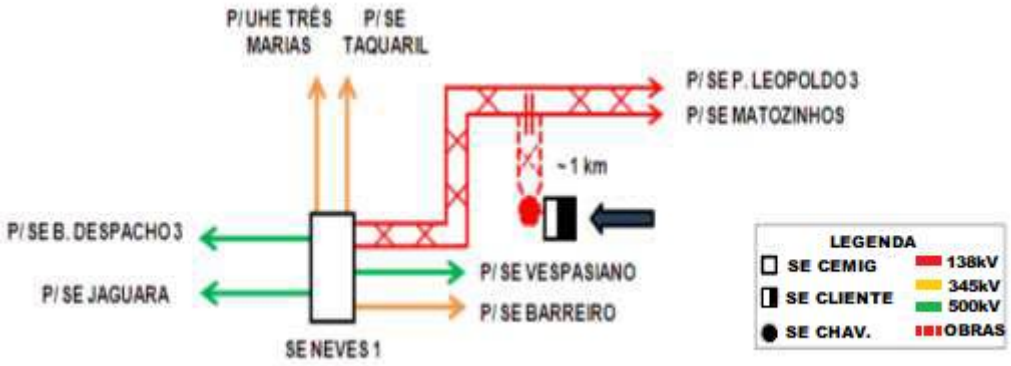

Figura 4-2 – Sistema de conexão da SE do Consumidor (Fonte: [C18])

A conexão proposta será através de uma subestação (SE) de 138 kV, seccionando a LD 138 kV Neves 1 – Matozinhos. A Figura 4-3 mostra o sistema elétrico regional no qual será interligada a SE do cliente.

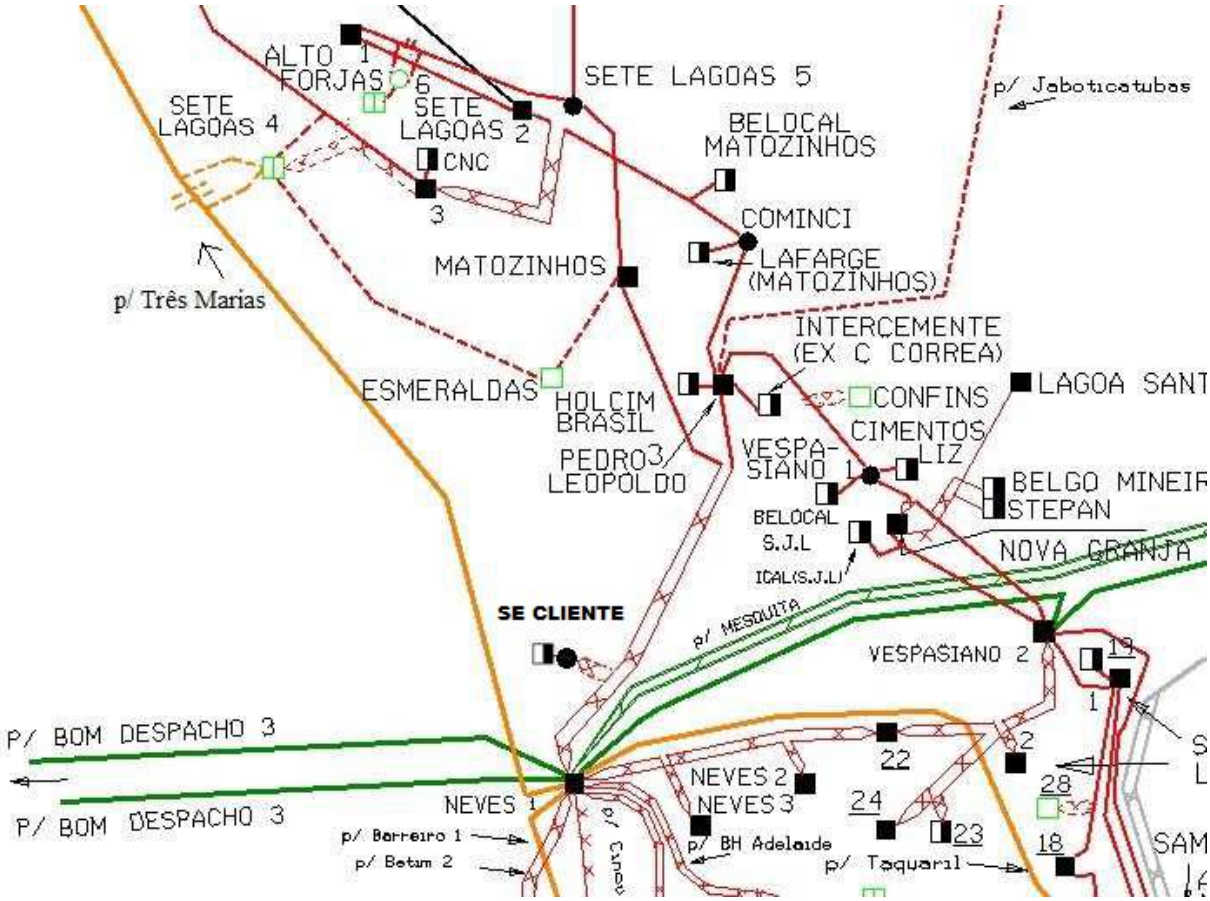

Figura 4-3 – Sistema Elétrico regional – SE do cliente (Fonte: [C18])

Destaca-se neste sistema, a capilaridade dos eixos estruturais de 138 kV e a proximidade com fontes de Transmissão, como a SE Neves 1 (500 kV) e a SE Sete Lagoas 4 (345 kV).

A visão ampla do sistema elétrico onde se interligará o consumidor, além do sistema de conexão, é importante para as análises de afundamento de tensão, uma vez que o desempenho de uma SE relativo ao fenômeno é influenciada por pontos remotos do sistema.

Foram considerados em operação os para-raios (ZnO) previstos serem instalados ao longo da LD 138 kV Neve 1 – Matozinhos e da LD 138 kV Neves 1 – Pedro Leopoldo 3.

4.2.3 Legislação

A ANEEL ainda não estabeleceu valores de referência ou padrões de desempenho das concessionárias, os quais deverão ser definidos em resoluções específicas, mas que ainda não foram publicadas.

Conforme PRODIST – Submódulo 8 [A20], as informações do desempenho das barras de subestações de distribuição a serem monitoradas poderão servir como referência de desempenho das barras de unidades consumidoras com cargas sensíveis a VTCD.

4.2.4 Metodologia de Análise

A metodologia empregada é similar à utilizada pelo ONS para analisar o Sistema de Transmissão, à proposta pela ANEEL para o monitoramento futuro do Sistema de Distribuição, e à utilizada pelo *Electric Power Research Institute (EPRI).*

Enquanto na abordagem do ONS, do EPRI e na proposição da ANEEL de limites de desempenho os dados provêm de medições, na metodologia adotada nesta análise utilizam-se dados de simulações para estimativa de desempenho futuro.

Os parâmetros para avaliação do desempenho do sistema elétrico em relação ao afundamento de tensão são os mesmos: amplitude, duração e frequência.

O desempenho do sistema elétrico será apresentado através dos seguintes indicadores:

- ✓ Índice de Desempenho de Subestação;
- ✓ Histograma de Frequência de Ocorrências (estimativa);
- ✓ Região de Vulnerabilidade.

4.2.4.1 I_{sev} – Índice de Desempenho de Subestações

O I_{sev} (Índice de Severidade) procura mostrar o quanto a SE do consumidor (barra de referência) está suscetível aos afundamentos de tensão, considerando simultaneamente, a amplitude, duração e frequência de *n* pontos de curto-circuito simulados. Quanto maior o I_{sev} mais suscetível é a barra de referência.

$$I_{SEV} = \sum_1^n exp(-V_r) \,.\, I_S.F.T \tag{4.1}$$

Onde:

- ✓ V_r é a tensão residual em p.u. calculada pelo curto-circuito deslizante [A17];
- ✓ I_S é a densidade de descargas individuais (strokes/km²/ano) ao longo das linhas;
- ✓ F é a taxa histórica de desligamentos/100km/ano em linhas;
- ✓ T é o parâmetro relacionado ao tempo de duração dos afundamentos de tensão;
- ✓ N é o índice do ponto do curto-circuito simulado.

A amplitude (ou tensão residual) do afundamento de tensão foi obtida a partir do software ASPEN ([A17]) utilizado na CEMIG e a duração considerou tempos típicos de atuação da proteção do sistema elétrico.

A frequência estimada foi obtida pela taxa histórica de faltas em linhas do sistema elétrico, ponderando-as pela densidade de descargas atmosféricas, pois os desligamentos causados por estas, poderão refletir em VTCD nas regiões de vulnerabilidade. A Figura 4-5 ilustra esta integração dos dados georreferenciados de LD e LT da CEMIG (GEOTRANS) com o mapa com a informação georreferenciada de densidade de descargas atmosféricas.

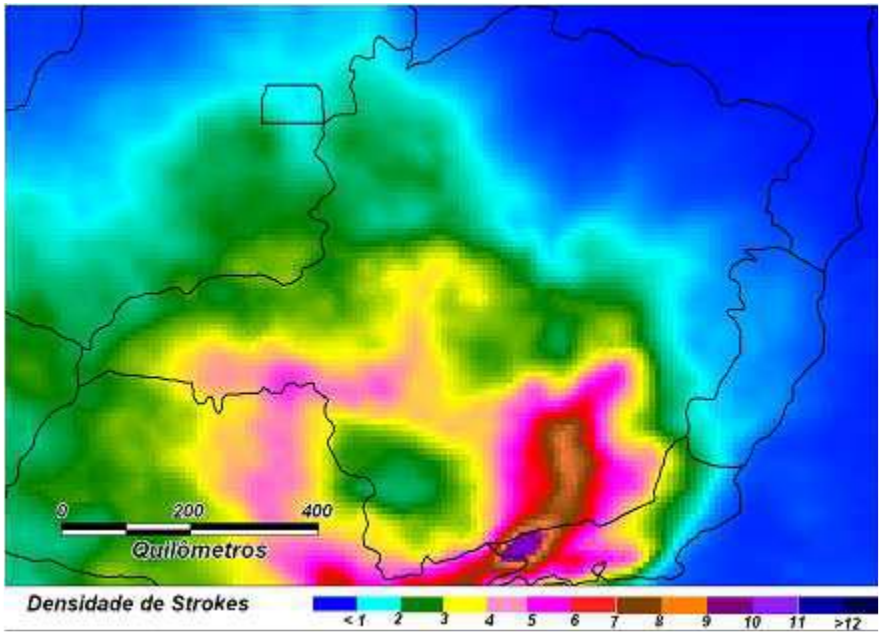

Figura 4-4 – Densidade de Descargas Individuais/km²/ano* (Fonte: [C18])

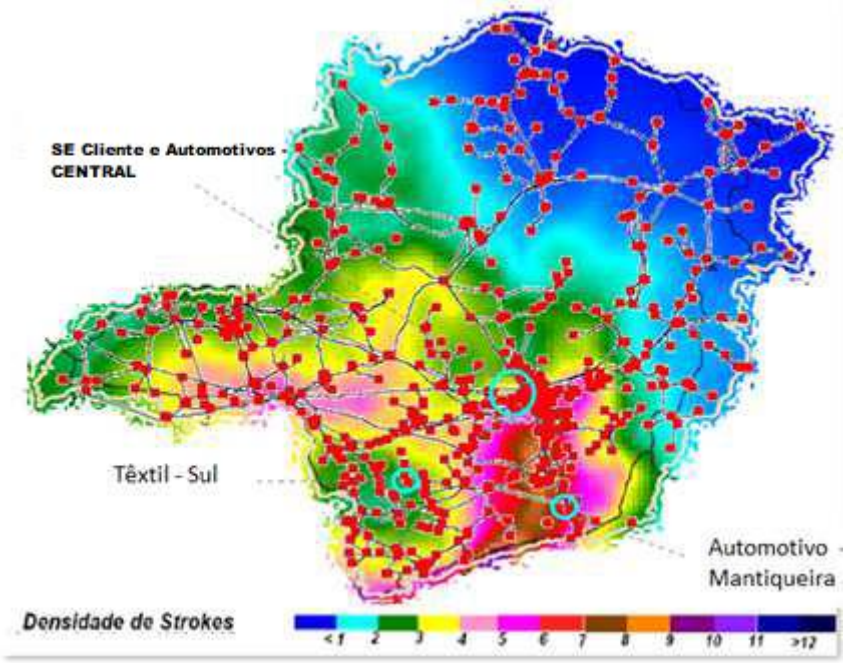

Figura 4-5 – Sistema Elétrico x Densidade de Descargas Georreferenciados (Fonte: [C18])

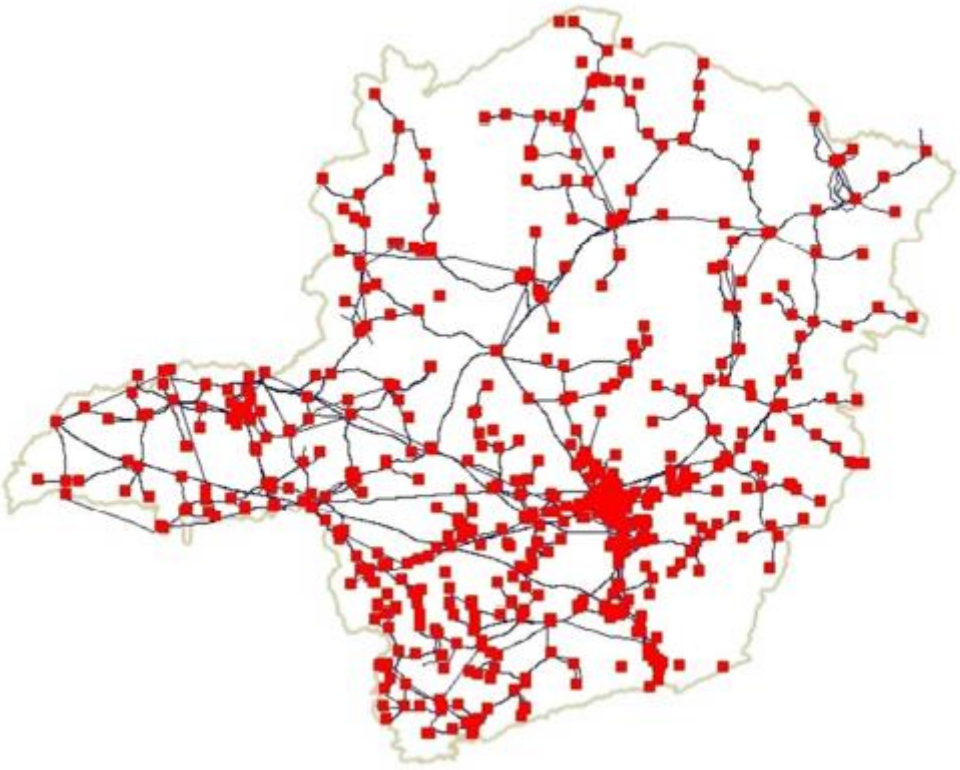

Figura 4-6 – Sistema Elétrico Georreferenciado (GEOTRANS) (Fonte: [C18])

4.2.4.2 Histograma de Frequência de Ocorrência

O histograma procura mostrar uma expectativa da frequência esperada de ocorrência de cada faixa de afundamentos de tensão em uma SE em observação.

4.2.4.3 Região de Vulnerabilidade

A região de vulnerabilidade permite estimar quantos km de linha podem provocar afundamentos de tensão em uma SE. O tamanho da região de vulnerabilidade influencia diretamente na frequência de ocorrência do fenômeno. Não necessariamente o maior valor implica o pior desempenho, tendo em vista que é necessário avaliar também os parâmetros duração e amplitude.

4.2.5 Resultados

Foram realizadas simulações de faltas monofásicas e trifásicas, com afundamentos de tensão de até 0,7 p.u., considerando-se a distribuição de probabilidade de 70% monofásicas e 5% trifásicas, em 105 SE de consumidores, os quais representam 95% dos grandes clientes conectados no sistema de distribuição da CEMIG-D. Faltas bifásicas e bifásicas-terra, as quais representam os outros 25%, não foram analisadas. Admitiu-se uma tensão pré-falta de 1.00 p.u. e resistência de falta nula.

A seguir são detalhados os objetivos e metodologias de cálculo para esses indicadores.

4.2.5.1 Histograma de Frequência de Ocorrência

Os histogramas apresentam a estimativa de ocorrências de afundamentos de tensão, por amplitude, para a SE de atendimento à SE do cliente.

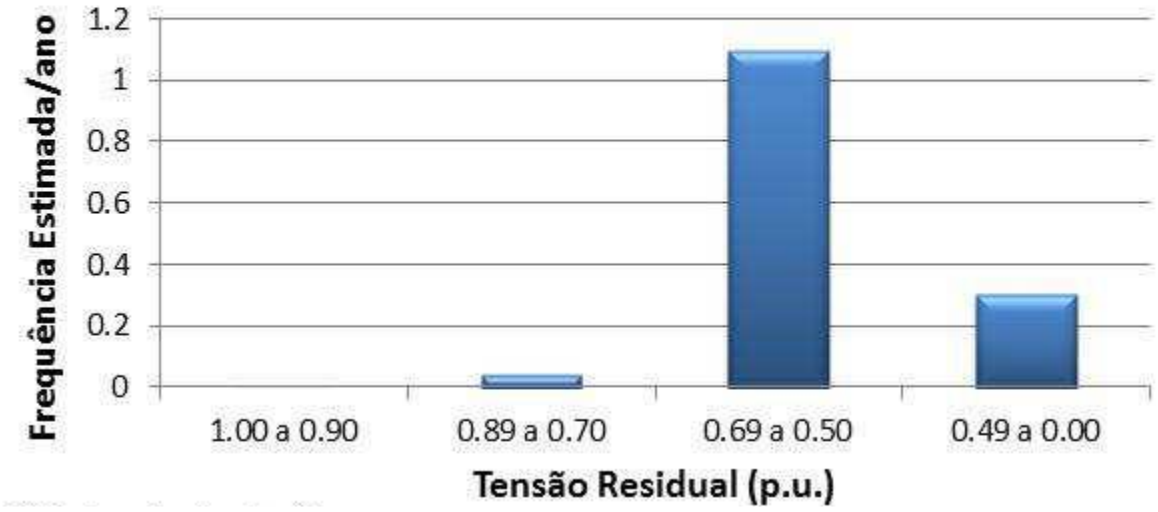

Figura 4-7 – Histograma de Frequência Estimada – Simulações Trifásicas (Fonte: [C18])

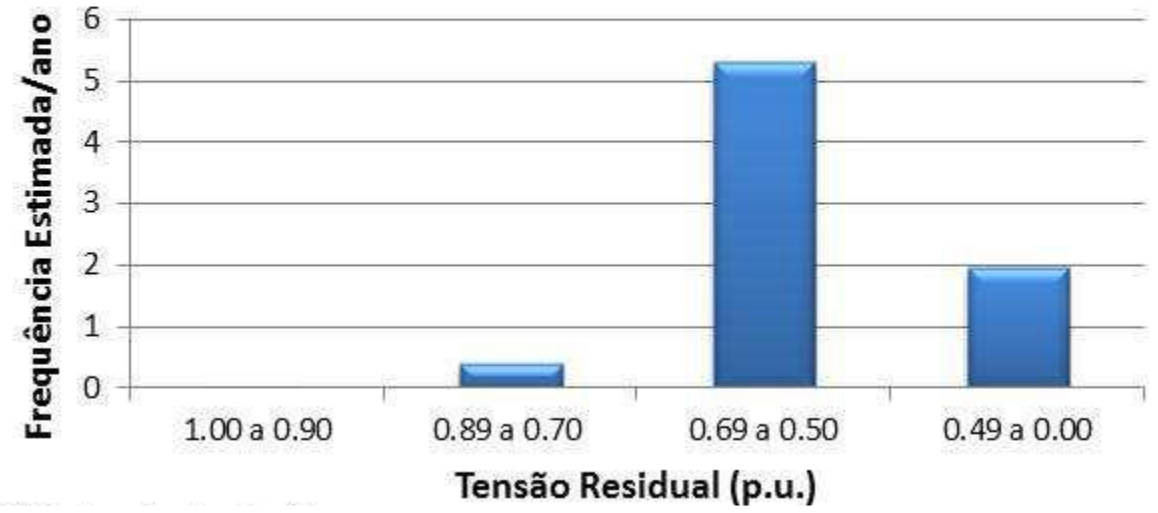

Figura 4-8 – Simulação de Frequência Estimada – Simulações Monofásicas Trifásicas (Fonte: [C18])

Verificam-se as seguintes expectativas para os afundamentos de tensão simulados na subestação do cliente:

- ✓ Maioria dos afundamentos de tensão com tensão residual entre 0.5 p.u. a 0.69 pu;
- ✓ Há probabilidade de afundamentos de tensão com tensão residual abaixo de 0.5 p.u.

Considerando o tempo típico de atuação da proteção do sistema de 138 kV, grande parte os afundamentos de tensão devem ter duração entre 150 ms a 300 ms. Já nos sistemas de transmissão (345 kV e 500 kV), poderão ocorrer afundamentos com duração inferior à 150 ms, tempo típico de atuação da proteção.

4.2.5.2 Índice de Desempenho de SE – I_{sev}

O gráfico da Figura 4-9 mostra os valores simulados do índice I_{sev} para 105 (cento e cinco) subestações de consumidores, que representam 95% dos atuais grandes clientes conectados no sistema de distribuição da CEMIG-D.

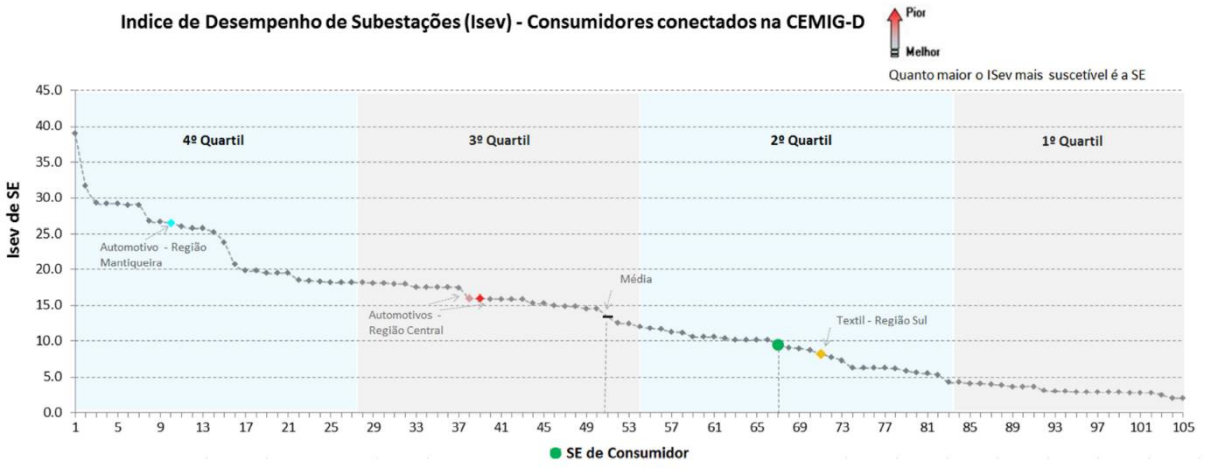

Figura 4-9 – Desempenho de SE de Consumidores – Índice I_{sev} Trifásicas (Fonte: [C18])

Considerando o indicador I_{sev}, pode-se observar para a SE do consumidor em relação aos afundamentos de tensão que:

- ✓ Encontra-se no 2º quartil, cujos valores são relativamente próximos das SE com os melhores desempenhos (1º quartil);
- ✓ Apresenta um desempenho superior (I_{sev} menor) comparado com os consumidores da região Central analisados;
- ✓ Apresenta um desempenho superior à maioria das SE dos consumidores localizados na região Mantiqueira e Triângulo do estado (3º quartil e 4º quartil);
- ✓ Apresenta um desempenho acima da média geral;

- ✓ Apresenta um desempenho inferior à maioria das SE de consumidores localizados na região Norte (1º quartil) e similares aos localizados no Leste do estado (2º quartil);

4.2.5.3 Região de Vulnerabilidade

O gráfico da Figura 4-10 mostra um comparativo do tamanho da região de vulnerabilidade para os mesmos 105 (cento e cinco) SE de consumidores conectados no sistema de distribuição da CEMIG-D.

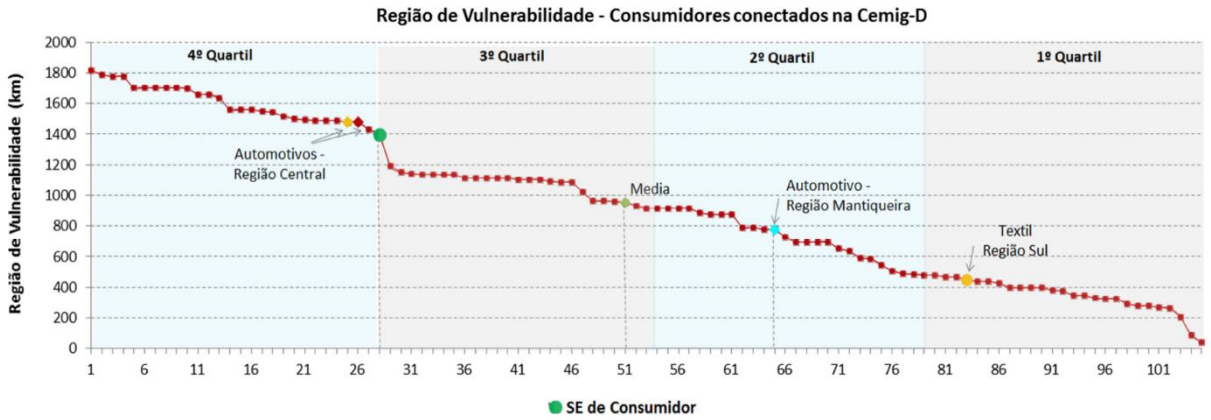

Figura 4-10 – Região de Vulnerabilidade de SE de consumidores Trifásicas (Fonte: [C18])

Considerando o indicador região de vulnerabilidade, pode-se observar as seguintes estimativas para a SE do cliente em relação aos afundamentos de tensão:

- ✓ O valor de 1.400 km para a região de vulnerabilidade indica que cerca de 1.400 km de linhas, quando em curto-circuito, provocam afundamentos de tensão na SE do consumidor (cerca de 60 linhas);
- ✓ Encontra-se no 3º quartil, no limiar com o 4º quartil que possui a maior região de vulnerabilidade;
- ✓ A região de vulnerabilidade é acima da média, em função da característica do sistema elétrico regional, com muitas LD e LT, e localizado em uma região com densidade de descargas atmosféricas considerável;
- ✓ Mais de 60% das linhas da região de vulnerabilidade são de 138 kV e o restante linhas fontes do sistema de transmissão de 500 kV e 345 kV.

4.2.5.4 Análise dos Resultados

Em função dos resultados apresentados, os principais pontos do desempenho na SE da empresa de semicondutores são descritos a seguir:

- ✓ Não está imune às ocorrências de afundamentos de tensão, como todo sistema elétrico, principalmente devido à predominância de sistemas aéreos na região de influência;
- ✓ A maioria dos afundamentos de tensão deve situar-se entre 0.5 p.u. a 0.69 p.u., com duração estimada entre 150 ms a 300 ms (9 ciclos a 18 ciclos de 60 Hz), tempo característico de atuação da proteção de 138 kV;
- ✓ Em termos relativos, apresenta um desempenho superior à média geral do universo de 95% dos consumidores simulados e conectados no sistema da CEMIG D;
- ✓ Analisando simultaneamente os parâmetros amplitude, duração e frequência, encontra-se no 2º quartil, com valores de desempenho relativamente próximos das SE com os melhores desempenhos;
- ✓ Apesar da região de vulnerabilidade relativamente extensa, o sistema elétrico que atenderá a empresa possui fontes fortes de suprimento, o que compensa positivamente no seu desempenho final em relação aos afundamentos de tensão.

Conforme apresentado acima, apesar da concessionaria garantir o atendimento a todos os critérios normativos da ANEEL, a SE do consumidor não estará imune às ocorrências de distúrbios no fornecimento de energia elétrica, a qual deverá garantir internamente a qualidade e ininterruptabilidade necessárias para a continuidade do seu processo produtivo.

Para justificar a necessidade de implantação de um sistema de energia ininterrupta de alto valor inicial e custos operacionais adicionais, utilizou-se como base o estudo anteriormente apresentado, no qual observou-se que um distúrbio e/ou interrupção no fornecimento de energia, poderia acarretar em perdas que giram em torno dos € 4,3 milhões (aproximadamente R$ 26 milhões).

5. SISTEMAS PARA GARANTIR A QUALIDADE E ININTERRUPTABILIDADE DA ENERGIA

5.1 AVALIAÇÃO DOS SISTEMAS IMPLANTADOS

Após a fase de estudos e avaliações do sistema no qual a fábrica de semicondutores seria inserida, e implantação da SE do cliente, devidamente conectada, foram realizados os testes operacionais, visando aferir todos os dados simulados e apresentar os parâmetros reais.

5.2 SISTEMA DE SUPRIMENTO (CONCESSIONÁRIA)

5.2.1 Medições

O Analisador de Energia foi instalado no Conjunto de Manobra – Barra B 13,8kV - Cubículo KO3 - Entrada 2 da Cemig, de modo a registrar as grandezas elétricas deste alimentador, entre os dias 18/05/2018 à 25/05/2018. O período de amostragem utilizado foi de 10 segundos. Para tais medições, utilizou-se os transformadores de potencial e corrente existentes no conjunto de manobra, cujos dados são apresentados a seguir:

- ✓ TP: 13800V-115V;
- ✓ TC: 800-5A.

Para estas medições, foi utilizado o Analisador de Energia Embrasul modelo RE6000, o mesmo foi programado para registrar as seguintes grandezas:

- ✓ V (Tensão);
- ✓ Hz (Frequência);
- ✓ I (Corrente);
- ✓ kVA (Potência Aparente);
- ✓ kW (Potência Ativa);
- ✓ kVAr (Potência Reativa);
- ✓ FP (Fator de Potência);
- ✓ Distorção total de tensão;

- ✓ Distorção total de corrente;
- ✓ Distorção Harmônica Total (DHT).

O Analisador também foi programado para registrar sobretensões, subtensões, sobrefrequências e subfrequências superiores a 5% da nominal, com o objetivo de registrar possíveis distúrbios de tensão na barra do Conjunto de Manobra.

5.2.2 Resultado das medições

Nas subseções a seguir, são apresentados tabelas e gráficos com os principais resultados das medições realizadas no Conjunto de Manobra - Barra B 13,8kV - Cubículo KO3 - Entrada 2 da Cemig.

Durante o período de medição, evidenciou-se que a carga alimentada pelo Conjunto de Manobra - Barra B 13,8kV - Cubículo KO3 - Entrada 2 da Cemig estava desligada, o que resultou em valores de corrente e potência iguais a zero. Dessa forma, foram obtidos valores medidos relativos à tensão, frequência e harmônicas de tensão.

5.2.3 Comportamento da tensão fase-neutro

A Figura 5-1 apresenta o gráfico com o comportamento da tensão fase-neutro no tempo e a Tabela 5-1 o resumo de tais medições.

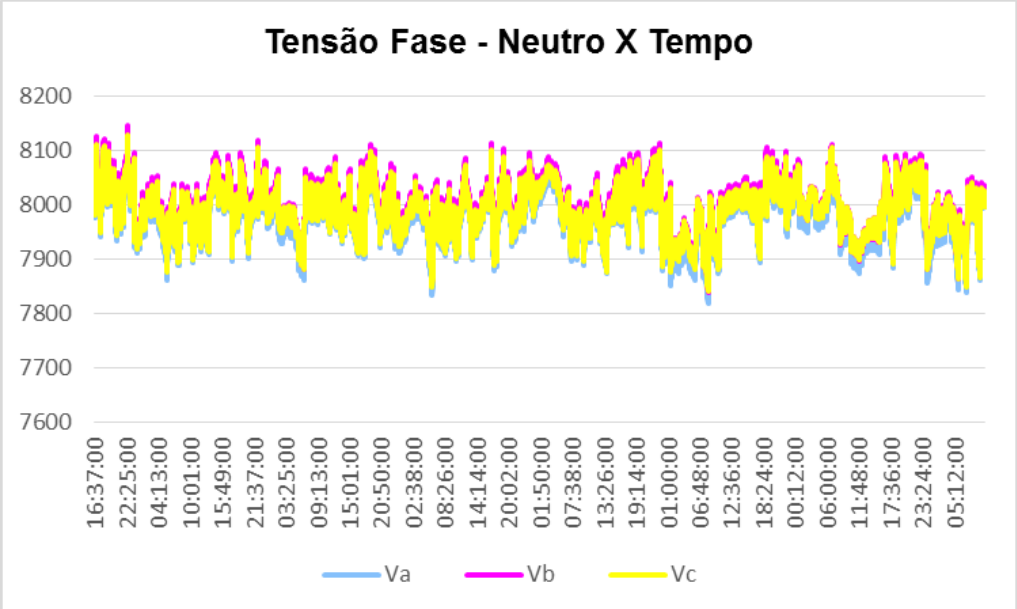

Figura 5-1 – Comportamento da tensão fase-neutro (Fonte: [U18])

Tabela 5-1 – Tabela resumo – Analisador EMBRASUL RE6000 (Fonte: [U18])

EMBRASUL RE6000/B/H/T/N N.S:96000615 V.S.2,16 ANL 1,75 (10 segundos)

ANÁLISE GERAL (Integração = 10 segundos)

Intervalo considerado:
segunda-feira 21/05/2018 16:36:10,00 até segunda-feira 28/05/2018 10:50:44,00

Faixas de horário estabelecidas no software

Intervalo - Fora de ponta:	00:00 - 00:00	00:00 - 18:00
Intervalo - Ponta:	18:00 - 24:00	
Intervalo - Reservado:		

Máximos, médios e mínimos de tensões e correntes por fase.

Fase A: tensões [V]				**Correntes [A]**			
Média	7,979 k			Média	0,00		
Mínimo	7,817 k	08:21:10,00	26/05/2018	Mínimo	0,00	16:36:20,00	21/05/2018
Máximo	8,121 k	22:41:00,00	21/05/2018	Máximo	0,00	16:36:20,00	21/05/2018
Fase B: tensões [V]				**Correntes [A]**			
Média	8,000 k			Média	0,00		
Mínimo	7,838 k	08:21:10,00	26/05/2018	Mínimo	0,00	16:36:20,00	21/05/2018
Máximo	8,147 k	22:41:00,00	21/05/2018	Máximo	0,47	23:07:10,00	25/05/2018
Fase C: tensões [V]				**Correntes [A]**			
Média	7,991 k			Média	0,00		
Mínimo	7,839 k	08:21:10,00	26/05/2018	Mínimo	0,00	16:36:20,00	21/05/2018
Máximo	8,130 k	22:41:00,00	21/05/2018	Máximo	0,00	16:36:20,00	21/05/2018

Potências médias, por fase e trifásicas, no intervalo

FASE	kW	kVAr	kVA	FP
A	0,000	0,000	0,000	1,000
B	0,000	0,000	0,000	0,000
C	0,000	0,000	0,000	1,000
Total	**0,000**	**0,000**	**0,000**	**0,000**

Potências aparentes por fase, segundo máximos e mínimos trifásicos

FASE	kVA(max)	Horário		kVA(min)	Horário	
A	0,000	25/05/2018	23:07:10,00	0,000	21/05/2018	16:36:20,00
B	3,866	25/05/2018	23:07:10,00	0,000	21/05/2018	16:36:20,00
C	0,000	25/05/2018	23:07:10,00	0,000	21/05/2018	16:36:20,00
3f	**3,866**	**25/05/2018**	**23:07:10,00**	**0,000**	**21/05/2018**	**16:36:20,00**

A partir Figura 5-1 e Tabela 5-1, observa-se que:

- ✓ A tensão entre a fase V_a e o neutro apresenta um mínimo de 7.817V, uma média de 7.979,97V e um máximo de 8.121,6V;
- ✓ A tensão entre a fase V_b e o neutro apresenta um mínimo de 7.838,40V, uma média de 8.000,63V e um máximo de 8.148,0V;
- ✓ A tensão entre a fase V_c e o neutro apresenta um mínimo de 7.839,6V, uma média de 7.991,10V e um máximo de 8.130,0V;

- ✓ A maior variação da tensão em relação à tensão nominal fase-neutro (7.967,4V) é apresentada na fase V_b (8.148,0V), o que corresponde a 2,2% acima da tensão nominal.

5.2.4 Comportamento da tensão fase-fase

A Figura 5-2 apresenta o comportamento da tensão fase-fase no tempo.

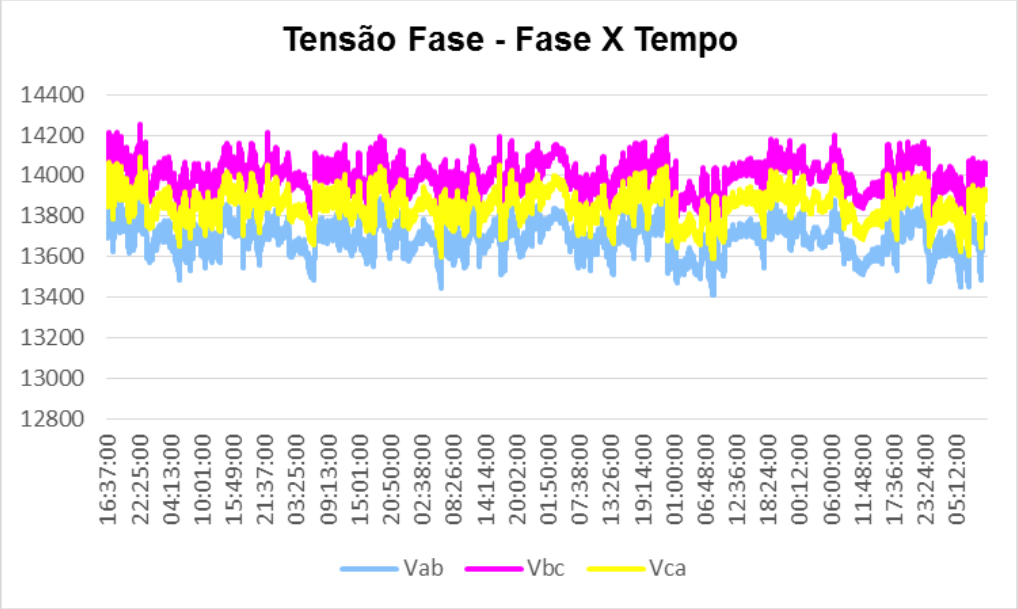

Figura 5-2 – Comportamento da tensão fase-fase Trifásicas (Fonte: [U18])

É possível observar da Figura 5-2 que:

- ✓ A tensão entre as fases V_{ab} apresenta um mínimo de 13.408,80V, uma média de 13.692,19V e um máximo de 13.941,6V;
- ✓ A tensão entre as fases V_{bc} apresenta um mínimo de 13728,0V, uma média de 14.000,17V e um máximo de 14.251,2V;
- ✓ A tensão entre as fases V_{ca} apresenta um mínimo de 13.586,40V, uma média de 13.855,26V e um máximo de 14.097,6V;
- ✓ A maior variação de tensão entre as fases em relação à tensão nominal (13.800V) é apresentado entre as V_{bc} (14.251,2) o que corresponde a 3,27% acima da tensão nominal.

Considerando os valores médios apresentados, pode-se obter o Fator de Desequilíbrio de Tensão, conforme abaixo:

$$FD\% = 100\sqrt{\frac{1-\sqrt{3-6\beta}}{1+\sqrt{3-6\beta}}} \quad (5.1)$$

Sendo:

$$\beta = \frac{V_{ab}^4+V_{bc}^4+V_{ca}^4}{(V_{ab}^2+V_{bc}^2+V_{ca}^2)^2} \quad (5.2)$$

Então:

$$FD\% = 1{,}26\%$$

5.2.5 Comportamento da frequência

A Figura 5-3 apresenta o comportamento da frequência no tempo.

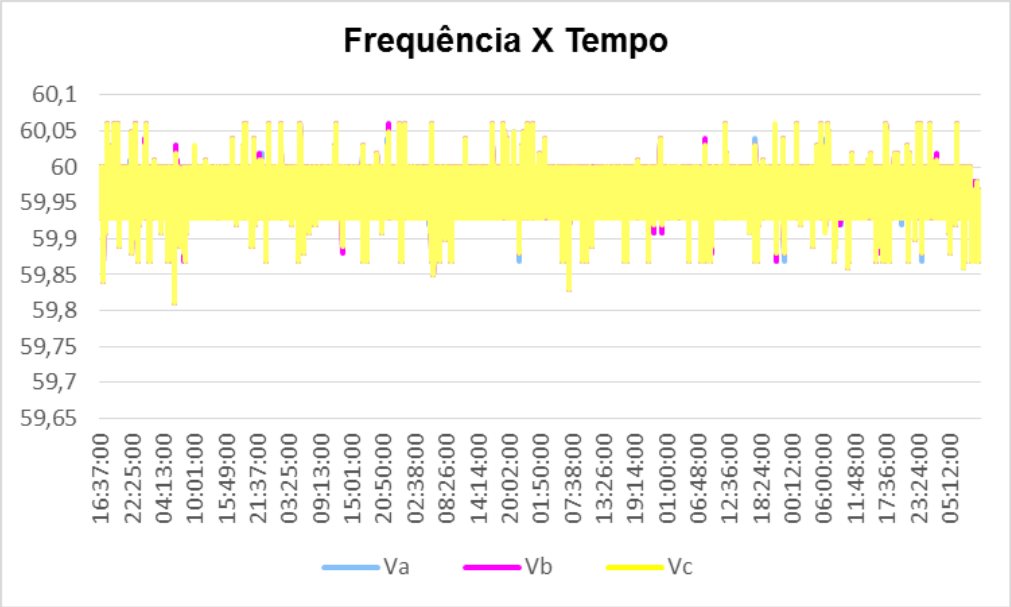

Figura 5-3 – Comportamento da frequência Trifásicas (Fonte: [U18])

Observa-se, a partir do gráfico apresentado na figura acima, que a frequência varia entre 59,81 e 60,06, não ocorrendo variações significativas em relação a frequência da rede (60Hz).

5.2.6 Comportamento das harmônicas de tensão

A Figura 5-4 apresenta o comportamento das harmônicas de tensão.

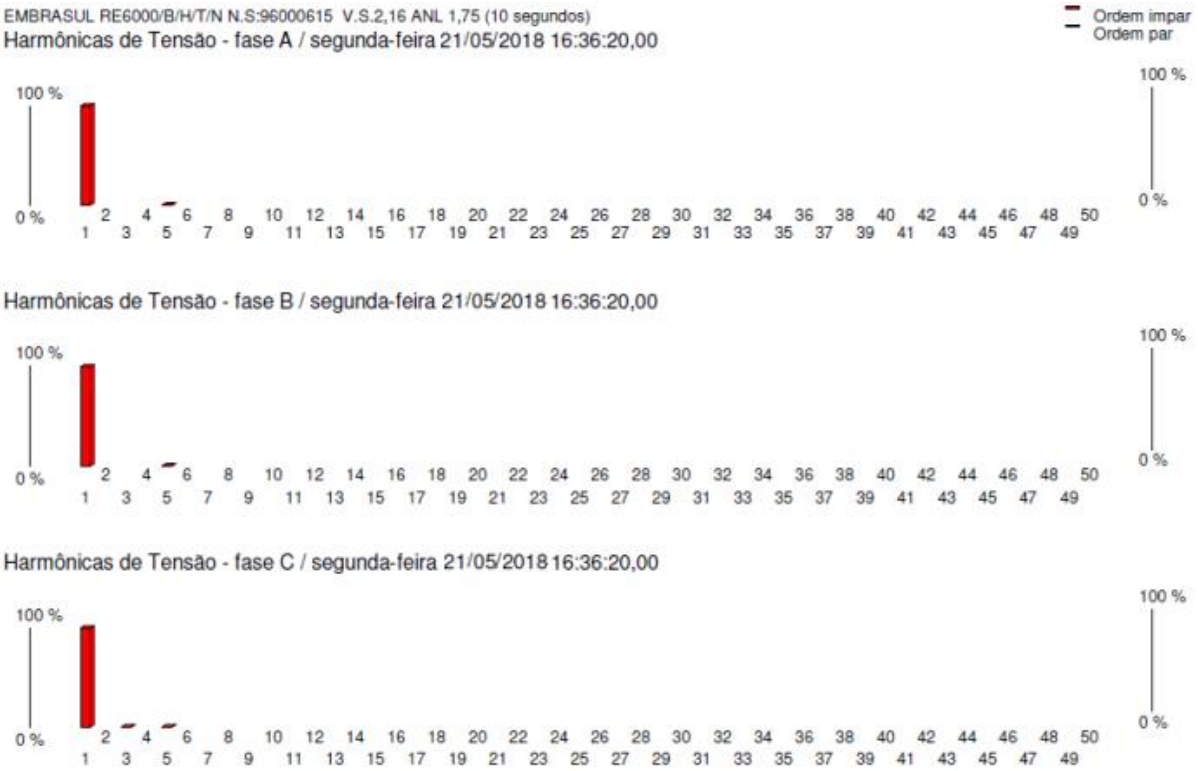

Figura 5-4 – Comportamento das harmônicas de tensão Trifásicas (Fonte: [U18])

Observa-se pela Figura 5-4, que a presença de harmônicas ímpares (ordem 3, 5, 7 ...) são praticamente nulas, sendo a DHT um importante índice para garantir a QEE.

5.2.7 Medições de grandezas elétricas

A Tabela 5-2 apresenta os principais resultados da medição de grandezas elétricas.

Tabela 5-2 – Grandezas Elétricas (Fonte: [U18])

Dados	Tensão (V)	Frequência (Hz)	DHT (%)
Mínimo	13.483,2	59,81	0,01
Média	13.849,05	59,96	0,53
Máximo	14.251,2	60,06	0,9

5.2.8 Conclusões

A partir das análises apresentadas ao longo deste relatório, observa-se que não ocorreram desequilíbrios significativos de tensões, frequências e harmônicas de tensão entre as fases nas medições de grandezas elétricas realizadas na entrada no Conjunto de Manobra - Barra B 13,8kV - Cubículo KO3 - Entrada 2 da Cemig.

5.3 SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO INTERNO – SE DO CLIENTE

A Tabela 5-3 apresenta os requisitos mínimos de qualidade de energia requeridos na Indústria de Semicondutores em questão.

Tabela 5-3 – Requisitos de Qualidade de Energia – Indústria de Semicondutores (Fonte: [C18])

Descrição	Requerimento
Variação máxima de Tensão (V)	± 8%
Variação máxima de Frequência (Hz)	60 ± 0.2 %
Tempo máximo de Interrupção	< 16 ms

Após a avaliações dos resultados obtidos nos estudos apresentados na Seção 4.2.1, bem como os requisitos mínimos apresentados pela Indústria de Semicondutores (e.g. Tabela 5-3), observou-se a necessidade de implantação de um sistema para garantir a qualidade e ininterruptabilidade em casos de distúrbios no fornecimento de energia, visto que no PRODIST não existe a regulamentação das VTCD (variações acima de ±10% com duração menor que 3min).

Para isto, desenvolveu-se a engenharia do sistema elétrico de energia conforme será demonstrado nos itens a seguir.

5.3.1 Qualidade de Energia e Ininterruptabilidade – Estudos

Em decorrência da crescente utilização da automação nos processos industriais atuais, a Qualidade da Energia Elétrica (QEE) entregue pelas concessionárias tem recebido cada vez mais atenção, tanto dos agentes do setor elétrico quanto dos pesquisadores de centros acadêmicos. Equipamentos de cargas críticas, computadores pessoais, redes inteligentes e dispositivos controlados eletronicamente em instalações residenciais, são alguns exemplos desse processo de automatização.

Um aspecto importante relacionado à QEE é o afundamento de tensão da rede de distribuição, a qual deve respeitar os limites especificados pelos órgãos reguladores. Dentre os principais problemas decorrentes dos distúrbios estão o desligamento de equipamentos sensíveis, os danos por sobretensões, o aumento de perdas em vazio nos transformadores, as operações com baixa eficiência dos equipamentos elétricos, entre outros.

Pesquisa realizada pelo *European Copper Insitute* apresenta algumas soluções adotadas pelos diversos setores da sociedade para eliminar ou mitigar os fenômenos de QEE, como mostra a Figura 5-5 [B14].

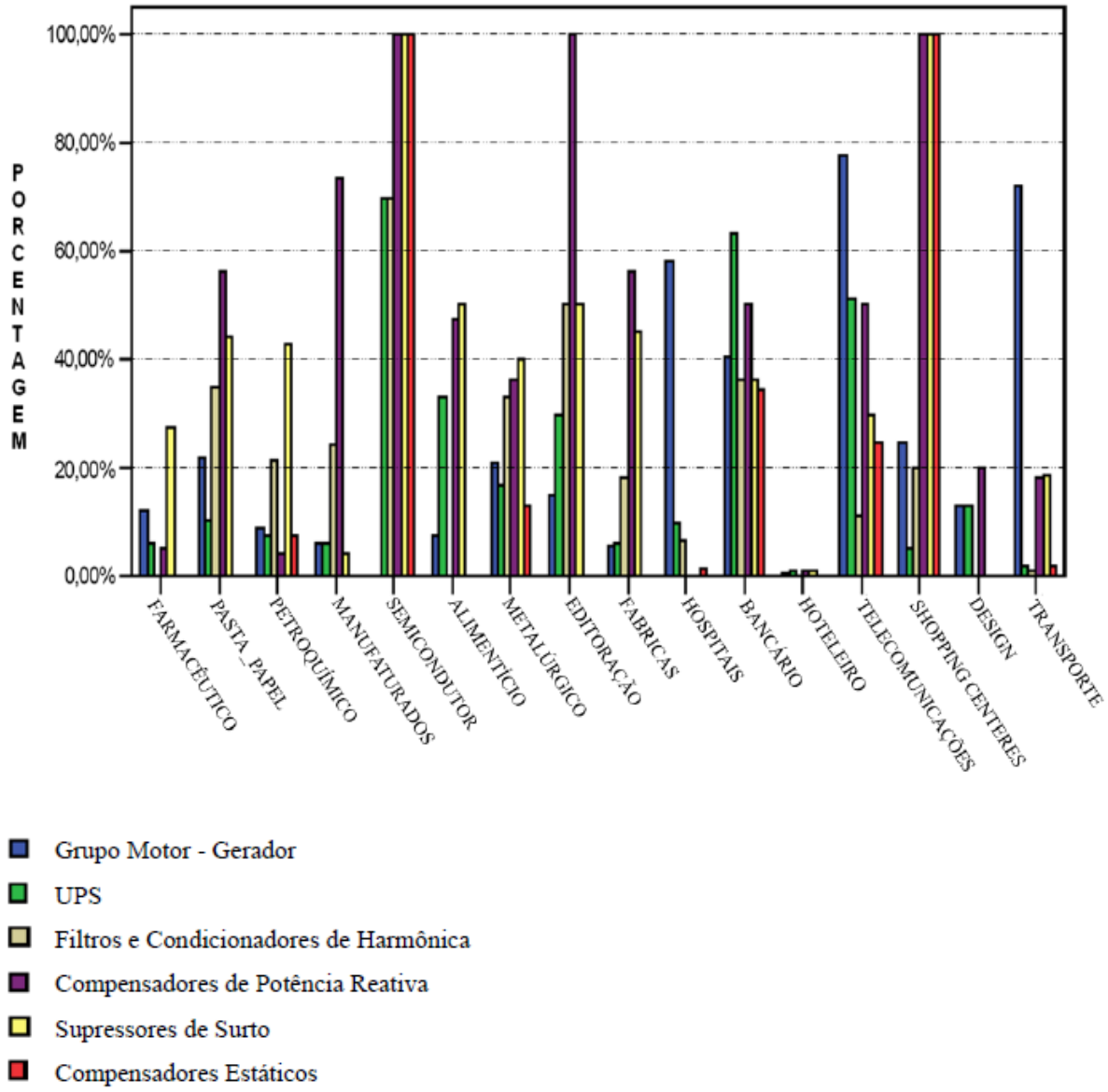

Figura 5-5 – Soluções adotadas para eliminar ou mitigar os fenômenos de QEE em setores da sociedade em porcentagem da carga total instalada (Fonte: [B14])

Pode-se observar que nas indústrias de semicondutores, o uso de Sistemas Ininterruptos de Energia, ou, em inglês, *Uninterruptible Power Systems* (UPS) é necessário em aproximadamente 70% da carga total instalada, pois grande parte dos equipamentos são sensíveis e críticos para o processo

Para garantir todos os requisitos de qualidade da energia e ininterruptabilidade no atendimento das cargas críticas, o consumidor realizou um estudo interno, avaliando as tecnologias disponíveis no mercado, considerando critérios tais como, custo de implantação e operacional, prazos de fornecimento e montagem, indicadores de manutenabilidade dentre outros

5.3.1.1 Recebimento e Transformação

Afim de evitar-se as variações normais de tensão que ocorrem ao longo do dia, seja pelas próprias cargas ligadas à rede interna de distribuição ou pela concessionária, os transformadores principais (138/13,8 kV) da SE da consumidora possuem comutador de *tap* sob carga (OLTC – *On-Load Tap Changer*).

Com o controle feito na tensão de entrada, para manter a saída constantemente próximo da nominal, os transformadores são capazes de ajustar numa faixa de ± 10%, através comutação do *tap,* onde é realizada a variação da relação entre o número de enrolamentos do primário e secundário. A comutação do *tap* é realizada automaticamente por motores, sob carga (*Load Tap Changer* – LTC), onde cada comutador de *tap* tem associado um relé regulador automático de tensão (conhecido como “relé 90”), que monitora a tensão do secundário do transformador e comanda as operações de comutação de *tap* como desejado [U08].

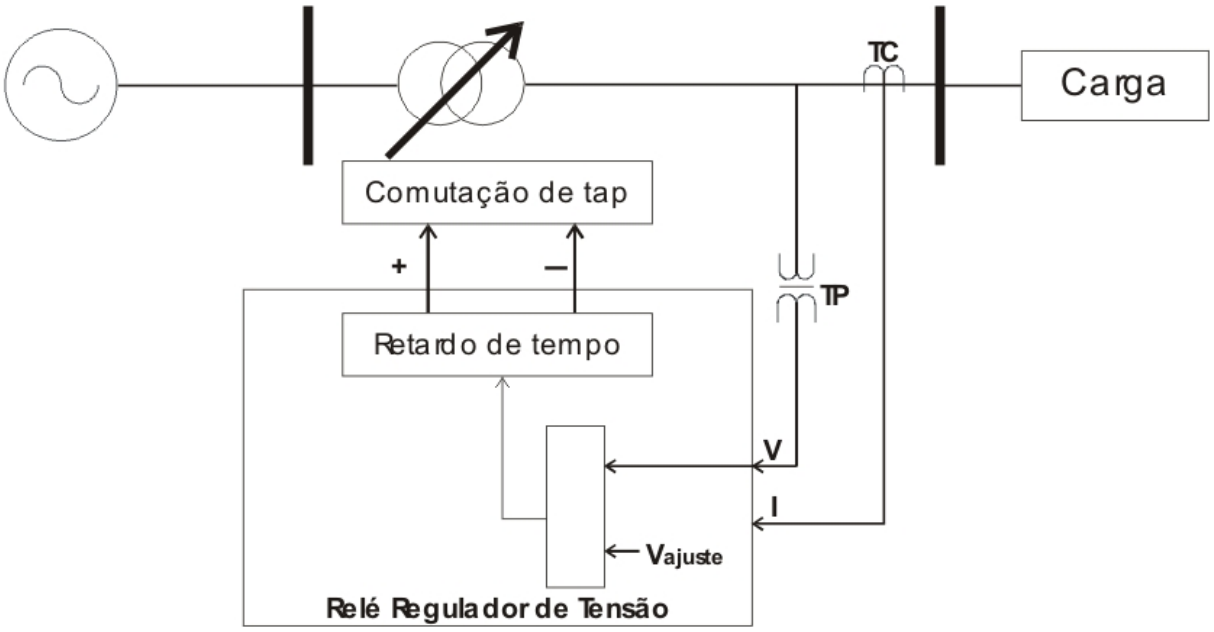

Figura 5-6 – Esquema do relé regulador automático de tensão (Fonte: [U08])

5.3.1.2 Sistema Dinâmico

Os UPSs são equipamentos de fornecimento de energia secundária e/ou de emergência e são divididos em 3 (três) categorias: dinâmicos (UPS rotativo), estáticos (UPS eletrônico) e híbridos (combinação das tecnologias dinâmica e estática), estáticos e híbridos.

A UPS dinâmica além de garantir a ininterruptabilidade no fornecimento de energia, tem também como característica corrigir a energia elétrica fornecida pela fonte e garantir a qualidade do produto entregue às cargas críticas.

O armazenamento da energia cinética é feito através da rotação contínua em 7700 rpm de um volante de inércia de aproximadamente 350kg, instalado em ambiente de vácuo, para reduzir assim o atrito (conforme Figura 5-7 e Figura 5-8).

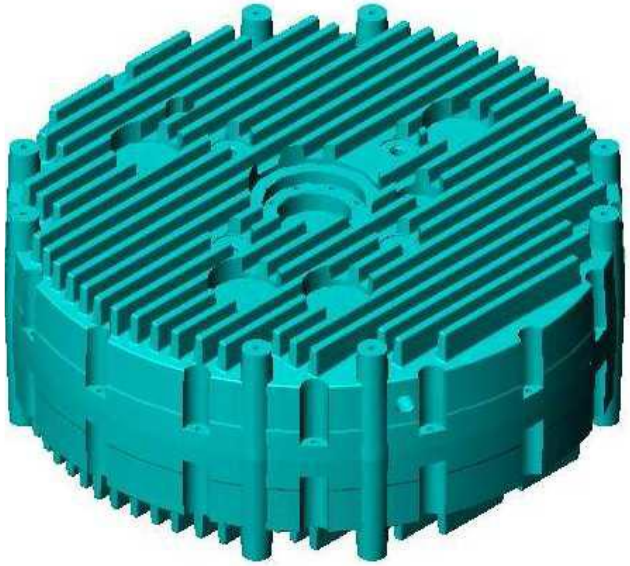

Figura 5-7 – Volante de Inércia para armazenamento de energia cinética (Fonte: [C06])

Figura 5-8 – Volante de Inércia para armazenamento de energia cinética (Fonte: [C06])

A configuração da UPS dinâmica é através da filosofia *parallel online (*Figura 5-9*)*, onde não existe a dupla conversão (CA/CC – CC/CA) utilizada nos modelos convencionais à bateria, tendo o circuito de potência ligado em paralelo com a linha principal de alimentação e possuindo somente aparelhos de corte e comando entre a entrada e a saída.

A descarga do volante de inércia ocorre somente quando há a variação superior a 10% da tensão nominal no fornecimento de energia elétrica, sedo que para corrigir os distúrbios sua intervenção limita-se à utilização de eletrônica (IGBTs, condensadores e etc.). Após a utilização desta energia armazenada no volante de inércia, é consumida uma potência de 75kW para a “recarga” do mesmo.

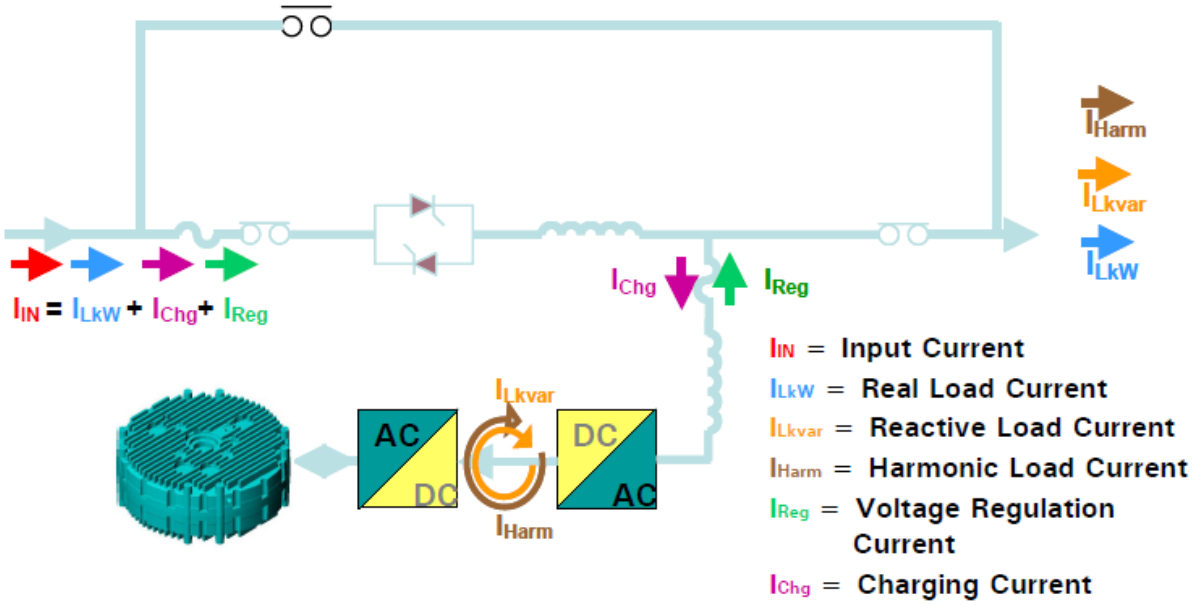

Figura 5-9 – UPS em modo online, sem ausência total no suprimento de energia (Fonte: [C06])

Em eventos de ausência total de energia elétrica, onde a UPS torna-se a única fonte (Figura 5-10), o sistema de UPS foi dimensionado para suportar o atendimento de todas as cargas críticas à pleno funcionamento, durante um período de 20s. Este tempo é suficiente para que o sistema de GMG, possa assumir automaticamente todo o suprimento de energia elétrica.

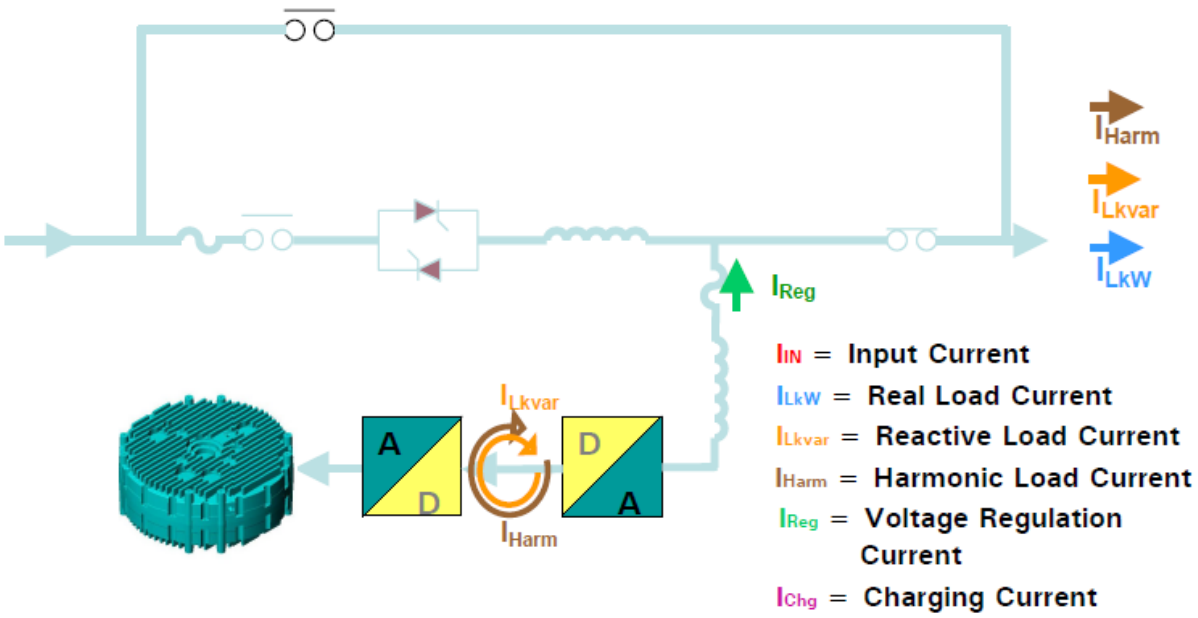

Figura 5-10 – UPS em modo online, com ausência total no suprimento de energia (Fonte: [C06])

Apresentando uma eficiência que gira em torno de 97% à plena carga, sendo bem superior em relação às UPSs convencionais (estática de baterias), as UPSs dinâmicas são a melhor solução para os diversos problemas das redes elétricas, podendo citar: interrupção, harmônicas, variações frequência e etc. Importante mencionar também que a UPS dinâmica garante a correção do fator de potência sempre para o unitário.

Outras das grandes vantagens da UPS dinâmica em relação às soluções convencionais de baterias tem a ver com a reduzida área de implantação necessária e a necessidade de realizar somente manutenções básicas, envolvendo a troca de óleo da bomba de vácuo e rotinas simples de inspeção, em contrapartida, o sistema estático, requer uma rotina detalhada de manutenção preventiva nas baterias, ventiladores e etc. A título de exemplo, uma UPS estática de baterias para 250KVA necessitaria de pelo menos 5 m^2 de área de implantação, ao passo que a UPS dinâmica não ocupa mais de 1,4 m^2 [S16].

5.3.1.3 Grupo Motogeradores (GMGs)

Para garantir a ininterruptabilidade no fornecimento de energia, quando ocorrem distúrbios de ausência de tensão em períodos superiores a 2 ciclos, foram instalados grupos motogeradores à diesel.

Os geradores (acionados por motor de combustão, à óleo diesel, gás natural, biogás e outros) são os responsáveis por converter a energia mecânica em elétrica através da indução eletromagnética, onde uma corrente que flui através do rotor, cria um campo magnético induzindo a os elétrons nas bobinas do estator, que resultará em corrente alternada.

Existem quatros tipos de alternadores (geradores) que convertem a energia mecânica em energia elétrica, são eles:

- ✓ Gerador de Corrente Contínua;
- ✓ Gerador de Indução;
- ✓ Gerador Síncrono;
- ✓ Motores Elétricos.

5.3.2 Implantação

Sabe-se nas indústrias em geral, uma das principais características que leva à escolha de um sistema é, sem dúvida, o custo total para a implantação e operação dos mesmos.

No caso das indústrias de semicondutores, apesar dos custos do sistema serem também de extrema importância, a necessidade de garantir o atendimento aos requisitos mais restritivos de qualidade de energia e ininterruptabilidade, além dos altos impactos financeiros decorrentes paralisações ocorridas por distúrbios em geral, fazem com que a avaliação seja mais técnica do que financeira.

Após os estudos já mencionados, foi instalado um sistema composto por UPSs Dinâmicas e Grupos Moto Geradores (GMG), onde as UPSs garantem a qualidade e ininterruptabilidade da energia elétrica e, os geradores o atendimento auxiliar em casos de interrupções no suprimento vindo da concessionária.

Buscando melhorar também a confiabilidade dos sistemas, foram instalados uma UPS e um GMG reservas, e em paralelo aos respectivos equipamentos em operação, diminuindo assim a probabilidade nas ocorrências de falhas, bem como a redução no tempo de eventuais paradas corretivas.

Na Figura 5-11, está apresentado o diagrama Unifilar da Subestação Principal do cliente, após a definição dos sistemas para garantir a qualidade e ininterruptabilidade no fornecimento de energia.

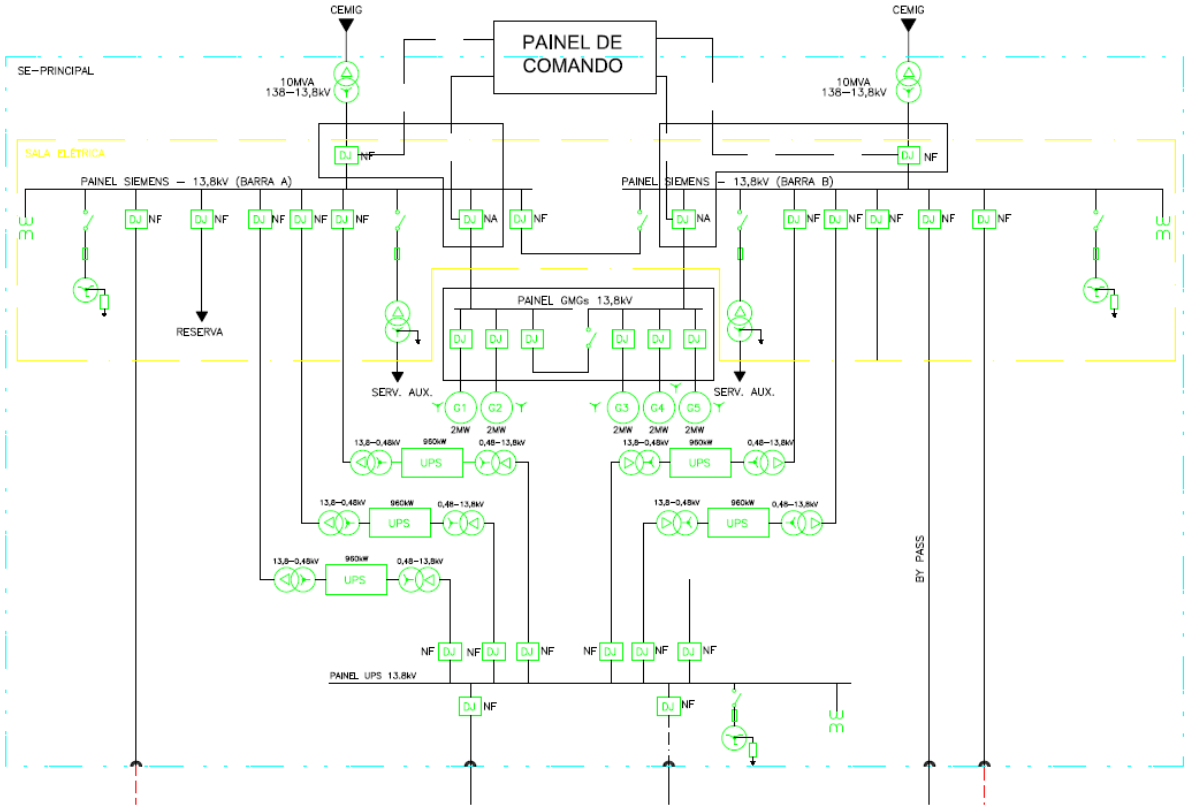

Figura 5-11 – Unifilar Subestação Principal do Cliente (Criado pelo autor)

De acordo com os estudos elétricos realizados na fase de desenvolvimento do projeto de implantação, verificou-se que as cargas críticas representam aproximadamente 50% da demanda total de 10MW na SE do consumidor, sendo que, para garantir a qualidade da energia entregue às mesmas e a ininterruptabilidade do fornecimento em caso de distúrbios na alimentação da concessionária, foram instalados os sistemas descritos a seguir.

- ✓ 5 UPSs Catterpillar 1200Z – 1.200kVA – 960kW (composta por 4 módulos de 300 kVA / 240 kW) – 480V
- ✓ 3 Grupo Motogeradores Catterpillar 3516 – 2.281kVA – 1.825kW

Abaixo seguem os valores aproximados referentes à implantação dos sistemas.

Tabela 5-4 – Custos aproximados para a implantação do sistema de energia ininterrupta (Criado pelo autor)

Descrição	Custo (R$/MW)
UPS	R$ 2.500.000,00
Geradores	R$ 1.000.000,00

A Tabela 5-4, demonstra que foi necessário um investimento inicial de aproximadamente R$ 15,5 milhões para a implantação do sistema de energia ininterrupta.

5.3.3 Operação

5.3.3.1 UPS

Conforme demonstrado anteriormente, as UPS operam em modo *parallel online*, sendo assim, toda a energia proveniente da alimentação principal destinada às cargas críticas, é corrigida antes da entrega.

Para o dimensionamento da fonte de alimentação necessária em cada UPS, tem-se:

$$P_{input} = \frac{P_{output} + P_{recharge}}{\eta} \quad (5.3)$$

Onde:

- ✓ P_{input} é a potência ativa requerida da alimentação principal pela UPS;
- ✓ P_{output} é a potência ativa entregue pela UPS às cargas;
- ✓ $P_{recharge}$ é a potência requerida pela UPS para alimentação do volante de inercia;
- ✓ H é o rendimento da UPS.

Considerando os dados já anteriormente informados:

$$P_{input} = \frac{4x240+4x75}{0,97} = 1.298,97 \text{ kW}$$

Ou seja, uma UPS de 960kW, solicita 1.298,97kW na entrada, para funcionamento a plena carga, isto representa um acréscimo de aproximadamente 35% no consumo final referente ao atendimento às cargas críticas, com um custo horário aproximado de R$ 292 por equipamento.

5.3.3.2 GMG

Conforme já mencionado, o sistema de geração à diesel opera em modo *stand by*, ou seja, entra em operação somente quando ocorrem distúrbios de ausência de tensão em períodos superiores a 2 ciclos, sendo capaz de assumir todo o fornecimento de energia elétrica em aproximadamente 15s (tempo em que a carga permanece “alimentada” pelas UPSs).

Cada gerador, funcionando à plena carga, consome aproximadamente 530l/h de diesel, representando um custo horário de aproximadamente R$ 1.400.

5.4 CONCLUSÕES

Pode-se observar que durante o período da realização das medições, não houveram variações significativas dos principais índices de QEE, o que demonstrou a eficiência do sistema implantado e aderência aos resultados apresentados também no estudo de viabilidade (4.2), mas sendo importante mencionar que isto não garante que a SE do consumidor estará imune às ocorrências de distúrbios no fornecimento de energia elétrica.

Sendo assim, foram estudados e implantados os sistemas para garantir a qualidade e ininterruptabilidade necessárias para a indústria de semicondutores, que mesmo com o alto valor de implantação justificam-se pelo fato de que qualquer distúrbio ocorrido poderia acarretar em perdas que giram em torno dos € 4,3 milhões (aproximadamente R$ 26 milhões).

Importante observar que além do alto custo de implantação, a operação destes sistemas, mesmo que com alto índice de desempenho, aumentam o consumo

energético da SE do consumidor, sendo assim, a aplicação dos mesmos devem ser restritos ao atendimento das cargas críticas.

6. PROPOSIÇÃO DE COMPENSAÇÕES FRENTE AS VTCD

Quanto maior a sensibilidade e criticidade das cargas em relação aos distúrbios de energia, maior será o impacto nos processos produtivos, e quanto maior o valor agregado do produzido, maior será o lucro cessante.

Partindo dessa premissa, pode-se assumir que o mais adequado seria a proposição de índices de desempenho para controlar as VTCD e as interrupções internas de cada consumidor. Além disto, os cálculos das compensações deveriam conter uma parcela para considerar os impactos negativos provenientes de distúrbios no fornecimento de energia.

Conforme demonstrado, os limites de continuidade determinados pelo PRODIST, não refletem o real impacto causado pelos distúrbios nas empresas e podem acarretar em lucros cessantes exorbitantes. No entanto, esses montantes não são considerados nos cálculos de compensação, e consequentemente, os consumidores industriais devem instalar sistemas caros e complexos, os quais visam garantir a qualidade e ininterruptabilidade necessárias para o atendimento das suas cargas críticas.

Sendo assim, seguem abaixo os limites propostos para a frequência de ocorrência de eventos de VTCD e um novo índice de Duração de Interrupção Interna Individual por Unidade Consumidora (DIIC), visando garantir que as concessionárias entreguem produtos de melhor qualidade ao consumidor e que os mesmos possam ser compensados em caso de não atendimento.

6.1 FREQUÊNCIA DE OCORRÊNCIAS DE EVENTOS VTCD (f_{ei})

Corresponde à quantidade de vezes que cada combinação de parâmetros duração e amplitude ocorre por unidade de tempo, sendo que os eventos simultâneos devem ser agregados compondo um mesmo evento no barramento sob avaliação, apurado por medição apropriada no período de 30 (trinta) dias consecutivos [A20].

Para a apuração dos eventos ocorridos, propõem-se que as curvas referentes às VTCD sejam correlacionadas com as curvas de carga e registro de manobras dos consumidores.

Tabela 6-1 - Limites de ocorrência de VTCD propostos, estratificado por amplitude e duração

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]
(0,85 – 0,90]	0	0	0	0	0	0	0
(0,80 – 0,85]	0	0	0	1	1	1	1
(0,70 – 0,80]	4	2	2	1	1	1	1
(0,60 – 0,70]	4	2	2	1	1	1	1
(0,50 – 0,60]	3	2	2	1	1	1	1
(0,40 – 0,50]	3	2	2	1	1	1	1
(0,30 – 0,40]	1	1	1	1	1	1	1
(0,20 – 0,30]	1	1	1	1	1	1	1
(0,10 – 0,20]	1	1	1	1	1	1	1
< 0,10	1	1	1	1	1	1	1

A Tabela 6-1 segue a mesma estrutura apresentada na Tabela 3-1 e Tabela 3-2, sendo que para garantir o atendimento ao parâmetro de Fator de Impacto unitário (Equação 3.2), os índices devem atender ao proposto na Tabela 3-3, onde o Fator de Impacto Base (FI_{BASE}) deverá ser maior ou igual ao somatório dos fatores de ponderação pelas respectivas frequências de ocorrência (Equação 6.1) [A20].

$$FI_{BASE} \geq \sum_{i=A}^{I} (f_{ei} x f p_i) \tag{6.1}$$

Considerando a aplicação das Tabelas 3.3 e 6.1, na Equação 3.2, a qual já considera a aplicação do FI_{BASE} apresentado na Equação 6.1, tem-se que:

$$FI = 0{,}9507$$

Os limites nulos entre as amplitudes de 0,80 e 0,90 pu (região A) devem-se ao fato de o PRODIST já definir o respectivo fator de ponderação (fp_i) também como nulo (Tabela 3-3), ou seja, qualquer ocorrência nessa região não terá como ser avaliada, pois não irá refletir na alteração do Fator de Impacto Base (FI_{BASE}).

6.2 DURAÇÃO DE INTERRUPÇÃO INTERNA INDIVIDUAL POR UNIDADE CONSUMIDORA (DIIC)

Indicador de continuidade de serviço, considerando o controle das interrupções diretamente na SE do consumidor, utilizando a Equação 6.2:

$$DIIC = \sum_{i=1}^{n} t\,(i) \tag{6.2}$$

Para o cálculo do valor da compensação é proposta aplicação da Equação 6.3:

$$Valor = DIIC\ x\ ELCh\ x\ kei \tag{6.3}$$

Onde:

- ✓ *ELCh* é o Encargo de lucro cessante por hora, definido durante o fechamento do contrato de fornecimento de energia;
- ✓ *kei* é o coeficiente de majoração cujo valor deve ser fixado em [A20]:
  - 15 (quinze), para unidade consumidora ou ponto de conexão atendidos em Baixa Tensão;
  - 20 (vinte), para unidade consumidora ou ponto de conexão atendidos em Média Tensão;
  - 27 (vinte e sete), para unidade consumidora ou ponto de conexão atendidos em Alta Tensão.

6.3 CONCLUSÕES

Neste capítulo foram propostos os limites para o f_{ei} estratificados por amplitude e duração, buscando garantir que o Fator de Impacto unitário deixe de ser somente uma referência qualitativa.

A proposição do novo índice DIIC e sua respectiva compensação, visa criar novos uma nova relação entre a distribuidora e o consumidor, pois também leva em consideração os impactos de produção ocorridos por distúrbios no fornecimento da energia elétrica.

7. CONCLUSÕES

Com a finalidade de identificar e melhorar o fornecimento de energia elétrica no que se refere à QEE, muitas metodologias para medição e para a definição de indicadores foram desenvolvidas nas últimas décadas. No entanto, as normas propostas em alguns países, nomeadamente Brasil, Estados Unidos, União Europeia e África do Sul, ainda carecem de melhorias e proposituras de novos métodos para transpor os impactos incorridos por distúrbios de VTCD inerentes ao sistema, bem como a mudança tecnológica dos equipamentos atualmente inseridos no sistema elétrico. Neste contexto, o presente trabalho de dissertação teve como principal objetivo contribuir para o aperfeiçoamento das metodologias de avaliação de QEE. Tais metodologias podem configurar um importante passo para o avanço das normas existentes.

A seguir são apresentadas as principais conclusões e contribuições deste trabalho de dissertação.

- ✓ Mesmo que o PRODIST tenha definido a partir da estratificação das VTCD as regiões de sensibilidade, os Fatores de Ponderação e Impacto são parâmetros utilizados somente como referência no planejamento dos sistemas de distribuição em média e alta tensão (SDMT e SDAT). A busca pelo Fator de Impacto (FI) unitário, visa evitar que as distribuidoras excedam com frequência os limites referencias, mesmo que estes sejam somente qualitativos e que o seu atendimento não significa que não haja paradas de processo nas plantas industriais. Importante ressaltar também que a busca pela redução do FEC (Frequência Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora) e do FIC (Frequência de Interrupção Individual por Unidade Consumidora ou por Ponto de Conexão), auxiliam na redução dos distúrbios de VTCD.
- ✓ Neste trabalho, buscou-se avaliar e demonstrar que os limites e indicadores relacionados à qualidade do produto entregue pelas concessionárias, não atende aos requisitos mínimos das indústrias, fazendo com que estas tenham que implantar sistemas internos para garantir o atendimento aos requisitos mínimos das suas cargas críticas e eliminar assim possíveis impactos causados pelos distúrbios no fornecimento da energia elétrica.

- ✓ Considerando o alto custo de implantação dos sistemas internos para garantir a qualidade e ininterruptabilidade no fornecimento de energia, bem como as estimativas de lucro cessante relacionados aos possíveis distúrbios, foram propostos indicadores para avaliar as interrupções internas dos clientes e cálculo das respectivas compensações, pois os existentes no PRODIST possuem uma visão generalizada, sem considerar os reais impactos causados pontualmente.
- ✓ Os limites propostos na Tabela 6-1 e novos indicadores relacionados à continuidade do serviço (Equações 6.2 e 6.3), tem como principal objetivo garantir que as distribuidoras sejam responsabilizadas pela baixa QEE em relação especificamente às VTCD, onde os mesmos não sejam somente referencias, conforme é aplicado atualmente no Fator de Impacto (FI), o qual trata-se de um índice meramente qualitativo.

A partir da experiência obtida no desenvolvimento desta dissertação, é possível apresentar as seguintes sugestões para trabalhos futuros:

- ✓ Importante ressaltar que foram considerados somente os afundamentos de tensão, sem a proposta de critérios para as elevações, sendo que estas deverão ser tratadas de maneira separada.
- ✓ Estudar a criação de estratificações por sensibilidade das cargas, considerando os tipos de indústria
- ✓ Melhorias nos procedimentos de avaliação do sistema de alimentação
- ✓ Estudar novas formas de mitigação das VTCD, buscando reduzir os valores em relação às tradicionais apresentadas

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[A17] ASPEN Power Flow™ V14.5, 2017.

[A20] ANEEL (2020). Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST, Módulo 8 – Qualidade da Energia Elétrica [Internet], Brasília - Distrito Federal, Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). Disponível em <http://www.aneel.gov.br>, [Acesso em: 05 de novembro de 2020].

[A96] NRS 048-2; “Electricity Supply – Quality of Supply”, South African Bureau of Standards, 1996.

[AN02] Andersson, T. e Nilsson, D. Test and evaluation of voltage dip immunity, STRI AB and Vatenfall AB, 2002.

[B14] Balbinot, L. H. A. Análise de Sistemas de Energia Ininterruptos. Dissertação de Graduação, Departamento de Engenharia Elétrica. UFRGS, 2014.

[C06] Caterpillar. Application and Installation Guide – Uninterruptible Power Supply (UPS) - LEBE6439-00, 2006.

[C18] Companhia Energética de Minas Gerais – CEMIG. “Análise de Afundamentos de Tensão Esperados no Sistema Elétrico de Suprimento ao Consumidor”, Relatório Técnico, 2018.

[C99] CENELEC EN 50160; “Voltage Characteristics of Electricity Supplied by Public Distribution Systems”, European Committee for Electro technical Standardization, 1999.

[D06] Diniz, J. A. Descrição do Processo MOS do CCS/UNICAMP, 2006.

[DP17] Deckmann, S.M. e J. A. Pomilio. Avaliação da Qualidade de Energia Elétrica, Campinas, Departamento de Sistemas e Controle de Energia, UNICAMP, 2017.

[F02] Ferreira, A.A. Caracterização e análise de variações de tensão de curta duração, Campinas, Departamento de Sistemas e Controle de Energia, Dissertação de Mestrado, UNICAMP, 2002.

[I02] IEEE Standard 1159; “IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality”, Institute of Electrical and Electronics Engineers, junho, 1995 e “IEEE Task Force p1159 – Monitoring Electric Power Quality”, Institute of Electrical and Electronics Engineers, fevereiro, 2002.

[I03] IEC Technical Report 61000-2-8: Environment – Voltage dips and short interruptions on public electric power supply systems with statistical measurement results, 2003

[I95] IEEE Standard 446; “IEEE Recommended Practice For Emergency And Standby Power Systems For Industrial and Commercial Applications”, Institute of Electrical and Electronics Engineers, dezembro, 1995.

[ITIC00] ITIC (CBEMA) curve Application Note; “Technical Committee 3 (TC3) of the Information Technology Industry Council”; 2000, Disponível em: http://www.itic.org/technical/iticurv.pdf.,

[LE05] Luna, E.K. Uma contribuição ao estudo de VTCD aplicado a equipamentos eletrônicos alimentados por conversor CA-CC, Campinas, Departamento de Sistemas e Controle de Energia, Dissertação de Mestrado, UNICAMP, 2005.

[MR02] McGranaghan, M.; Roettger, B.; ”Economic Evaluation of Power Quality”, IEEE Power Engineering Review, fevereiro, 2002.

[O02] ONS (2017). Procedimentos de Rede, Módulo 2.8 – Gerenciamento dos Indicadores de Qualidade da Energia Elétrica da Rede Básica [Internet], Brasília - Distrito Federal, Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS).

[P12] Pinto, D. A. B. Implementação de uma UPS offline monofásica, Portugal, Escola de Engenharia, Dissertação de Mestrado, Universidade do Minho, 2012.

[P13] Paulillo, G. Qualidade de Energia – Capítulo III – Desequilibrios de Tensão, Disponível em <https://www.osetoreletrico.com.br>, [Acesso em: 23 de outubro de 2018].

[P13a] Paulillo, G. e Teixeira, M.D. Qualidade de Energia – Capítulo IV – Variações de Tensão de Longa Duração, 2013, Disponível em <https://www.osetoreletrico.com.br>, [Acesso em: 23 de outubro de 2018].

[P13b] Paulillo, G. e Teixeira, M. Qualidade de Energia – Capítulo VII – Flutuações de Tensão, Disponível em <https://www.osetoreletrico.com.br>, [Acesso em: 23 de outubro de 2018].

[P13c] Paulillo, G. e Teixeira, M.D. e Bacca, I. Qualidade de Energia – Capítulo XI – Transitórios, 2013, Disponível em <https://www.osetoreletrico.com.br>, [Acesso em: 03 de outubro de 2020].

[S16] Sereno, C. UPS dinâmicas - Energia de Qualidade, 2016, Disponível em <http://est-pa.blogspot.com>, [Acesso em: 26 de fevereiro de 2019].

[S17] Starosta, J. “A revisão do Módulo 8 – critérios de avaliação das variações de tensão de curta duração (VTCDs) – Parte 3”, in O Setor Elétrico, 2017.

[SEMI06] SEMI F47; “Specification for Semiconductor Processing Equipment Voltage Sag Immunity”, SEMI – Semiconductor Equipment and Material Institute. 2006.

[SV12] Vieira, C.H.S. Análise Probabilística da Conformidade de Tensão em Redes de Distribuição considerando a presença de Geração Distribuída, Maranhão, Centro de Ciências Exatas e Tecnologia, Dissertação de Mestrado, UFMA, 2012.

[U08] Usida. W. F. Estratégias para Regulação de Tensão em Transformadores com Comutação de TAP, Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo, 2008.

[U18] Resultados da Medição de Grandezas Elétricas, Relatório Técnico, 2018.