

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica - PPGEE

Universidade Federal de Minas Gerais - UFMG

**Caracterização das Variações de Tensão de Curta
Duração e seus Impactos em uma Planta da
Indústria Alimentícia**

Reinaldo Moreira Maia

Orientador: Selênio Rocha Silva

Belo Horizonte, Junho de 2011

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica - PPGEE

Universidade Federal de Minas Gerais - UFMG

Caracterização das Variações de Tensão de Curta Duração e seus Impactos em uma Planta da Indústria Alimentícia

Dissertação submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Minas Gerais, como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

Professor Selênio Rocha Silva
Orientador

Belo Horizonte, Junho de 2011

**Dedico este trabalho aos meus Pais,
Neide meu grande Amor,
Pedro e Miguel meus filhos.**

AGRADECIMENTOS

A Deus pela vida;

A minha família pelo carinho, paciência e constante incentivo;

Ao orientador, professor Selênio Rocha Silva, pelo apoio no desenvolvimento desta dissertação;

Ao Eng. Marcos Moreira, pela ajuda com o Matlab;

A empresa Moinhos Vera Cruz, que possibilitou o estudo de caso;

E a todos os colegas da UFMG, em especial Pedro Rodrigues da Costa.

RESUMO

As variações de tensão de curta duração (VTCD) geram grandes prejuízos principalmente para as indústrias, que possuem instalados equipamentos sensíveis a estes fenômenos.

Neste trabalho são apresentadas as características das VTCD e o comportamento, em um estudo de caso, de alguns equipamentos de uma indústria alimentícia quando submetidos à VTCD descrevendo os efeitos e prejuízos causados.

A metodologia do trabalho consistiu de monitoramento das características da indústria por 4 anos, onde foram avaliados as características dos distúrbios presentes na rede de alimentação e as consequências sobre os processos produtivos internos. Ensaio laboratoriais foram empregados para identificar a sensibilidade de alguns equipamentos industriais submetidos à VTCD.

Com os resultados das medições e ensaios foi determinada a sensibilidade à VTCD do ponto de conexão da indústria e a sensibilidade e susceptibilidade de alguns equipamentos instalados em sua planta industrial.

O conhecimento da sensibilidade dos equipamentos permitiu a melhoria na robustez da planta através da dessensibilização da proteção de subtensão, a utilização de fontes ininterruptas de energia nas cargas mais sensíveis e a modificação no algoritmo do controlador lógico programável (CLP) principal, reduzindo o número de distúrbios que impactavam o comportamento da planta em 94,7%.

O trabalho permitiu um maior conhecimento dos comportamentos de equipamentos de comando e de controle utilizados no processo, auxiliando futuras especificações para substituição de dispositivos. Além disto, buscou-se neste trabalho construir um conjunto de procedimentos que possam ser replicados em processos industriais similares.

Palavras-chave: Variação de tensão de curta duração, Mitigação de distúrbios, Afundamentos de tensão, Sensibilidade de equipamentos industriais.

ABSTRACT

The Short-Duration Voltage Variations (SDVV) can generate great prejudice to industries that possesses installed equipments that are sensitive to these phenomena.

In this work the characteristics of the SDVV will be presented as well as a case study on the behavior of some equipments of a food industry when submitted to SDVV, describing the effects and prejudices caused by it.

The methodology of the work consisted in monitoring the industry characteristics for 4 years, period in which the characteristics of the disturbs in the power supply network and the consequences over the internal productive processes were evaluated. Laboratory tests were used to identify the sensitivity of some industrial equipments submitted to SDVV.

With the measurements and tests results it was determined the SDVV sensitivity of the industry's connection point and the sensitivity and susceptibility of some equipments that were installed in its industrial plant.

The knowledge on the sensitivity of the equipments allowed an increase in the robustness of the plant through the desensitization of the undervoltage protection, the utilization of uninterrupted sources of energy in more sensitive charges and the modification of the main Programmable Logic Controller (PLC) algorithm, therefore reducing the number of disturbs that impacted the behavior of the plant by 94,7%.

The work allowed a larger knowledge on the behavior of command and control equipments used in the process, helping future specifications for device replacement. Besides, in this work, it was intended to assemble a group of procedures capable of being replicated in similar industrial processes.

Key words: Short-Duration Voltage Variation, Disturb Mitigation, Voltage Sags, Sensitivity of Industrial equipments.

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS	2
RESUMO	3
ABSTRACT	4
LISTA DE FIGURAS	9
ABREVIATURAS E SIGLAS	11
CAPÍTULO 1: INTRODUÇÃO	13
1.1 Considerações Iniciais	13
1.2 Objetivos.....	14
1.3 Relevância	15
1.4 Estado da Arte	16
1.5 Organização do Texto.....	17
CAPÍTULO 2: VARIAÇÕES DE TENSÃO DE CURTA DURAÇÃO.....	19
2.1 Fundamentações Teóricas para Variações de Tensão de Curta Duração	19
2.2 Caracterização de um Afundamento de Tensão	22
2.3 Possíveis Causas dos Afundamentos de Tensão.....	23
2.4 Efeitos dos Afundamentos de Tensão	23
2.5 Características dos Afundamentos de Tensão	25
2.5.1 A Influência do Tipo de Conexão dos Transformadores e das Cargas nos Afundamentos de Tensão.	26
2.6 Área de Vulnerabilidade	27
2.7 Problemas de Qualidade da Energia Elétrica	28
2.7.1 Distúrbios Transientes	28
2.7.2 Variações de Tensão de Longa Duração	29
2.7.3 Desequilíbrios de Tensão.....	29

2.7.4 Flutuações de Tensão.....	30
2.7.5 Distorções de Forma de Onda	30
2.7.7 Variações de Frequência.....	31
2.8 Normalização Aplicável	32
CAPÍTULO 3: DESCRIÇÃO DO PROCESSO E OS PROBLEMAS DE QUALIDADE	
DA ENERGIA	34
3.1 Apresentação	34
3.2 Equipamentos Sensíveis à Variação de Tensão.....	36
3.3 Problemas de Qualidade da Energia no Processo.....	38
3.4 Sistema Elétrico da Moinhos Vera Cruz	39
3.5 Prejuízos Industriais	41
3.5.1 Cálculo do Prejuízo por Interrupção no Processo	42
3.6 Soluções e Ações Implementadas.....	42
3.7 Custos das Implementações.....	43
3.8 Ações Esperadas e Realizadas	44
3.9 Resultados Iniciais.....	44
3.10 Resultados Obtidos após as Implementações	47
3.11 Classificação das VTCD.....	50
3.9.2 Curva Característica MVC	53
CAPÍTULO 4: SENSIBILIDADE DE EQUIPAMENTOS INDUSTRIAIS.....	
4.1. Sensibilidade dos Equipamentos	56
4.2. Determinação da Sensibilidade de Equipamentos Industriais.....	57
4.2.1 Objetivo	57
4.2.2 Etapas	57
4.2.2.1 Preparação e Montagem	58

4.2.2.2 Execução.....	60
4.2.2.3 Análise.....	61
4.3. Resultados dos Ensaios de Sensibilidade para Contatores Eletromecânicos	61
4.3.1 Sensibilidade para contatores eletromecânicos	62
4.4 Resultados dos Ensaios de Sensibilidade para Fonte de Alimentação CLP.....	67
4.5 Resultados dos Ensaios de Sensibilidade para Eletroválvulas	67
4.5.1 Sensibilidade para Eletroválvulas.....	68
CAPÍTULO 5: CONCLUSÃO.....	72
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	74
APÊNDICE I.....	77
APÊNDICE II.....	79
APÊNDICE III	84

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Classificação das VTCD conforme PROREDE	20
Tabela 2: Características dos fenômenos eletromagnéticos da energia elétrica	32
Tabela 3: Indicadores de fornecimento da energia e interrupções no processo	41
Tabela 4: Registros das interrupções de produção por VTCD	41
Tabela 5: Custos das implementações na MVC	43
Tabela 6: Registros de distorções harmônicas.....	46
Tabela 7: Discretização dos afundamentos de tensão	51
Tabela 8: Discretização das elevações de tensão.....	51
Tabela 9: Resumo dos problemas de qualidade da energia elétrica na MVC	52
Tabela 10: Ficha de registros dos resultados	60

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Composição do prejuízo industrial	16
Figura 2: Forma de onda de uma interrupção momentânea de tensão	20
Figura 3: Forma de onda de um afundamento momentâneo de tensão	20
Figura 4: Forma de onda de uma elevação momentânea de tensão.....	21
Figura 5: Caracterização de um afundamento de tensão	22
Figura 6: Curva de suportabilidade para computadores - ITIC	24
Figura 7: Curva de suportabilidade para equipamentos semicondutores – SEMI F47 ..	25
Figura 8: Os tipos de afundamento de tensão.....	27
Figura 9: Área de vulnerabilidade definida para uma carga específica.....	27
Figura 10: Distúrbio transiente impulsivo	28
Figura 11: Distúrbio transiente oscilatório	29
Figura 12: Desequilíbrio de tensão	29
Figura 13: Flutuação de tensão	30
Figura 14: Distorção harmônica de tensão	31
Figura 15: Forma de onda de tensão com inter-harmônicas.....	31
Figura 16: Corte de tensão.....	31
Figura 17: Vista aérea da Moinhos Vera Cruz - Santa Luzia – MG	35
Figura 18: Localização dos alimentadores da CEMIG para a MVC.....	39
Figura 19: Registros dos problemas de qualidade da energia	45
Figura 20: Registros de distorções harmônicas	45
Figura 21: Número de desligamentos causados por VTCD	46
Figura 22: Temporização da linha de programa do CLP.....	47
Figura 23: Registro de AMT de 0.43 pu e 43.2 ciclos sem interrupção da produção	48

Figura 24: Registro de AMT de 0.68 pu e 1.04 segundos sem interrupção da produção	48
Figura 25: Registro de ITT de 0.09 pu e 10.2 ciclos sem interrupção da produção.....	49
Figura 26: Registro de ITT de 0 pu e 1.731 segundos sem interrupção da produção	49
Figura 27: Resumo das interrupções de produção causadas por VTCD	50
Figura 28: Discretização dos afundamentos de tensão	51
Figura 29: Discretização das elevações de tensão	51
Figura 30: Problemas de qualidade da energia elétrica na MVC	52
Figura 31: Registros mensais dos problemas de qualidade da energia elétrica na MVC	53
Figura 32: Curva característica MVC comparada a SEMI F47.....	54
Figura 33: Curva característica MVC comparada a ITIC.....	55
Figura 34: Montagem utilizada nos ensaios dos equipamentos	58
Figura 35: Vista dos ajustes do PSL.....	59
Figura 36: Curva de sensibilidade do contator C1 para AMT com ângulo de 45°.....	62
Figura 37: Curva de sensibilidade de contatores para AMT com ângulo de 0°	63
Figura 38: Curva de sensibilidade de contatores para AMT com ângulo de 30°	64
Figura 39: Curva de sensibilidade de contatores para AMT com ângulo de 45°	64
Figura 40: Curva de sensibilidade de contatores para AMT com ângulo de 90°	65
Figura 41: Curva de sensibilidade de contatores para AMT com ângulo de 135°	66
Figura 42: Curva de tolerância para contatores	67
Figura 43: Curva de sensibilidade de eletroválvulas para AMT com ângulo de 0°	68
Figura 44: Curva de sensibilidade de eletroválvulas para AMT com ângulo de 30°	69
Figura 45: Curva de sensibilidade de eletroválvulas para AMT com ângulo de 45°	69
Figura 46: Curva de sensibilidade de eletroválvulas para AMT com ângulo de 90°	70
Figura 47: Curva de sensibilidade de eletroválvulas para AMT com ângulo de 135° ...	71

ABREVIATURAS E SIGLAS

AMT – Afundamento Momentâneo de Tensão

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica

BT – Baixa Tensão

CA – Corrente Alternada

CBEMA – *Computer Business Equipment Manufacturers Association*

CBQEE – Conferência Brasileira sobre Qualidade da Energia Elétrica

CCK – CCK Automação, software de gerenciamento da energia elétrica

CEMIG – Companhia Energética de Minas Gerais

CLP – Controlador Lógico Programável

CPU – Unidade Central de Processamento

DIC – Duração de Interrupção por unidade Consumidora

DMIC – Duração Máxima de Interrupção Contínua por unidade Consumidora

E/S – Entradas e Saídas

EV – Eletroválvula

FF – Fase-Fase

FT – Fase-Terra

FFT – Fase-Fase-Terra

FIC – Frequência de Interrupção por unidade Consumidora

IEAR – *Interrupted Energy Assessment Rate*

IEEE - *Institute of Electrical and Electronics Engineers*

IEC – *International Electrotechnical Commission*

ITIC – *Information Technology Industry Council*

MVC – Moinhos Vera Cruz

ONS – Operador Nacional do Sistema Elétrico

PROREDE – Procedimentos de Rede

PVO – Pequeno Volume de Óleo

RMS – *Root Mean Square*

VTCD – Variação de Tensão de Curta Duração

CAPÍTULO 1: INTRODUÇÃO

Neste capítulo são apresentados os motivos da preocupação com a qualidade da energia elétrica, os objetivos e relevância deste trabalho e a metodologia adotada para esta dissertação.

1.1 Considerações Iniciais

O conceito de “Qualidade da Energia Elétrica” está associado a um conjunto de anomalias que podem ocorrer na qualidade da energia elétrica fornecida aos consumidores.

Estas anomalias podem originar-se e/ou manifestar-se em diferentes pontos da rede elétrica, tanto dentro de uma instalação consumidora, como externamente a ela. A fim de caracterizar a qualidade da energia elétrica, são analisados os sinais de tensão em sua amplitude, forma de onda e frequência.

Um problema de qualidade da energia elétrica pode ser definido como qualquer desvio ou alteração manifestada nestas grandezas, que resulte na falha ou operação inadequada de instalações, aparelhos ou equipamentos [1].

De um modo geral, a atual e crescente preocupação com a qualidade da energia elétrica, por parte dos diversos segmentos envolvidos desde a geração até o consumo final, se devem aos seguintes motivos:

- os componentes dos equipamentos atuais os tornam mais sensíveis à qualidade do fornecimento da energia elétrica, do que aqueles utilizados no passado. Muitos destes novos equipamentos baseados em circuitos eletrônicos analógico-digitais são suscetíveis a diversos tipos de distúrbios;
- o crescimento industrial e o aumento da utilização de cargas de natureza intrinsecamente perturbadora, assim como o aumento do uso de equipamentos que proporcionam maior eficiência energética, mas em contrapartida, degradam a qualidade da energia;

- a proliferação do emprego de cargas com relação tensão-corrente não linear nos setores comercial e residencial, a exemplo dos computadores, aparelhos eletroeletrônicos e sistemas de iluminação com lâmpadas de descarga e compactas fluorescentes em substituição às incandescentes;
- os aspectos econômicos relacionados ao suporte da qualidade da energia, ao controle de níveis de emissão e ao grau de imunidade de dispositivos, que implicam em dispêndios financeiros por parte das concessionárias, dos consumidores e dos fabricantes de equipamentos. A energia degradada ou de má qualidade pode levar à diminuição da vida útil de instalações e equipamentos, a custos operacionais devidos a necessidade de manutenção, à eventual substituição precoce dos mesmos e elevados prejuízos no decurso de paradas de processos produtivos;
- o aumento do interesse e atenção aos problemas de qualidade da energia pelos consumidores, visto que os usuários estão melhor informados e mais exigentes quanto aos seus direitos e deveres;
- o inter-relacionamento entre a qualidade da energia e a operação dos sistemas elétricos em função do aumento das interligações entre as áreas elétricas, fazendo com que a falha ou a deterioração devida a algum elemento possa trazer consequências mais abrangentes.

Diante do exposto, vislumbra-se que o tema “Qualidade da Energia Elétrica”, passa a exigir uma ação integrada das partes envolvidas, ou seja, concessionárias, consumidores e fabricantes de equipamentos eletroeletrônicos que, na maioria das vezes, assessorados por instituições de ensino e pesquisa, desenvolvem estudos objetivando conhecer os perfis operacionais dos equipamentos e conseqüente mitigação dos efeitos de um fornecimento elétrico inadequado [2].

Estes trabalhos são ainda acompanhados com grande interesse pelos órgãos reguladores e fiscalizadores, como Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), com o intuito de assegurar ou melhorar os padrões de qualidade requeridos ao bom funcionamento do sistema elétrico atual.

1.2 Objetivos

São objetivos deste trabalho:

- Avaliar um problema de qualidade da energia elétrica, através de um estudo de caso em uma indústria alimentícia, instalada na ponta de uma rede de distribuição;
- Verificar os prejuízos financeiros gerados pelos problemas de qualidade da energia na indústria e os custos envolvidos para mitigação dos problemas;
- Conhecer as características dos afundamentos de tensão e elevações de tensão incidentes na planta industrial estudada, através de coleta de dados em um sistema de gerenciamento de energia;
- Classificar as variações de tensão de curta duração conforme procedimentos de rede e determinar uma curva característica dos problemas de qualidade da energia para a indústria em estudo;
- Conhecer a sensibilidade de alguns equipamentos industriais através de ensaios em laboratório onde é proposta uma metodologia para os ensaios e determinação das curvas de sensibilidade.

- Propor e implementar soluções técnicas e econômicas para a mitigação dos efeitos causados pelos problemas de qualidade, verificando, através de comparação entre períodos antes e após as implementações, a eficácia das técnicas utilizadas;

1.3 Relevância

Estudos mostram que problemas na qualidade da energia elétrica geram grandes prejuízos para a indústria [3]. Alguns exemplos são citados:

- Controle de tráfico aéreo: perda de controle em um grande aeroporto pode custar US\$15.000/minuto;

- Fabricante de compressores: afundamentos e interrupções custam em torno de US\$1.700.000/ano;

- DuPont: economizou US\$75 milhões/ano implementando solução de qualidade de energia;

- Indústria automotiva: interrupções momentâneas custam em torno de US\$10 milhões/ano;

- EUA: US\$50 bilhões por ano foram gastos como resultado de interrupções por qualidade de energia;

- Vale do Silício - Califórnia EUA: “uma empresa fabricante perdeu mais de US\$3 milhões em um único dia”;

- Indústria de papel: Um afundamento de tensão pode levar a perda de um dia inteiro de produção – US\$250.000;

- Sistemas computacionais de armazenamento de dados: metade dos problemas com computadores e um terço de todas as perdas de dados têm como fonte à rede de alimentação;

- Indústria de alimentos e bebidas: o custo típico de afundamento é de US\$87.000/ano.

Equipamentos eletrônicos, de processamento de dados e de comunicação, responsáveis por uma crescente categoria de cargas residencial, comercial e industrial, são sensíveis aos distúrbios da fonte de alimentação.

A eletrônica de potência tem produzido uma nova geração de equipamentos e disseminado sua aplicação industrial. Em contrapartida, estes equipamentos são responsáveis pela geração de alguns distúrbios de qualidade da energia elétrica, para os quais os equipamentos eletrônicos citados são sensíveis.

Dentre os distúrbios que comprometem a qualidade da energia elétrica, o afundamento de tensão, que é um dos fenômenos de VTCD, é o maior responsável por perdas econômicas em indústrias [4], conforme Figura 1 proposta por alguns autores.

Processos produtivos contínuos podem ser interrompidos devido à ocorrência destes distúrbios, o que pode significar perda de bilhões de reais, consequência do tempo de espera para reinício da operação do sistema, retomada plena da produção e, finalmente, reparo dos equipamentos danificados.

Os prejuízos financeiros substanciais devido à interrupção de processos, quantificados pelas perdas de produção, perdas de insumos e custos associados à mão-de-obra e a reparos de equipamentos danificados, torna relevante os estudos sobre a qualidade da energia elétrica.

Para a Moinhos Vera Cruz, estudo de caso deste trabalho, os prejuízos chegam a mais de R\$840.000,00 (oitocentos e quarenta mil reais) por ano, por problemas de qualidade da energia que interrompem o seu processo produtivo.

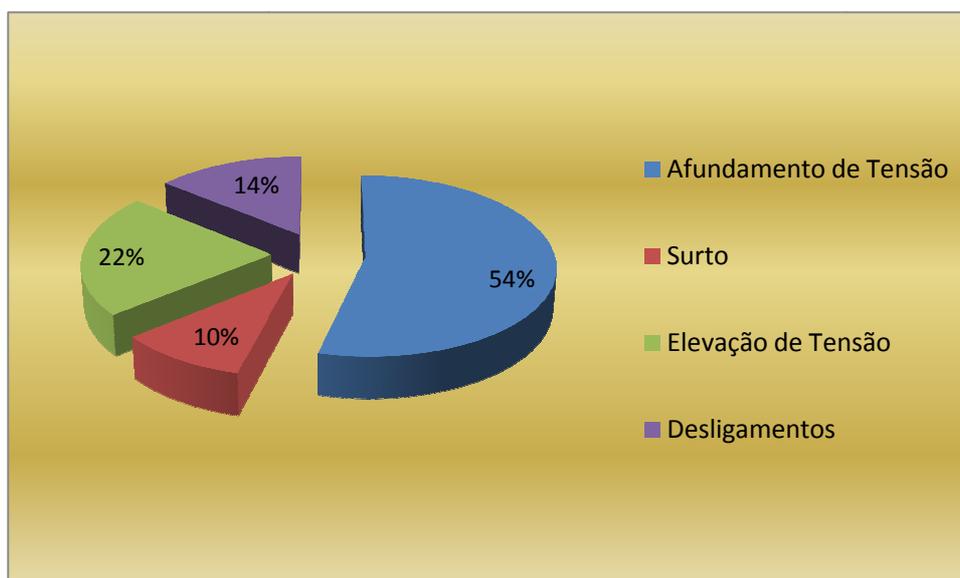


Figura 1: Composição do prejuízo industrial

1.4 Estado da Arte

Durante os últimos vinte anos, houve um crescente interesse em investigações na quantificação do valor da confiabilidade do sistema elétrico de potência. Esta confiabilidade está ligada diretamente à qualidade da energia elétrica. Porém, o termo qualidade de energia elétrica, bem como a preocupação com o tema, foi difundido a partir de 1990 [5]. Com o interesse crescente, ampliou-se também a literatura relacionada ao assunto.

Historicamente o Brasil foi um dos pioneiros a desenvolver trabalhos na área da qualidade da energia elétrica, juntamente com a França e a Inglaterra nas décadas de 70 e 80. Este impulso deveu-se a grandes projetos, como por exemplo, a “Ferrovia Carajás” e “Sistema de Transmissão de Itaipu”, resultando na formação de grupos técnicos encarregados de solucionar os desafios que apareceram ao longo desses projetos [6].

Entre inúmeros trabalhos, alguns relacionados à sensibilidade de equipamentos e impactos econômicos, que são tema principal deste trabalho, são citados abaixo.

Em 1994, Lamoree et. al. [7] mostrou o resultado de diferentes investigações do afundamento de tensão, as quais caracterizavam a atuação do distúrbio em consumidores, e a evolução da sensibilidade de equipamentos para diferentes amplitudes e durações.

Em 1995, é publicada pelo IEEE [8] uma recomendação para o monitoramento da qualidade da energia elétrica, onde pode ser encontrada a definição do afundamento de tensão, objetivos do seu monitoramento, instrumentos de medição, aplicação de técnicas e interpretação de resultados de medições.

Em 1998, o IEEE [9] publica uma recomendação para avaliação da compatibilidade de sistemas elétricos de potência com equipamentos de processos eletrônicos, onde ressalta a importância da preocupação com a qualidade da energia elétrica.

Em 2004, Sasa Z. Djokic et al [10] publica um estudo sobre a sensibilidade de contadores eletromecânicos c.q., durante afundamentos de tensão, interrupções momentâneas e elevações de tensão.

Em 2009, Maia R. M. [11] apresentou um artigo no IX CBQEE sobre o impacto de afundamentos de tensão em uma indústria alimentícia.

Em 2009, a ANEEL autoriza, em caráter definitivo, a publicação dos “Procedimentos de Rede” onde constam os sub-módulos 2.8 e 3.6 diretamente voltados para as questões da qualidade da energia elétrica.

Em 2010, o grupo de trabalhos internacionais CIGRE, CIRED e UIE, publica um trabalho [12] sobre a imunidade de equipamentos e instalações a afundamentos de tensão, com a descrição dos afundamentos, a avaliação de equipamentos e processos, a caracterização de testes de imunidade, os aspectos econômicos e estatísticos e a aplicação das classes de imunidade.

Os artigos acima, o grande número de publicações no tema, o número crescente de congressos e conferências sobre o tema no Brasil e exterior e os objetivos deste trabalho, demonstram a importância do estudo das variações de tensão de curta duração e principalmente os afundamentos de tensão e são bases teóricas para a continuidade deste trabalho.

1.5 Organização do Texto

Esta dissertação foi dividida em 05 capítulos.

No capítulo 1, são apresentadas as considerações iniciais sobre a qualidade da energia elétrica, os objetivos do trabalho, a importância do tema na conjuntura atual, os estados da arte sobre o tema e a organização do texto.

No capítulo 2, são apresentadas as definições segundo o procedimento de rede para as VTCD e os principais problemas de qualidade da energia elétrica, suas causas e efeitos para os equipamentos e instalações industriais da Moinhos Vera Cruz. É apresentada também a caracterização e classificação dos afundamentos momentâneos de tensão, AMT, e algumas normas aplicáveis.

No capítulo 3, é feita a apresentação da empresa Moinhos Vera Cruz e seu processo, identificando os equipamentos sensíveis a variações de tensão e os problemas gerados pelas VTCD em seus equipamentos através de um estudo de caso. Desenvolve-se uma análise dos resultados, através da coleta de dados e comparação com dados antes das implementações.

O capítulo 4 trata da sensibilidade de equipamentos industriais a VTCD, com aplicação de ensaios laboratoriais em contadores eletromecânicos, fontes de alimentação de CLP e eletroválvulas, tendo sido elaboradas as curvas de sensibilidade para os equipamentos e verificado o comportamento dos equipamentos dentro das instalações da Moinhos Vera Cruz (MVC).

No capítulo 5, é feita a conclusão apresentado os resultados das implementações e ensaios de sensibilidade dos equipamentos e uma continuidade do trabalho é recomendada.

CAPÍTULO 2: VARIAÇÕES DE TENSÃO DE CURTA DURAÇÃO

Neste capítulo, são apresentadas as definições segundo o procedimento de rede para as VTCD, e os principais problemas de qualidade da energia elétrica, suas causas e efeitos para os equipamentos e instalações industriais.

2.1 Fundamentações Teóricas para Variações de Tensão de Curta Duração

VTCD é um evento aleatório de tensão caracterizado por desvio significativo, por um período de um ciclo a um minuto, do valor eficaz da tensão. Calcula-se o valor eficaz da tensão a partir da média quadrática dos valores instantâneos da tensão, em período mínimo de meio ciclo e máximo de um ciclo [13].

A amplitude da VTCD é definida pelo valor extremo do valor eficaz da tensão em relação à tensão nominal do sistema no ponto considerado, enquanto perdurar o evento.

A duração da VTCD é definida pelo intervalo de tempo decorrido entre o instante em que o valor eficaz da tensão em relação à tensão nominal do sistema no ponto considerado ultrapassa determinado limite e o instante em que essa variável volta a cruzar esse limite.

A partir da duração e amplitude, as VTCD são classificadas de acordo com o que se apresenta na Tabela 1, conforme os procedimentos de rede (PROREDE) em seu submódulo 2.8, gerenciamento dos indicadores de desempenho da rede básica e de seus componentes, aprovado pela ANEEL em Agosto de 2009 [14].

A variação momentânea de tensão compreende os eventos com duração inferior ou igual a 3 (três) segundos, que pode ser , interrupção, afundamento e elevação momentâneas de tensão. A variação temporária de tensão compreende os eventos com duração superior a 3 (três) segundos e inferior ou igual a 1 (um) minuto, que pode ser, interrupção, afundamento e elevação temporárias de tensão.

Tabela 1: Classificação das VTCD conforme PROREDE

Denominação	Sigla	Duração da Variação	Amplitude da tensão (valor eficaz) em relação à tensão nominal
Interrupção momentânea de tensão	IMT	Inferior ou igual a três segundos	Inferior a 0,1 pu
Afundamento momentâneo de tensão	AMT	Superior ou igual a um ciclo e inferior ou igual a três segundos	Superior ou igual a 0,1 pu e inferior a 0,9 pu
Elevação momentânea de tensão	EMT	Superior ou igual a um ciclo e inferior ou igual a três segundos	Superior a 1,1 pu
Interrupção temporária de tensão	ITT	Superior a três segundos e inferior ou igual a um minuto	Inferior a 0,1 pu
Afundamento temporário de tensão	ATT	Superior a três segundos e inferior ou igual a um minuto	Superior ou igual a 0,1 pu e inferior a 0,9 pu
Elevação temporária de tensão	ETT	Superior a três segundos e inferior ou igual a um minuto	Superior a 1,1 pu

Denomina-se Interrupção Momentânea de Tensão (IMT) o evento em que o valor eficaz da tensão é inferior a 0,1 pu da tensão nominal, durante um intervalo de tempo com duração inferior ou igual a 3 (três) segundos. A forma de onda de uma IMT é apresentada na Figura 2.

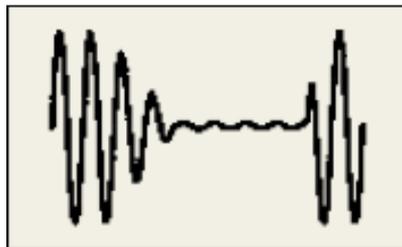


Figura 2: Forma de onda de uma interrupção momentânea de tensão

O Afundamento Momentâneo de Tensão (AMT) é definido como o evento em que o valor eficaz da tensão é superior ou igual a 0,1 e inferior a 0,9 pu da tensão nominal, com duração superior ou igual a um ciclo (16,67 ms) e inferior ou igual a 3 (três) segundos. A forma de onda de um AMT é apresentada na Figura 3.

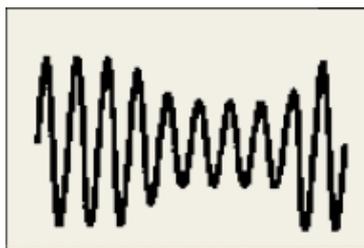


Figura 3: Forma de onda de um afundamento momentâneo de tensão

A Elevação Momentânea de Tensão (EMT) é o evento em que o valor eficaz da tensão é superior a 1,1 pu da tensão nominal, durante um intervalo de tempo semelhante ao do AMT. A forma de onda de uma EMT é apresentada na Figura 4.

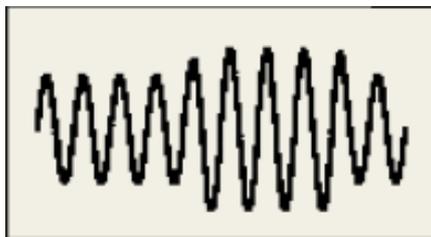


Figura 4: Forma de onda de uma elevação momentânea de tensão

A Interrupção Temporária de Tensão (ITT) é o evento em que o valor eficaz da tensão é inferior a 0,1 pu da tensão nominal, durante um intervalo de tempo com duração superior a 3 (três) segundos e inferior ou igual a 1 (um) minuto.

Denomina-se Afundamento Temporário de Tensão (ATT) o evento em que o valor eficaz da tensão é superior ou igual a 0,1 e inferior a 0,9 pu da tensão nominal, durante um intervalo de tempo semelhante ao ITT.

A Elevação Temporária de Tensão (ETT) é o evento em que o valor eficaz da tensão é superior a 1,1 pu da tensão nominal, durante um intervalo de tempo com duração superior a 3 (três) segundos e inferior ou igual a 1 (um) minuto.

Dentre os fenômenos de VTCD, o que mais afeta as instalações da indústria do estudo de caso, são os AMT e serão tratados neste trabalho com mais ênfase.

A amplitude, o tempo de duração, o ângulo de deslocamento, o ponto na curva onde começa o AMT, o elevado desequilíbrio gerado, a recuperação de tensão, principais características de um afundamento de tensão, são parâmetros importantes a serem considerados.

Outro parâmetro relevante para determinar os impactos dos afundamentos é a sua frequência de ocorrência, que corresponde à quantidade de vezes que cada combinação dos parâmetros, duração e amplitude ocorre em determinado período de tempo, ao longo do qual um barramento tenha sido monitorado (três meses, um ano, etc.).

Um afundamento momentâneo de tensão atinge, de forma danosa e prejudicial, principalmente as indústrias. Estas trabalham intensamente e impreterivelmente com processos de produção dependentes entre si. Os processos utilizam-se de máquinas que cada vez mais se modernizam através da utilização de microprocessadores, ou eletrônica de potência. Um AMT pode levar um equipamento ao funcionamento inadequado de forma que a produção perca a validade por defeitos surgidos nos produtos, ou em algumas partes do processo.

Existem duas possibilidades de ocorrências de prejuízos para uma indústria. Uma delas acontece quando o equipamento analisado durante o AMT não chega a interromper o funcionamento, mas apenas altera seu funcionamento (perda de sincronismo, perda de torque, entupimento, mudança de posição de eletroválvulas). A segunda possibilidade

ocorre quando o equipamento atingido interrompe o funcionamento parando os processos de produção.

Não se pode afirmar qual das duas possibilidades implica em maiores prejuízos para a indústria. Este tipo de análise e resultado estão intensamente ligados com o tipo de processo da indústria.

O interesse no estudo das VTCD são principalmente suas conseqüências para os equipamentos instalados no parque industrial, tais como: CLP, contadores, balanças eletrônicas, impressoras industriais, disjuntores, eletroválvulas, acionamentos de velocidade variável etc., cargas estas bastante sensíveis a estas variações de tensão.

2.2 Caracterização de um Afundamento de Tensão

Um afundamento de tensão é caracterizado principalmente pelos seguintes parâmetros:

- 1- Amplitude da sua tensão residual, que pode ser expresso em porcentagem em relação à tensão nominal ou na base em pu (por unidade).
- 2- Tempo de duração, que pode ser expresso em ciclos ou segundos.
- 3- Ângulo de deslocamento, também conhecido pelo termo em inglês “phase angle jump”, expresso em graus.
- 4- Ponto na forma de onda da tensão onde inicia o afundamento de tensão, expresso em graus.
- 5- Elevado desequilíbrio trifásico gerado.
- 6- Recuperação da tensão.

Na Figura 5 é possível ver as características básicas de um AMT, com os seguintes registros: amplitude = 0,85 pu, duração = 3,6 ciclos, início do AMT = 90°, variação da fase angular e recuperação da tensão.

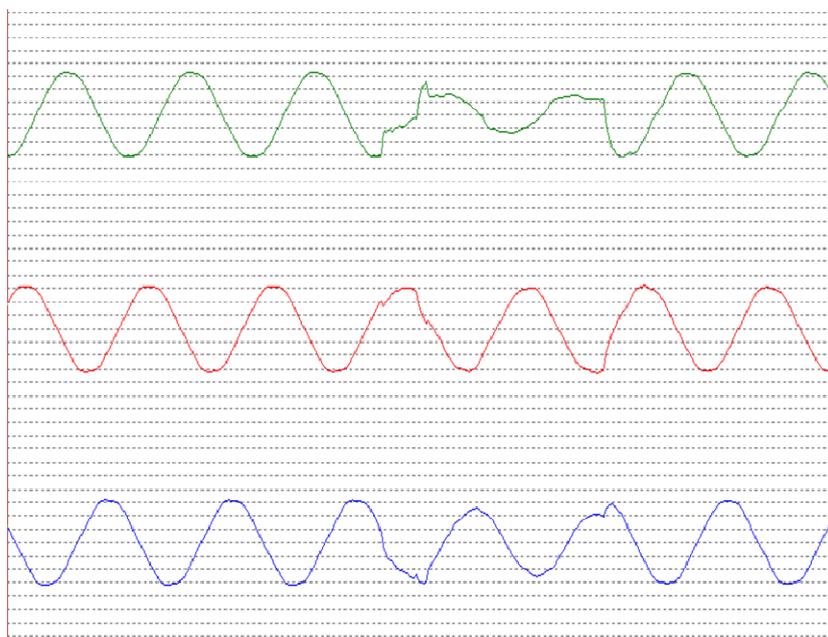


Figura 5: Caracterização de um afundamento de tensão

2.3 Possíveis Causas dos Afundamentos de Tensão

As principais causas de afundamentos de tensão são os chaveamentos de cargas pesadas, partidas de motores e os curtos-circuitos em qualquer ponto de fornecimento de energia. O curto-circuito provoca uma grande elevação da corrente, e esta, por sua vez, ocasiona grandes quedas de tensão nas impedâncias do sistema. Suas causas são diversas, mas basicamente envolvem um rompimento do dielétrico entre dois pontos que deveriam ser isolados entre si e que, em condições normais, estão em potenciais diferentes.

Muitos curtos-circuitos são causados por sobretensões que solicitam a isolação além de sua rigidez dielétrica.

Uma das causas dessas sobretensões são as descargas atmosféricas. Entretanto a isolação pode também ser degradada, danificada ou simplesmente anulada por outros agentes climáticos (vento, produtos químicos, névoa salina, etc.), pelo impacto ou contato de animais, veículos, equipamentos de escavação, etc., e como resultado do envelhecimento do material, devido às questões térmicas [15].

Os sistemas elétricos são dotados de equipamentos com dispositivos de proteção para desconectar o ponto de curto-circuito da fonte de energia com tempos de respostas definidos para cada sistema. Assim que a desconexão acontece, há a recuperação imediata da tensão, para aproximadamente seu valor anterior, em todos os pontos exceto nos desconectados. Algumas faltas são temporárias, o curto-circuito desaparece e a tensão se recupera antes de acontecer a desconexão.

A redução repentina da tensão de fornecimento, seguida por sua recuperação tal como descrito, representa o fenômeno afundamento de tensão.

O chaveamento de grandes cargas, como grandes motores, ou as fortes flutuações geradas por algumas cargas, durante sua energização, podem causar grandes variações de corrente, que, no seu efeito, são semelhantes a correntes de curto-circuito.

Apesar do fenômeno de AMT ser frequente, não é característica dos AMT danificar equipamentos e, na maioria das vezes, ocorre apenas uma parada ou falha do equipamento, que normalmente retorna ao estado de operação logo após o término do fenômeno.

2.4 Efeitos dos Afundamentos de Tensão

Com o propósito de investigar os efeitos dos afundamentos de tensão sobre alguns equipamentos do sistema elétrico, estudos realizados [16] têm o intuito de esclarecer conceitos sobre curva de suportabilidade.

O conceito de curva de sensibilidade (trata-se também como curva de suportabilidade) de equipamentos eletrônicos foi introduzido em 1978 por Thomas Key. Quando Thomas key estudou a confiabilidade do suprimento de energia elétrica para instalações

militares, concluiu que afundamentos de tensão de curta duração poderiam prejudicar a operação normal dos grandes computadores dessas instalações.

Apartir destes estudos foi determinada a curva ITIC, ex-CBEMA, que fornece limites de tolerância para computadores no que tange a distúrbios de tensão no sistema elétrico.

A curva ITIC é dividida em três áreas, região proibida (dano físico), região de operação normal e região de operação sem dano físico, conforme Figura 6 [17].

No eixo das ordenadas estão as amplitudes da variação momentânea de tensão em porcentagem. No eixo das abscissas está a duração em ciclos ou segundos.

Para atender a curva de suportabilidade ITIC, o equipamento precisa operar sem falhas em quaisquer amplitudes de tensão e duração compreendidas na região de operação normal, indicadas na curva.

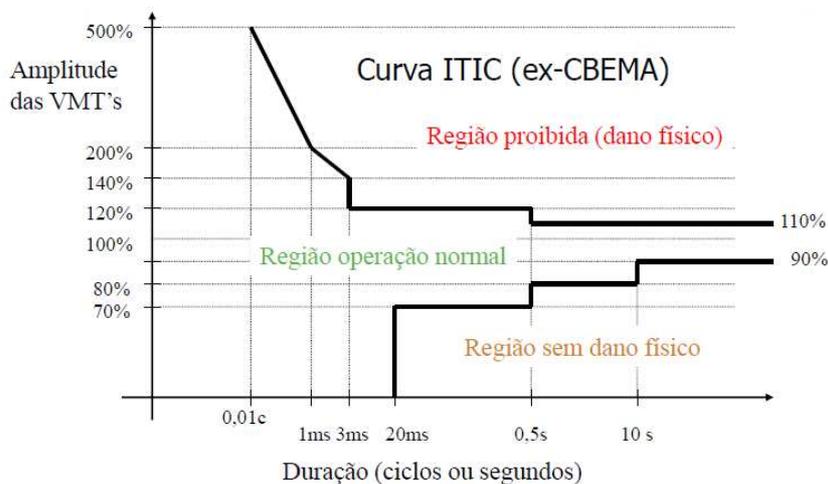


Figura 6: Curva de suportabilidade para computadores - ITIC

Outra curva de suportabilidade determinada aplica-se para equipamentos semicondutores. A suportabilidade é definida pela norma SEMI F47-200 “Voltage Sag Immunity Standards”, que especifica a tolerância requerida para os fabricantes de equipamentos semicondutores.

Para que os equipamentos atendam a norma SEMI F47, é preciso que ele opere sem falhas na região acima da curva mostrada na Figura 7.

No eixo das coordenadas está o valor em porcentagem da tensão nominal do equipamento e no eixo das abscissas está a duração em segundos.

Os efeitos danosos dos AMT estão relacionados ao desempenho de equipamentos, que levam a perda da programação de microprocessadores em CLP, causando interrupção de parte ou todo o processo industrial, redução do conjugado nos motores podendo desacelerar a carga e, com o restabelecimento da tensão, provocar correntes elevadas, suficientes para atuar a proteção por sobre corrente, atuação indevida de relés de subtensão, desligamento de lâmpadas de descarga, desatracamento de contatores e relés

auxiliares e atuação indevida nos acionamentos de velocidade variável em corrente alternada.

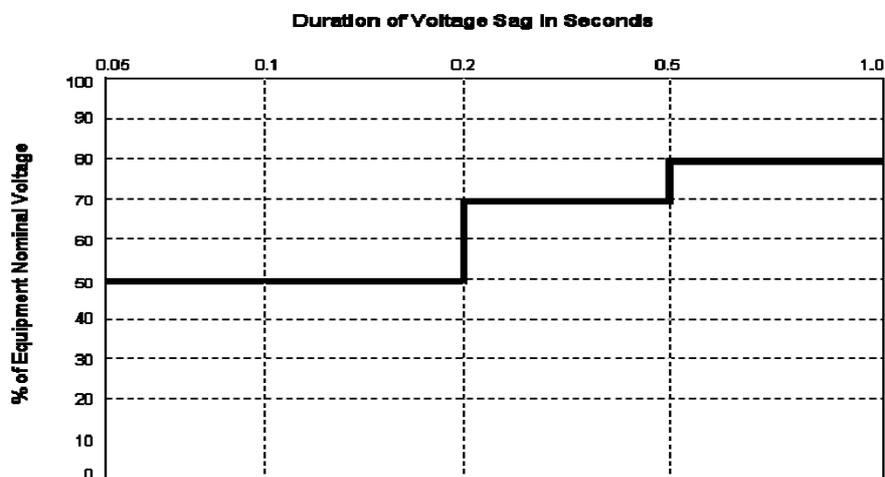


Figura 7: Curva de suportabilidade para equipamentos semicondutores – SEMI F47

Nas instalações da MVC os AMT provocam o desligamento do disjuntor principal da subestação, o entupimento de linhas de transporte pneumático, o entupimento das cabeças de impressão industrial, erros de leitura de variáveis no CLP, desatracamento dos contatores causando paradas do processo, mudança de posição de eletroválvulas e consequentemente paradas de linhas de produção.

Muitos trabalhos têm publicado que, os AMT são entre as VTCD, a principal causa de distúrbios (68% dos eventos) de qualidade da energia elétrica e grandes responsáveis por perdas na produção.

2.5 Características dos Afundamentos de Tensão

As características de um afundamento de tensão dependem do tipo da falta ocorrida, da localização da falta, da impedância da falta, do tipo de conexão dos transformadores, das tensões pré-falta, das características da proteção do sistema elétrico, etc.

Um afundamento de tensão pode ser equilibrado ou desequilibrado. O que vai definir esta característica é o *tipo de falta* que deu origem ao distúrbio. Uma falta trifásica gera um afundamento equilibrado (simétrico), enquanto os outros tipos de falta geram afundamentos desequilibrados. A maioria das faltas no sistema elétrico é fase terra. As faltas trifásicas são mais severas, mas menos comuns. Consequentemente a maioria dos afundamentos de tensão é desequilibrada [18].

Dependendo da *localização da falta*, o afundamento de tensão pode afetar um grande número de consumidores ou apenas um número restrito. Uma falta no sistema de distribuição atinge um número muito menor de consumidores do que uma falta no sistema de transmissão. Isto ocorre devido à grande diferença que existe entre as duas configurações: o sistema de transmissão é geralmente malhado e cobre uma área

geográfica maior, e o sistema de distribuição é radial e mais concentrado geograficamente. Além disto, as distâncias elétricas entre os diversos pontos de um sistema de distribuição são pequenas (baixa impedância), tornando um pouco mais solidárias as tensões em todo o sistema.

No caso de afundamentos de tensão desequilibrados, faltas fase-terra (FT), fase-fase (FF) ou fase-fase-terra (FFT), a tensão que chegará numa determinada carga dependerá também da *conexão do transformador* que liga o sistema faltoso ao barramento do consumidor. As principais alterações nos afundamentos são causadas por transformadores conectados em Δ -Y e Y- Δ .

2.5.1 A Influência do Tipo de Conexão dos Transformadores e das Cargas nos Afundamentos de Tensão.

Para faltas FT, FF e FFT os afundamentos são desequilibrados. Caso a carga esteja ligada ao secundário de um transformador conectado em Δ -Y ou Y- Δ , ela sentirá mudanças de amplitude, ou de amplitude e ângulo, devido ao afundamento de tensão. No caso de uma falta FFF, o afundamento gerado é equilibrado e não sofre influência do tipo de conexão do transformador e nem da carga. Ele é denominado Tipo A, e é mostrado no diagrama fasorial da Figura 8 (a).

Para uma falta FT teremos afundamento de tensão somente na fase defeituosa. Na Figura 8 (b) mostramos o diagrama fasorial de um afundamento de tensão causado por uma falta FT (Tipo B). Se a carga estiver ligada em estrela, não enxergará mudanças no afundamento, isto é, o afundamento é do tipo B, mas se a carga estiver conectada em Δ sentirá uma queda na amplitude e mudança no ângulo das duas fases não faltosas, e a terceira retornará ao normal. Este tipo de afundamento é denominado C, e é mostrado no diagrama fasorial da Figura 8 (c). Este diagrama fasorial também representa a transformação do afundamento através de um transformador Δ -Y, onde a carga é conectada em estrela no secundário. Se a carga estiver conectada em Δ , irá experimentar uma queda de tensão nas três fases com mudança de ângulo em duas delas. O diagrama fasorial que representa este tipo de afundamento (Tipo D) é o da Figura 8 (d).

Para faltas FF teremos afundamento de tensão e mudança de ângulo nas duas fases faltosas, sendo que a terceira não se modifica. Este afundamento é do Tipo C, e é representado pelo diagrama fasorial da Figura 8 (c). Caso a carga esteja conectada em estrela ela não sentirá mudanças no afundamento, mas se ela estiver conectada em Δ , verá um afundamento nas três fases e mudança de ângulo em duas delas. Este afundamento é do Tipo D, e é representado pelo diagrama fasorial da Figura 8 (d).

Para uma falta FF ocorrida no lado primário de um transformador conectado em Δ -Y uma carga conectada em Y no secundário experimentará um afundamento do Tipo D, mostrado no diagrama fasorial da Figura 8 (d), e uma carga conectada em Δ sentirá um afundamento do Tipo C, mostrado no diagrama fasorial da Figura 8 (c).

Para análise dos tipos de afundamentos em função da conexão dos transformadores e conexão das cargas, o sistema é considerado solidamente aterrado, com as impedâncias de seqüência zero, positiva e negativa consideradas iguais.

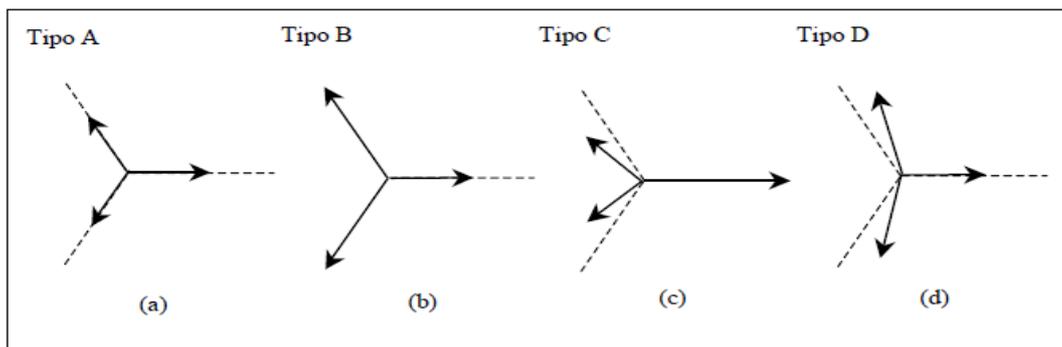


Figura 8: Os tipos de afundamento de tensão

Como consequência, a tensão nas fases não faltosas permanece sem alterações. Entretanto, estas simplificações, comumente utilizadas com o objetivo de facilitar o desenvolvimento analítico e a obtenção de conclusões importantes a respeito da questão estudada, não são uma limitação para a metodologia adotada, que permite considerar valores distintos para as três impedâncias de seqüência.

2.6 Área de Vulnerabilidade

O conceito de área de vulnerabilidade foi desenvolvido para ajudar na avaliação da probabilidade de uma carga específica estar sujeita a afundamentos de tensão de uma determinada amplitude. A área de vulnerabilidade é definida para um consumidor específico e para um limite de tensão de afundamento. Limite de tensão este, estabelecido a partir do tipo de carga existente neste consumidor. De posse dos dados de sensibilidade da carga, é possível determinar qual valor de tensão de afundamento passível afetá-la e, conseqüentemente, definir qual a área geográfica (área de vulnerabilidade) do sistema capaz de causá-lo.

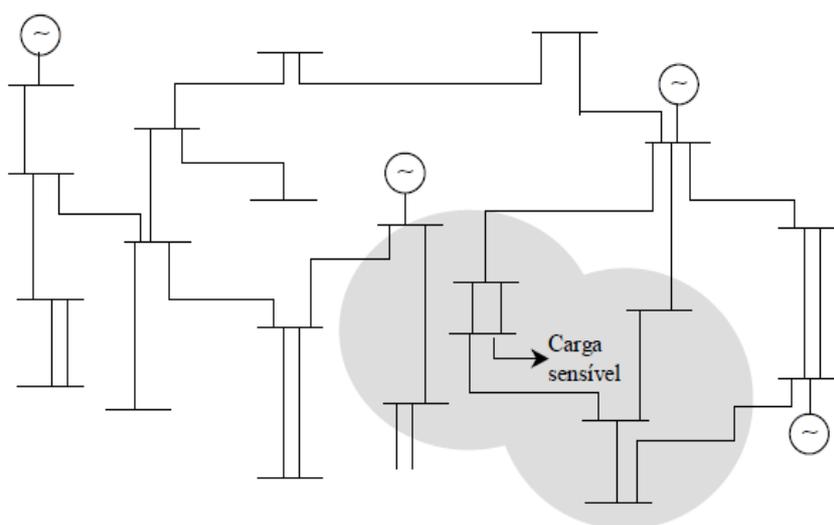


Figura 9: Área de vulnerabilidade definida para uma carga específica

A determinação da área de vulnerabilidade é feita através de cálculos de curto circuito ao longo do sistema. É importante ressaltar que quanto mais sensível a carga, maior será a sua área de vulnerabilidade. Na Figura 9 mostramos a área de vulnerabilidade definida para uma carga específica (área cinza). Isto significa que, para uma falta em qualquer ponto dentro da área cinza a carga sofrerá problemas de mau funcionamento ou desligamentos [19].

2.7 Problemas de Qualidade da Energia Elétrica

Em relação às VTCD, outros problemas com a qualidade da energia elétrica [20, 21] podem ser resumidos em:

2.7.1 Distúrbios Transientes

Este termo vem sendo utilizado na análise da qualidade de energia e logo é associado com a ocorrência de um evento indesejável de ocorrência momentânea.

São classificados segundo o PROREDE e o IEEE1159-1995 da seguinte forma:

Distúrbios impulsivos: ocorrem repentinamente através de uma rápida alteração de tensão (ou corrente) em relação às condições de operação de regime permanente com uma única polaridade, conforme Figura 10. Devido a sua rapidez, estes eventos normalmente são absorvidos por componentes do circuito e não se propagam muito além da fonte geradora, o que explica as alterações de sua característica de um local para outro. Entretanto, estes distúrbios podem excitar os circuitos ressonantes do sistema de energia para produzir outro tipo de transiente os oscilatórios. Podem ser classificados como:

1. Nanosegundos: 5ns (subida) e duração < 50ns
2. Microsegundos: 1 μ s (subida) e 50ns < duração < 1ms
3. Milisegundos: 0,1ms (subida) e duração > 1ms

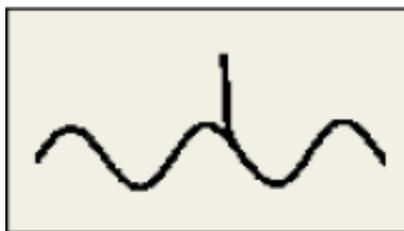


Figura 10: Distúrbio transiente impulsivo

Distúrbios oscilatórios: ocorrem repentinamente através de rápidas alterações de tensão (ou corrente) em relação às condições de operação de regime permanente, com mudanças de polaridade, conforme Figura 11. São definidos quanto ao seu espectro frequência, duração e magnitude. Normalmente são causados por chaveamentos, respostas a impulsos, carregamentos e descarregamentos de bancos de capacitores, ferroressonância e energização de transformadores. Podem ser classificados como:

1. Baixa frequência: $< 5\text{kHz}$; duração 0,3 a 50ms; nível: 0-4 pu
2. Média frequência: 5-500kHz; duração 20 μs ; nível: 0-8 pu
3. Alta frequência: 0,5-5MHz; duração 5 μs ; nível: 0-4 pu

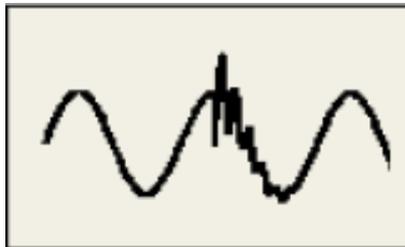


Figura 11: Distúrbio transiente oscilatório

2.7.2 Variações de Tensão de Longa Duração

São definidas como variações de tensão de longa duração, as variações de tensão com tempo de duração superior a um minuto, e podem ser classificadas como:

Interrupções de longa duração ou sustentada: Possuir amplitude de 0 pu.

Subtensões: Possuir amplitude inferior a 0,9 pu.

Sobretensões: Possuir amplitude superior a 1,1 pu.

2.7.3 Desequilíbrios de Tensão

O desequilíbrio de tensão é caracterizado por qualquer diferença nas amplitudes entre as três tensões das fases ou no desvio da defasagem de 120° entre estas tensões, conforme Figura 12.

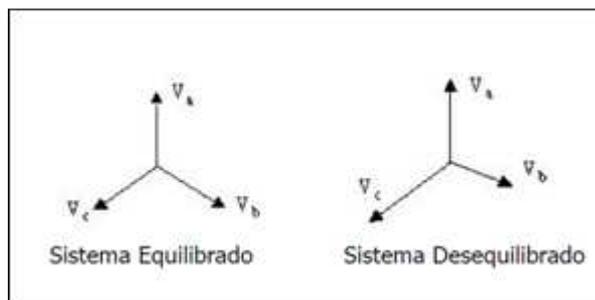


Figura 12: Desequilíbrio de tensão

A diferença entre as impedâncias das fases dos sistemas de transmissão ou distribuição de energia elétrica pode causar o desequilíbrio de tensão. Outras causas são distribuição desigual de cargas monofásicas ou bifásicas, cargas trifásicas desequilibradas ou quando uma carga trifásica equilibrada é conectada a uma rede desequilibrada causando o desequilíbrio das correntes de carga.

2.7.4 Flutuações de Tensão

As flutuações de tensão podem ser definidas como uma variação aleatória, repetitiva ou esporádica do valor eficaz da tensão. A impressão visual resultante das variações de fluxo luminoso nas lâmpadas causadas por flutuações de tensão é chamada de cintilação ou flicker.

As flutuações de tensão podem ser causadas pela instabilidade de cargas de alta potência como os fornos a arco, a partida simultânea de vários motores elétricos, ao uso de máquinas de solda, laminadores de grande porte, turbinas eólicas e as inter-harmônicas. O espectro de frequência típico do fenômeno é menor que 25 Hz, com amplitude entre 0,1 e 7% na amplitude. Na Figura 13, é apresentada a forma de onda de uma flutuação de tensão.

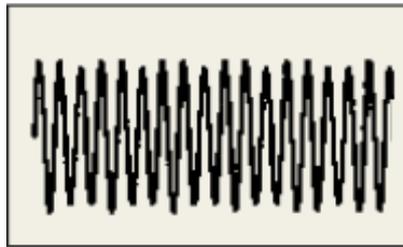


Figura 13: Flutuação de tensão

2.7.5 Distorções de Forma de Onda

Distorções na forma de onda são desvios relativos ao regime permanente de fornecimento de energia da frequência fundamental que caracteriza seu espectro. As distorções podem ser classificadas em:

Harmônicas: existem vários tipos de distorções na forma de onda, entre eles estão as harmônicas, que podem ser definidas como múltiplos inteiros da frequência (50/60 Hz) que o sistema de energia foi projetado para operar. As distorções harmônicas existem devido às características não lineares de equipamentos e cargas conectadas ao sistema de fornecimento de energia.

As fontes de distorção harmônica para o sistema elétrico podem ser grandes conversores estáticos, como os instalados em siderúrgicas, utilizados na transmissão em corrente contínua e compensadores estáticos, os conversores de média potência utilizados na indústria de transformação e tração elétrica, os conversores de baixa potência utilizados em equipamentos domésticos, informática e comércio, os transformadores de potência em sua magnetização, em máquinas elétricas rotativas e fornos a arco elétrico.

A Figura 14 representa a forma de onda de tensão com distorção harmônica.

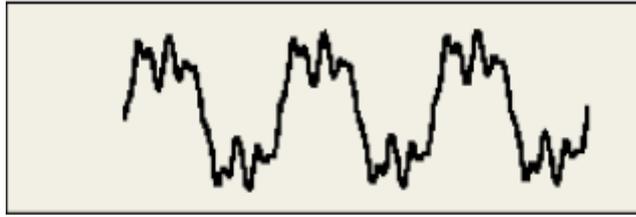


Figura 14: Distorção harmônica de tensão

Também podem ocorrer as inter-harmônicas que são tensões ou correntes com uma frequência que não é um múltiplo inteiro da frequência fundamental da alimentação, conforme a Figura 15.

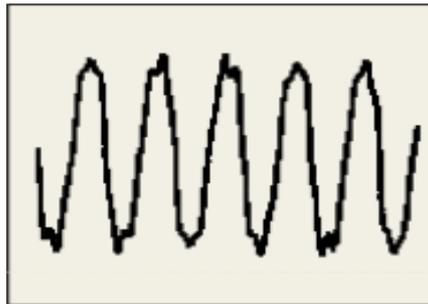


Figura 15: Forma de onda de tensão com inter-harmônicas

2.7.6 Corte de Tensão

Também conhecido pelo termo em inglês “notching”, são pequenos cortes periódicos na forma de onda da tensão, decorrentes do fenômeno de comutação em conversores trifásicos comutados pela rede. O corte de tensão é caracterizado pela altura relativa do corte (notch depth $kn\% = d/v$), que é o valor médio da altura do corte em relação à onda senoidal e pela área do corte (A_n – Notch área), que é área do corte calculada a partir do produto da altura média e do intervalo de comutação. A Figura 16 representa um corte de tensão.

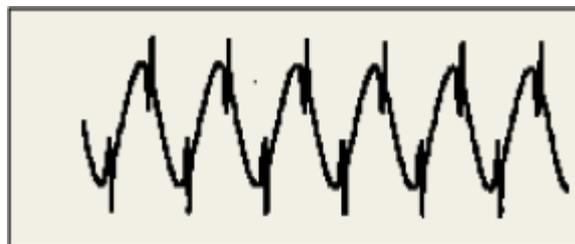


Figura 16: Corte de tensão

2.7.7 Variações de Frequência

As variações de frequência podem ser definidas como qualquer desvio no valor de referência da frequência da energia elétrica. No Brasil a frequência base é de 60Hz. As variações podem ocorrer devido a um desequilíbrio entre os níveis de potência de geração e demanda. A duração típica de uma variação de frequência é menor que dez segundos.

Na Tabela 2 [22], são mostradas as principais categorias e características dos fenômenos eletromagnéticos do sistema de fornecimento de energia elétrica.

Tabela 2: Características dos fenômenos eletromagnéticos da energia elétrica

Categorias	Componente espectral típico	Duração típica	Amplitude típica da tensão
1 - Transientes			
1.1 - Impulsivos			
Nanosegs	5 ns rise	<50 ns	
Microsegs	1µs rise	50 ns – 1 ms	
Milisegs	0,1 ms rise	> 1 ms	
1.2 - Oscilatórios			
Baixa frequência	< 5 kHz	0,3 – 30 µs	0 – 4 pu
Média frequência	5 – 500 kHz	20 µs	0 – 8 pu
Alta frequência	0,5 – 5 MHz	5 µs	0 – 4 pu
2 - Variações de curta duração			
2.1 - Instantâneas			
Afundamento de Tensão		0,5 – 30 ciclos	0,1 – 0,9 pu
Salto de Tensão		0,5 – 30 ciclos	1,1 – 1,8 pu
2.2 - Momentâneas			
Interrupção		0,5 ciclos – 3 s	< 0,1 pu
Afundamento de Tensão		30 ciclos – 3 s	0,1 – 0,9 pu
Salto de Tensão		30 ciclos – 3 s	1,1 – 1,8 pu
2.3 - Temporárias			
Interrupção		3 s – 1 min	< 0,1 pu
Afundamento de Tensão		3 s – 1 min	0,1 – 0,9 pu
Salto de Tensão		3 s – 1 min	1,1 – 1,8 pu
3 - Variações de longa duração			
3.1 - Interrupção Sustentada			
		> 1 min	0,0 pu
3.2 - Subtensões			
		> 1 min	0,8 – 0,9 pu
3.3 - Sobretensões			
		> 1 min	1,1 – 1,2 pu
4 - Desequilíbrio			
		Contínuo	0,5 – 2 %
5 - Distorção de forma de onda			
5.1 - Nivel CC			
		Contínuo	0 – 0,1 %
5.2 - Harmônicos			
	0 – 100 ^o harmônico	Contínuo	0 – 20 %
5.3 - Interharmônicos			
	0 – 6 kHz	Contínuo	0 – 2 %
5.4 - Corte			
		Contínuo	
5.5 - Ruído			
	espectro banda	Contínuo	0 – 1 %
6 - Flutuações de tensão			
	< 25 Hz	Intermitente	0,1 – 7 %
7 - Variações da frequência			
		< 10 s	

2.8 Normalização Aplicável

As normas básicas abordam todos os aspectos gerais do assunto, descrevendo os fenômenos, descrevendo a metodologia de medição e técnicas de ensaios e são apresentadas a seguir [23, 24, 25, 26].

IEC 61000-2-1 (1990) *clause 8 “Voltage Dips and Short Supply Interruption”*:

Esta norma descreve brevemente os afundamentos, considerando os parâmetros intensidade e duração. Também são analisadas as causas dos afundamentos, e os efeitos sobre cargas sensíveis.

IEC 61000-2-4 (2002) *“Environment – Compatibility Levels in Industrial Plants For Low Frequency Conducted Disturbances”*: Esta norma [40] define três classes de ambientes eletromagnéticos. São indicados valores de referência de afundamentos de tensão para cada classe de ambiente.

IEC 61000-2-8 (2002), *“Environment – Voltage Dips and Short Interruptions on Public Electric Power Supply Systems With Statistical Measurements Results”*.

Esta norma descreve de forma detalhada as causas e a propagação dos afundamentos de tensão. Também são abordados os efeitos sobre cargas sensíveis e métodos de medição. IEC 61000-4-11 (1994), “*Testing and Measuring Techniques - Voltage Dips, Short Interruptions and Voltage Variations Immunity Tests*”. Esta norma deve ser utilizada para testar o nível de imunidade de equipamentos eletro-eletrônicos cuja corrente nominal é menor que 16 A por fase. Ela descreve os procedimentos e os equipamentos de teste. Esta norma não deve ser aplicada em equipamentos que funcionem em tensão CC ou em tensão cuja frequência é 400 Hz.

Normas industriais SEMI: O objetivo destas normas é aprimorar a produtividade dos fabricantes de materiais semicondutores. Elas surgem do acordo voluntário entre os fabricantes e os consumidores finais de materiais semicondutores.

SEMI F47-0200 “*Specification for Semiconductor Processing Equipment Voltage Sag Immunity*”: Esta norma indica o nível de imunidade que os processos que fabricam semicondutores devem possuir. A norma não permite a utilização de No-breaks com o objetivo de melhorar a tolerância dos processos.

SEMI F42-0999 “*Test Method For Semiconductor Processing Equipment Voltage Sag Immunity*”: Esta norma [36] define a metodologia de teste para determinar a tolerância dos equipamentos frente a afundamentos de tensão, visando o atendimento da norma SEMI F47.

Norma industrial CBEMA : A Indústria da Tecnologia da Informação (ITI), anteriormente conhecida como Associação dos Fabricantes de Equipamentos de Computação (CBEMA), publicou uma nota técnica onde era mostrada uma curva de tolerância para os equipamentos fabricados pelos integrantes da ITI. Embora a curva assuma que os equipamentos da ITI são ligados em sistemas cuja tensão fase-neutro é 120 Vca, a mesma vem sendo utilizada de forma generalizada como uma curva de tolerância típica de equipamentos microprocessados. A curva define no plano tensão por tempo com duas áreas: uma área superior onde se encontram os eventos que não devem sensibilizar os equipamentos e, uma área inferior onde se encontram os eventos que podem afetar o funcionamento normal dos equipamentos sendo que os mesmos devem desligar-se de forma controlada.

Procedimentos de Rede: Resolução normativa nº 372 de setembro de 2009 da ANEEL, consta de 25 módulos, sendo que os sub-módulos 2.8 e 3.6, estão diretamente voltados à questão de problemas de qualidade. O sub-módulo 2.8 trata do gerenciamento dos indicadores de desempenho da rede básica e de seus componentes e o sub-módulo 3.6 dos requisitos técnicos mínimos para a conexão à rede básica.

CAPÍTULO 3: DESCRIÇÃO DO PROCESSO E OS PROBLEMAS DE QUALIDADE DA ENERGIA

Neste capítulo é feita uma breve apresentação da Moinhos Vera Cruz, relatando os principais problemas de qualidade da energia no processo e os equipamentos sensíveis à variação da tensão instalados em sua unidade industrial de Santa Luzia.

3.1 Apresentação

A Moinhos Vera Cruz (MVC) é uma empresa da zona da Mata Mineira, fundada em 1953, atua no ramo da indústria de trigo e derivados. Em 1989, foi construída a moderna unidade de Santa Luzia, cidade a 25 quilômetros de Belo Horizonte (MG), hoje com 480 toneladas por dia de capacidade de moagem, 30 mil toneladas de capacidade de armazenamento de grãos em silos de concreto e 10 mil toneladas em silos metálicos.

A unidade de Santa Luzia, mostrada na Figura 17, foi a primeira indústria de moagem totalmente controlada por CLP no Brasil, desde os silos até o empacotamento da farinha de trigo, o processo de produção é todo monitorado automaticamente através de instrumentação analógica e digital sofisticada [27]. Através de suas duas salas de controle (moagem e veramix) é possível operar toda a planta e acompanhar o estado de cada equipamento individualmente. Uma central de ar comprimido é responsável por suprir todo o sistema pneumático de automação.

Recentemente foi inaugurado em seu parque industrial uma unidade de produção de farinhas integrais, Pedra Mó, com alto nível de automação e controle, que conta inclusive de uma central de energia solar para suprir toda a energia usada em seus comandos.

O seu principal processo é a moagem de trigo, que se divide em quatro etapas principais: a recepção e armazenamento dos grãos, a limpeza e condicionamento do trigo, a moagem do trigo o armazenamento e distribuição dos produtos.

Um detalhamento de cada etapa é feito a seguir.



Figura 17: Vista aérea da Moinhos Vera Cruz - Santa Luzia – MG

Recepção e Armazenamento do Grão

O trigo é recebido por meio rodoviário ou ferroviário, pesado em balanças eletrônicas com células de carga e armazenado em perfeitas condições de higiene, temperatura e umidade para poder garantir um melhor produto final, em silos de concreto e metálico.

Limpeza e Acondicionamento do Trigo

Nesta etapa é eliminada toda a impureza como sementes estranhas, terra, areia, pedras e outros. A presença de impurezas causa danos aos equipamentos e também desqualifica o produto final, para isso são utilizados equipamentos específicos para a limpeza do grão. Após a etapa de limpeza o trigo é acondicionado no mínimo por 18 horas, este tempo varia de acordo com a dureza e umidade do grão. Esta etapa de acondicionamento tem como objetivo facilitar a separação do farelo com o endosperma durante a moagem.

Moagem do Trigo e Produção de Derivados

O objetivo do processo de moagem é separar na forma mais pura o endosperma para que este possa ser moído e convertido em farinhas não contaminadas com o germe ou o farelo, os quais são comercializados separadamente. Para isto, o grão primeiramente passa por um processo de trituração onde serão extraídas as semolinas (endosperma). Em seguida estas são classificadas no plansifter em partículas grossas e finas. Estas partículas irão passar por cilindros redutores, novamente pelo plansifter, sassores e outros equipamentos que definirão os produtos derivados do trigo. O principal produto derivado de trigo é a farinha, seguida do farelo e o germe.

Armazenamento e Distribuição dos Produtos Acabados

Nesta etapa o produto é embalado através de empacotadeiras automáticas em embalagens de 1kg, 5kg, 50kg e o “Big Bag” de 1000 kg. Todo o produto passa por equipamentos detectores de metal, para garantir a pureza e é armazenado sempre em ambientes limpos, secos e arejados. A distribuição dos produtos é feita por uma frota própria e por transportadoras terceirizadas.

3.2 Equipamentos Sensíveis à Variação de Tensão

A equipe de manutenção com utilização do sistema de gerenciamento da energia elétrica CCK, após cada interrupção do processo por problemas de qualidade da energia, registrou durante quatro anos as ocorrências de VTCD e identificou os equipamentos mais sensíveis a estes fenômenos, conforme detalhamento a seguir.

1- Disjuntor a seco de baixa tensão e forte intensidade Masterpact Merlin Gerin:

Instalado na Subestação principal, no painel de baixa tensão (BT), utilizado como disjuntor principal para proteção e comando do quadro de BT, responsável em alimentar todas as cargas do setor produtivo, seu desligamento implica em parada geral de todos os processos de produção. Suas características são: tensão nominal 380V, com limite de capacidade de interrupção de 100 kA e corrente de curta duração admissível de 75 kA, 1s. Possui três pólos e trabalha com corrente nominal de 3200A. O tempo de fechamento dos contatos de carga é de 80 ms.

O disjuntor foi construído com bobina de mínima tensão instantânea, que provoca a abertura instantânea do disjuntor quando sua tensão de alimentação descer a um valor entre 35% e 90% de sua tensão nominal, com tempo de resposta de 90 ms (5.4 ciclos) [28].

2- Impressoras industriais de jato de tinta Willet modelo 460 Si:

As impressoras 460 Si de jato de tinta, instaladas nas linhas de produtos acabados, destinam-se à impressão das informações de data, lote e validade nos produtos. São aparelhadas com uma cabeça de impressão cilíndrica, conectada ao gabinete por um cabo umbilical flexível. As impressoras são operadas a partir de um painel de controle localizado no topo do gabinete principal e acionadas por um sensor capacitivo que detecta a passagem do produto na linha. A impressão é feita por meio da formação de gotas processadas em sua eletrônica, que chega a 1309 milhões de caracteres por litro de tinta.

Toda parada da impressora é precedida de uma circulação automática de solvente por todo o circuito hidráulico de tinta e eletroválvulas com o objetivo de limpeza e evitar a obstrução das mesmas com a secagem da tinta que acontece em poucos segundos. A parada destes equipamentos implica em parada das linhas de empacotamento. Toda parada abrupta por corte de energia, não aciona o sistema de limpeza com solvente, o que ocasiona obstrução da cabeça de impressão. Trabalha com tensão alternada de 220V e consumo típico de 200W.

3- Impressoras industriais de jato de tinta Imaje S7 e 9020:

Mesmo princípio de funcionamento das impressoras Willet, também utiliza jato contínuo desviado e caracteres tipo matricial. Também apresentam necessidade de uma limpeza por meio de solvente no circuito de tinta e eletroválvulas para evitar que a tinta seque e provoque a obstrução do circuito hidráulico. A parada destes equipamentos implica em parada das linhas de empacotamento. Trabalha com tensão alternada de 220V e consumo típico de 150W.

4- CLP Rockwell família 5:

O sistema CLP-5 consiste dos seguintes componentes principais: dois controladores CLP-5, módulos adaptadores remotos, módulos de E/S 1771 com oito canais, chassi, fontes de alimentação e terminais de programação. Instalados em dois racks na sala de controle, são imprescindíveis ao processo de produção. Uma falha ou parada do controlador implica em parada imediata e total da produção. E como é dotado de eletrônica sensível, está sujeito à queima de seus componentes em variações de tensão, além de erros de atualização de variáveis do processo durante AMT.

5- Balança eletrônica ferroviária e rodoviária com células de carga:

As balanças Filizola, com indicador de peso digital IDS-2 para uso industrial, são usadas para pesagem dos vagões na linha férrea e pesagem de cargas na balança rodoviária. Montadas sobre células de carga, elas identificam e monitoram as chegadas e saídas de cargas da Moinhos Vera Cruz. São constituídas dos seguintes componentes: Placa principal com microcontrolador U24 e EPROM U3, placa fonte alimentada em 220 V ou 240 VAC, placa CI interface e caixa de junção onde são conectados as células de carga. Uma falha nestas balanças, ou desligamento, compromete o recebimento da matéria prima e a expedição de todos os produtos. A eletrônica e as células de carga são as partes mais sensíveis as variações de tensão e exigem forma de onda senoidal para o perfeito funcionamento conforme indicado pelo fabricante.

6- Contatores eletromecânicos:

São dispositivos de comando eletromecânicos para alimentação de motores, alimentados em corrente alternada. Possuem contatos principais trifásicos e contatos auxiliares para comando e proteção. São utilizados em circuitos de comando com lógica “relé” para intertravamento do processo.

A sensibilidade a VTCD é função do equilíbrio entre a força eletromagnética e a força da mola que o mantém normalmente aberto. As falhas nos contatores geram falhas no sistema supervisorio, parando todo o processo.

7- Eletroválvulas:

As eletroválvulas são responsáveis por comandar todas as válvulas de desvio e gaveta no processo. São montadas com corpo em alumínio e bobina solenóide alimentadas em

corrente alternada. Podem ser duplas ou simples e uma falha nestas eletroválvulas altera o posicionamento das válvulas de desvio ocasionando em erro de posicionamento para o CLP e parada da linha de produção.

Uma dificuldade deste estudo foi separar as interrupções de produção por afundamentos momentâneos de tensão, das demais causas. Foi observado pela equipe de manutenção, que todos os desligamentos nos centros de carga e processo eram em função do desligamento do disjuntor a seco de BT Masterpact Melin Gerin 3200 A, instalado no quadro de baixa tensão na subestação.

3.3 Problemas de Qualidade da Energia no Processo

Nas instalações dos Moinhos Vera Cruz, o número de interrupções de fornecimento de energia elétrica registrados, chama a atenção para um problema de sensibilidade das proteções e equipamentos às variações de tensão de curta duração, destacando-se os afundamentos momentâneos de tensão, o que leva a desligamentos indesejados da planta com consequentes prejuízos para a empresa.

Os desligamentos, por problemas de qualidade da energia, geram as seguintes consequências para o processo e área administrativa da MVC:

- 1- Tempo médio de 15 minutos para restabelecimento do processo produtivo após cada desligamento, composto pela soma dos tempos médios registrados para rearme da subestação, onde está localizado o disjuntor a seco Masterpact, a partida dos compressores de ar comprimido e partida do processo até sua estabilização.
- 2- Rejeição do produto logo após o restabelecimento, devido a não homogeneidade do produto e variação no padrão de cor das farinhas. Toda a parada de produção requer procedimentos para a garantia da homogeneidade da farinha, o que não ocorre nas paradas abruptas por falta de energia;
- 3- Entupimento de linhas de transporte, em função da parada repentina dos sopradores, acarretando em tempo médio de 2 horas de parada para liberação da linha de produção. As tubulações ficam com todo o produto retido no momento da parada que se acumula na saída dos sopradores e não permite a partida dos mesmos antes de se esvaziar as tubulações;
- 4- Ocorrência de queima de componentes eletrônicos sensíveis no CLP e equipamentos eletrônicos. Principalmente módulos de entrada e saída do CLP, além de sensores de nível indutivos e capacitivos;
- 5- Constantes erros de partida nas impressoras industriais, ocasionando em paradas médias de 30 minutos para limpeza dos circuitos de tinta. Em função da falta do procedimento de limpeza automática do circuito hidráulico por solventes antes da parada do equipamento;
- 6- Aumento de manobras nos equipamentos da subestação, aumentando os riscos de acidentes, além de diminuir a vida útil dos mesmos. No mínimo são necessários a manobra de duas chaves seccionadoras e seis disjuntores para restabelecimento da energia;
- 7- Falhas de “rota incompleta” gerada pelo sistema supervisor, devido ao desatracamento momentâneo dos contadores. O CLP identifica como “rota

- incompleta” falta do sinal “funcionando” que é gerado pelo contato normal aberto dos contatores e enviado ao supervisor;
- 8- Falha no posicionamento de válvulas de desvio do transporte pneumático e automação, em função da mudança de estado das eletroválvulas durante AMT.
 - 9- Erros de leitura das variáveis do processo pelo CLP. Durante os AMT as leituras das variáveis do processo são interrompidas e não são atualizadas no sistema supervisor;
 - 10- Falha de comunicação na rede corporativa interna. Parada de comunicação por falta de energia nos modems de informática;
 - 11- Inicialização de computadores e perda de dados, devido a falta de energia momentânea, que desliga os computadores e perde os dados não salvos;
 - 12- Perda de análises em andamento no setor de laboratório. Algumas análises de laboratório demoram até duas horas para conclusão e são perdidas se forem interrompidas durante a análise, o que acontece quando ocorre interrupção da energia elétrica.

3.4 Sistema Elétrico da Moinhos Vera Cruz

A subestação fonte da CEMIG para a Moinhos Vera Cruz é a subestação Santa Luzia II, localizada no Conjunto Cristina em Santa Luzia. Esta subestação é alimentada por duas linhas de transmissão em 138 kV, formando um anel entre as subestações de Neves I e Vespasiano II, estas ambas 500 kV.

A Moinhos Vera Cruz encontra-se no final da sua rede de distribuição em 13.8kV, conforme Figura 18, planta de localização abaixo fornecida pela CEMIG, o que o torna mais suscetível aos problemas de qualidade da energia, visto que está sujeito a distúrbios provocados em qualquer parte da rede.

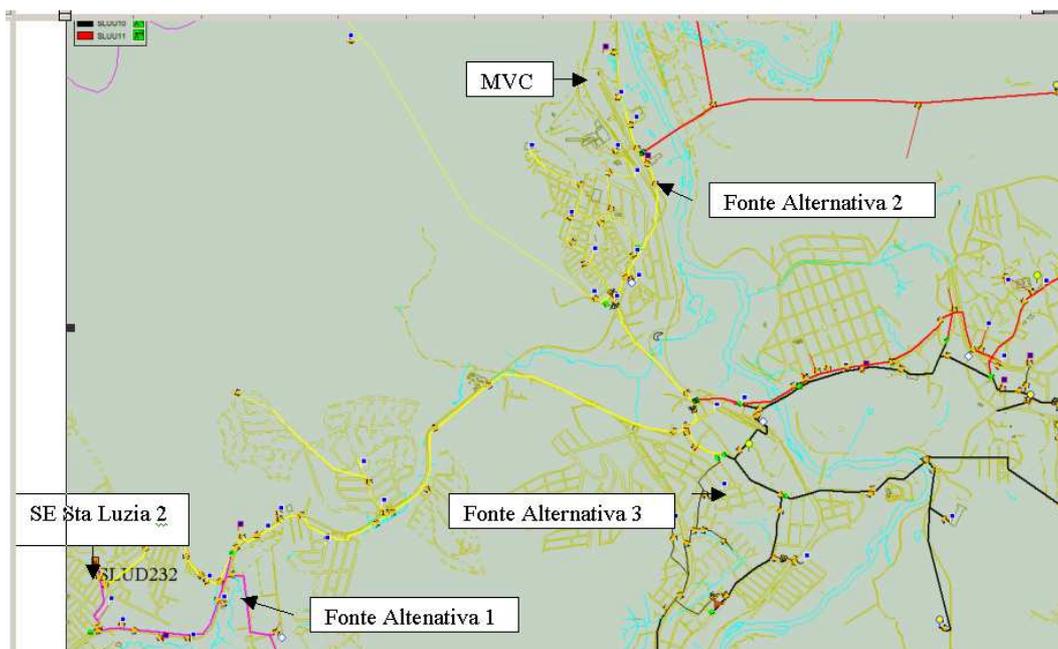


Figura 18: Localização dos alimentadores da CEMIG para a MVC

O nível de curto circuito da barra que atende a Moinhos Vera Cruz, segundo a CEMIG, em 13.8kV vale para faltas trifásicas, 1406 A com ângulo de 51,57° e para faltas monofásicas, 883 A com ângulo de 49,45°. A Corrente mínima de curto monofásico é de 171 A. A potência de curto circuito trifásico é de 33,6 MVA com uma razão de curto circuito de 9,82%, e relação X/R baixa de 1,26.

A relação baixa de X/R confirma que a indústria está alimentada por rede de distribuição com condutores finos e encontra-se instalada na ponta.

A unidade industrial dos Moinhos Vera Cruz de Santa Luzia, possui uma subestação interna de 15 kV, com 3,3 MVA de potência instalada, proteção secundária microprocessada SEG, disjuntor tripolar a PVO 400A 15kV Siemens, chave seccionadora 630A 15kV Siemens, três transformadores 1000 kVA e um transformador 300 kVA. Um disjuntor a seco BT de forte intensidade Masterpact Melin Gerin 3200A, instalado no quadro de baixa tensão na subestação, que alimenta toda a planta industrial. Para supervisão e gerenciamento da energia elétrica, existe instalado na sala de controle, o gerenciador de energia CCK 6700, versão 7.5.6.0 de 2009, que faz o controle do fator de potência, controle de demanda e o registro de falhas de energia, sempre com a data e hora da falta e do retorno da energia.

Possui dois grupos geradores, um de 300KVA que supre a barra de emergência (iluminação e tomadas de uso geral) e um de 1560KVA para suprir parte do processo produtivo em uma emergência.

Os indicadores de qualidade de fornecimento permitidos para os Moinhos Vera Cruz, conforme dados fornecidos pela CEMIG são:

- DIC = 22,0 (expresso em horas)
- FIC = 20,0 (expresso em número de interrupções)
- DMIC = 11,0 (expresso em horas)

Todos os desligamentos ocorridos no processo são registrados no livro de ocorrências na sala de controle pelo operador do turno, além de serem registrados como falha de energia no sistema de supervisão e gerenciamento da energia elétrica CCK.

No período de Março de 2007 a Fevereiro de 2008, foram registrados 195 distúrbios de energia elétrica que provocaram a interrupção do processo. Os registros são apresentados na Tabela 3, onde constam também os indicadores de fornecimento permitidos para a instalação.

Os registros dos indicadores de fornecimento ficaram menores que os valores permitidos, porém seus valores são muito inferiores aos registros de desligamentos do processo, visto que representam apenas as falhas registradas nos alimentadores pela concessionária de energia.

Do total de registros de desligamentos do processo, foram subtraídos os desligamentos programados pela concessionária de energia (CEMIG) e pela manutenção interna, que não geraram parada abrupta da produção, resultando em 171 desligamentos causados pelas VTCD, conforme Tabela 4.

Tabela 3: Indicadores de fornecimento da energia e interrupções no processo

Mês/ano	DIC	FIC	DMIC	CCK
mar/07	0.88	2	0.86	16
abr/07	0	0	0	14
mai/07	1.40	1	1.40	14
jun/07	0.03	1	0.03	13
jul/07	0	0	0	15
ago/07	0	0	0	17
set/07	0	0	0	17
out/07	0	0	0	18
nov/07	1.56	2	1.51	19
dez/07	0.78	2	0,69	18
jan/08	7.40	2	0.52	18
fev/08	0.78	2	0.69	16

Os registros mostram que 87% dos desligamentos da planta foram causados por VTCD, com uma média de 14 desligamentos por mês, causando grande prejuízo para a indústria.

Tabela 4: Registros das interrupções de produção por VTCD

Mês/ano	Desligamentos	VTCD
mar/07	16	12
abr/07	14	12
mai/07	14	13
jun/07	13	11
jul/07	15	14
ago/07	17	17
set/07	17	16
out/07	18	16
nov/07	19	16
dez/07	18	16
jan/08	18	15
fev/08	16	13
Total	195	171

3.5 Prejuízos Industriais

Os prejuízos financeiros foram estimados considerando os custos operacionais reais da produção parada, os custos por perda de oportunidade de produção por tonelada

produzida e o tempo médio perdido e necessário para restabelecimento dos processos. As informações foram retiradas do setor contábil da empresa considerando o período de ocorrência.

3.5.1 Cálculo do Prejuízo por Interrupção no Processo

O cálculo do prejuízo apresentado teve como base todos os custos envolvidos no processo produtivo considerando a produção mensal e número de horas trabalhadas durante o período estudado.

O custo operacional por hora parada é de R\$2.068,72 (dois mil sessenta e oito reais e setenta e dois centavos), que são os custos fixos da planta. O custo por perda da oportunidade de produção é de R\$890,00 (oitocentos e noventa reais) por tonelada que é o valor referente ao que se deixa de produzir com a planta parada. A capacidade de produção da planta é de 20 toneladas por hora, (0,33 ton/min.), e o tempo médio de interrupção de produção por parada, citado anteriormente foi considerado de 15 minutos.

Deixa-se de produzir durante os 15 minutos de parada 5 toneladas de produto, que multiplicado pelo custo por perda de oportunidade, representa R\$4.450,00 (quatro mil quatrocentos e cinquenta reais) que são somados aos custos operacionais referente a 15 minutos, que é de R\$517,18 (quinhentos e dezessete reais e dezoito centavos), totalizando um prejuízo por interrupção de R\$4.967,18 (quatro mil novecentos e sessenta e sete reais e dezoito centavos).

Com base no valor acima, no período de doze meses, cento e setenta e um desligamentos provocados por VTCD, acumularam um prejuízo de R\$849.387,78 (oitocentos e quarenta e nove mil trezentos e oitenta e sete reais e setenta e oito centavos), somente com a parada de produção, sem acrescentar custos das horas paradas para manutenção nos equipamentos e processos, e queima de componentes em função dos desligamentos. Estes valores são maiores que as cinco vezes os valores encontrados na literatura como valor médio anual de prejuízos causados por afundamentos de tensão em indústrias alimentícias que é de R\$140.000,00/ano.

Além dos prejuízos financeiros, as paradas de produção causavam grande insatisfação para a gerência da MVC e dispersão dos funcionários, que na maioria das vezes diminuía seu ritmo de trabalho após cada evento diminuindo assim a produtividade da planta industrial.

3.6 Soluções e Ações Implementadas

Como em todos os desligamentos o disjuntor Masterpact da subestação atuava, foi proposta a substituição da bobina de mínima tensão instantânea, por uma bobina de mínima tensão temporizada em 3 segundos, para eliminar os desligamentos intempestivos quando da ocorrência de AMT. A substituição foi realizada em 17 de maio de 2008, conforme ajuste registrado nas fotos apresentadas no Apêndice I.

Para as cargas sensíveis aos desligamentos, como o CLP, balanças com células de carga e as impressoras industriais, foram instalados no-break senoidais modelo SS800 e NHS 600 VA, com tempo de resposta da ordem de 1.5 ms para variação da tensão [29].

Com estas implementações, foi promovido o aumento da robustez do disjuntor e proteção dos equipamentos sensíveis, como uma das ferramentas para mitigação dos efeitos do fenômeno de AMT.

Neste mesmo período, foi instalado na subestação interna um monitor de tensão CCK 4100/P/T, capaz de registrar eventos do tipo:

- Afundamento de tensão e elevações de tensão a partir de ½ ciclo de duração do tipo SAG e SWELL;
- Variações rápidas de tensão a partir de 130 microsegundos de duração do tipo Transientes;
- Ocorrências de variações entre neutro-terra;
- Harmônicas até 49ª ordem;
- Interrupções de energia de acordo com a resolução 024 da ANEEL de 28/01/2000;
- Registro contínuo do valor de tensão por fase em médias integradas a partir de 250 milisegundos de duração.

Além da instalação do monitor de tensão, foi atualizada a versão do gerenciador de energia CCK para sua última versão CCK6700, com maior precisão no monitoramento e capacidade de registros.

3.7 Custos das Implementações

Para a implementação das soluções propostas, foram adquiridos três no-breaks 800VA para as impressoras industriais Imaje e três no-breaks 600VA para as impressoras industriais Willet. Uma bobina de mínima tensão temporizada Schneider para o disjuntor principal a seco BT Masterpact Merlin Gerin da subestação, um monitor de tensão CCK 4100 e nova versão do gerenciador CCK 6700, conforme dados mostrados na Tabela 5. Toda a mão de obra para implementação foi feita por funcionários da MVC e não foram computados seus valores.

Tabela 5: Custos das implementações na MVC

Descrição	Quant.	Valor Unitário (R\$)	Valor Total (R\$)
No-break 800 VA	03	870,00	2.610,00
No-break 600 VA	03	210,00	630,00
Bobina MNR Schneider	01	1.966,50	1.966,50
Monitor de tensão CCK4100	01	2.800,00	2.800,00
Gerenciador CCK6700	01	4.000,00	4.000,00
Total			12.006,50

Para o custo médio de R\$4.967,18 (quatro mil novecentos sessenta sete reais e dezoito centavos), por desligamento não programado, pode-se concluir que o retorno do investimento foi após 2.4 desligamentos evitados, o que representa um retorno do capital investido imediato, considerando a média de desligamentos registrados.

3.8 Ações Esperadas e Realizadas

Após as implementações, prevê-se uma redução nos desligamentos causados por AMT, visto que a bobina de mínima tensão instalada no disjuntor principal da subestação foi temporizada em 3 segundos, este disjuntor é responsável por alimentar todas as cargas industriais de baixa tensão.

Com a instalação de no-breaks nas impressoras Willet e Imaje e, conseqüentemente, término dos desligamentos abruptos da linha de produção por problemas de qualidade da energia, espera-se acabar com o entupimento do sistema hidráulico das impressoras, permitindo sempre uma limpeza automática do circuito hidráulico de tinta antes da parada destes equipamentos.

Com a redução dos desligamentos da planta por AMT, espera-se uma redução nos entupimentos da linha de transporte pneumático, visto que não será acumulado produto nas tubulações provocado por parada inesperada das bombas de transporte.

Também foram instalados no-breaks para os CLP e as balanças eletrônicas, evitando-se assim a queima de seus componentes mais sensíveis à VTCD.

Com a instalação de no-breaks para os CLP, espera-se a redução dos erros de leitura das variáveis do processo, ocasionadas no momento dos AMT.

3.9 Resultados Iniciais

Com a instalação da nova versão do CCK e do monitor de tensão CCK 4100, passou a ser possível registrar separadamente os eventos em afundamentos de tensão, elevações de tensão, transitórios e falhas de energia (interrupções), passando a ser possível registrar os tipos de eventos, tempos de duração, seus valores eficazes e as curvas dos eventos. É mostrada uma tela de coleta de dados do sistema de gerenciamento de energia CCK na Figura 19.

Nesta tela é possível verificar a data de ocorrência do evento, o horário de início e a duração do evento em ciclos, minutos ou graus dependendo do evento. Os valores de tensão eficazes também são registrados nesta tela.

Figura 19: Registros dos problemas de qualidade da energia

CCK4100 - QUADRO BT							
Resumo	Eventos	Curvas	Registros RMS	Harmônicas	Histórico de Programação		
Evento #	Instante Inicial	Tipo de Evento	Fim/Duração/Ângulo	Vr	Vs	Vt	Vn
25	01/06/08 13:13:37,741	Transiente	108°	406.2	404.4	405.0	0.0
24	31/05/08 23:38:25,140	SAG	9.6 ciclos	367.7	390.1	309.1	0.0
23	31/05/08 16:00:11,050	SAG	10.2 ciclos	355.6	383.2	325.1	0.0
22	30/05/08 08:13:35,691	Transiente	144°	400.0	396.6	397.5	0.0
21	28/05/08 01:45:59,841	SAG	00:18:56,370	55.1	83.2	48.6	0.0
20	28/05/08 02:04:55,731	Transiente	144°	382.2	374.4	384.3	0.0
19	28/05/08 01:46:01,221	Falha de Energia	00:18:54,480	0.0	0.0	0.0	0.0
18	28/05/08 01:46:00,621	Falha de Energia	5.4 ciclos	34.9	71.0	81.2	0.0
17	28/05/08 01:45:59,941	Falha de Energia	00:00:00,179	18.2	35.8	24.8	0.0
16	28/05/08 01:45:59,860	Transiente	204°	212.1	337.1	179.3	0.0
15	22/05/08 16:32:27,490	SAG	02:28:47,091	91.9	164.9	74.7	0.0
14	22/05/08 19:01:14,101	Transiente	301°	394.1	387.4	393.4	0.0
13	22/05/08 16:32:27,591	Falha de Energia	02:28:46,480	0.0	0.0	0.0	0.0
12	22/05/08 16:32:27,551	Transiente	22°	186.3	329.1	211.6	0.0
11	22/05/08 02:23:17,140	SAG	2.5 ciclos	330.2	337.1	367.7	0.0
10	22/05/08 02:23:17,161	Transiente	204°	336.8	347.6	367.7	0.0
9	21/05/08 18:16:15,241	Transiente	268°	399.9	394.9	395.9	0.0
8	18/05/08 12:21:35,550	Transiente	8°	355.1	375.0	383.6	0.0
7	17/05/08 12:32:40,050	SAG	00:32:10,121	53.4	46.3	41.2	0.0

As distorções harmônicas totais passaram a ser monitoradas, com medições diárias instantâneas, e registros para as principais componentes, conforme apresentado na Figura 20.

Durante o do estudo de caso, não foram registrados distorções harmônicas superiores a 3% em nenhuma das fases, o que evidenciou não existir problemas desta natureza nas instalações industriais da MVC.

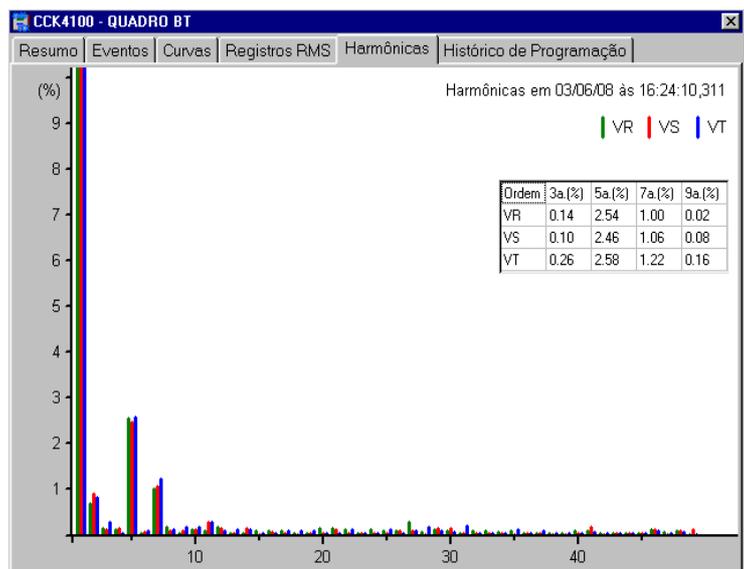


Figura 20: Registros de distorções harmônicas

Na Tabela 6, são apresentados os registros de distorções harmônicas de tensão, com seus valores médios durante o período de seis meses.

Tabela 6: Registros de distorções harmônicas.

Fase / %	3 ^a (%)	5 ^a (%)	7 ^a (%)	9 ^a (%)
Vr	0,34	2,58	2,68	0,20
Vs	0,26	2,46	2,36	0,22
Vt	0,60	2,58	2,22	0,18

Para efeito de comparação e verificação da eficácia das ações tomadas, foram analisados os registros de um ano antes das ações, setembro de 2007 a abril de 2008, e um ano após, de setembro de 2008 a abril de 2009.

Este período contempla a similaridade sazonal, que também interfere no número de ocorrências, em função do período do ano mais chuvoso com maior número de descargas atmosféricas, com mais ventos, período estes que aumentam o número de distúrbios na rede elétrica. Os resultados são apresentados na Figura 21.

Uma redução significativa de 86,7% nos desligamentos foi registrada, considerando apenas os desligamentos causados por VTCD.

Apartir de Abril de 2008 foi mantido o monitoramento dos equipamentos para verificar as conseqüências dos AMT sobre os mesmos, visto que o disjuntor principal não mais atuava desconectando o sistema elétrico. Nenhum registro foi feito, indicando que a temporização da bobina de mínima tensão do disjuntor principal poderia ser mantida sem causar danos aos equipamentos internos da instalação.

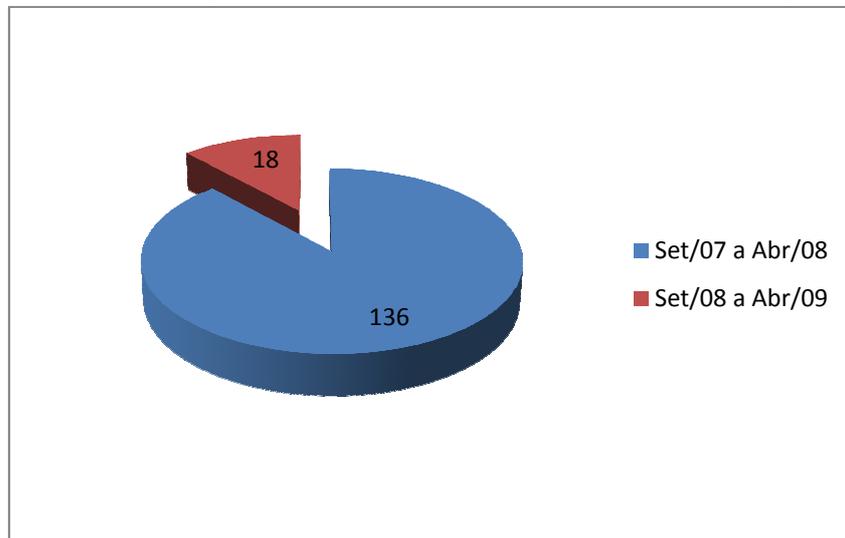


Figura 21: Número de desligamentos causados por VTCD

Após este período e visto que o número de desligamentos registrados ainda era alto (18 eventos em um ano), foi observado que nas ocorrências de AMT, o disjuntor principal não estava mais sendo sensibilizado e atuando, porém o CLP desconectava as cargas em função de falhas nos equipamentos registrado no sistema supervisorio.

As falhas eram registradas como “rota incompleta” que indicavam parada em equipamentos de uma linha de produção. Após consulta no manual de programação do

CLP e, verificando as linhas de programa, foi identificado que todos os contatores eletromecânicos tinham seus contatos auxiliares, normal aberto (NA), utilizados na lógica relé do programa. Estes contatos em condições normais de funcionamento do equipamento fornecia ao programa do CLP a permissão para manter a linha de produção ligada. No momento de uma afundamento de tensão, ocorria um desatracamento momentâneo dos contatores eletromecânicos e conseqüentemente os contatos auxiliares NA mudavam de estado e indicavam para o CLP falha no equipamento.

Foi observado que os equipamentos não falhavam no momento dos AMT, mas o CLP desligava a linha de produção por registrar a falha “rota incompleta” causada pelo desatracamento momentâneo dos contatores.

Para diminuir estas falhas e conseqüentemente os desligamentos causados, foi implementado na linha de programa do CLP uma temporização, “Time of delay”, com ajustes em 2 segundos, conforme mostrado na Figuras 22.

Esta temporização da linha de programa passou a permitir o desatracamento momentâneo dos contatores eletromecânicos, com conseqüente mudança de estado dos contatos auxiliares, durante os AMT, sem causar a falha “rota incompleta” ao CLP.

O tempo de ajuste em dois segundos foi definido, considerando que os AMT incidentes na instalação tinham duração inferior a este tempo.

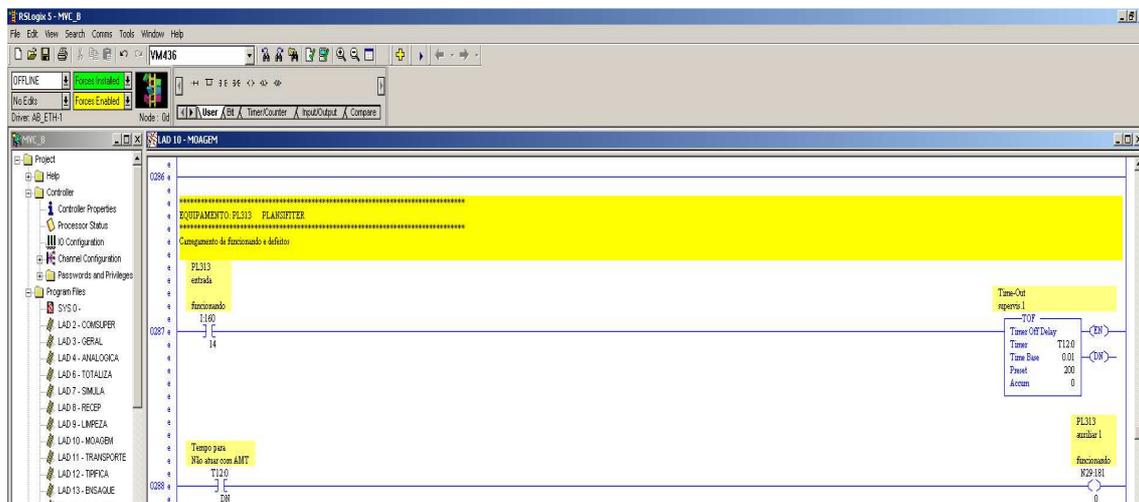


Figura 22: Temporização da linha de programa do CLP

3.10 Resultados Obtidos após as Implementações

Após as implementações serem concluídas, foram registrados afundamentos de tensão sem a ocorrência de desligamentos do processo. As figuras 23 e 24 mostram registros de valores eficazes de tensão com recuperação da tensão após um AMT sem a interrupção do processo produtivo, evidenciando a eficácia das implementações feitas.

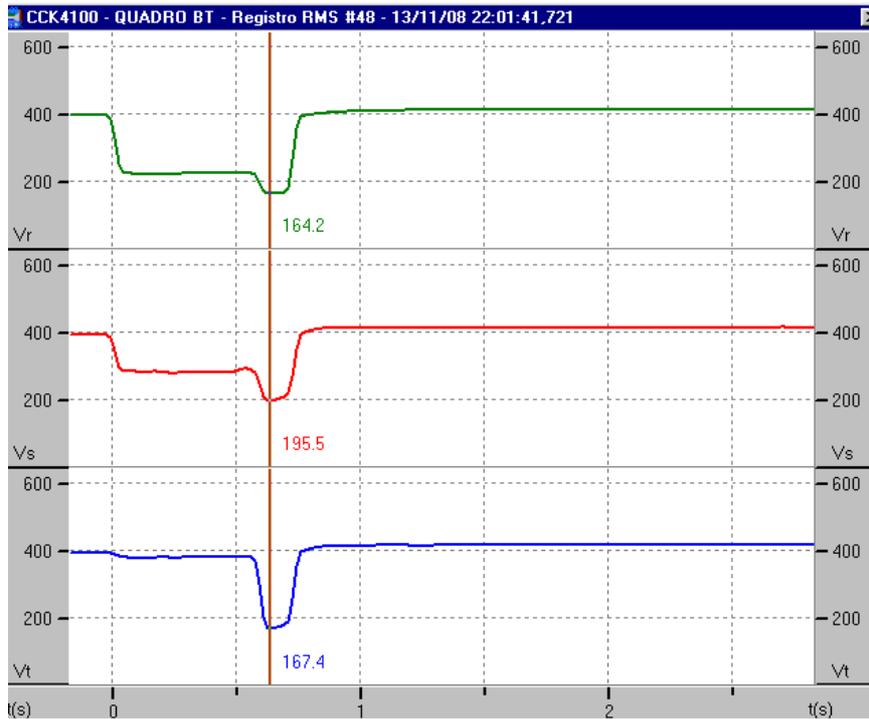


Figura 23: Registro de AMT de 0.43 pu e 43.2 ciclos sem interrupção da produção

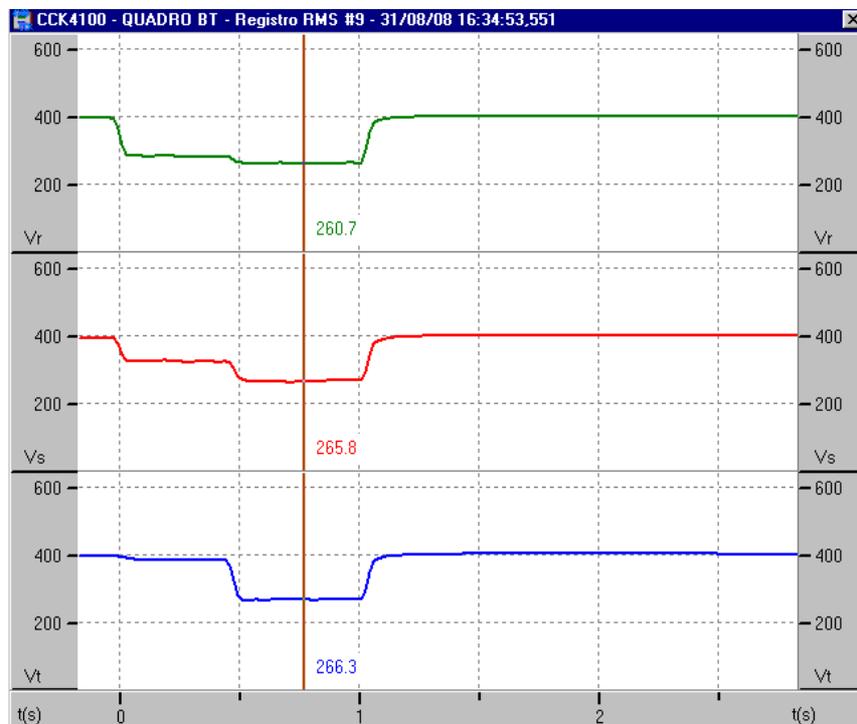


Figura 24: Registro de AMT de 0.68 pu e 1.04 segundos sem interrupção da produção

As instalações ficaram mais robustas após as implementações, suportando inclusive interrupções temporárias de tensão sem interromper a produção. As figuras 25 e 26 mostram os registros de duas ITT com recuperação da tensão após os fenômenos.

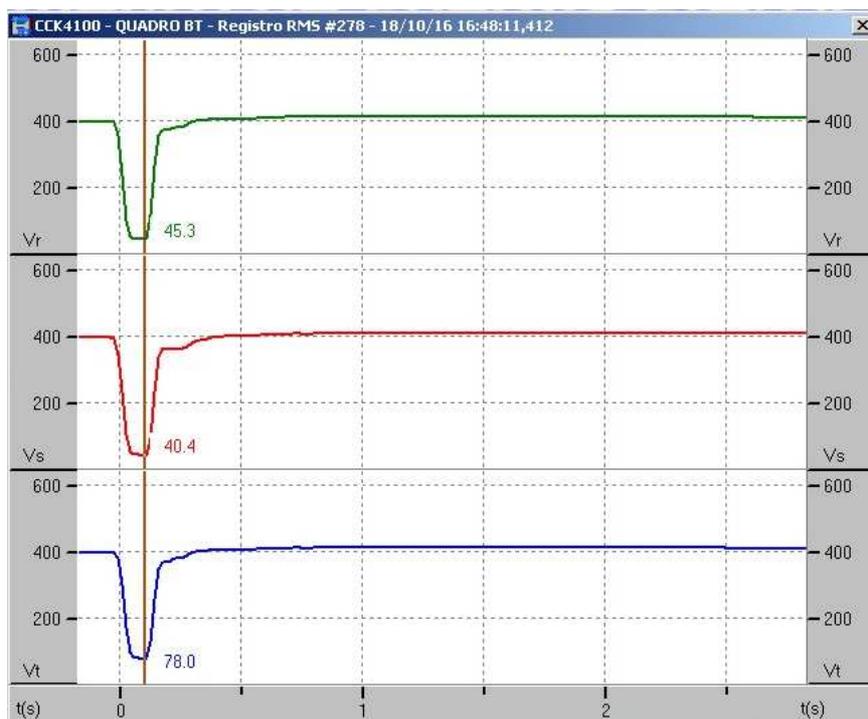


Figura 25: Registro de ITT de 0.09 pu e 10.2 ciclos sem interrupção da produção

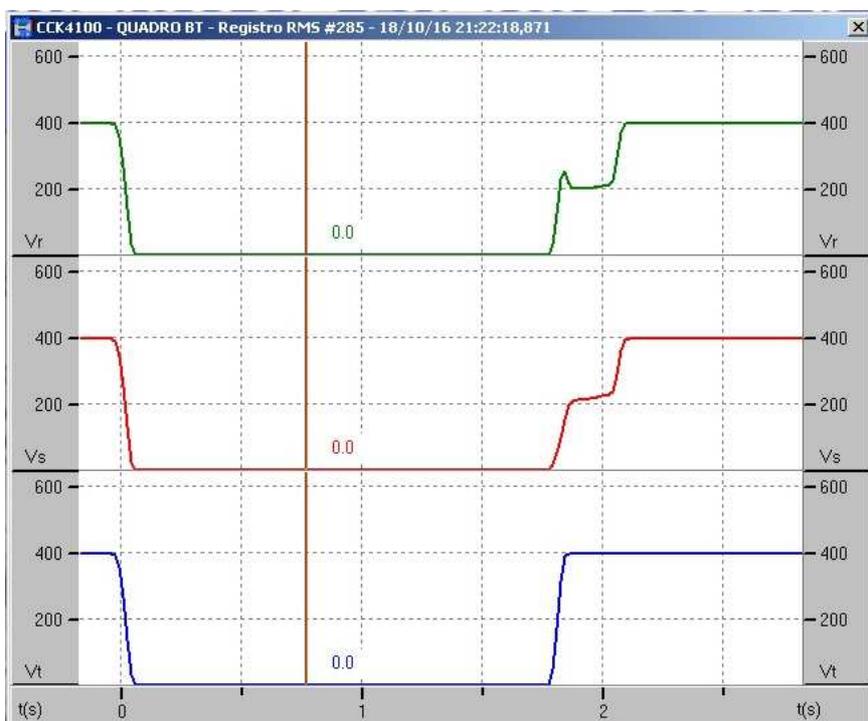


Figura 26: Registro de ITT de 0 pu e 1.731 segundos sem interrupção da produção

Em relação aos prejuízos financeiros podemos verificar, no período de junho de 2007 a maio de 2008, 169 desligamentos causados por VTCD com prejuízos de R\$839.453,42 (oitocentos e trinta e nove mil quatrocentos e cinquenta e três reais e quarenta e dois

centavos). Para o período de junho de 2008 a maio de 2009, ano após as ações iniciais implementadas uma redução para 19 desligamentos causados por VTCD com prejuízos de R\$93.376,42 (noventa e três mil trezentos e setenta e seis reais e quarenta e dois centavos). No terceiro período, de junho de 2009 a maio de 2010, após todas as implementações, foi registrado um redução para 9 desligamentos, com prejuízos de R\$44.704,62 (quarenta e quatro mil setecentos e quatro reais e sessenta e dois centavos). Considerando o mesmo número do eventos e os mesmos custos para os períodos anteriores, obtemos uma redução de 94,7% nos prejuízos.A Figura 27 mostra a redução no número de desligamentos da produção causadas por VTCD no período citado.

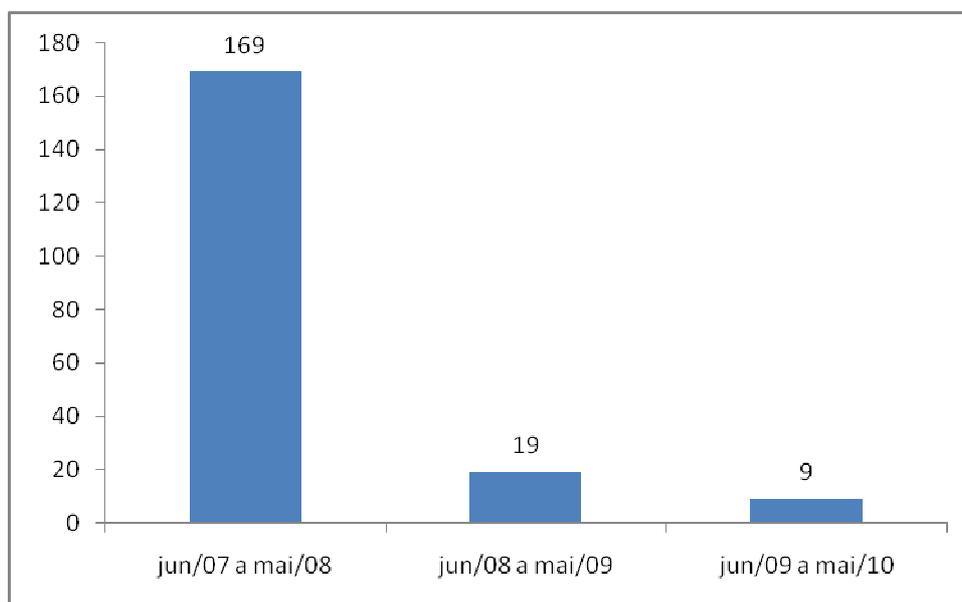


Figura 27: Resumo das interrupções de produção causadas por VTCD

3.11 Classificação das VTCD

Com a necessidade de conhecer melhor a sensibilidade dos equipamentos quando submetidos à VTCD, foi necessário antes classificar os fenômenos conforme os procedimentos de rede (PROREDE), em uma nova campanha de medição compreendido entre setembro de 2008 a dezembro de 2010, e assim conhecer as características dos AMT e elevações de tensão que incidem sobre as instalações da planta industrial da MVC.

Na Tabela 07 e Figura 28 são apresentadas a discretização dos parâmetros amplitude e duração para contabilização de afundamentos de tensão, conforme o procedimento de rede. Os afundamentos foram separados por faixas de amplitude e duração e inseridos em uma tabela. Foi possível observar uma maior incidência de AMT de até 0.50 pu com duração até 300ms.

Tabela 7: Discretização dos afundamentos de tensão

Duração Amplitude [pu]	[16.67 ms - 300 ms]	[300 ms - 600ms]	[600 ms - 1s]	[1s - 3s]	[3s - 1min]
(0.85 - 0.90)	113	2	1	11	0
(0.80 - 0.85)	65	1	2	0	0
(0.70 - 0.80)	44	1	8	4	0
(0.60 - 0.70)	31	1	12	9	0
(0.50 - 0.60)	13	4	14	1	0
(0.40 - 0.50)	22	16	10	0	0
(0.30 - 0.40)	6	1	1	1	0
(0.20 - 0.30)	2	0	0	0	0
(0.10 - 0.20)	3	0	1	0	0
< 0.10	6	0	1	8	0

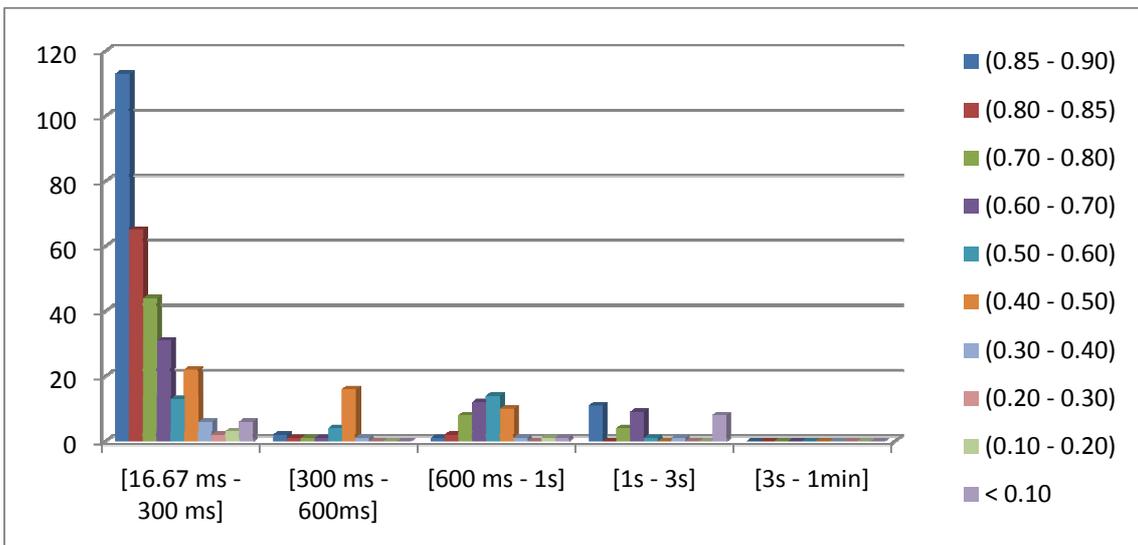


Figura 28: Discretização dos afundamentos de tensão

Na tabela 8 e Figura 29 são apresentadas a discretização dos parâmetros amplitude e duração para contabilização de elevação de tensão conforme os procedimentos de rede.

Tabela 8: Discretização das elevações de tensão

Duração Amplitude [pu]	[16.67 ms - 300 ms]	[300 ms - 600ms]	[600 ms - 1s]	[1s - 3s]	[3s - 1min]
(1.10 - 1.40)	3	4	7	2	28
> 1.40	0	0	0	0	1

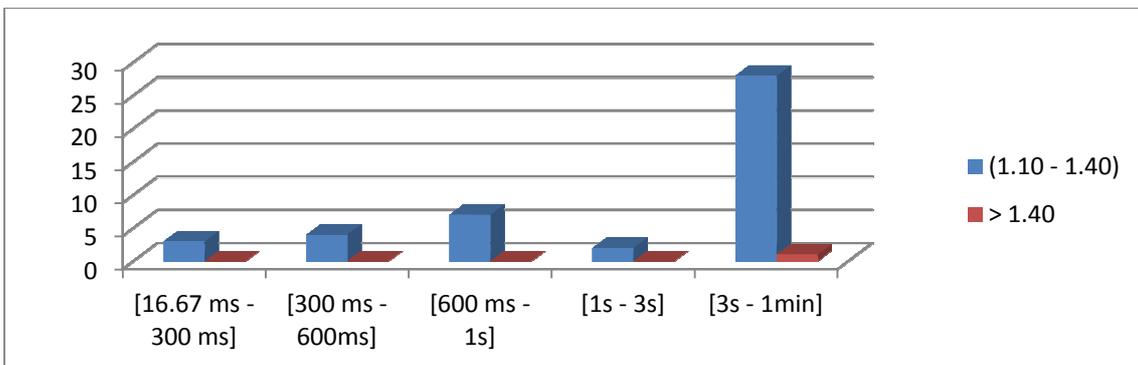


Figura 29: Discretização das elevações de tensão

Na Tabela 9 e Figura 30 foi apresentado o resumo das VTCD nas instalações da MVC, para o período 27 meses, classificados conforme a discretização apresentada acima.

Tabela 9: Resumo dos problemas de qualidade da energia elétrica na MVC

AMT	EMT	IMT	ETT	Interrupção Sustentada
400	16	15	29	70
75,5%	3,0%	2,8%	5,5%	13,2%

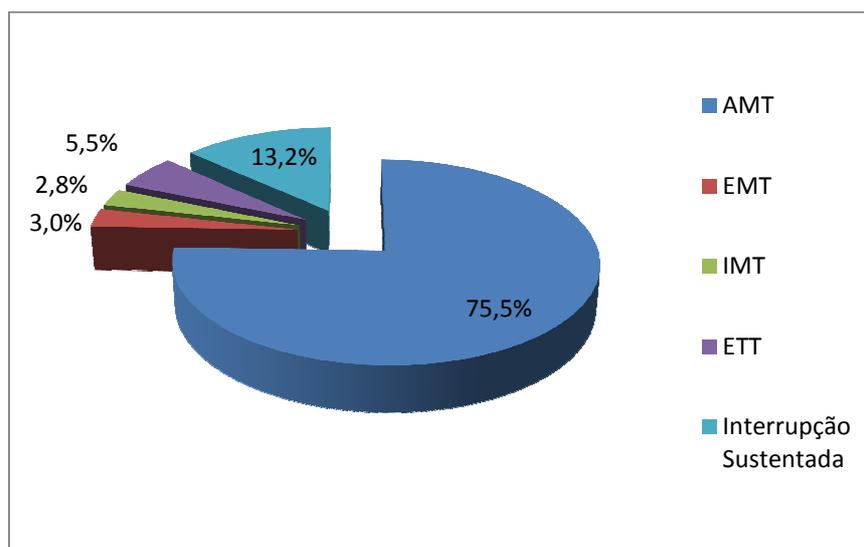


Figura 30: Problemas de qualidade da energia elétrica na MVC

Após esta campanha de medições e da classificação feita, fica evidente que entre as VTCD, o principal problema que incide sobre as instalações da MVC são os afundamentos momentâneos de tensão com 75,5% dos problemas, seguido pela interrupção sustentada com 13,2% do total.

Vale ressaltar que o pequeno número de elevações momentâneas e temporárias de tensão registrado, são muito prejudiciais para o sistema elétrico, visto que podem ultrapassar o nível de rigidez dielétrica dos isolamentos e provocar danos aos mesmos. Porém em todas as ocorrências de elevações de tensão foi observada a atuação das proteções do sistema, desconectando-o e evitando danos nos equipamentos e instalações.

Na Figura 31 são apresentados os registros das VTCD na MVC entre setembro de 2008 e dezembro de 2010. Estes registros são feitos mensalmente e mostram que não há relação direta entre os fenômenos e os períodos do ano, comprovando assim o caráter aleatório dos problemas de qualidade da energia elétrica.

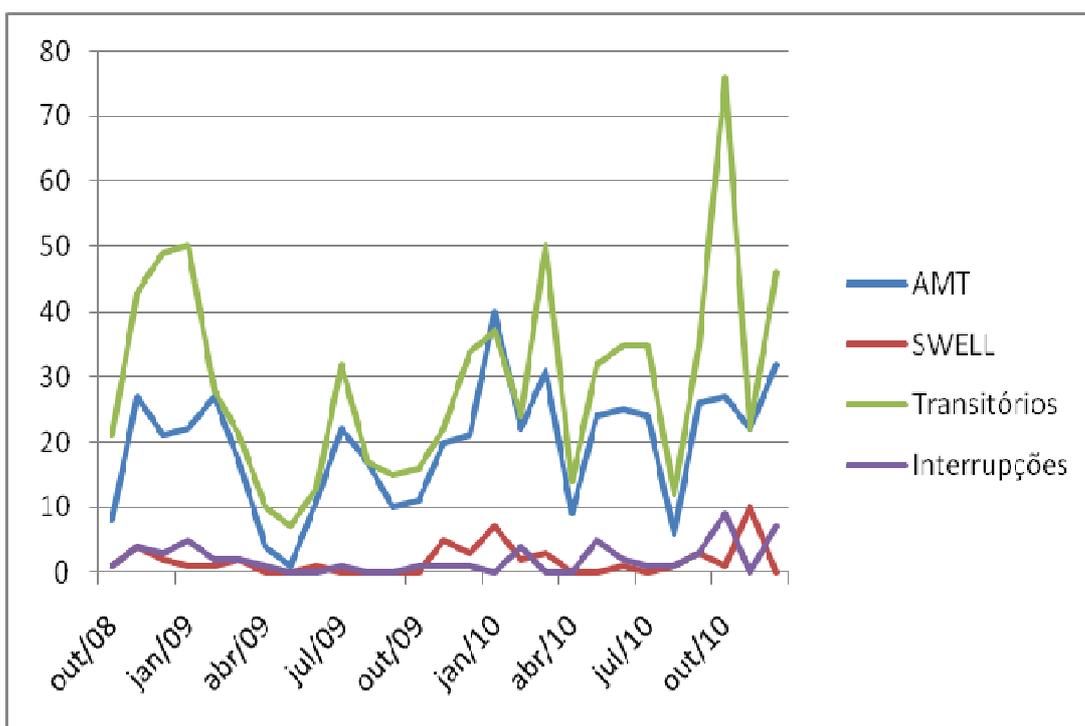


Figura 31: Registros mensais dos problemas de qualidade da energia elétrica na MVC

Após a classificação das VTCD, foi possível conhecer melhor os eventos que incidem sobre as instalações da MVC, que podem ser resumidos em:

- 1) Os distúrbios de afundamento momentâneo de tensão são responsáveis por 75,5% dos problemas de qualidade da energia que afeta a MVC;
- 2) 81,2% dos AMT que incidem sobre as instalações são de até 0.50 pu de amplitude e 36 ciclos de duração e 0.60 pu acima de 36 ciclos;
- 3) São inferiores a 8,2% os AMT com duração superior a 1 segundo;
- 4) Mais de 13% dos desligamentos da planta são causados por interrupções sustentadas de origem externa;
- 5) As elevações temporárias de tensão são o terceiro maior problema de qualidade da energia elétrica nas instalações da MVC com 5,5% do total dos eventos.

3.9.2 Curva Característica MVC

Após conhecer as características dos AMT que incidem sobre as instalações da Moinhos Vera Cruz, foi possível determinar uma curva que representa o perfil dos AMT incidentes no ponto de conexão da instalação.

A curva representa mais de 81% de todos os AMT incidentes na MVC durante o período de junho de 2007 a dezembro de 2010.

Esta curva é chamada aqui de curva característica MVC, identificada em vermelho na Figura 32, e representa as características dos AMT incidentes na instalação, com as amplitudes e durações na área superior a curva.

Esta curva passa a ser uma referência para análise de sensibilidade dos equipamentos instalados no parque industrial e as futuras aquisições, por representar em sua parte superior os afundamentos normalmente incidentes nas instalações.

Esta curva quando comparada com a curva SEMI F47, mostra que mesmos os equipamentos que atendem a esta norma, estão sujeitos a AMT mais severos que os suportáveis e pode vir a falhar se instalados na MVC.

Com ela é possível verificar, se conhecido a curva de sensibilidade do equipamento, se ele será atingido ou não pelos AMT, e se podem ou não falhar, quando instalados na planta em estudo.

A curva característica MVC foi definida como:

- Afundamentos de até 0.50pu para duração inferior a 36 ciclos;
- Afundamentos de até 0.60pu para duração superior a 36 ciclos.

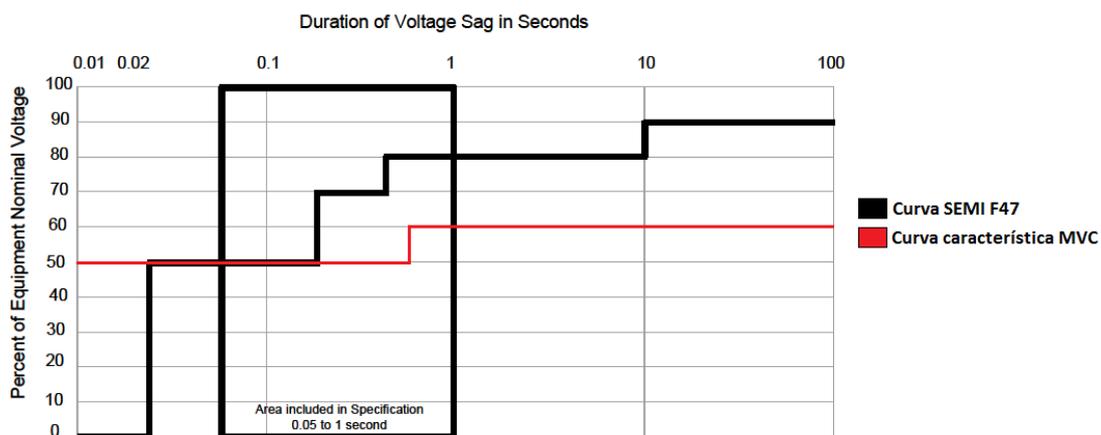


Figura 32: Curva característica MVC comparada a SEMI F47

A curva característica MVC foi também comparada à curva ITC. Neste caso foi acrescido o limite superior de elevações de tensão. A área em vermelho representa as VTCD incidentes na instalação.

É possível observar na Figura 33, que mesmos equipamentos que atenda a suportabilidade definida pela curva ITIC, podem sofrer danos, se não protegidos, na instalação da MVC, visto que será atingido por elevações de tensão não suportáveis e ou afundamentos mais severos que os limites impostos pela ITIC.

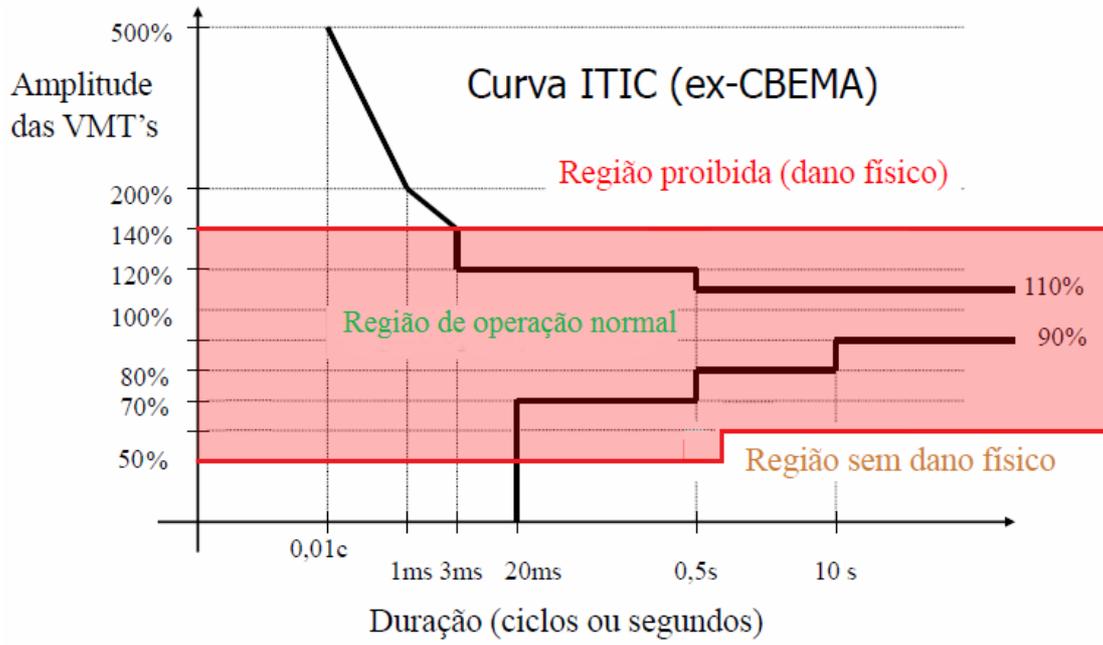


Figura 33: Curva característica MVC comparada a ITIC

CAPÍTULO 4: SENSIBILIDADE DE EQUIPAMENTOS INDUSTRIAIS

Neste capítulo é apresentado a sensibilidade dos equipamentos a VTCD e os ensaios laboratoriais com as respectivas curvas de sensibilidade para contatores eletromecânicos, fontes para CLP e eletroválvulas. É também apresentada uma avaliação da sensibilidade dos equipamentos nas instalações da MVC através da curva característica MVC.

4.1. Sensibilidade dos Equipamentos

A sensibilidade de equipamentos a VTCD pode ser definido como a capacidade do equipamento para sentir e reagir às variações de tensão.

O impacto da VTCD sobre os consumidores industriais ocorre de forma diferenciada em função da sensibilidade dos equipamentos eletroeletrônicos instalados, das particularidades inerentes a cada processo industrial (indústrias alimentícia, têxteis, alumínio, plástico, cimento, papel, metalúrgica, siderurgia, química, etc.) e também dos sistemas de controle de processo envolvidos. Logo, pode-se afirmar que a sensibilidade da carga do consumidor é uma combinação da sensibilidade dos equipamentos eletroeletrônicos instalados com a sensibilidade do processo industrial [30].

Normalmente, o efeito dos afundamentos de tensão em consumidores industriais dá-se sob a forma de interrupção parcial ou total de processos produtivos, com os conseqüentes prejuízos associados às paradas de produção, perdas de produtividade, perdas de insumos, reparo e reposição de equipamentos danificados. Os efeitos dos afundamentos de tensão sobre os principais equipamentos eletro-eletrônicos utilizados nas indústrias manifestam-se sob a forma de:

- Perda de programação em microprocessadores;
- Perda de programação de PLC;

- Desatracamento das bobinas de contadores e relés auxiliares, com conseqüentes desligamentos de cargas e equipamentos através da lógica do sistema de controle;
- Desligamento de lâmpadas de descarga, como as de vapor de mercúrio, que levam cerca de alguns minutos para reacenderem;
- Variação de velocidade dos acionamentos CA (motor e carga mecânica), que dependendo do tipo de processo, poderão comprometer a qualidade do produto ou até provocar a parada de produção;
- Variação de torque do motor CA, com as mesmas implicações citadas anteriormente;
- Desligamento de acionamentos devido à atuação de dispositivos de proteção associados, que quando detectam condições de risco, promovem o bloqueio do disparo de tiristores ou até mesmo o desligamento imediato da fonte de alimentação;
- Falhas de comutação em pontes controladas, afetando os disparos dos gatilhos de tiristores;
- Atuação indevida de proteções de subtensão e sobre corrente.

Em consumidores residenciais, os efeitos dos afundamentos de tensão são percebidos pela perda de memória e perda de programação de relógios digitais, fornos de microondas, videocassetes, desligamento de microcomputadores, etc. Normalmente, estes problemas não estão associados a prejuízos financeiros, mas sim à satisfação dos consumidores e à imagem das empresas de energia elétrica.

Foi adicionado nas curvas de sensibilidade dos equipamentos ensaiados a curva característica MVC com o propósito de verificar a possibilidade de o equipamento ser submetido à AMT que incidem normalmente no MVC em mais de 81% das ocorrências, e poder avaliar se o equipamento é vulnerável dentro da instalação.

4.2. Determinação da Sensibilidade de Equipamentos Industriais

As curvas de sensibilidade de equipamentos presentes nas literaturas foram realizadas, em sua grande maioria, nos EUA, e representam a sensibilidade dos equipamentos fabricados naquele país. A fim de conhecer a sensibilidade dos equipamentos fabricados no Brasil, foi utilizada a metodologia proposta por Carvalho.

4.2.1 Objetivo

O objetivo principal dos ensaios é levantar a sensibilidade de alguns equipamentos industriais, submetidos a afundamento de tensão com amplitudes e ângulos pré determinados e através do tratamento estatístico dos dados, determinar suas curvas de sensibilidade. Posteriormente será possível verificar seu comportamento nas instalações da MVC comparando sua curva de sensibilidade com a curva característica MVC, que representa os afundamentos incidentes na instalação.

4.2.2 Etapas

Os ensaios foram realizados no LCCE (Laboratório de Conversão e Controle da Energia) da UFMG, foi utilizando o equipamento PSL (Industrial Power Corruptor)

para gerar os afundamentos de tensão. Os ensaios foram divididos em três etapas, Preparação e montagem, execução e análise, descritas a seguir.

4.2.2.1 Preparação e Montagem

Foram ensaiados os seguintes equipamentos:

- 1) Contator eletromecânico, bobina alimentada em c.a., potência 5 kW;
- 2) Fonte de alimentação eletrônica para rack de CLP, alimentação em c.a., potência 1,1 kW;
- 3) Eletroválvula, bobina alimentada em c.a., potência 2,5W.

Foram ensaiados quatro contadores eletromecânicos, denominados de C1, C2, C3 e C4. Duas fontes de alimentação, denominadas de F1 e F2 e quatro eletroválvulas, denominadas EV1, EV2, EV3 e EV4.

O circuito de testes utilizados nos ensaios está representado de forma simplificado na Figura 34 e consiste em uma fonte geradora de distúrbio, o equipamento a ser testado e um equipamento de registros.

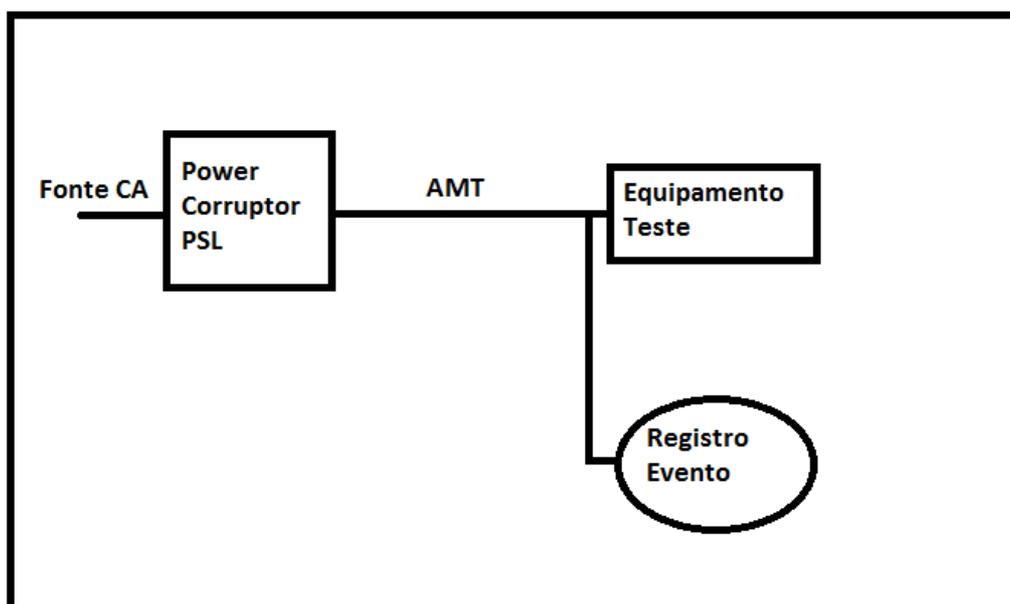


Figura 34: Montagem utilizada nos ensaios dos equipamentos

O equipamento utilizado para gerar os AMT foi o PSL Industrial Power Corruptor, modelo IPC-480V-200A, que atende as normas SEMI F47, CBEMA, ITIC, MIL STD, FAA, SAMSUNG. Capaz de gerar distúrbios em cargas alimentadas de 100 a 480 V, 50 ou 60Hz, monofásica ou trifásica, com corrente de até 200A. Ele possui capacidade para variar a amplitude do AMT ou SWELL entre 0% a 125% da tensão nominal com incrementos de 2,5%, e duração de 0,1 ciclo a 34 segundos com incrementos de 0,1 ciclo. A variação angular pode ser ajustada de 0 a 359 graus com incrementos de 1 grau.

Todos os ajustes, no PSL, são feitos na parte frontal do equipamento através de seletor manual, de simples operação conforme mostrado na Figura 35.

Após a energização do PSL, fazem-se os ajustes de amplitude do afundamento, duração em ciclos, ângulo do AMT e a norma a ser seguida. Em todos os ensaios realizados o PSL foi selecionado para atender as especificações da norma SEMI F47.

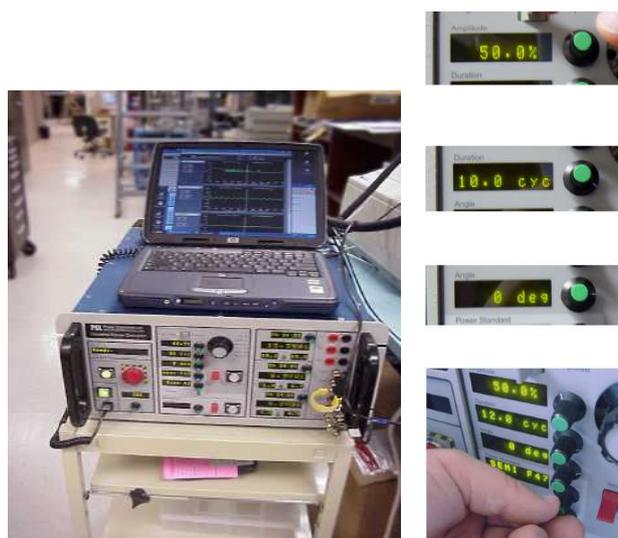


Figura 35: Vista dos ajustes do PSL

Foi definido como critério para determinar a falha no equipamento as seguintes condições.

Para os contadores eletromecânicos, a mudança de estado dos contatos auxiliares NA (normal aberto) durante o AMT seria considerado falha do equipamento. Para registro da falha, foi instalado um ohmímetro analógico Minipa ET1100, entre os contatos e a flexão do ponteiro do ohmímetro indicaria a falha. Este tipo de montagem pode gerar erros de interpretação ou não sensibilizar o ohmímetro o suficiente para flexionar o ponteiro, porém não foi considerado impeditivo para os ensaios.

Para as fontes de alimentação, uma variação na tensão de saída durante o AMT seria considerado falha do equipamento. A carga instalada na saída da fonte durante os ensaios representava 30% de sua capacidade. Para registro da falha, foi instalado um voltímetro analógico Minipa ET100, nos terminais de saída da fonte. As considerações sobre esta montagem são as mesmas da montagem para os contadores.

Para as eletroválvulas, uma mudança física de posição da válvula seria considerado falha. Para registro da falha, foi utilizado a inspeção visual após os AMT.

Todos os ensaios foram realizados no LCCE no período de setembro de 2010 a abril de 2011 e totalizaram 61.210 registros.

4.2.2.2 Execução

A tensão nominal de referência utilizada nos ensaios foi 220V bifásica. Após os ensaios, utilizou-se a ficha de registros, mostrada na Tabela 10.

Tabela 10: Ficha de registros dos resultados

Duração:		(Ciclos)	0 graus														
Ensaio	Amplitude do Afundamento de Tensão (% Vn)																
Num.	90	85	80	75	70	65	60	55	50	45	40	35	30	25	20	15	10
1																	
2																	
3																	
4																	
5																	
6																	
7																	
8																	
9																	
10																	

No campo superior da ficha de registros é indicada a duração em número de ciclos e o ângulo de início do AMT. Abaixo são indicados os valores de amplitude dos AMT que foram entre 10 e 90% da tensão nominal com incrementos de 5%. Os ensaios foram repetidos em 10 vezes para cada amplitude de AMT conforme campo a esquerda da ficha de registros.

Após os ensaios a ficha de registro foi preenchida com os algarismos “1” ou “0” para os seguintes resultados.

- Numeral “1” (um) quando o equipamento falhava;
- Numeral “0” (zero) quando o equipamento não falhava.

Foi definido o uso de três cores para identificação das faixas de resultados na ficha de registro. As colunas verdes representam as amplitudes dos AMT onde não ocorreram falhas, as colunas em vermelho representam as amplitudes dos AMT onde ocorreram falhas em todos os ensaios e as colunas em amarelo representam as amplitudes dos AMT onde parte dos ensaios ocorreu falha nos equipamentos. Foram consideradas também amarelas as colunas de transição. Uma ficha de registros, exemplo, é mostrada na Figura 36, com as faixas identificadas.

Duração:	1	(Ciclos)	0 graus														
Ensaio	Amplitude do Afundamento de Tensão (% Vn)																
Num.	90	85	80	75	70	65	60	55	50	45	40	35	30	25	20	15	10
1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
3	0	0	0	0	0	0	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1
4	0	0	0	0	0	0	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1
5	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
6	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1
7	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
8	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
9	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
10	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1

Figura 36: Ficha de registro com identificação das faixas por cores

Os ensaios foram realizados continuamente e não foram utilizados intervalos de tempo entre os afundamentos aplicados. Após a realização de todos os ensaios passou-se para a fase de análise dos resultados.

Os ensaios foram feitos com AMT de 1 ciclo, 3 ciclos, 5 ciclos, 10 ciclos, 15 ciclos, 18 ciclos, 20 ciclos, 30 ciclos, 40 ciclos, 60 ciclos, 120 ciclos e 300 ciclos, com ângulos de 0°, 30°, 45°, 90° e 135°.

4.2.2.3 Análise

A análise dos resultados foi dividida em três etapas para melhor compreensão dos resultados e posteriormente determinação das curvas de sensibilidade dos equipamentos.

A primeira etapa consistiu em determinar as faixas (verde, amarelo, vermelho) de cada ensaio nas fichas de registros. A região de transição entre as condições de operação normal e falhas dos equipamentos ficou identificada com a cor amarelo e é a região de interesse. Os resultados desta faixa foram somados e determinou-se o número de ocorrência de falhas por faixa de amplitude do AMT. Através da distribuição probabilística normal, foi determinado o percentual de ocorrências normalizado.

A segunda etapa consistiu em determinar uma equação de reta que melhor representasse as ocorrências normalizadas do tipo:

$$Y = AX + B \quad (4.1)$$

Onde:

Y = % da tensão nominal (Vn)

X = % probabilidade normalizada

A e B = coeficientes a identificar

Para determinar a equação da reta foi utilizada uma regressão linear, método dos mínimos quadrados, implementado no software Matlab com as funções polyfit e polyval.

Na terceira etapa, definiu-se a faixa de certeza que foi para este trabalho 90% e 0%. Com o valor % de probabilidade normalizada para 90% (1,29), determina-se o valor de tensão para na qual 90% dos ensaios o equipamento falhou. Da mesma forma, com o valor % de probabilidade normalizada para 0% (-3,10), determina-se o valor de tensão para na qual 0% dos ensaios ocorre falha, isto é, o equipamento não falha. Os valores de tensão determinados para 90% e 0% definem a faixa de sensibilidade do equipamento para aquele AMT.

4.3. Resultados dos Ensaios de Sensibilidade para Contatores Eletromecânicos

As tabelas de resultados foram inseridas em uma rotina do software Matlab onde foram utilizadas as funções Polyfit, Polyval e Plot para a determinação das curvas no formato apresentado na Figura 37.

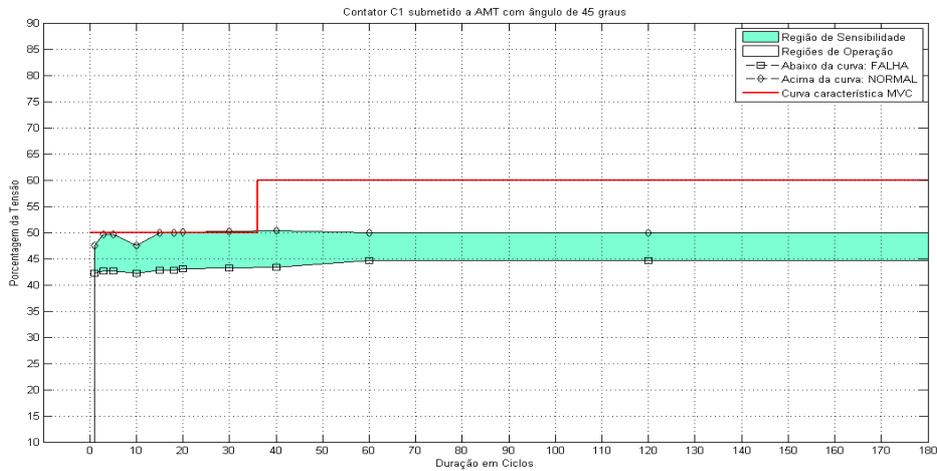


Figura 37: Curva de sensibilidade do contator C1 para AMT com ângulo de 45°.

A área preenchida em verde representa a região de sensibilidade do equipamento, sendo uma área de incerteza em relação ao funcionamento do equipamento. A curva superior representa a curva com 0% de certeza de falha, isto é, valores de AMT acima desta curva não irão sensibilizar o equipamento. A curva inferior que representa 90% de certeza de falha indica que valores de AMT abaixo desta curva irão sensibilizar o equipamento. Acima da curva vermelha, curva característica MVC, indica os valores de AMT incidentes na planta industrial da MVC.

Com as considerações acima, é possível observar que o contator C1 não está vulnerável aos AMT com ângulo de 45° na instalação, por que sua área de sensibilidade está abaixo da curva característica MVC, indicando que sua sensibilidade somente ocorre para AMT mais severos que os incidentes na planta.

4.3.1 Sensibilidade para contadores eletromecânicos

Com o objetivo de identificar o contator eletromecânico mais robusto e conhecer o seu comportamento dentro das instalações da MVC, foram determinadas as curvas de sensibilidade a seguir.

Será analisada a área de sensibilidade e comparado a curva característica MVC para identificar se o equipamento é vulnerável ou não dentro das instalações. Posteriormente serão comparados entre os equipamentos os resultados para determinar o equipamento mais robusto.

Os resultados serão apresentados através de figuras, contendo os ensaios dos quatro contadores eletromecânicos para cada ângulo de início dos AMT. No eixo das ordenadas estão os valores da tensão em porcentagem e no eixo das abscissas a duração do AMT em ciclos.

As curvas de sensibilidade para os quatro contatores eletromecânicos, submetidos à AMT com ângulo de 0 grau, estão mostradas na Figura 38.

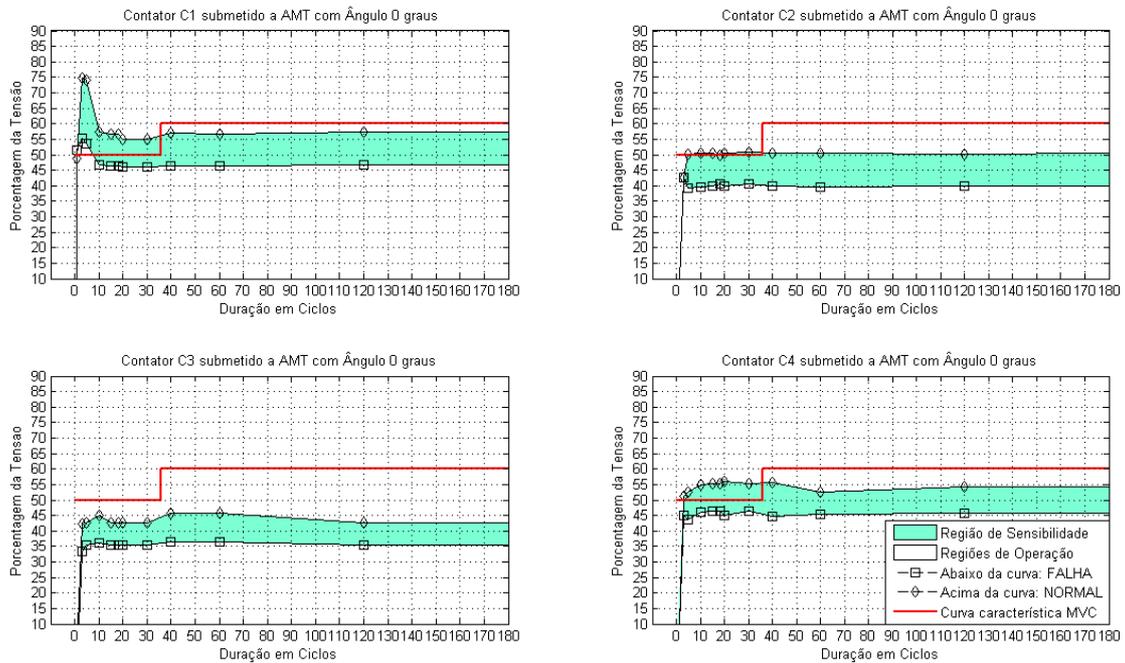


Figura 38: Curva de sensibilidade de contatores para AMT com ângulo de 0°

Os contatores eletromecânicos C1 e C4 apresentam parte de suas curvas de sensibilidade acima da curva característica MVC, indicando que são vulneráveis dentro da instalação da MVC.

O contator eletromecânico C2 apresenta parte de sua curva de sensibilidade no limiar da curva característica MVC, o que não permite afirmar sobre sua imunidade à AMT dentro da instalação.

O contator eletromecânico C3 apresenta toda sua curva de sensibilidade abaixo da curva característica MVC, indicando sua imunidade aos AMT incidentes na instalação em estudo.

Na Figura 39, são apresentadas as curvas de sensibilidade de contatores eletromecânicos quando submetidos à AMT com ângulo de 30 graus.

Os resultados obtidos são muito semelhantes aos encontrados nas curvas de sensibilidade para AMT com 0 grau. Os contatores eletromecânicos C1 e C4 apresentam partes de suas curvas de sensibilidade acima da curva característica MVC, o contator eletromecânico C2 apresenta parte da curva de sensibilidade no limiar da curva característica e o contator eletromecânico C3 apresenta sua curva de sensibilidade abaixo da curva característica MVC, indicando maior robustez em relação aos demais contatores e que não está vulnerável dentro das instalações da MVC para AMT com ângulo de 30 graus.

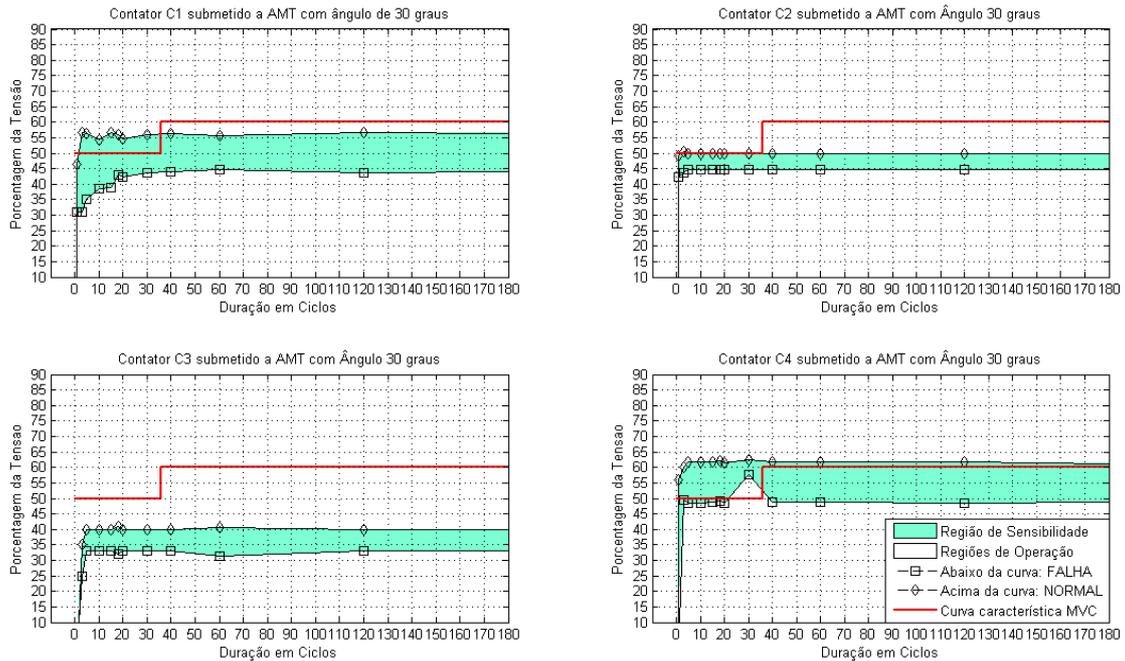


Figura 39: Curva de sensibilidade de contadores para AMT com ângulo de 30°

As curvas de sensibilidade de contadores eletromecânicos submetidos à AMT com ângulo de 45 graus são mostradas na Figura 40.

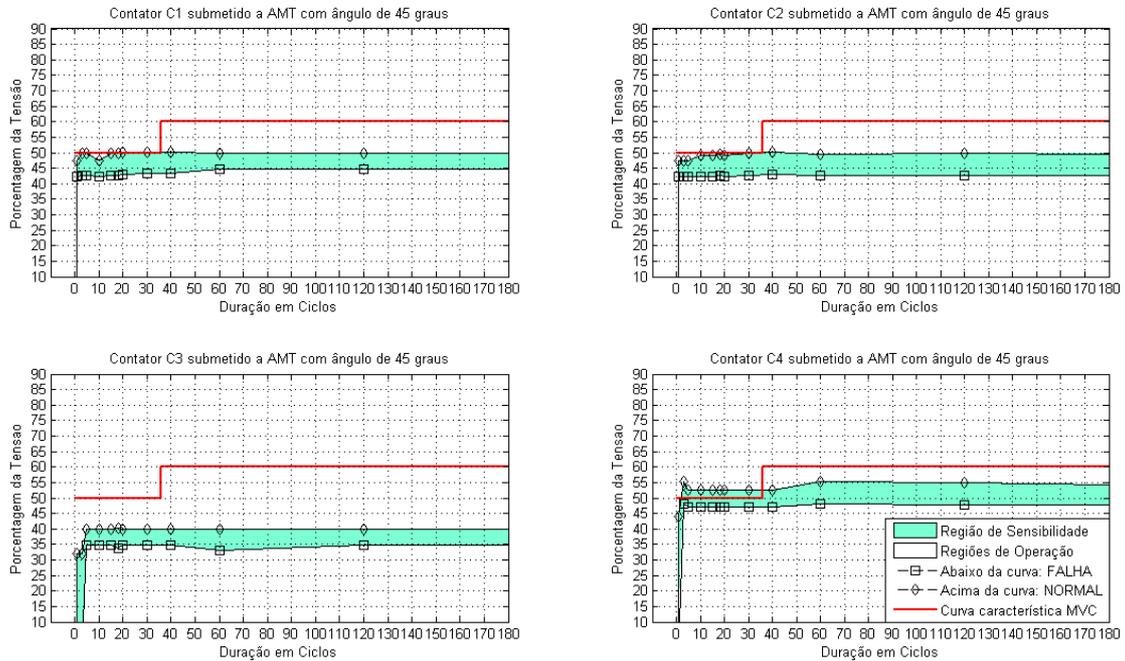


Figura 40: Curva de sensibilidade de contadores para AMT com ângulo de 45°

Uma diminuição na sensibilidade de todos os contadores eletromecânicos foi observada para AMT com ângulo de 45 graus. Porém o contator eletromecânico C4 continuou a apresentar parte de sua curva de sensibilidade acima da curva característica MVC, indicando ser vulnerável aos AMT dentro da instalação.

Os contatores eletromecânicos C1 e C2 apresentaram parte de suas curvas de sensibilidade no limiar na curva característica MVC, assim não podemos afirmar sobre sua vulnerabilidade dentro da instalação.

O contator eletromecânico C3 apresentou sua curva de sensibilidade abaixo da curva característica MVC, sendo o contator eletromecânico mais robusto e imune aos AMT com ângulo de 45 graus incidentes na instalação da MVC.

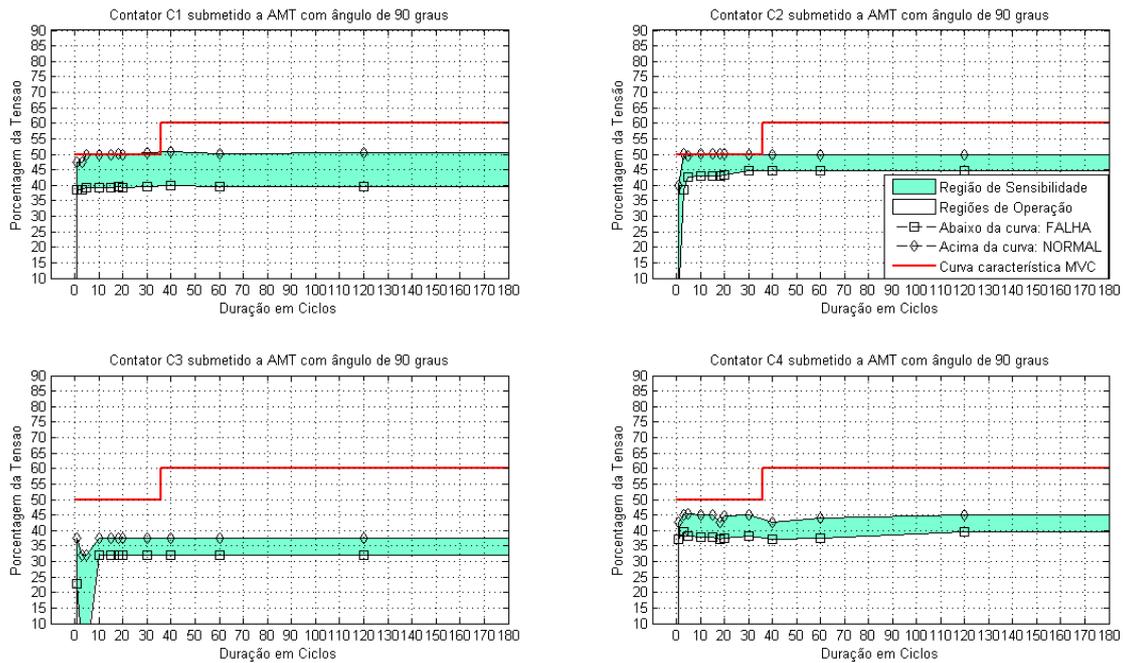


Figura 41: Curva de sensibilidade de contatores para AMT com ângulo de 90°

As curvas de sensibilidade de contatores eletromecânicos para AMT com ângulo de 90 graus são apresentadas na Figura 41.

Um aumento na robustez de todos os contatores é verificado. Os contatores eletromecânicos C1 e C2 possuem parte de suas curvas de sensibilidade no limiar da curva característica MVC, e não pode ser considerados imunes, porém os contatores eletromecânicos C3 e C4 apresentam suas curvas de sensibilidade abaixo da curva característica MVC indicando maior robustez em relação aos outros contatores e sua imunidade aos AMT com ângulo de 45 graus dentro das instalações da MVC.

Os resultados dos ensaios para determinar a curva de sensibilidade de contatores eletromecânicos quando submetidos à AMT com ângulo de 135 graus e mostrado na Figura 42.

A sensibilidade dos contatores eletromecânicos submetidos à AMT com ângulo de 135 graus, possui características semelhantes que os resultados vistos quando são submetidos à AMT com ângulo de 30 graus.

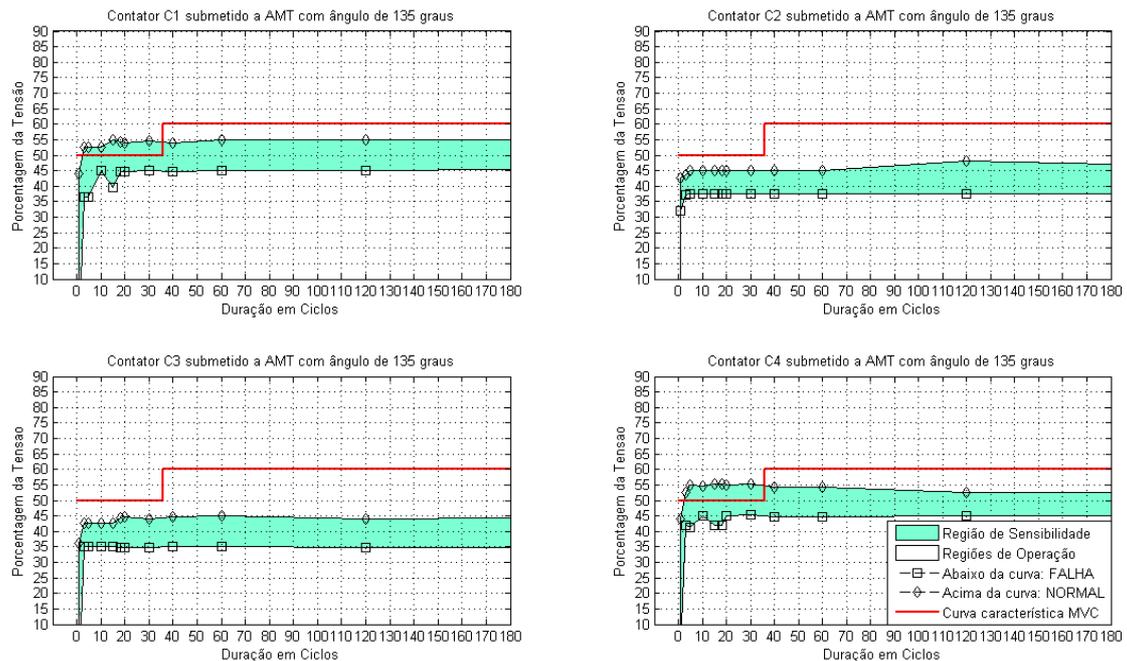


Figura 42: Curva de sensibilidade de contadores para AMT com ângulo de 135°

Apartir dos resultados apresentados nas curvas de sensibilidade dos contadores, foram feitas algumas conclusões:

- 1- Todos os contadores foram mais robustos quando submetidos à AMT com ângulo de 90°;
- 2- O Contator C2 não apresentou variação considerável em sua robustez para os diferentes ângulos de AMT;
- 3- Todos os contadores foram mais sensíveis quando submetidos à AMT com ângulos 0°, 30° e 135°, não registrando diferenças consideráveis entre eles;
- 4- O contator eletromecânico C3 apresentou menor sensibilidade que os demais contadores para todos os tipos de AMT utilizados nos ensaios.
- 5- Somente o contator C3 ficou em todos os ensaios com sua curva de sensibilidade abaixo da curva característica MVC, indicando sua imunidade dentro das instalações da MVC.

Vale ressaltar que 80% dos contadores instalados na MVC são do tipo C3, o que torna as instalações menos vulnerável para estes equipamentos, do que seria se usando contadores do tipo C1 e C4 respectivamente. O contator C2 é a segunda melhor opção para a MVC considerando seus resultados e as características dos AMT na instalação.

Todas as curvas determinadas nos ensaios estão registradas no Apêndice II, deste trabalho.

A variação de sensibilidade para os contadores eletromecânicos identificada nos ensaios é concordante com as bibliografias consultadas, que mostram grande variação entre os fabricantes conforme a Figura 26, além de uma maior robustez dos contadores para AMT com ângulo de 90° [31].

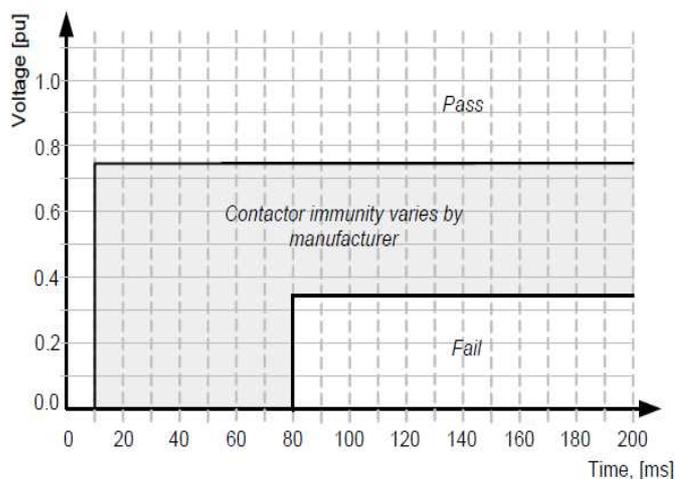


Figura 43: Curva de tolerância para contadores

4.4 Resultados dos Ensaios de Sensibilidade para Fonte de Alimentação CLP

Foi utilizada a mesma metodologia de ensaios para determinação das curvas de sensibilidade para as duas de fonte de alimentação para CLP, aqui denominadas F1 e F2.

Durante os ensaios foi utilizado carga de 30% da capacidade nominal das fontes.

A fonte F1 é usada nas instalações do MVC, na alimentação dos racks do CLP, com alimentação bifásica Vac 220V e saída Vdc 5V, potência de 75VA.

A fonte F1 foi submetida a afundamentos de 0.10 pu com duração de 3s e não apresentou nenhuma variação na tensão de saída. Foram repetidos os ensaios para 0°, 30°, 45°, 90° e 135° suportando uma interrupção temporária de tensão de 7s.

A fonte F2 também não apresentou falhas quando submetido à AMT, suportando interrupção temporária de tensão de 4s.

Para a condição de carregamento em 30% das fontes, podemos afirmar que as fontes do tipo F1 e F2 instaladas na MVC não são vulneráveis aos AMT.

4.5 Resultados dos Ensaios de Sensibilidade para Eletroválvulas

Para determinação das curvas de sensibilidade para as eletroválvulas, foram utilizados os mesmos métodos de ensaios, em quatro tipos de eletroválvulas EV1, EV2, EV3 e EV4 instaladas no sistema pneumático de automação da MVC.

As eletroválvulas são responsáveis pelo posicionamento das válvulas de desvio e gavetas do sistema de automação, que direcionam o fluxo de produção para seus destinos finais.

4.5.1 Sensibilidade para Eletroválvulas

Com o objetivo de avaliar as eletroválvulas quanto à robustez e conhecer o comportamento delas quando submetidos à AMT com ângulos de incidência de 0°, foi determinada as curvas a seguir mostrada na Figura 44.

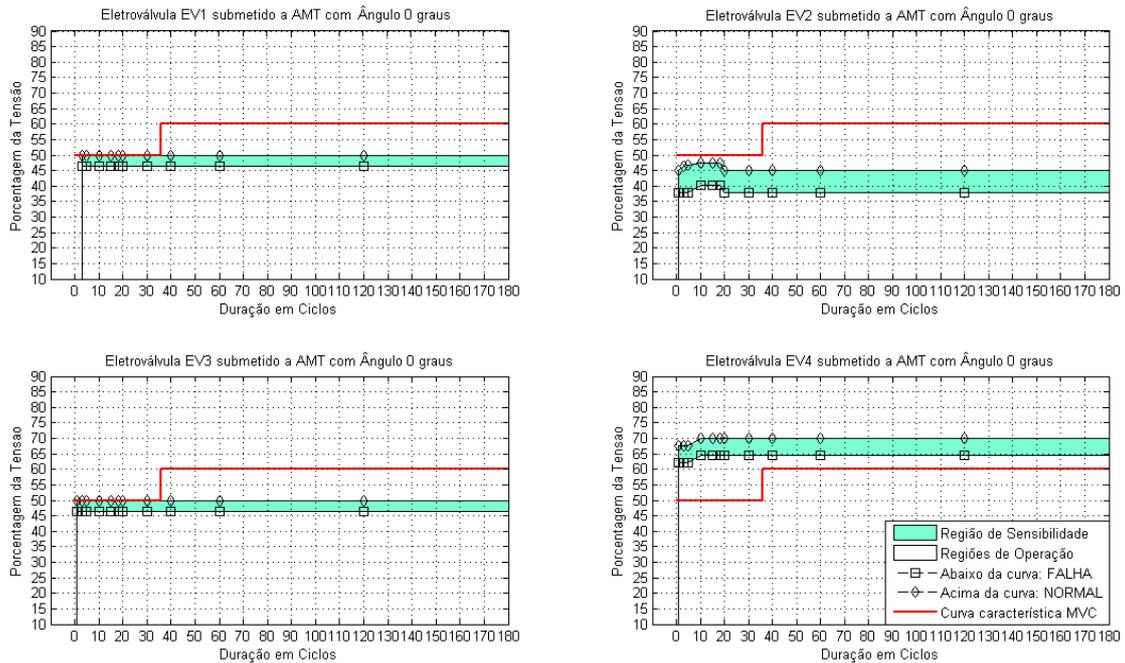


Figura 44: Curva de sensibilidade de eletroválvulas para AMT com ângulo de 0°

As Eletroválvulas EV1, e EV3 possuem parte de suas curvas de sensibilidade no limite da curva característica MVC, o que pode indicar vulnerabilidade dentro das instalações da MVC. A eletroválvula EV2, apresentou mais robustez, permanecendo com sua curva de sensibilidade abaixo da curva característica MVC. A eletroválvula EV4, ficou com sua curva de sensibilidade totalmente acima da curva característica MVC indicando que está vulnerável a todos os tipos de AMT dentro da instalação.

A Figura 45 mostra os resultados de sensibilidade para eletroválvulas quando submetidas à AMT com ângulo inicial de 30 graus.

O comportamento das eletroválvulas em relação à sensibilidade, não teve alterações significativas, com uma pequena melhora na robustez da eletroválvula EV2.

A eletroválvula EV4 permaneceu com sua curva abaixo da curva característica MVC, indicando sua vulnerabilidade aos AMT incidentes na instalação e um possível problema de qualidade do material utilizado em sua fabricação.

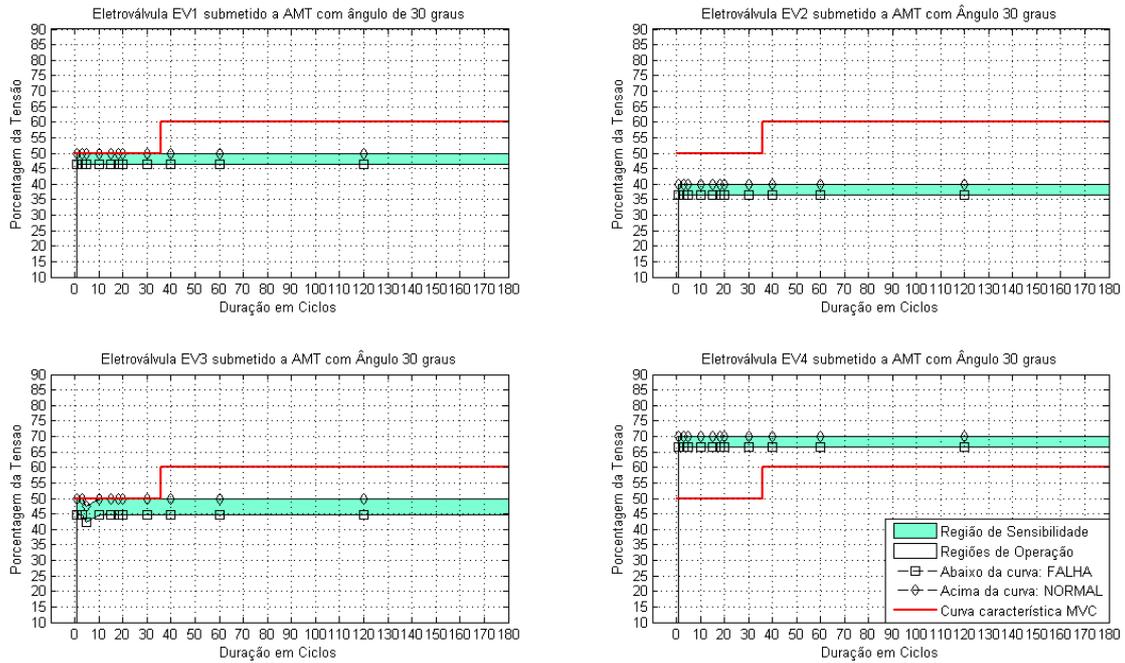


Figura 45: Curva de sensibilidade de eletroválvulas para AMT com ângulo de 30°

Os ensaios foram repetidos para AMT com ângulo de 45 graus e os resultados são apresentados na Figura 46.

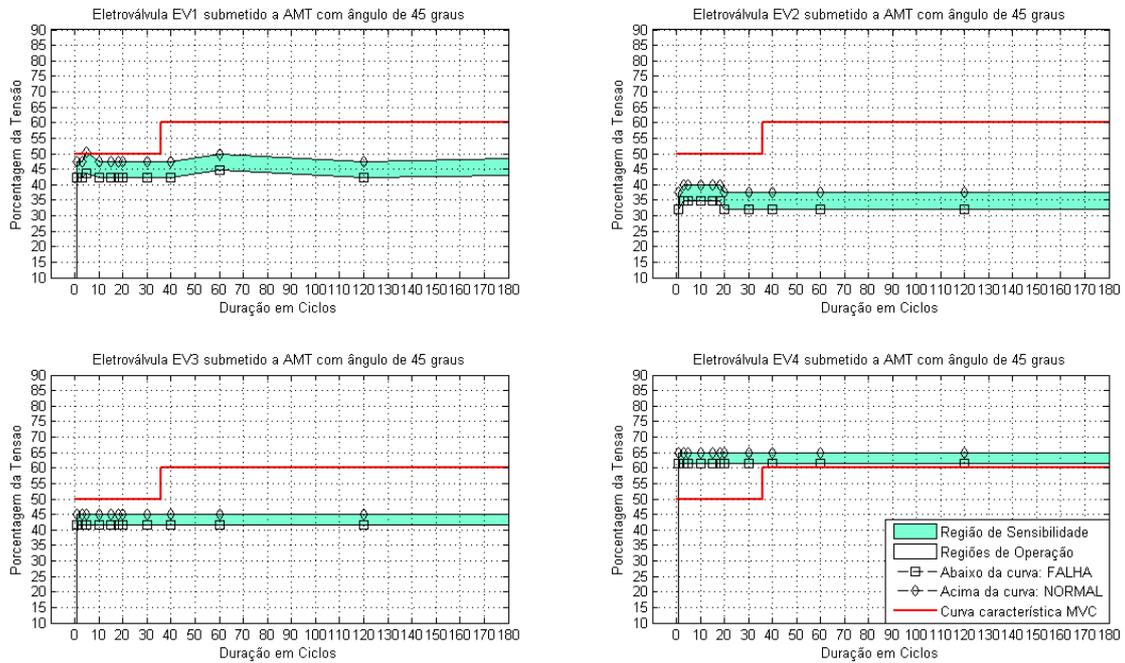


Figura 46: Curva de sensibilidade de eletroválvulas para AMT com ângulo de 45°

Todas as Eletroválvulas apresentaram comportamento mais robusto quando submetidas à AMT com 45°. A eletroválvula EV2 foi mais robusta, e a maior sensibilidade foi registrada na EV4 apesar da ligeira melhora no seu comportamento. A eletroválvula

EV4 ficou com sua curva de sensibilidade acima da curva característica MVC indicando sua possibilidade de falhas dentro das instalações da MVC.

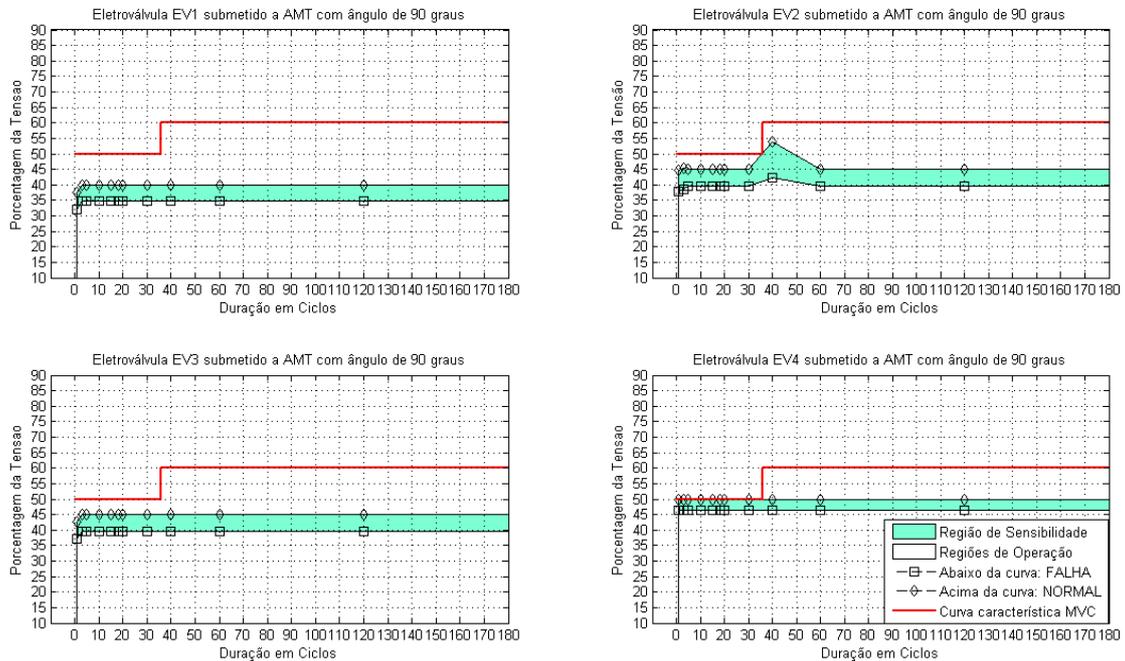


Figura 47: Curva de sensibilidade de eletroválvulas para AMT com ângulo de 90°

A curva de sensibilidade de eletroválvulas para AMT com ângulo de 90 graus é mostrada na Figura 47.

Para AMT com 90°, foi observado comportamento melhor, referente a sensibilidade, para todas as eletroválvulas semelhante aos resultados encontrados para contadores.

Todas eletroválvulas apresentaram suas curvas de sensibilidade abaixo da curva característica MVC e indicam que não são vulneráveis para este tipo de AMT dentro das instalações.

Os ensaios foram repetidos para AMT com ângulo de 135 graus e apresentado seus resultados na Figura 48.

O comportamento das eletroválvulas quando a sensibilidade ficou semelhante aos resultados encontrados nos ensaios de AMT com ângulos de 30 graus.

Mais uma vez foi verificada uma maior sensibilidade para a eletroválvula EV4 que pode indicar um problema de qualidade e uma maior robustez para a eletroválvula EV2.

Apartir dos resultados verificados nos ensaios, algumas conclusões sobre a sensibilidade das eletroválvulas quando submetidas à AMT foram feitas:

- 1- Todas as eletroválvulas foram mais robustas quando submetidas à AMT com ângulo de 90°, similar aos resultados encontrados para os contadores eletromecânicos;

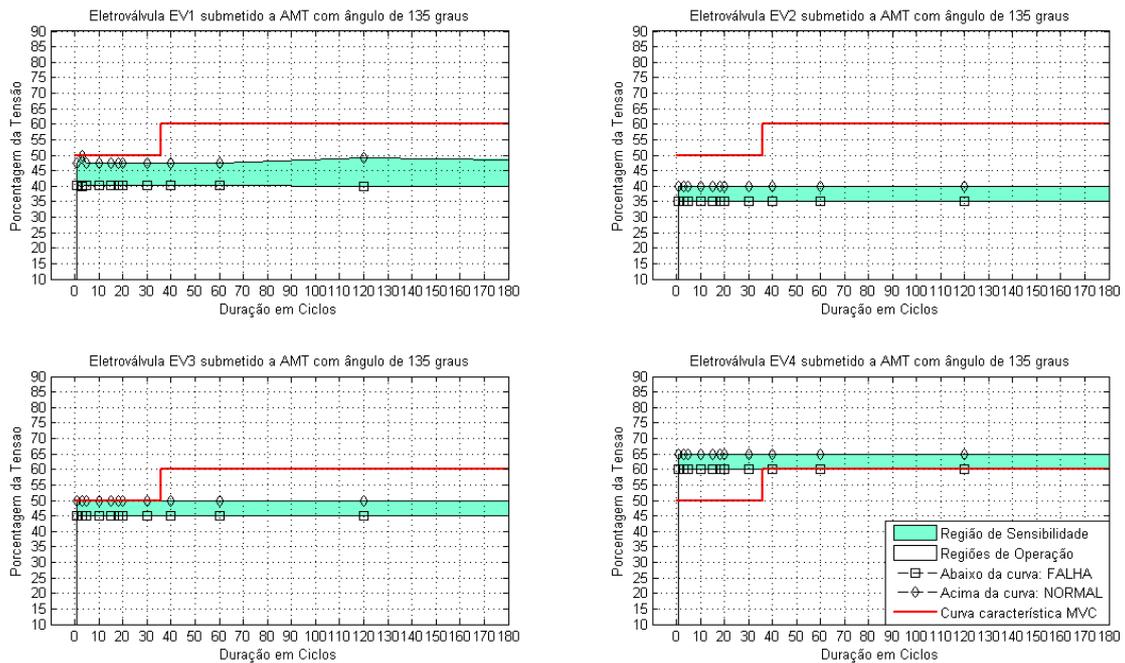


Figura 48: Curva de sensibilidade de eletroválvulas para AMT com ângulo de 135°

2- A eletroválvula EV2 apresentou maior robustez e indicou imunidade aos AMT incidentes nas instalações da MVC;

As eletroválvulas utilizadas nas instalações da MVC do tipo EV1 representam 80% do total de eletroválvulas instaladas, seguido por EV2 com 10% e EV4 com 10%.

Após a identificação de uma maior sensibilidade das eletroválvulas do tipo EV4, foi decidida a substituição por eletroválvulas do tipo EV2 nas instalações da MVC.

Todos os resultados dos ensaios nas eletroválvulas estão registradas no Apêndice III deste trabalho.

CAPÍTULO 5: CONCLUSÃO

Neste trabalho, foi apresentado e implementado as soluções de melhoria da robustez dos equipamentos com a dessensibilização da proteção de subtensão do disjuntor principal, instalação de fontes ininterruptas (no-break) para as cargas mais sensíveis e implementação de temporização nas linhas de comando no programa do CLP.

Foi determinada a curva característica MVC representando mais de 81% dos AMT incidentes no ponto de conexão da indústria durante um período de 4 anos.

Foi determinada as curvas de sensibilidade para contatores eletromecânicos e eletroválvulas e a metodologia utilizada para determinação das curvas mostrou-se prática podendo ser utilizadas para outros equipamentos industriais.

Os resultados obtidos, com redução em 91,4% nos desligamentos causados por VTCD, foram muito satisfatórios, e o método utilizado de comparação entre os eventos antes e após as implementações mostrou-se positivo.

A comparação entre as curvas de sensibilidade dos equipamentos e a curva característica MVC, permitiu conhecer a vulnerabilidade dos equipamentos dentro das instalações industriais.

As propostas de continuidade deste trabalho são:

Determinar a suportabilidade das linhas de produção, apartir da identificação da sensibilidade de seus equipamentos;

Realizar trabalho semelhante em outra planta de moagem, permitindo identificar a sensibilidade de processos de moagem.

Aplicar a metodologia em outras indústrias para validar o método.

Por fim, este trabalho procurou contribuir para o aprofundamento dos estudos de VTCD e seus efeitos em instalações industriais e das técnicas de mitigação com o menor investimento e maior eficácia.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

DUGAN, Roger C. et al. **Electrical Power Systems Quality**. 2. ed. USA: McGraw-Hill, 2002, p. 1-10. [1]

BOLLEN, Math H. J. **Understanding Power Quality Problems: Voltage Sags and Interruptions**. New York: IEEE press, 1960, 543 p. [2]

ABINEE **Associação Brasileira da Indústria Elétrica e Eletrônica**. São Paulo, Disponível em <http://tec.abinee.org.br/arquivos/s1601.pdf>. Acesso em: 29 mai. 2008. [3]

IEEE Recommended Practice for Evaluating Electric Power System Compatibility with Electronic Process Equipment. New York: IEEE press, 1998, p. 1346-1998. [4]

COSTA, J. G. **Avaliação do Impacto Econômico do Afundamento de Tensão na Indústria**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2003. [5]

CARVALHO P. L. **Uma Contribuição ao Estudo da Depressão de Tensão**. 1997. 134 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 1997. [6]

LAMOREE J. et al. **Voltage Sag Analysis Case Studies**. IEEE Transactions on Industry Applications, New York, p. 4-7, jul. 1994. [7]

IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality. New York: IEEE press, p. 1159-1165, ago. 1995. [8]

IEEE Recommended Practice for Evaluating Electric Power System Compatibility with Electronic Process Equipment. New York: IEEE press, 1998, p. 1346-1998. [9]

DJOKIC Sasa Z.; MILANOVIC Jovica V.; KIRSCHEN David S. **Sensitivity of AC Coil Contactors to Voltage Sags, Short Interruptions, and Undervoltage Transients**. IEEE Transaction on Power Delivery, New York, Vol. 19, jul. 2004. [10]

MAIA R. M. **Impacto de Afundamentos de Tensão em uma Indústria Alimentícia**. 2008. 45 p. Monografia (Especialização em Automação Industrial) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2008. [11]

CIGRE Voltage Dip Immunity of Equipment and Installations, Working Group CA.110. Apr. 2010. [12]

ONS Operador Nacional do Sistema Elétrico, **Gerenciamento dos indicadores de desempenho da rede básica e de seus componentes**. Submódulo 2.8, ago. 2009. [13]

ONS Operador Nacional do Sistema Elétrico, **Requisitos técnicos para a conexão a rede básica**. Submódulo 3.6, ago. 2009. [14]

ELETRICIDADE MODERNA. São Paulo: Eurelectric, **Remédio Cabe a Fabricantes e Usuários**. P. 302-307. set. 2003. [15]

IEEE Recommended for Emergency and Stand-by Power Systems for industrial and Comercial Applications. New York: IEEE Orange Book, 1995. [16]

SILVA, S. R. **Variações e Flutuações de Tensão: Sensibilidade de Equipamentos e processos**. Belo Horizonte: UFMG, 2007. 34 p. Apostila. [17]

FONSECA, V. R. C. **Cálculo Estocástico do Afundamento de Tensão**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 1999. [18]

DUGAN, Roger C. et al. **Electrical Power Systems Quality**. 2. ed. USA: McGraw-Hill, 2002, p. 48-49. [19]

CCK AUTOMAÇÃO. **Manual de Instalação e Operação do Programa SW CCK4100/P/T**. São Paulo, 2008. Manual. [20]

SILVA, S. R. **Variações e Flutuações de Tensão: Caracterização das VTCD's**. Belo Horizonte: UFMG, 2007, p. 11-16. Apostila. [21]

DUGAN, Roger C. et al. **Electrical Power Systems Quality**. 2. ed. USA: McGraw-Hill, 2002, p. 14. [22]

IEC 61000 **Eletromagnetic compability**. Available for buying at www.techstreet.com. [23]

SEMI F47-0200 Specification for semiconductor processing equipment voltage sag immunity. Available at www.powerstandards.com. [24]

SEMI F42-0999 Test method for semiconductor processing equipment voltage sag immunity. Available at www.powerstandards.com. [25]

ONS Operador Nacional do Sistema Elétrico, **Gerenciamento dos indicadores de desempenho da rede básica e de seus componentes**. Submódulo 2.8, ago. 2009. [26]

MOINHOS VERA CRUZ Home Page. Santa Luzia. Disponível em <http://www.moinhosveracruz.com.br>, Acesso em: Belo Horizonte, 26 fev. 2008. [27]

MERLIN GERIN **Disjuntores e Interruptores a seco BT de forte intensidade: Masterpact Merlin Gerin 800 a 6300 A**, jun. 1998. 38 p. Catálogo. [28]

ENGETRON Home Page. Contagem. Disponível em <http://www.engetron.com.br>, Acesso em: Belo Horizonte, 20 mar. 2008. [29]

LEBORGNE R. C. **Uma Contribuição à Caracterização da Sensibilidade de Processos Industriais Frente a Afundamentos de tensão**. 2003. 163 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2003. [30]

FILHO F.F.C. **Algoritmos Numéricos**. Belo Horizonte: LTC, 2001. p. 149-151. [31]

APÊNDICE I

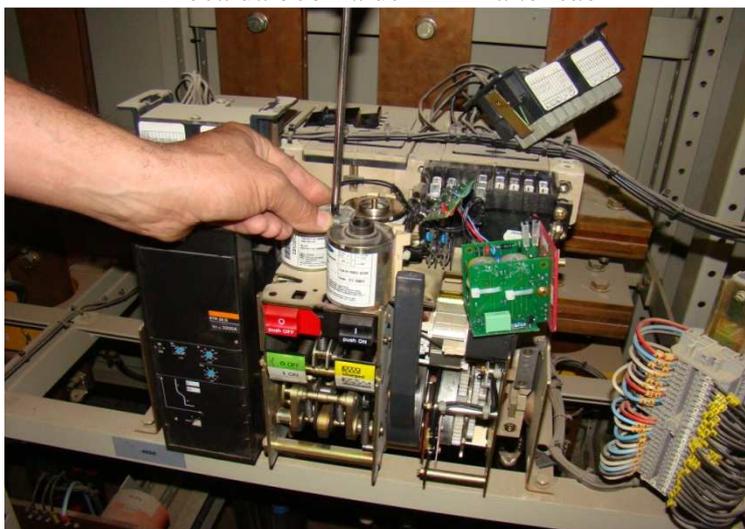
Monitor de Tensão



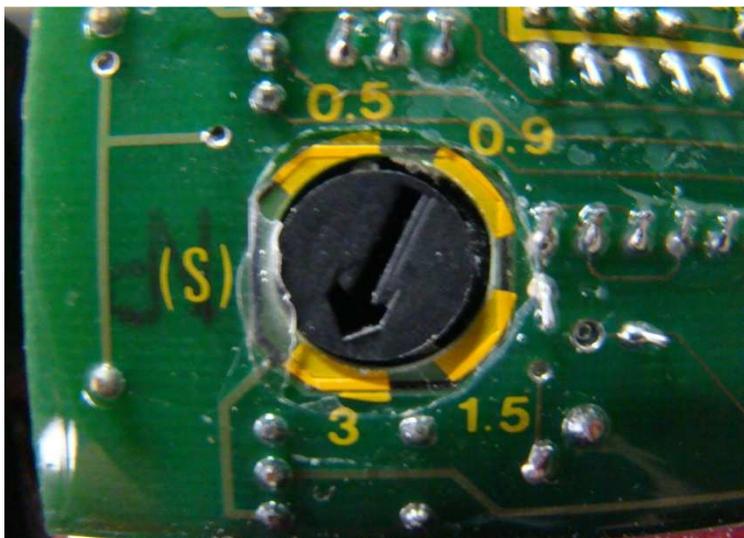
Disjuntor a seco BT de forte intensidade Masterpact



Troca da bobina de mínima tensão

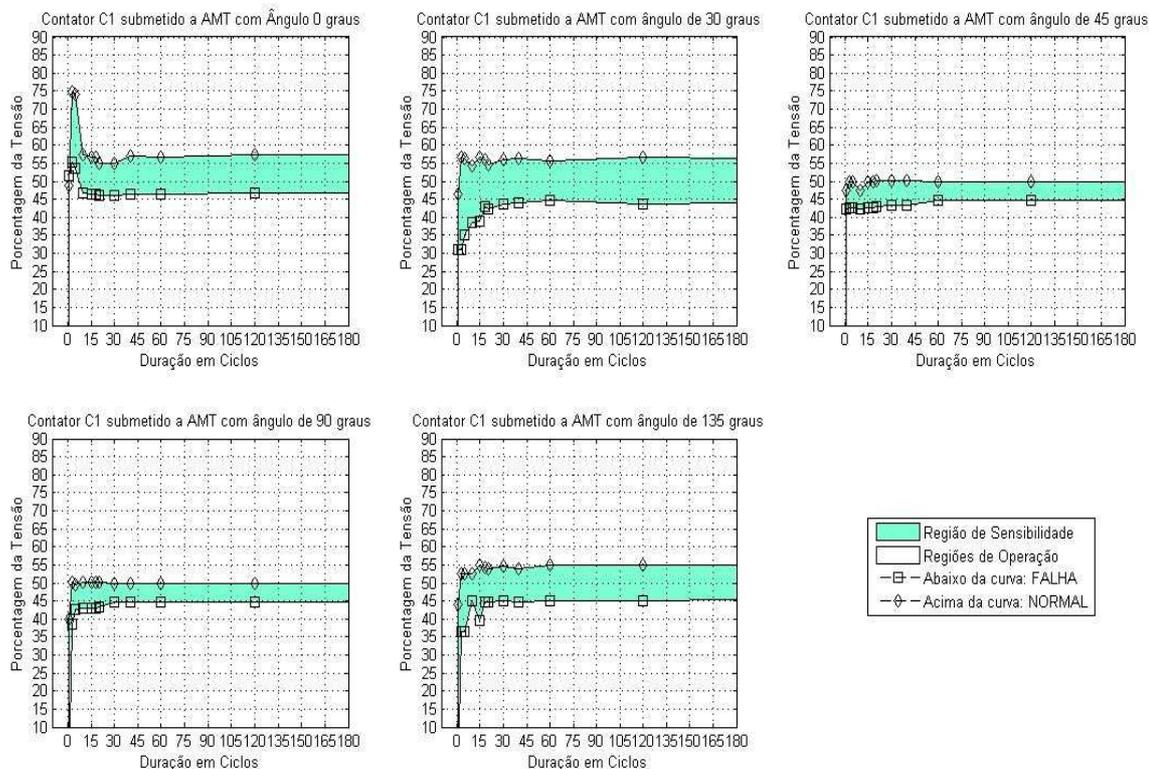


Ajuste de tempo da bobina de mínima tensão

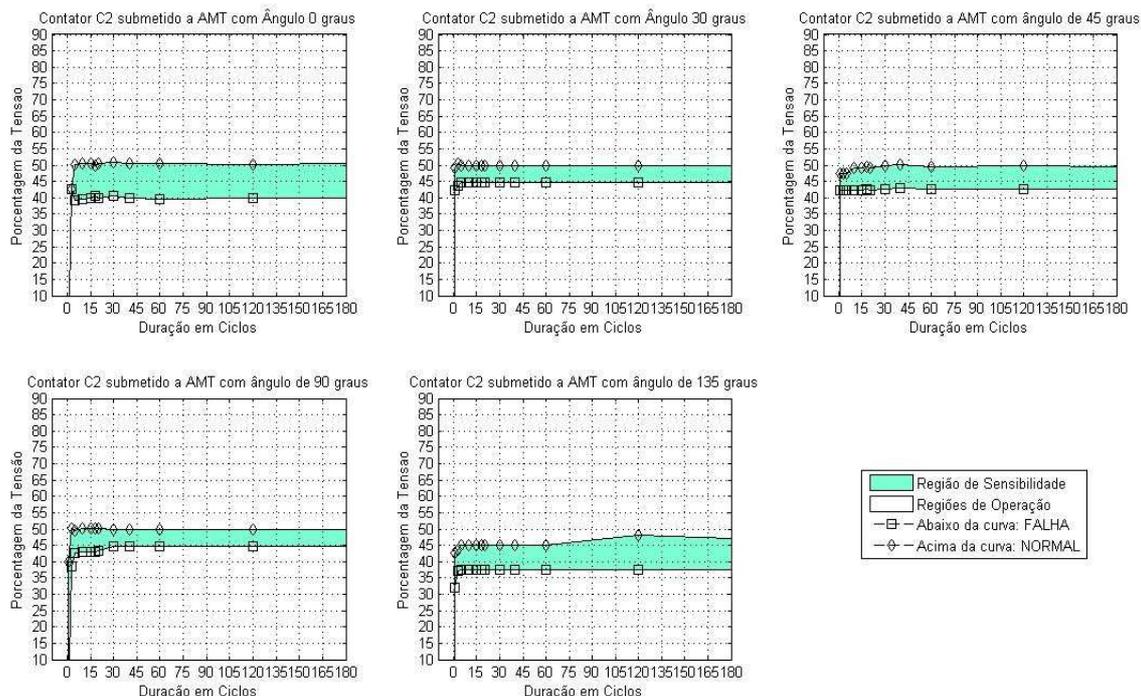


APÊNDICE II

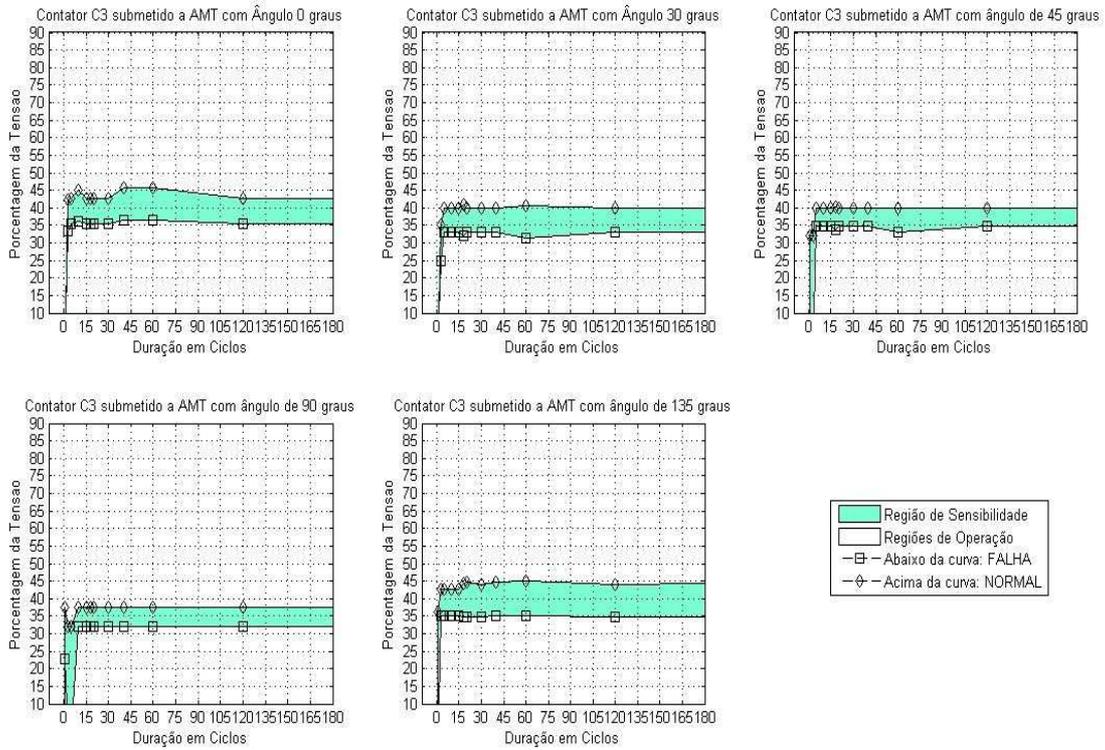
Curvas de Sensibilidade Contator C1



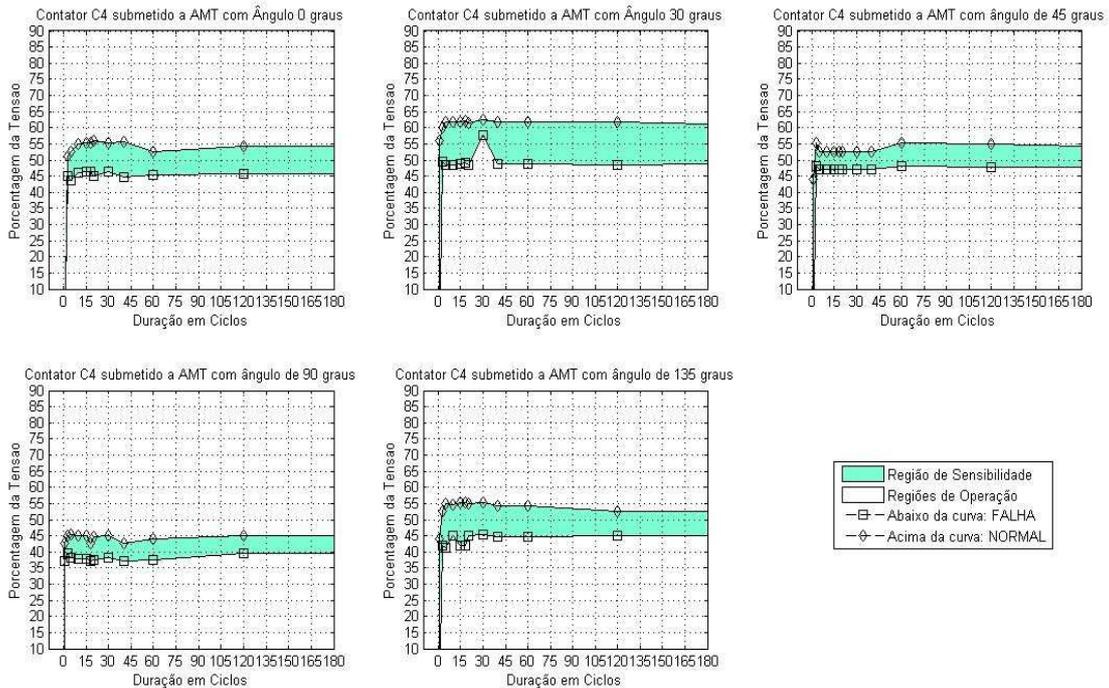
Curvas de Sensibilidade Contator C2



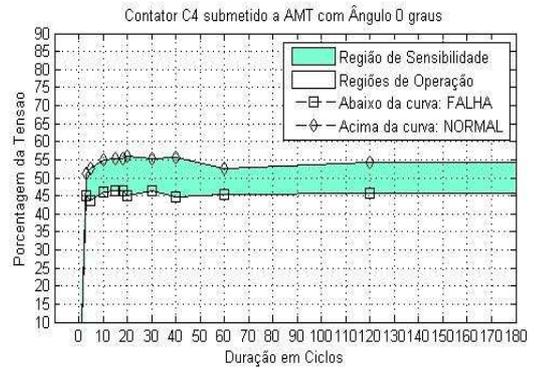
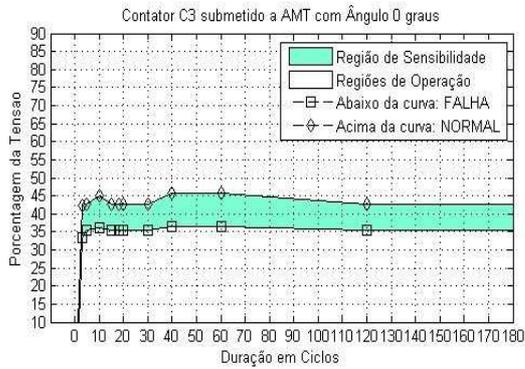
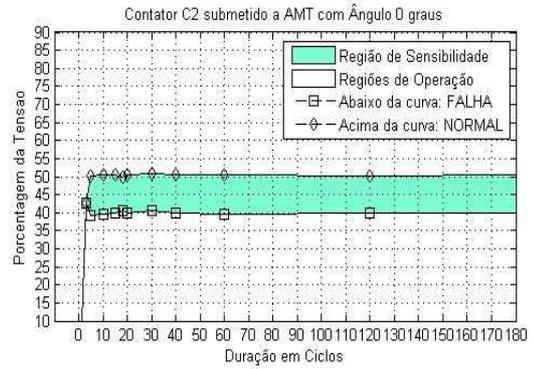
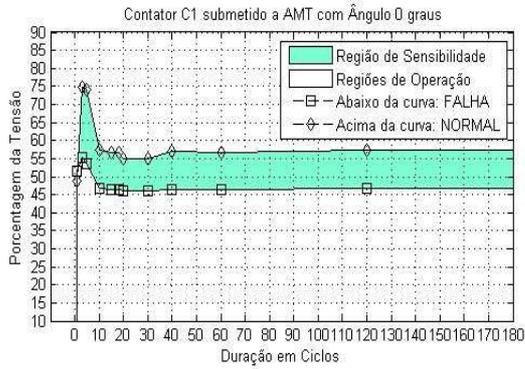
Curvas de Sensibilidade Contator C3



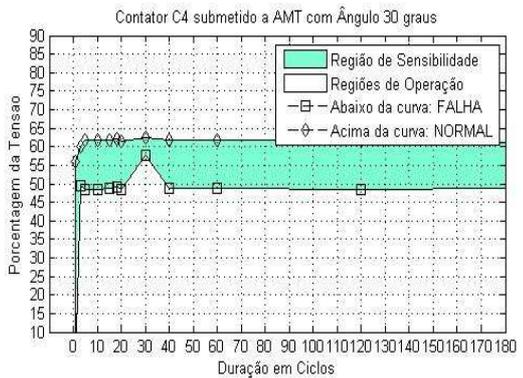
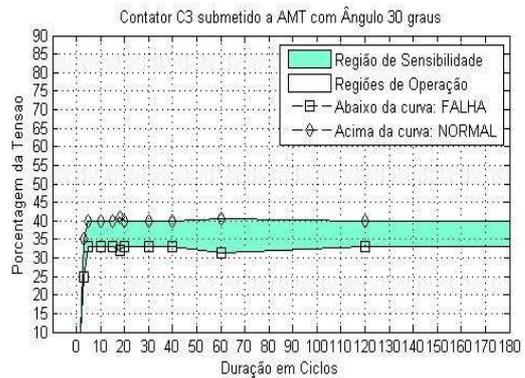
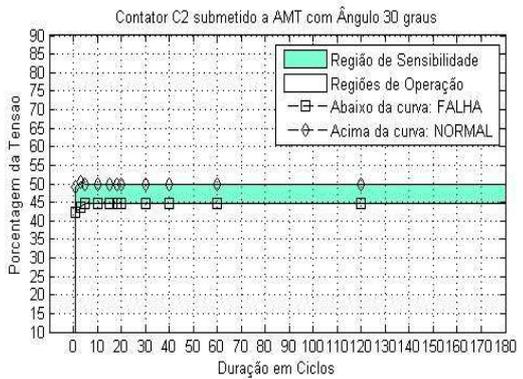
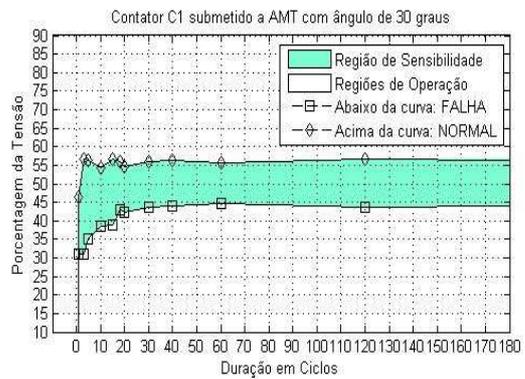
Curvas de Sensibilidade Contator C4



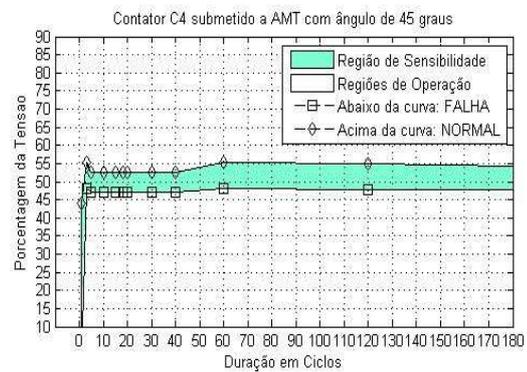
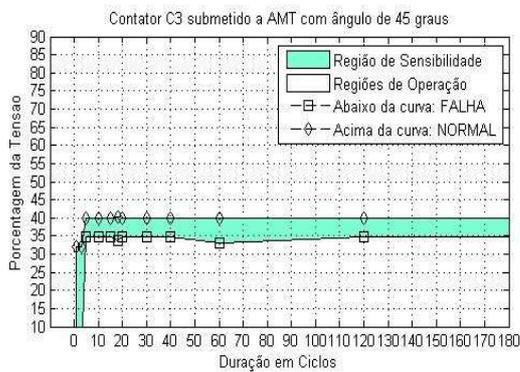
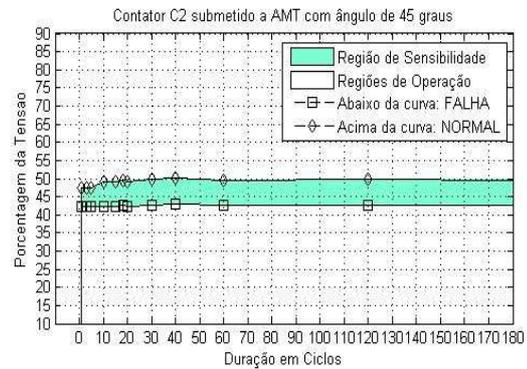
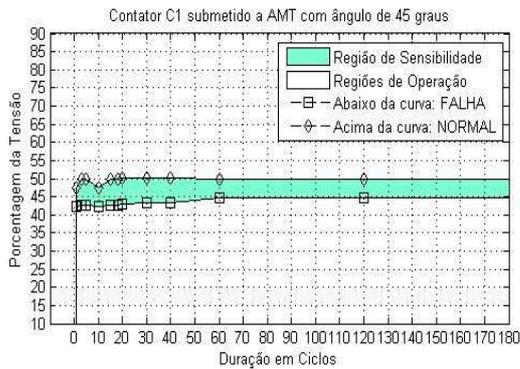
Curvas de Sensibilidade para AMT com ângulo de 0°



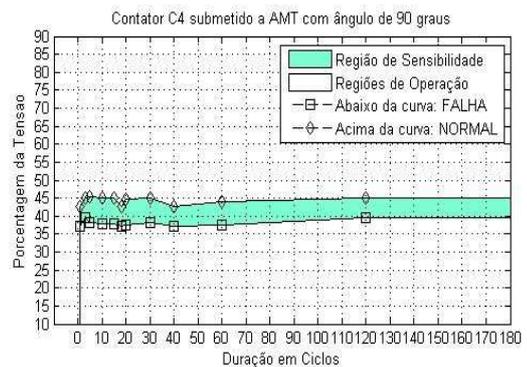
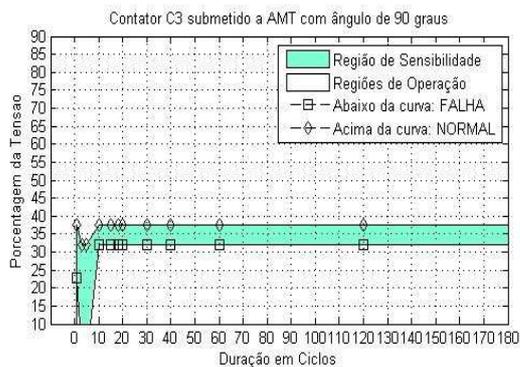
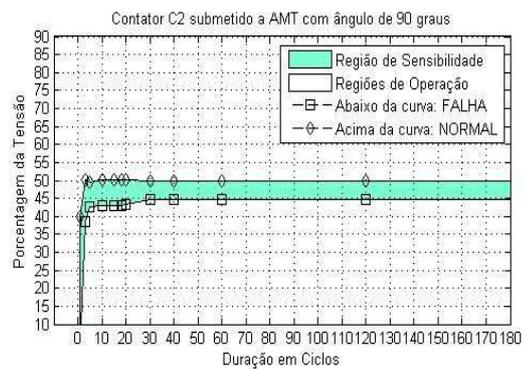
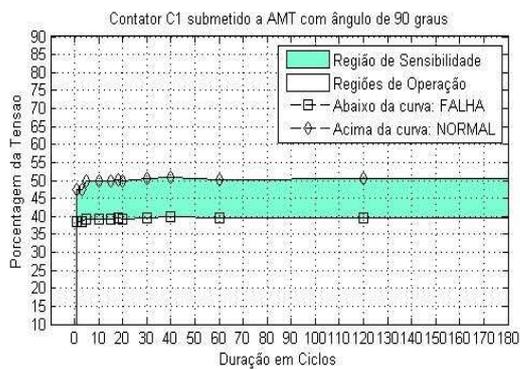
Curvas de Sensibilidade para AMT com ângulo de 30°



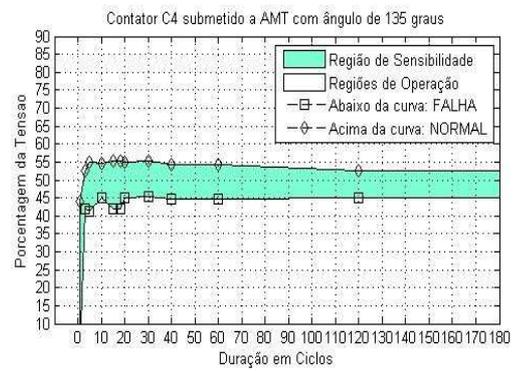
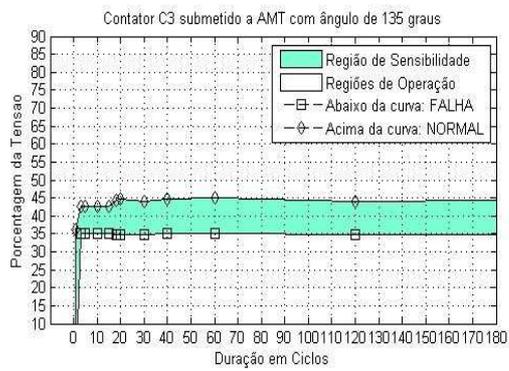
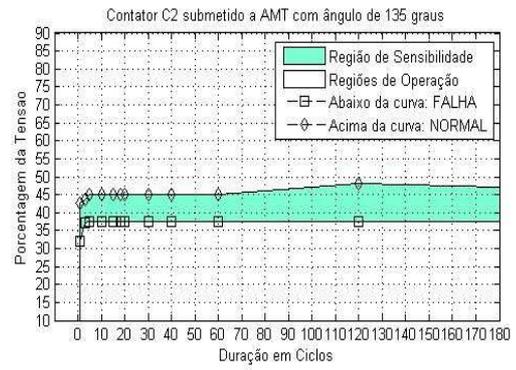
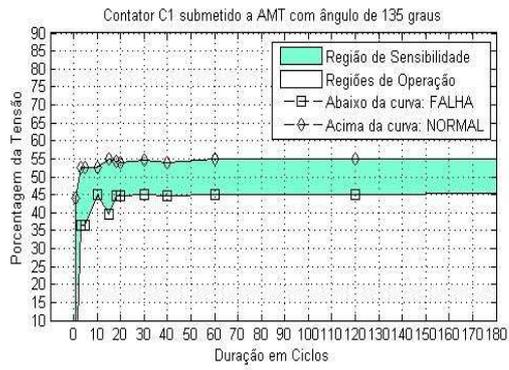
Curvas de Sensibilidade para AMT com ângulo de 45°



Curvas de Sensibilidade para AMT com ângulo de 90°

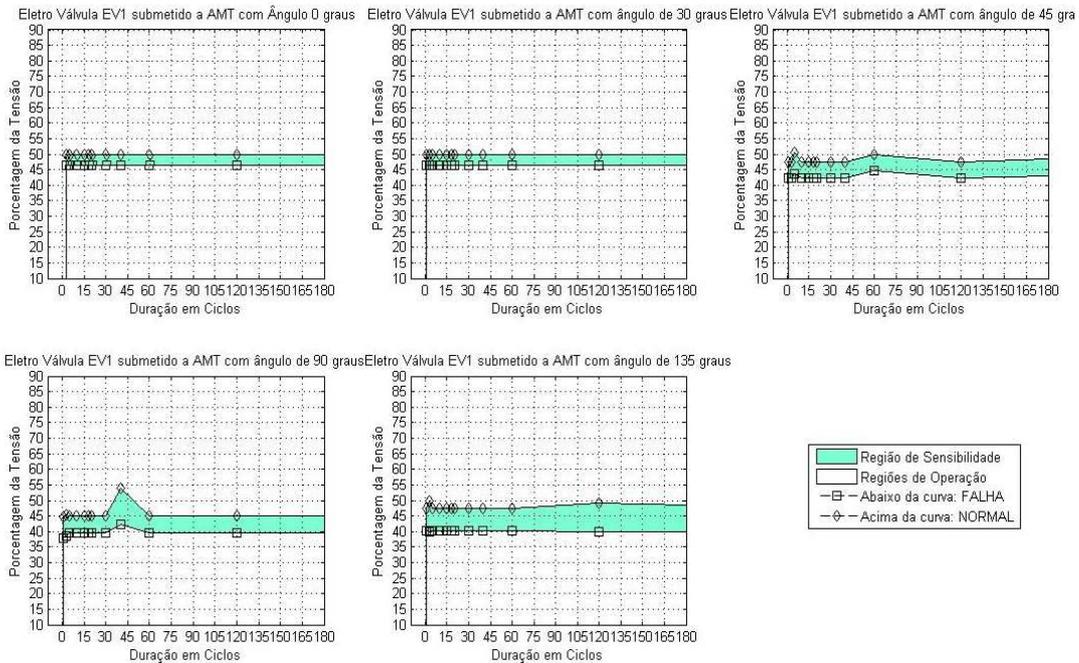


Curvas de Sensibilidade para AMT com ângulo de 135°

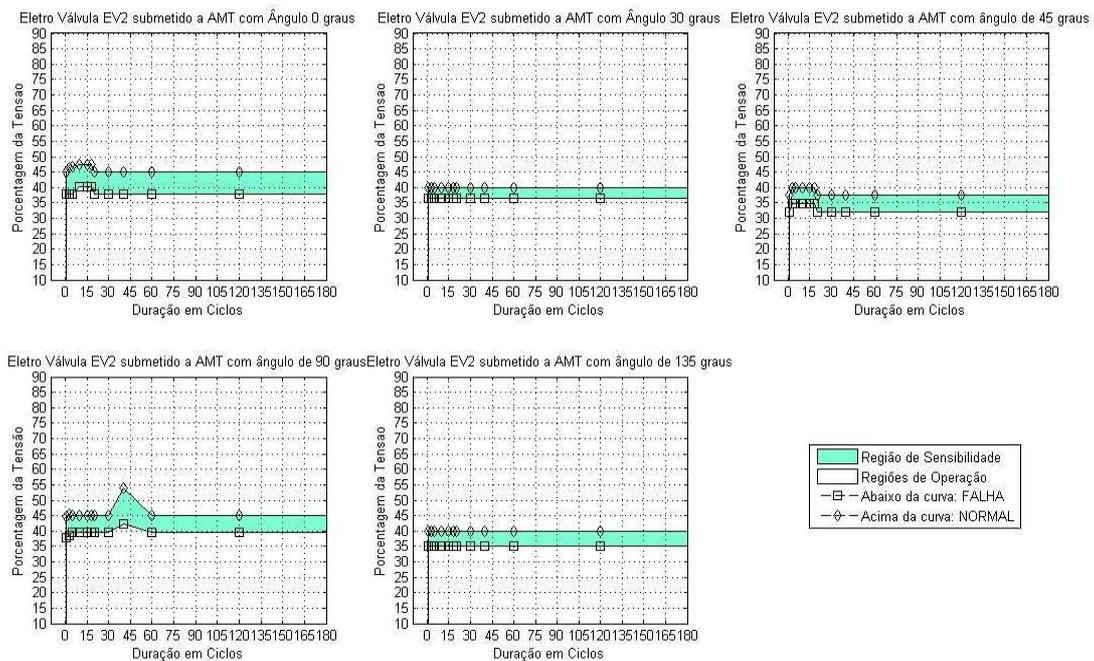


APÊNDICE III

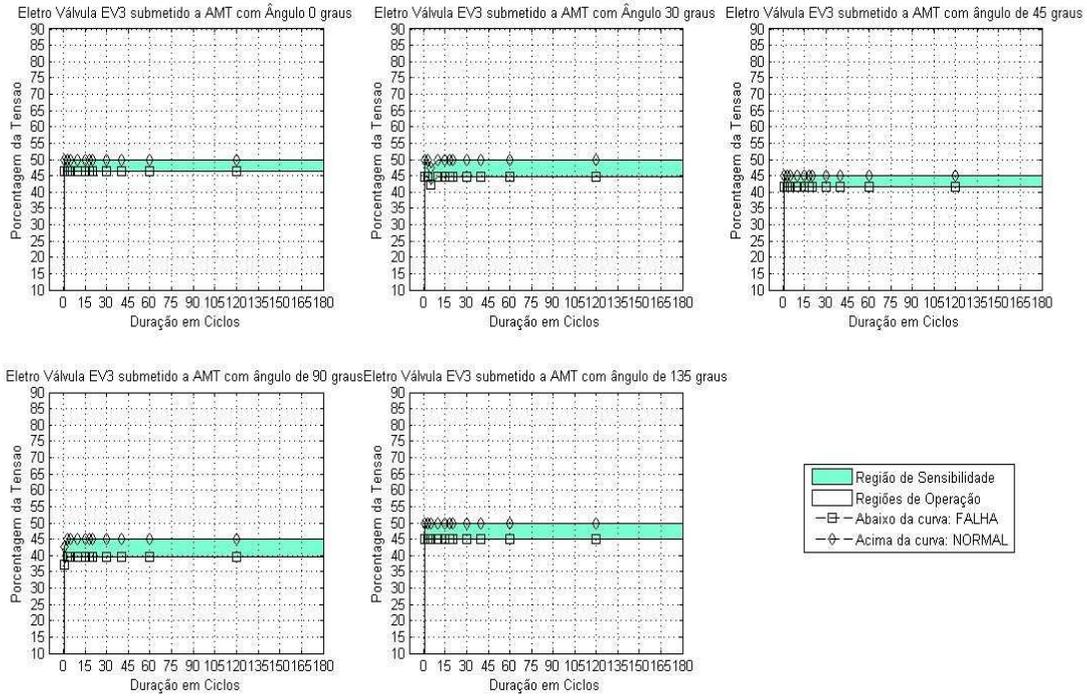
Curvas de Sensibilidade Eletroválvula EV1



Curvas de Sensibilidade Eletroválvula EV2



Curvas de Sensibilidade Eletroválvula EV3



Curvas de Sensibilidade Eletroválvula EV4

