

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA ELÉTRICA**

**Custos de Paradas de Processos Industriais
Devido a Afundamentos Momentâneos de
Tensão**

Édison Massao Motoki

Itajubá, 25 de julho de 2022

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA ELÉTRICA**

Édison Massao Motoki

**Custos de Paradas de Processos Industriais
Devido a Afundamentos Momentâneos de
Tensão**

Tese submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica como parte dos requisitos para obtenção do Título de **Doutor em Ciências em Engenharia Elétrica**.

Área de Concentração: Sistemas Elétricos de Potência

Orientador: Prof. Dr. José Maria de Carvalho Filho - UNIFEI

Orientador: Prof. Dr. Paulo Márcio da Silveira - UNIFEI

Itajubá, 25 de julho de 2022

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho de doutorado à esposa Emília e às filhas Carolina, Luciana, Marina e aos meus netos Felipe e Clara.

In Memoriam, aos meus queridos pais, Saburo e Zulmira que sempre se esforçaram para que eu pudesse estudar e ter uma profissão, a de engenheiro e agora de professor e consultor.

“Nossa maior fraqueza está em desistir. O caminho mais certo de vencer é tentar mais uma vez... Muitas das falhas da vida acontecem quando as pessoas não percebem o quanto perto estão quando desistem”

(Thomaz Alva Edison)

AGRADECIMENTOS

Agradeço imensamente ao corpo docente desta universidade, com quem tive ótimos relacionamentos de aprendizado como aluno e de convivência como professor.

À EDP – Energias de Portugal e ao QMAP pelos incentivos financeiros e de local de trabalho, para poder desenvolver a pesquisa deste trabalho que é importante para a minha vida profissional,

Aos Engenheiros Natanael Barbosa e Jules Carneiro, pelo apoio na escolha das empresas, para a pesquisa em São Paulo e cidades do Espírito Santo.

Ao Instituto Presbiteriano Mackenzie que em determinados momentos da pesquisa puderam me apoiar, para que fosse possível a continuidade da pesquisa.

Ao Professor Dr. Paulo Grillo que me apoiou imensamente orientando-me nas ferramentas estatísticas que precisei utilizar neste trabalho de doutorado. Da mesma forma ao Mestre Marcos Vinicius da Costa que me apoiou no desenvolvimento dos conceitos estatísticos.

Em especial agradecimento aos orientadores Professores. Dr. José Maria de Carvalho Filho e Dr. Paulo Marcio da Silveira, que me orientaram com sabedoria, durante o período árduo de desenvolvimento do doutorado.

Ao meu irmão Carlos que nos apoiou para o acontecimento deste projeto.

Enfim, a todos que diretamente ou indiretamente me apoiaram para que se tornasse em realidade este trabalho de pesquisa.

A Deus por me dar forças em momentos difíceis desta fase da minha vida pessoal e profissional.

RESUMO

Com o advento da tecnologia eletroeletrônica, as indústrias têm investido em sistemas e em equipamentos visando o aumento de produtividade e da qualidade de seus produtos. Ao mesmo tempo, pesquisadores indicam que, atrelado ao seu uso os equipamentos e sistemas trazem grande sensibilidade em sua operação na qual impacta na continuidade produtiva gerando perdas econômicas significativas às empresas como principalmente às do ramo industrial.

As variações de tensão de curta duração (VTCDs), principalmente quando da ocorrência de afundamentos momentâneos de tensão (AMTs), trazem consequências muito graves para as unidades consumidoras (UCs), sobretudo, para aquelas unidades industriais com cargas sensíveis.

Torna-se, portanto, imprescindível que os estudos sobre custos de interrupção em processos industriais devido às VTCDs comecem a ser priorizados pelas concessionárias de energia elétrica e por pesquisadores, de maneira que os resultados venham a contribuir para a melhoria da imagem e da relação entre concessionária e seus clientes, bem como para a sociedade acadêmica, técnicos e agentes do setor elétrico.

O objetivo deste trabalho é apresentar os resultados de uma metodologia para obter os custos de paradas industriais devido aos AMTs. Trata-se de uma pesquisa direta, através de um questionário junto às UCs, composta por diversas indústrias supridas por redes de média tensão de concessão da EDP – Energias de Portugal.

Inicialmente foram selecionadas 70 indústrias, das quais 60 delas foram escolhidas pela própria EDP. Deste total, 33 aceitaram participar da pesquisa. Elas estão classificadas em 12 tipos diferentes de atividades, permitindo assim uma avaliação de custos por evento e por demanda instalada.

A pesquisa foi fomentada por um projeto de P&D ANEEL pela EDP, abrangendo indústrias da região sudeste (São Paulo e Espírito Santo) e seus resultados são muito coerentes em relação às poucas estimativas que podem ser encontradas na literatura, embora estas estejam relacionadas a desligamentos em maneira geral.

Para coroar o trabalho, os custos encontrados foram utilizados para se ter uma avaliação mais ampla a partir de medições existentes na EDP, considerando desligamentos que aconteceram em 61 barras de subestações nos estados do ES e de SP.

Por fim, cabe comentar que esta pesquisa trouxe uma contribuição técnica relevante para o setor elétrico brasileiro, ajudando a preencher lacunas existentes na literatura nacional quando o assunto tenta ser abordado.

Palavras-Chave: Custos. Parada de processo, Afundamento de tensão, Pesquisa direta.

ABSTRACT

With the advent of electro-electronic technology, the industries have invested in systems and equipment in order to increase productivity and quality of their products. At the same time, researchers indicate that, linked to their use the equipment and systems bring great sensitivity in their operation which impacts on production continuity, generating significant economic losses for companies, especially those in the industrial sector.

Short-term voltage variations, mainly when there are momentary voltage sags bring very serious consequences for consumer units, especially for those industrial units with sensitive loads.

It is, therefore, essential that studies on costs of interruption in industrial processes due to voltage sags begin to be prioritized by electric energy concessionaires and researchers, so that the results start contributing to the improvement of the image and relationship between the concessionaire and its customers, as well as for the academic society, technicians and agents of the electric sector.

The objective of this work is to present the results of a methodology to obtain the costs of industrial stoppages due to momentary voltage sags. This is a direct survey, through a questionnaire with the consumer units, composed of several industries supplied by medium voltage networks granted by EDP – Energias de Portugal.

Initially, 70 industries were selected, of which 60 were chosen by EDP itself. Of this total, 33 agreed to participate in the research. They are classified into 12 different types of activities, thus allowing an assessment of costs per event and per installed demand.

The research was supported by an ANEEL R&D project by EDP, covering industries from the southeast region (São Paulo and Espírito Santo) and its results were very coherent compared to the few estimations that may be found in the literature, although these are related to shutdowns in general.

Crowning the work, the costs found were used in order to have a broader evaluation (annual costs) from existing measurements at EDP, considering shutdowns that happened in 61 substations' busbars in the states of ES and SP.

Finally, it is worth mentioning that this research brought a relevant technical contribution to the Brazilian electricity sector, helping to fill gaps in the national literature when this subject tries to be addressed.

Key words: *Costs. Process shutdown, Voltage sag, Survey.*

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Tensão v_{ab} na entrada do conversor.....	22
Figura 1.2 – Tensão v_{ab} na saída do conversor.	23
Figura 2.1 – VTCDs: (a) afundamento, (b) elevação e (c) interrupção de tensão.	29
Figura 2.2 – Principais parâmetros utilizados na caracterização dos eventos de AMTs.	31
Figura 2.3 – Deslocamento do ângulo de fase durante um afundamento de tensão.....	32
Figura 2.4 – Modelo do divisor de tensão para o estudo de afundamentos de tensão.....	33
Figura 2.5 – Afundamento de tensão com ponto de início em aproximadamente 275°	34
Figura 2.6 – Curva CBEMA.....	36
Figura 2.7 – Curva ITIC.	37
Figura 2.8 – Curva SEMI F47.	37
Figura 2.9 – Topologia típica da fonte de alimentação de um CLP.	39
Figura 2.10 – Tensão da rede ($v(t)$) e tensão na saída do retificador.	39
Figura 2.11 – Curvas de sensibilidade referentes a fonte de um CLP.....	40
Figura 2.12 – Esquema básico de um contator.	41
Figura 2.13 – Curvas de sensibilidade de um contator para diferentes pontos de início.....	42
Figura 2.14 – Curvas de sensibilidades de um computador para diferentes critérios de falha.	44
Figura 2.15 – Topologia simplificada de um conversor de frequência.	45
Figura 2.16 – Curvas de sensibilidade de conversores de frequência: eventos tipo II.	47
Figura 2.17 – Curvas de sensibilidade de conversores de frequência: eventos tipo I.	47
Figura 2.18 – Curvas de sensibilidade de conversores de frequência – torques diferentes: eventos tipo III.....	48
Figura 3.1 – Esquematização do método das posições de falta em um suposto sistema malhado.....	58
Figura 3.2 – Impacto da distância do passo na aplicação de curtos-circuitos.	61
Figura 3.3 – Curva de sensibilidade genérica.	65
Figura 3.4 – Fluxograma de um processo.	65
Figura 3.5 – Sensibilidade equivalente de UC.	66
Figura 3.6 – Curva de sensibilidade de um equipamento.	66
Figura 3.7 – Incerteza envolvida ao avaliar a sensibilidade de um equipamento.	67
Figura 3.8 – Pcurva (T, V) para diferentes distribuições de V_{crit} e T_{crit} : (a) uniforme; (b) normal; (c) exponencial crescente para V_{crit} e decrescente para T_{crit} ; e (d) exponencial decrescente para.....	68
Figura 4.1 – Quantidade de empresas por estados.....	76
Figura 5.1 – Número de empregados.....	82
Figura 5.2 – Número de eventos por mês.	83
Figura 5.3 – Tempo de retomada.....	83
Figura 5.4 – Demanda.	84
Figura 5.5 – Custo por evento.	84
Figura 5.6 – Custo por demanda.....	85
Figura 5.7 – Correlação custo por evento x demanda.	86
Figura 5.8 – Correlação custo por demanda x demanda.....	86
Figura 5.9 – Comparação de custos médios por evento entre tipos de atividade.	90
Figura 6.1 – Distribuição das subestações monitoradas da EDP ES.....	95
Figura 6.2 – Distribuição das subestações monitoradas da EDP SP.....	96
Figura 6.3 – Diagrama unifilar da SE.....	96
Figura 6.4 – Frequência acumulada: magnitude dos afundamentos de tensão.....	97
Figura 6.5 – Frequência acumulada: duração dos eventos de VTCD.	98

Figura 6.6	– Frequência dos afundamentos de tensão em termos de magnitude e duração. ...	98
Figura 6.7	– Taxa de ocorrência de cada tipo de afundamento de tensão.	100
Figura 6.8	– Frequência acumulada: magnitude dos afundamentos de tensão, por tipo.	101
Figura 6.9	– Frequência acumulada: duração dos afundamentos de tensão, por tipo.	101
Figura 6.10	– V_{crit} e T_{crit} Variáveis aleatórias e independentes.	104
Figura 6.11	– Curva de sensibilidade de eventos para valores de V_e e T_e	105
Figura 6.12	– Número de desligamentos ES e SP.	107
Figura 6.13	– Custo anual UCs do ES.	108
Figura 6.14	– Custo anual UCs do ES (valores elevados).	109
Figura 6.15	– Custo anual UCs do ES (valores baixos).	109
Figura 6.16	– Custo anual UCs do ES (valores médios).	110
Figura 6.17	– Custo anual UCs do SP.	110
Figura 6.18	– Custo anual UCs do SP (valores baixos).	111
Figura 6.19	– Custo anual Ucs do SP (valores médios).	111
Figura 6.20	– Custo anual (plástico).	113
Figura 6.21	– Custo anual (automotivo).	114
Figura 6.22	– Custo anual (comercial).	115
Figura 6.23	– Custo anual (vidro).	115
Figura 6.24	– Custo anual (metalúrgico).	116
Figura 6.25	– Custo anual (alimentos).	117
Figura 6.26	– Custo anual (moveleira).	118
Figura 6.27	– Custo anual (têxtil).	118
Figura 6.28	– Comparação do número de desligamentos (pesquisa x medição).	119

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1 – Exemplos de fatores de ponderações para diferentes magnitudes de AMTs.	19
Tabela 1.2 – Combinando fatores de ponderação com desempenho de AMT esperado para determinar os custos totais das VTCDs.	19
Tabela 2.1 – Classificação das VTCDs (PRODIST).	29
Tabela 2.2 – Classificação das VTCDs (IEEE 1159).	30
Tabela 3.1 – Período mínimo de monitorização e precisão desejada.	57
Tabela 4.1 – Planejamento das visitas às empresas - SP e ES.	76
Tabela 5.1 – Identificação das empresas.	79
Tabela 5.2 – Equipamentos sensíveis, histórico de eventos e tempo de retomada.	80
Tabela 5.3 – Custo por evento e custo por demanda. (em dólares americanos)	81
Tabela 5.4 – Custos por tipo de atividade (em dólares americanos).	88
Tabela 5.5 – Custo mensal e número de desligamento mensal	91
Tabela 6.1 – Taxa de ocorrência de cada tipo de afundamento de tensão.	99
Tabela 6.2 – Parâmetros adotados para os conversores.	103
Tabela 6.3 – Custos Anuais e Número de Desligamentos (medição e pesquisa).	119

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

A	Número de funcionários afetados
AMT	Afundamento Momentâneo de Tensão
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
ASD	<i>Adjustable Speed Drive</i>
AVV	Acionamento Variável de Velocidade
B	Duração da interrupção (horas)
C	Salários dos funcionários (custo horário + custos indiretos do funcionário por hora)
CA ¹	Custos adicionais (R\$)
CBEMA	<i>Computer and Business Equipment Manufactures Association</i>
CC	Corrente Contínua
CC ¹	Custo de interrupção do consumidor
CD	Custo direto (R\$)
CE	Custo da energia elétrica por hora (R\$/h)
CLP	Controlador Lógico Programável
CMP	Custo de matéria-prima utilizada por hora (R\$/h)
CMPD	Preço da matéria-prima descartada (R\$)
CO	Custo oculto (US\$)
CODT	<i>Cost of Downtime</i>
CPFL	Companhia Paulista de Força e Luz
CPU	<i>Central Process Unit</i>
CR	Custo para recuperação da produção perdida (US\$)
CR ¹	Custo de repartida (US\$)
DIV	Custos diversos não considerados em consequência da ocorrência de um distúrbio (típicos de cada processo)
D _c	Duração do evento
D _L	Limite de tolerância de duração
E	Economia de energia durante a interrupção do processo (US\$)
E ¹	Produtos + serviços perdidos por interrupção (US\$)
EA	Economias adicionais (R\$)
EDP	Energias de Portugal
ENT	Número estimado de desligamento
f	Frequência de ocorrência de AMTs (número de paradas)
FTcrit(x)	Função de massa de probabilidade de tempo crítico em x
FVcrit(x)	Função de massa de probabilidade de tensão crítica em x
fTcrit(x). fVcrit(x)	Probabilidade de Vcrit ser igual à V e de Tcrit ser igual a T
FTcrit(Te)	Funções de distribuição acumulada de tempo crítico
FVcrit(Ve)	Funções de distribuição acumulada de tensão crítica
F	Custo por produto + serviço perdido ou reparado (US\$)
h	Tempo total de operação, em horas
G	Tempo gasto para reiniciar (horas)
h ₀	Horas extras (h)

I	Número de funcionários envolvidos na repartida
ICD	Interrupção de curta duração
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
IEC	<i>International Electrotechnical Commission</i>
IFC	Custo na forma de capital e mão-de-obra ociosa (R\$)
IHM	Interface homem máquina
ITIC	<i>Information Technology Industry Council</i>
J	Equipamento danificado devido a parada (US\$)
K	Número de elementos de custos ocultos
L	Valor de mão de obra anual a ser acrescentado (US\$)
L ¹	Custo oculto por elemento (USD/Nº elementos ocultos).
m	Custo médio da perda em outros setores (% de Q)
mi	Custo das perdas em outros setores devido a um distúrbio i (R\$).
MEE	Método de enumeração de estado
MMC	Método de Monte Carlo
Ne(T _i ,V _k)	Número de eventos com magnitude inferior a V _k e duração superior a T _i
nf	Número de produtos finais por hora
nmo	Número de funcionários que trabalham na produção
nr	Número de produtos ou matérias primas retrabalhados
n _v e n _T	Número de valores das variáveis V _{crit} e T _{crit}
OC	Custo da interrupção do consumidor (R\$)
OTC	Custo de recuperação da produção em horas extras
PAC	Ponto de acoplamento comum
P _{curva} (T,V)	Probabilidade da curva de sensibilidade do equipamento pelo ponto (T, V)
PLC	<i>Programmable Logic Controller</i>
PRODIST	Procedimentos de distribuição de energia elétrica no sistema elétrico nacional;
P(T _{crit} =x)	Probabilidade de tempo crítico ser igual a x
P _{trip} (T _e ,V _e)	Probabilidade de desligamento do equipamento
P(V _{crit} =x)	Probabilidade de tensão crítica ser igual a x
p.u.	por unidade
PWM	<i>Pulse Width Modulation</i>
Q	Valor anual total (R\$) de material danificado
QEE	Qualidade da Energia Elétrica
Ra	Resistência da impedância do alimentador no ponto de falta ao PAC (ohms)
RMP	Receita de matéria-prima danificada ou retrabalhada (R\$)
Rs	Resistência da impedância da fonte no PAC (ohms)
SE	Subestação
SEP	Sistema Elétrico de Potência
SEMI F47	<i>Semiconductor Equipment Materials International</i>
SMO	Salários médios dos funcionários ociosos ligados à produção por hora (R\$/h)
SMO ¹	Custo da mão-de-obra por hora (R\$/h)
SPC	Custo de produtos e materiais danificados (R\$)

t_i	Duração do distúrbio i em horas
ton	Toneladas
t_{partot}	Tempo total de parada (tempo de reparação e de religamento – horas).
t_{rec}	Tempo para recuperação da produção (horas)
t_{ret}	Tempo para retrabalho em horas
TLT-LCD	<i>Thin Film Transistor - Liquid Crystal Display</i>
UCs	Unidade(s) consumidoras
V	Custo médio das perdas de produtos e materiais (% de Q)
V_C	Intensidade de tensão do evento
V_{crit}	Tensão crítica - Variáveis aleatórias discretas e independentes
V_e	Magnitude do evento
v_i	Custo das perdas de produtos e materiais devido a um distúrbio i (R\$)
VPS	Valor do produto final (R\$)
V_{ref}	Tensão de referência
$V_{residual}$	Tensão residual durante o evento (V)
VTCD(s)	Variação(ões) de tensão de curta duração.
T_{crit}	Tempo crítico - Variáveis aleatórias e independentes
V_L	Limite de tolerância de intensidade de tensão
X	Custo da mão de obra dos empregados afetados
X_a	Reatância da impedância do alimentador no ponto de falta ao PAC (ohms)
X_s	Reatância da impedância da fonte no PAC (ohms)
Z	Custo de repartida (R\$)
Y	Perda do produto/serviço devido à interrupção (R\$)

LISTA DE SÍMBOLOS

ε	Fração da produção normal não produzida durante o desligamento (ton)
$\bar{\varepsilon}$	Fração da produção normal não produzida durante o religamento (ton)
γ	Quociente entre o salário da hora extra da mão-de-obra e o salário normal (R\$/h)
γ_{ti}	Tempo de religamento de um processo interrompido de duração t_i (horas).
φ	Deslocamento de ângulo de fase da tensão durante o evento
ρ	Fração da produção perdida (ton)
ω	Porcentagem do salário em hora normal
$\bar{\omega}$	Porcentagem do salário em hora extra

SUMÁRIO

DEDICATÓRIA.....	iii
AGRADECIMENTOS.....	iv
RESUMO.....	v
ABSTRACT.....	vi
LISTA DE FIGURAS.....	vii
LISTA DE TABELAS.....	ix
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS.....	x
LISTA DE SIMBOLOS.....	xiii
1. INTRODUÇÃO.....	16
1.1. Considerações Iniciais	16
1.2. Relevância do tema	17
1.3. Estado da Arte.....	18
1.4. Objetivos e Contribuições da Tese	26
1.5. Estrutura da Tese.....	27
2. SENSIBILIDADE DE CARGAS FRENTE À VTCDs.....	28
2.1. Considerações Iniciais	28
2.2. Conceito de VTCDs.....	28
2.3. Sensibilidade de Cargas Frente às VTCDs.....	32
2.4. Curvas de Sensibilidade	34
2.4.1. Principais Curvas de Sensibilidade.....	35
2.4.2. Aplicação das Curvas de Sensibilidade	37
2.5. Sensibilidade de Equipamentos Utilizados na Indústria	38
2.5.1. CLPs.....	38
2.5.2. Contatores	41
2.5.3. Computadores	42
2.5.4. Conversores de Frequência	44
2.5.5. Observações Complementares	48
2.6. Considerações Finais	49
3. OBTENÇÃO DE CUSTOS DE PARADAS DE PROCESSOS INDUSTRIAIS	
DEVIDO A AMTs.....	50
3.1. Considerações Iniciais	50
3.2. Formulação dos Custos de Paradas de Processos Industriais	50
3.3. Metodologias para Obtenção dos Parâmetros de AMTs.....	56
3.3.1. Realização de Medições.....	56
3.3.2. Realização de Simulações	57
3.3.2.1. Método da Enumeração de Estados.....	58
3.3.2.2. Simulação de Monte Carlo.....	61
3.3.2.3. Método Híbrido.....	63
3.4. Determinação do Número de Desligamentos dos Processos	64
3.4.1. Modelo de “N” Estados.....	64
3.4.2. Incertezas da Sensibilidade da Carga.....	66
3.5. Pesquisa Direta	69
3.6. Considerações finais.....	69
4. PROPOSTA E REALIZAÇÃO DE PESQUISA DIRETA.....	71
4.1. Considerações Iniciais	71
4.2. Elaboração do Formulário de Pesquisa	72
4.3. Seleção das Empresas	74
4.4. Planejamento das Visitas.....	74
4.5. Realização da Visitas	75

4.6.	Considerações Finais	76
5.	ESTUDO DE CASO E RESULTADOS	78
5.1.	Considerações Iniciais	78
5.2.	Resultados	78
5.3.	Análises Gerais	82
5.4.	Análises por Tipo de Atividade.....	87
5.5.	Considerações Finais	90
6.	ESTIMATIVA DE CUSTO ANUAL DEVIDO A AMT.....	93
6.1.	Considerações Iniciais	93
6.2.	Medições de VTCD	93
6.2.1.	Rede de Monitoramento.....	93
6.2.2.	Severidade das VTCDs.....	97
6.2.3.	Tipos de afundamentos de tensão	99
6.2.4.	Severidade dos afundamentos de tensão por tipo	100
6.3.	Metodologia para estimação de desligamentos de ASDs.....	102
6.3.1.	Representação da Sensibilidade dos ASDs.....	102
6.3.2.	Determinação do número de desligamentos para ASD	103
6.4.	Metodologia para a obtenção dos custos.....	107
6.4.1.	Determinação do número anual de paradas de processo por barramento monitorado	107
6.4.2.	Determinação dos custos anuais devido às paradas de processo	112
6.4.3.	Análise dos Resultados – 12 ramos de atividade industrial	112
6.5.	Considerações Finais	119
7.	CONCLUSÕES.....	122
	REFERÊNCIAS.....	125
	APÊNDICE A.....	131
	APÊNDICE B.....	134
	Barra A – ES.....	134
	Barra B – SP.....	134
	APÊNDICE C.....	135

1. INTRODUÇÃO

1.1. Considerações Iniciais

O avanço cada vez maior da tecnologia eletroeletrônica tem permitido às indústrias investirem em sistemas e em equipamentos visando o aumento da qualidade e da produtividade. No entanto, pesquisadores indicam que, combinado ao seu uso no processo industrial, estes equipamentos e sistemas possuem grande sensibilidade em sua operação, o que provoca a descontinuidade produtiva e, conseqüentemente, perdas econômicas significativas às empresas do ramo industrial (MCGRANAGHAN, 2002).

No Brasil, o sistema elétrico é constituído predominantemente de redes aéreas de transmissão e de distribuição, o que torna a rede elétrica suscetível a diversos fatores externos, tais como condições climáticas adversas (descargas atmosféricas e vendavais), queimadas, vandalismo e acidentes, que podem provocar curtos-circuitos na rede. Sabe-se que os curtos-circuitos são a principal causa de ocorrência de variações de tensão de curta duração (VTCDs), sobretudo dos afundamentos momentâneos de tensão (AMTs), que trazem prejuízos relevantes para as unidades consumidoras, sobretudo, para aquelas unidades industriais com cargas sensíveis (COSTA, 2018).

Existe uma carência de estatísticas disponíveis sobre custos de paradas de processo devido aos AMTs, apenas alguns trabalhos trataram sobre este assunto, tais como: Behera et al 2019, Chen et al, 2016; Salim et al, 2014; Vegunta, Milanovic, 2013; Heuni et al, 2002. As poucas estatísticas disponíveis se referem às perdas em razão das interrupções permanentes (qualidade de serviço). Por sua vez, cada vez mais os riscos de demandas judiciais de consumidores contra empresas concessionárias são crescentes, com pedidos milionários de indenizações devido aos prejuízos por interrupções de processos industriais provocados por VTCDs.

Um exemplo disso é o caso do pedido de ressarcimento solicitado pela empresa Fibra Du Pont SA (FIDUSA) contra a Companhia Paulista de Força e Luz (CPFL). A referida empresa recebeu mais de R\$ 20 milhões como indenizações, como consequência de VTCDs e de interrupções parciais e totais em seu processo industrial (FIDUSA e CPFL, 2014).

Os AMTs, além de ocasionarem paradas parciais ou totais de um processo industrial, acarretam perdas de matéria-prima, quebra produtiva, aumento de horas extras de equipes para que haja a recuperação da fabricação dos produtos, além dos custos relativos à queima de

equipamentos, tudo isso trazendo perda de lucratividade de muitas indústrias (LAMEDICA et al, 2001; SALIM et al, 2014).

Assim, tais distúrbios representam não apenas um desafio a ser enfrentado por agentes do setor elétrico, como também por indústrias ou complexos comerciais de grande porte que necessitem urgentemente mitigar o elevado custo de interrupções decorrente desses eventos. Nesse sentido é de fato importante relacionar as perdas em processos industriais devidos aos fenômenos de AMTs.

1.2. Relevância do tema

A escolha do tema sobre estimativa de custos de interrupção de processos industriais devido às AMTs, se deu pelo fato de diversos trabalhos publicados na literatura técnica ter foco na análise de características relacionadas à qualidade do serviço, estando esta relacionada aos índices de continuidade.

Ademais, o avanço da tecnologia fez com que houvesse uma vasta aplicação da eletrônica de potência, da microeletrônica e dos microprocessadores em uma infinidade de equipamentos, desde relógios digitais domésticos às linhas de processos industriais automatizadas. Tal avanço tecnológico significa também um aumento considerável da sensibilidade dos equipamentos em relação à Qualidade da Energia Elétrica (QEE).

Com a necessidade de maior produtividade industrial aconteceu, por exemplo, a disseminação da aplicação de Acionamentos de Velocidade Variável (AVVs) e de sistemas controlados eletronicamente. Isto revelou o aspecto de vital importância da QEE no que diz respeito à sensibilidade destas cargas frente a AMTs, inevitáveis nos Sistema Elétrico de Potência (SEP) e resultantes, geralmente, de curtos-circuitos nos sistemas de transmissão e distribuição.

Ocorrências de VTCDs, sobretudo de AMTs, combinadas com a sensibilidade dos equipamentos modernos, resultam em um número expressivo de interrupções de processos industriais, o que, como supramencionado, ocasionam perdas econômicas significativas e irrecuperáveis ao processo fabril. Algumas concessionárias de distribuição relatam que mais de 90% das reclamações de consumidores estão relacionadas com a ocorrência das VTCDs (CARVALHO FILHO, 2000).

Um levantamento sobre perdas por atividade industrial, realizado no estado do Paraná, mostrou que as VTCDs provocam perdas financeiras indesejáveis, tal como salientado, afetando o lucro das empresas e, a depender da sensibilidade dos equipamentos, podem acarretar interrupções parciais e até totais de processos industriais (TEIXEIRA et al., 2011).

Consequentemente, torna-se primordial que os estudos sobre custos de interrupção em processos industriais devido às AMTs sejam considerados de grande importância pelas concessionárias de energia elétrica, pelas indústrias do setor e pelas universidades, de modo que os resultados das pesquisas possam contribuir para a descoberta de meios mitigadores do problema, para a melhoria da imagem e da relação entre concessionária e suas unidades consumidoras (UCs), assim como para a sociedade em geral que teria os benefícios de menores perdas monetárias de processos industriais.

Por todas estas razões citadas, o desenvolvimento deste trabalho de tese tem a sua relevância, a saber: (i) uma incansável busca na literatura dos últimos 20 anos sobre a questão das perdas monetárias relacionadas aos desligamentos causados por AMTs; (ii) um grande planejamento envolvendo concessionária e indústrias em busca de mais informações sobre o assunto; (iii) a realização da pesquisa direta (*survey*) objetivando então o levantamento dos valores monetários, confiáveis e próximos à realidade, inexistente na literatura técnica nacional nestas 2 últimas décadas e (iv) o levantamento de custos anuais a partir de medições existentes na concessionária.

1.3. Estado da Arte

Foi realizada uma busca por artigos publicados sobre custos de paradas de processos produtivos devido a AMTs das duas últimas décadas. As principais e mais relevantes publicações estão comentadas neste estado da arte que se segue.

Em (LAMEDICA et al, 2001) foi realizada uma pesquisa (*survey*) através de envio de um questionário em três distritos da Itália, no qual 93 indústrias de 18 diferentes segmentos de atividade responderam. Os resultados indicaram que os processos são suscetíveis a determinados tipos de distúrbios que afetam a QEE, sendo: 84% devidos a eventos de AMTs e interrupções de curta duração (ICDs), 8% devido à sobretensão, 6% em decorrência de flutuação de tensão, e finalmente 2% causados por harmônicos. Qualitativamente, 89% das empresas responderam sobre o impacto econômico anual devido a problemas de qualidade de energia elétrica (QEE), cujos resultados estão assim estratificados em relação a tal impacto: 8% desprezaram, 28% mínimo, 20% baixo, 25% médio, 16% alto e 3% muito alto. Apenas 10 indústrias da amostra informaram o custo médio anual (em dólares americanos), sendo que 7 delas indicaram uma perda econômica média de até US\$ 20.000,00; em outra o custo variou entre USD 20.000,00 e USD 50.000,00 e, para 2 delas, o valor variou entre USD 50.000,00 e USD 250.000,00 por ano.

Em (MCGRANAGHAN et AL, 2002) é mencionado que, devido a uma simples interrupção do processo, os custos associados aos problemas de QEE em instalações fabris podem variar de USD 10 mil a milhões de dólares. São descritas as possibilidades de mitigar os afundamentos com algumas aplicações de tecnologias para indústrias e que cada uma delas possui uma eficácia em termos percentuais, para cada nível de afundamento. São considerados fatores de ponderações para análise econômica para cada nível de afundamento, como mostra a Tabela 1.1, cujos dados foram usados para uma investigação realizada pelo autor.

Tabela 1.1 – Exemplos de fatores de ponderações para diferentes magnitudes de AMTs.

Categoria do evento	Fator de Ponderação para análise Econômica
Interrupção	1,0
AMT – com tensão abaixo de 50%	0,8
AMT – com tensão entre 50% e 70%	0,4
AMT – com tensão entre 70% e 90%	0,1

A Tabela 1.2 combina as ponderações com o número de eventos esperados para determinar um custo anual total associado a AMTs e interrupções. O fator de ponderação e o número de eventos estabelecem a quantidade total equivalente de interrupções durante um ano.

Tabela 1.2 – Combinando fatores de ponderação com desempenho de AMT esperado para determinar os custos totais das VTCDs.

Categoria do Evento	Fator de Ponderação para análise Econômica	Nº de eventos anuais	Total Equivalente de interrupções
Interrupção	1,0	5	5
AMT – com tensão abaixo de 50%	0,8	3	2,4
AMT – com tensão entre 50% e 70%	0,4	15	6
AMT – com tensão entre 70% e 90%	0,1	35	3,5
Total			16,9

Se uma interrupção custar US\$ 40.000,00 os custos totais associados a AMTs e interrupções seriam de:

- USD 40.000,00 x 16,9 = USD 676.000,00 por ano.

No documento (HEINE et al, 2002) é apresentado um método para se estimar o número de AMTs, chamado de método de posição de falta, e os custos decorrentes destes afundamentos de tensão, por meio de um estudo em cinco distribuidoras de energia da Finlândia. Para tal, foi estimado o número de ocorrências de AMTs, empregando dados estatísticos referentes a ocorrência de faltas permanentes na rede, faltas temporárias e os diversos tipos (monofásica, bifásica, trifásica). As consequências econômicas foram avaliadas considerando o número de

paradas de processo, os custos envolvidos e o número de clientes afetados em cinco zonas (3 rurais e 2 urbanas), cada uma de responsabilidade de uma concessionária diferente. Como conclusão do trabalho, chegou-se a custos anuais devido a AMTs – em moeda europeia (Euros - €) de: € 530.000,00 para 500 indústrias na área Rural 1; € 270.300,00 para 150 Indústrias na Zona Rural 2; € 8.474.700,00 para 1950 Indústrias na Zona Rural 3; € 1.038.800,00 para 1400 indústrias na área Urbana 1 e € 519.400,00 para 700 indústrias na área Urbana 2.

Em (QUAIA et al, 2003), empregou-se um método para o cálculo de custo de interrupção de pequenas plantas industriais causado por AMTs e por ICDs. Pesquisas foram realizadas com pequenas indústrias da Itália, sendo que 1/3 desses usuários são sensíveis a AMTs, causando prejuízos significativos frente a estes distúrbios. A formulação do custo de interrupção do processo inclui a perda de produção, a perda de matéria-prima, as imperfeições na produção, os equipamentos danificados, a manutenção extra e, finalmente, os tempos de parada do processo. A metodologia foi aplicada em uma planta do ramo de plástico, suprida em média tensão – 20 kV, e que experimentou uma média anual de 25 a 30 interrupções de processo devido a AMTs. A análise foi realizada em 4 tipos de máquinas do processo, as quais são sensíveis a AMTs: injeção, compressão, polimerização e moldes. Considerando seus tempos médios de retomada de produção e com seus parâmetros de custos atrelados a cada tipo de máquina, chegou-se a um custo com variação de € 300,00 a € 550,00, entre o tempo de parada (0 segundo até 1 hora) até a repartida.

Os autores do artigo (GUPTA et al, 2005) é realizado um estudo em uma rede de distribuição genérica, composta por 295 barramentos, 296 linhas de transmissão, grande número de chaves e disjuntores de forma a permitir alteração da topologia da rede para obter melhor confiabilidade do sistema e a continuidade de energia aos dos consumidores. A metodologia empregada para estimar o número de AMTs nos consumidores foi o método da posição de falta, que corresponde a aplicação de vários tipos de falta em diversos pontos da rede de acordo com a probabilidade de ocorrência de cada um deles. São escolhidas 37 indústrias com alta sensibilidade a AMTs e pertencentes a um determinado barramento selecionado aleatoriamente. São simulados 10.000 ensaios para verificar a variação do número de paradas (*trips*) dos processos, considerando diferentes categorias de indústrias, classificados em 3 grupos: grupo I para cargas elevadas (> 2 MW); grupo II para cargas médias (1 MW a 2 MW) e grupo III para cargas pequenas (até 1 MW). Os custos por evento considerando o tempo de 24 horas para reinício de produção, obtidos para paralisações de processos industriais foram na moeda inglesa (Libra Esterlina - £): £ 581.000,00 para grandes cargas industriais, £ 16.300,00 para indústrias de médio porte e de £ 1.000,00 para pequenas cargas.

Em (MILANOVIC et al, 2006), uma metodologia foi proposta para estimar as perdas financeiras devido a interrupções de suprimento e AMTs, por meio de uma avaliação probabilística, aplicável tanto para avaliação das perdas individuais de consumidores, quanto das perdas totais do sistema. Para fins do cálculo das perdas econômicas, o autor considerou que toda parada de plantas industriais (diversos tipos de atividades) necessita de 24 horas para a retomada da produção normal, levando em conta apenas interrupções por AMTs. O custo estimado para a classe de consumidores industriais foi de U\$ 19.594,00 por evento.

O artigo (GOSWAMI, A.K, 2008) apresenta uma implementação prática que consiste em uma avaliação estocástica das perdas financeiras, tendo em conta os AMTs. O estudo caracteriza a parada do processo por uma equação probabilística acumulativa baseado nos 2 estudos de (MILANOVIC, 2006) e, leva em consideração a sensibilidade e a interconexão de equipamentos presentes em um determinado processo, bem como os tipos de consumidores e a localização destes na rede de distribuição. A rede de distribuição simulada é composta de 29 barras, 28 linhas e 11 transformadores. O método de Monte Carlo (MMC) é utilizado no processo. Os custos relatados por várias categorias de clientes na Índia, no estado de Uttarakhand, são em decorrência de paradas de processo devido a afundamentos de tensão. As cargas foram classificadas em três categorias: grupo I (>20MW), 60% era industrial de grande porte e 40% de cargas industriais menores; grupo II (entre 5 e 20 MW), 60% de grandes cargas industriais, 30% cargas comerciais menores e 10% de cargas comerciais; grupo III (até 5 MW), 60% residencial, 20% cargas industriais menores e 20% comercial. Para todas as categorias de consumidores industriais os custos, na moeda indiana (Rupias indianas - Rs) por parada devido a AMTs ficaram entre Rs 46.300,00 a Rs 781.000,00 (US\$ 648,00 a US\$ 10.934,00) para grupos I e II e de Rs 46.300,00 para grupo III (US\$ 648,00) por evento.

A referência (KJOLLE et al, 2008) apresenta a metodologia utilizada e os principais resultados de uma pesquisa realizada na Noruega sobre os custos devido a interrupções de curta duração. Foram utilizados questionários, nos quais se deveria informar os custos diretos, bem como qual a disposição do consumidor em pagar para evitar as variações na tensão ou em aceitá-las. Os resultados foram normalizados e padronizados pela energia não suprida, em kWh, para os casos de interrupções com duração superior a três minutos, e pela potência, em kW, para as interrupções de curta duração e afundamentos de tensão com duração menor ou igual a três minutos. Os resultados mostraram que o custo por demanda interrompida devido a afundamentos de tensão em consumidores industriais está entre USD 3,34 à USD 5,18 para cada kW.

Em (BELCHIOR et al, 2008) os autores, através de estudos computacionais empregando um simulador no domínio do tempo, se propõem a investigar o desempenho de uma alternativa de baixo custo, envolvendo modificações junto ao controle V/Hz, conjuntamente com pré-seleção de tapes dos transformadores de alimentação dos conversores. De forma computacional, um afundamento de tensão fase-fase (V_{ab}) foi aplicado a um conversor de frequência que alimenta um motor trifásico tipo gaiola, durante 30 ciclos. Como o sistema é equilibrado, apresentam-se as formas de onda para apenas uma das tensões fase-fase (v_{ab}) com 304V.

Conforme esperado, o afundamento trifásico é refletido simetricamente nas tensões de linha, reduzindo para 80% as amplitudes dessas tensões e conseqüentemente, os valores eficazes, conforme mostra a Figura 1.1.

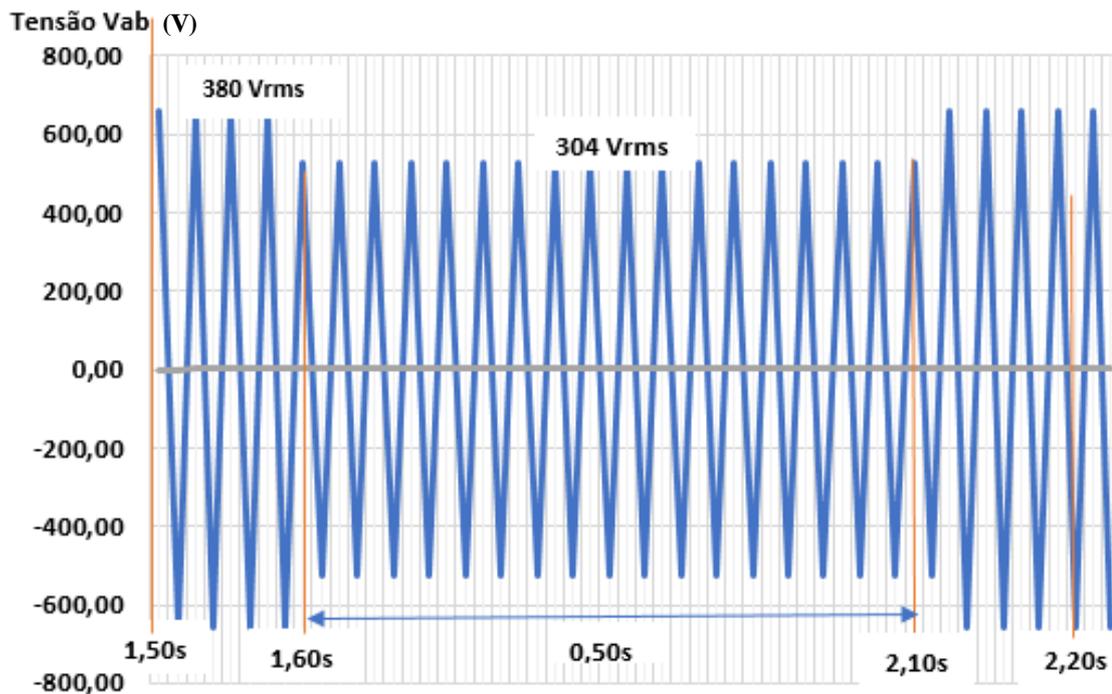


Figura 1.1 – Tensão v_{ab} na entrada do conversor.

A Figura 1.2 é associada à tensão na saída do equipamento em teste, o conversor de frequência. Observa-se uma significativa queda de tensão, suficiente para atingir o limite suportado pelo equipamento, e mostra, claramente, o total desligamento do equipamento. Estudos realizados por (TUNABOYLU, N. S.; COLLINS JR, E. R., 2002) mostraram que apenas 25% da energia armazenada no barramento CC de um conversor de frequência são utilizados, quando da ocorrência de um afundamento de tensão.

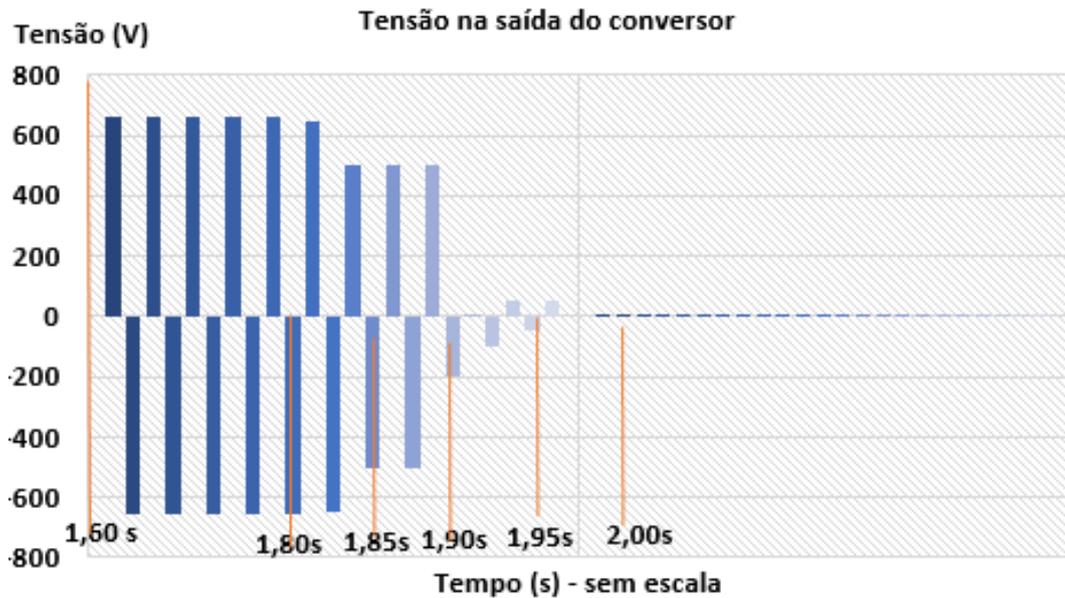


Figura 1.2 – Tensão v_{ab} na saída do conversor.

Os autores (BELCHIOR et al, 2008), mostraram que a performance do inversor pode melhorar através de modificações sistemáticas e apropriadas da relação Volts/Hertz do próprio inversor, sempre que se tornar menor esta relação, devido ao afundamento de tensão, o circuito vai atuar para aumentar a relação V/Hertz resultando uma tensão de saída do conversor apropriada, reduzindo a variação da tensão que alimenta o motor, diminuindo a oscilação da velocidade da carga acionada por este equipamento, mitigando a parada do sistema.

Por fim, aplicou-se este estudo à uma indústria química têxtil com a mitigação dos AMTs e redução dos custos, com aumento de produção líquida em até 8,6%.

O trabalho de (CARVALHO FILHO et al, 2009) aponta a estimativa de custo devido a ocorrência de AMTs com base na redução momentânea do fluxo de potência e da energia não suprida observada em um sistema elétrico. Como estudo de caso foi utilizado medições reais realizadas num importante sistema de transmissão no Brasil. Os custos levantados foram devido a 37 eventos considerados significativos, cujos valores variaram de USD 510,00/evento a USD 772.800,00/evento, com maior concentração de valores abaixo de USD 50.000,00 por evento.

No trabalho (CEBRIAN et al, 2010), um método híbrido é utilizado para avaliação dos riscos atrelados às interrupções de processos sensíveis devido às faltas no sistema elétrico de distribuição. São determinados, para cada consumidor, índices relacionados aos AMTs, considerando as frequências de ocorrências classificadas em faixas de magnitude e de duração, bem como os impactos nos processos industriais alimentados pelo sistema de distribuição utilizado como caso teste. O custo médio anual devido a afundamentos de tensão em consumidores industriais foi de USD 64.417,00.

Em (GOSWAMI et al, 2014), pesquisadores apresentaram uma metodologia para análise de custo-benefício visando à mitigação de VTCDs em uma fábrica de cimento, considerando a probabilidade de parada do processo. O custo (Rs – rupias indianas) por AMT informado pela indústria cimenteira foi de Rs 750.000,00 ou USD 13.385,00 por evento.

Em (SALIM et al, 2014) um estudo foi realizado para avaliar o nível de QEE na Malásia, bem como estimar o custo associado a ocorrência de AMTs. Os eventos foram capturados por medidores instalados em locais apropriados na rede elétrica. Os custos por evento variaram de acordo com o tipo de atividade da unidade consumidora:

- (i) setor comercial: USD 24.124,00/evento (o menor dos custos)
- (ii) setor de semicondutores: USD 723.729,00/evento (semicondutores maiores dos custos);
- (iii) vidro/granitos/argila/cimento, cerâmica e azulejos: USD 96,500.00/evento;
- (iv) metal /alumínio/produtos de cobre: USD 168.700,00.

Em um estudo dos autores (CHEN et al, 2016), discute-se os impactos dos AMTs nas unidades consumidoras e aplica um método de cálculo das perdas decorrentes de AMTs por meio de questionários ou entrevistas pessoais. Os resultados mostram uma grande variação no custo anual devido a ocorrências de AMTs principalmente no setor industrial, em razão do valor agregado do produto final. Para a indústria de fibras químicas os custos variam de USD 29.000,00 à USD 172.000,00, já para a indústria de semicondutor os custos estão entre USD 574.000,00 e USD 3.585.000,00.

O estudo de (BEHERA et AL, 2019), custos de perdas são avaliados devido à ocorrência de AMTs em um sistema de distribuição de uma indústria química, considerando 5 tipos de equipamentos sensíveis instalados no processo industrial. O custo considerado foi de USD 1.893,00 por evento (AMT) incluindo: custo trabalhista, custos dos produtos inacabados, perdas de matérias primas, entre outros. Os resultados obtidos com as simulações variam em função do barramento onde estão instaladas as cargas sensíveis. O número de paradas estimado variou de 24 a 344 por ano, resultando em perdas entre USD 380,80 a USD 12.128,20 por ano.

Em (SOMRAK et al, 2019) um estudo de análise de investimento é realizado para minimizar perdas devido à ocorrência de AMTs e ICDs. Usando o método por Monte Carlo para uma simulação estocástica de AMTs por um período de 30 anos, foi utilizado o sistema de teste Modified RBTS Bus 2. Os dados de entrada considerados para realizar a simulação foram os custos obtidos de (SALIM, F. et al, 2014), das indústrias de plástico e automotiva, cujos valores de perdas foram de USD 48.920,00 e USD 56.142,00, respectivamente, representando uma média de USD 52.531,00 por evento. Para a análise, 2 tipos de sistemas foram

considerados na simulação, linhas aéreas e de cabos subterrâneos. O melhor resultado obtido para o referido investimento para mitigar as paradas do processo aconteceu na simulação em que 4 linhas aéreas foram substituídas por linhas de cabos subterrâneos.

Em (HE et al, 2020) a importância de avaliar perdas financeiras em consumidores industriais devido a AMTs e ICDs é mencionada. Os autores propõem um novo modelo para avaliar o impacto dos AMTs e os equipamentos sensíveis são modelados usando as curvas de sensibilidade de cada equipamento, associadas com a tabela verdade caracterizada pela relação lógica do equipamento sensível com a produção do processo. Um modelo de otimização com o objetivo de minimizar o desvio das incertezas é construído e os detalhes do algoritmo também são fornecidos. O modelo é aplicado em uma linha de produção do processo de TLT-LCD (*Thin Film Transistor – Liquid Crystal Display*), que é uma tecnologia de transistor de filme fino para melhorar a qualidade de imagem nas telas de televisores, monitores de computadores, telefones celulares, dentre outros dispositivos portáteis. No processo de fabricação de TLT-LCD, há equipamentos sensíveis a AMTs, tais como Controladores Lógicos Programáveis (CLPs) e *Adjustable Speed Drive* (ASDs). Com essa proposta de metodologia, conseguiu-se verificar a sua eficácia com base em dados de investigação do processo estudado, determinando, assim, que a perda anual estimada devido a AMTs é de USD 776.439,00 por ano. O estudo de caso mostrou que o modelo proposto possui melhor adaptabilidade do que o modelo convencional.

Toda essa pesquisa bibliográfica englobou cerca de duas décadas de literatura e objetivou verificar a existência de trabalhos relacionados a custos por interrupção de processos produtivos devido a AMTs. Diretamente relacionado ao tema desta tese, constatou-se três principais procedimentos utilizados para se obter uma estimativa dos custos, sendo eles: (i) realização de pesquisas através de formulários (*survey*); (ii) realizações de simulações estocásticas de AMTs e (iii) medições de campo por medidores instalados nos barramentos de interesse, dos eventos por um intervalo de tempo.

Dentre os principais países onde os custos foram levantados destacam-se: Itália, China, Índia, Finlândia, Brasil, Malásia e Noruega. De modo geral as estimativas de custos são apresentadas em base anual, por evento e por kW interrompido. Apesar da significativa quantidade de ramos de atividades pesquisadas nas publicações, observou-se que os de custos são muito discrepantes de país para país, para um mesmo setor produtivo.

Constatou-se também a existência de poucas publicações sobre o assunto, em periódicos com fator de maior impacto. E mesmo assim são publicações relativamente antigas e não há publicações mais recentes, que atualizem esses estudos considerando a natureza de cargas atuais.

Dentre os artigos encontrados nestas duas décadas passadas, apenas 4 deles (LAMEDICA, et al 2001; QUAIA et al, 2003; KJOLLE et al, 2008; CHEN, et al, 2016) empregaram o método da pesquisa direta através de questionários (*survey*), o que torna esta proposta de tese relevante e notória, principalmente para o setor elétrico do Brasil..

No caso específico do Brasil, os trabalhos encontrados são mais direcionados a continuidade de serviços e não por qualidade do produto, no caso AMT, bem como, não quantifica os custos por segmento de atividade.

Este trabalho gerou 3 artigos que foram apresentados e publicados nos anais do Conferência Brasileira sobre Qualidade de Energia Elétrica, CBQEE 2019 (MOTOKI, EM et al, CBQEE 2019; SANTIAGO ET AL, CBQEE 2019; JUNG et al CBQEE 2019) e um artigo em revista internacional *Energies* (MOTOKI et al, 2021), os quais estão também citados nas referências.

Considerando o ineditismo dos resultados em termos de atualização dos custos para a realidade recente de cargas industriais, este trabalho contribui com a sociedade científica, com as unidades consumidoras e com concessionárias de energia elétrica em geral, entregando a todos uma visão mais ampla e atual de um assunto de grande importância, de modo que planejamentos futuros possam ser realizados na tentativa de diminuir ou até mesmo mitigar as grandes perdas monetárias que vem acontecendo por causa de AMTs.

1.4. Objetivos e Contribuições da Tese

O objetivo principal desta tese é propor, aplicar e obter os custos de paradas de processos industriais devido à ocorrência de AMTs para diferentes ramos de atividades, via pesquisa direta (*survey*), por meio de um questionário minuciosamente pensado e elaborado, conforme Capítulo 4 e Apêndice A.

Em termos de objetivos específicos, as seguintes questões são avaliadas:

- (i) Custos por consumidor pesquisado;
- (ii) Custos por atividade industrial agrupada em 12 categorias;
- (iii) Levantamento de tipos de cargas sensíveis mais utilizadas nos processos;
- (iv) Perfil dos consumidores pesquisados em termos de demanda contratada, número de empregados e tempo para retomada de produção.
- (v) Aferição de resultados por medições na concessionária.

Neste contexto, este trabalho objetiva no levantamento de custos e contribuir em

preencher algumas lacunas, principalmente na tentativa de responder à pergunta: quanto uma indústria pertencente à rede de MT sob concessão da EDP, perde de recursos financeiros, a cada ano, devido aos fenômenos AMT?

Com este objetivo a pesquisa foi aplicada em 33 empresas, em 12 áreas de negócio distintas, supridas em média tensão (11,9 / 13,8 kV) pela empresa EDP nos estados do Espírito Santo e São Paulo, conforme será mencionado ao longo deste texto.

1.5. Estrutura da Tese

A tese encontra-se estruturada em sete capítulos.

O primeiro capítulo apresenta a Introdução, composta por considerações iniciais, justificativas e relevância do tema, estado da arte, além do objetivo, contribuição e estrutura da tese.

O segundo capítulo mostra a revisão dos conceitos necessários e a base teórica sobre sensibilidade de cargas frente aos AMTs.

O terceiro capítulo descreve os métodos para a formulação de custos, considerando os métodos por medição, por simulação e por pesquisa direta.

O quarto capítulo apresenta a proposta para a realização da pesquisa direta através de questões contidas em um formulário de pesquisa para o levantamento de custos.

O quinto capítulo mostra o estudo de caso, a seleção de empresas, a pesquisa de campo e as análises dos resultados e considerações sobre os resultados obtidos.

O sexto capítulo apresenta uma atividade desenvolvida para conclusão do doutorado, o que inclui a estimativa de custos anuais devido à ocorrência de afundamentos de tensão, baseado em medições realizadas em 32 subestações de distribuição, considerando como carga sensível típica o Acionamento por Velocidade Variável, do Inglês Adjustable Speed Drive (ASD).

Por fim, no sétimo capítulo estão as conclusões da tese, bem como a lista dos artigos publicados, além das referências utilizadas na tese e os apêndices citados no texto.

2. SENSIBILIDADE DE CARGAS FRENTE À VTCDs

2.1. Considerações Iniciais

Cada tipo de indústria tem uma característica de sensibilidade própria frente às ocorrências de VTCDs de acordo com os tipos de equipamentos utilizados em seus processos produtivos. Considerando este contexto, neste capítulo será apresentado o conceito de VTCDs, juntamente com as curvas de sensibilidade dos principais tipos de equipamentos sensíveis encontrados em plantas industriais, tais como:

- Controlador lógico programável – CLP, que monitora e controla a operação dos equipamentos e processos;
- Contator que permite o acionamento de cargas em um circuito de potência, a partir de um circuito de comando;
- Conversor de frequência, do Inglês ASD – *Adjustable Speed Drive*, que faz o controle de partida, de parada e de velocidade de motores de indução;
- Computadores de processo – que faz a interface homem máquina (IHM).

Dentre outros dispositivos sensíveis à VTCDs também podem ser citados: lâmpadas ultravioletas (utilizadas principalmente em indústria moveleira para a secagem das placas após a aplicação de resinas sintéticas) e sensores eletrônicos (usados na maioria das indústrias com finalidades diversas).

2.2. Conceito de VTCDs

As definições de VTCDs encontradas nas literaturas técnicas convergem para caracterizá-las como eventos elétricos aleatórios com desvios significativos na amplitude da tensão durante curtos intervalos de tempo, englobando: os afundamentos, as elevações e as interrupções de curta duração, conforme mostra a Figura 2.1 (IEEE Std 1159-2009; ANEEL 2021).

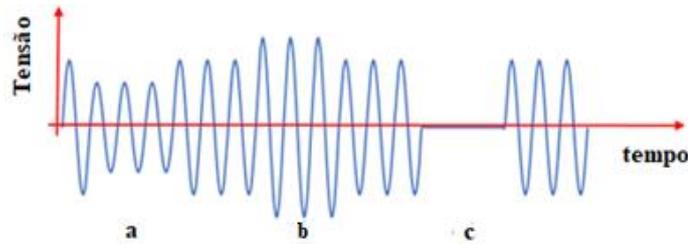


Figura 2.1 – VTCDs: (a) afundamento, (b) elevação e (c) interrupção de tensão.

Como referências que classificam estes eventos têm-se o Módulo 8 (ANEEL, 2021) e o IEEE 1159 – 2009 e que definem os valores de magnitude e de duração das VTCDs, conforme mostram a Tabela 2.1 e Tabela 2.2.

O PRODIST Módulo 8 – Revisão 12 (ANEEL 2021), classifica as VTCDs conforme a Tabela 2.1. Nota-se que o AMT é definido por sua magnitude superior ou igual a 0,1 pu e inferior a 0,9 pu e duração superior ou igual a 1 ciclo e inferior ou igual a 3 segundos.

Tabela 2.1 – Classificação das VTCDs (PRODIST).

Classificação	Denominação	Duração da variação	Valor eficaz da tensão
Variação Momentânea de Tensão	Interrupção Momentânea de Tensão	Inferior ou igual a 3 segundos	Inferior a 0,1 p.u
	Afundamentos Momentâneos de tensão	Superior ou igual a 1 ciclo e inferior ou igual a 3 segundos	Superior ou igual a 0,1 e inferior a 0,9 p.u
	Elevação Momentânea de Tensão	Superior ou igual a 1 ciclo e inferior ou igual a 3 segundos	Superior a 1,1 p.u
Variação Temporária de Tensão	Interrupção Temporária de tensão	Superior a 3 segundos e inferior a 3 minutos	Inferior a 0,1 p.u
	Afundamento Temporário de Tensão	Superior a 3 segundos e inferior a 3 minutos	Superior ou igual a 0,1 e inferior a 0,9 p.u
	Elevação Temporária de tensão	Superior a 3 segundos e inferior a 3 minutos	Superior a 1,1 p.u

Fonte: PRODIST, Módulo 8, Revisão 12, (ANEEL 2021).

A IEEE Std 1159-2009 discretiza as VTCDs e define o afundamento de tensão ou *voltage sag*, como sendo a redução do valor eficaz da tensão para um valor entre 0,1 e 0,9 pu, por um período de tempo compreendido entre 1/2 ciclo e 1 minuto.

Neste caso, a intensidade do afundamento é definida pela menor tensão remanescente durante a ocorrência do distúrbio. Um evento cuja intensidade é inferior a 0,10 p.u. é considerado como sendo uma interrupção. Adicionalmente, o IEEE classifica os afundamentos de tensão, segundo a sua duração, em três categorias:

- Instantâneos: entre 1/2 ciclo e 30 ciclos;
- Momentâneos: entre 30 ciclos e 3 segundos;
- Temporários: entre 3 segundos e 1 minuto.

Tabela 2.2 – Classificação das VTCDs (IEEE 1159).

Categoria	Evento	Duração Típica	Amplitude Típica
Instantâneo	Afundamento	0,5 ciclo - 30 ciclos	0,1 - 0,9 p.u
	Elevação	0,5 ciclo - 30 ciclos	1,1 - 1,8 p.u
Momentâneo	Interrupção	0,5 ciclo - 30 ciclos	< 0,1 p.u
	Afundamento	30 ciclos - 3 segundos	0,1 - 0,9 p.u
	Elevação	30 ciclos - 3 segundos	1,1 - 1,4 p.u
Temporário	Interrupção	3 segundos - 1 minuto	< 0,1 p.u
	Afundamento	3 segundos - 1 minuto	0,1 - 0,9 p.u
	Elevação	3 segundos - 1 minuto	1,1 - 1,2 p.u

Fonte: adaptado por (COSTA, 2018) de (IEEE Std 1564-2014).

Destaca-se que há diferenças nas categorias, entre a IEEE 1159 e Módulo 8 do PRODIST, relativo à classificação e duração das VTCDs.

Para caracterizar as VTCDs, os principais parâmetros utilizados são a magnitude e a duração dos eventos. A depender dos objetivos outras características que influenciam no desempenho de alguns equipamentos durante o evento podem ser necessários, tais como o deslocamento do ângulo de fase da tensão e a frequência, não sendo objetivo deste estudo.

A magnitude do evento (V_e) é definida como sendo o valor eficaz da tensão residual em relação à tensão de referência, conforme a equação (2.1).

$$V_e = \frac{V_{residual}}{V_{ref}} \quad (2.1)$$

onde:

$V_{residual}$ é a tensão residual durante o evento;

V_{ref} é a tensão de referência.

Para um afundamento de tensão, define-se a tensão residual como o menor valor de amplitude registrado durante o evento. Para as elevações, considera-se o maior valor.

No que se refere à duração do evento, este é definido como sendo o intervalo de tempo em que a amplitude da tensão viola certo limite e depois retorna ao valor aceitável. Este período de tempo está diretamente ligado à velocidade de operação do sistema de proteção, sendo determinado principalmente pelo tempo de eliminação da falta (BOOLLEN, 2000; HANZELKA, 2008).

A Figura 2.2 ilustra as definições anteriores.

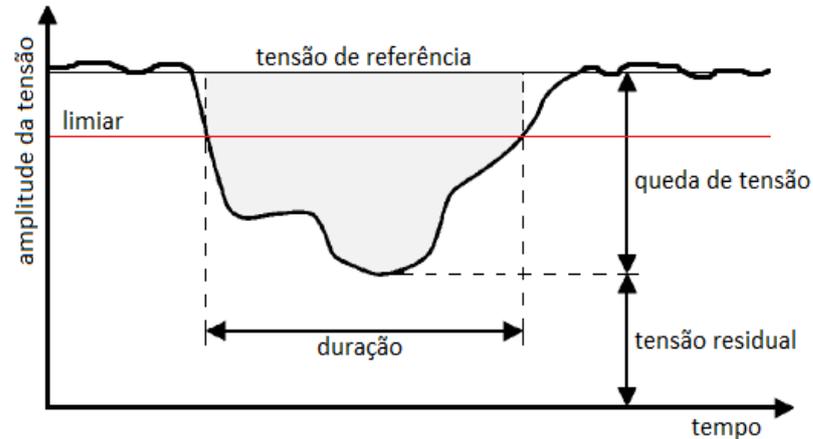


Figura 2.2 – Principais parâmetros utilizados na caracterização dos eventos de AMTs.
Fonte: Adaptado por (COSTA, 2018) de (BOOLLEN, 2000; HANZELKA, 2008).

As VTCDs podem acontecer em uma única fase ou em mais de uma fase. Para a maioria dos casos, aparece o registro de eventos simultâneos nas três fases, sendo que a magnitude e a duração em cada fase são diferentes, considerando que na maior parte das vezes as faltas são assimétricas. Nestes casos, para se caracterizar o fenômeno, adota-se o critério de agregação de fases, que nada mais é do que um procedimento que atribui um único conjunto de parâmetros aos eventos registrados nas três fases. Para a magnitude do evento considera-se a menor tensão residual. Para a duração, pode-se considerar um dos seguintes critérios: (i) agregação por união de fases, ou seja, a duração é dada pelo intervalo de tempo entre o instante em que o primeiro evento viola o limiar adotado e o instante em que o último evento volta ao estado normal a partir do limiar; (ii) agregação por parâmetros críticos, em que a duração do evento resultante corresponde à duração do evento mais longo e, finalmente (iii) agregação pela fase crítica, onde a duração do evento resultante corresponde à duração do evento de menor magnitude entre todas as fases.

Conforme (DUGAN, et al 2002), quanto as elevações de tensão, estas podem ser provenientes da desconexão de grandes blocos de carga ou da energização de bancos de capacitores, ou ainda estarem associadas à ocorrência de faltas na rede, dependendo do tipo de aterramento do sistema. Se o sistema for aterrado por elevados valores de impedância, durante uma falta fase-terra, haverá um aumento da tensão nas fases sadias. Nesse caso, alguns métodos podem classificar o evento como tendo dois tipos de fenômenos: afundamento e elevação de tensão simultaneamente (SABIN, et al 2014; COSTA, 2018).

Pesquisadores têm enfatizado que os AMTs são os eventos de maior frequência dentre as VTCDs, confirmados pelas literaturas técnicas que mostram uma maior taxa de ocorrência destes em relação às elevações de tensão (COSTA, 2018).

A origem dos AMTs está no aumento do fluxo de corrente pelas impedâncias da rede em curtos intervalos de tempo, devido às faltas (curtos-circuitos) em algum ponto do SEP, ou então partida de grandes motores ou energização de transformadores. A maioria das faltas é causada por condições climáticas adversas (chuvas, vendavais, descargas atmosféricas, etc.). Entretanto, também podem ocorrer em função de contato com árvores, de animais ou de outros objetos estranhos à rede. Por fim, alguns dos defeitos podem ser provocados por terceiros, tais como a colisão de veículos com postes, obras irregulares e até mesmo por vandalismo. (BOLLEN AND GU, 2006; IEEE Std 1564-2014; COSTA, 2018).

Dentre os distúrbios que afetam a qualidade da energia elétrica, o afundamento de tensão é o que causa maiores prejuízos em uma unidade industrial, devido à sensibilidade de cargas existentes nas instalações fabris (CARVALHO FILHO, J.M., 2000).

2.3. Sensibilidade de Cargas Frente às VTCDs

Os equipamentos podem ser divididos em três categorias quanto ao tipo de sensibilidade às VTCDs (DUGAN, et al 2018):

- Equipamentos sensíveis à magnitude do evento: neste tipo de carga a sensibilidade é determinada pela amplitude da tensão e não pela duração do distúrbio;
- Equipamentos sensíveis à magnitude e à duração do evento: estes equipamentos apresentam mau funcionamento, quando a amplitude da tensão permanece abaixo de determinados limites durante certo intervalo de tempo;
- Equipamentos sensíveis a outras características: alguns dispositivos são influenciados por fatores diferentes da magnitude e duração, como o deslocamento do ângulo de fase da tensão e o início dos eventos.

A Figura 2.3 mostra o gráfico do ângulo de deslocamento de fase.

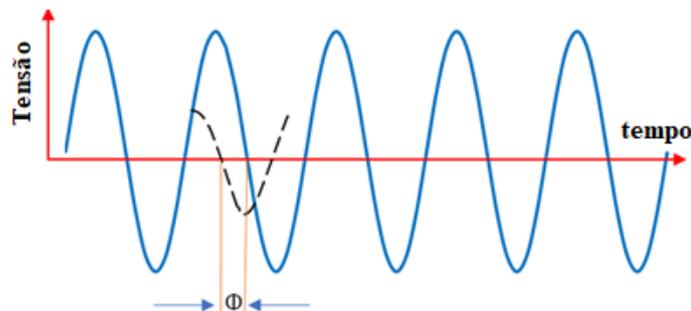


Figura 2.3 – Deslocamento do ângulo de fase durante um afundamento de tensão.
Fonte: Adaptado por (COSTA, 2018) de (HANZELKA, 2008).

Para entendimento do desvio do ponto de passagem por zero, Costa, 2018 considerou o modelo apresentado na Figura 2.4.

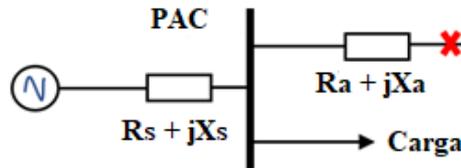


Figura 2.4 – Modelo do divisor de tensão para o estudo de fundamentos de tensão.
Fonte: (COSTA, 2018).

No caso de uma falta fase-terra ou trifásica no local indicado na Figura 2.3, o valor de ϕ no ponto de acoplamento comum (PAC) pode ser calculado a partir da equação (2.1) (BOLLEN; PING, JENKINS, 1996).

$$\phi = \text{tg}^{-1} \left(\frac{X_a}{R_a} \right) - \text{tg}^{-1} \left(\frac{X_s + X_a}{R_s + R_a} \right) \quad (2.1)$$

Onde:

R_s – é a resistência da impedância da fonte no PAC;

X_s – é a reatância da impedância da fonte no PAC;

R_a – é a resistência da impedância do alimentador no ponto de falta ao PAC;

X_a – é a reatância da impedância do alimentador no ponto de falta ao PAC;

Verifica-se que o deslocamento do ângulo de fase da tensão é devido a diferenças entre a relação X/R da fonte (X_s/R_s) e do alimentador sob falta (X_a/R_a) e a carga sofrerá o AMT.

O deslocamento do ângulo de fase da tensão (ϕ) pode afetar o desempenho de ASDs (*Adjustable Speed Drives*), pois estes utilizam o ponto de passagem por zero da tensão como referência para o ângulo de disparo de tiristores (BOLLEN et al, 1996; BOLLEN, 2000; BOLLEN, 2003; BOLLEN AND GU, 2006).

Em relação aos contadores, o desempenho depende do ponto de início dos eventos (SHAREEF et al., 2010; DJOKIC, MILANOVIC, KIRSCHEN, 2004; ESCRIBANO et al., 2012). Define-se como ponto de início do evento como sendo o ângulo de fase da tensão no instante em que o evento se inicia. Segundo (BOLLEN, 2000), pela Figura 2.5, observa-se um evento cujo ponto de início é de aproximadamente 275° .

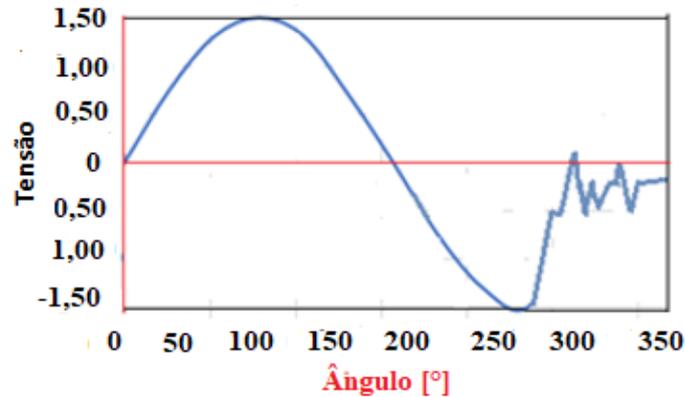


Figura 2.5 – Afundamento de tensão com ponto de início em aproximadamente 275°.
Fonte: Adaptado por (COSTA, 2018) de (BOLLEN, 2000).

A influência do sistema de proteção dos equipamentos é igualmente importante, pois o mesmo é configurado para que a carga se desconecte da rede se a tensão em seus terminais violar os limites seguros para operação do equipamento. Segundo (HALZENKA, 2008), durante uma VTCD, o equipamento pode ser desligado, não necessariamente por sensibilidade ao evento, mas devido à atuação da sua própria proteção.

Os CLPs, que são equipamentos de controle baseados em microprocessadores muito utilizados em indústrias, também são sensíveis à ocorrência de AMTs, podendo ter a perda de informações, linhas de programação, configurações e causar a parada de processos (HANZELKA, 2008).

Portanto, o impacto das VTCDs nas UCs depende da sensibilidade dos equipamentos instalados, de cada processo e dos sistemas de proteção e controle utilizados. Os efeitos podem envolver, segundo (BOLLEN, 2000; CARVALHO FILHO, 2000; BODNAR, 2016; COSTA, 2018):

- desligamento de ASDs;
- desatracamento das bobinas de contadores;
- falhas de comutação em pontes controladas;
- disfunção de controladores lógicos programáveis;
- variações de velocidade e torque em motores de indução, entre outros.

2.4. Curvas de Sensibilidade

Conforme Bollen (2000), Thomas Key em 1978 introduziu o conceito de curva de tolerância para avaliar a sensibilidade de equipamentos eletrônicos ao estudar a confiabilidade do suprimento de energia elétrica em instalações militares. O autor concluiu que as ocorrências dos AMTs poderiam prejudicar o funcionamento dos grandes computadores destas instalações.

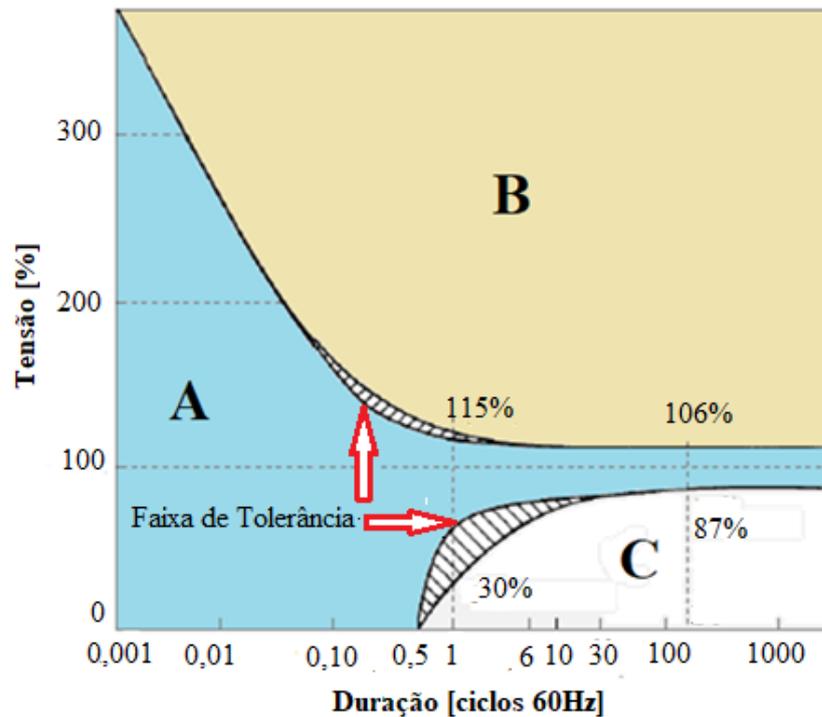
O avanço tecnológico de instrumentos para pesquisa e testes laboratoriais tem permitido, com melhor precisão, o levantamento da curva de sensibilidade de equipamentos em geral. As primeiras curvas de sensibilidade foram desenvolvidas nas décadas de 70 e 90.

Cabe aqui destacar a necessidade de mais estudos laboratoriais sobre as sensibilidades das cargas atuais, com tecnologias digitais embarcadas em equipamentos e sistemas operacionais, as quais são bem diferentes das cargas das décadas passadas. Estudos mais recentes (WELDEMARIAN et al,2016; WHU et al, 2016; JUNG, 2021) mostram em seus trabalhos que os equipamentos se tornaram mais sensíveis com o advento de novas tecnologias.

As curvas de sensibilidade têm a finalidade de mostrar o desempenho dos equipamentos frente às VTCDs, delimitando regiões de operação em função da magnitude e duração dos eventos, classificando-as em regiões de imunidades, susceptibilidade e de sensibilidade. Estas curvas são utilizadas na avaliação de sensibilidade das cargas e no cálculo de alguns indicadores, conforme são descritos nos subitens subsequentes.

2.4.1. Principais Curvas de Sensibilidade

Em função do estudo de Thomas Key (1978), foi criada a Curva CBEMA, como mostrada na Figura 2.6. O nome surgiu em referência a uma associação da época, *Computer and Business Equipment Manufacturers Association*, e os trabalhos realizados pelo grupo tinham o objetivo de descrever a tolerância dos computadores *mainframe* frente às VTCDs. Posteriormente tais curvas passaram a ser utilizadas também para outros tipos de equipamentos à base de microprocessadores.



As regiões de operação indicadas pelas letras A, B e C representam:

- Região A: região de imunidade ou de tolerância de tensão para computadores,
- Região B: região de susceptibilidade, com possibilidade de ruptura da isolação do equipamento devido à ocorrência de sobretensões transitórias e elevações de tensão;
- Região C: região de sensibilidade, com possibilidade de mau funcionamento e desligamento do equipamento em virtude da ocorrência de afundamentos de tensão.

A Curva ITIC, mostrada na Figura 2.7, foi desenvolvida na década de 90 pelo grupo ITIC (*Information Technology Industry Council*) que foi formado para revisar a curva CBEMA, de modo a representar de forma mais bem apropriada a curva de sensibilidade dos computadores da época e de outros equipamentos de TI (IEEE Std 1100-2005).

As regiões A, B e C são igualmente determinadas e definidas similarmente, conforme a Curva CBEMA, porém para outros tipos de equipamentos eletro-eletrônicos.

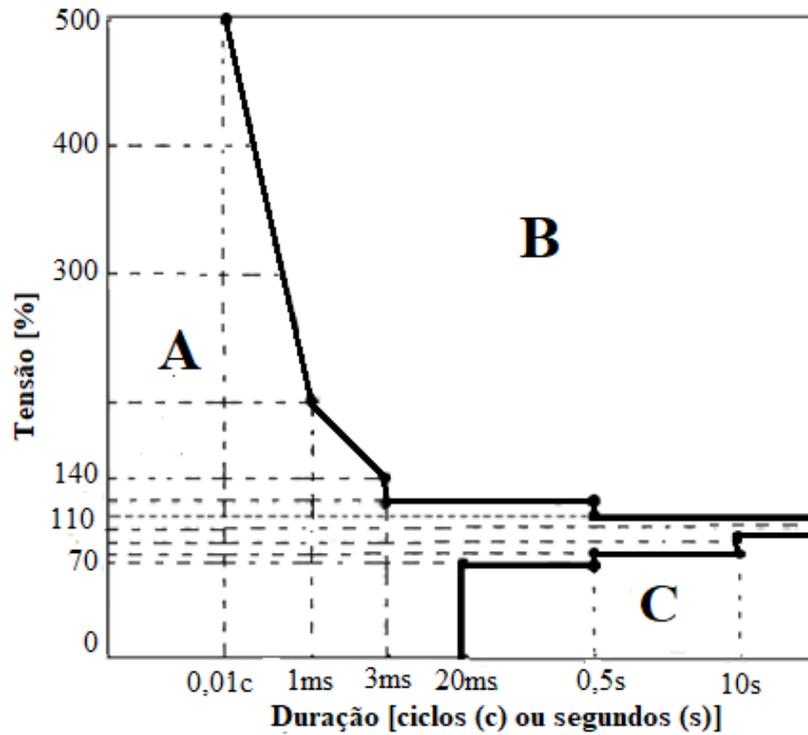


Figura 2.7 – Curva ITIC.

A curva SEMI F47, mostrada na Figura 2.8, foi concebida pela associação SEMI (Semiconductor Equipment Materials International), com o intuito de especificar a tolerância de equipamentos da indústria de semicondutores.

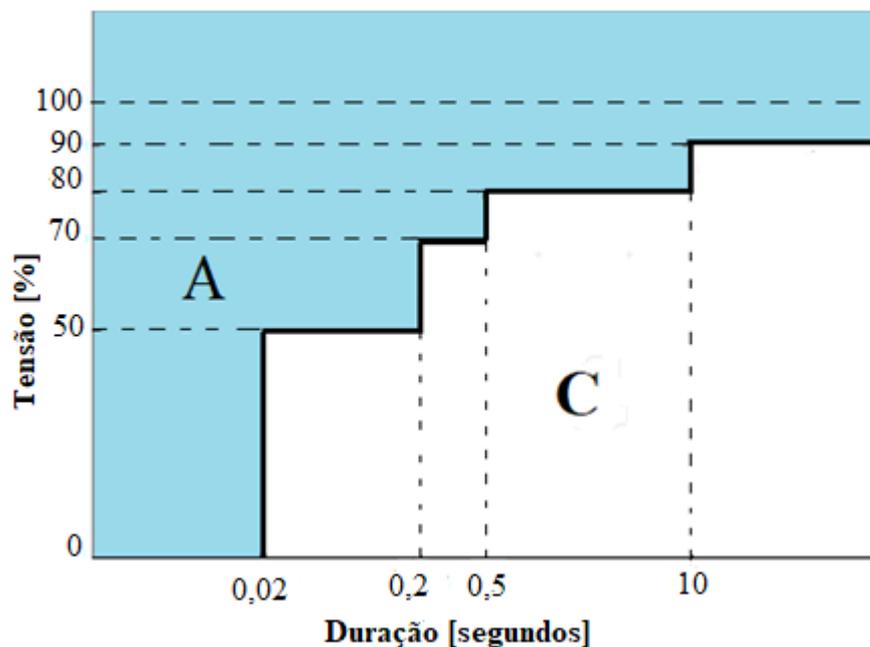


Figura 2.8 – Curva SEMI F47.

2.4.2. Aplicação das Curvas de Sensibilidade

As curvas apresentadas não apenas avaliam a sensibilidade em si de equipamentos, mas

também podem ser usadas para avaliar o produto ofertado pelas empresas de distribuição de energia elétrica no que diz respeito aos eventos de VTCDs. Assim um evento pode ser comparado a uma curva para avaliar se a magnitude de tensão está na região de imunidade ou se provocaria falhas dos equipamentos, neste caso demandando ações para a melhoria da rede ou emprego de algum outro método de mitigação (THALLAM et al., 2000).

Existem vários fatores relacionados à sensibilidade das cargas, muitos dos quais podem não ser extraídos de uma curva no plano magnitude versus duração. Portanto é necessária uma análise prévia das condições de comportamento de uma carga sob uma determinada condição operacional, devendo ser reavaliadas se aplicadas a uma condição diferente. Utilizando uma única curva, não é possível analisar, por exemplo, situações de desequilíbrio. Se somente a magnitude e a duração são levadas em consideração, podem ser que outras características importantes estejam sendo desconsideradas, as quais podem conduzir a um mau funcionamento de algumas cargas. Vale lembrar que tais curvas não são capazes de representar todos os tipos de equipamentos, pois foram concebidas para caracterizar a sensibilidade de certos tipos de equipamentos (THALLAM et al, 2000).

2.5. Sensibilidade de Equipamentos Utilizados na Indústria

Conforme supracitado a avaliação e o desempenho dos diversos tipos de carga frente às VTCDs, nem sempre podem ser representados por meio das curvas de sensibilidade ITIC, CBEMA e SEMI F47. Para tanto, o uso de curvas específicas para o equipamento analisado, obtidas a partir de testes laboratoriais, é uma condição ideal que apresenta resultados mais precisos (COSTA, 2018).

Nesta seção são mostrados alguns estudos sobre a sensibilidade de equipamentos tipicamente presentes em uma instalação industrial (GUPTA et al 2006 – IEE Transactions; ESCRIBANO et al., 2012; WELDEMARIAM et al., 2016), quais sejam os CLPs, contadores, computadores e os ASDs.

2.5.1. CLPs

Trata-se de um equipamento microprocessado que objetiva fazer as funções de controle, e são regidos por um conjunto de linhas de instruções que são estabelecidas pelo usuário. O CLP é composto de fonte de alimentação, unidade de processamento (CPU) e módulos de entradas e saídas de sinais, digitais ou analógicos (WU et al., 2016).

A fonte de alimentação fornece os níveis de tensão CC para o funcionamento da CPU e dos módulos. Uma topologia típica de fonte chaveada com modulação por largura de pulso (*Power Width Modulation* – PWM) é mostrada na Figura 2.9, a qual foi adaptada de (WU et al., 2016) por (COSTA, 2018).

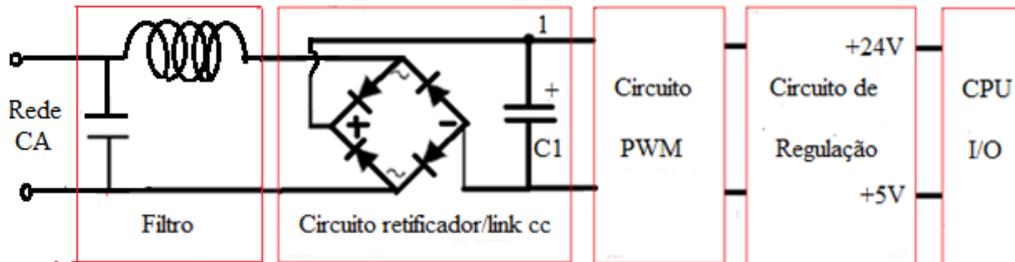


Figura 2.9 – Topologia típica da fonte de alimentação de um CLP.
Fonte: Adaptado por (COSTA, 2018) de (WU et al., 2016).

Na Figura 2.10 são mostradas as formas de onda da fonte de alimentação da rede CA $v(t)$ com tensão de pico V_p e, a tensão CC do retificador no ponto 1 da figura.

Se $|v(t)| > |v_{C1}(t)|$, o capacitor $C1$ é carregado até sua tensão igualar a tensão de pico da rede (V_p), negligenciando-se a queda de tensão nos diodos. Caso contrário, $C1$ descarrega até atingir um nível de tensão menor, voltando a ser recarregado somente quando $|v(t)|$ supera esse nível, e um novo ciclo de carga e descarga se inicia (Costa, 2018).

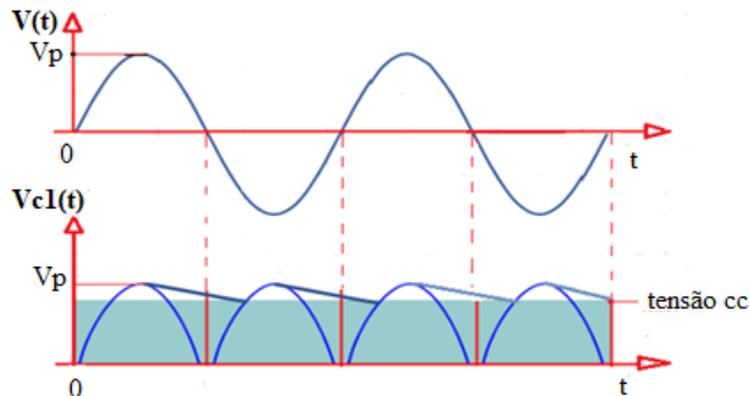


Figura 2.10 – Tensão da rede ($v(t)$) e tensão na saída do retificador.

Fonte: (COSTA, 2018).

Quando ocorre um afundamento de tensão há redução da tensão de pico da rede. Neste caso, o capacitor $C1$ recarrega com um valor menor do que V_p . Com isto, a tensão durante a sua descarga é menor e um novo estado de equilíbrio é estabelecido. Conseqüentemente, uma redução do nível de tensão CC ocorre, o que resulta em erros de comandos caso seja atingido a um patamar inferior ao nível mínimo de funcionamento da CPU, acarretando o desligamento

do equipamento (WU et al., 2016).

A Figura 2.11, adaptado por (COSTA, 2018) de (CIGRE/CIREN/UIE JOINT WORKING GROUP C4.110, 2010) mostra as curvas de sensibilidade obtidas através de testes em diversos CLPs, ilustrando o “pior caso” e o “melhor caso”:

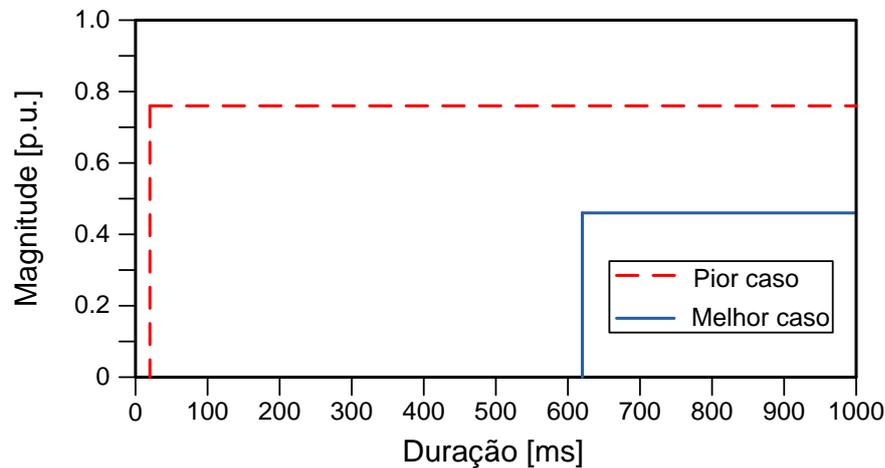


Figura 2.11 – Curvas de sensibilidade referentes a fonte de um CLP.

Fonte: Adaptado por (COSTA, 2018) de (Cigre/Cired/Uie Joint Working Group C4.110, 2010).

Previendo as consequências do mau funcionamento de um CLP, as fábricas desse tipo de equipamento implementam as funções de diagnóstico contínuo, pelo monitoramento da tensão de entrada (CA) ou de saída (CC) da fonte e, ao detectar uma falha, a CPU recebe esta informação, comandando então de maneira segura e controlada a parada do processo (CIGRE/CIREN/UIE JOINT WORKING GROUP C4.110, 2010).

Devido às características construtivas do CLP, no que tange à velocidade de processamento dos dados de processos, se a tensão CA é monitorada, o CLP pode reagir a eventos de curtíssima duração, como de um ciclo, podendo ser inapropriada a sua operação, devido à resposta do CLP ser muito rápida, principalmente se o equipamento puder manter o seu funcionamento por um período maior. Em contrapartida, se a tensão CC é monitorada, sua reação é mais lenta, pois o nível de tensão CC leva um tempo maior para cair devido à energia armazenada nos capacitores do link CC, o que melhora a suportabilidade do equipamento (CIGRE/CIREN/UIE JOINT WORKING GROUP C4.110, 2010).

Outra situação indesejável do CLP é com respeito à sensibilidade dos módulos, que podem afetar o desempenho de operação, devido às entradas digitais terem as características técnicas de respostas rápidas, ao detectar uma mudança de estado do dispositivo monitorado. Por conseguinte, as mudanças dos valores de entrada por AMTs são então detectadas rapidamente, fazendo com que o sistema de controle opere de uma condição “on” como “off”, ou vice-versa (COSTA, 2018; CIGRE/CIREN/UIE JOINT WORKING GROUP C4.110,

2010).

2.5.2. Contatores

O contator é um dispositivo eletromecânico muito utilizado nas indústrias. Ele permite o controle de cargas em um circuito de potência a partir de um circuito de comando (DJOKIC et al, 2004; ESCRIBANO et al, 2010 e 2012).

O equipamento é constituído de um núcleo de material ferromagnético composto de duas partes, uma móvel e outra fixa, este segundo contendo uma bobina elétrica, mantidas distantes pela ação de uma mola, conforme mostra a Figura 2.12.

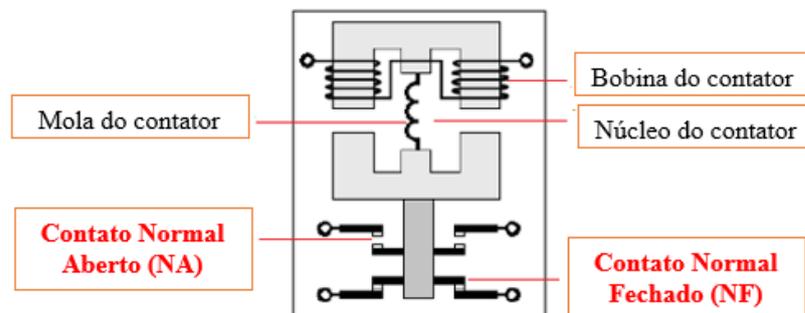


Figura 2.12 – Esquema básico de um contator.
Fonte: (COSTA, 2018).

Quando um determinado circuito de comando elétrico energiza a bobina, haverá a circulação de um fluxo magnético através do núcleo, fazendo com que a força magnética resultante supere a força da mola, atraindo a parte móvel na direção da parte fixa, comutando assim os contatos, ou seja abertura dos contatos NF – normalmente fechado e fechamento dos contatos NA – normalmente aberto.

Se ocorrer um AMT, haverá a diminuição do fluxo gerado pela bobina, reduzindo a força de atração, que mantém os contatos na posição de operação. Portanto, se a tensão residual for muito baixa, a força magnética será menor do que a força da mola, fazendo com que os contatos retornem para a posição de origem, desligando carga.

A curva de sensibilidade de contatores para diversos valores de ponto de início é mostrada na Figura 2.13, adaptado por (COSTA, 2018) de (DJOKIC et al, 2004).

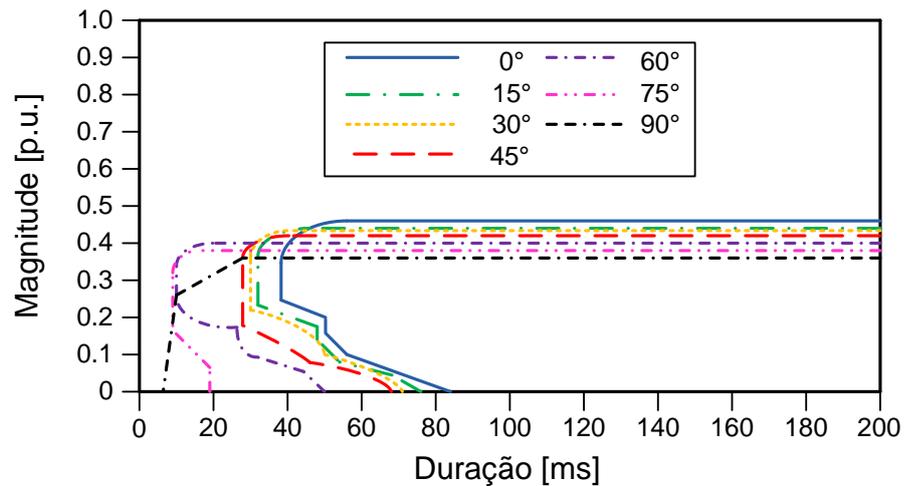


Figura 2.13 – Curvas de sensibilidade de um contator para diferentes pontos de início.
Fonte: Adaptado por (COSTA, 2018) de (SHAREEF, 2010).

Para durações mais curtas, maior será a sensibilidade do contator, quando o evento se inicia em 90° . Devido a bobina apresentar um comportamento indutivo, a corrente que flui por ela estará 90° atrasada em relação à tensão aplicada em seus terminais. Quando a tensão é máxima, a corrente é mínima e instantaneamente, haverá a redução da força magnética. Entretanto, se a tensão for mínima quando o evento se inicia, a corrente será máxima reduzindo gradualmente a força magnética, de forma que possibilite o prolongamento do tempo em que o dispositivo poderá suportar o evento.

Nota-se na Figura 2.13 que, dependendo do ângulo do ponto de início do evento, tem-se a duração e magnitude de comportamentos distintos, mostrando que a magnitude pode variar de 0,35 pu a 0,45 pu, e a sua duração respectiva também varia para cada ângulo considerado como ponto de início (KANOKBANNAKORN et al, 2011).

2.5.3. Computadores

Esse tipo de equipamento é, nos dias de hoje, uma ferramenta extremamente importante, principalmente nas aplicações industriais, pois, além das aplicações convencionais, serve também de interface homem máquina – IHM.

Um dos motivos do uso deste equipamento é que ele oferece ao operador uma visualização da condição operacional da planta em tempo real: a operação, controle e monitoramento do processo industrial.

A capacidade de processamento do computador está cada vez mais rápida, devido ao rápido desenvolvimento dos processadores.

A disseminação do uso deste equipamento está atrelada com a redução de custos de

fabricação, além da sua aplicação em uma grande variedade de tarefas, não só nas atividades industriais, mas em todos os setores da economia.

Entretanto, um computador utiliza uma fonte chaveada para o seu funcionamento. Durante um AMT, o seu desempenho operacional é similar ao do CLP.

Por conseguinte, um AMT faz com que haja a redução da tensão de saída da fonte, ou seja, se a tensão CC for reduzida a um nível inferior ao mínimo necessário para o funcionamento dos componentes do computador, vai acarretar travamentos nas tarefas executadas, o que gera problemas de segurança operacional nas atividades desempenhadas pelo mesmo (COSTA, 2018).

Se por um lado a energia armazenada nos capacitores durante a operação normal pode conseguir manter a tensão da fonte durante um determinado tempo, suportando eventos de curtas durações, por outro lado, ao ser restabelecida a tensão da rede, haverá o recarregamento nos capacitores do link CC.

Consequentemente, uma elevada corrente é drenada no circuito, podendo haver a queima dos componentes, bem como a atuação de algum dispositivo de proteção, em caso de se ter computadores conectados ao mesmo circuito (CIGRE/CIREN/UIE JOINT WORKING GROUP C4.110, 2010; ESCRIBANO, et al., 2012).

A proporção dos efeitos provocados por um AMT no computador está relacionada ao tipo de atividade ou tarefa realizada por este no processo.

Para usos em aplicações industriais de processos contínuos, que são em tempo real, as consequências são mais graves, do que em aplicações de operações off-line, que impacta em proporção menor, como a perda de arquivos em construção, caso estes não estejam salvos antes da falha, com a necessidade de reinicializar o computador.

Além disso, caso ocorra um AMT, não necessariamente haverá o desligamento do computador, mas pode ocorrer o travamento de telas e tarefas, provocar lentidão operacional e até corromper arquivos, bem como a perda de resposta de periféricos (CIGRE/CIREN/UIE JOINT WORKING GROUP C4.110; DJOKIC et al. – *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 20, n. 1, p. 375–383, 2005).

Os autores (DJOKIC et al. 2005 – *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 20, n. 1, p. 375–383) elaboraram a curva de sensibilidade, mostrada pela Figura 2.13, adaptada por (COSTA, 2018), baseando-se em 3 tipos de comportamentos operacionais diferentes: reinicialização da máquina; travamento da operação de cópia de dados de um CD-ROM para o disco rígido; e bloqueio do sistema operacional.

É importante salientar que ao considerar apenas o critério de reinicialização ou

desligamento, a representação da sensibilidade do equipamento (menos sensível) pode estar sendo equivocada.

Nas aplicações de controle contínuo do processo tal procedimento é de grande risco (DJOKIC et al., 2005 – *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 20, n. 1, p. 375–383) pois o bloqueio do sistema operacional ou até mesmo o travamento da operação de leitura e escrita pode provocar os mesmos efeitos quando acarreta ao computador o seu desligamento.

As curvas CBEMA e ITIC, figuras 2.6 e 2.7, regiões C, respectivamente, mostram as similaridades dessas curvas com o levantamento de curva realizado por (DJOKIC et al. – *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 20, n. 1, p. 375–383, 2005), conforme mostra a figura 2.14.

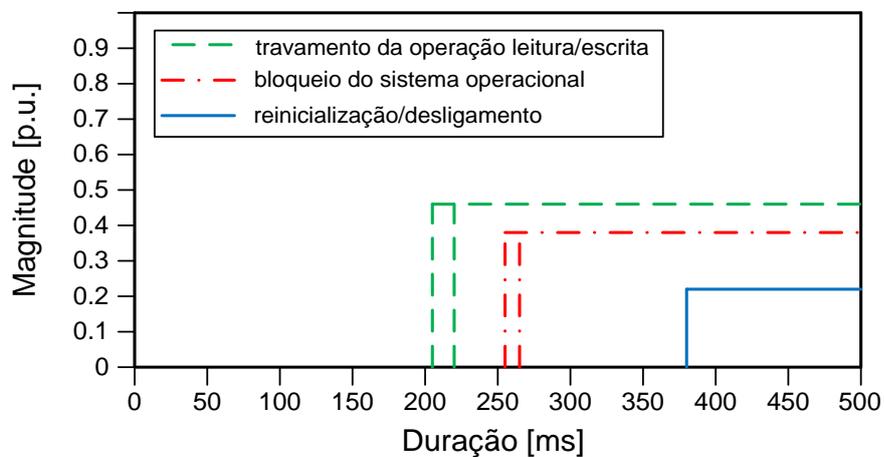


Figura 2.14 – Curvas de sensibilidades de um computador para diferentes critérios de falha.
Fonte: Adaptado por (COSTA, 2019) de (DJOKIC, et al, *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 20, n. 1, p. 375–383, 2005).

2.5.4. Conversores de Frequência

Segundo (DJOKIC et al., 2005 – *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 20, n. 1, p. 494–505) os conversores de frequência, ou simplesmente ASD são equipamentos largamente aplicados nas indústrias de várias formas, mas geralmente para fazer o acionamento de motores de indução.

Além disso, trazem algumas vantagens operacionais tais quais a melhora no controle do processo, a redução no estresse térmico e mecânico durante a partida e frenagem dos motores. Em aplicações que requerem torque variável ou velocidades reduzidas, trabalham de forma a obter a eficiência no aproveitamento de energia elétrica.

Os ASDs têm características técnicas que transformam a tensão da rede, de amplitude e frequência fixas, em uma tensão de amplitude e frequência variáveis e, desta forma permitem controlar a velocidade e o torque do motor.

A sua topologia em geral é constituída de um retificador em ponte, *link* CC e um inversor

composto por IGBTs – *Insulated Gate Bipolar Transistors*, conforme mostra a Figura 2.15, adaptada por (COSTA, 2018) de (CIGRE/CIRED/UIE JOINT WORKING GROUP C4.110, 2010).

Segundo (ESCRIBANO et al, 2012) é necessário verificar a especificação técnica para a escolha de um ASD, principalmente no que se refere ao seu desempenho perante um AMT, além de outras necessidades de operação do processo.

No mercado os fabricantes disponibilizam 2 tipos de inversores comerciais, escalar e vetorial. Este último serve para aplicações que exijam controles mais específicos de velocidade e frenagem de motores e fornecem na sua especificação técnica, o tempo em que o equipamento consegue suportar um AMT.

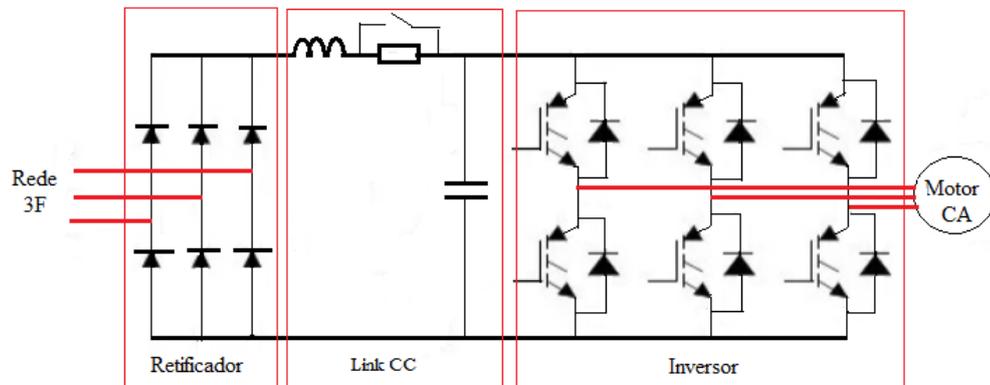


Figura 2.15 – Topologia simplificada de um conversor de frequência.

Fonte: Adaptado por (COSTA, 2018) de (Cigre/Cired/Uie Joint Working Group C4.110, 2010).

Alguns processos requerem um controle preciso de certas variáveis como temperatura, pressão ou vazão, não tolerando qualquer perda de controle, mesmo por um curto intervalo de tempo. Nesses casos, é necessária a escolha de um equipamento que suporte determinada condição de afundamento de tensão.

Alguns deles conseguem, através do *link CC* e de configuração e programação, suportar até 50% de queda da tensão de alimentação, durante 500 ms, significando a grande maioria dos ASDs vetoriais.

Quanto ao desempenho de um equipamento trifásico, diferentes combinações de tensão nas três fases podem ter diferentes efeitos na sua operação (CIGRE/CIRED/UIE JOINT WORKING GROUP C4.110, 2010; DJOKIC et al. – *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 20, n. 1, p. 494–505, 2005).

Considerando que a maioria das VTCDs é causada por faltas no sistema elétrico, pode-se limitar o número de combinações possíveis, dependendo do número de fases nas quais ocorreu a redução da tensão. Podem, portanto, serem definidas curvas de sensibilidade para

cada tipo de afundamento de tensão, tipos I, II e III (COSTA, 2018), o que permite uma avaliação mais precisa do desempenho do equipamento. Considera-se:

tipo I - apenas uma tensão tem decréscimo em magnitude, as outras duas permanecem inalteradas;

tipo II - duas tensões têm decréscimos em magnitude e a outra permanece inalterada;

tipo III - as três tensões trifásicas sofrem alterações iguais em magnitude.

O autor (DJOKIC et al., 2005 – *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 20, n. 1, p. 494–505) salienta que se os testes forem realizados em uma única fase por vez (tipo I), a sensibilidade do equipamento pode ser subestimada, enquanto se a aplicação de eventos de mesma magnitude e duração nas três fases são feitas simultaneamente (tipo III), pode levar a uma avaliação sobrestimada da sua sensibilidade.

A) Curvas de sensibilidade para os eventos tipo I e tipo II (COSTA, 2018)

O comportamento dos ASDs referentes aos eventos tipo I e tipo II é mais complexo do que para eventos tipo III. Caso ocorra uma redução da tensão em apenas uma das fases, a ondulação da tensão CC vai aumentar e fluirão através de cada diodo da ponte retificadora diferentes valores de correntes. Nesta situação o equipamento poderá suportar o evento, somente se a tensão não cair abaixo do valor considerado na proteção de subtensão e, ao mesmo tempo, a proteção de sobrecorrente não seja ativada.

As Figuras 2.16 e 2.17 adaptadas de (DJOKIC et al., 2005 – *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 20, n. 1, p. 494–505) por (COSTA, 2018) apresentam curvas de sensibilidade obtidas de conversores de frequência, aos eventos do tipo II e tipo I, respectivamente, sendo que durante os testes, os motores foram acionados em condições nominais e a tensão nas fases, em conformidade ao seu valor nominal foi ajustada para se manter em 1 p.u.

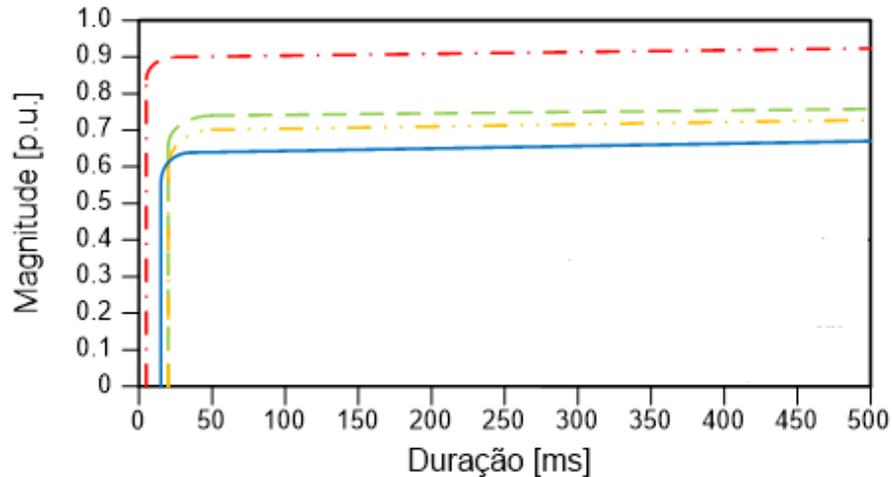


Figura 2.16 – Curvas de sensibilidade de conversores de frequência: eventos tipo II.

Fonte: Adaptado por (COSTA, 2018) de (DJOKIC et al. - *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 20, n. 1, p. 494–505, 2005).

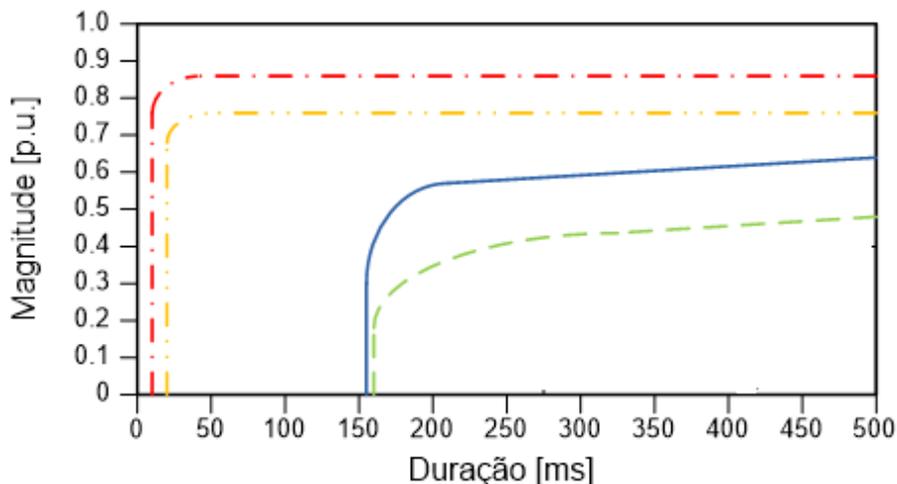


Figura 2.17 – Curvas de sensibilidade de conversores de frequência: eventos tipo I.

Fonte: Adaptado por (COSTA, 2018) de (DJOKIC et al. - *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 20, n. 1, p. 494–505, 2005).

B) Curvas de sensibilidade para os eventos tipo III

Os capacitores pertencentes ao link CC se descarregam, reduzindo assim o nível de tensão, se ocorrer um AMT. Caso esta tensão CC caia abaixo do valor considerado na proteção de subtensão, haverá o desligamento do ASD (CIGRE/CIREN/UIE JOINT WORKING GROUP C4.110, 2010).

Entretanto, após o evento, uma elevação da corrente drenada da rede poderá ocorrer, devido à reaceleração dos motores e à recarga dos capacitores. Nesta condição, há a atuação da proteção de sobrecorrente do equipamento, podendo danificar e ou queimar seus componentes (CIGRE/CIREN/UIE JOINT WORKING GROUP C4.110, 2010).

Outra consideração a fazer é a influência da condição de carga do motor controlado

(DJOKIC et al., 2005 – *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 20, n. 1, p. 494–505). Se a carga trabalha com um torque reduzido, que é o caso de extrusoras de polímeros de uma indústria têxtil, a energia requerida pelo motor será menor. Portanto, durante um afundamento de tensão, com a tensão no link CC reduzindo mais lentamente, haverá um tempo maior para atingir o valor definido na proteção de subtensão, o que melhora a capacidade do equipamento de suportar AMTs. A Figura 2.18 mostra a curva de sensibilidade do ASD considerando eventos do tipo III e diferentes níveis de carregamento, adaptado por (COSTA, 2018) de (DJOKIC et al., 2005 – *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 20, n. 1, p. 494–505).

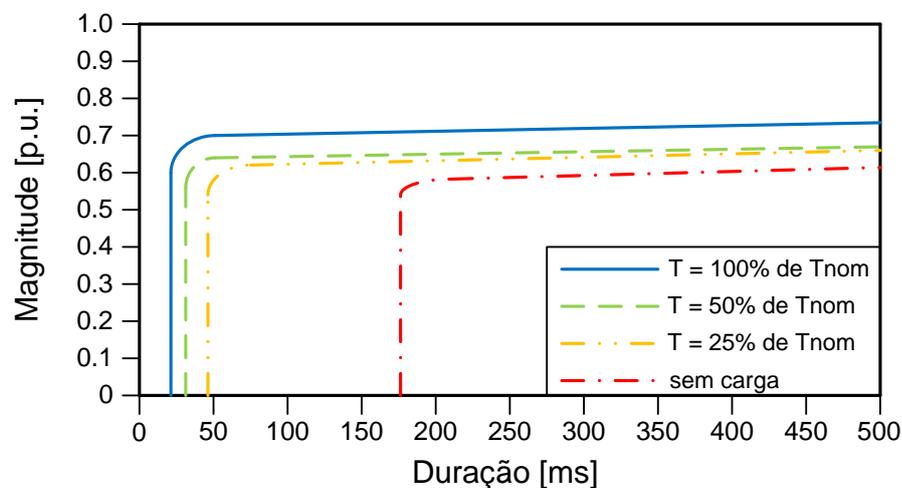


Figura 2.18 – Curvas de sensibilidade de conversores de frequência – torques diferentes: eventos tipo III.
Fonte: Adaptado por (COSTA, 2018) de (DJOKIC et al *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 20, n. 1, p. 494–505, 2005).

Vale lembrar que houve uma evolução nos ASDs, considerando este comportamento da tensão no link CC. Alguns fabricantes conseguiram conceber um ASD, com um banco de capacitores capaz de armazenar maior energia durante a operação normal do ASD. Com isto, o ASD consegue suportar um AMT de até 50% em sua alimentação, com um tempo de descarga do capacitor de até 0,5 segundo.

2.5.5. Observações Complementares

Em relação à sensibilidade dos equipamentos, é complexo definir quais as características apropriadas do seu desempenho, pois este depende do projeto de cada fabricante e da sua aplicação no processo industrial, além das tecnologias empregadas em cada equipamento.

Para o emprego dos equipamentos eletroeletrônicos no processo, é importante verificar junto ao fabricante do equipamento, as características técnicas de funcionamento que são relevantes, como já citado anteriormente, do nível de suportabilidade do *link* CC e que podem

impactar na operação do processo.

Para o caso de ASD, outra importante consideração se refere ao deslocamento do ângulo de fase de tensão dos eventos que são também, exemplos de características técnicas importantes e que são encontradas na literatura técnica (COSTA, 2018; WALDAMERIAM et al., 2016; DJOKIC et al., 2005; ESCRIBANO et al, 2012).

O impacto das VTCDs sobre os consumidores varia de uma atividade para outra, sendo a atividade industrial a mais afetada, devido aos elevados custos de interrupção associados à parada dos processos produtivos.

É importante salientar que os equipamentos de um mesmo tipo de concepção não possuem necessariamente o mesmo padrão de comportamento de operação (JUNG, 2021), podendo haver variações significativas na sua sensibilidade frente a esses fenômenos.

Isto é verdade em função de diferentes modelos e fabricantes, características construtivas de hardware, configurações de software, elementos opcionais e, no caso dos equipamentos trifásicos, ainda há o efeito dos diferentes tipos de afundamentos de tensão, ou seja, tipos I, II e III (COSTA, 2018), já evidenciados anteriormente.

2.6. Considerações Finais

Este capítulo foi dedicado à conceituação de VTCDs e à caracterização da sensibilidade de cargas frente a este distúrbio. Foram mostradas as curvas de sensibilidades clássicas da literatura (CBEMA, ITIC e SEMI F47) que desempenharam papel importante no período que foram criadas, porém atualmente tem pouca aplicabilidade devido à evolução dos equipamentos. Apresentaram-se também as curvas de sensibilidade dos principais equipamentos utilizados em ambiente industrial, que pesquisadores obtiveram por meio de teste em laboratório.

Destaca-se que o principal objetivo deste capítulo foi mostrar que os dispositivos normalmente usados nas indústrias possuem sensibilidade com relação às VTCDs, e que dependendo da magnitude e da duração do distúrbio, podem provocar uma parada do processo e conseqüentemente acarretar prejuízos financeiros para o consumidor industrial.

3. OBTENÇÃO DE CUSTOS DE PARADAS DE PROCESSOS INDUSTRIAIS DEVIDO A AMTs

3.1. Considerações Iniciais

Neste capítulo são apresentadas as principais metodologias utilizadas para obtenção dos custos de paradas de processos industriais causadas por AMTs. Tais eventos são atualmente os de maior preocupação para os consumidores, concessionárias e pesquisadores, pois são os eventos mais recorrentes no sistema elétrico (COSTA, 2018).

Os principais trabalhos pesquisados nas duas últimas décadas e que foram apresentados no item 1.3, dentro os quais estão (LAMEDICA et al, 2001; HEINE et al (2003); QUAIA et al (2003); GUPTA et al, 2005; MILANOVIC, 2006-Parte I e 2006-Parte II; GOSWAMI et al (2008), KJOLLE et al (2008); BELCHIOR et al (2008); CARVALHO FILHO et al (2009), CEBRIAN et al, 2010; GOSWAMI et al (2014); SALIM et al (2014); SALIM et al. (2014); CHEN et al, 2016; BEHERA et al, 2019; SOMRAK et al, 2019; HE et al, 2020), revelam diversas metodologias, cada uma com as suas especificidades atreladas às características de operação de cada tipo de processo ou subprocesso e suas interconexões com as cargas sensíveis.

Existem basicamente três metodologias para a obtenção da frequência, amplitude dos eventos, além da duração de AMTs, os quais determinam as paradas de processo, quais sejam: (i) simulações, (ii) medições e (iii) pesquisa direta. Nas próximas subseções são apresentadas algumas destas metodologias.

3.2. Formulação dos Custos de Paradas de Processos Industriais

Inicialmente deve-se mencionar que os itens que compõem as perdas na formulação de custos são abrangentes e dependem das características de cada atividade industrial, desde o regime de trabalho de produção, do valor agregado do produto, da perda da matéria prima, do produto inacabado, das penalidades pelo não cumprimento do contrato na entrega do produto, dentre outras considerações.

Segundo (COSTA, 2003) os custos de interrupção dependem da atividade de cada tipo de consumidor e de um conjunto de fatores, a saber: (i) dependência do consumidor quanto a eletricidade; (ii) a natureza e o momento do distúrbio, (iii) o valor monetário da atividade interrompida.

A título de exemplo, (SULLIVAN et al, 1997) apresentam em seus estudos que aproximadamente 15% do prejuízo com matéria prima, durante uma interrupção de 4hs,

acontece dentro dos primeiros segundos da interrupção, sendo que 60% do prejuízo ocorre na 1ª hora de desligamento.

De acordo com (COSTA, 2003), o custo de produtos e materiais danificados – SPC ocorrido anualmente pela interrupção em um processo produtivo pode ser calculado através da equação (3.1).

$$SPC = \sum_{i=1}^f [v \cdot t_i + m \cdot t_i] \cdot \frac{Q}{h} \quad (3.1)$$

Onde:

Q – valor anual total de material danificado ou produto que teve sua produção interrompida (R\$), a ser acrescentado no custo final devido a qualquer problema de produção, inclusive devido ao afundamento de tensão;

h – tempo total de operação, em horas, em um ano típico;

f – frequência de ocorrência de AMTs que gerem interrupção do processo em um ano típico;

t_i – duração do distúrbio i em horas;

v – custo médio das perdas de produtos e materiais (R\$), devido a ocorrências de afundamentos de tensão, em percentual de Q, ao longo de um ano típico, calculado a partir da equação (3.2);

m – custo médio da perda em outros setores (R\$), devido a ocorrências de afundamentos de tensão, em percentual de Q, ao longo de um ano típico, calculado a partir da equação (3.3).

$$v = \frac{\sum_{i=1}^f v_i}{f} \quad (3.2)$$

$$m = \frac{\sum_{i=1}^f m_i}{f} \quad (3.3)$$

Onde:

v_i – custo das perdas de produtos e materiais devido a um distúrbio i (R\$);

m_i – custo das perdas em outros setores devido a um distúrbio i (R\$).

Segundo (COSTA, 2003) a produção interrompida resulta em custo na forma de capital e mão-de-obra ociosa (IFC – R\$), conforme mostra a equação (3.4).

$$IFC = \sum_{i=1}^f [\varepsilon \cdot t_i + \bar{\varepsilon} \cdot \gamma_{ti}] \cdot \frac{Q}{h} \quad (3.4)$$

Onde:

ε – fração da produção normal não produzida durante o desligamento (ton);
 $\bar{\varepsilon}$ – fração da produção normal não produzida durante o religamento (ton);
 Γ_{ti} – tempo de religamento de um processo interrompido de duração t_i (h).

(COSTA, 2003) observa que é importante considerar que nas indústrias que não trabalham as 24 horas do dia, há a possibilidade de recuperação da parte da produção perdida, através do regime de hora extra, o que em geral, vai acrescentar custos extras, podendo de alguma forma inviabilizar este tipo de alternativa devido as obrigações trabalhistas.

As horas extras de produção necessárias para esta recuperação (h_0) são dadas pela equação (3.5), onde ρ é a fração da produção perdida com a interrupção em toneladas.

$$h_0 = \rho \sum_{i=1}^f [v \cdot t_i + (t_i + \gamma_{ti}) \cdot (\varepsilon \cdot t_i + \bar{\varepsilon} \cdot \gamma_{ti})] \quad (3.5)$$

Uma vez optando-se pela decisão de trabalho em regime de hora extra (HE) para recuperar a perda da produção, o custo dessa recuperação (OTC – R\$: é o custo da recuperação da fração da produção perdida ρ com hora extra) pode ser calculado, segundo a equação (3.6).

$$OTC = h_0 \cdot \frac{\bar{\omega}}{\omega} \cdot \frac{L}{h} \quad (3.6)$$

Onde:

L – valor de mão de obra anual a ser acrescentado (R\$);

$\bar{\omega}$ – porcentagem do salário em hora extra;

ω – porcentagem do salário em hora normal.

Finalmente, a formulação do custo da interrupção do consumidor (OC – R\$) anual devido a afundamentos de tensão é determinado com base na equação (3.7).

$$OC = SPC + IFC + OTC - E + DIV \quad (3.7)$$

Onde:

E – economia de energia durante a interrupção do processo (R\$);

DIV – custos diversos (R\$) não considerados nas equações anteriores e consequentes da ocorrência de um distúrbio. São valores específicos de cada processo.

Com esta proposta de formulação de custo, (COSTA, 2003) oferece uma possibilidade de estimar os custos de interrupções industriais devido aos AMTs.

Outra forma de estimação dos custos devido à AMTs é apresentada em (WATANABE, 2010). Neste trabalho são considerados apenas os custos diretos, como perda de produção e

queima de equipamentos e desconsiderados os custos indiretos, como a insatisfação do cliente e a depreciação dos equipamentos.

Quando ocorre um AMT, o processo do consumidor pode se comportar de 3 maneiras distintas: interrupção total, operação inadequada (falha parcial) ou operação normal.

No caso de interrupção total, algumas parcelas de custos são levadas em conta, tais como: (i) custo da parada de produção; (ii) queima de equipamentos; (iii) receita de matéria-prima danificada; (iv) custo para recuperação da produção perdida e (v) multas por atraso de entrega. Cada uma destas parcelas tem a sua própria formulação.

(i) Custos de parada de produção: este custo está diretamente relacionado à produção interrompida devido ao distúrbio e pode ser calculado pela equação (3.8).

$$C_{\text{par}} = (\text{VPF} \cdot \text{nf} - \text{CMP} - \text{CE} + \text{SMO} \cdot \text{nmo}) \cdot \text{tpar}_{\text{tot}} \quad (3.8)$$

Onde:

C_{par} – custo da parada da produção (R\$);

VPF – valor do produto final (R\$);

nf – número de produtos finais por hora;

CMP – custo de matéria-prima utilizada por hora (R\$/h);

CE – custo da energia elétrica por hora (R\$/h);

SMO – salários médios dos funcionários ociosos ligados à produção por hora (R\$/h);

nmo – número de funcionários que trabalham na produção;

tpar_{tot} – tempo total de parada (tempo de reparação e de religamento – h).

(ii) Queima de equipamentos (QE – R\$): o custo dos equipamentos queimados corresponde ao valor dos novos equipamentos subtraído do valor da venda dos equipamentos danificados;

(iii) Receita de matéria-prima danificada ou retrabalhada (RMP – R\$): a matéria-prima que está sendo processada durante o distúrbio pode se danificar. Caso isso ocorra, a matéria-prima danificada pode ser retrabalhada (R – R\$), caso seja viável recuperar a qualidade da matéria-prima ou produto. Caso contrário, o produto é descartado, e considerado como sucata ou matéria-prima danificada. Essa quantificação de receita é calculada pela equação (3.9).

$$\text{RMP} = \begin{cases} \text{R} = \text{VPF} \cdot \text{nr} - (\text{CE} + \text{SMO}) \cdot \text{tret} \\ \text{CPMD} \end{cases} \quad (3.9)$$

Onde:

nr – número de produtos ou matérias primas retrabalhados;
 SMO – custo da mão-de-obra por hora (R\$/h);
 tret – tempo para retrabalho em horas;
 CMPD – preço da matéria-prima descartada (R\$).

(iv) Custo para recuperação da produção perdida (CR) – RS): se possível, o processo industrial poderá operar em hora-extra, a fim de se recuperar a produção perdida e calculado pela equação (3.10).

$$CR = (CMP + CE + \gamma \cdot CMO) \cdot trec \quad (3.10)$$

Onde:

γ – quociente entre o salário da hora extra da mão-de-obra e o salário normal;
 trec – tempo para recuperação da produção (h).

As indústrias que trabalham em regime integral, vinte e quatro horas por dia, serão consideradas impossibilitadas de recuperar através do regime de horas extras.

(v) Multas por atraso de entrega (M – R\$): deve ser calculado conforme as cláusulas estabelecidas pelo contrato firmado entre o consumidor industrial e seus clientes.

Com todas as parcelas apuradas, o custo de interrupção do consumidor (CC – RS) é obtido pela equação (3.11).

$$CC = C_{par} + QE - RMP + CR + M + CA - EA \quad (3.11)$$

Onde:

CA – custos adicionais (R\$);

EA – economias adicionais (R\$).

RMP – receita matéria prima danificada (negativa pois recupera-se pelo retrabalho)

É importante salientar que formulação proposta (WATANABE, 2010) tem o objetivo de auxiliar os consumidores industriais na determinação dos custos devido afundamentos de tensão e deve ser customizado de acordo com as especificidades de cada processo produtivo.

O trabalho (VEGUNTA, 2011) descreve uma metodologia para estimar o custo de parada de processo devido a ocorrência de afundamentos de tensão, intitulado CODT (*cost of downtime*), formulado conforme equação (3.12).

$$CODT = CD + CR + CO \quad (3.12)$$

Onde:

CD – custo direto (USD);
CR – custo de repartida (USD);
CO – custo oculto (USD).

(i) Custo Direto: é o custo associado a produção até o momento em que houve a interrupção do processo. Este custo é composto por alguns componentes típicos que são:

- Custos de matéria-prima: envolve o prejuízo associado a quantidade de desperdício de matéria-prima;
- Custos de mão de obra, corresponde ao valor monetário da mão de obra trabalhada até a parada do processo.
- Custos por perda de oportunidades devido ao atraso no cronograma de produção e que, conseqüentemente, levará a um impacto nas vendas ou fluxo de receita.

(ii) Custos de Repartida: esta parcela é composta pelos custos de danos acumulados contendo:

- Custos de recrutamento de empreiteiros;
- Perda de material de produção e de equipamento;
- Custo de reparo e reposição;
- Custo de mão de obra de horas extras para recuperar do tempo de produção perdida.

(iii) Custos ocultos: esses custos não são prontamente percebidos ou observados, como perda de imagem que não se pode medir, pois é a princípio intangível, mas que geralmente resultam em danos ou perdas importantes. Por exemplo, uma forma de considerar este custo é periodicamente realizar pesquisas (*survey*) junto aos clientes. Podem ser considerados nesse processo a diminuição da reputação e competitividade da empresa, bem como os efeitos de insatisfação dos clientes. Tais elementos não podem ser percebidos imediatamente, mas causam perdas de negócios ou receitas.

Portanto, para estimar o CODT deve-se incluir tanto os custos identificáveis quanto o custo oculto. Os custos identificáveis, geralmente são chamados de custos diretos. Os custos ocultos são geralmente referidos como custos indiretos, conforme já explicitado. Considerando as parcelas mencionadas anteriormente, chega-se ao valor do CODT estimado, utilizando-se a equação (3.13).

$$\text{CODT} = (X + Y) + Z + H \quad (3.13)$$

Onde:

$\left\{ \begin{array}{l} X - \text{custo da mão de obra dos empregados afetados} \\ Y - \text{perda do produto/serviço devido à interrupção} \end{array} \right. \rightarrow \text{Custos diretos (USD)}$
 Z – custo de repartida (R\$);
 H – custo oculto (R\$).

Os custos X, Y, Z e H podem ser obtidos aplicando-se as equações (3.14) a (3.17).

$$X = A \cdot B \cdot C \quad (3.14)$$

$$Y = E \cdot F \quad (3.15)$$

$$Z = G \cdot I \cdot C + J \cdot F \quad (3.16)$$

$$H = K \cdot L \quad (3.17)$$

Onde:

A – número de funcionários afetados;
 B – duração da interrupção (horas);
 C – salários dos funcionários (custo horário + custos indiretos do funcionário por hora R\$/h);
 E – produtos + serviços perdidos por interrupção (USD);
 F – custo por produto + serviço perdido ou reparado (USD);
 G – tempo gasto para reiniciar (horas);
 I – número de funcionários envolvidos na repartida;
 J – equipamento danificado devido a parada (USD);
 K – número de elementos de custos ocultos;
 L – custo oculto por elemento (USD/n° elementos ocultos).

Na literatura técnica há outras propostas para quantificação de custos devido a AMTs que não serão abordadas neste documento (LAMEDICA et al, 2001; MCGRANAGHAN et al, 2002; QUAIÁ et al, 2003; GUPTA et al, 2005; MILANOVIC Partes I e II et AL, 2006; GOSWAMI, A.K, 2008; KJOLLE et al, 2008; CARVALHO FILHO et al, 2009; SALIM et al, 2014; CHEN et al, 2016; BEHERA et al, 2019; HE et al, 2020).

3.3. Metodologias para Obtenção dos Parâmetros de AMTs

3.3.1. Realização de Medições

Em (ALVES et al, 2003) comentam que existem vários métodos propostos para a caracterização dos afundamentos de tensão e que para a obtenção de dados estatísticos confiáveis através de medições, exige longos períodos de monitoramento, podendo se tornar

impraticável; consideraram em seus estudos a caracterização clássica, baseada nos valores de amplitude e duração da menor tensão remanescente entre as três fases.

A Tabela 3.1 ilustra o período de monitoramento necessário, em função do número esperado de afundamentos de tensão, além do grau de confiança desejado.

Tabela 3.1 – Período mínimo de monitorização e precisão desejada.

Frequência de Ocorrência do Afundamento de Tensão	Precisão de 50%	Precisão de 10%
1 por dia	2 semanas	1 ano
1 por semana	4 meses	7 anos
1 por mês	1 por ano	30 anos
1 por ano	16 anos	400 anos

Fonte: ALVES et al (2003).

A tabela mostra, por exemplo, que são necessários 7 anos de medição para se obter uma precisão de 10%, caso a expectativa seja a ocorrência de um AMT por semana no barramento a ser monitorado.

Destaca-se que nem sempre as empresas de distribuição de energia possuem medidores de qualidade em sua rede para atender todos os consumidores sensíveis. Adicionalmente, como já citado, o tempo de campanha de medição é muito longo, resultando em demora na análise dos custos por AMT nas UCs a serem estudadas.

Portanto, os métodos de simulação se apresentam como uma boa alternativa para a obtenção dos parâmetros dos AMTs nos barramentos que alimentam consumidores cargas sensíveis a estes eventos.

3.3.2. Realização de Simulações

Como as principais causas dos afundamentos de tensão são os curtos-circuitos, os procedimentos utilizados são as simulações de faltas, que fornecem a intensidade mínima dos afundamentos em valores eficazes das tensões remanescentes nos barramentos estudados.

Para que a duração dos eventos seja estimada é necessário considerar os dados de tempo de operação das proteções do sistema.

Para o cálculo da frequência das ocorrências dos AMTs, considera-se normalmente as taxas médias de falhas das linhas de distribuição e transmissão do sistema, obtidas através dos registros históricos de operação do sistema.

O AMT pode ocorrer de várias formas no SEP, como por exemplo, o tipo de falta que acontece na linha, tanto de distribuição quanto de transmissão, bem como a sua intensidade e a

duração dependem da localização do curto-circuito ao longo dessas linhas. Além disso, as posições dos curtos-circuitos simulados são normalmente determinadas através de um processo de sorteio aleatório, para reproduzir de forma aleatória as ocorrências de faltas no sistema.

Devido à característica estocástica do processo, as simulações normalmente consideram vários anos de funcionamento de um sistema, com o objetivo de se obter uma estimativa confiável, na qual através da construção de um histórico de funcionamento do sistema, a estimação de um valor médio de ocorrências de afundamentos, pode então ser estimada.

As metodologias utilizadas para simulação de AMTs são: (i) o método de Enumeração de Estado (EE); (ii) o método de Monte Carlo (MC), (iii) método Híbrido.

3.3.2.1. Método da Enumeração de Estados

Esta metodologia também é chamada de Método do Curto-Circuito Deslizante ou do Método das Posições de Falta.

O método não só simula faltas em vários pontos do trecho dos alimentadores do sistema a ser estudado, como também avalia se há a influência no ponto de defeito pelas intensidades e durações dos AMTs, de um determinado barramento escolhido para o estudo.

A Figura 3.1 mostra um diagrama unifilar de um suposto sistema, no qual é analisado o comportamento das tensões de um barramento i com a aplicação de curtos-circuitos do trecho do sistema (WESTIN, 2021).

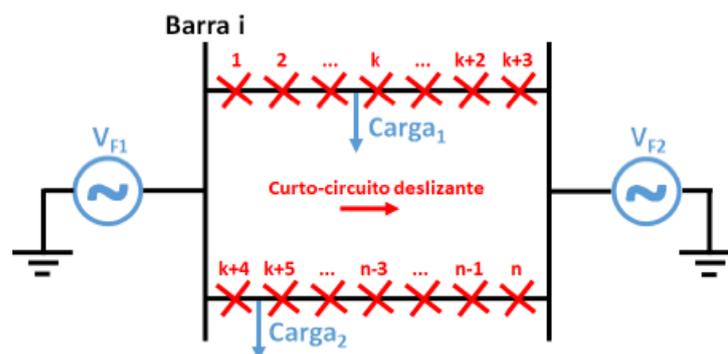


Figura 3.1 – Esquematização do método das posições de falta em um suposto sistema malhado.

Fonte: (WESTIN, 2021).

Como são aplicados os curtos-circuitos nos dois alimentadores, composto por n segmentos, então é possível formular o cálculo da intensidade deste afundamento para um curto-circuito trifásico aplicado, em um ponto k qualquer do trecho. A equação (3.18) mostra o cálculo para o afundamento de tensão de um barramento i para um curto-circuito trifásico num ponto k .

$$E_{i,k} = E_i^P - \frac{E_k^P}{Z_{k,k}^+ + Z_f} Z_{i,k} \quad (3.18)$$

Em que:

$E_{i,k}$ - é o afundamento de tensão na barra i devido a curto-circuito trifásico na barra k ;

E_i^P - é a tensão pré-falta na barra i ;

E_k^P - é a tensão pré-falta na barra k ;

$Z_{i,k}$ - é a impedância de transferência entre as barras $i-k$;

$Z_{k,k}^+$ - é a impedância própria de sequência positiva da barra k ;

Z_f - é a impedância de falta

A equação 3.18 permite concluir que as variáveis relevantes de influência na intensidade do afundamento de tensão são:

- Tensões de pré-falta (E_i^P e E_k^P)
- Impedância de falta (Z_f)
- Características inerentes à rede representada impedância própria de sequência positiva ($Z_{k,k}^+$)
- Posição relativa entre o ponto de falta e a barra monitorada representada pela impedância de transferência ($Z_{i,k}$)

Para que se possa avaliar o afundamento de tensão para os outros tipos de faltas considerando a terra, aplicam-se expressões semelhantes a equação (3.18), com a incorporação das impedâncias de sequências zero, positivas e negativas no cálculo. Com o emprego das equações (3.19) e (3.20), calcula-se a intensidade das tensões residuais para defeitos fase terra.

$$\begin{bmatrix} E_{i,k}^0 \\ E_{i,k}^+ \\ E_{i,k}^- \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ E_{a_i}^P \\ 0 \end{bmatrix} - \frac{E_{a_k}^P}{E_{i,k}^0 + Z_{i,k}^+ + Z_{i,k}^- + 3Z_f} x \begin{bmatrix} Z_{k,k}^0 \\ Z_{k,k}^+ \\ Z_{k,k}^- \end{bmatrix} \quad (3.19)$$

$$\begin{bmatrix} E_{a_{i,k}}^0 \\ E_{b_{i,k}}^+ \\ E_{c_{i,k}}^- \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} x \begin{bmatrix} E_{i,k}^0 \\ E_{i,k}^+ \\ E_{i,k}^- \end{bmatrix} \quad (3.20)$$

Em que:

$E_{a_i}^P$, $E_{a_k}^P$ é a tensão pré-falta na fase A nos barramentos i e k ;

$E_{i,k}^0$, $E_{i,k}^+$, $E_{i,k}^-$ é a tensão de sequência zero, positiva e negativa, no barramento i devido a um curto-circuito fase-terra na barra k ;

$Z_{i,k}^0, Z_{i,k}^+, Z_{i,k}^-$ é a impedância de transferência de sequência zero, positiva e negativa, entre os barramentos $i-k$;

$Z_{k,k}^0, Z_{k,k}^+, Z_{k,k}^-$ é a impedância própria da barra k de sequência zero, positiva e negativa;

$E_{i,k}^0, E_{i,k}^+, E_{i,k}^-$ é a tensão nas fases A, B e C, no barramento i devido a um curto-circuito fase-terra na barra k .

Segundo (BOLLEN, 2000) o Método de Enumeração de Estados necessita:

- 1- Modelar a rede a ser estudada, além do seu sistema de proteção;
- 2- Determinar qual parte do sistema a serem aplicados os curtos-circuitos, que normalmente corresponde às linhas de distribuição e transmissão da rede em questão, pois as suas taxas de falta são notadamente superiores em relação aos equipamentos;
- 3- Determinar os pontos a serem monitorados;
- 4- Definir um passo de discretização para a área da rede segregando-a em seus respectivos segmentos sendo que, cada fração satisfaça a uma posição para a aplicação de curtos-circuitos;
- 5- Definir o valor máximo de impedância de falta para cada tipo de defeito;
- 6- Definir um passo de discretização para as impedâncias de defeito e segregá-las em faixas correspondentes;
- 7- Determinar o número de curtos-circuitos anuais a serem aplicados em cada porção de rede;
- 8- Avaliar as características dos eventos de VTCD para cada segmento de trecho, para cada tipo de falta, para cada faixa de impedância, considerando a rede utilizada.

Os resultados obtidos por este método podem ter influências de alguns fatores, tais como o comprimento total da área para aplicação dos curtos-circuitos e a distância de aplicação de faltas.

O comportamento da influência da posição entre defeitos, em relação à tensão real do curto-circuito é mostrada pela Figura 3.2 (BOLLEN, 2000).

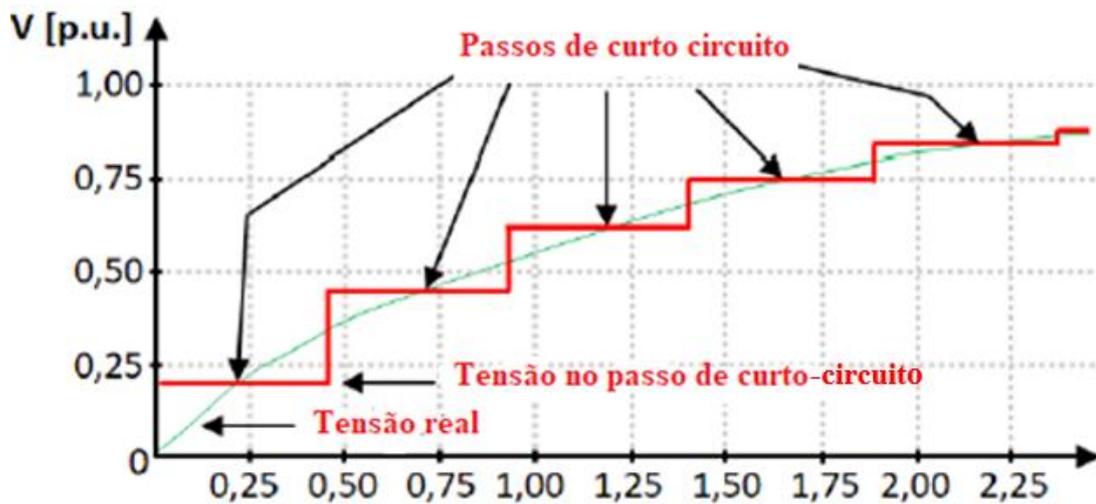


Figura 3.2 – Impacto da distância do passo na aplicação de curtos-circuitos.
Fonte: (WESTIN, 2021).

Nota-se pela figura que maior será o erro associado, quanto mais próximo o defeito está do barramento monitorado, portanto recomenda-se uma maior enumeração dos segmentos iniciais. O erro relativo é menor para faltas em locais mais distantes, onde a curva de tensão real possui menor inclinação, dispensando-se assim, um menor passo de discretização.

Um fator de influência nos resultados é que em um sistema real, a escolha adequada do passo de discretização do comprimento da rede é de vital importância, para a aplicação de curtos-circuitos de um problema contínuo, pois pode provocar perdas na qualidade do resultado. Além deste fator há outro que está relacionado com a fronteira das posições de faltas, conhecida como as áreas de Vulnerabilidade, as quais são regiões onde a ocorrência de falta provoca VTCD no barramento monitorado.

Salienta-se, portanto, a importância em otimizar os pontos de aplicação de defeitos para obter resultados com melhor precisão, dado seu esforço computacional demandado e, conseqüentemente, os pontos nos quais os níveis de tensão são superiores à sensibilidade da carga, não necessitam ser considerados para avaliação do curto-circuito.

Lembrando que o Método de Enumeração de Estados fornece apenas o número médio de VTCDs em um determinado tempo e, portanto, devido às características de natureza aleatória do problema, o uso de ferramenta estatística com o uso de seus parâmetros como desvio padrão, é determinante para a obtenção de resultados satisfatórios.

3.3.2.2. Simulação de Monte Carlo

Em função da dimensão de um sistema real de distribuição ou de transmissão, às vezes não é possível determinar os valores de alguns parâmetros da rede. Para tanto, a modelagem

destas variáveis torna-se mais adequada através de funções de distribuições de probabilidades e dessa forma, a Simulação Monte Carlo é utilizada, pois permite retratar as características das diversas variáveis de influência nos parâmetros dos afundamentos de tensão.

Por ser uma simulação estocástica, a variável aleatória, como a taxa de falta, pode ser expressa por uma função de probabilidade e outros tipos de variáveis podem ser utilizadas como dados de entrada do problema.

A Simulação Monte Carlo por ser um método probabilístico baseado em um processo de sorteio de números aleatórios, objetiva retratar a realidade física, matemática e lógica de um sistema sob análise e por esta razão é considerada uma ferramenta poderosa e robusta para avaliação de sistemas complexos (CEBRIAN et al, 2010).

Com a Simulação Monte Carlo pode-se reproduzir a realidade do problema, modelando o sistema na região escolhida (transmissão, distribuição), simulando-se assim os possíveis anos de operação do sistema por meio de sorteios massivos das características desejadas, em uma demanda computacional relativamente pequena. As grandezas sorteadas podem ser, por exemplo, trecho em falta, posição da falta, tipo da falta, resistência de falta, patamar de carga (tensão pré-falta) etc. (WESTIN, 2019).

A metodologia baseada na Simulação Monte Carlo pode ser resumida em (WESTIN, 2019):

1. Modelar a rede de interesse, bem como seu sistema de proteção;
2. Determinar qual a área do sistema em que os curtos-circuitos sorteados serão aplicados. Normalmente, a região escolhida corresponde às linhas de distribuição e transmissão;
3. Determinar quais os pontos de monitoração;
4. Determinar o número de anos para simulação;
5. Determinar o número de faltas anuais totais;
6. Para cada falta anual, sortear o local em defeito, o tipo de curto-circuito e sua resistência associada;
7. Repetir o item 6 para todos os anos de simulação escolhidos;
8. Avaliar estatisticamente os parâmetros das VTCDs considerando todo o horizonte de simulação.

3.3.2.3. Método Híbrido

Cebrian (2010) com o objetivo de combinar as vantagens das metodologias para cálculo de VTCDs, propôs o uso simultâneo dos dois (2) métodos descritos: Método Enumeração de Estados (MEE) e Método Monte Carlo (MMC), no qual denominou de Método Híbrido.

Esta técnica seleciona aleatoriamente parte das variáveis via MMC, enquanto um número de faixas possíveis para as demais variáveis é definido através do MEE, obtendo um conjunto bem definido de estados.

Todo este conceito estabelece em fixar um número preestabelecido de condições de curtos-circuitos, com todos os seus parâmetros envolvidos, cada um com sua respectiva distribuição de probabilidade. O autor assim define o Método Híbrido de tal modo que possa ser resumido em:

1. Modelar a rede de interesse, bem como seu sistema de proteção;
2. Determinar quais os pontos de monitoração;
3. Determinar qual a área do sistema em que os curtos-circuitos sorteados serão aplicados. Normalmente, a região escolhida corresponde às linhas de distribuição e transmissão;
4. Agrupar trechos, em função de seus comprimentos;
5. Classificar os grupos em predominantes (em função dos seus comprimentos) ou não predominantes, de acordo com a extensão total da rede;
6. Determinar as condições de curtos-circuitos para os grupos predominantes:
 - Número total de faltas por grupo, em função da proporção de seu comprimento com o tamanho total do sistema (sorteio);
 - Número de faltas por tipo de curto-circuito, em função da probabilidade de ocorrência (sorteio);
 - Impedância de faltas, em função de faixas de valores (determinístico);
 - Posição da falta, em função do comprimento total do grupo (sorteio).
7. Determinar as condições de curtos-circuitos para os grupos não predominantes:
 - Número total de faltas por grupo, em função da proporção de seu comprimento com o tamanho total do sistema (sorteio);
 - Número de faltas por tipo de curto-circuito, em função da probabilidade de ocorrência (sorteio);
 - Impedância de faltas, em função do valor máximo (sorteio);
 - Posição da falta, em função do comprimento total do grupo (sorteio).

8. Determinar o número de simulações necessárias para a aplicação da metodologia, em função do valor do menor comprimento existente no grupo dos predominantes, da probabilidade mínima dos tipos de falta e do número mínimo de faixas para a discretização da impedância de falta.

3.4. Determinação do Número de Desligamentos dos Processos

A sensibilidade de um equipamento utilizado na indústria (CLP, contator, computador e conversor de frequência), conforme abordado no Capítulo 2, é definida pela sua tolerância de funcionamento mediante a ocorrência de AMTs.

Com relação aos sistemas produtivos, para a análise da sensibilidade devem ser consideradas tanto as sensibilidades individuais dos equipamentos como a sua forma de interconexão com os demais equipamentos de processo.

Também devem ser consideradas as regiões de pontos de incertezas, em que o equipamento pode falhar ou não, na representação da sensibilidade da carga (YUNG et al, 2019), conforme explorado no item 3.4.2.

3.4.1. Modelo de “N” Estados

Para efeito da análise da sensibilidade do processo, o modelo utilizado pode ser baseado nos estados de falha e estados de sucesso, considerando-se somente os estados de falha, pois comprometem operacionalmente as UCs.

No Modelo de N Estados (CARVALHO FILHO, 2000), cada componente do sistema da UC representa a sensibilidade dos equipamentos ou processos envolvidos, a qual é definida pelos limites de tolerância de intensidade (V_L) e duração (D_L).

A Figura 3.3 de forma geral, representa a curva de sensibilidade de uma unidade produtiva, cujos estados 1 e 2 são os estados operantes e inoperantes e, a interrupção de cada componente ocorrerá se forem satisfeitas as condições estabelecidas na equação (3.18).

$$(V_C < V_L) \cap (D_C > D_L) \quad (3.18)$$

Onde:

- V_C e D_C : representam a intensidade e duração do evento, respectivamente, em um determinado instante.

- V_L e D_L : representam os limites de tolerância de intensidade e de duração

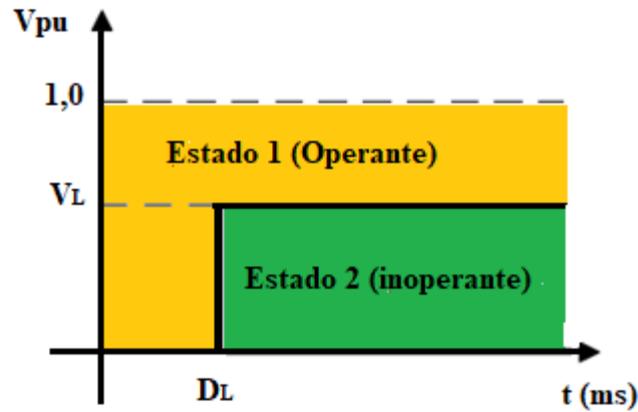


Figura 3.3 – Curva de sensibilidade genérica.
Fonte: (ALVES, 2003; COSTA, 2003).

O número esperado de interrupções de processo será a soma dos números de ocorrência de afundamentos, obtidos por medição ou simulação, contabilizados abaixo da curva de sensibilidade dos equipamentos representados.

No entanto, os processos industriais são constituídos de diversas unidades produtivas interconectadas de diversas formas (em série ou em paralelo), dependendo caso a caso do processo de cada consumidor.

A Figura 3.4 é um exemplo de um fluxograma de processo, sendo que U_1 , U_2 e U_3 representam os níveis de sensibilidade correspondentes a cada unidade produtiva.

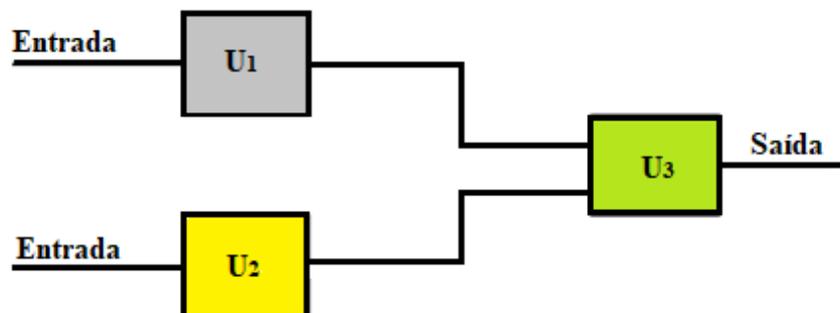


Figura 3.4 – Fluxograma de um processo.
Fonte: (ALVES, 2003; COSTA, 2003).

Pode-se, portanto, estabelecer todas as condições operativas do processo de produção, como mostra a Figura 3.5, caracterizando o modelo da sensibilidade equivalente do processo da UC.

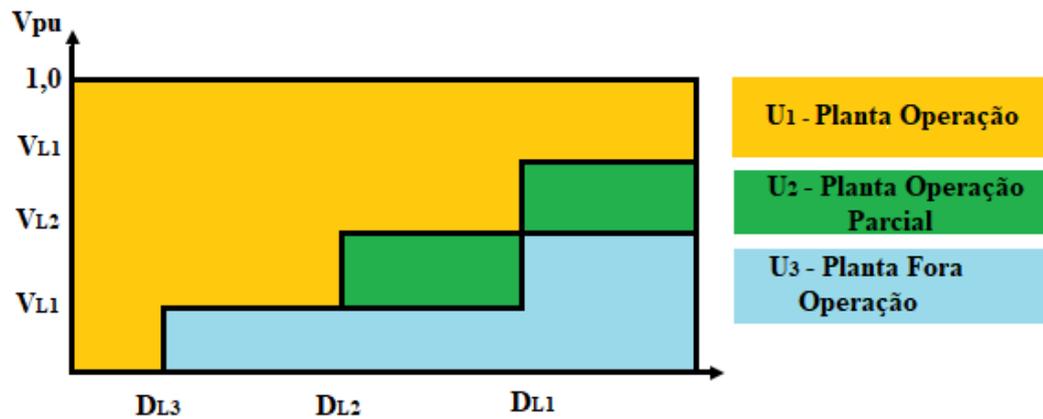


Figura 3.5 – Sensibilidade equivalente de UC.
Fonte: (ALVES, 2003; COSTA, 2003).

3.4.2. Incertezas da Sensibilidade da Carga

Com relação ao nível de sensibilidade das cargas, pode-se estimar o número de desligamentos dos equipamentos utilizados na indústria, e com isto, quantificar o impacto das VTCDs sobre os consumidores (ESCRIBANO, AH et al, 2012; GUPTA, CP, MILANOVIC, JV, 2006; BELCHIOR, 2003).

Para tanto, uma opção, além da curva de sensibilidade para cada tipo de equipamento pode ser aplicada, através de uma abordagem probabilística considerando-se a incerteza envolvida na análise de sensibilidade das cargas,

Os trabalhos desenvolvidos por (ESCRIBANO, A.H. et al, 2012; BODNAR, R. et al., 2016.) mostram através dos resultados de testes, que há a possibilidade de obter uma curva retangular, representando assim, a sensibilidade de um equipamento, como mostra a Figura 3.6.

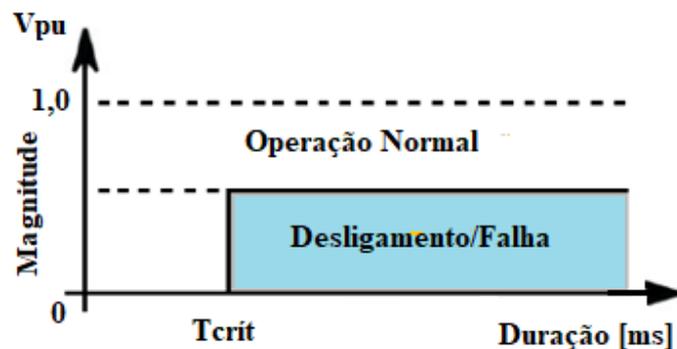


Figura 3.6 – Curva de sensibilidade de um equipamento.
Fonte: (COSTA, 2018).

Pela figura nota-se que o equipamento sensível leva à sua falha quando ocorre eventos de magnitude de tensão inferior a V_{crit} e duração superior a T_{crit} .

Conforme mostrado no Capítulo 2, os diferentes tipos de cargas, cada uma delas possuem curvas de sensibilidade distintas, além do que um mesmo tipo de carga não possui um único padrão de comportamento, o que significa que para cada tipo analisado, não há uma única curva de sensibilidade, mas uma família de curvas (GUPTA, C.P et al, 2006; BODNAR et al, 2016).

A Figura 3.7 mostra as possíveis regiões, com testes de amostras de um determinado tipo de equipamento, onde cada amostra testada teria a sua curva de sensibilidade definida por um ponto (T_{crit} , V_{crit}) dentro da região A (COSTA, 2018).

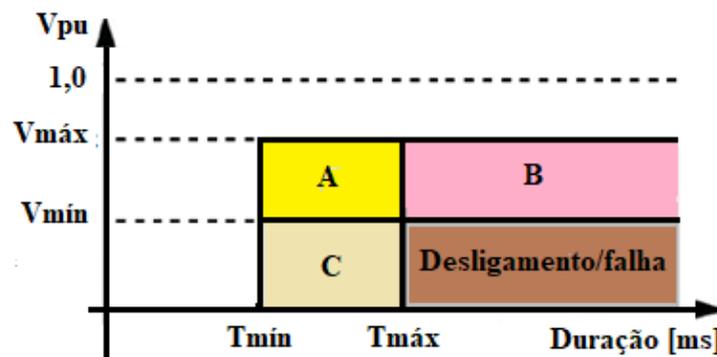


Figura 3.7 – Incerteza envolvida ao avaliar a sensibilidade de um equipamento.
Fonte: Adaptado por (COSTA, 2018) de (GUPTA, C.P et al, 2006).

A falha de todas as amostras ocorreria se ocorressem os eventos com magnitude inferior a $V_{mín}$ e duração superior a $T_{máx}$. Eventos com magnitude superior a $V_{máx}$ ou duração inferior a $T_{mín}$, nenhuma delas seria afetada. Para os eventos que ocorressem nas regiões A, B e C algumas amostras, nem todas levariam às falhas (COSTA, 2018; YUNG et al, 2019).

Conclui-se que a sensibilidade de um equipamento está delimitada entre duas curvas, uma de sensibilidade mínima através do ponto ($T_{máx}$, $V_{mín}$), e outra de sensibilidade máxima, dada pelo ponto ($T_{mín}$, $V_{máx}$), que definem uma região de incerteza quanto ao seu desempenho frente às VTCDs (COSTA, 2018).

Como o desempenho de um equipamento é representado por uma curva de sensibilidade retangular, através do ponto (T_{crit} , V_{crit}), pode-se dizer que para estimar o número de desligamentos desse tipo de equipamento, basta conhecer como os valores de V_{crit} e T_{crit} se distribuem entre $V_{mín}$ e $V_{máx}$ e entre $T_{mín}$ e $T_{máx}$, respectivamente (GUPTA, C.P., MILANOVIC, J.V., 2006; BODNAR, R et al, 2016; CHAN, M.Y.; MILANOVIC, J.V., 2007).

A distribuição das variáveis V_{crit} e T_{crit} poderia ser obtida por meio de testes de muitas amostras. Outra opção seria assumir que esses equipamentos seguem uma distribuição teórica, como exemplificado na Figura 3.8 (GUPTA, C.P. e MILANOVIC, J.V., 2006):

- Distribuição uniforme: probabilidades iguais da sensibilidade do equipamento ser definida por um ponto qualquer dentro da região A (vide Figura 3.5);
- Distribuição normal: maior probabilidade da sensibilidade do equipamento ser definida por um ponto no centro da região A;
- Distribuição exponencial crescente para V_{crit} e decrescente para T_{crit} : maior probabilidade da sensibilidade do equipamento ser definida por um ponto próximo ao canto superior esquerdo da região A;
- Distribuição exponencial decrescente para V_{crit} e crescente para T_{crit} : ocorre o oposto do caso anterior, ou seja, há uma maior probabilidade do ponto (T_{crit}, V_{crit}) estar próximo ao canto inferior direito da região A.

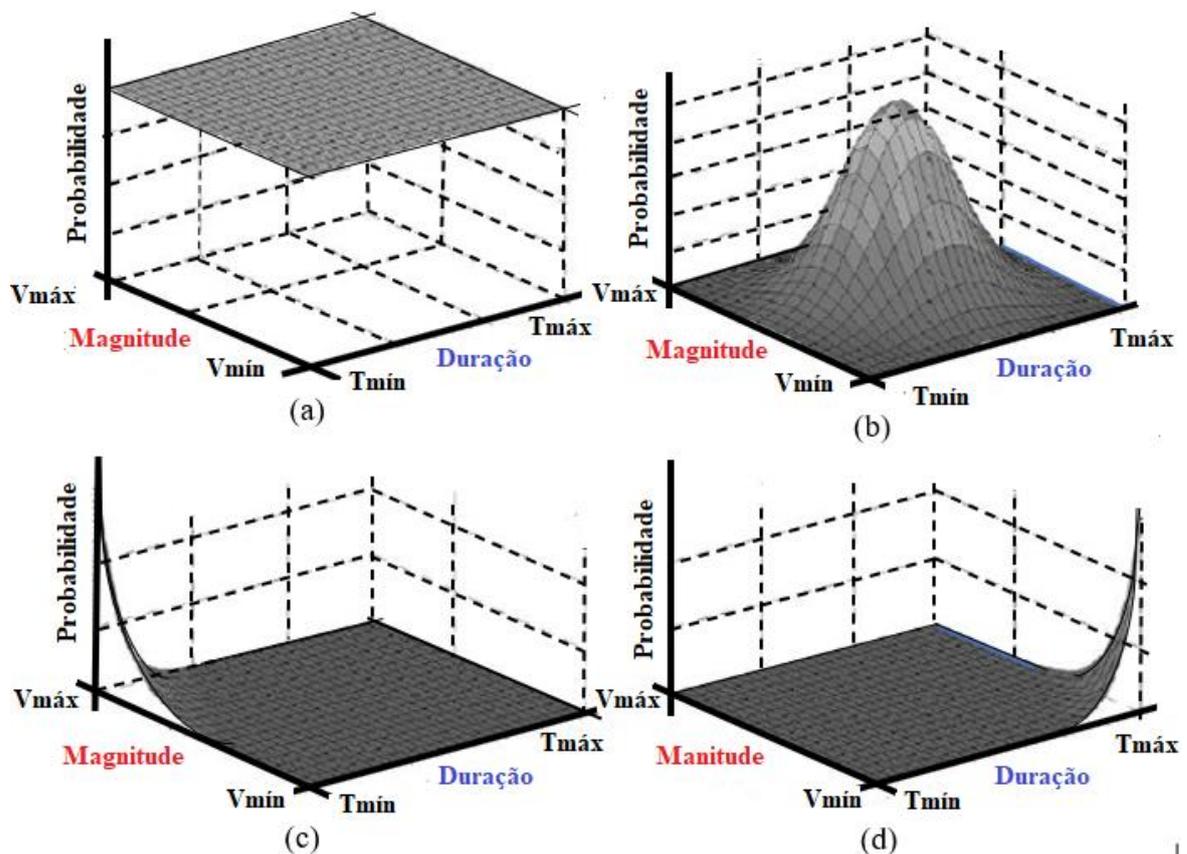


Figura 3.8 – Pcurva (T, V) para diferentes distribuições de V_{crit} e T_{crit} : (a) uniforme; (b) normal; (c) exponencial crescente para V_{crit} e decrescente para T_{crit} ; e (d) exponencial decrescente para V_{crit} e crescente para T_{crit} .

Fonte: Adaptado por (COSTA, 2018) de (BODNAR, 2016).

Essa metodologia é utilizada neste trabalho sendo explicada em detalhes no Capítulo 6.

3.5. Pesquisa Direta

Alguns trabalhos pesquisados na literatura técnica (LAMEDICA et al, 2001; QUAIA et al, 2003; KJOLLE et al, 2008; CHEN et al, 2016; HE et al, 2020) realizaram pesquisa direta, por obter resultados mais rápidos, através da entrevista junto às UCs e mediante o emprego de um questionário específico.

Conforme citado anteriormente, nos últimos anos não foi encontrado na literatura nacional esse tipo de trabalho, o que torna relevante a proposta deste doutorado, trazendo atualização de custos, não só aos pesquisadores quanto para as academias, mas principalmente às concessionárias de energia elétrica, que cada vez mais sofrem processos judiciais solicitando indenizações por perdas, devido a AMTs.

Além da pesquisa em si nos consumidores, no caso específico supridos em redes elétricas de MT sob concessão da EDP, ter-se-á a oportunidade de conhecer os vários tipos de atividades dos setores industriais e comerciais, desde pequeno a médio porte, além de conhecer as especificidades de cada processo com as suas cargas críticas, correlacionando-as com os custos devido a uma série de fatores como o tempo de repartida de cada tipo de atividade, perdas de matéria prima, horas extras, custos por perda de equipamentos, dentre outros que compõem os custos totais devido aos AMTs.

Evidentemente caberão às empresas a divulgação ou não destes dados, que são muitas vezes considerados confidenciais e estratégicos pelas organizações.

Além disso, conhecer as instalações em termos de demanda contratada, consumo, pessoal técnico envolvido no processo, além de outras características técnicas pertinentes a cada tipo de empresa, são informações importantes que complementam esta proposta de doutorado.

Portanto, no capítulo 4 está proposta a metodologia de como será aplicada a pesquisa direta nas unidades consumidoras, sob concessão da EDP.

3.6. Considerações finais

Alves (2003) e Costa (2003) apresentaram uma metodologia integrada que permite realizar a estimação das interrupções provocadas por AMTs em um processo industrial, por meio da análise de sensibilidade pelo modelo de N estados e propõe um equacionamento para quantificar o custo de parada de produção dos consumidores industriais.

Em sua dissertação de mestrado Watanabe (2010) propôs a estimação de custos devido à AMTs, considerando os custos diretos, como perda de produção e queima de equipamentos e desconsiderando os custos indiretos, como a insatisfação do cliente e a depreciação dos

equipamentos, sendo que a metodologia utilizada foi do custo da energia não suprida ou não consumida pelo consumidor.

Em um trabalho (VEGUNTA, 2011) mostra que, o custo de *downtime* (CODT – *cost of downtime*) é um custo devido à parada do equipamento provocando uma interrupção da produção ou serviço, em função da sensibilidade dos equipamentos devido a configuração com o processo.

Dos trabalhos pesquisados, de mais de duas décadas como os mencionados na Revisão da Literatura (SULLIVAN et al, 1997; LAMEDICA, et al, 2001; SALIM et al, 2014; SOMRAK et al, 2019; HE et al, 2020; além de outros) verificou-se que a cada 3 anos, houve pelo menos um estudo sobre custos, devido a AMT e ICD, seja por simulações, medições ou por pesquisa direta obtendo-se os custos anuais, por evento e por kW, sendo que o da pesquisa direta não foi encontrada na literatura nacional mais recente.

Neste contexto, a proposta neste trabalho de doutorado é a aplicação da pesquisa direta, através de formulário de questões relativas às atividades industriais, objetivando a obtenção de custos por paradas industriais devido aos AMTs.

4. PROPOSTA E REALIZAÇÃO DE PESQUISA DIRETA

4.1. Considerações Iniciais

Com base no levantamento bibliográfico realizado, cuja síntese foi apresentada nos capítulos anteriores, este trabalho de pesquisa de doutorado propõe a aplicação de uma metodologia pela pesquisa direta, para atender a um dos objetivos do projeto de pesquisa e desenvolvimento (P&D – fomentado pela EDP), para a obtenção de custos por AMTs, que é o principal foco deste trabalho.

Em linhas gerais, o método utilizado para a obtenção dos custos devido a ocorrência de AMTs, consistiu na realização de visitas técnicas às indústrias acompanhado da aplicação de um formulário de pesquisa específico.

O formulário proposto contém questões que objetivam obter informações específicas de cada tipo de atividade industrial, principalmente no tocante ao custo de interrupção devido aos AMTs, cujas informações foram obtidas durante as visitas técnicas.

O conteúdo do formulário foi elaborado com base no Anexo 2 da tese de doutorado de Magalhães (2009), que contém questões que visam à obtenção de dados qualitativos e quantitativos dos consumidores.

Este questionário relativo aos consumidores industriais, foco deste trabalho, inicialmente possuía 51 perguntas para obter dados da empresa visitada, desde a sua razão social, seu porte, tipo de atividade, dados de custos por interrupção, dentre outras questões. No entanto, a pesquisa realizada por Magalhães (2009) teve como objetivo avaliar a qualidade de serviços da concessionária, especificamente, quanto a continuidade no suprimento de energia elétrica às UCs.

O formulário proposto no presente trabalho foi personalizado, tomando como referência as pesquisas desenvolvidas por Magalhães (2009) e Pelegrini (2012), diferenciando-se na busca de custos por AMTs e de interrupções de curta duração e não por descontinuidade de serviços, como elaborado por estes autores.

Neste contexto, a metodologia foi dividida em cinco etapas, a saber:

- Elaboração do Formulário de Pesquisa;
- Seleção das empresas;
- Planejamento das visitas;
- Realização das visitas;

- Tratamento dos resultados das pesquisas de campo.

4.2. Elaboração do Formulário de Pesquisa

Conforme citado no item 4.1, na elaboração do formulário de pesquisa, foram consideradas as questões contidas no Anexo 2 do questionário relativo à indústria proposto por Magalhães (2009).

De um montante de 51 perguntas, 19 foram selecionadas e adaptadas aos objetivos da pesquisa objeto deste trabalho, contando com a participação da gerência da EDP, cuja compilação final teve foco na obtenção dos custos associados as interrupções de processos industriais devido aos AMTs.

A seguir, é apresentado o conteúdo do formulário elaborado, explicitando as razões da escolha de cada questão formulada. Este formulário é apresentado na íntegra no Apêndice A.

1. *Razão social da empresa;*
2. *Principal tipo de atividade;*
3. *Média mensal de demanda, consumo e tensão de suprimento.*

As questões 1 a 3 visam identificar a empresa, seu tipo de atividade, bem como sua demanda, consumo e tensão de abastecimento.

4. *Horários normais de trabalho da sua empresa;*
5. *Número de empregados da empresa*

Estes questionamentos buscam identificar o regime de produção e a quantidade de turnos de trabalho da fábrica, bem como o porte da empresa.

6. *Tipos de cargas sensíveis e processos instalados*
7. *Quantas paradas de processo ocorreram devido a AMTs, nos últimos 12 meses?*

Estas questões visam conhecer a finalidade do uso da energia e os tipos de cargas sensíveis instaladas nas indústrias, bem como identificar a quantidade de paradas para o cálculo dos custos de interrupção do processo, devido a AMTs.

8. *Considerando o afundamento de tensão e a curta interrupção, identifique os eventos que têm o maior impacto (instantâneo, momentâneo e temporário).*

A questão 8 visa conhecer, de forma qualitativa, a percepção dos entrevistados a respeito paralisações de processos, suas frequências e seus impactos no processo. Busca identificar também os tipos de eventos mais impactantes.

9. *Qual o período mais crítico do dia em sua empresa, em que o AMT causam mais prejuízos?*
10. *Qual(is) equipamento(s) a empresa tem que são os mais sensíveis a AMT e o ICD?*

Tais questionamentos buscam verificar, de modo qualitativo, se há um período do dia com maior frequência de AMT e ICD que afetem a empresa diretamente em termos de paradas de processos. Ademais, visam identificar as cargas sensíveis e a percepção dos entrevistados se elas têm correlações com as paradas de processo da empresa.

11. *Quanto tempo demoraria, para a retomada de produção ou operação normal, caso houvesse uma parada inesperada do processo?*

Visa determinar o tempo necessário para a retomada do processo de produção.

12. *Quando se tem uma parada inesperada do processo, devido a AMT qual tipo de prejuízo ou dano a sua empresa tem e em que intensidade?*

Esta questão visa verificar se é possível detalhar cada item que compõe o custo total da perda de acordo com as especificidades de cada atividade industrial.

13. *Considerando-se um dia e um período de alta produção, há como estimar o custo de reinício de produção / operação e a perda de produção / operação / faturamento que teria nesse período, caso houvesse uma parada inesperada do processo devido a AMT?*

Tal questão complementa a anterior, verificando se há também perda de lucro cessante.

14. *A sua empresa paga horas extras para os funcionários a fim de recuperar as perdas de receita, de produção ou até para finalizar um trabalho interrompido, decorrente de uma parada inesperada do processo, devido a AMT? Se sim, qual seria o gasto aproximado com o pagamento dessas horas extras?*

Esse questionamento objetiva verificar, em termos qualitativos e quantitativos, se existe pagamento de horas extras aos colaboradores em decorrência da ocorrência de afundamento de tensão e interrupção de curta interrupção.

15. *Sua empresa possui matéria-prima, produto em processo ou um produto acabado que poderia se estragar devido a uma parada inesperada de produção? Se sim, qual o prejuízo associado a esta perda?*

Esta indagação objetiva verificar se há perda de matéria-prima ou de produto acabado, ou em processamento para obtenção dos custos associados.

16. *A sua empresa teve, no último ano, algum custo adicional para reparo ou substituição de equipamento ou máquina em decorrência de uma parada inesperada do processo? Se sim, informar o valor aproximado do custo de reparo ou substituição desses equipamentos.*

O intuito desta questão é verificar se há gastos com reparos e reposição de equipamento danificado devido à AMT.

17. *Sua empresa poderia ter outro tipo de prejuízo, se ocorresse uma parada inesperada do processo devido a AMT? Se sim, qual? O(a) Sr.(a) saberia estimar qual seria o prejuízo devido a esse outro fator?*

Aqui, objetiva-se verificar se há outro tipo de custo decorrente da parada inesperada do processo.

18. *Sua empresa teria procedimentos ou equipamentos para monitorar a ocorrência de AMT? Se sim, detalhe o tipo de monitoramento.*

Esta questão tem como objetivo saber se a empresa apresenta procedimentos específicos quando ocorrem AMT ou se há equipamentos de monitoramento.

19. *O que sua empresa faz para mitigar AMT (não faz nada, geradores, nobreaks, investe em outras fontes de energia)? Qual é o investimento para isso?*

Esta questão visa saber se a empresa investe em equipamentos para mitigação de AMT.

4.3. Seleção das Empresas

A partir do projeto de pesquisa e desenvolvimento (P&D) com a EDP associado a esta Tese, foram definidos uma lista de potenciais uma lista de potenciais empresas para a realização de visitas técnicas, adotando três critérios, a saber:

- Estratificação por ramo de atividade;
- Localização eletro geográfica no sistema de distribuição;
- Empresas que “mais reclamam” de problemas associados a QEE.

Usando os critérios estabelecidos, foram selecionadas 70 empresas, dentre aquelas que “mais reclamam” de problemas atribuídos à QEE. Destaca-se que o objetivo é obter um mínimo de trinta (30) empresas que respondam totalmente às questões do formulário, a fim de se obter um grau satisfatório de representatividade na pesquisa.

4.4. Planejamento das Visitas

De posse da lista de empresas, o pesquisador definiu que a EDP deveria informar às UCs sobre os objetivos da pesquisa e verificar se a empresa teria ou não interesse em participar do trabalho. Para agilizar a realização da pesquisa “in loco”, decidiu-se enviar com antecedência o Formulário de Pesquisa, solicitando às UCs a devolução do formulário devidamente preenchido no dia da realização da visita.

Adicionalmente, foram adotados os seguintes procedimentos:

- A EDP ficou responsável pelo agendamento das visitas;
- Durante a visita, o pesquisador, sempre acompanhado de um representante da EDP, deveria explicar novamente os objetivos e a importância da pesquisa, tanto do ponto de vista acadêmico, quanto ao atendimento ao cliente.
- Após a reunião inicial, deve-se solicitar a realização de uma visita às instalações da fábrica, de modo a entender o processo fabril, identificando-se as partes críticas do processo, com o intuito de compreender melhor a origem das paradas devido aos AMTs;
- Após a realização da visita ao processo, os envolvidos devem retomar a reunião e verificar se a empresa respondeu todas as questões do formulário, prestar todos os esclarecimentos necessários e ao final da visita, receber o formulário devidamente preenchido.

Da lista inicial de setenta (70) empresas selecionadas, sessenta (60) tiveram a aprovação definitiva da EDP, sendo trinta e sete (37) do estado de SP e vinte e três (23) do estado de ES, todas supridas em média tensão (13,8 kV).

4.5. Realização da Visitas

A 1ª etapa da pesquisa iniciou-se em maio de 2019, no estado de São Paulo, região de Guarulhos e nas cidades do Vale do Paraíba. No estado de Espírito Santo, as cidades de Cachoeiro de Itapemirim, Vila Velha, grande Vitória, Serra e, ao norte, as cidades de Linhares e São Mateus.

Uma vez consolidada a seleção de sessenta (60) empresas, foram agendadas visitas em trinta e nove (39) indústrias, sendo dezesseis (16) empresas do estado de SP, vinte e três (23) empresas do estado de ES.

Dessas vinte e três (23) indústrias do ES, dezenove (19) concederam a realização de visitas técnicas e quatro (4) não quiseram receber o pesquisador e o representante da EDP.

As empresas de SP todas as dezesseis (16) previstas foram visitadas.

A 2ª etapa ocorreu em meados de agosto de 2019, quando houve mais oito (8) agendamentos às empresas da cidade de Serra, estado do ES. Em setembro de 2019, no estado de SP, foram agendadas visitas em mais quatro (4) empresas, no entanto, uma delas cancelou a visita.

A 3ª etapa, ocorrida no mês de outubro de 2019, foram visitadas seis (6) empresas da cidade de Guarulhos, estado de SP. Em novembro de 2019, uma (1) empresa na cidade de Vitória e duas (2) empresas na região de Linhares e São Mateus, todas no estado de ES.

Das sessenta (60) empresas selecionadas, 5 não receberam o pesquisador, totalizando então cinquenta (55) empresas pesquisadas, representado 91,7%.

Considerando a quantidade inicial de 60 empresas, o estado de São Paulo foi representado por 25 (empresas), 41,7%; o estado de Espírito Santo por 30 (empresas), 50%, e 5 empresas (8,3%) desistiram.

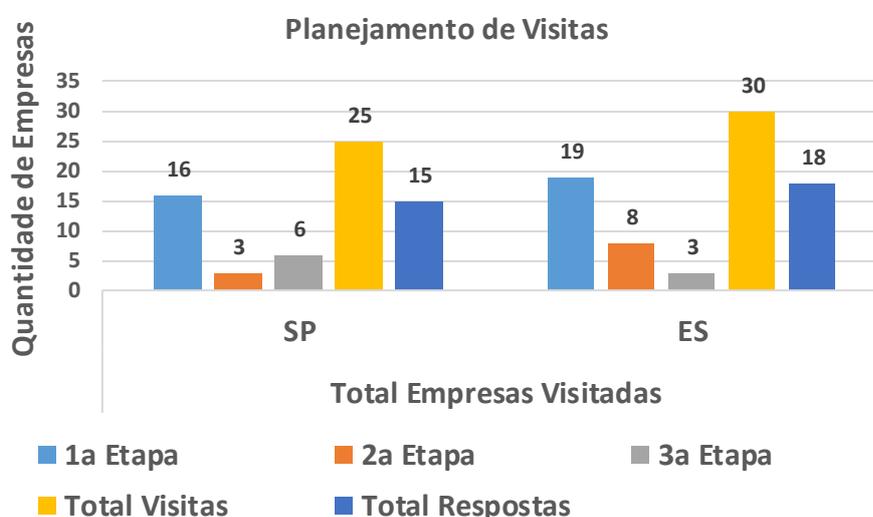
Dentre aquelas que responderam ao questionário, 15 empresas (25%) foram do estado de SP, e 18 empresas (30%) do estado de ES e as que não responderam ao questionário totalizaram 22 empresas.

Na Tabela 4.1 é apresentado um balanço das visitas planejadas e realizadas, assim como a quantidade de empresas que efetivamente responderam ao questionário.

Tabela 4.1 – Planejamento das visitas às empresas - SP e ES.

Etapas	Quantidade Empresas - SP	Quantidade Empresas - ES	Total Visitadas	
			SP	ES
Planejamento	37	23	-	-
1ª Etapa	16	23	16	19
2ª Etapa	4	8	3	8
3ª Etapa	6	3	6	3
Total Geral	26	34	25	30
Total Respostas	-	-	15	18

A Figura 4.1 representa as quantidades de empresas visitadas e as que responderam o formulário em cada etapa, conforme mostrado na Tabela 4.1.

**Figura 4.1** – Quantidade de empresas por estados.

4.6. Considerações Finais

Este capítulo descreveu a metodologia empregada para a realização da pesquisa direta, através de formulário específico, para a obtenção de custos por paradas industriais devido aos AMTs.

Foram selecionadas para participarem da pesquisa empresas de pequeno, médio e grande porte, em diversos ramos de atividade. Todas as empresas são alimentadas em média tensão (13,8 kV) pela área de concessão da EDP – Energias de Portugal, nos estados de São Paulo e de Espírito Santo, cujos resultados serão mostrados no Capítulo 5.

Várias foram as dificuldades encontradas para a realização da pesquisa, sendo as principais: (i) por razões internas aconteceu uma demora na marcação das visitas por parte da EDP; (ii) por questões de segurança a EDP determinou que qualquer visita a ser realizada o pesquisador não poderia estar só, mas sim acompanhado de um representante da concessionária,

atrasando o processo em função de disponibilidade de funcionários; (iii) a distância geográfica das empresas alvo; (iv) o tempo limitado do projeto; (v) a adesão das empresas em participar dos estudos; (vi) cancelamento das visitas por parte da UC e (vii) a limitação de recurso financeiro.

Das 33 (trinta e três) empresas que responderam ao questionário, algumas delas não permitiram revelar os seus nomes, por questões estratégicas de negócios tendo em vista os concorrentes do mesmo tipo de atividade industrial.

Cabe ressaltar que o número desejado de respostas era de no mínimo 30 empresas. Apesar de ser um número relativamente pequeno, os dados extraídos neste tipo de pesquisa já seriam suficientes para os resultados pretendidos.

Apesar das dificuldades citadas anteriormente, a busca pelas informações se mostraram eficientes e vantajosas, pois, em muitos casos, os custos devido aos AMTs foram conseguidos quase de imediato. Entretanto, enfatiza-se aqui que as informações relativas à composição dos custos, conforme detalhamentos propostos por Costa (2003), Watanabe (2010) e Vegunta (2011), não foram disponibilizadas pelas empresas. Os motivos estão expostos no início do próximo capítulo.

5. ESTUDO DE CASO E RESULTADOS

5.1. Considerações Iniciais

Neste capítulo são apresentados os resultados da aplicação da metodologia proposta para a obtenção dos custos de paradas de processos devido à ocorrência de afundamentos e interrupções de tensão de curta duração, foram utilizados dados reais de 33 empresas supridas em média tensão, situadas na área de concessão da distribuidora de energia elétrica EDP.

Os passos da metodologia descritos no capítulo anterior são usados para condução da pesquisa e obtenção dos resultados. Aqui, faz-se uma análise dos resultados obtidos, bem como uma comparação destes com os valores encontrados na literatura técnica.

Conforme mencionado, as empresas não estiveram dispostas a fornecer detalhamento dos seus custos sobre seus processos fabris, na maior parte das vezes por questões de sigilo e receio de concorrências, impossibilitando assim a utilização das formulações apresentadas no capítulo 3, item 3.2. Conseqüentemente, os valores aqui apresentados são resultados das manipulações dos dados obtidos via entrevistas/ formulários, uso dos valores atuais de custos por kW e custos por demanda em cada ramo de atividade, bem como outros dados e tratamentos estatísticos, conforme serão mostrados.

5.2. Resultados

Os resultados obtidos com a aplicação do formulário de pesquisa foram tratados estatisticamente e organizados em tabelas e gráficos para facilitar a apresentação, interpretação e análise.

Conforme explicitado no Capítulo 4, dentre as 70 empresas pré-selecionadas, após uma nova avaliação da EDP, um total de sessenta (60) foram escolhidas, sendo trinta e sete (37) do estado de SP e vinte e três (23) do estado de ES, todas supridas em média tensão (13,8 kV) e destas, 33 UCs responderam integralmente o formulário de pesquisa.

As Tabelas de 5.1 a 5.4 apresentam as empresas contendo as suas características pertinentes a cada tipo de processo.

A Tabela 5.1 mostra a lista de empresas contendo o tipo de atividade (evitou-se aqui o nome das empresas, por solicitação de algumas), o porte da empresa e uma coluna de observações que apresenta alguma informação adicional. Dentro do universo de todas as empresas visitadas que responderam ao questionário, para efeito de dimensionamento do porte das mesmas, levou-se em consideração a quantidade de funcionários, o nível de demanda

contratada, o volume de produção e espaço físico do processo produtivo, ficando assim definido: (i) pequeno porte: menor do que 300 funcionários, (ii) médio porte: entre 300 a 800 funcionários e (iii) grande porte: maior que 800 funcionários.

Tabela 5.1 – Identificação das empresas.

Número	Tipo de atividade	Porte da empresa	Observação
1	Plástico	Grande (1.000 empregados)	Filme plástico para alimentos
2	Automotivo	Médio (560 empregados)	Fechaduras e maçanetas
3	Pneus	Grande (1.000 empregados)	Pneus para carros
4	Pneus	Grande (1.000 empregados)	Pneus para carros
5	Comercial	Médio (300 empregados)	Locação de espaço
6	Comercial	Pequeno (150 empregados)	Locação de espaço
7	Papel de parede	Médio (300 empregados)	Papel de parede
8	Metalúrgica	Pequeno (170 empregados)	Perfil de alumínio
9	Brinquedos	Pequeno (190 empregados)	Brinquedos
10	Plástico	Médio (400 empregados)	Filme plástico para alimentos
11	Plástico	Médio (800 empregados)	Filme plástico para alimentos
12	Galvanização	Pequeno (35 empregados)	Peças metálicas
13	Extrusão	Pequeno (49 empregados)	Metalúrgica
14	Têxtil	Pequeno (120 empregados)	Fibra de lã
15	Têxtil	Pequeno (70 empregados)	Tingimento de tecidos
16	Vidro	Pequeno (80 empregados)	Vidros para box, portas e janelas
17	Extrusão	Médio (500 empregados)	Cabos submarinos
18	Plástico	Médio (300 empregados)	Embalagem para alimentos
19	Fundição	Pequeno (50 empregados)	Peças de trem de carga
20	Mineração	Pequeno (45 empregados)	Pedras para construção civil
21	Vidro	Pequeno (60 empregados)	Vidros para box, portas e janelas
22	Alimentos	Pequeno (250 empregados)	Sucos
23	Mobiliário	Médio (300 empregados)	Placas de MDF
24	Mobiliário	Médio (300 empregados)	Placas de MDF
25	Alimentos	Pequeno (50 empregados)	Ração para animais
26	Pedras e granitos	Pequeno (250 empregados)	Pias de granito e mármore
27	Chips de cartão	Pequeno (200 empregados)	Cartões de banco
28	Plástico	Pequeno (100 empregados)	Embalagem para alimentos
29	Metalúrgica	Médio (300 empregados)	Peças - Movimentos verticais e horizontais
30	Comercial	Grande (1.000 empregados)	Locação de espaço
31	Química	Pequeno (100 empregados)	Fertilizante
32	Automotivo	Médio (500 empregados)	Montadora de ônibus
33	Petrolífera	Grande (1.000 empregados)	Prospecção de petróleo

A Tabela 5.2 apresenta, para cada empresa, os equipamentos sensíveis usados no processo, o número médio de paradas de processo mensal e o tempo médio para retomada da produção quando ocorre uma parada de processo.

Tabela 5.2 – Equipamentos sensíveis, histórico de eventos e tempo de retomada.

Número	Tipo de atividade	Equipamentos sensíveis	Histórico de eventos	Tempo de retomada
1	Plástico	ASD, PLC	2 eventos/mês	120 min
2	Automotivo	ASD, PLC, Robôs	4 eventos/mês	60 min
3	Pneus	ASD, PLC	2 eventos/mês	120 min
4	Pneus	ASD, PLC, Cartões eletrônicos	3 eventos/mês	60 min
5	Comercial	Computador, No break	7 eventos/mês	15 min
6	Comercial	Computador, No break	4 eventos/mês	20 min
7	Papel de parede	ASD, PLC	5 eventos/mês	30 min
8	Metalúrgica	ASD, PLC	2 eventos/mês	60 min
9	Brinquedos	ASD, PLC	8 eventos/mês	45 min
10	Plástico	ASD, PLC, Cartões eletrônicos	10 eventos/mês	30 min
11	Plástico	ASD, PLC, Cartões eletrônicos	10 eventos/mês	30 min
12	Galvanização	Contator	1 evento/mês	10 min
13	Extrusão	ASD, PLC	3 eventos/mês	15 min
14	Têxtil	ASD, Contator	2 eventos/mês	30 min
15	Têxtil	ASD, PLC, Cartões eletrônicos	6 eventos/mês	40 min
16	Vidro	ASD, PLC	não disponível	10 min
17	Extrusão	ASD, PLC, RX SCANNER	30 eventos/mês	60 min
18	Plástico	ASD, Impressora	25 eventos/mês	60 min
19	Fundição	ASD, PLC	1 evento/mês	60 min
20	Mineração	ASD, PLC	não disponível	20 min
21	Vidro	ASD, PLC	não disponível	20 min
22	Alimentos	ASD, PLC	não disponível	360 min
23	Moveleira	ASD, PLC, lâmpada UV	8 eventos/mês	60 min
24	Moveleira	ASD, PLC, lâmpada UV	8 eventos/mês	30 min
25	Alimentos	ASD, PLC	8 eventos/mês	30 min
26	Pedras e granitos	ASD, PLC	4 eventos/mês	30 min
27	Chips de cartão	Impressoras	8 eventos/mês	120 min
28	Plástico	ASD, PLC	4 eventos/mês	15 min
29	Metalúrgica	ASD, PLC	4 eventos/mês	15 min
30	Comercial	Computador, Elevador, Escada rolante	5 eventos/mês	10 min
31	Química	ASD, PLC, Contator, Elevador	não disponível	10 min
32	Automotivo	Laser, Dobrador, Solda	30 eventos/mês	20 min
33	Petrolífera	ASD, PLC	18 eventos/mês	60 min

A Tabela 5.3 apresenta, para cada empresa pesquisada, a demanda, o custo por evento em dólar americano, o custo por demanda em dólar americano por kW e outras informações sobre custos adicionais como pagamentos de multas, retrabalho, e reparo de equipamentos danificados pela ocorrência de afundamentos ou interrupção de tensão, também em dólares americanos.

Tabela 5.3 – Custo por evento e custo por demanda. (em dólares americanos)

Número	Tipo de atividade	Demanda (kW)	Custo/Evento (USD)	Custo/kW (USD/kW)	Outras informações
1	Plástico	3.000	4.190,30	1,40	US\$3.286,50 danos ao equipamento
2	Automotivo	2.500	6.847,00	2,74	Danos ao equipamento
3	Pneus	2.900	6.003,00	2,07	US\$12.005,00/mês (reprocessamento)
4	Pneus	1.700	6.000,00	3,53	US\$18.000,00/mês (reprocessamento) + 2.096,00 manutenção
5	Comercial	1.200	2.717,00	2,26	US\$76.070,00/mês de multas (12h sem energia)
6	Comercial	1.300	6.851,00	5,27	US\$261,00 danos ao equipamento US\$227.718,00 compra de 8 geradores
7	Papel de parede	1.700	9.667,00	5,69	US\$2.370,00 danos ao equipamento
8	Metalúrgica	1.400	2.071,00	1,48	-
9	Brinquedos	1.200	3.657,00	3,05	US\$740,00 danos ao equipamento
10	Plástico	500	1.640,00	3,28	US\$2.368,00 danos ao equipamento
11	Plástico	1.350	6.056,00	4,50	US\$7.130,00 danos ao equipamento
12	Galvanização	350	556,00	1,60	US\$470,00 danos ao equipamento
13	Extrusão	500	1.811,00	3,62	-
14	Têxtil	950	1.501,00	1,67	-
15	Têxtil	450	1.509,45	3,35	US\$2.841,00 danos ao equipamento
16	Vidro	410	1.437,00	3,51	Perda de um forno devido a 8h de interrupção
17	Extrusão	850	52.800,00	62,18	Perda de tubos de até 2 km
18	Plástico	2.400	5.690,00	2,37	-
19	Fundição	850	4.773,00	5,61	Sucatas são reprocessadas
20	Mineração	2.000	4.085,00	2,04	Despadronização no tamanho da partícula
21	Vidro	405	2.161,00	5,33	Sucatas são destinadas a indústria de bebidas
22	Alimentos	700	5.145,00	7,35	5 no breaks — 800 kVA
23	Mobiliário	760	7.238,00	9,52	Danos as lâmpadas UV
24	Mobiliário	800	7.153,00	8,94	Danos ao transformador
25	Alimentos	1.000	650,00	0,65	Material é reciclado e reprocessado
26	Pedras e granitos	3.150	11.130,00	3,53	Placas imperfeitas são reprocessadas
27	Chips de cartão	500	6.613,00	13,26	-
28	Plástico	400	2.031,00	5,08	Material é reciclado e reprocessado
29	Metalúrgica	500	2.715,00	5,43	-
30	Comercial	6.000	9.311,00	1,55	Investimento em filtros de harmônicos
31	Química	250	4.565,00	18,26	Gastos com reprocessamento
32	Automotivo	2.500	13.049,00	5,22	Investimento: no break e gerador
33	Petrolífera	2.500	41.414,00	16,57	-

5.3. Análises Gerais

Considerando todas as empresas pesquisadas, foram gerados *boxplots* no Minitab (VALLADARES NETO et al, 2019) para o número de empregados, número médio de evento por mês, tempo de retomada, demanda, custo por evento e custo por demanda.

A Figura 5.1 mostra o *boxplot* do número de empregados, neste caso, não há dados considerados discrepantes. O valor médio do número de empregados encontrado foi de 349 e o *boxplot* demonstra que no geral, este estudo focou em pequenas e médias empresas.

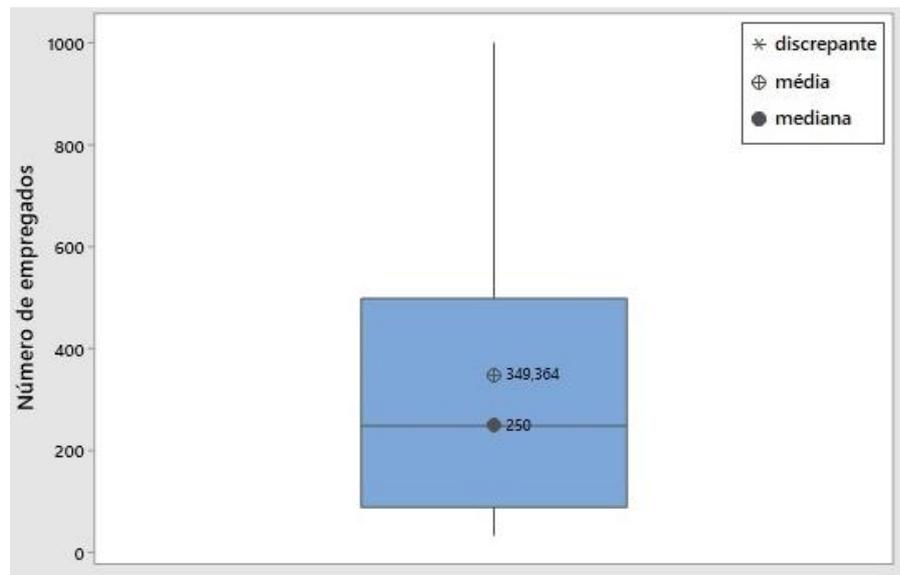


Figura 5.1 – Número de empregados.

A Figura 5.2 exibe o boxplot do número de afundamentos de tensão mensal, nota-se que há 4 empresas com número de eventos discrepantes. Em termos médios, ocorre aproximadamente 8 eventos por mês, o que pode ser considerado um alto valor, pois dependendo do tipo de produto produzido, uma única parada de processo pode gerar grandes prejuízos.

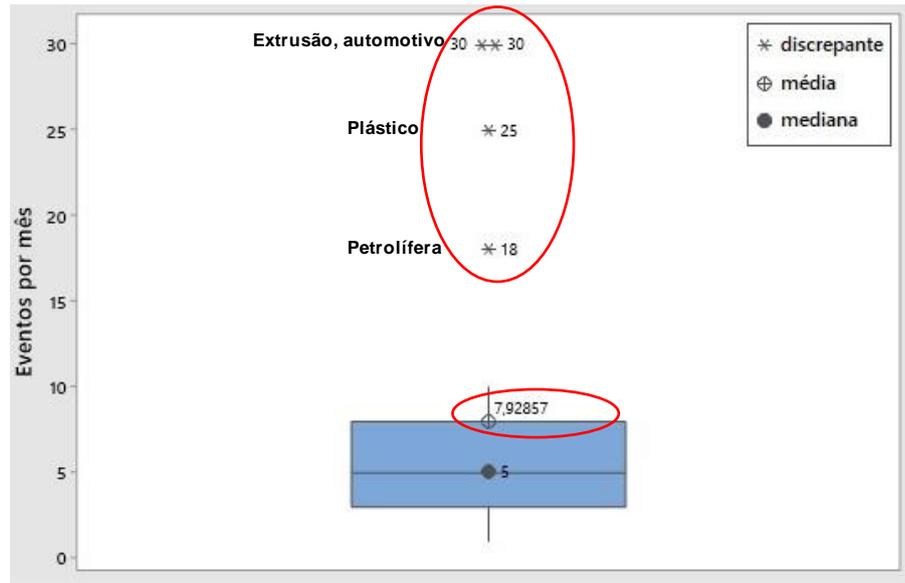


Figura 5.2 – Número de eventos por mês.

A Figura 5.3 apresenta o *boxplot* do tempo de retomada da produção. Neste há apenas um valor discrepante, a maioria das empresas possuem tempo de retomada entre 10 min e 60 min e o valor médio é de 50,76 min.

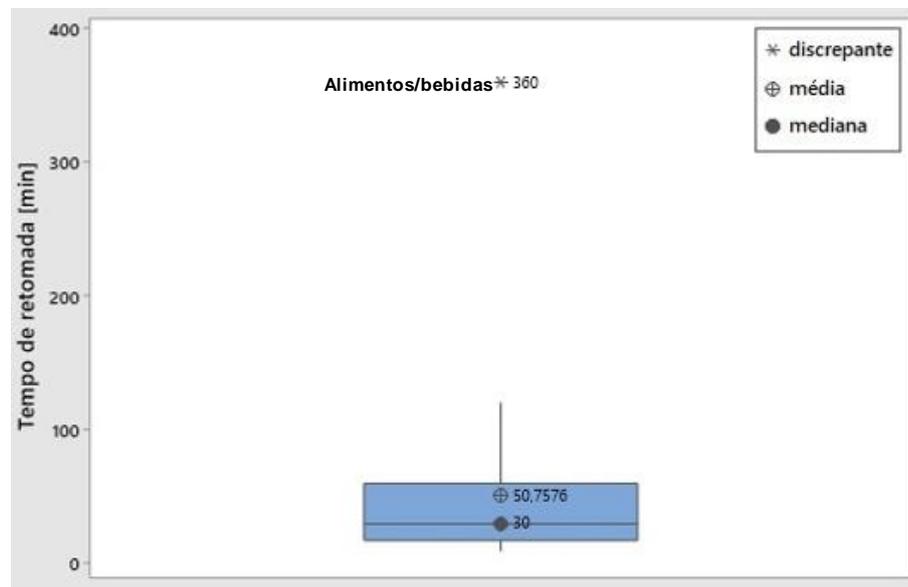


Figura 5.3 – Tempo de retomada.

O gráfico da Figura 5.4 corresponde ao boxplot da demanda, o qual apresenta um valor discrepante (empresa 30). A demanda média por eletricidade é de 1.423,48 kW, com uma grande concentração de empresas na faixa de 500 kW à 2.500 kW, reforçando que a maioria das empresas pesquisadas são de pequeno e médio porte.

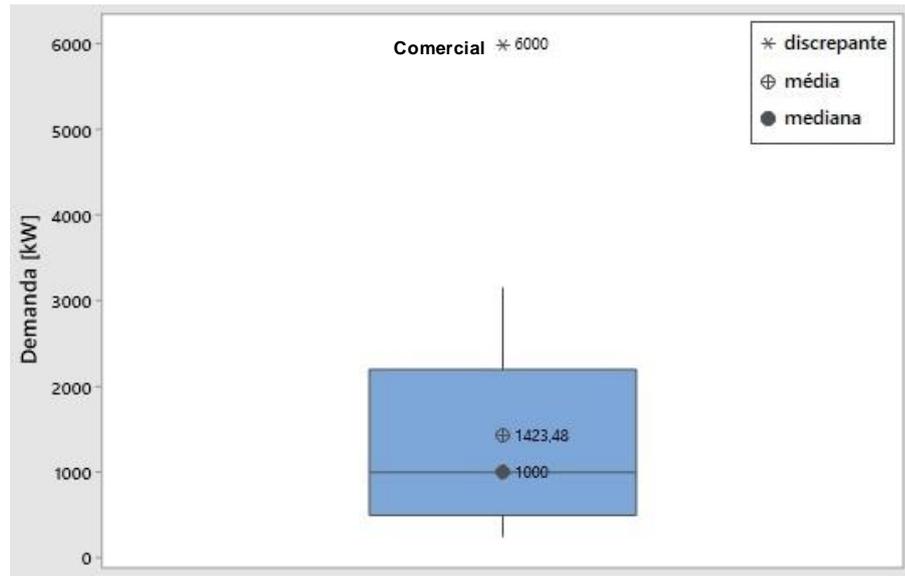


Figura 5.4 – Demanda.

A Figura 5.5 apresenta o *boxplot* do custo por evento, onde se observa que há duas empresas (17 e 33), em que o custo por evento é muito superior às demais. Esta discrepância se deve ao alto valor agregado do produto – cabos submarinos para uso em águas profundas e a extração do petróleo, respectivamente. Nota-se também que o custo médio devido à ocorrência de um afundamento de tensão foi de USD 7.364,75.

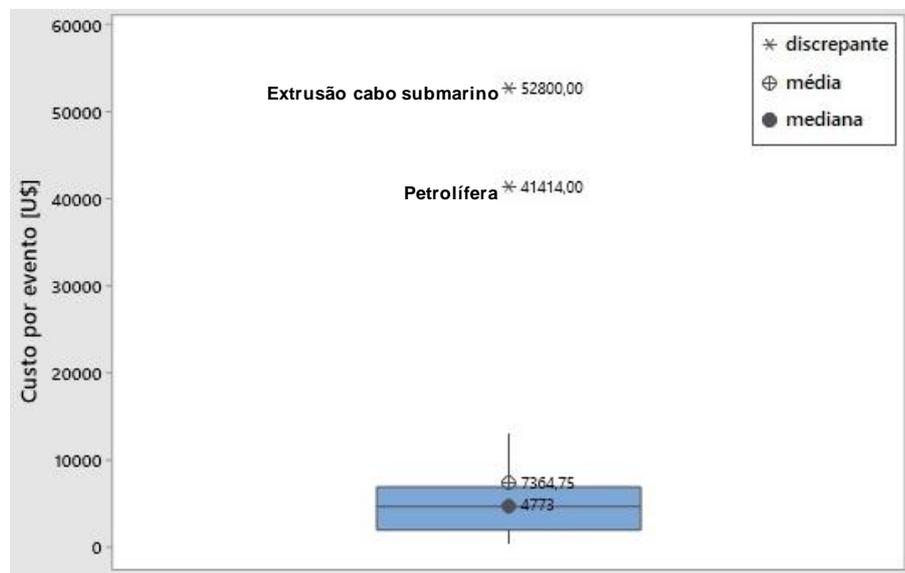


Figura 5.5 – Custo por evento.

A Figura 5.6 mostra o *boxplot* do custo por demanda, em que as empresas 17, 27, 31 e 33 são caracterizadas como discrepantes, como explicado anteriormente. Observa-se que o valor médio encontrado foi de USD 6,72/kW e que há uma grande concentração de empresas na faixa de USD 2,00/kW à USD 6,00/kW.

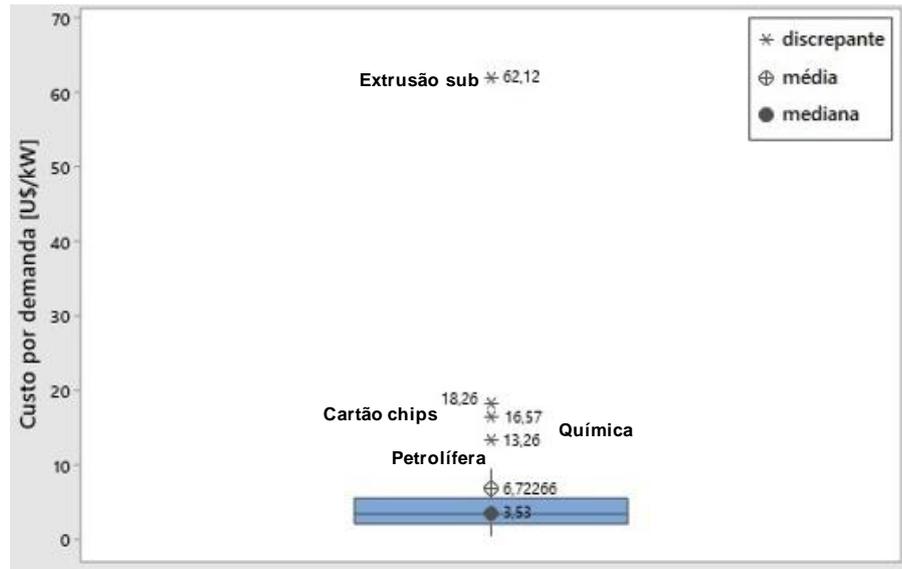


Figura 5.6 – Custo por demanda.

Considerando os valores médios encontrados para o número de eventos por mês (8) e o custo por evento (USD 7.364,75), tem-se, portanto, uma estimativa do custo médio anual devido às paradas de processo ocasionadas por AMTs de USD 707.016,00. A magnitude deste valor mostra a importância de estudar os impactos econômicos destes distúrbios e quando viável usar condicionadores de energia para mitigar estes custos.

Outra análise realizada com os números da pesquisa foi a verificação da existência de correlação da demanda de energia das empresas com o custo por evento, assim como com o custo por demanda.

O gráfico na Figura 5.7 mostra a dispersão e o coeficiente de correlação entre o custo por evento e demanda, enquanto a Figura 5.8 apresenta as mesmas informações entre as variáveis “custo por demanda” e “demanda”.

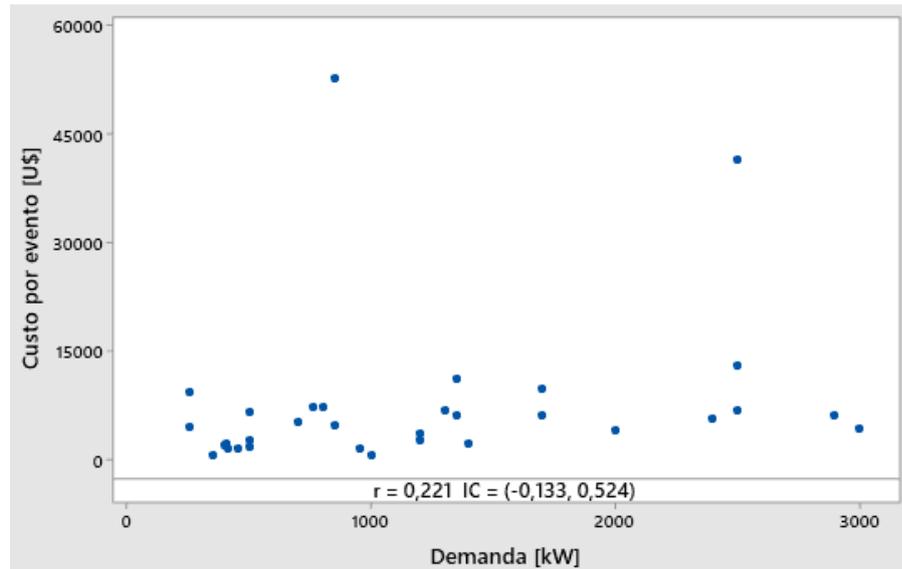


Figura 5.7 – Correlação custo por evento x demanda.

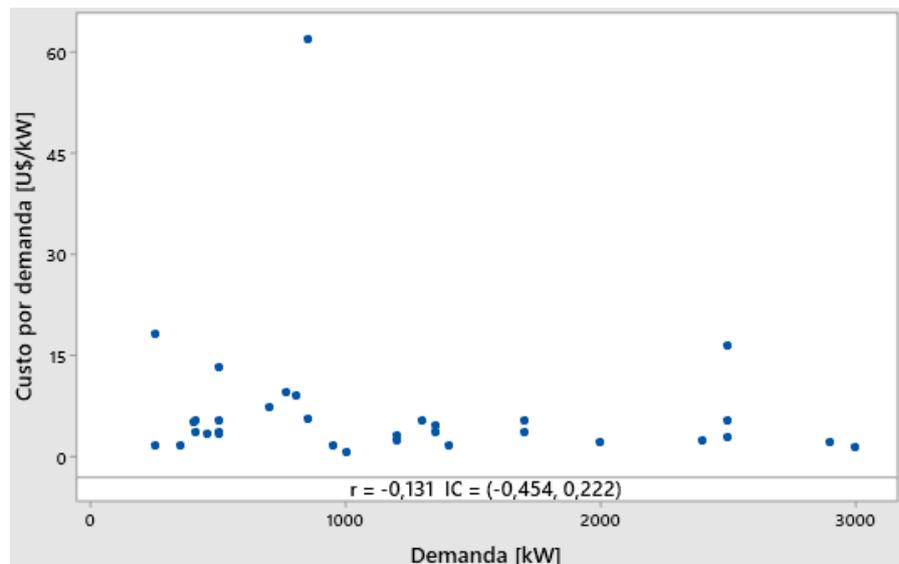


Figura 5.8 – Correlação custo por demanda x demanda.

Devido ao baixo valor do coeficiente de correlação encontrado em ambos casos ($r = 0,22$ e $r = -0,13$ respectivamente) ¹ (FIGUEIREDO FILHO et al, 2009), pode-se concluir que a demanda não afeta o custo por evento ou custo por demanda, ou seja, pode ocorrer de empresas com elevada demanda produzir um produto com baixo valor agregado e conseqüentemente apresentar um pequeno custo por evento, assim como é possível que empresas que não demandam grandes quantidades de potência produzam produtos com alto valor agregado

¹ O coeficiente de correlação de Pearson é uma medida de associação linear entre 2 variáveis que varia de -1 a 1. Uma correlação perfeita (-1 ou 1) indica que o escore de uma variável pode ser determinado exatamente ao se saber o escore da outra. No outro oposto, uma correlação de valor zero indica que não há relação linear entre as variáveis. Para (COHEN, 1988), valores entre 0,10 e 0,29 podem ser considerados pequenos; entre 0,30 e 0,49 são médios e entre 0,5 e 1 são considerados grandes. (FIGUEIREDO FILHO, 2009).

contribuindo para elevar o custo por evento desta. Portanto, provavelmente a principal variável que influencia os custos é o valor agregado do produto gerado.

5.4. Análises por Tipo de Atividade

Considerando as 33 empresas avaliadas, 12 diferentes tipos de atividades foram identificados. A Tabela 5.4 apresenta uma faixa e o valor médio da demanda, custo por evento e custo por demanda de cada tipo de atividade pesquisado. As indústrias de fundição, galvanização, extrusão e de cabos submarinos foram incluídas no ramo de atividade metalúrgica. A indústria de brinquedos foi agrupada junto às empresas de produção de plástico, pois os brinquedos são produzidos usando máquinas de injeção de polímeros.

Tabela 5.4 – Custos por tipo de atividade (em dólares americanos).

Número	Demanda (kW)	Custo/Evento (USD)	Custo/kW (USD/kW)
Plástico—Total de empresas: 8—24,24%			
1	3.000	4.190,00	1,40
7	1.700	9.667,00	5,69
9	1.200	3.657,00	3,05
10	500	1.640,00	3,28
11	1.350	6.056,00	4,50
18	2.400	5.690,00	2,37
27	500	6.613,00	13,26
28	400	2.031,00	5,08
Faixa	400 até 3.000	1.640,00 até 9.667,00	1,40 até 13,26
Média	1.381,25	4.943,00	4,83
Automotivo—Total de empresas: 4—12,12%			
2	2.500	6.847,00	2,74
3	2.900	6.003,00	2,07
4	1.700	6.000,00	3,53
32	2.500	13.049,00	5,22
Faixa	1.700 até 2.900	6.000,00 até 13.049,00	2,07 até 5,22
Média	2.400	7.974,75	3,39
Comercial—Total de empresas: 3—9,09%			
5	1.200	2.717,00	2,26
6	1.300	6.851,00	5,27
30	6.000	9.311,00	1,55
Faixa	1.200 até 6.000	2.717,00 até 9.311,00	1,55 até 5,27
Média	2.833,33	6.293,00	3,03
Vidro—Total de empresas: 2—6,06%			
16	410	1.437,00	3,51
21	405	2.161,00	5,33
Faixa	405 até 410	1.437,00 até 2.161,00	3,51 até 5,33
Média	408	1.799,00	4,42
Metalúrgica—Total de empresas: 6—18,18%			
8	1.400	2.071,00	1,48
12	350	556,00	1,60
13	500	1.811,00	3,62
17	850	52.800,00	62,18
19	850	4.773,00	5,61
29	500	2.715,00	5,08
Faixa	350 até 1.400	556,00 até 52.800,00	1,48 até 62,18
Média	741,67	10.787,67	13,26
Mineração—Total de empresas: 1—3,03%			
20	2.000	4.085,00	2,04
Alimentos—Total de empresas: 2—6,06%			
22	700	5.145,00	7,35
25	1.000	650,00	0,65
Faixa	700 até 1.000	650,00 até 5.145,00	0,65 até 7,35
Média	850	2.897,50	4,00
Mobiliário—Total de empresas: 2—6,06%			
23	760	7.238,00	9,52
24	800	7.153,00	8,94
Faixa	760 até 800	7.153,00 até 7.238,00	8,97 até 9,52
Média	780	7.195,50	9,23
Pedras e granitos—Total de empresas: 1—3,03%			
26	3.150	11.130,00	3,53
Química—Total de empresas: 1—3,03%			
31	250	4.565,00	18,26
Têxtil—Total de empresas: 2—6,06%			
14	950	1.501,00	1,67
15	450	1.509,45	3,35
Faixa	450 até 950	1.501,00 até 1.509,45	1,67 até 3,35
Média	700	1.505,23	2,51
Petrolífera—Total de empresas: 1—3,03%			
33	2500	4.1414,00	16,57

A Tabela 5.4 mostra que o ramo de atividade de maior representatividade das indústrias visitadas foi a do ramo plástico, correspondendo a 24,24% do total de empresas pesquisadas, as quais apresentaram faixas de custo por evento de USD 1.640,00 à USD 9.667,00 e faixa de custo por demanda de USD 1,40/kW à USD 13,26/kW. Estas grandes faixas de valores se justificam pelo diferente valor agregado dos produtos produzidos por estas empresas. O custo médio por evento foi de US\$ 4.943,00 e o custo por demanda foi de USD 4,79/kW.

O setor automotivo representa 12,12% do total de empresas visitadas e os custos obtidos foram próximos entre si, variando de USD 6.000,00 até USD 6.847,00 para os fabricantes de peças, embora cada empresa fabrique um produto distinto. Já para uma montadora de ônibus o custo ficou em USD 13.048,00. Os custos médios por evento e por demanda foram de USD 7.947,50 e USD 3,39/kW, respectivamente.

O setor de atividade comercial teve 3 empresas visitadas, representando 9,09% das empresas analisadas, os custos por evento obtidos variam de USD 2.717,00 até USD 9.311,00, apresentando uma média de US\$ 6.293,00, enquanto o custo médio por demanda foi de USD 3,03/kW. Neste tipo de atividade, dois shopping centers e um galpão de armazenamento foram agrupados.

As duas indústrias de vidro avaliadas tiveram um custo médio por evento de USD 1.799,00 e o custo médio por demanda de USD 4,42/kW, ressaltando que as empresas visitadas destinam seu produto para construção civil.

As indústrias metalúrgicas contabilizam 18,18% das visitas e apresentam custos por evento na faixa de USD 556,00 à USD 52.800,00, com uma média de USD 10.787,67. Neste ramo de atividade, uma pequena empresa de fundição e uma de galvanização foram incluídas. As quais produzem matéria prima para grandes metalúrgicas. A indústria de cabo umbilical óptico, usado em águas profundas para extração de petróleo também foi agrupada, a qual possui custo de parada de processo elevado.

Nas indústrias de alimentos, observa-se que os custos por eventos são muito diferentes. A fábrica dedicada à alimentação animal teve menor custo, enquanto o fabricante de bebidas apresentou maior custo. No último caso, a operação de retomada de processo produtivo é complexa, pois é necessário limpar toda a linha de produção, aumentando assim o tempo de retomada.

As duas empresas do setor moveleiro apresentaram custos por evento muito próximos com uma média de USD 7.195,50 e custo por demanda de USD 9,23/kW, demonstrando que possivelmente estes valores são típicos neste tipo de atividade.

Já as indústrias têxteis também apresentaram custos por evento próximos entre si, variando de USD 1.501,00 até USD 1.509,45. O custo médio por demanda foi de USD 2,51/kW.

As demais atividades pesquisadas, que são: mineração, química, pedras e granitos e petrolífera, possuem apenas uma empresa na amostra, portanto não é possível fazer uma análise comparativa nestes casos. No entanto, nota-se que há grande variabilidade nos valores de custo por evento nestas indústrias, principalmente devido ao valor agregado do produto que cada empresa produz.

Por fim, a Figura 5.9 apresenta uma comparação gráfica entre os valores médios de custo por evento de cada tipo de atividade avaliada. Observa-se que, com exceção do setor petrolífero, os outros setores possuem um custo médio próximo entre si e de aproximadamente USD\$ 6.000,00. Portanto, o porte da empresa é uma variável que também influencia no custo por evento.

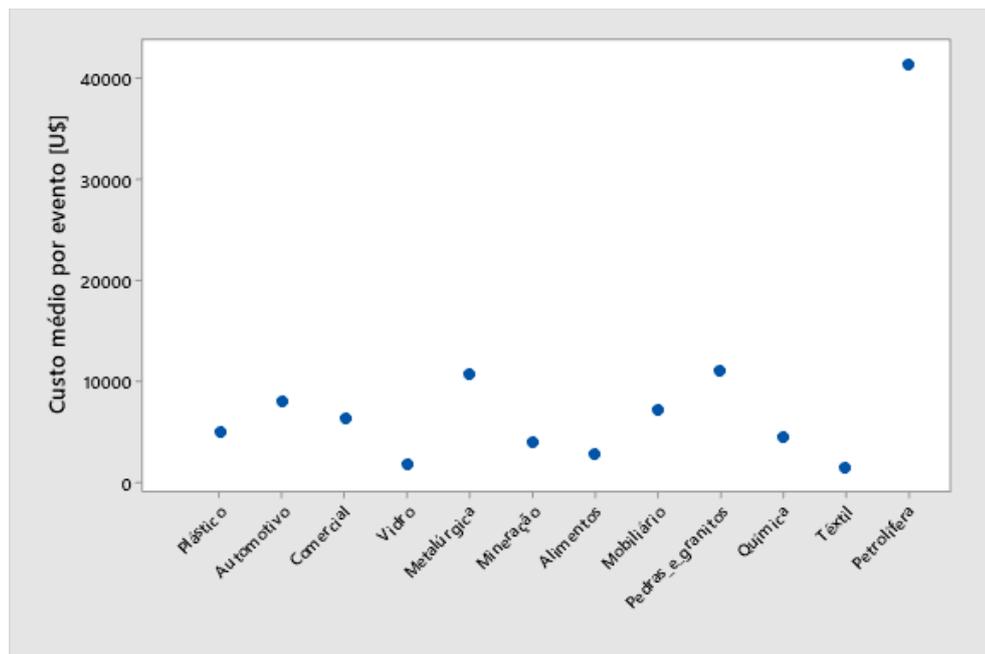


Figura 5.9 – Comparação de custos médios por evento entre tipos de atividade.

5.5. Considerações Finais

Apesar do fato de 5 empresas de ES não terem fornecido dados de eventos por mês, mesmo assim, chegou-se a um custo médio por evento de USD 7.364,75 para as 33 empresas.

O número de desligamentos para as 15 empresas de SP foi de 69/mês, com uma média por evento de USD 4.187,50. O custo mensal é de USD 288.938,00 e anual de USD 3.467.252,00, conforme dados das Tabelas 5.2 e 5.3.

Para o estado de ES, excetuando as 5 empresas que não informaram os dados de desligamentos, UCs 16, 20, 21, 22 e 31, o número de desligamentos das 13 indústrias restantes foi de 153 desligamentos/mês, com uma média por evento de USD 20.596,31. O custo mensal é de USD 3.151.236,00 e anual de USD 37.814.832,00, conforme dados das Tabelas 5.2 e 5.3.

A Tabela 5.5 mostra os respectivos valores.

Tabela 5.5 – Custo mensale número de desligamento mensal

TIPO DE METODOLOGIA	CUSTO ANUAL ES	CUSTO ANUAL SP	Nº DESLIG ANUAL ES	Nº DESLIG ANUAL SP
PESQUISA	USD \$37.814.832,00*	USD \$3.467.252,00	1.836 (153*x12)	828 (69x12)

*Não considerado custos de 5 UCs que não disponibilizaram os dados de desligamentos (UCs 16, 20, 21, 22 e 31)

Esses resultados mostram que as 13 indústrias do ES foram as que mais sofreram perdas financeiras, comparadas com as 15 empresas do estado de SP. Cabe salientar que os valores dos produtos agregados, das UCs 17 e 33 (cabos submarinos, e petrolífera) do estado de ES são bem maiores, em relação aos demais valores das empresas de SP e ES.

Durante a pesquisa de campo percebeu-se a preocupação dos entrevistados em não fornecer detalhadamente seus custos, possivelmente por receio de especulação de empresas concorrentes no mercado. Em geral, as empresas consideram os custos uma parte estratégica do negócio, embora o pesquisador tenha garantido o sigilo dos dados e que o nome da empresa não fosse divulgado. As pequenas empresas, quase todas, concordaram em ter seus nomes revelados, inclusive permitindo a divulgação de custos. Porém, por questões de consistência, o pesquisador e a EDP optaram por não divulgar o nome de nenhuma das empresas pesquisadas.

A comparação de valores obtidos neste trabalho com valores encontrados em documentos nacionais e internacionais é bem difícil, pois são muitas as variáveis que entram no processo. Uma destas variáveis é o próprio valor do dólar que servem de referência, pois ele pode variar muito de país para país.

Pelos resultados encontrados, sinaliza-se à EDP o risco de ação indenizatória das UCs. Portanto, seria interessante uma maior aproximação junto aos consumidores, na tentativa de conscientizá-los quanto ao fenômeno, muitas vezes aleatórios, podendo com isso se evitar a judicialização para fins de remuneração pelas perdas devido aos AMTs, conforme vem acontecendo no país e no mundo, a exemplo do caso da Fibra Du Pont (FIBRA DUPONT E CPFL 2014), citado neste trabalho. Esse processo, de certa forma, criou uma jurisprudência no Brasil para que outras ações indenizatórias sejam feitas pelos consumidores.

Para que se possa coroar esse trabalho, procurou-se fazer um comparativo de custos por outra metodologia, mostrada no próximo capítulo. Trata-se da obtenção de custos aproveitando-se de medições realizadas pela própria EDP em um outro projeto de P&D. Tais medições estão retratadas em uma dissertação de mestrado (Costa, 2018), cujos dados obtidos de AMTs serão utilizados para a obtenção dos custos, com base em resultados anteriormente apresentados.

6. ESTIMATIVA DE CUSTO ANUAL DEVIDO A AMT

6.1. Considerações Iniciais

Algumas metodologias para a obtenção de custo de paradas de processo devido a ocorrência de AMTs, com realizações de Simulações, Medições e de Pesquisa Direta foram descritas no capítulo 3.

A proposição neste capítulo visa estimar o custo anual devido a AMT, considerando, como elemento crítico o ASD, carga industrial considerada a mais sensível, conforme informação obtida dos consumidores, durante a realização de pesquisa de campo nas UCs, nos estados de Espírito Santo e de São Paulo.

Para tanto, a metodologia para o cálculo a ser considerada é a de medições de AMTs, que foram extraídas de 32 barramentos das SEs em MT, do sistema de distribuição da EDP destes estados durante 1 ano de coleta.

Para efeito de cálculo dos custos foi considerada a quantidade de AMTs que aconteceram durante 12 meses de medição, cujos resultados foram tratados estatisticamente, em função da probabilidade de desligamentos de carga sensível, apresentados na dissertação de Costa (2018), cuja metodologia adotada pelo autor é apresentada de forma objetiva neste capítulo.

Portanto, para realizar estimativa dos custos anuais devido a AMT serão considerados:

- Os números de desligamentos obtidos a partir dos resultados de medições realizadas em 32 barramentos da EDP;
- Os valores de custo por parada de processo das 33 UCs, que foram discretizadas em 12 tipos de atividade industrial descritos no Capítulo 5,
- A carga sensível considerada será o ASD.

6.2. Medições de VTCD

6.2.1. Rede de Monitoramento

Neste item são apresentadas as estatísticas levantadas com base nos resultados de medições provenientes de um outro projeto de P&D (Pesquisa e Desenvolvimento), financiado pela própria EDP, para análise das características dos eventos e o desempenho dos barramentos monitorados (COSTA, 2018).

Para a referida análise uma base de dados proveniente do projeto citado foi utilizada, a qual contém os resultados de medições de 61 pontos de monitoramento em subestações de MT (em 13,8 kV), de duas distribuidoras, da EDP ES e EDP SP, durante o período de um ano.

Para realização da medição da tensão no barramento de MT destas subestações, utilizou-se o medidor SEL-734 que possui um sistema de controle e monitoramento avançado, fabricado pela *Schweitzer Engineering Laboratories*. Este medidor permite conexão através de rede ethernet, viabilizando o acesso remoto àqueles pontos de medição onde se dispõe desta estrutura de comunicação. Este equipamento possui um *software* com interface simples para parametrização, disponibilizando uma vasta quantidade de parâmetros a serem configurados, permitindo inúmeras possibilidades de ajustes.

Desta forma, foi proposto um conjunto de ajuste único que foi configurado em todos os medidores instalados, de forma a obter padronização nas medições de maior relevância (*Voltage Sags, Swells and Interruptions*). Deste modo os medidores capturaram distúrbios de tensão e apresentaram as informações resumidas (em forma de tabela) ou detalhadas (através de oscilografia) de acordo com a norma IEC 61000-4-30 ou as curvas CBEMA/ITIC. Foi parametrizado nos medidores eventos de VTCD que ocorressem para tensões eficazes $V \leq 0,9V_N$ e duração superior a 0,5 ciclo (8,33ms).

Os principais resultados apresentados se baseiam no valor eficaz das tensões, e o SEL-734 é capaz de realizar os cálculos deste valor eficaz atualizando a cada nova amostra do sinal, fazendo a atualização ponto a ponto. Portanto, com esta janela de cálculo “deslizante”, obtém-se um valor eficaz na mesma taxa de amostragem do sinal, através de uma tabela contendo o resumo com todas as informações dos eventos.

Com respeito à rede de medição, a alocação dos monitores de qualidade da energia elétrica, visando às medições de VTCDs, foi definida de forma determinística pelas concessionárias envolvidas no projeto de P&D, optando-se pela escolha dos pontos a serem monitorados com base no conhecimento dos especialistas de cada empresa, levando em conta a concentração de consumidores sensíveis a VTCDs e características particulares do sistema em cada região. A distribuição geográfica dos medidores nas regiões de abrangência das concessionárias pode ser vista nas imagens apresentadas nas Figuras 6.1 e 6.2.



Figura 6.1 – Distribuição das subestações monitoradas da EDP ES.



Figura 6.2 – Distribuição das subestações monitoradas da EDP SP.

A figura 6.3 mostra o diagrama unifilar simplificado de uma SE típica monitorada nos 61 pontos de medições.

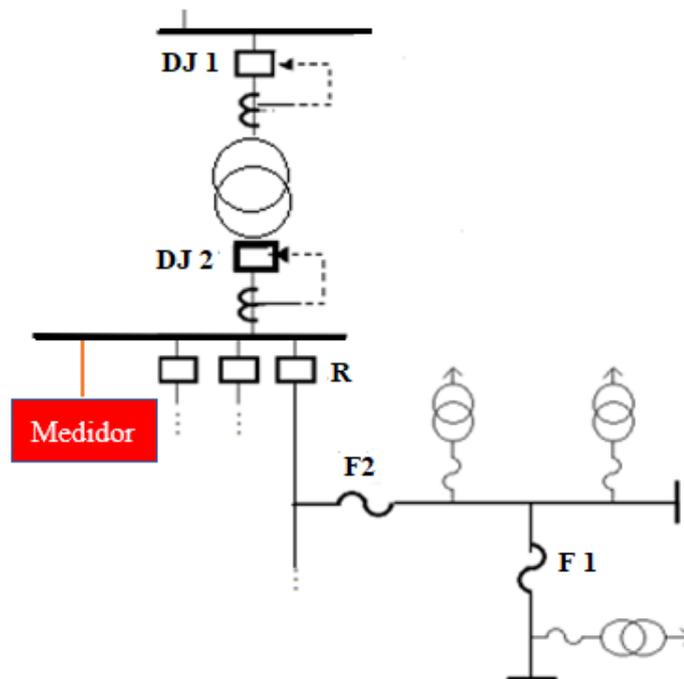


Figura 6.3 – Diagrama unifilar da SE.

Foram instalados 30 medidores na rede da EDP ES e os dados foram obtidos remotamente. Na rede da EDP SP foram instalados 31 medidores e neste caso os dados foram

coletados manualmente no local. Em ambas concessionárias os dados foram extraídos e disponibilizados mensalmente.

Dos 61 pontos de monitoramento, registraram-se 10.378 eventos de VTCD, ao longo de um ano de medições, com duração superior a 0,5 ciclo (8,33 ms), sendo:

- 10.201 afundamentos de tensão (98,3%) e
- 177 elevações de tensão (1,7%).

Portanto, os afundamentos de tensão representam a maioria dos eventos detectados, o que corrobora a importância desta pesquisa de doutorado.

6.2.2. Severidade das VTCDs

Com respeito a este item, Costa (2008) elaborou um gráfico de frequência acumulada $F(x)$ com relação à magnitude dos AMTs.

O autor, ao analisar a severidade dos eventos de VTCD, observou que cerca de 45% possuía magnitude inferior a 0,80 p.u e 7,2% a magnitude foi inferior a 0,4 p.u., conforme mostra a Figura 6.4.

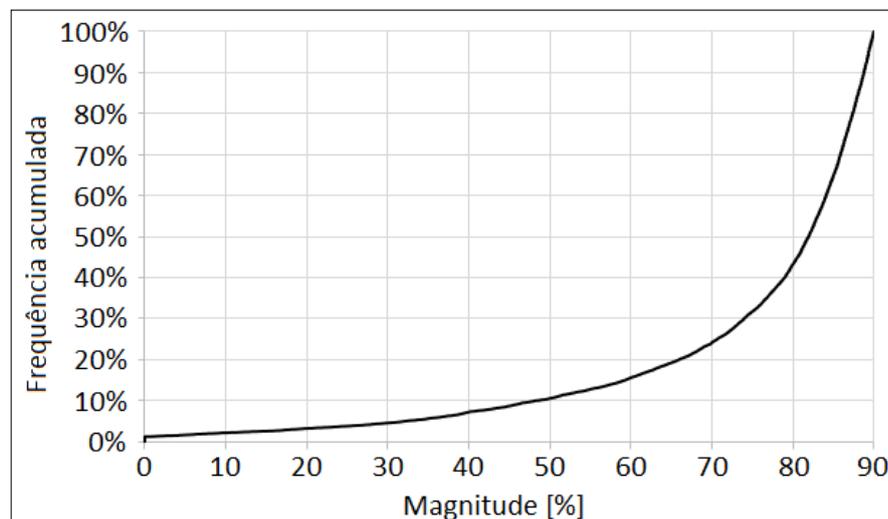


Figura 6.4 – Frequência acumulada: magnitude dos afundamentos de tensão.
Fonte: COSTA (2018).

A Figura 6.5 mostra a frequência acumulada com relação à duração das VTCDs, sendo que 75% dos eventos de VTCD têm duração inferior a 200 ms e que apenas 5% dos eventos tiveram duração superior a 1 segundo.

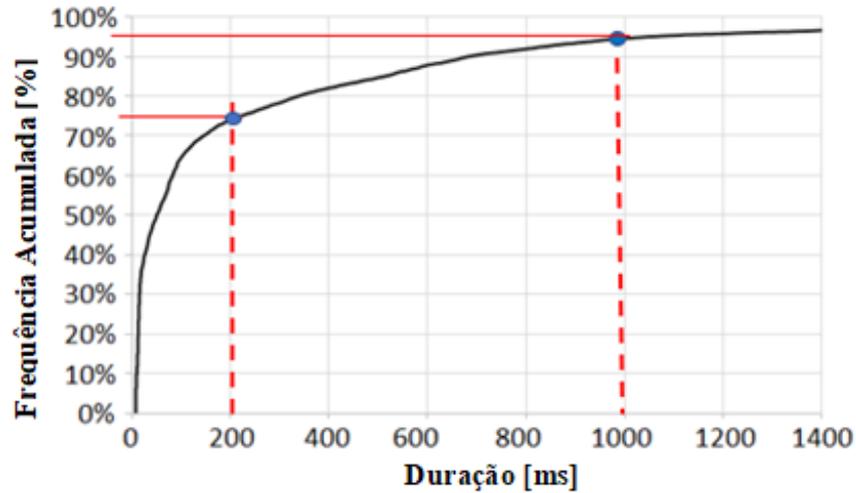


Figura 6.5 – Frequência acumulada: duração dos eventos de VTCD.
Fonte: COSTA (2018).

Na Figura 6.6 é apresentado um gráfico tridimensional mostrando o número de afundamentos de tensão registrados, estratificados por faixas de magnitude e duração.

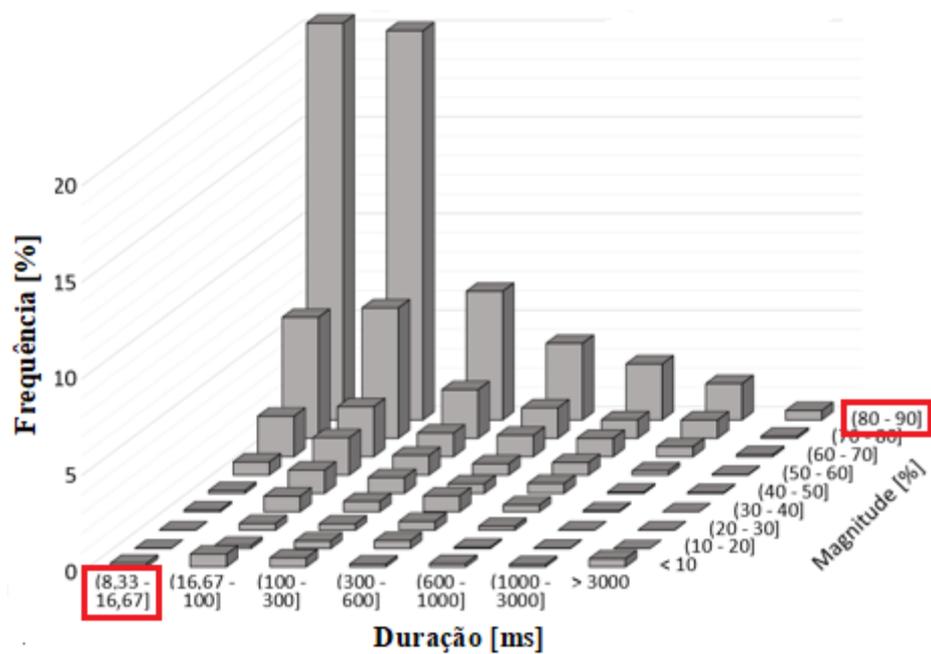


Figura 6.6 – Frequência dos afundamentos de tensão em termos de magnitude e duração.
Fonte: COSTA (2018).

Percebe-se que grande maioria dos eventos se concentra próximos ao limiar de detecção de 0,9 p.u, bem como, uma grande quantidade de ocorrências apresenta duração inferior a um ciclo.

6.2.3. Tipos de afundamentos de tensão

Em virtude das magnitudes estarem disponíveis nas três fases, foi possível aplicar a Classificação ABC, proposta por Bollen, 2000, conforme resultados apresentados na Tabela 6.1. De forma semelhante, os eventos também foram classificados em função do número de fases em que ocorreu a redução da tensão (CIGRE, 2010), conforme o seguinte critério:

- tipo I: redução mais severa em uma das fases;
- tipo II: redução severa em duas das fases;
- tipo III: redução da tensão nas três fases na mesma proporção.

Tabela 6.1 – Taxa de ocorrência de cada tipo de afundamento de tensão.

Fonte: COSTA (2018).

Tipo do evento		Frequência [%]	
I	B	21,4	60,1
	D	24,9	
	F	13,8	
II	C	17,4	26,5
	E	0,9	
	G	8,2	
III	A	13,4	13,4

Para a obtenção da classificação dos eventos em tipos I, II e III, o método proposto em (BOLLEN, GOOSSENS AND ROBERT, 2004) foi considerado e implementado.

Para tanto, primeiramente deve-se ordenar em ordem crescente, os valores de magnitude registrados nas três fases, obtendo-se assim, V_X , V_Y e V_Z ($V_X \leq V_Y \leq V_Z$) e, na sequência, os eventos são separados para as seguintes condições (CIGRE, 2010):

se $(V_Z - V_Y) < (V_Y - V_X)$: pode se tratar de um evento tipo I ou tipo III se os dois maiores valores de magnitude são próximos;

se $(V_Z - V_Y) \geq (V_Y - V_X)$: pode se tratar de um evento tipo II ou tipo III, quando os dois menores valores são próximos.

Diferenciam-se os eventos tipo I e tipo III, comparando-se a média dos dois maiores valores de magnitude ($V_{YZ} = (V_Y + V_Z)/2$) com o menor (V_X):

se $V_{YZ} < 0,3 + 0,7 V_X$: é do tipo III o evento;

se $V_{YZ} \geq 0,3 + 0,7 V_X$: é do tipo I o evento.

Para se determinar os eventos tipo II e tipo III faz-se analogamente, cotejando-se o maior valor de magnitude (V_Z) com a média dos dois menores ($V_{XY} = (V_X + V_Y)/2$):

se $V_Z < 0,3 + 0,7 V_{XY}$: é do tipo III o evento;

se $V_Z \geq 0,3 + 0,7 V_{XY}$: é do tipo II o evento.

Outra constatação obtida pela análise dos resultados de medições foi a predominância dos eventos ocasionados por:

- faltas fase-terra e bifásicas (tipos B, C e D) representaram 63,7% dos afundamentos de tensão;
- faltas bifásicas à terra (tipos E, F e G) representaram 22,9% das ocorrências;
- faltas trifásicas (tipo A) representaram 13,4% das ocorrências.

A Figura 6.7 mostra de forma gráfica os resultados mencionados anteriormente.

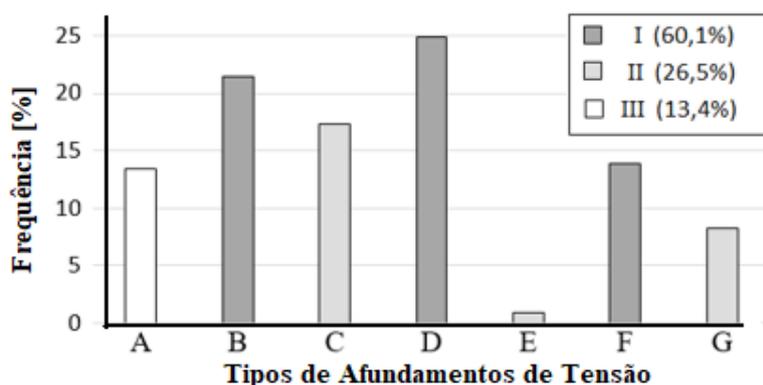


Figura 6.7 – Taxa de ocorrência de cada tipo de afundamento de tensão.

Fonte: COSTA (2018).

6.2.4. Severidade dos afundamentos de tensão por tipo

Com a classificação dos AMTs, analisou-se a severidade desses eventos de acordo com as magnitudes e tipos I, II e III. A Figura 6.8 mostra os resultados obtidos.

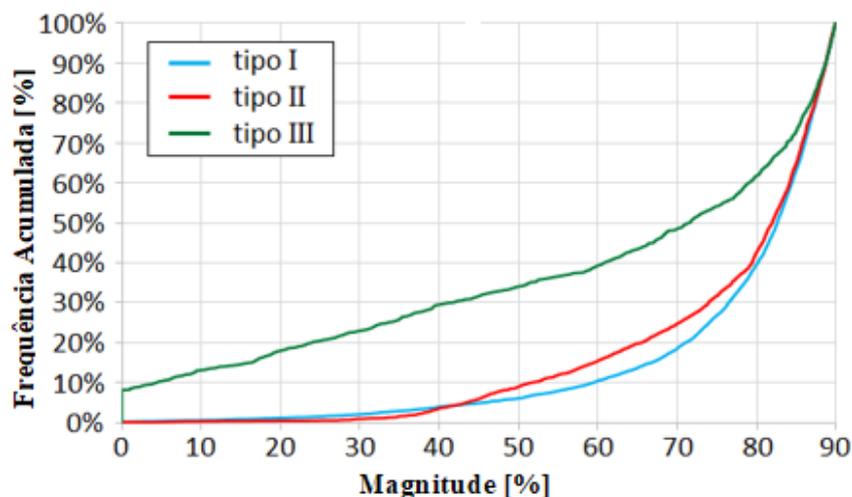


Figura 6.8 – Frequência acumulada: magnitude dos a fundamentos de tensão, por tipo.
Fonte: COSTA (2018).

Costa (2018) observou que os eventos tipo III foram os mais severos, pois além de ocorrer afundamentos simultâneos nas três fases, a magnitude dos eventos desse tipo tendeu a ser mais severa em relação aos outros tipos, ou seja, apenas 4% dos eventos tipo I e tipo II as suas magnitudes foram inferiores a 0,4 p.u, e os eventos tipo III, representou 30%.

Com referência à duração dos eventos, são mostrados na Figura 6.9 os resultados obtidos.

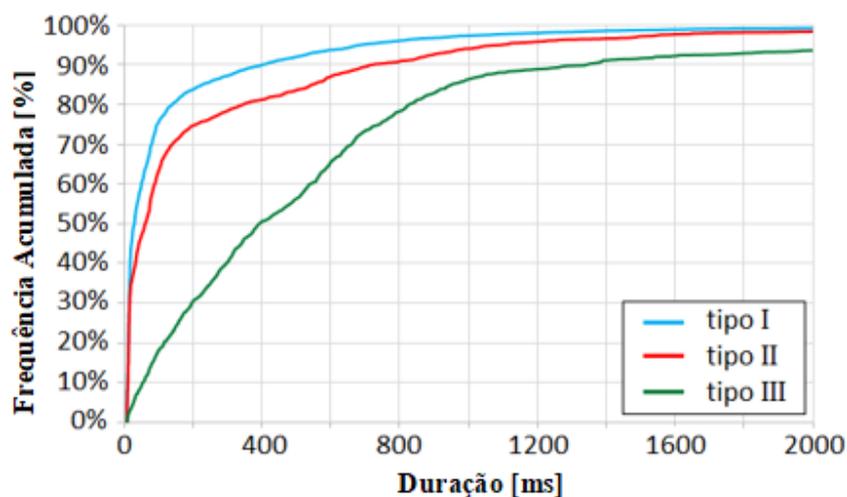


Figura 6.9 – Frequência acumulada: duração dos a fundamentos de tensão, por tipo.
Fonte: COSTA (2018).

Verifica-se que 85% dos eventos tipo I apresentam duração inferior a 200 ms e os eventos tipo III representam 30%, concluindo-se que os eventos tipo III são os mais severos, tanto em termos de magnitude como em duração.

6.3. Metodologia para estimação de desligamentos de ASDs

6.3.1. Representação da Sensibilidade dos ASDs

6.3.1.1. Incerteza das Curvas de sensibilidade

Conforme visto nos capítulos 2 e 3, as curvas de sensibilidade tais como, a curva ITIC, CBEMA ou SEMI F47 mostram o desempenho de um equipamento devido às VTCDs, podendo-se utilizar curvas específicas fornecidas pelo fabricante ou por testes laboratoriais, com resultados melhores a respeito de seu desempenho.

Portanto, pelos resultados de testes há a possibilidade de obter uma curva retangular, como mostrado na Figura 3.6, significando que o equipamento é sensível a eventos de magnitude inferior a V_{crit} e duração superior a T_{crit} (ESCRIBANO, A.H. et al, 2012; BODNAR, R. Et al., 2016).

No Capítulo 2 foi explorado que para diferentes tipos de equipamentos, cada um deles possui curvas de sensibilidade distintas e que um mesmo tipo de equipamento não possui um único padrão de comportamento, mas uma família de curvas de sensibilidade (GUPTA, C.P et al, 2006; BODNAR et al, 2016).

Na Figura 3.7 foram apresentadas as possíveis regiões de sensibilidade, obtidas a partir de testes de um determinado tipo de equipamento e cada curva é definida por um ponto (T_{crit} , V_{crit}) onde: ocorre a falha do equipamento para todos os eventos com magnitude inferior a V_{min} e duração superior a T_{max} ; não ocorre falha para eventos com magnitude superior a V_{max} ou duração inferior a T_{min} . Para os eventos que ocorrem nas regiões A, B e C nem sempre resultam em falhas (COSTA, 2018; YUNG et al, 2019).

Portanto, conclui-se que a sensibilidade de um equipamento está delimitada entre duas curvas, uma de sensibilidade mínima através do ponto (T_{max} , V_{min}), e outra de sensibilidade máxima, dada pelo ponto (T_{min} , V_{max}), que definem uma região de incerteza quanto ao seu desempenho frente às VTCDs (COSTA, 2018).

6.3.1.2. Sensibilidade dos ASDs Trifásicos

A sensibilidade dos ASDs trifásicos pode ser avaliada considerando as diferentes combinações de afundamentos de tensão nas três fases, o que resulta em diferentes efeitos na operação do equipamento (DJOKIC et al, 2005); estes mencionam que há a possibilidade de uma avaliação mais precisa do desempenho do ASD, ao invés de se considerar apenas um tipo de afundamento de tensão. Observa que se os testes são feitos em uma única fase por vez, por exemplo, a do tipo I, a sensibilidade do ASD teria a possibilidade de ser subestimada. Por outro

lado, se a aplicação dos testes ocorresse nos eventos do tipo III, de mesma magnitude e duração nas três fases simultaneamente, poderia ocorrer o oposto da anterior, ou seja, para uma avaliação sobrestimada da sua sensibilidade.

Para efeito de estabelecer o número de desligamento e seu respectivo custo neste Capítulo de Tese, consideram-se os parâmetros mostrados na Tabela 6.2, com base em trabalhos apresentados na literatura técnica por (DJOKIC et al, 2005; GUPTA AND MILANOVIC, 2006; CHAN AND MILANOVIC, 2007; BODNAR et al, 2016^a; 2016b).

Tabela 6.2 – Parâmetros adotados para os conversores.

Equipamento	Vmin [%]	Vmax [%]	Tmin [ms]	Tmax [ms]
Conversor de frequência (tipo I)	15	85	10	450
Conversor de frequência (tipo II)	45	85	10	175
Conversor de frequência (tipo III)	55	90	10	150

6.3.2. Determinação do número de desligamentos para ASD

Conforme (GUPTA E MILANOVIC, 2006) pode-se considerar que o desempenho de um equipamento é representado por uma curva de sensibilidade retangular, como mostrado na Figura 3.6, definida por um ponto (T_{crit} , V_{crit}).

Conhecendo como os valores de V_{crit} e T_{crit} se distribuem entre V_{min} e V_{max} e entre T_{min} e T_{max} , respectivamente, pode-se estimar o número de desligamentos desse equipamento. Assumindo que V_{crit} e T_{crit} seguem uma determinada distribuição, pode-se estimar o número de desligamentos utilizando funções de massa de probabilidade ou funções de distribuição acumulada (GUPTA and MILANOVIC, 2006).

6.3.2.1. Método das funções de massa de probabilidade

Considerando que V_{crit} e T_{crit} são variáveis aleatórias discretas e independentes, como mostra a Figura 6.10, as funções de massa de probabilidade são dadas pelas equações (6.1) e (6.2).

1. Considera-se uma curva de sensibilidade específica, ou seja, um ponto (T_i, V_k) ;
2. Verifica-se o número de eventos abaixo de tal curva;
3. Multiplica-se o número obtido pela probabilidade de ocorrência dessa curva;
4. Repetem-se os passos anteriores para obter a contribuição referente a cada combinação de V_{crit} e T_{crit} (o número de combinações é dado pelo produto de n_V por n_T).

6.3.2.2. Método das funções de distribuição acumulada

O método anterior utiliza a probabilidade da curva de sensibilidade do equipamento ser dada por um ponto qualquer dentro da região A da Figura 6.10, enquanto este método considera a probabilidade de desligamento do equipamento associada a cada evento.

Considerando um evento de magnitude Ve e duração Te , a probabilidade deste evento provocar desligamento no equipamento analisado é igual ao somatório das probabilidades associadas às curvas de sensibilidade que envolvam este evento, nas quais são definidas por valores de V_{crit} superiores a Ve e por valores de T_{crit} inferiores a Te , como mostra a Figura 6.11.

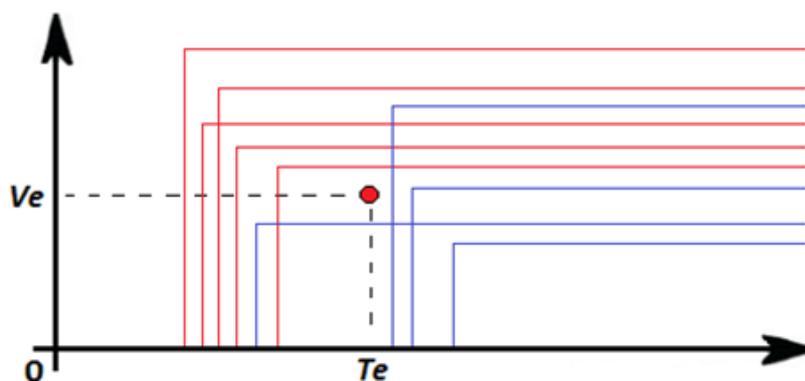


Figura 6.11 – Curva de sensibilidade de eventos para valores de Ve e Te .
Fonte: Costa (CBA 2018).

Portanto, a probabilidade de desligamento do equipamento é calculada pela equação (6.5).

$$P_{trip}(Te, Ve) = (1 - F_{V_{crit}}(Ve)) \cdot F_{T_{crit}}(Te) \quad (6.5)$$

Onde $F_{V_{crit}}(Ve)$ e $F_{T_{crit}}(Te)$ são as funções de distribuição acumulada, calculadas pelas equações 6.6 e 6.7:

$$F_{V_{crit}}(x) = P(V_{crit} \leq x) \quad (6.6)$$

$$F_{T_{\text{crit}}}(x) = P(T_{\text{crit}} \leq x) \quad (6.7)$$

O número de desligamentos (ENT) é estimado através da equação (6.8), para todos os eventos registrados durante o período.

$$ENT = \sum_{i=1}^{n_{af}} P_{\text{trip}}(T_{e_i}, V_{e_i}) \quad (6.8)$$

Dessa forma, por este conceito pode-se adotar o seguinte algoritmo:

1. Considera-se um determinado evento, de magnitude V_e e duração T_e ;
2. Calcula-se a probabilidade de desligamento do equipamento, somando as probabilidades de ocorrência das curvas de sensibilidade que englobam tal evento;
3. Repetem-se os passos anteriores para obter a contribuição referente a cada evento registrado no barramento de conexão do equipamento.

6.3.2.3. Número de desligamentos de ASD

Utilizando o método de funções de probabilidade acumulada obteve-se o número esperado de desligamentos de ASDs. Como os ASDs são equipamentos trifásicos, foram considerados separadamente os eventos tipo I, II e III. Para obter o número de desligamento total utilizou-se a taxa de ocorrência de cada tipo de afundamento de tensão, mostrada na Tabela 6.1 e os parâmetros contidos na Tabela 6.2.

O Apêndice B representa o número estimado de desligamentos de ASDs utilizando dados de medição dados de medições de AMTs obtidos durante 12 meses de monitoramento ininterrupto em 15 barramentos de subestações de distribuição da EDP ES e 18 barramentos de distribuição da EDP SP.

A Figura 6.12 mostra os *boxplots* do número de desligamentos estimado nas SEs monitoradas. Observa-se que o número médio de desligamentos das SEs da EDP ES é 20,57, enquanto na EDP é de 15,29.

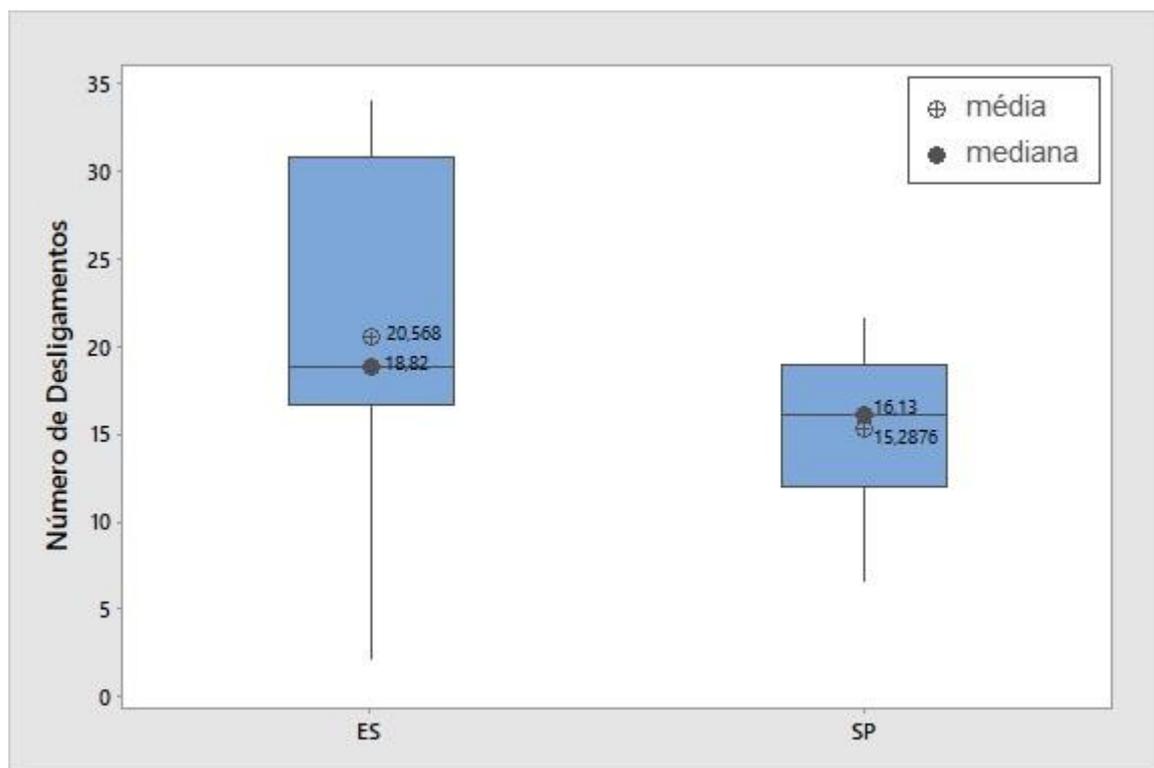


Figura 6.12 – Número de desligamentos ES e SP.

Nota-se na Figura 6.12 que os barramentos das Ses do ES apresentaram maior variabilidade em relação ao número de desligamentos comparado as SEs de SP, visto que os valores máximo e mínimo são distantes. Possivelmente, no estado do ES as SEs monitoradas estão instaladas em áreas com clima, vegetação e relevo distintos, justificando a disparidade do número de desligamentos estimados.

6.4. Metodologia para a obtenção dos custos

6.4.1. Determinação do número anual de paradas de processo por barramento monitorado

Para a determinação dos custos anuais de paradas de produção foram considerados no total 33 consumidores, sendo que 18 UCs do ES e 15 de SP, tomando como base os custos por parada de produção obtidos no capítulo 5. Em termos de medições, foram considerados os AMTs registrados continuamente por um período de 12 meses em 15 barramentos da EDP ES e 17 da EDP SP, conforme resultados apresentados no item 6.2.

Foi admitido que os 18 consumidores do estado de Espírito Santo poderiam estar conectados em qualquer um dos 15 barramentos da EDP ES e da mesma forma, 15 UCs do Estado de São Paulo conectados nos 17 barramentos da EDP SP.

Como base nestas premissas, o Apêndice C1 apresenta os valores de custo anual de parada de produção em USD para as UCs do ES e o Apêndice C2 das UCs de SP.

Os *boxplots* apresentados na Figura 6.13 sintetizam os custos apresentados nas Tabelas C.1 e C2 da Apêndice C, mostrando para cada UC do ES a mediana, os quartis, os valores mínimo e o máximo dos custos anuais calculados.

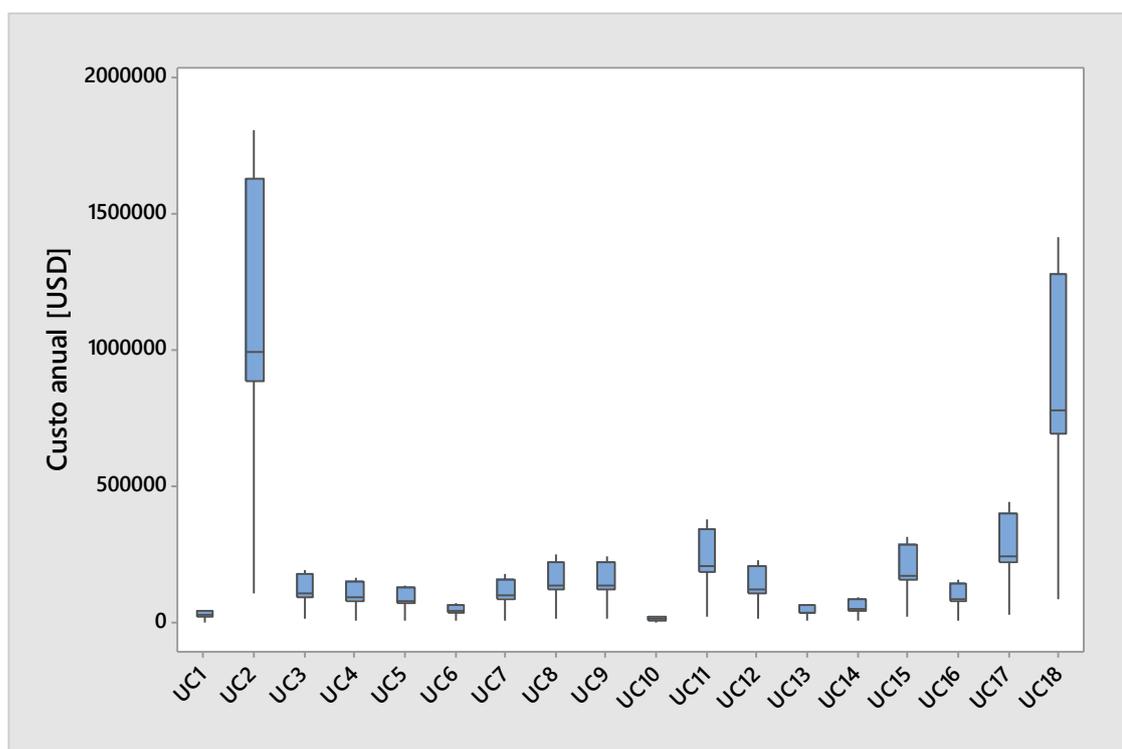


Figura 6.13 – Custo anual UCs do ES.

Analisando a Figura 6.13, nota-se que as UCs 2 e 18 do ES, possuem uma variação de custo anual muito superior as demais UCs, devido ao alto valor agregado do produto e, conseqüentemente, o custo da parada de processo nestas são muito elevados. Pode-se observar também a existência de dois grupos, um com custo anual baixo composto pelas UCs 1, 6, 10, 13 e 14 e outro que apresenta custo anual médio composto pelas UCs 3, 4, 5, 7, 8, 9, 11, 12, 15, 16 e 17. Com intuito de melhorar a visualização dos custos anuais, os *boxplots* das UCs destes dois grupos estão exibidos, respectivamente, nas Figuras 6.14, 6.15 e 6.16.

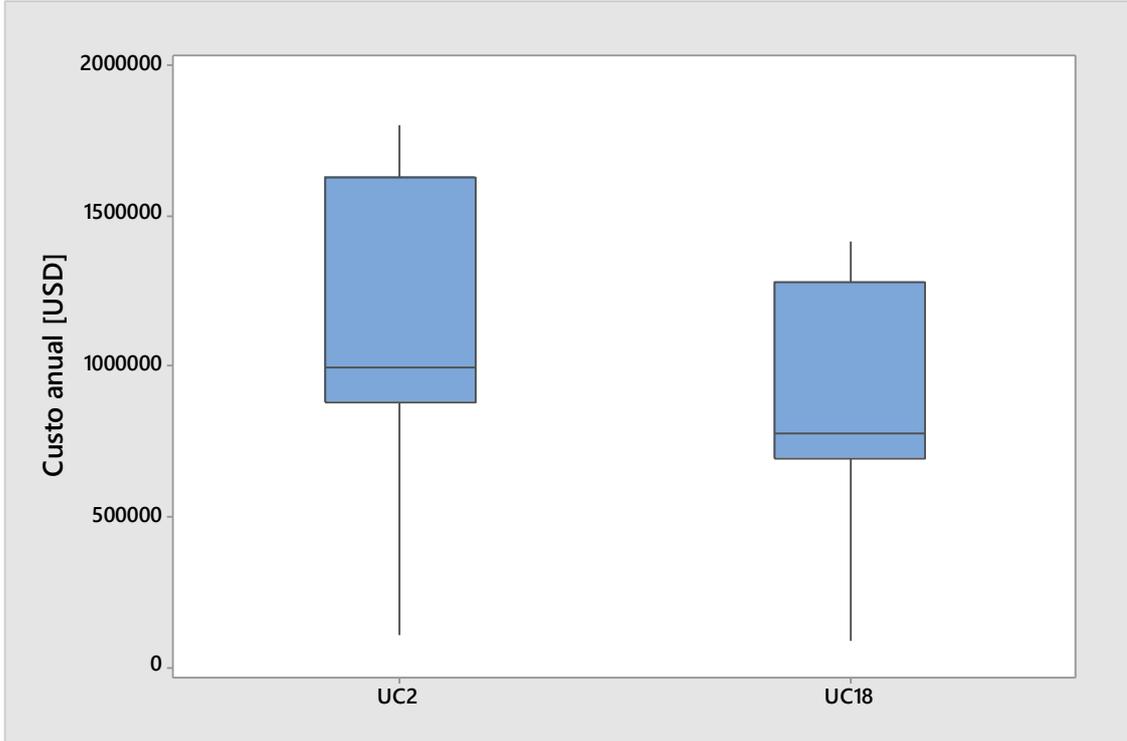


Figura 6.14 – Custo anualUCs do ES (valores elevados).

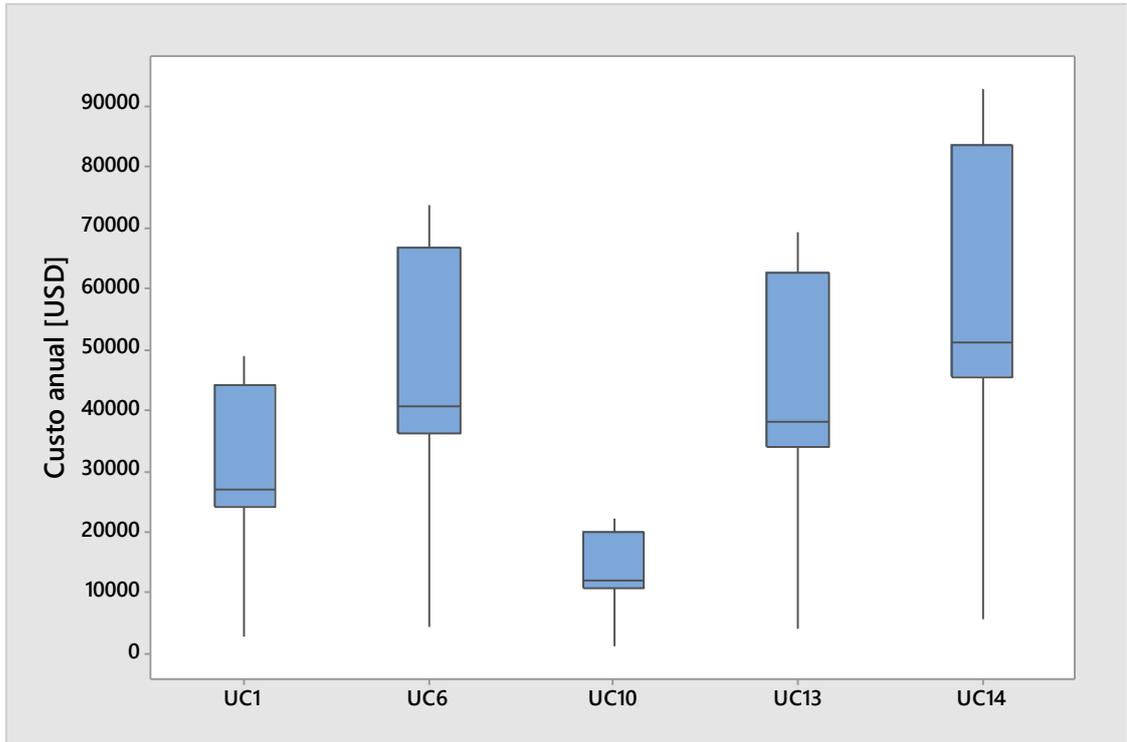


Figura 6.15 – Custo anualUCs do ES (valores baixos).

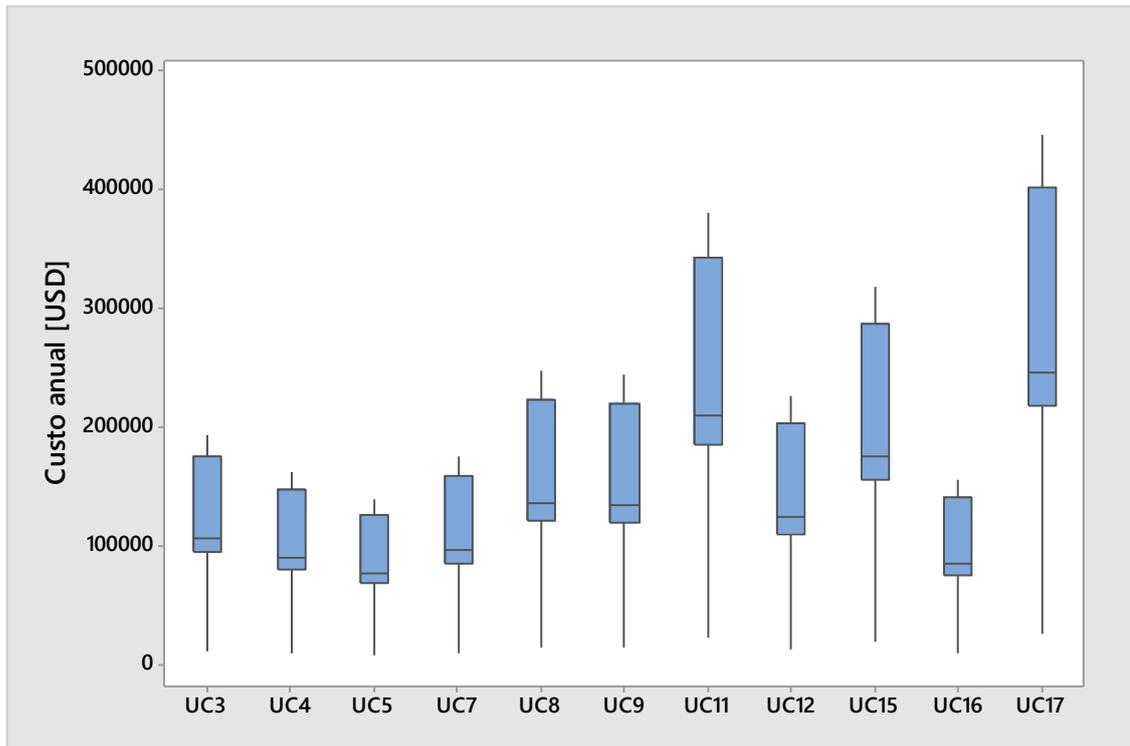


Figura 6.16 – Custo anual UCs do ES (valores médios).

Da mesma forma, os boxplots apresentados na Figura 6.17, sintetiza os dados apresentados nas Tabelas C.3 e C.4 do Apêndice C, mostrando para cada UC de SP a mediana, os quartis, os valores mínimo e máximo dos custos anuais calculados.

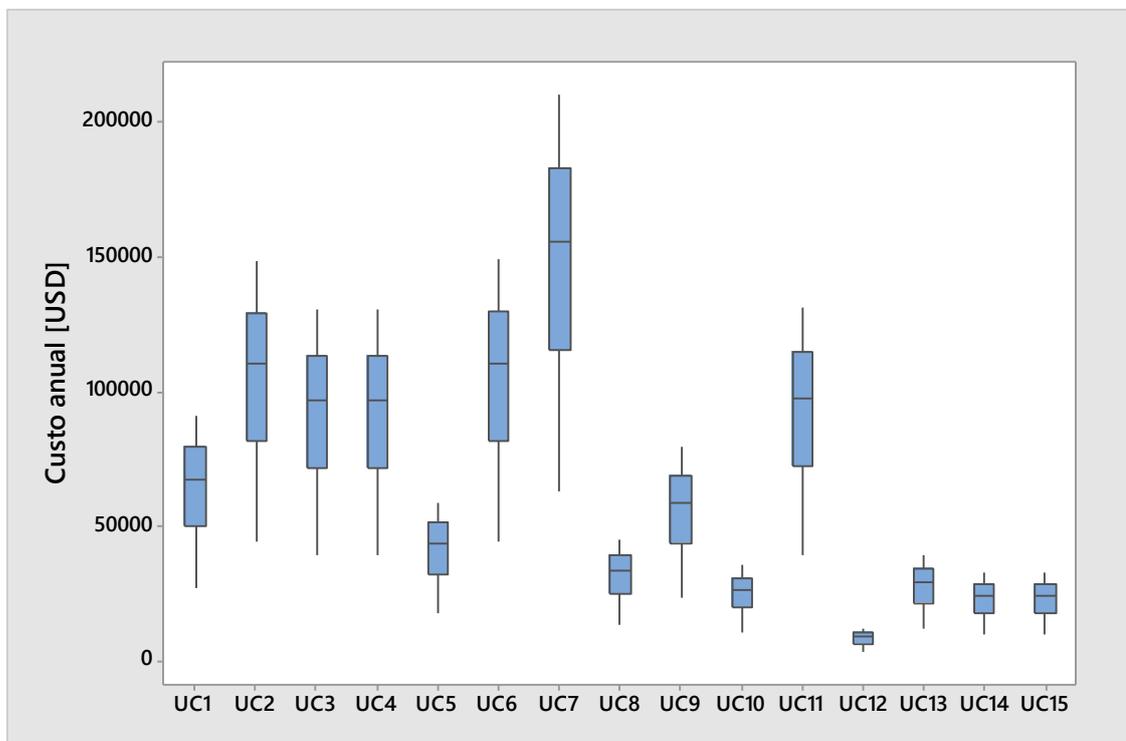


Figura 6.17 – Custo anual UCs do SP.

Na Figura 6.17, não se observa a grande disparidade observada nas UCs do ES. Observa-se também a existência de dois grupos de UCs; um com custos anuais mais baixos (UCs 5, 8, 10, 12, 13, 14 e 15) e outro com valores médios (UCs 1, 2, 3, 4, 6, 7, 9 e 11). Para melhorar a visualização dos custos, os *boxplots* destes dois grupos foram separados nas Figuras 6.18 e 6.19.

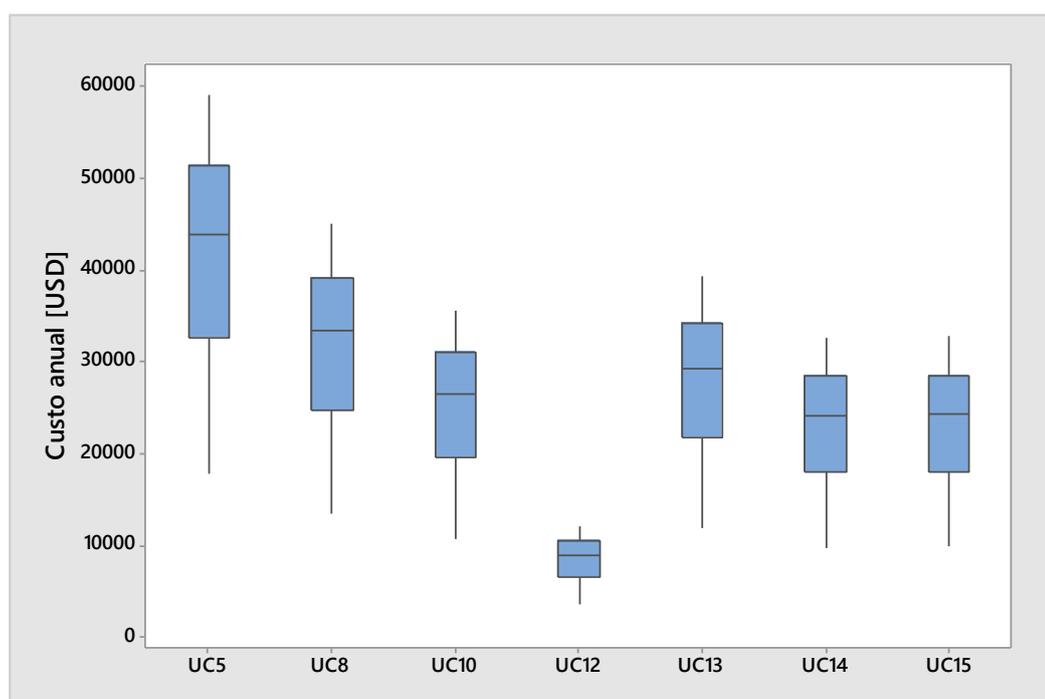


Figura 6.18 – Custo anual UCs do SP (valores baixos).

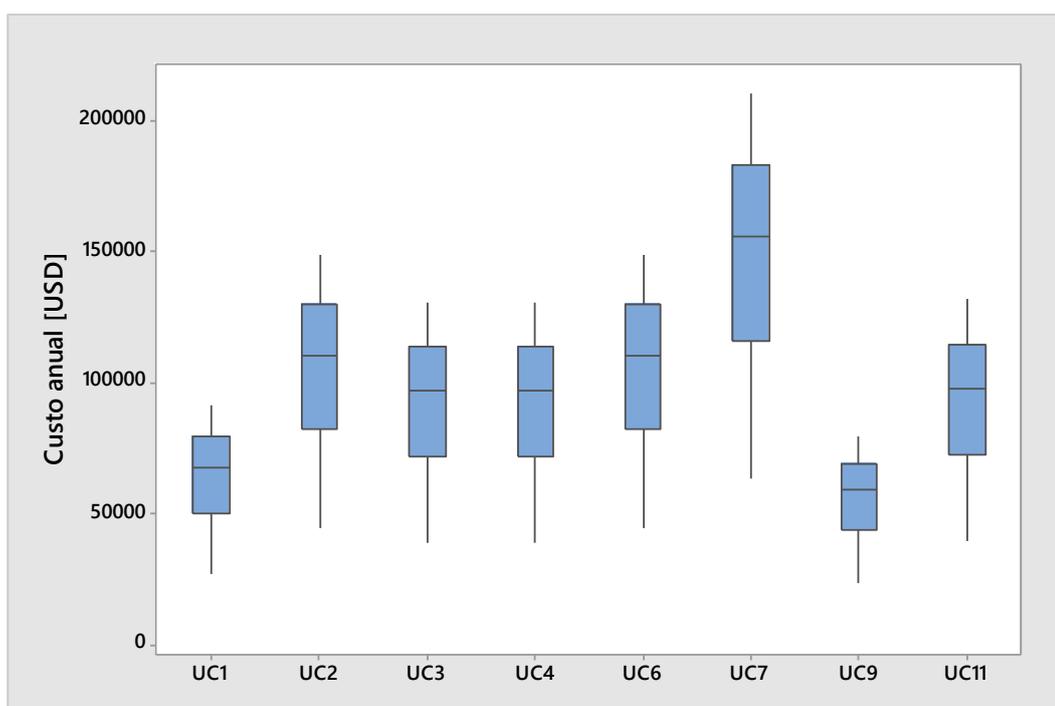


Figura 6.19 – Custo anual Ucs do SP (valores médios).

6.4.2. Determinação dos custos anuais devido às paradas de processo

São considerados 33 consumidores no total, sendo que 18 UCs do ES e 15 de SP, como se estivessem conectados em 15 barramentos de ES e 17 de SP, respectivamente.

De posse da média anual de desligamentos desses 32 barramentos são considerados que 18 consumidores estivessem conectados nos 15 barramentos de ES e 15 UCs nos 17 barramentos de SP, com os seus respectivos custos por parada de processo, levantados na pesquisa de campo.

O Apêndice C apresenta os valores de custo anual em USD para as UCs, simulando a conexão destas em cada barramento, onde foi estimado o número de desligamentos.

6.4.3. Análise dos Resultados – 12 ramos de atividade industrial

Para os estados de ES e SP foram identificados 12 tipos de atividades, sendo que São Paulo foram 5 tipos (plástico, metalúrgica, têxtil, automotivo e comercial) e Espírito Santo com 11 tipos (vidro, metalúrgica, plástico, mineração, alimentos, moveleira, pedras, comercial, química, automotiva e petrolífera). Contudo, 8 tipos de atividades possuem mais de uma empresa pesquisada, cujos resultados são exibidos sob a forma de *boxplots* nas Figuras 6.20 à 6.27.

Avaliando os ramos de atividade, nota-se na Figura 6.20 que as indústrias que trabalham com plástico possuem perfis diferentes em relação ao custo anual devido às paradas de processo, provavelmente por este material ser muito versátil e usado em diversos tipos de produtos, com seus respectivos valores agregados distintos.

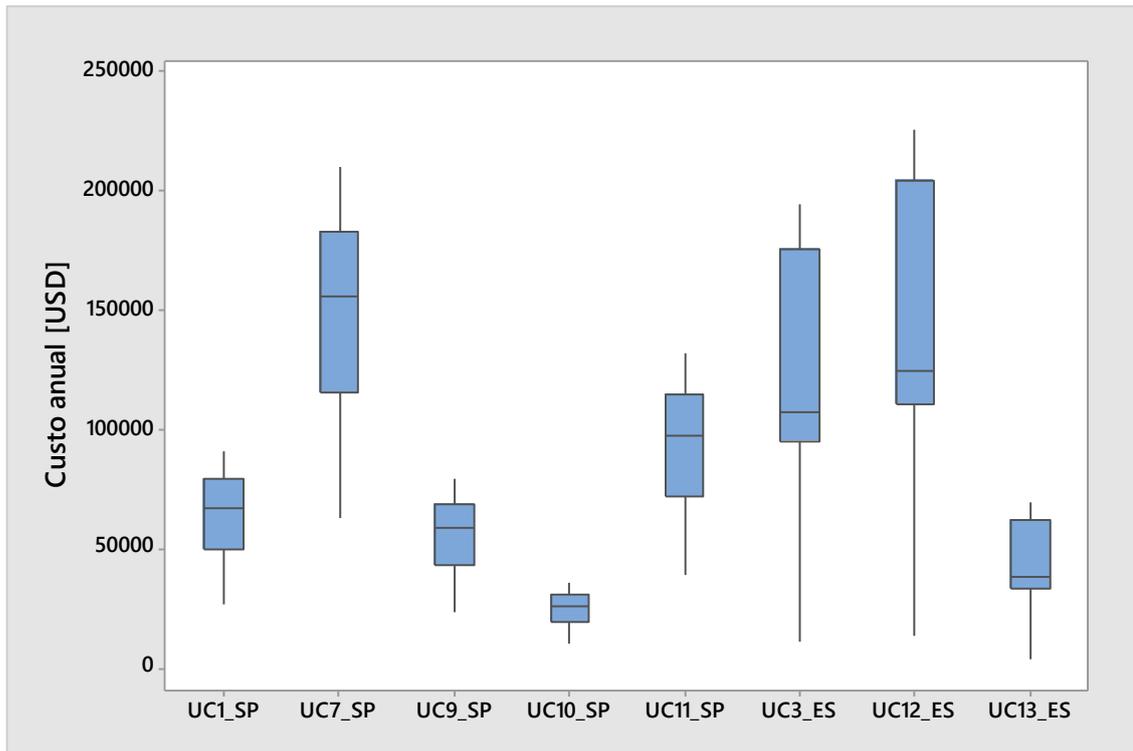


Figura 6.20 – Custo anual(plástico).

A Figura 6.21 mostra que dentre as empresas pesquisadas do setor automotivo, três possuem faixa de custo anual semelhante (UC2_SP, UC3_SP e UC4_SP), por serem empresas que fabricam partes e peças para automóveis e uma delas (UC17_ES) tem custo superior às demais, pois trata-se de uma montadora de ônibus.

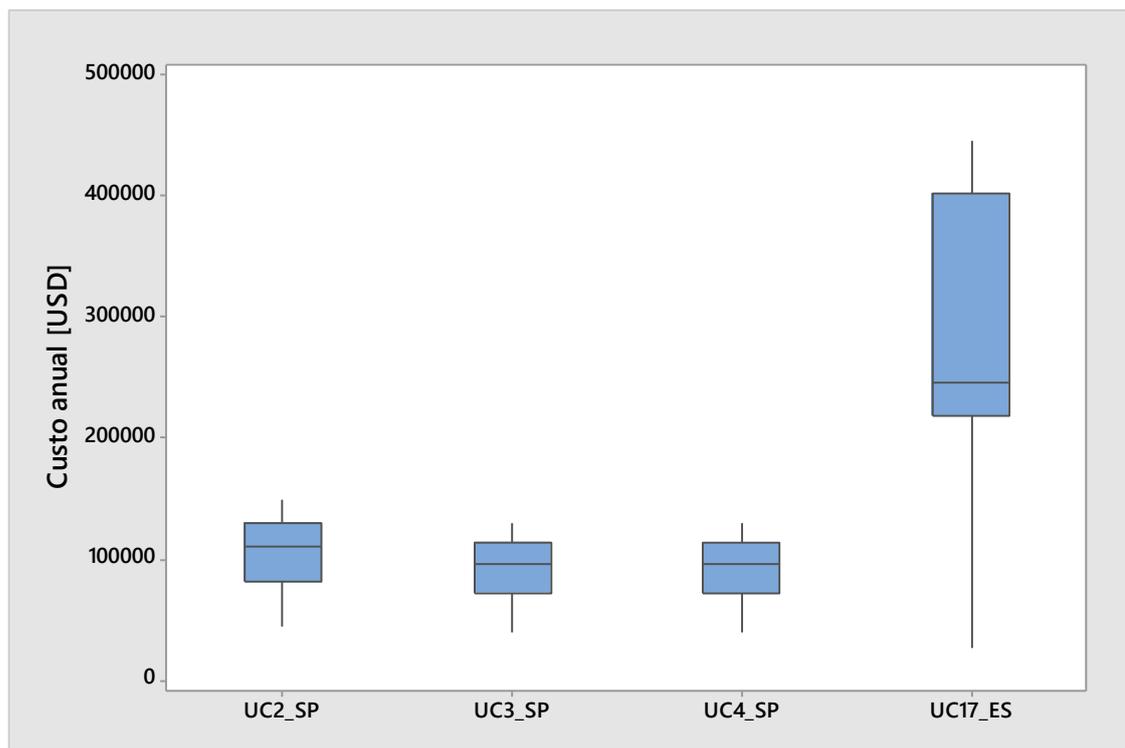


Figura 6.21 – Custo anual(automotivo).

Na Figura 6.22 fica evidente que as empresas do ramo comercial pesquisadas possuem três patamares distintos de custo anual, pois possuem diferentes finalidades, sendo uma de galpão de distribuição e logística (SP) e as outras duas, *shopping centers*, para SP e ES. Dentre estes, o de SP é de médio porte, cujos contratos de penalidades junto aos locatários são menores ao do ES. Neste último, do ES, o custo é bem maior por ser uma empresa de grande porte.

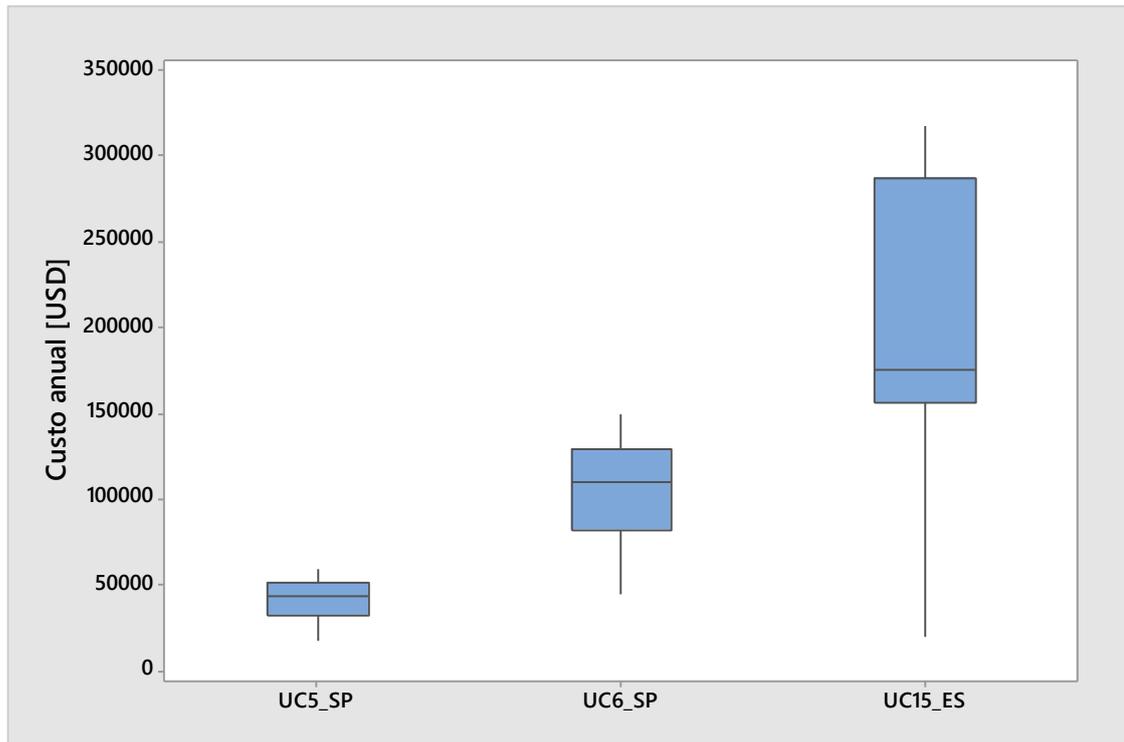


Figura 6.22 – Custo anual (comercial).

As duas indústrias estudadas que trabalham com vidro apresentaram custos anuais relativamente semelhantes, conforme mostra a Figura 6.23, pois ambas são para atender o mesmo tipo de consumidor, a construção civil e também, por serem de pequeno porte.

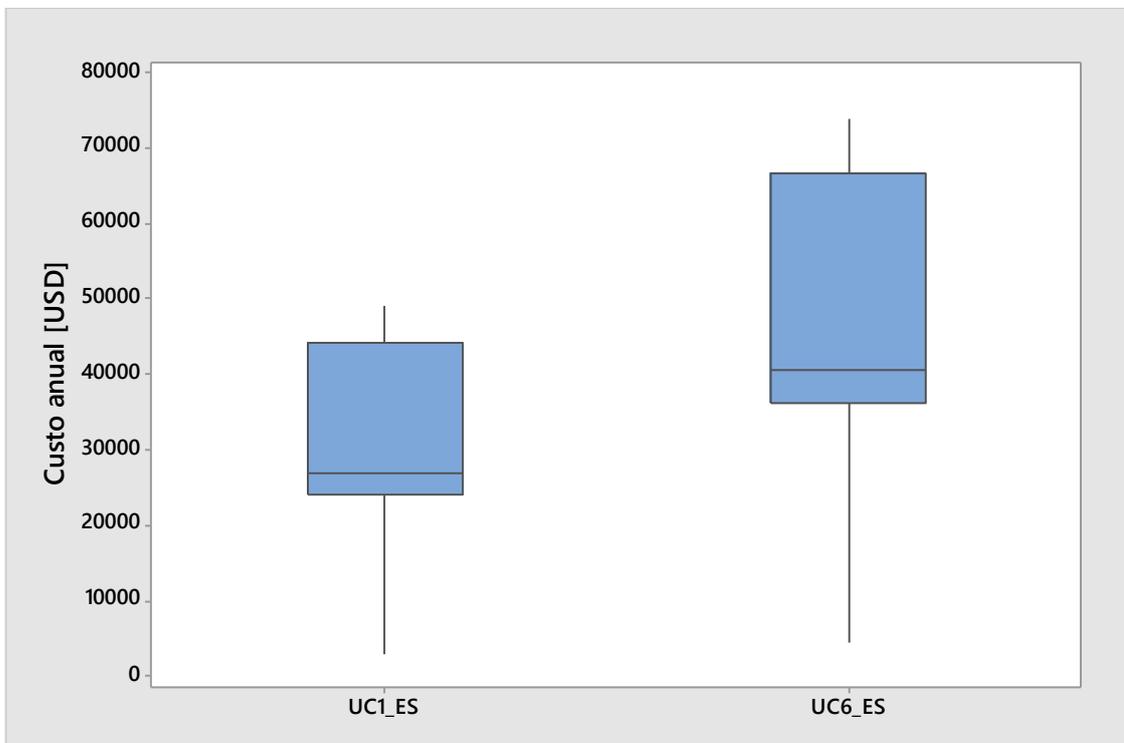


Figura 6.23 – Custo anual (vidro).

Pela Figura 6.24, observa-se que as empresas do tipo metalúrgicas de forma geral possuem custos anuais próximos, com exceção da UC2_ES que exibe um valor elevado, devido ao valor agregado do produto (cabos submarinos) para atendimento às plataformas de petróleo em águas profundas. As demais são empresas de pequeno a médio porte, cujos produtos são variados em suas aplicações.

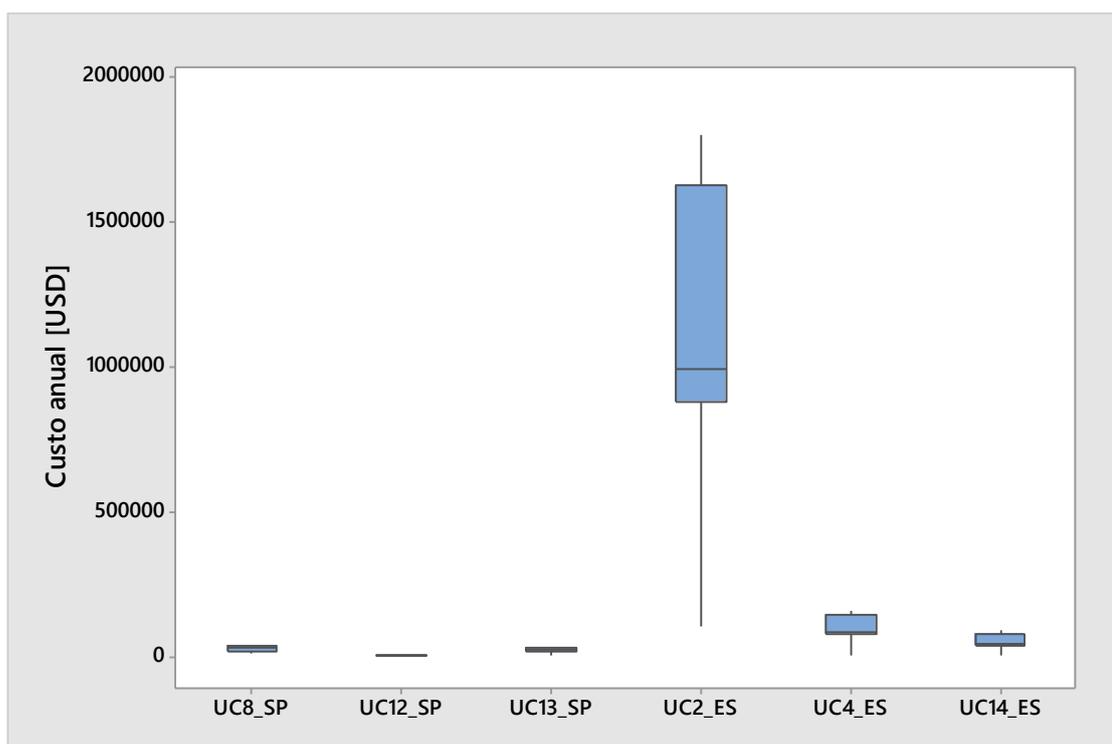


Figura 6.24 – Custo anual (meta lúrgico).

Nota-se na Figura 6.25 que as empresas do ramo alimentício pesquisadas possuem custos anuais em níveis bem diferentes, pois uma se refere à fabricação de sucos e a outra para atender o mercado de ração animal. A primeira pode ter uma parada de processo por longo período de tempo (8 horas), no qual necessita descontaminar as linhas de produção por processos de lavagens, devido à contaminação do produto por perda de temperatura. A segunda, mesmo que haja a perda de temperatura do processo na fabricação de *pellets*, estes são reaproveitados para o início do processo, reduzindo assim o custo de paradas.

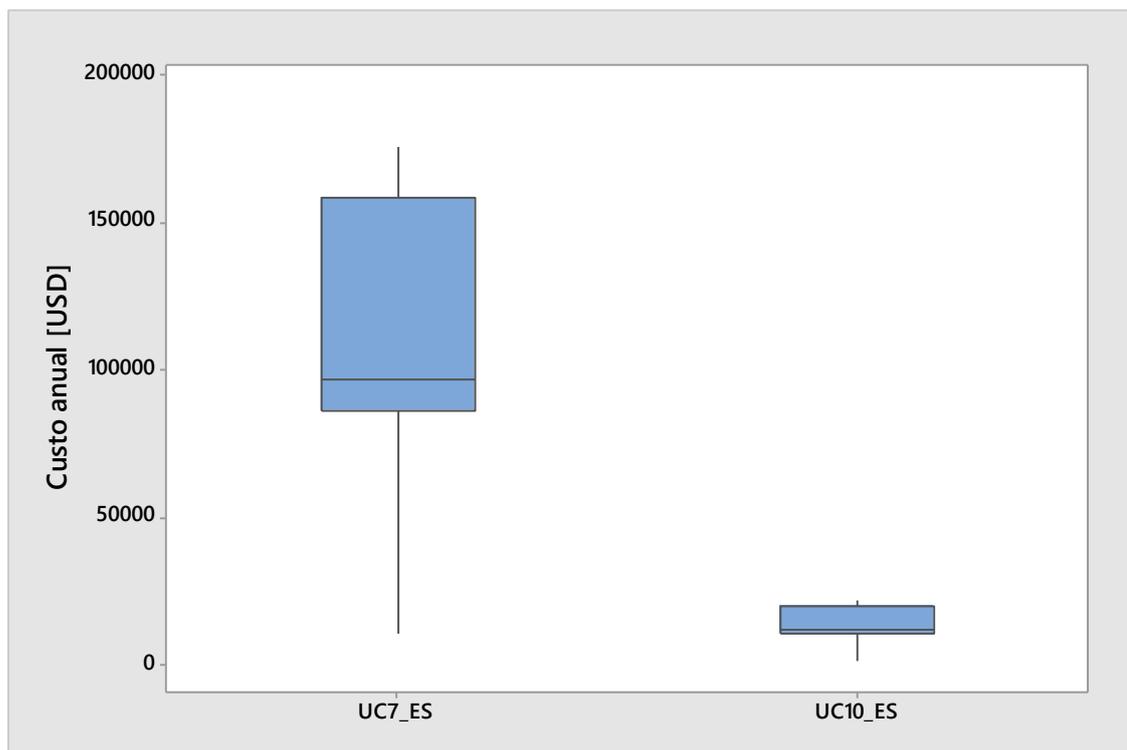


Figura 6.25 – Custo anual (alimentos).

Observa-se pelas Figuras 6.26 e 6.27 que, para as empresas do ramo moveleiro e têxtil que foram pesquisadas, os seus respectivos custos anuais foram praticamente idênticos. As indústrias moveleiras e têxteis (uma atende ao ramo de confecção e a outra de cobertores) possuem linhas de produção semelhantes, fabricando o produto similares, sendo ambas são do mesmo porte e custos equivalentes.

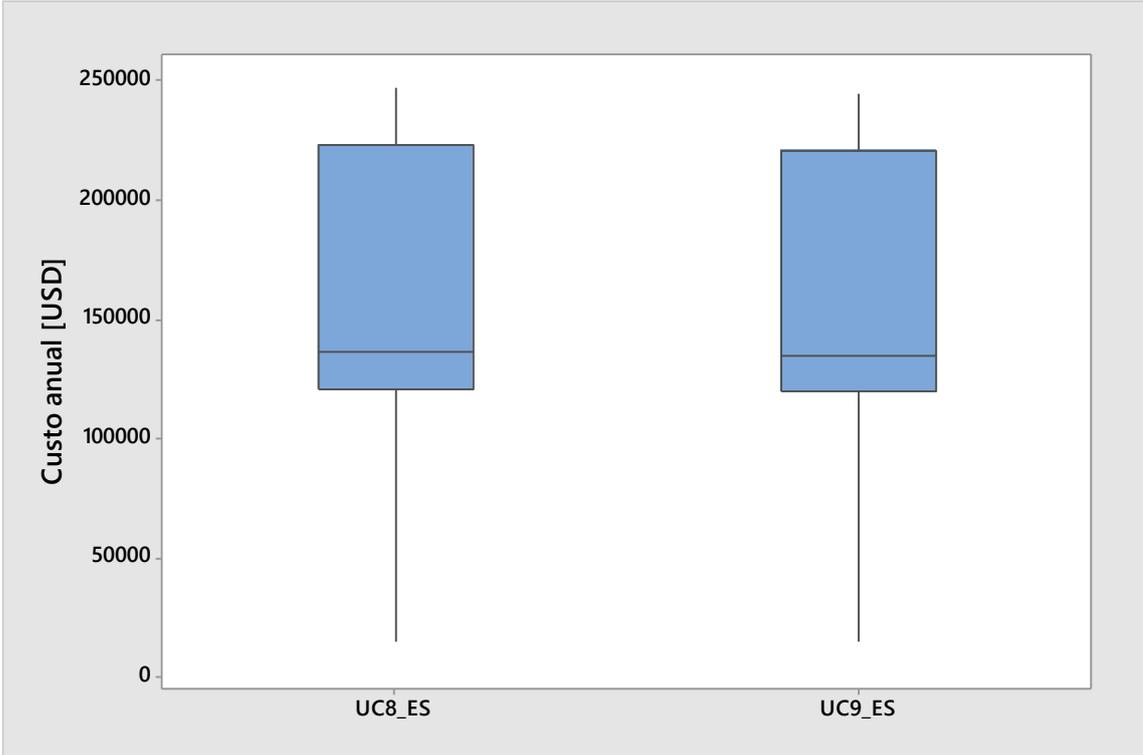


Figura 6.26 – Custo anual (moveleira).

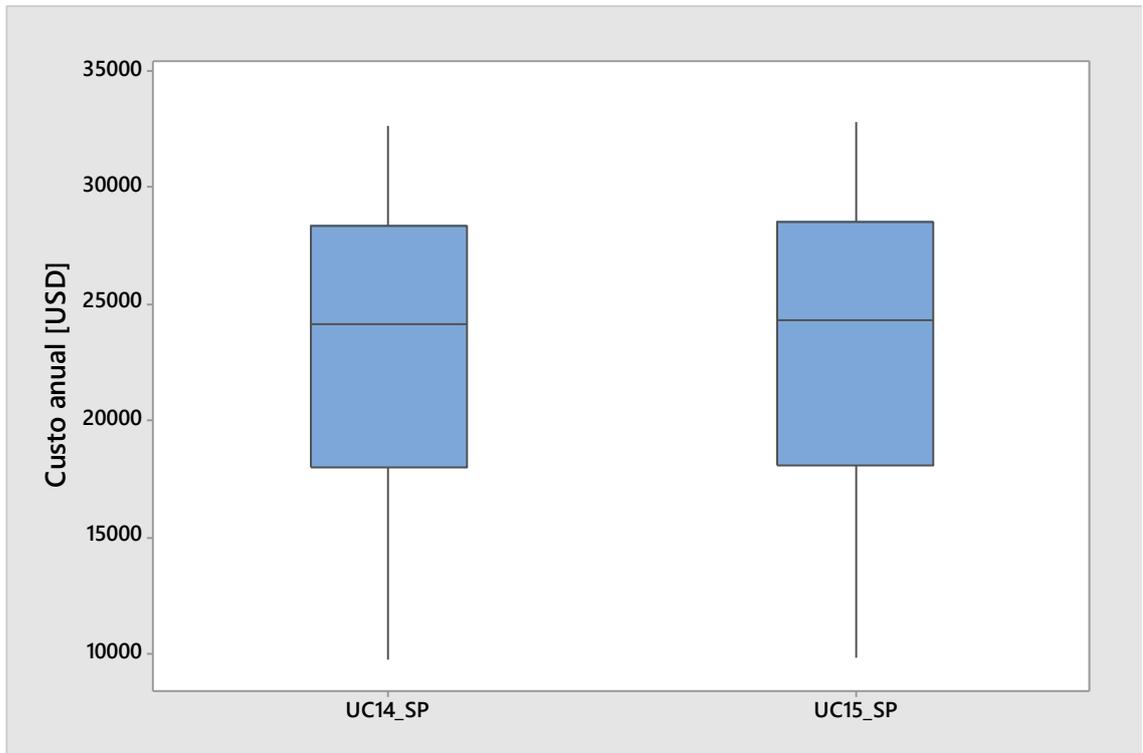


Figura 6.27 – Custo anual (têxtil).

6.5. Considerações Finais

Neste capítulo foi apresentada uma estimativa dos custos anuais de parada de produção utilizando conjuntamente custos por parada de produção obtidos a partir de pesquisa de campo e dados reais de medição de AMTs registrados nos barramentos de subestações de distribuição.

Pelos resultados obtidos, nota-se que há uma grande diferença na média de desligamentos obtidos pela pesquisa direta (capítulo 5) em relação à medição (capítulo 6). A Figura 6.28 mostra as diferenças citadas.

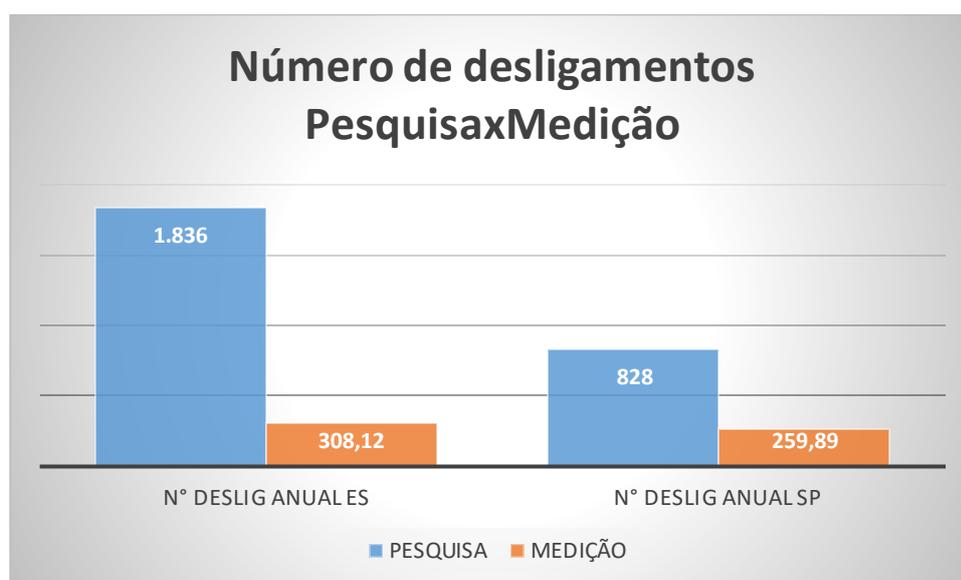


Figura 6.28 – Comparação do número de desligamentos (pesquisa x medição).

A Tabela 6.3 mostra os referidos custos acompanhados dos valores de desligamentos anuais, da pesquisa direta e da medição.

Tabela 6.3 – Custos Anuais e Número de Desligamentos (medição e pesquisa).

TIPO DE METODOLOGIA	CUSTO ANUAL ES	CUSTO ANUAL SP	Nº DESLIG ANUAL ES	Nº DESLIG ANUAL SP
PESQUISA	USD \$37.814.832,00*	USD \$3.467.252,00	1.836	828
MEDIÇÃO	USD 3.742.553,00	USD 933.720,00	308,12	259,89

*Não estão incluídos o nº desligamentos das UCs (16, 20,21, 22 e 31)

Na metodologia de custos por medição nas UCs do estado de ES o custo médio anual calculado foi de USD 3.742.553,00 (Apêndice C, Tabelas C.1 e C.2). Este valor representa o valor médio de custos de todos os consumidores (UCs 16 a 23), como se estivessem conectados nos barramentos das SEs (A) e do número de desligamentos coletados ininterruptamente pelos medidores durante um ano, para os ASDs.

Comparando os custos da pesquisa com o da medição, a relação foi de 10:1 e a relação de número de desligamentos foi de 6:1, devido a grande quantidade de desligamentos informados pela pesquisa direta ser de 1.836 desligamentos por ano, contra os 308 da medição.

As UCs (17, 18, 32 e 33) foram as que informaram essa grande quantidade de desligamentos, ou seja, 103 desligamentos por mês ou 1.236 anuais, o que influenciou no resultado.

Para as UCs pesquisadas no estado de SP o custo utilizando dados de medição foi de 3,7 vezes maior e o número de eventos representou 3,19 vezes mais na pesquisa direta.

Em ambos os estados, a metodologia de obtenção de custos a partir de medições foram bem inferiores àqueles obtidos por pesquisa direta. Como pressupostos para essas diferenças observadas, pode-se destacar:

- A percepção das quantidades de paradas de processos informadas pelos consumidores está muito acima dos valores reais medidos;
- Os ASDs efetivamente instalados nas indústrias tem maior sensibilidade (menor robustez) que os limites de sensibilidade utilizados em testes de simulações;
- Possível efeito da conexão dos transformadores delta-estrela das UCs na propagação dos AMTs. Em outras palavras, os AMTs registrados nos sistemas de média tensão não correspondem àqueles percebidos pelos consumidores.

Cabe mencionar que utilizar dados de medições de AMTs nas subestações de distribuição das distribuidoras em vez de medições nas subestações de entrada das UCs podem também estar resultando em erros.

A enorme diferença entre as metodologias do capítulo 5 e do capítulo 6 pode estar na percepção do consumidor, podendo esta estar equivocada em alguns casos (UCs 17, 18, 32 e 33), nas quais outros tipos de evento e não apenas desligamentos por AMTs vem acontecendo, influenciando, assim, os resultados e os custos finais.

Salienta-se que se estas quantidades das referidas UCs fossem menores, haveria uma redução da diferença entre os resultados de custos da pesquisa direta em relação à medição, muito embora o custo maior continuaria sendo pela pesquisa direta, em virtude da quantidade dos eventos terem sido menores na medição.

Finalmente, mesmo com as possíveis diferenças incorridas na metodologia aplicada, os custos de paradas de produção de processos industriais devido à ocorrência de AMTs são

extremamente significativos, comprovando assim a relevância e a contribuição deste trabalho de tese.

7. CONCLUSÕES

A revisão da literatura apresentada no subcapítulo 1.3 prova que, de fato, vários tipos de indústrias instaladas em diferentes países enfrentam problemas de perda de produção devido à ocorrência de AMTs.

Verificou-se que vários tipos de metodologias são utilizados para obter uma estimativa desses custos, tais como: realização de pesquisa direta através de formulários, uso de simulações estocásticas e uso de medições. Custos estimados devido às interrupções do processo são apresentados anualmente, por evento e por kW.

Apesar do significativo número de ramos de atividade levantados nas publicações, observou-se que os custos obtidos em diferentes países para o mesmo setor produtivo são muito díspares, considerando-se tratar de um assunto de grande complexidade.

No sentido de trazer alguma contribuição importante e inédita, principalmente no Brasil, este trabalho de tese apresentou e fez a aplicação de pesquisa direta com o objetivo de avaliar o impacto financeiro de AMTs nas áreas consumidoras industriais e comerciais em uma região do país. A metodologia foi baseada na realização de visitas *in loco* e na aplicação de um questionário específico, minuciosamente detalhado, que tentasse trazer a tona importantes informações de clientes consumidores de energia elétrica em média tensão.

Algumas dificuldades foram enfrentadas ao longo do trabalho, tais como: demora na definição das escolhas das UCs, atrasos no planejamento das visitas e dificuldade de agendamento com as empresas, falta de interesse de algumas delas, dificuldades de logística e locomoção para visitar as empresas, cancelamentos, falta de recursos financeiros etc.

Uma dificuldade mais específica foi a preocupação de parte dos entrevistados não estarem autorizados a fornecer os custos de forma detalhada. Em algumas instalações, quando o proprietário do negócio se encontrava presente, os valores de perdas se mostraram mais evidentes, e as respostas às questões feitas pelo pesquisador eram imediatas. Porém, a maioria respondeu sem querer revelar de forma detalhada todos os itens que compõe na formulação de custos. Isto até é compreensível em alguns casos, devido ao temor de especulações de concorrentes no mercado, uma vez que os custos podem fazer parte estratégica do negócio. Mesmo pesquisador e a EDP garantindo a confidencialidade dos dados e que os nomes das empresas seriam resguardados, alguns formulários foram entregues sem muito detalhamento.

Porém, nada disso tirou o ânimo de continuar tentando até que por fim, 33 formulários preenchidos foram obtidos, dos quais 10 solicitaram que os nomes fossem mantidos na confidencialidade. Em pequenas empresas, praticamente todas concordaram em ter o nome

revelado, incluindo a permissão de divulgação dos custos. No entanto, por questão de uniformidade, optou-se em não divulgar os nomes das empresas neste documento.

Considerando que a amostra inicial foi de 60 empresas, com 33 respostas ao formulário de pesquisa, a taxa de sucesso de resposta ao formulário foi de 55%. Ao se considerar o número de 55 empresas, por causa da desistência de 5 delas em não receber visitas, a taxa passa a ser 60%.

Seja como for, resultados da pesquisa permitiram quantificar as perdas envolvidas em 33 empresas (a meta era de no mínimo 30), agrupadas em 12 áreas de negócios, todas ligadas em redes de média tensão (11,9 kV e 13,8 kV). A média do custo obtido foi de USD 7.364,75 por evento e USD 6,72 / kW.

Por fim, com os dados de medições de eventos obtidos de forma ininterrupta durante o período de um ano, obtidos em 32 pontos de monitoramento em subestações (em 13,8 kV) da EDP, obteve-se valores de custos anuais por paradas industriais, conforme mostra a Tabela 6.3, notando-se valores muito diferentes do método da pesquisa direta com o de medição.

Como melhorias ao procedimento utilizado, propõe-se a realização de um conjunto de ações, contando com ampla participação de empresas, com o objetivo de atrair e motivar a participação dos consumidores, sendo elas:

- Realização de *workshop*, coordenado pela concessionária, para clientes consumidores escolhidos para pesquisas futuras, com a finalidade de explicar os motivos das entrevistas.
- Realização de um *workshop* de encerramento da pesquisa, mostrando os resultados obtidos e as possíveis ações que podem ser tomadas internamente no sistema elétrico industrial para mitigação dos problemas identificados;
- Fazer campanha de conscientização de gestores de empresas (diretores, gerentes, etc...) sobre a importância do conhecimento da composição dos custos de paradas de processo devido a AMTs.

Sugerem-se como propostas futuras:

- Realização de campanhas de medições, diagnósticos da rede, implementações de sistemas de monitoramento e gestão dos AMTs, determinando de forma mais precisa, as cargas sensíveis ligadas aos barramentos, colaborando para estudos de mitigação de AMTs;

- Realizar novas pesquisas diretas para aumentar o tamanho da amostra contemplando um maior número de segmentos de atividades que possuem cargas sensíveis às ocorrências de AMTs.
- Realizar medições nas próprias UCs, de preferência próximo aos equipamentos sensíveis. O efeito da conexão dos transformadores pode estar influenciando nos resultados.
- Correlacionar as ocorrências de paradas com os resultados de medições de AMTs com o objetivo de aferir a sensibilidade dos equipamentos e processos.

Vale salientar que a presente pesquisa, em virtude dos resultados obtidos pelo trabalho de campo, alcançou os objetivos estabelecidos e, assim, representa uma contribuição técnica efetiva para o setor elétrico, especialmente para o setor brasileiro.

Diretamente relacionado com o tema desta qualificação, foram publicados os seguintes artigos:

- MOTOKI, EM; CARVALHO FILHO, J. M.; SILVEIRA, P. M.; CARNEIRO, J.R.V.; SOUZA, P.V.G.; PEREIRA, N.B. Custos de Paradas de Processos Industriais devido a Variação de Tensão de Curta Duração através da Pesquisa de Campo. XIII Conferência Brasileira sobre Qualidade de Energia Elétrica – CBQEE 2019.
- MOTOKI, E.M.; GUERRERO, C.A.V.; SILVEIRA, P.M.; GUIRELLI, C.R.; SANTOS, R.V.; PAZZINI, L.H.A.; SANTIAGO,N.S.; AKAMINE, C. Estudo de Sensibilidade de um Transmissor de TV Digital e seus Impactos de Operação Frente a Variações de Tensão de Curta Duração. XIII Conferência Brasileira sobre Qualidade de Energia Elétrica – CBQEE 2019.
- JUNG, F.L.L.; PASSOS, F.O.; CARVALHO FILH, J.M.; MOTOKI, E.M.; PEREIRA, N.B. New Left-Right Characterization Method used for Contactor Sensitivity Curves. XIII Conferência Brasileira sobre Qualidade de Energia Elétrica – CBQEE 2019.
- MOTOKI, E.M.; CARVALHO FILHO, J.M.; SILVEIRA, P.M.; PEREIRA, N.B.; SOUZA, P.V.G. Cost of Industrial Process Shutdowns due to Voltage Sag and Short Interruption. *Energies* **2021**, 14, 2874. [https:// doi.org/10.3390/en14102874](https://doi.org/10.3390/en14102874).

Igualmente será desenvolvido um novo artigo a ser proposto para uma revista com classificação Qualis Capes.

REFERÊNCIAS

ALVES, M. F.; COSTA, J.G.; FONSECA, V. R. C. Impacto Econômico do Afundamento de Tensão na indústria: Uma Metodologia Aplicada a Grandes Redes Elétricas. V SBQEE Seminário Brasileiro sobre Qualidade da Energia Elétrica. 17 a 20 de Agosto de 2003. Aracaju – Sergipe – Brasil.

ANEEL. Módulo 8 do PRODIST - Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica do Sistema Elétrico Nacional (revisão 12), 2021. Disponível em: https://www.aneel.gov.br/documents/656827/14866914/M%C3%B3dulo_8-Revis%C3%A3o_12/342ff02a-8eab-2480-a135-e31ed2d7db47.

BEHERA, C.; BANIK, A.; NANDI, J.; DEY, S.; REDDY, G.H.; GOSWAMI, A.K. Assessment of Financial Loss due to Voltage Sag in na Industrial Distribution System. In Proceedings of the 2019 IEEE 1st International Conference on Energy, Systems and Information Processing (ICESIP), Chennai, India, 4–6 July 2019; pp. 1–6.

BELCHIOR, F.N. Análise Comparativa e Melhorias do Desempenho de Conversores de Frequência frente a Afundamentos Momentâneos de Tensão. Dissertação Mestrado. Universidade Federal de Uberlândia. 2003, Uberlândia, MG, Brasil.

BELCHIOR, F.N.; OLIVEIRA, J. C.; KAGAN, N.; MOTOKI, E.M. Procedimentos Aplicados à Indústria para a Melhoria da Suportabilidade de Conversores de Frequência VSI-PWM Frente a Afundamentos de Tensão. INDUSCON – XVIII Conferência Internacional de Aplicações Industriais, Agosto 2008, Poços de Caldas, MG, Brasil.

BODNAR, R. et al. Methodology for quantification of equipment trips due to voltage sags. In: 2016 ELEKTRO. IEEE, p. 264–268, 2016.

BODNAR, R. et al. Methodology for determination of the number of equipment malfunctions due to voltage quality. In: 2016 IEEE 16th International Conference on Environment and Electrical Engineering (EEEIC). IEEE, p. 1–6, 2016.

BOLLEN, M.H.J. Understanding Power Quality Problems: Voltage Sags and Interruptions. New York: IEEE Press on Power Engineering, 2000.

BOLLEN, M.H.J. Algorithms for characterizing measured three-phase unbalanced voltage dips. IEEE Transactions on Power Delivery, v. 18, n. 3, p. 937–944, 2003.

BOLLEN, M.H.J.; GOOSSENS, P.; ROBERT, A. Assessment of voltage dips in HV-networks: deduction of complex voltages from the measured RMS voltages. IEEE Transactions on Power Delivery, v. 19, n. 2, p. 783–790, 2004.

BOLLEN, M.H.J.; GU, I.Y.H. Signal Processing of Power Quality Disturbances. New York: IEEE Press Series on Power Engineering, 2006.

BOLLEN, M.H.J.; PING, W.; JENKINS, N. Analysis and Consequences of the Phase Jump Associated with A Voltage Sag. In: 1996 12th Power Systems Computation Conference. Dresden, August 19-23, p. 316–322, 1996.

CARVALHO FILHO, J. M. Uma Contribuição à Avaliação do Atendimento a Consumidores com Cargas Sensíveis – Proposta de Novos Indicadores. Tese de Doutorado. Escola Federal de Engenharia de Itajubá, 2000.

CARVALHO FILHO, J.M.; LEBORGNE, R.C.; OLIVEIRA, T.C.; OLIVEIRA, J.F.; WATANABE, G.T. Voltage Sag Cost Assessment Based on Power Flow Reduction and Non Supplied Energy. In Proceedings of the 2009 IEEE Power & Energy Society General Meeting, Calgary, AB, Canada, 26–30 July 2009.

CEBRIAN, J.C.; KAGAN, N. Hybrid Method to Assess Sensitive Process Interruption Costs Due to Faults in Electric Power Distribution Networks. IEEE Trans. Power Deliv. 2010, 25, 1686–1696.

CHAN, J.Y.; MILANOVIC, J. V. Severity indices for assessment of equipment sensitivity to voltage sags and short interruptions. In: 2007 IEEE Power Engineering Society General Meeting. IEEE, p. 1–7, 2007.

CHEN, W.; DING, C.; WANG, L.; ZHU, X. Economic Analysis of Voltage Sag Loss and Treatment Based On-Site Data. In Proceedings of the 2016 China International Conference on Electricity Distribution (CICED), Xian, China, 10–13 August 2016; pp. 1–4.

CIGRE/CIRED/UIE JOINTWORKING GROUP C4.110 Voltage Dip Immunity of Equipment and Installations; Cigre Technical Brochure 412; CIGRE: Paris, France, 2010.

COHEN, J. (1988), *Statistical power analysis for the behavioral sciences*. Hillsdale, NJ, Erlbaum.

COSTA, J.G. Avaliação do Impacto Econômico do Afundamento de Tensão na Indústria. Dissertação de Mestrado. Pontífice Universidade Católica – MG, 2003.

COSTA, M.V. Uma Contribuição à Regulamentação das Variações de Tensão de Curta Duração. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Itajubá – MG, 2018.

COSTA, M.V; CARVALHO FILHO, JM. Avaliação dos Indicadores de VTCD com base no Nível de Sensibilidade dos Equipamentos. Sba – Sociedade Brasileira de Automática – CBA 2018. Paraiba.

DJOKIC, S.; MILANOVIC, J.; KIRSCHEN, D. Sensitivity of AC Coil Contactors to Voltage Sags, Short Interruptions, and Undervoltage Transients. IEEE Trans. Power Deliv. 2004, 19, 1299–1307.

DJOKIC, S.; STOCKMAN, K.; MILANOVIC, J.; DESMET, J.; BELMANS, R. Sensitivity of AC Adjustable Speed Drives to Voltage Sags and Short Interruptions. IEEE Trans. Power Deliv. 2005, 20, 494–505.

DJOKIC, S.Z. et al. Sensitivity of personal computers to voltage sags and short interruptions. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 20, n. 1, p. 375–383, 2005.

DUGAN, R.C. et al. *Electrical Power Systems Quality*. 2nd ed. NY: McGraw-Hill, 2002.

ESCRIBANO, A.H.; GÓMEZ-LÁZARO, E.; MOLINA-GARCÍA, A.; FUENTES, J. Influence of Voltage Dips on Industrial Equipment: Analysis and Assessment. *Int. J. Electr. Power Energy Syst.* 2012, 41, 87–95.

ESCRIBANO, A.H. et al. Analysis of the AC-contactor electrical behavior under voltage dips. In: *The XIX International Conference on Electrical Machines - ICEM2010*. IEEE, p. 1–5, 2010.

FIBRA DUPONT E CPFL (2014). PROCESSO 2014/0058500-0; Data 01/04/2014 a 20/10/2014; Diário oficial Superior Tribunal de Justiça; Estado Brasil; Envolvidos da última movimentação: Relator Sérgio Kukina MINISTRO; Embargante: Companhia Paulista de Força e Luz - CPFL Embargado Invista Nylon Sul Americana Ltda; Interessado Fibra Dupont Sudamerica S/A; Movimentações Ano de 2014.

FIGUEIREDO FILHO, DB; SILVA JUNIOR, JA. Desvendando os Mistérios do Coeficiente de Correlação de Pearson (r). *Revista Política Hoje*, Vol. 18, n. 1, 2009. Federal University of Pernambuco Researchgate.net. Google acadêmico. Article in Leviathan · January 2009. DOI: 10.11606/issn.2237-4485.lev.2014.132346. See discussions, stats, and author profiles for this publication at: <https://www.researchgate.net/publication/290157754>

GOSWAMI, A.K.; GUPTA, C.P.; SINGH, G.K. Assessment of Financial Losses due to Voltage Sags in an Indian Distribution System. In *Proceedings of the 2008 IEEE Region 10 and the Third international Conference on Industrial and Information Systems*, Kharagpur, India, 8–10 December 2008; pp. 1–6.

GOSWAMI, A.K.; GUPTA, C.P.; SINGH, G.K. Cost-Benefit Analysis of Voltage Sag Mitigation Methods in Cement Plants. In *Proceedings of the 2014 16th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP)*, Bucharest, Romania, 25–28 May 2014; pp. 866–870.

GUPTA, C.P.; MILANOVIC, J.V. Costs of Voltage Sags: Comprehensive Assessment Procedure. In *Proceedings of the IEEE Russia Power Tech*, St. Petersburg, Russia, 27–30 June 2005; pp. 1–7.

GUPTA, C.P.; MILANOVIC, J.V. Probabilistic Assessment of Equipment Trips due to Voltage Sags. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 21, n. 2, p. 711–718, 2006.

GUPTA, C.P.; MILANOVIC, J. V. Probabilistic Methods for Counting Equipment Trips due to Voltage Sags. In: *2006 International Conference on Probabilistic Methods Applied to Power Systems*. IEEE, p. 1–8, 2006.

HANZELKA, Z. Voltage Dips and Short Supply Interruptions. In: BAGGGINI, A. (Org.) *Handbook of Power Quality*. West Sussex: John Wiley & Sons, Ltd, p. 79-134, 2008.

HE, H.-Y.; ZHANG, W.-H.; WANG, Y.; XIAO, X.-Y. A Sensitive Industrial Process Model for Financial Losses Assessment Due to Voltage Sag and Short Interruptions. *IEEE Trans. Power Deliv.* 2020.

HEINE, P.; POHJANHEIMO, P.; LEHTONEN, M.; LAKERVI, E. A method for estimating the frequency and cost of voltage sags. *IEEE Trans. Power Syst.* 2002, 17, 290–296.

<https://rstudio-pubs-static.s3.amazonaws.com/50700626ac87c8c6124f77a41a4f0744919805.html>. Correlação / Regressão. *Estatística Aplicada*. 20 de junho de 2019. Acesso 21/01/2022.

INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS **IEEE Std 1100-2005 (IEEE Emerald Book)**: IEEE Recommended Practice For Powering and Grounding Electronic Equipment. New York, 2005.

IEEE Std 1159-2009: IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality; IEEE: New York, NY, USA, 2009.

INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS IEEE Std 1564-2014: IEEE Guide for Voltage Sag Indices. New York, 2014.

JUNG, F.L.L.; PASSOS, F.O.; CARVALHO FILH, J.M.; MOTOKI, E.M.; PEREIRA, N.B. New Left-Right Characterization Method used for Contactor Sensitivity Curves. XIII Conferência Brasileira sobre Qualidade de Energia Elétrica – CBQEE 2019.

JUNG, F.L.L., Sensibilidade de Equipamentos Industriais frente a afundamentos de Tensão. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Itajubá – MG, 2021.

KANOKBANNAKORN, W.; SAENG SUWAN, T.; SIRISUKPRASERT, S. The Modeling of AC Magnetic Contactor for Immunity Studies and Voltage Sag Assessment. In *Proceedings of the The 8th Electrical Engineering/ Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI) Association of Thailand—Conference 2011*, Khon Kaen, Thailand, 17–19 May 2011; pp. 621–624.

KJOLLE, G.H.; SAMDAL, K.; SINGH, B.; KVITASTEIN, O.A. Customer Costs Related to Interruptions and Voltage Problems: Methodology and Results. *IEEE Trans. Power Syst.* 2008, 23, 1030–1038.

LAMEDICA, R.; ESPOSITO, G.; TIRONI, E.; ZANINELLI, D.; PRUDENZI, A. A survey on power quality cost in industrial customers. In *Proceedings of the 2001 IEEE Power Engineering Society Winter Meeting. Conference Proceedings (Cat. No.01CH37194)*, Columbus, OH, USA, 28 January–1 February 2001.

MAGALHAES, C.H.N. Recursos Operativos no Planejamento de Expansão de Sistemas de Potência. Tese de Doutorado, Universidade de São Paulo – SP, 2009.

MCGRANAGHAN, M.; ROETTGER, B. Economic evaluation of power quality. *IEEE Power Eng. Rev.* 2002, 22, 8–12.

MILANOVIC, J.V.; Gupta, C.P. Probabilistic Assessment of Financial Losses due to Interruptions and Voltage Sags-Part I: The Methodology. *IEEE Trans. Power Deliv.* 2006, 21, 918–924.

MILANOVIC, J.V.; Gupta, C.P. Probabilistic Assessment of Financial Losses due to Interruptions and Voltage Sags—Part II: Practical Implementation. *IEEE Trans. Power Deliv.* 2006, 21, 925–932.

MOTOKI, EM; CARVALHO FILHO, J.M.; SILVEIRA, P.M.; CARNEIRO, J.R.V.; SOUZA, P.V.G.; PEREIRA, N.B. Custos de Paradas de Processos Industriais devido a Variação de Tensão de Curta Duração através da Pesquisa de Campo. XIII Conferência Brasileira sobre Qualidade de Energia Elétrica – CBQEE 2019.

MOTOKI, E.M.; GUERRERO, C.A.V.; SILVEIRA, P.M.; GUIRELLI, C.R.; SANTOS, R.V.; PAZZINI, L.H.A.; SANTIAGO, N.S.; AKAMINE, C. Estudo de Sensibilidade de um Transmissor de TV Digital e seus Impactos de Operação Frente a Variações de Tensão de Curta Duração. XIII Conferência Brasileira sobre Qualidade de Energia Elétrica – CBQEE 2019.

MOTOKI, E.M.; CARVALHO FILHO, J.M.; SILVEIRA, P.M.; PEREIRA, N.B.; SOUZA, P.V.G. Cost of Industrial Process Shutdowns due to Voltage Sag and Short Interruption. *Energies* 2021, 14, 2874. [https:// doi.org/10.3390/en14102874](https://doi.org/10.3390/en14102874).

PELEGRINI, M.A.; ALMEIDA, C.F.M.; KONDO, D.V.; MAGALHAES, C.H.; SILVA, F.T.; BALDAN, S.; FILHO, F.C.S.; GARCIA, V.V. Survey and Applications of Interruption Costs in Large Customers. In *Proceedings of the 2012 IEEE 15th International Conference on Harmonics and Quality of Power*, Hong Kong, China, 17–20 June 2012; pp. 860–864.

QUAIA, S.; TOSATO, F. A method for the Computation of the Interruption Costs Caused by Supply Voltage Dips and Outages in Small Industrial Plants. In *Proceedings of the IEEE Region 8 EUROCON 2003, Computer as a Tool*, Ljubljana, Slovenia, 22–24 September 2003; Volume 2, pp. 249–253.

SABIN, D.D.; BOLLEN, M.H.J. Overview of IEEE Std 1564-2014 Guide for Voltage Sag Indices. In: 2014 16th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP). IEEE, p. 497–501, 2014.

SALIM, F.; Nor, K.M.; SAID, D.M.; RAHMAN, A.A.A. Voltage Sags Cost Estimation for Malaysian Industries. In *Proceedings of the 2014 IEEE International Conference on Power and Energy (PECon)*, Kuching, Sarawak, 1–3 December 2014; pp. 41–46.

SHAREEF, H.; MARZUKI, N.; MOHAMED, A.; MOHAMED, K. Experimental Investigation of Ac Contactor Ride Through Capability during Voltage Sag. In *Proceedings of the 2010 9th International Conference on Environment and Electrical Engineering*, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), Cappadocia, Turkey, 16–19 May 2010; pp. 325–328.

SOMRAK, T.; TAYJASANANT, T. Minimized Financial Losses Due to Interruptions and Voltage Sags with Consideration of Investment Cost. In *Proceedings of the 2019 IEEE PES GTD Grand International Conference and Exposition Asia (GTD Asia)*, Bangkok, Thailand, 19–23 March 2019; pp. 29–34.

SULLIVAN, M.J. ; T. VARDELL ; M. JOHNSON. Power Interruption Costs to Industrial and Commercial Consumers of Electricity. Published in: *IEEE Transactions on Industry Applications* (Volume: 33 , Issue: 6 , Nov/Dec 1997), Page(s): 1448 – 1458, INSPEC

Accession Number: 5790525, Date of Publication: Nov/Dec 1997, DOI: 10.1109/28.649955, ISSN Information: Publisher: IEEE.

THAILAN, R.S. AND HEYDT, G.T. Power Acceptability and Voltage Sag Industry in the Three Phase Sense. IEEE PES Summer Meeting 2000, Seattle, WA, USA, July 2000.

TEIXEIRA, M. D.; AOKI, A. R.; BONELLI, A. F.; PENICHE, R. A.; BACCA, I. A.; CHAVES NETO, CORDEIRO, M. T.A.. Impactos Econômicos Associados a Fenômenos de Qualidade de Energia: Visão do Consumidor. XXI SNPTEE SEMINÁRIO NACIONAL DE PRODUÇÃO E TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA. Versão 1.0. 23 a 26 de Outubro de 2011. Florianópolis – SC.

VALLADARES NETO, J.; SANTOS, C.B.; TORRES, E.M; ESTRELA, C, 2017. Boxplot: Um Recurso Gráfico para a Análise e Interpretação de Dados Quantitativos. Revista Odontológica do Brasil Central 2017; 26(76): 1-6. ISSN 1981-3708 – Revisão. https://rstudio-pubs-static.s3.amazonaws.com/507006_26ac87c8c6124f77_a41a_4f_0744919805.html – 20/06/2019. Acesso 21/01/2022.

VEGUNTA S. C.AND MILANOVIC J. V. "Estimation Of Cost Of Downtime Of Industrial Process Due To Voltage Sags," in *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 26, no. 2, pp. 576-587, April 2011.

WATANABE, G.T. Uma Contribuição à Análise de Perdas Ocasionadas por Afundamentos Momentâneos de Tensão. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Itajubá – MG, 2010.

WELDEMARIAM, L.E., CUK, V., COBBEN, J. F. G., 2016. Cost Estimation of Voltage Dips in Small Industries Based on Equipment Sensitivity Analysis. *Smart Grid and Renewable Energy*, 7, 271- 292. <http://dx.doi.org/10.4236/sgre.2016.711021>.

WESTIN, N.O.P. et al, 2019. Comparação entre Metodologias de Simulação de VTCDs em Redes de Distribuição. CBQEE 2019. Congresso Brasileiro de Qualidade de Energia Elétrica.

WESTIN, N.O.P.. Alocação Ótima de Religadores em Rede de Distribuição considerando Variações de Tensão de Curta Duração. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Itajubá – MG, 2021.

WU, Y.; LI, C.; Xu, Y.; WEI, P. Characterizing The Tolerance Performance Of PLCs to Voltage Sag Based on Experimental Research. In Proceedings of the 2016 IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC), Xi'an, China, 25–October 2016; pp. 496–501.

YUNG, F. L. et al, 2019. New Left-Right Characterization Method used for Contactor Sensitivity Curves. CBQEE 2019. Congresso Brasileiro de Qualidade de Energia Elétrica.

APÊNDICE A – FORMULÁRIO DE PESQUISA

1. Razão social da empresa:

2. Principal tipo de atividade da sua empresa:

3. Média mensal de demanda, consumo e tensão de suprimento (mínimo 6 a 12 meses)?

	Média	
	Valor	Unidade de Medida
Demanda contratada		
Tensão		
Consumo mensal		

4. Assinale os horários de trabalho normais da sua empresa? (Marque todas as opções possíveis).

	Manhã	Tarde	Noite	Madrugada
De Segunda a Sexta				
Sábado				
Domingo e Feriado				

5. Número de empregados nessa empresa (quantas pessoas trabalham nessa unidade da empresa incluindo administrativos e produção, efetivos e terceirizados, em todos os turnos de trabalho)?

- | | |
|--|---|
| <input type="checkbox"/> Menos de 10 pessoas
<input type="checkbox"/> De 11 a 30 pessoas
<input type="checkbox"/> De 31 a 50 pessoas
<input type="checkbox"/> De 51 a 100 pessoas | <input type="checkbox"/> De 101 a 300 pessoas
<input type="checkbox"/> De 301 a 500 pessoas
<input type="checkbox"/> De 501 a 1000 pessoas
<input type="checkbox"/> mais de 1000 pessoas |
|--|---|

6. Tipos de cargas e processos instalados

Finalidade	% do consumo total
Iluminação	
Ar condicionado e ventilação	
Refrigeração industrial	
Aquecimento (estufas)	
Produção de vapor	
Fornos	
Força motriz	
Computação e Comunicação	
Elevadores / escadas rolantes	
Outro:	
Outro:	
Total (garanta que a soma dá 100%)	100%

7. Quantas paradas de processo ocorreram devido a AMTs, e outros tipos de distúrbios, nos últimos 12 meses?

8. Considerando o afundamento de tensão e a curta interrupção, identifique os eventos que têm o maior impacto (instantâneo, momentâneo e temporário).

9. Qual o período mais crítico do dia em sua empresa, em que o AMT e o ICD causam mais prejuízos? (Marque todas as opções possíveis).

Pela manhã, das 6h00 às 12h00 À noite das, 18h00 às 24h00

À tarde, das 12h00 às 18h00 De madrugada, das 0h00 às 6h00

10. Qual(is) equipamento(s) da sua empresa são mais sensíveis a AMT e o ICD?

11. Quanto tempo demoraria a retomada de produção ou operação caso houvesse uma parada inesperada do processo?

12. Quando se tem uma parada inesperada do processo devido a AMT e ICD, qual tipo de prejuízo que a sua empresa tem, e em que intensidade?

	Prejuízo			
	Nenhum	Pouco	Algum	Muito
Retomada de produção ou da operação				
Gastas com horas-extras				
Perda de dados / comunicação				
Perda de matéria prima				
Perda de produto acabado				
Perda de produção ou impossibilidade de operação				
Perda de vendas / negócios				
Atraso nas entregas / Multas				
Gastos com gerador de energia				
Avaria em equipamentos				
Gastos com meio ambiente				
Outro:				

13. Considerando-se um dia e um período de alta produção, há como estimar o custo de reinício de produção / operação e a perda de produção / operação / faturamento que sua empresa teria nesse período caso houvesse uma parada inesperada do processo devido a AMT e ICD?

-
-
14. A sua empresa paga horas-extras para os funcionários a fim de recuperar as perdas de receita ou produção ou até para finalizar um trabalho interrompido, decorrente de uma parada inesperada do processo, devido a AMT e ICD? Se sim, qual o gasto estimado com o pagamento dessas horas-extras?

-
-
15. Sua empresa possui matéria prima, produto em processo ou produto acabado que se estragaria devido a uma parada inesperada do processo? Se sim, qual o o prejuízo associado a estas perdas?

-
-
16. A sua empresa teve, no último ano, algum custo adicional para reparo ou substituição de equipamento ou máquina em decorrência de uma parada inesperada do processo? Se sim, o Sr.(a) poderia informar o valor aproximado do custo de reparo ou substituição destes equipamentos?

-
-
17. Sua empresa poderia ter outro tipo de prejuízo, se ocorresse uma parada inesperada do processo devido a AMT e ICD? Se sim, qual? O(a) Sr.(a) saberia estimar qual seria o prejuízo devido a esse outro fator?

-
-
18. Sua empresa teria procedimentos ou equipamentos para monitorar a ocorrência de AMT e ICD? Se sim, detalhe o tipo de monitoramento

-
-
19. O que sua empresa faz para mitigar o AMT e o ICD (não faz nada, geradores, no breaks, investe em outras fontes de energias)? E qual é o investimento para isso?
-
-

APÊNDICE B – N° DESLIGAMENTO ASDs

Barra A – ES

Barra B – SP

Barra A ES Barra B SP	2012						2013						N° Deslig Anual
	jul	ago	set	out	nov	dez	jan	fev	mar	abr	mai	jun	
A2	1,03	1,09	0,37	0	0	0,47	1,78	0,51	1,67	2,37	0	0	9,29
A3	0,07	0,32	0,01	0,03	0	0	0,3	0,01	1,11	0,19	0,04	0	2,08
A8	0,01	1,01	2,35	1,66	2,59	2,65	4,84	0,06	1,41	0	0,05	0,6	17,23
A9	0,01	1,01	2,35	1,66	2,61	3,62	5,8	0,06	1,39	0	0,05	0,03	18,59
A10	0	1	1	1,2	0	0,19	0,16	1,34	1,03	0,33	1	0	7,25
A11	0,08	1,45	3,88	0,47	0,03	0,3	6,48	1,37	1,84	0	0	0,84	16,74
A13	0	0,95	0	1,56	5,21	0	4,1	1,11	3,11	2,03	4,16	1,52	23,75
A14	0,29	2,07	0,94	0,51	1,1	0,99	1,76	0,16	5,01	2,12	0	2,19	17,14
A17	0,56	1	1	0,09	4	3,02	2,44	1	1,42	1,81	1	1,48	18,82
A18	4,16	2,03	0,82	4,52	1,3	2,08	2,84	2,81	1,83	2,13	0,37	0,63	25,52
A20	4,93	2,82	3,94	1,45	1,01	2,22	6,6	2,09	3,47	1,05	1,01	1	31,59
A24	2,84	2,96	0,01	1,41	1,05	2,42	5,41	1,04	2,22	4,96	3,12	4,97	32,41
A25	0,86	2,61	0,38	5,06	2,43	1	7,99	3,64	0,79	4	2	0,08	30,84
A26	0,87	2,39	0,08	7,44	2,8	2	8,05	3,64	0,8	4	2	0,1	34,17
A28	0,2	1,65	1,38	3,27	3,55	1,03	6,77	0,38	2,26	2,26	0,19	0,16	23,10
B1	1	0,45	0,02	2,23	1,05	0,46	2,79	2,1	2,69	0,34	1,01	0,92	15,06
B2	0,01	1	0	1,43	1,67	0,75	3,39	1,17	1,62	0,55	1,12	1,23	13,94
B3	0,97	0,38	2,02	0	1,65	3,44	2,42	1,82	1,67	1,24	0,6	3,11	19,32
B4	2,84	2,07	3,11	3,92	2,05	1,84	1,41	0,56	1	0,24	0	0,01	19,05
B5	2,94	1,44	0,78	0,81	3,53	2,14	2,92	0,67	1,85	0,71	0,99	0,03	18,81
B6	0,94	0,03	1,01	3,93	2,03	1	0,16	3,39	1,05	1,57	1	1,01	17,12
B8	1,65	0,01	0,05	0	1,05	0,87	1,01	4,85	0,95	0,01	0,01	0,31	10,77
B14	0	1,54	1	1,9	6	2,42	2,95	3,16	0	0,78	1	1,01	21,76
B16	0,91	2,01	0,71	2	2,4	2,59	1	1,69	1,68	0	1,01	0	16,00
B17	0	0,01	2,91	2	4,08	2,75	1	1,85	1	0,53	0	0	16,13
B18	0,81	0,03	0,03	0	0,64	0,07	0	1,19	0,77	0,04	2,95	0	6,53
B19	0	0,06	2,64	2,82	0,01	2,24	3,96	1,64	0,46	1	2,52	0,85	18,20
B21	0	0,16	0,04	1,63	1,45	0	0	0,07	1,79	0,01	2	0,37	7,52
B23	0,01	0	1,14	1,91	0	2,35	1,14	2	2,24	1	0,17	1	12,96
B25	0	0	0,91	1,58	0	3,97	3,24	1,1	4,47	0,84	0	3,25	19,36
B26	1,06	0,12	0,02	1	0,06	0,01	1,8	5,83	0,99	0,11	0	0	11,00
B30	1,59	0,2	1,18	0,01	0,51	3,74	1,01	5,73	0,8	0,23	0,45	0,91	16,36

APÊNDICE C – CUSTO ANUAL (USD)

Tabela C.1 – Custos anuais para as UCs do ES.

ES		UC1	UC2	UC3	UC4	UC5	UC6	UC7	UC8	UC9
		\$1.437,00	\$52.800,00	\$5.690,00	\$4.773,00	\$4.085,00	\$2.161,00	\$5.145,00	\$7.238,00	\$7.153,00
A2	9,29	\$13.349,73	\$490.512,00	\$52.860,10	\$44.341,17	\$37.949,65	\$20.075,69	\$47.797,05	\$67.241,02	\$66.451,37
A3	2,08	\$2.988,96	\$109.824,00	\$11.835,20	\$9.927,84	\$8.496,80	\$4.494,88	\$10.701,60	\$15.055,04	\$14.878,24
A8	17,23	\$24.759,51	\$909.744,00	\$98.038,70	\$82.238,79	\$70.384,55	\$37.234,03	\$88.648,35	\$124.710,74	\$123.246,19
A9	18,59	\$26.713,83	\$981.552,00	\$105.777,10	\$88.730,07	\$75.940,15	\$40.172,99	\$95.645,55	\$134.554,42	\$132.974,27
A10	7,25	\$10.418,25	\$382.800,00	\$41.252,50	\$34.604,25	\$29.616,25	\$15.667,25	\$37.301,25	\$52.475,50	\$51.859,25
A11	16,74	\$24.055,38	\$883.872,00	\$95.250,60	\$79.900,02	\$68.382,90	\$36.175,14	\$86.127,30	\$121.164,12	\$119.741,22
A13	23,75	\$34.128,75	\$1.254.000,00	\$135.137,50	\$113.358,75	\$97.018,75	\$51.323,75	\$122.193,75	\$171.902,50	\$169.883,75
A14	17,14	\$24.630,18	\$904.992,00	\$97.526,60	\$81.809,22	\$70.016,90	\$37.039,54	\$88.185,30	\$124.059,32	\$122.602,42
A17	18,82	\$27.044,34	\$993.696,00	\$107.085,80	\$89.827,86	\$76.879,70	\$40.670,02	\$96.828,90	\$136.219,16	\$134.619,46
A18	25,52	\$36.672,24	\$1.347.456,00	\$145.208,80	\$121.806,96	\$104.249,20	\$55.148,72	\$131.300,40	\$184.713,76	\$182.544,56
A20	31,59	\$45.394,83	\$1.667.952,00	\$179.747,10	\$150.779,07	\$129.045,15	\$68.265,99	\$162.530,55	\$228.648,42	\$225.963,27
A24	32,41	\$46.573,17	\$1.711.248,00	\$184.412,90	\$154.692,93	\$132.394,85	\$70.038,01	\$166.749,45	\$234.583,58	\$231.828,73
A25	30,84	\$44.317,08	\$1.628.352,00	\$175.479,60	\$147.199,32	\$125.981,40	\$66.645,24	\$158.671,80	\$223.219,92	\$220.598,52
A26	34,17	\$49.102,29	\$1.804.176,00	\$194.427,30	\$163.093,41	\$139.584,45	\$73.841,37	\$175.804,65	\$247.322,46	\$244.418,01
A28	23,10	\$33.194,70	\$1.219.680,00	\$131.439,00	\$110.256,30	\$94.363,50	\$49.919,10	\$118.849,50	\$167.197,80	\$165.234,30

Tabela C.2 – Custos anuais para as UCs do ES (Continuação).

ES		UC10	UC11	UC12	UC13	UC14	UC15	UC16	UC17	UC18
		\$650,00	\$11.130,00	\$6.613,00	\$2.031,00	\$2.715,00	\$9.311,00	\$4.565,00	\$13.049,00	\$41.414,00
A2	9,29	\$6.038,50	\$103.397,70	\$61.434,77	\$18.867,99	\$25.222,35	\$86.499,19	\$42.408,85	\$121.225,21	\$384.736,06
A3	2,08	\$1.352,00	\$23.150,40	\$13.755,04	\$4.224,48	\$5.647,20	\$19.366,88	\$9.495,20	\$27.141,92	\$86.141,12
A8	17,23	\$11.199,50	\$191.769,90	\$113.941,99	\$34.994,13	\$46.779,45	\$160.428,53	\$78.654,95	\$224.834,27	\$713.563,22
A9	18,59	\$12.083,50	\$206.906,70	\$122.935,67	\$37.756,29	\$50.471,85	\$173.091,49	\$84.863,35	\$242.580,91	\$769.886,26
A10	7,25	\$4.712,50	\$80.692,50	\$47.944,25	\$14.724,75	\$19.683,75	\$67.504,75	\$33.096,25	\$94.605,25	\$300.251,50
A11	16,74	\$10.881,00	\$186.316,20	\$110.701,62	\$33.998,94	\$45.449,10	\$155.866,14	\$76.418,10	\$218.440,26	\$693.270,36
A13	23,75	\$15.437,50	\$264.337,50	\$157.058,75	\$48.236,25	\$64.481,25	\$221.136,25	\$108.418,75	\$309.913,75	\$983.582,50
A14	17,14	\$11.141,00	\$190.768,20	\$113.346,82	\$34.811,34	\$46.535,10	\$159.590,54	\$78.244,10	\$223.659,86	\$709.835,96
A17	18,82	\$12.233,00	\$209.466,60	\$124.456,66	\$38.223,42	\$51.096,30	\$175.233,02	\$85.913,30	\$245.582,18	\$779.411,48
A18	25,52	\$16.588,00	\$284.037,60	\$168.763,76	\$51.831,12	\$69.286,80	\$237.616,72	\$116.498,80	\$333.010,48	\$1.056.885,28
A20	31,59	\$20.533,50	\$351.596,70	\$208.904,67	\$64.159,29	\$85.766,85	\$294.134,49	\$144.208,35	\$412.217,91	\$1.308.268,26
A24	32,41	\$21.066,50	\$360.723,30	\$214.327,33	\$65.824,71	\$87.993,15	\$301.769,51	\$147.951,65	\$422.918,09	\$1.342.227,74
A25	30,84	\$20.046,00	\$343.249,20	\$203.944,92	\$62.636,04	\$83.730,60	\$287.151,24	\$140.784,60	\$402.431,16	\$1.277.207,76
A26	34,17	\$22.210,50	\$380.312,10	\$225.966,21	\$69.399,27	\$92.771,55	\$318.156,87	\$155.986,05	\$445.884,33	\$1.415.116,38
A28	23,10	\$15.015,00	\$257.103,00	\$152.760,30	\$46.916,10	\$62.716,50	\$215.084,10	\$105.451,50	\$301.431,90	\$956.663,40

Tabela C.3 – Custos anuais para as UCs de SP.

SP		UC1	UC2	UC3	UC4	UC5	UC6	UC7
		\$4.190,30	\$6.847,00	\$6.003,00	\$6.000,00	\$2.717,00	\$6.851,00	\$9.667,00
B1	15,06	\$63.105,92	\$103.115,82	\$90.405,18	\$90.360,00	\$40.918,02	\$103.176,06	\$145.585,02
B2	13,94	\$58.412,78	\$95.447,18	\$83.681,82	\$83.640,00	\$37.874,98	\$95.502,94	\$134.757,98
B3	19,32	\$80.956,60	\$132.284,04	\$115.977,96	\$115.920,00	\$52.492,44	\$132.361,32	\$186.766,44
B4	19,05	\$79.825,22	\$130.435,35	\$114.357,15	\$114.300,00	\$51.758,85	\$130.511,55	\$184.156,35
B5	18,81	\$78.819,54	\$128.792,07	\$112.916,43	\$112.860,00	\$51.106,77	\$128.867,31	\$181.836,27
B6	17,12	\$71.737,94	\$117.220,64	\$102.771,36	\$102.720,00	\$46.515,04	\$117.289,12	\$165.499,04
B8	10,77	\$45.129,53	\$73.742,19	\$64.652,31	\$64.620,00	\$29.262,09	\$73.785,27	\$104.113,59
B14	21,76	\$91.180,93	\$148.990,72	\$130.625,28	\$130.560,00	\$59.121,92	\$149.077,76	\$210.353,92
B16	16,00	\$67.044,80	\$109.552,00	\$96.048,00	\$96.000,00	\$43.472,00	\$109.616,00	\$154.672,00
B17	16,13	\$67.589,54	\$110.442,11	\$96.828,39	\$96.780,00	\$43.825,21	\$110.506,63	\$155.928,71
B18	6,53	\$27.362,66	\$44.710,91	\$39.199,59	\$39.180,00	\$17.742,01	\$44.737,03	\$63.125,51
B19	18,20	\$76.263,46	\$124.615,40	\$109.254,60	\$109.200,00	\$49.449,40	\$124.688,20	\$175.939,40
B21	7,52	\$31.511,06	\$51.489,44	\$45.142,56	\$45.120,00	\$20.431,84	\$51.519,52	\$72.695,84
B23	12,96	\$54.306,29	\$88.737,12	\$77.798,88	\$77.760,00	\$35.212,32	\$88.788,96	\$125.284,32
B25	19,36	\$81.124,21	\$132.557,92	\$116.218,08	\$116.160,00	\$52.601,12	\$132.635,36	\$187.153,12
B26	11,00	\$46.093,30	\$75.317,00	\$66.033,00	\$66.000,00	\$29.887,00	\$75.361,00	\$106.337,00
B30	16,36	\$68.553,31	\$112.016,92	\$98.209,08	\$98.160,00	\$44.450,12	\$112.082,36	\$158.152,12

Tabela C.4 – Custos anuais para as UCs de SP (Continuação).

SP		UC8	UC9	UC10	UC11	UC12	UC13	UC14	UC15
		\$2.071,00	\$3.657,00	\$1.640,00	\$6.056,00	\$556,00	\$1.811,00	\$1.501,00	\$1.509,49
B1	15,06	\$31.189,26	\$55.074,42	\$24.698,40	\$91.203,36	\$8.373,36	\$27.273,66	\$22.605,06	\$22.732,92
B2	13,94	\$28.869,74	\$50.978,58	\$22.861,60	\$84.420,64	\$7.750,64	\$25.245,34	\$20.923,94	\$21.042,29
B3	19,32	\$40.011,72	\$70.653,24	\$31.684,80	\$117.001,92	\$10.741,92	\$34.988,52	\$28.999,32	\$29.163,35
B4	19,05	\$39.452,55	\$69.665,85	\$31.242,00	\$115.366,80	\$10.591,80	\$34.499,55	\$28.594,05	\$28.755,78
B5	18,81	\$38.955,51	\$68.788,17	\$30.848,40	\$113.913,36	\$10.458,36	\$34.064,91	\$28.233,81	\$28.393,51
B6	17,12	\$35.455,52	\$62.607,84	\$28.076,80	\$103.678,72	\$9.518,72	\$31.004,32	\$25.697,12	\$25.842,47
B8	10,77	\$22.304,67	\$39.385,89	\$17.662,80	\$65.223,12	\$5.988,12	\$19.504,47	\$16.165,77	\$16.257,21
B14	21,76	\$45.064,96	\$79.576,32	\$35.686,40	\$131.778,56	\$12.098,56	\$39.407,36	\$32.661,76	\$32.846,50
B16	16,00	\$33.136,00	\$58.512,00	\$26.240,00	\$96.896,00	\$8.896,00	\$28.976,00	\$24.016,00	\$24.151,84
B17	16,13	\$33.405,23	\$58.987,41	\$26.453,20	\$97.683,28	\$8.968,28	\$29.211,43	\$24.211,13	\$24.348,07
B18	6,53	\$13.523,63	\$23.880,21	\$10.709,20	\$39.545,68	\$3.630,68	\$11.825,83	\$9.801,53	\$9.856,97
B19	18,20	\$37.692,20	\$66.557,40	\$29.848,00	\$110.219,20	\$10.119,20	\$32.960,20	\$27.318,20	\$27.472,72
B21	7,52	\$15.573,92	\$27.500,64	\$12.332,80	\$45.541,12	\$4.181,12	\$13.618,72	\$11.287,52	\$11.351,36
B23	12,96	\$26.840,16	\$47.394,72	\$21.254,40	\$78.485,76	\$7.205,76	\$23.470,56	\$19.452,96	\$19.562,99
B25	19,36	\$40.094,56	\$70.799,52	\$31.750,40	\$117.244,16	\$10.764,16	\$35.060,96	\$29.059,36	\$29.223,73
B26	11,00	\$22.781,00	\$40.227,00	\$18.040,00	\$66.616,00	\$6.116,00	\$19.921,00	\$16.511,00	\$16.604,39
B30	16,36	\$33.881,56	\$59.828,52	\$26.830,40	\$99.076,16	\$9.096,16	\$29.627,96	\$24.556,36	\$24.695,26