



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ  
INSTITUTO DE TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

**MITIGAÇÃO DE VARIAÇÕES DE TENSÃO EM UMA INDÚSTRIA CERVEJEIRA  
USANDO BANCO DE CAPACITORES FIXOS E CHAVEADOS**

LUIZ CLÁUDIO LOBO DA SILVA JÚNIOR

**DM 21/2020**

BELÉM  
2020





UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ  
INSTITUTO DE TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

LUIZ CLÁUDIO LOBO DA SILVA JÚNIOR

**MITIGAÇÃO DE VARIAÇÕES DE TENSÃO EM UMA INDÚSTRIA CERVEJEIRA  
USANDO BANCO DE CAPACITORES FIXOS E CHAVEADOS**

**DM 21/2020**

BELÉM  
2020

**MITIGAÇÃO DE VARIAÇÕES DE TENSÃO EM UMA INDÚSTRIA CERVEJEIRA  
USANDO BANCO DE CAPACITORES FIXOS E CHAVEADOS**

Dissertação submetida à Banca Examinadora do Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica da UFPA para a obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Elétrica na área de Sistemas de Energia Elétrica.

BELÉM  
2020

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com ISBD  
Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Pará  
Gerada automaticamente pelo módulo Ficat, mediante os dados fornecidos pelo(a)  
autor(a)

---

L799m Lobo da Silva Júnior, Luiz Cláudio  
Mitigação de variações de tensão em uma indústria  
cervejeira usando banco de capacitores fixos e chaveados. /  
Luiz Cláudio Lobo da Silva Júnior. — 2020.  
77 f. : il. color.

Orientador(a): Prof. Dr. João Paulo Abreu Vieira  
Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em  
Engenharia Elétrica, Instituto de Tecnologia, Universidade  
Federal do Pará, Belém, 2020.

1. banco de capacitores. 2. variações de tensão. 3. tensão  
na indústria. I. Título.

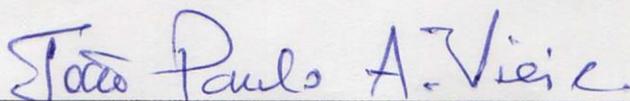
CDD 621.3191

---

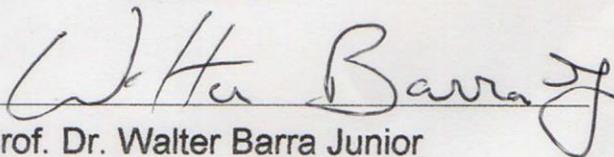
**MITIGAÇÃO DE VARIAÇÕES DE TENSÃO EM UMA INDÚSTRIA CERVEJEIRA  
USANDO BANCO DE CAPACITORES FIXOS E CHAVEADOS**

Dissertação submetida à Banca Examinadora do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da UFPA para a obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Elétrica na área de Sistemas de Energia Elétrica.

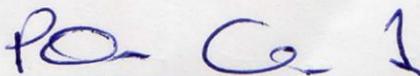
Avaliada em: 04 / 06 / 2020



Prof. Dr. João Paulo Abreu Vieira  
Orientador



Prof. Dr. Walter Barra Junior  
PPGEE/UFPA – Avaliador interno



Prof. Dr. Petrônio Vieira Junior  
FEEB/UFPA – Avaliador externo

Prof. Dra. Maria Emília de Lima Tostes  
Coordenadora do PPGEE/UFPA

BELÉM  
2020

Com gratidão, dedico este trabalho a minha mãe, Sr<sup>a</sup>. Jaqueline Barros da Silva, e em memória meu Pai, Sr. Luiz Claudio Lobo da Silva. Sem eles nada seria possível.

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente a Deus que permitiu o surgimento desta e de outras oportunidades em minha vida, momentos de batalha, felicidade e sucesso que me conduziram até onde estou. Ele sempre será o maior mestre que alguém pode ter.

A Universidade Federal do Pará, ao seu corpo docente e administração que me conduziram o um fio condutor de oportunidades em um horizonte de vasto conhecimento técnico.

Agradeço também ao meu orientador Prof. Dr. João Paulo Abreu Vieira pela condução, correções e incentivos na produção e desenvolvimento desta pesquisa e também pelos seus momentos de atenção e paciência.

Agradecimentos aos colegas Jonathan Muñoz Tabora e Fernando Duarte Brito, pela ajuda na produção em trabalhos correlatos nas disciplinas de composição deste curso, bem como atenção e apoio em outros momentos.

Gratidão aos que participaram direta ou indiretamente de minha formação nestes anos de estudo, meus agradecimentos.

“O temor do Senhor é o princípio da sabedoria; bom entendimento tem todos os que cumprem os seus mandamentos; o seu louvor permanece para sempre.

(Salmos 111:10)

## RESUMO

Bancos de capacitores fixos são equipamentos tipicamente usados em indústrias para correção do fator de potência e/ou mitigação de subtensão nos seus circuitos de distribuição. No horário de carga pesada, banco de capacitores fixos exercem um papel importante na compensação de potência reativa de sistemas industriais. Por outro lado, no horário de carga leve, a injeção de potência reativa proveniente de bancos de capacitores pode causar sobretensão nos circuitos de distribuição da indústria. O problema da variação de tensão em uma instalação industrial pode afetar adversamente a vida útil de seus equipamentos. O uso combinado de bancos de capacitores fixos e chaveados é uma solução alternativa de mitigação do problema da variação de tensão em regime permanente em plantas industriais. Esta dissertação de mestrado propõe e investiga uma técnica para mitigar variações de tensão em regime permanente em circuitos de distribuição de baixa tensão de uma indústria cervejeira, localizada na cidade de Benevides-PA. O método proposto baseia-se na compensação de potência reativa fornecida por bancos de capacitores fixos e chaveados. Nos últimos anos, o problema da qualidade de tensão tem sido observado na indústria cervejeira mencionada acima, causando uma redução drástica na vida útil de seus equipamentos. Um conjunto de dados reais de medição da indústria cervejeira foi usado nas simulações de fluxo de carga de séries temporais, usando o software OpenDSS, para avaliar a técnica de mitigação proposta.

**Palavras-chave:** Sistemas industriais, indústria cervejeira, qualidade da tensão, subtensão, sobretensão, bancos de capacitores fixos, e banco de capacitores chaveados.

## ABSTRACT

Fixed capacitor banks are equipment commonly used in industrial plants to correct power factor and/or mitigate undervoltage in their distribution networks. At heavy load levels, capacitor banks play an important role for reactive power compensation in industrial plants. On the other hand, during light load levels, the reactive power injection from capacitor banks can cause overvoltage in distribution circuits of industrial plants. The voltage variation problem in an industrial plant can adversely affect the useful life of its equipment. The combined use of fixed and switched capacitor banks is an alternative solution for mitigating steady-state voltage variation problems in industrial plants. This master dissertation proposes and investigates a technique to mitigate steady-state voltage variations in low voltage distribution circuits of a beer plant, located in the city of Benevides, PA. The proposed method is based on the reactive power compensation supplied fixed and switched capacitor banks. In recent years, the voltage quality problem has been observed in the above-mentioned beer plant, causing a drastic reduction in the useful life of its equipment. A set of real measurement data from the beer plant site was used in time-series load flow simulations, using OpenDSS software, to evaluate the proposed mitigation technique.

**Keywords:** Industrial plant, beer plant, voltage quality, undervoltage, overvoltage, fixed capacitor banks, and switched capacitor banks.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 — Armazenamento da Cevada em Silos. ....	22
Figura 2 — Trituração e Lavagem de Grãos. ....	23
Figura 3 — Fermentação, maturação e filtragem. ....	24
Figura 4 — Envasamento. ....	25
Figura 5 — Tratamento de Água. ....	27
Figura 6 — Maltagem. ....	28
Figura 7 — Cevada. ....	30
Figura 8 — Capacitores Fixos. ....	36
Figura 9 — Capacitores Chaveados. ....	38
Figura 10 — Faixas de Tensão em Relação à de Referência. ....	42
Figura 11 — Triângulo de Potências. ....	44
Figura 12 — Associação de Etapas. ....	47
Figura 13 — Fluxograma do Método de Mitigação. ....	48
Figura 14 — Visão geral do Painel do <i>Software</i> . ....	49
Figura 15 — Aba de visualização da qualidade de tensão. ....	50
Figura 16 — Multimetro SENTRON PAC4200. ....	50
Figura 17 — Pontos de Medição no Sistema. ....	51
Figura 18 — Funcionamento OpenDSS. ....	52
Figura 19 — Etapas de Aquisição. ....	53
Figura 20 — Curva de Carga do Setor A. ....	54
Figura 21 — Curva de Carga de CCM-II. ....	54
Figura 22 — Diagrama Unifilar da Rede Estudada. ....	56
Figura 23 — Circuito de Controle Setor A. ....	57
Figura 24 — Queima CCM-II. ....	58
Figura 25 — Circuito de Controle CCM-II. ....	58
Figura 26 — Resposta Atual de Tensão do Setor A. ....	59
Figura 27 — Fator de Potência Atual do Setor A. ....	59
Figura 28 — Foco na infração ocorrida nos dias 03/09 e 04/09. ....	60
Figura 29 — Fator de Potência da infração ocorrida nos dias 03/09 e 04/09. ....	60
Figura 30 — Resposta Atual de Tensão do Setor CCM-II. ....	61
Figura 31 — Fator de Potência Atual do Setor CCM-II. ....	61
Figura 32 — Resposta atual da tensão nos terminais das cargas de outros setores. ....	62
Figura 33 — Fator de Potência de outros Setores. ....	62

Figura 34 — Resultado Em Tensão Setor A e CCM II Com 40% Da Carga. ....	63
Figura 35— Fator de Potência Setor A e CCM II Com 40% Da Carga. ....	64
Figura 36 — Resultado Em Tensão Demais Setores Com 40% Da Carga. ....	64
Figura 37 — Fator de Potência Demais Setores Com 40% Da Carga. ....	65
Figura 38 — Resultado Em Tensão Do Setor A e CCM II Com 30% Da Carga. ....	65
Figura 39 — Fator de Potência Do Setor A e CCM II Com 30% Da Carga. ....	66
Figura 40 — Resultado Em Tensão Demais Setores Com 30% Da Carga. ....	66
Figura 41 — Fator de Potência Demais Setores Com 30% Da Carga. ....	67
Figura 42 — Resultado Em Tensão Do Setor A e CCM II Com 20% Da Carga. ....	67
Figura 43 — Fator de Potência Do Setor A e CCM II Com 20% Da Carga. ....	68
Figura 44 — Resultado Em Tensão Demais Setores Com 20% Da Carga. ....	68
Figura 45 — Fator de Potência Demais Setores Com 20% Da Carga. ....	69
Figura 46 — Resposta Em Tensão Dos Setores A e CCM-II Após Modificação A 100% Da Carga. ....	70
Figura 47 — Fator de Potência Dos Setores A e CCM-II Após Modificação A 100% Da Carga. ....	70
Figura 48 — Resposta Em Tensão Demais Setores Após Modificação A 100% Da Carga. ....	71
Figura 49 — Fator de Potência Demais Setores Após Modificação A 100% Da Carga. ....	71
Figura 50 — Resposta Em Tensão Dos Setores A e CCM-II Após Modificação A 20% Da Carga. ....	72
Figura 51 — Fator de Potência Dos Setores A e CCM-II Após Modificação A 20% Da Carga. ....	72
Figura 52 — Resposta Em Tensão Dos Demais Setores Após Modificação A 20% Da Carga. ....	73
Figura 53 — Fator de Potência Dos Demais Setores Após Modificação A 20% Da Carga. ....	73

## LISTA DE TABELAS

Tabela I — Relação de Equipamentos por Custo de Reparo ou Troca.....	18
Tabela II — Material Obtido Após a Brassagem. ....	31
Tabela III — Tensão Nominal igual ou inferior a 1 kV. ....	39
Tabela IV — Tensão Nominal igual ou superior a 69 kV e inferior a 230 kV.....	40
Tabela V — Fator de potência indutivo e capacitivo. ....	45
Tabela VI — Relação Entre Seção Relativa e Fator de Potência.....	46
Tabela VII — Valores em kVAR utilizados para os bancos de capacitores fixos e chaveados.....	69

## LISTA DE SIGLAS

A/D	Analógico / Digital
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
CCM	Centro de Controle De Motores
CA	Corrente Alternada
CCD	Contrato de Conexão às Instalações de Distribuição
COM	<i>Component Object Model</i>
DIT	Demais Instalações de Transmissão
DLL	<i>Dynamic Link Library</i>
DRP	Duração Relativa da Transgressão de Tensão Precária
DRC	Duração Relativa da Transgressão de Tensão Crítica
DRPE	Duração Relativa da Transgressão de Tensão Precária Equivalente
DRCE	Duração Relativa da Transgressão de Tensão Crítica Equivalente
Dp	Medidor de Pressão Diferencial
fp	Fator de Potência
F	Medidor de Vazão
GD	Geração Distribuída
LDC	<i>Liquid Crystal Display</i>
L	Sensor de Nível
LS	Chave de Nível
MATLAB	<i>Matrix Laboratory</i>
MS	Microsoft
OpenDSS	<i>Open Distribution System Simulator</i>
PRODIST	Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema
PPM	Polipropileno Metalizado
P	Medidor de Pressão
Q <sub>pH</sub>	Medidor de Ph
Q <sub>O<sub>2</sub></sub>	Medidor de Oxigênio
Q <sub>TOC</sub>	Medidor de Carbono Orgânico Total
Q <sub>TU</sub>	Medidor de Turbidez
Q <sub>PO<sub>4</sub></sub>	Medição de Fosfato
Q <sub>NO<sub>3</sub></sub>	Medição de Nitrato

$Q_{\text{NH}_4}$	Medição de Amônio
$Q_{\text{SL}}$	Medidor de Sólidos Totais
RMS	<i>Root Mean Square</i>
SDAT	Sistema de Distribuição de Alta Tensão
SDMT	Sistema de Distribuição de Média Tensão
SIGFI	Sistemas Individuais de Geração de Energia Elétrica com Fontes Intermitentes
TC	Transformador de Corrente
TP	Transformador de Potencial
TR	Tensão de Referência
T	Sensor de Temperatura
UASB	<i>Upflow Anaerobic Sludge Blanket</i>
VBA	<i>Visual Basic for Applications</i>

## SUMÁRIO

LISTA DE ILUSTRAÇÕES .....	37
LISTA DE TABELAS .....	39
LISTA DE SIGLAS .....	40
1. Introdução.....	16
1.1 Contextualização do Problema .....	16
1.2 Motivação.....	17
1.3 Objetivos .....	18
1.4 Trabalho Aceito para Publicação.....	18
1.5 Organização da Dissertação .....	19
2. Indústrias Cervejeiras .....	20
2.1 Introdução.....	20
2.2 Componentes de uma Cervejaria.....	21
2.3 Processo de Fabricação da Cerveja .....	28
2.4 Problemas de Qualidade de Tensão em Indústrias Cervejeiras .....	33
3. Controle de Tensão e Compensação de Potência Reativa em Indústrias .....	34
3.1 Introdução.....	34
3.2 Componentes de Compensação de Potência Reativa Utilizados na Indústria.....	35
3.2.1 Banco de Capacitor Fixo.....	36
3.2.2 Banco de Capacitor Chaveado .....	37
3.3 Variação de Tensão segundo o Prodist .....	39
3.3.1 Tensão em regime permanente .....	39
3.3.2 Fator de potência.....	42
4. Estudo de Caso .....	Erro! Indicador não definido.
4.1 Metodologia .....	Erro! Indicador não definido.
4.2 Método de Mitigação Proposto .....	47
4.3 Monitoramento .....	48
4.4 Sentron PAC4200 .....	50
4.5 Medição .....	51
4.6 O <i>Software</i> OpenDSS .....	51
4.7 Aquisição de Dados .....	52

<b>4.8</b>	<b>Curvas de Carga</b> .....	<b>53</b>
<b>5.</b>	<b>Resultados</b> .....	<b>55</b>
<b>5.1</b>	<b>Introdução</b> .....	<b>55</b>
<b>5.2</b>	<b>Dados da Instalação Fabril</b> .....	<b>Erro! Indicador não definido.</b>
<b>5.3</b>	<b>Resultados de Simulação</b> .....	<b>59</b>
5.3.1	Sistema operando na situação atual com banco de capacitores fixos.....	59
5.3.2.	Sistema operando em carga leve com banco de capacitores fixos .....	63
5.3.3	Aplicação do Método de Mitigação.....	69
<b>6.</b>	<b>Conclusão</b> .....	<b>74</b>
<b>6.1</b>	<b>Considerações Finais</b> .....	<b>74</b>
<b>6.2</b>	<b>Trabalhos Futuros</b> .....	<b>75</b>
	<b>Referências</b> .....	<b>76</b>

## 1. INTRODUÇÃO

### 1.1 Contextualização do Problema

A maioria das cargas industriais consiste de motores de indução que operam com valores de fator de potência razoavelmente baixos [Natarajan, 2005]. Dependendo do patamar de carga, motores de indução são equipamentos que operam inerentemente com fator de potência baixo, que por sua vez pode prejudicar a operação técnica e econômica da indústria. O fator de potência desses motores varia entre 0,30 e 0,95, dependendo da capacidade do motor e de outras condições operacionais. Portanto, o fator de potência é uma preocupação constante para engenheiros de instalações elétricas industriais. O desempenho da indústria pode ser melhorado pela correção do fator de potência. Bancos de capacitores *shunt* podem ser instalados nos circuitos de distribuição para corrigir o fator de potência da indústria.

Bancos de capacitores *shunt* são equipamentos que reduzem a componente da corrente indutiva em uma instalação elétrica industrial. A redução da corrente de linha reduz quedas de tensão em patamares de carga pesada e o aumento da corrente de linha reduz elevações de tensão em patamares de carga leve, melhorando assim a regulação de tensão do sistema industrial. Em uma instalação elétrica industrial é necessário manter a tensão dentro do intervalo de 0,95 a 1,05 p.u, tendo em vista que sobretensões e subtensões de longa duração resultam em falhas e mau funcionamento de equipamentos, principalmente em equipamentos sensíveis. Portanto, manter a tensão em níveis aceitáveis é um objetivo importante para garantir a continuidade dos processos produtivos e evitar custos de manutenção e troca de equipamentos da indústria.

Bancos de capacitores aplicados em sistemas industriais podem ser fixos ou chaveados a depender das condições de carga. As seguintes diretrizes são geralmente adotadas na indústria: 1) uso de banco de capacitores fixos para uma condição de carga mínima; 2) uso de banco de capacitores chaveados para patamares de carga acima da carga mínima até a carga máxima. Cabe frisar que bancos de capacitores podem causar sobretensões em patamares de carga mínima, causando aumento de perdas e danos aos equipamentos.

Bancos de capacitores chaveados fornecem flexibilidade adicional ao controle de tensão, correção de fator de potência e redução de perdas. Portanto, bancos de capacitores chaveados são frequentemente empregados para evitar tanto subtensões em condições de carga pesada quanto sobretensões em condições de carga leve. Entretanto, a aplicação combinada de bancos de capacitores fixos e chaveados é mais difícil [Short, 2004]. A combinação de banco de capacitores fixos e chaveados resulta em um problema de coordenação de suporte de potência reativa. A aplicação de banco de capacitores chaveados pode causar problemas de sobretensão transitória e ressonância harmônica em industriais [Dugan, et al, 2004]. O foco da presente dissertação de mestrado é o problema da variação de tensão em regime permanente em uma indústria cervejeira.

## **1.2 Motivação**

Essa dissertação de mestrado foi motivada pelo número significativo de ocorrências de falhas, danos e trocas de equipamentos de uma indústria cervejeira, localizada na cidade de Benevides-PA, no ano de 2019. Engenheiros e técnicos da indústria cervejeira mencionada demonstraram suas preocupações com o efeito da variação de tensão de longa duração na vida útil dos equipamentos da instalação. Uma das preocupações foi a necessidade melhoria da regulação de tensão nos circuitos de distribuição de baixa tensão da indústria por meio da compensação de potência reativa fornecida por bancos de capacitores fixos e chaveados.

A tabela 1 mostra o número de equipamentos danificados e o custo pelo reparo ou troca dos equipamentos da fábrica de cerveja, referentes ao ano de 2019. Observa-se que 92 motores apresentaram algum tipo de dano, o que representou um número significativo de trocas e reparos. Estes motores sofreram troca completa de bobina, processo conhecido como rebobinagem, que resultou em um custo aproximado de R\$ 311.396,00. Nota-se também que 15 inversores de frequência e 05 controladores lógicos programáveis também tiveram que passar por reparos e/ou trocas, que resultaram por sua vez num prejuízo financeiro de R\$ 131.618,00. O custo total associado a reparos e/ou trocas de equipamentos foi de R\$ 443.014,00 para a fábrica de cerveja no ano de 2019. Cabe frisar que não houve, por parte de engenheiros e técnicos da indústria de cerveja, uma análise da relação causa-efeito para determinar os problemas de qualidade da energia que provocaram os danos

verificados. Não obstante, sabe-se que tais equipamentos, quando submetidos a sub ou sobretensões de longa duração, podem ter a sua vida útil reduzida.

Tabela I — Relação de Equipamentos por Custo de Reparo ou Troca

Equipamentos	Número de equipamentos com alguma avaria	Custo por Troca/Reparo
Motores Danificados (Rebobinagem)	92	R\$ 311.396,00
Inversores de Frequência	15	R\$ 131.618,00
Controladores Lógicos Programáveis	5	

Fonte: [Heineken, 2019]

### 1.3 Objetivos

Este trabalho propõe investigar compensação reativa para mitigar variações de tensão que explora bancos de capacitores fixos e chaveados para variações de tensão em regime permanente nos circuitos de distribuição de baixa tensão de uma indústria cervejeira, localizada em Benevides-PA. A técnica proposta é basicamente uma solução de software e controle, não exige hardware adicional e, portanto, representa uma solução de baixo custo. Dados de medição de potências ativa e reativa das cargas, obtidos por meio de qualímetros instalados nas instalações elétricas da indústria cervejeira, foram usados nas simulações de fluxo de carga de séries temporais via software OpenDSS.

### 1.4 Trabalho Aceito para Publicação

L. C. L. S. Júnior, F. D. Brito, J. P. A. Vieira. Mitigation of Voltage Variations In a Brewery Plant Using Fixed and Switched Capacitor Banks. XIII Latin-American Congress on Electricity Generation and Transmission, 2019.

## **1.5 Organização da Dissertação**

Esta dissertação de mestrado está estruturada da seguinte forma:

O capítulo 2 apresenta os componentes e processos de fabricação utilizados na produção da cerveja, bem como sua relação com a qualidade de tensão. O capítulo 3 descreve os conceitos básicos e técnicas de controle de tensão e compensação de potência reativa para mitigação de variações de tensão. O capítulo 4 apresenta a metodologia proposta de mitigação de variações de tensão. Os resultados de simulação dos estudos de caso são apresentados no capítulo 5. Por fim, as principais conclusões do trabalho e os trabalhos futuros são apresentados no capítulo 6.

## 2. INDÚSTRIAS CERVEJEIRAS

### 2.1 Introdução

A cerveja é uns dos bens de consumo mais apreciados no mercado mundial, sua produção é composta pela soma de variados ingredientes conduzidos em processos químicos independentes que constroem as características do produto final. A princípio quatro ingredientes básicos devem conduzir à fabricação ideal da cerveja, água, malte, levedura e o lúpulo. Estes dois últimos são processos conduzidos por fatores externos, o primeiro se dá pela fermentação natural feita por fungos, é um processo milenar pelo qual microrganismos, com capacidade de produção de álcool, consomem açúcares para sintetizar etanol e dióxido de carbono. Já o segundo, de maneira básica, se dá na incorporação de um tipo de flor do gênero *Humulus*, chamada *Humulus lupulus*, onde é responsável pelo amargor característico da cerveja.

Durante todos os estágios de produção da cerveja alguns cuidados devem ser tomados, eles dizem respeito a qualidade do produto final e são dependentes de variáveis naturais como a humidade, temperatura e pressão. O Malte no processo chamado maltagem é separado por grãos de tamanho e grau nutricional ideais neste processo em que grãos são umidificados para germinação controlada da cevada. O Lúpulo, teve seu primeiro registro de adesão como agregador de sabor em 736 d.C. (SENAI, 2014), sua importância para cerveja pode ser resumida na fusão de amargor e aroma, em seu processo de produção a armazenagem, transporte e processamento são fatores essenciais ao impacto no sabor final da cerveja, por quanto não pode ser submetido ao oxigênio ou a baixas temperaturas durante essas etapas.

Ainda se pode citar, dentre outras determinações, o cuidado com a água utilizada na produção, visto que sua qualidade também influencia no sabor final e por isso é fator determinante na produção industrial. Em face destes critérios de produção, bem como em razão dos detalhes intrínsecos envolvidos na fabricação industrial da cerveja citados a seguir, é então, que se pode compreender a importância de uma planta industrial capacitada a atender uma produção em escala de forma diligente, os equipamentos, equipe técnica especializada e principalmente a tensão em regime permanente devem conceder segurança as etapas de manufatura de produção.

## 2.2 Componentes de uma Cervejaria

Atualmente o maquinário envolvido na produção de bebidas alcoólicas é delineado por alguns fabricantes que mostram dominância neste setor industrial. Neste subtópico são mostrados os processos fabris e os instrumentos essenciais as etapas de fabricação, por quanto que no tópico seguinte é tratado o processo de fabricação da cerveja e sua qualidade. O sensoriamento e a automatização da produção são destaques neste perfil de planta industrial, que naturalmente pode ser composta pelas etapas de armazenamento, trituração e lavagem de grãos, fermentação, maturação, filtragem e envasamento.

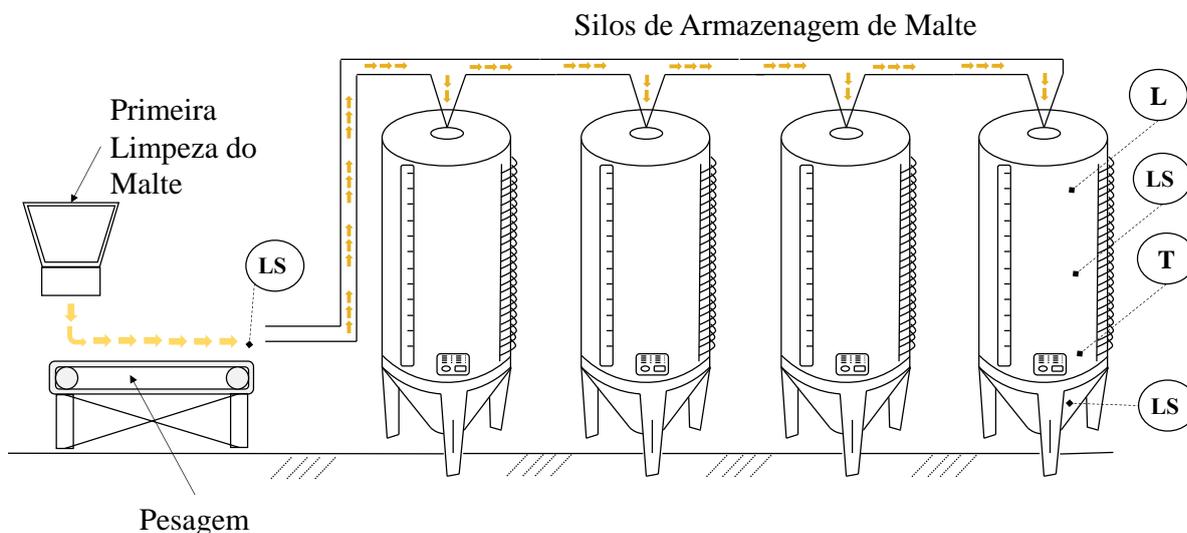
O tratamento de água também pode ocupar espaço junto as outras etapas de produção, a água deve possuir especificação química adequada para poder ser inclusa na mistura com outras substancias utilizadas durante o processo, é então que as indústrias deste ramo entendem a fazer seu próprio tratamento requerido, certificando-se da salinidade, pH, sais minerais, gases e dentre outras substancias nela inclusos. Por outro lado, a água também passa por etapas de solvência e limpeza nos estágios de fabricação, gerando o lodo, pelo o qual não pode ser depositado diretamente aos afluentes próximos, sendo direcionado a um composto de tratamentos hídricos essenciais a retirada de detritos e separação da água, que então pode ser descartada ou reutilizada, agora totalmente purificada.

### a) Armazenamento

A armazenagem do malte é feita através de silos que ajudam no manejo dos grãos utilizados nas outras etapas da produção da cerveja. Nesta, assim como nas outras etapas, se optou pela generalização do maquinário necessário, em função da grande possibilidade estrutural de transporte e armazenagem disponível as empresas atualmente. A Figura 1 mostra o armazenamento do malte em silos, sua pesagem e monitoração, esta é configuração possível e tende a sofrer pouca variação de uma fábrica para outra.

O malte utilizado aqui é produto da germinação controlada dos grãos da cevada, eles são umidificados e secados a ponto de produzirem enzimas essenciais à produção da cerveja, mas também fazem parte da cadeia produtiva de outras bebidas alcoólicas e alimentos, o malte pode ser definido como produto da germinação controlada de qualquer cereal utilizado como insumo de uma bebida fermentada.

Figura 1 — Armazenamento da Cevada em Silos.



Fonte: Adaptado de ENDRESS HAUSER, 2016.

Na figura acima se têm a ilustração de armazenamento do malte e dos silos verticais utilizados, inicialmente, por efeito de checagem, ele é pesado e peneirado à medida que é transportado por esteiras com pás até o despejo na entrada superior dos silos. A partir daqui são monitorados por sistemas de sensoriamento ideal para granulados e cereais, composto por dois sensores de tipo chave de nível (LS), na parte superior e inferior do silo, também possui sensor de nível (L) e temperatura (T).

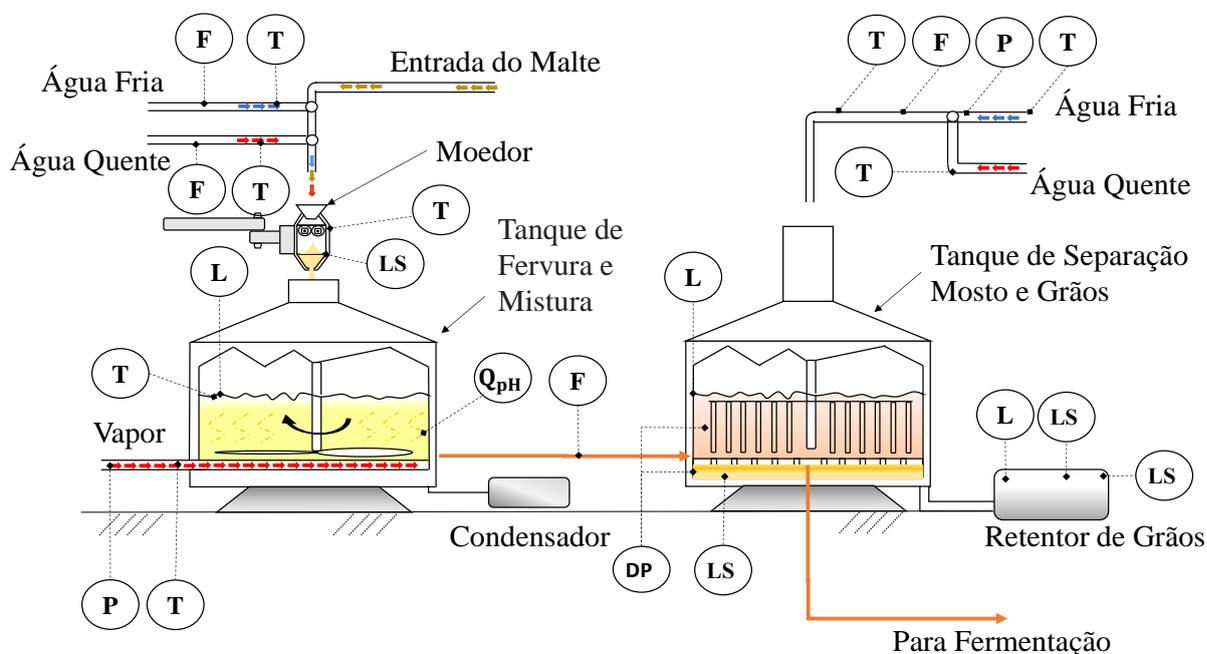
Vale citar que nesta etapa, bem como nas outras, o sistema elétrico é sempre composto por sistemas em comum de iluminação, força, comandos elétricos e refrigeração do ambiente. Estes sistemas variam de acordo com a área medida de cada setor, podendo representar grande impacto na variação de tensão e corrente quando acionados totalmente, sendo assim representados por grandes blocos de carga. Por outro lado, podem representar pouco impacto em setores da fábrica com baixa potência ou de baixíssima intermitência, como são os setores administrativos, pelo quais tendem a permanecer ligados por longos períodos de dias ou semanas.

#### b) Trituração e lavagem de grãos

Nesta etapa a trituração dos grãos é seguida de uma lavagem e fervura iniciais, o malte vindo do armazenamento é agora moído com antecedente banho térmico feito tela banho de água fria e quente, este estágio é monitorado por sensores de fluxo (F) e temperatura (T), esta ação proporciona a eliminação inicial de microrganismos

presos aos grãos. Este processo segue direto ao tanque de fervura e mistura, nele este material é constantemente movimentado e aquecido por um trocador de calor baixo do tanque. Esta ação pode ser visualizada na Figura 2.

Figura 2 — Trituração e Lavagem de Grãos.



Fonte: Adaptado de ENDRESS HAUSER, 2016.

No moedor, a temperatura e a passagem da matéria triturada são acompanhadas por sensores até que este material seja despejado abaixo, onde passa a ser monitorado por sensores de temperatura do líquido, nível (L) e pH ( $Q_{pH}$ ). Abaixo, se tem um trocador de calor que também é monitorado em sua pressão (P) e temperatura, este tem a função de manter aquecido o conteúdo do líquido à medida que este também é misturado. O vapor que condensa é direcionado a um condensador anexo ao tanque por uma canaleta onde é depositado.

Ainda na Figura 2, ao lado direito, o tanque de separação de mosto e grãos recebe o conteúdo do tanque anterior através de uma canaleta em que o fluxo de líquido é monitorado. O objetivo deste segundo recipiente é separar o líquido viscoso produzido anteriormente do restante do malte moído, o nome que é dado a este fluido é Mosto. O processo de separação é conduzido por um banho constante de água morna sobre o material vindo do tanque anterior, o material sólido que não será aproveitado passa ao Retentor de Grãos enquanto que o mosto segue para próxima etapa de produção.

No segundo tanque a água ainda tem objetivo de purificação, mais é secundário, seu real objetivo é a decantação forçada e circulação dos detritos até que sejam separados do mosto, tanto temperatura da água, fria e quente, quanto sua pressão e seu fluxo são cuidadosamente controlados antes da entrada no tanque.

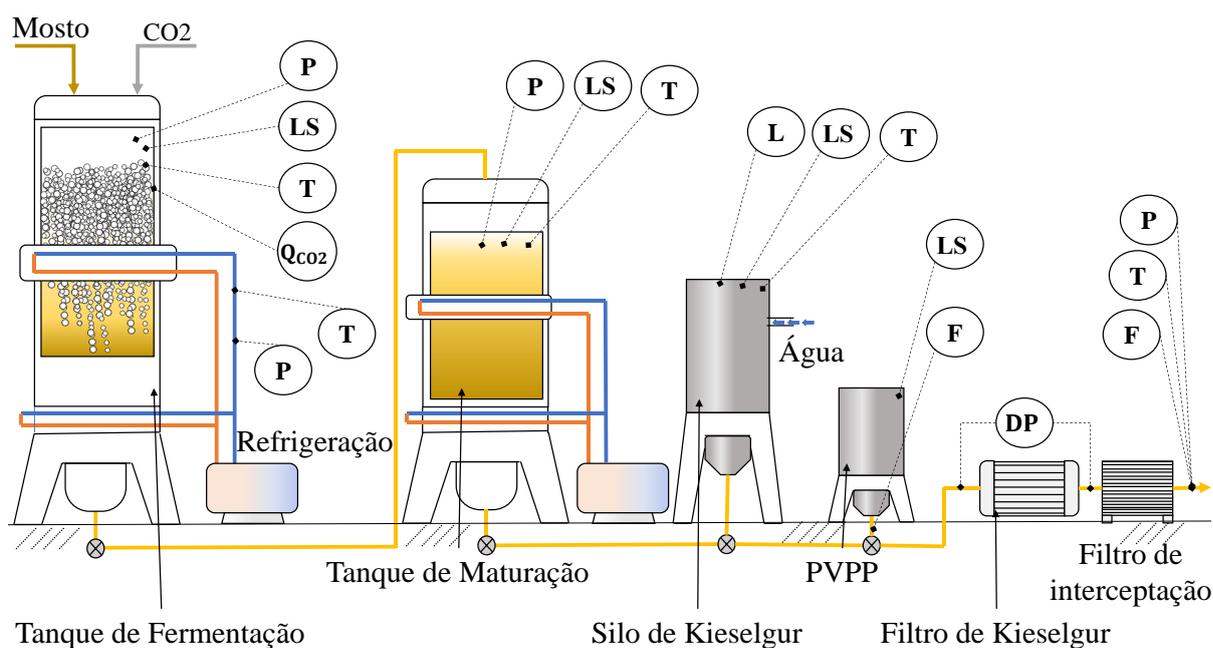
O processo de separação existe a partir de princípio da diferença de pressão de duas regiões, enquanto uma destina-se a manutenção do mosto a outra objetiva-se a retirada do restante de malte moído, este processo é monitorado por um sensor de diferença de pressão (DP). O tanque e o retentor de grãos ainda contam com sensores de nível (L) e chaves de nível (LS).

### c) Fermentação, maturação e filtragem

Esta é a segunda etapa com mais predominância na utilização de sistemas eletrônicos de controle e motores bomba, a fermentação e maturação são precisamente controladas por sistemas de refrigeração ininterruptos, em que pressão e temperatura passam por sensoriamento.

Na Figura 3, o primeiro tanque recebe  $\text{CO}_2$  e o mosto vindo da etapa anterior, ele é depositado durante certo período para que sofra fermentação controlada, para tal, pressão, temperatura, nível e quantidade de dióxido de carbono ( $Q_{\text{CO}_2}$ ) são monitorados até que a fermentação se conclua.

Figura 3 — Fermentação, maturação e filtragem.



Fonte: Adaptado de ENDRESS HAUSER, 2016.

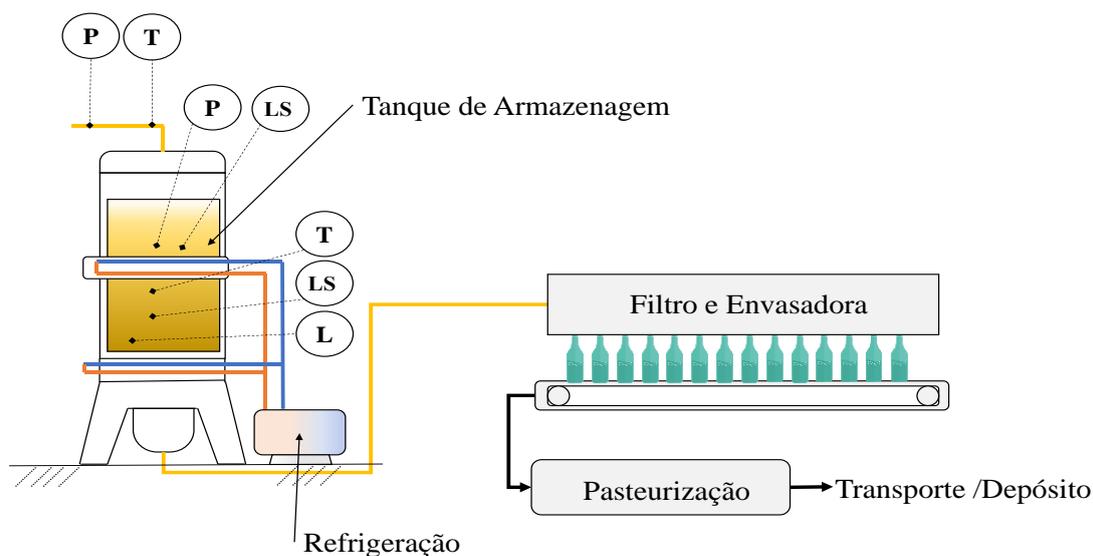
O segundo reservatório é o tanque da maturação, são monitorados pressão e nível enquanto que a temperatura também é equilibrada e novamente mantida por um sistema de refrigeração semelhante ao primeiro. Vale ressaltar que esta etapa é totalmente pressurizada, isto possibilita o melhor manejo do mosto entre os tanques e encanamento hidráulico.

Após o período de maturação necessário o mosto segue pressurizado até que receba aditivos vindos dos silos de Kieselgur e polivinilpolipirrolidona (PVPP), o primeiro é monitorado por sensores de nível e temperatura, enquanto que no segundo fluxo e nível são verificados. Por fim, o mosto passa primeiramente pelo filtro de Kieselgur, pelo qual se monitora pressão diferencial da entrada e saída, e em seguida passa pelo filtro de interceptação, após isso, antes de ser encaminhado a próxima etapa, são verificados pressão, temperatura e fluxo do líquido.

#### d) Envasamento

O preenchimento de qualquer líquido em um recipiente de forma seletiva e controlada é chamado de envasamento, na planta industrial de produção de cerveja esta etapa é fundamental e é a que mais possui motores e cargas de alto perfil de consumo. A Figura 4 mostra esta etapa, nela há um tanque de armazenamento refrigerado com a cerveja que será conduzida a um último filtro e ao envasamento, ao fim, as garrafas passam pelo bloco de pasteurização até serem encaminhadas ao transporte ou depósito.

Figura 4 — Envasamento.



Fonte: Adaptado de ENDRESS HAUSER, 2016.

O tanque de armazenagem é abastecido pela cerveja já filtrada vinda da etapa anterior, em razão da possibilidade de variação de pressão da tubulação a cerveja é novamente monitorada antes de entrar no tanque. Já dentro do recipiente a pressão, nível e temperatura são verificados antes de encaminhar a cerveja ao envasamento.

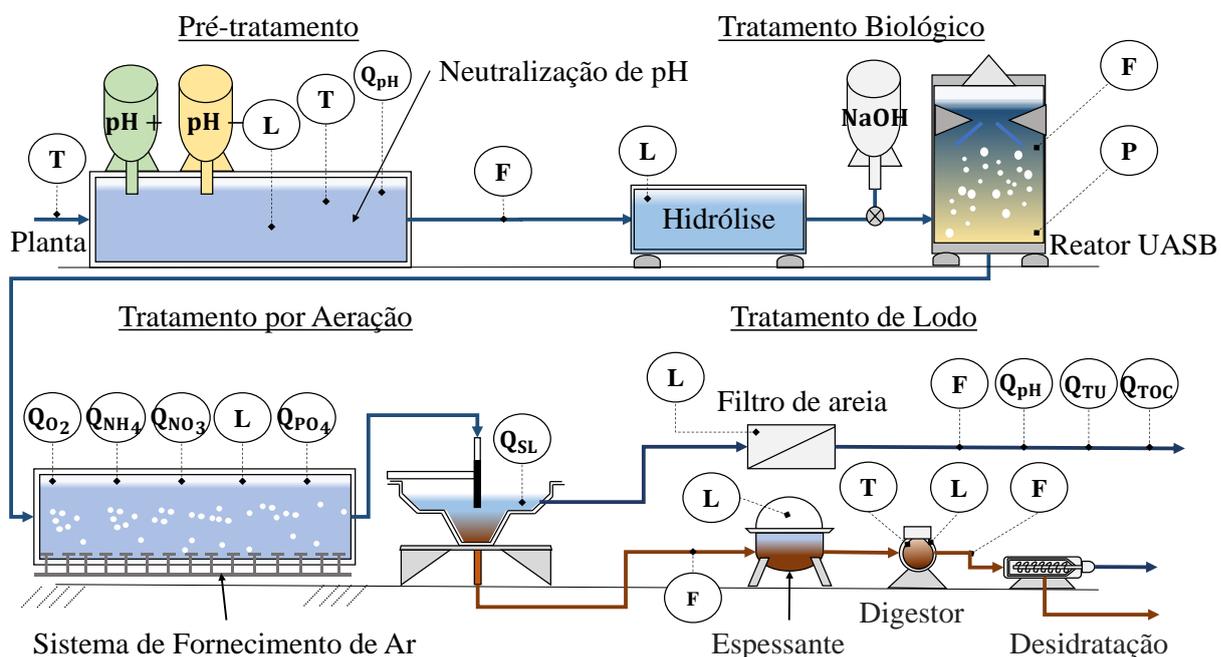
No envasamento a cerveja passa por uma última filtragem e então é envasada em garrafas, latas ou outros recipientes desenvolvidos originalmente em cada empresa. Este processo todo é enormemente envolvido por sensores, motores e eletrônica digital, ao fim, a cerveja, já envasada, passa por pasteurização para destruir microrganismos e patógenos que possam estar presente nos recipientes ou que mesmo tenham resistido aos outros controles biológicos.

#### e) Tratamento de água

O tratamento da água se inicia pela neutralização do pH, chamado de pré-tratamento, neste ponto a água entra em um tanque onde é feito um controle químico inicial, este processo tem início com a verificação da temperatura da água antes de sua entrada, já em seu interior do tanque, são monitorados o nível, pH e novamente a temperatura.

Na sequência o tratamento biológico se inicia com um tanque onde é feita a hidrólise, onde apenas o nível é verificado e antes dele o fluxo de água na entrada, após isto o líquido segue pela encanação e recebe hidróxido de sódio antes que entre no reator de tratamento UASB (sigla em inglês para manta anaeróbica de lodo ascendente), nele é realizada a separação de material orgânico em gases, sólidos e líquidos através de um processo anaeróbio com alta eficiência para o tratamento de efluentes, ao fim o reator devolve a atmosfera o biogás enquanto que a água segue para próxima etapa de tratamento. Isto pode ser visto na Figura 5.

Figura 5 — Tratamento de Água.



Fonte: Adaptado de ENDRESS HAUSER, 2016.

O tratamento por aeração recebe o efluente vindo do reator UASB e o deposita em um tanque para que seja aerado, este processo tem função de reintroduzir na água elementos que foram perdidos durante as etapas de fabricação, são repostos o oxigênio ( $O_2$ ), amônio ( $NH_4^-$ ), nitrato ( $NO_3$ ) e fosfato ( $PO_4$ ). Todas as substâncias que participam deste tratamento são monitoradas por sensores anexos ao tanque, além destes, o nível de líquido interno também é verificado. Na sequência o afluente é depositado em um tanque de decantação, onde um medidor de sólidos totais ( $Q_{SL}$ ) é disposto em seu interior.

Ao fim, o tratamento de lodo recebe a água de duas maneiras, na primeira, apenas a água da superfície do tanque de decantação é reintroduzida à natureza, apenas passando por um filtro de areia, nesta maneira o líquido passa por medidores de nível, fluxo, pH, turbidez ( $Q_{TU}$ ) e carbono orgânico total ( $Q_{TOC}$ ). Já o lodo, retirado na parte inferior do tanque, é direcionado ao espessante, que é responsável por diminuir a viscosidade do líquido, na sequência o lodo vai ao digestor que retira do efluente biogás e o encaminha à desidratação, neste ponto sólido e líquido são totalmente separados, ao passo que o primeiro pode ser diretamente descartado ao meio natural, já o segundo pode ser reaproveitado, ou também descartado. Durante esta etapa do tratamento de lodo são monitorados o nível, temperatura e o fluxo.

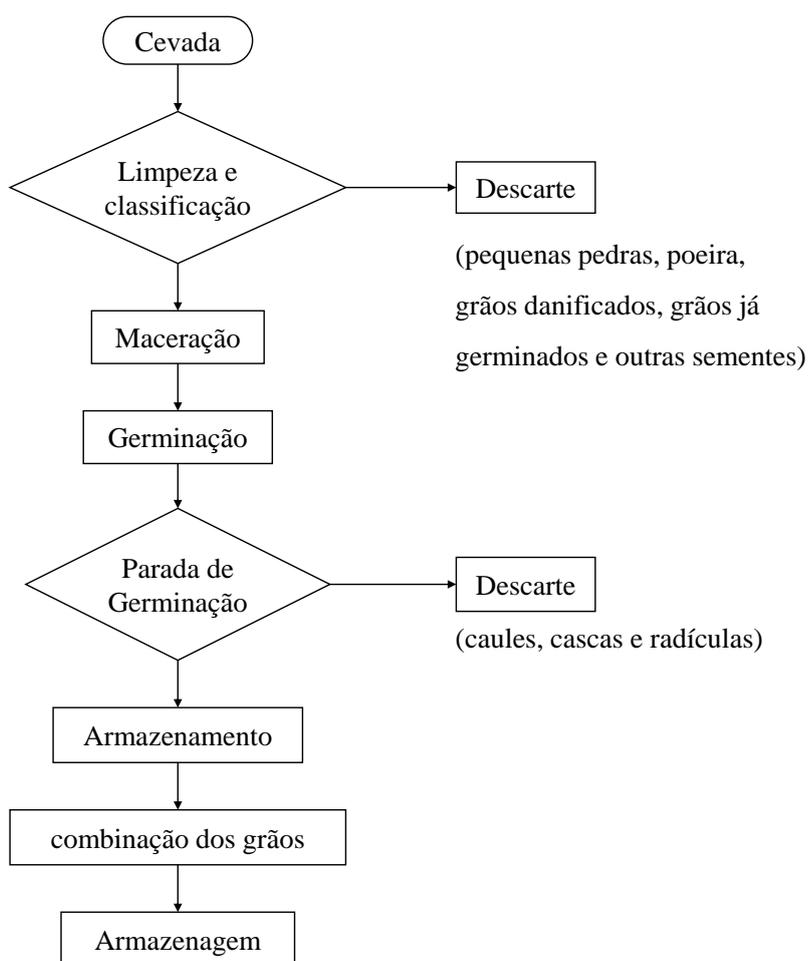
## 2.3 Processo de Fabricação da Cerveja

Neste subtópico são tratados os detalhes da fabricação da cerveja e seus processos de beneficiamento, o foco é dado ao detalhamento da maltagem, moagem, brasagem, fermentação, maturação e carbonatação.

### a) Maltagem

Esta etapa se inicia com a limpeza e classificação, nela a cevada é separada de pequenas pedras, poeira, grãos danificados, grãos já germinados e outras sementes de diferentes espécies de plantas, e também são classificados segundo seu tamanho para que possam germinar de maneira uniforme, e assim beneficiando o malte. Aqui se elimina grãos menores que 2,2 mm, este processo também pode ser feito antes do armazenamento. A Figura 6 mostra as etapas de processos em que a cevada passa até a maltagem e armazenagem.

Figura 6 — Maltagem.



Fonte: Adaptado de SENAI, 2014.

O fluxo se inicia a medida em que o grão é macerado, este processo acontece para que se humedeça a cevada a ponto que absorva cerca de 12% a 45% de umidade de forma palatina, a maceração induz a germinação controlada pelo grão de umidade induzido, após isto, ela é parada com a retirada da umidade excedente, este processo é chamado de secagem. Após isto são retirados possíveis caules, cascas e retículas que tenham se formado, e então se inicia a combinação dos grãos em lotes subdivididos por seu tamanho, isto serve para homogeneizar a produção futura ou comercialização.

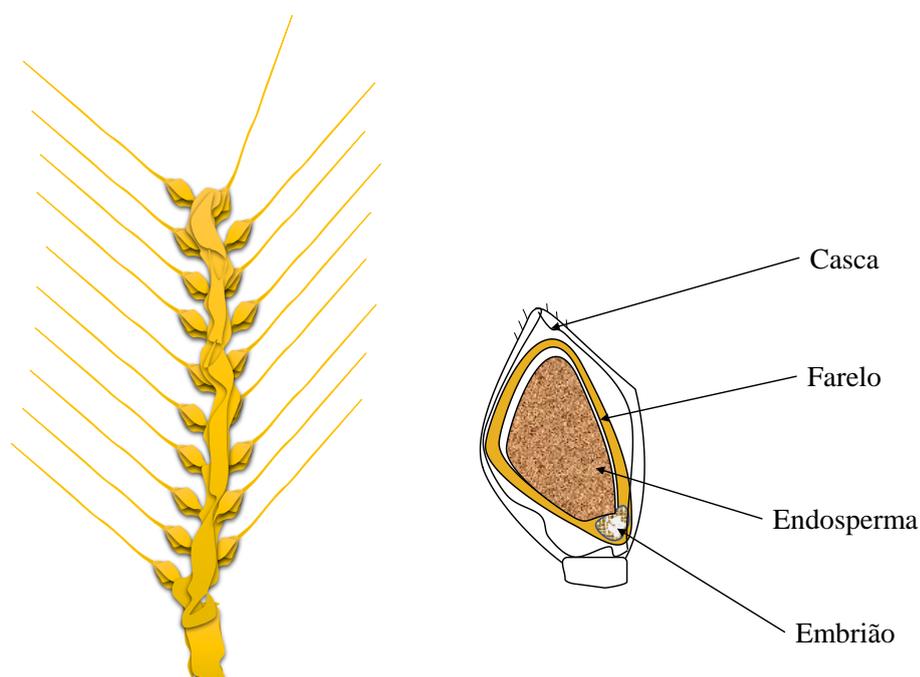
A maceração possui alguns outros objetivos secundários além da humidificação da cevada, eles dizem respeito a propriedade da água na limpeza de impurezas inconsistentes a qualquer produção de bens de consumo, isto se dá inicialmente com a entrada de água até que estas impurezas sejam suspensas a ponto de serem descartas com maior facilidade por estarem na superfície da água, chegado neste ponto, a maceração também contribui ao próximo objetivo que é o de fornecer oxigênio ao embrião adormecido no interior da semente.

Uma característica peculiar desta produção é a parada da germinação que, como dito antes, é feita por secagem do teor de umidade excedente da etapa anterior, pelo qual não pode ser retirado totalmente e, em razão disto, os grãos permanecem com certo grau de atividade germinativa. Por outro lado, caso haja muita umidade inclusa antes da elevação da temperatura, o fenômeno da cristalização de grãos pode ocorrer, culminando na perda total deste material.

#### b) Moagem

A moagem é a primeira etapa da produção da cerveja em que a forma física da cevada sofre mudanças significativas, seu objetivo é romper a casca externa do grão separando-a de seu endosperma. Em uma moagem ideal a casca é totalmente separada do endosperma, e este é triturado até que forme pequenas fragmentações antes que vire pó. Não é ideal que haja grandes concentrações de pó após a moagem, por quanto que estes contribuem negativamente a filtragem posterior, já a casca, se indica que seja pouco triturada, a passo que sua manutenção facilita sua remoção de junto do mosto. A Figura 7 ajuda na identificação deste conceito.

Figura 7 — Cevada.



Fonte: Produção do Próprio Autor.

Os moinhos são objetos de especificações detalhada, sua função é dedicada a moagem precisa e constante, são projetados em específico para cada tamanho de grão, pouca variação destes é suficiente para promover perda de malte após não ser moído precisamente. Em razão disto há grande esforço para limpeza e separação adequada do malte na etapa anterior, malhas vibratórias, limpeza por corrente de ar e limpezas magnéticas são os mais utilizados para esta finalidade. O farelo e o embrião contribuem pouco ao produto final, sua permanência junto ao endosperma triturado pouco interfere no sabor e aromas finais da cerveja.

### c) Brassagem

A brassagem é o processo de capitação do mosto a partir do composto de água e malte. A água representa cerca de 85% do mosto, o malte compõe a porcentagem restante com substâncias que são dissolvidas na água. Ainda na brassagem, lâminas de agitação são essenciais e devem introduzir a menor quantidade de oxigênio possível, homogeneizar a mistura a ponto da variação de temperatura ser a mínima possível, evitando pontos de baixa ou alta temperatura na extensão da superfície da mistura assim como em seu volume interno. Neste ponto o mosto ainda não foi filtrado, possuindo substâncias fermentáveis, não-fermentáveis, restos do grão e outras substâncias decantadas chamadas de *trub*. Esta relação pode ser vista na Tabela II.

Tabela II — Material Obtido Após a Brassagem.

Material Obtido	Porcentagem Aproximada
Substâncias Fermentáveis	50%
Substâncias Não-Fermentáveis	25%
Restos Do Grão	20%
Substâncias Decantadas	5%

Fonte: Adaptado de SENAI, 2014.

As substâncias fermentais são aquelas em que a levedura irá atuar levando a fermentação deste substrato. Já as não fermentais são açúcares, proteínas, substâncias inorgânicas e compostos que dão sabor e cor. A filtragem de qualquer líquido tem sempre o mesmo objetivo, o de reduzir ou retirar partículas que não sejam desejadas em sua constituição. Neste caso a boa filtragem irá atuar sobre os restos de grãos e deve conduzir o mosto a um estado mais límpido, além necessariamente possuir alta disposição de retenção aliada a grande eficiência na passagem do mosto.

Assim que o mosto, agora filtrado, sai da brassagem é direcionado a processo de fervura, que tem por objetivo efervescer o mosto durante um certo tempo e, também, é nesta etapa em que o lúpulo é anexado no processo de fabricação. O motivo da fervura é retirar por destilação substâncias voláteis não requeridas que estão anexas ao mosto, além de esterilização para destruição de microrganismos, integração química do lúpulo ao mosto, formação de substâncias não desejadas ao fundo do recipiente chamada de *trub*, diminuição do pH, indução de cor ao mosto e evaporação da água.

O resfriamento vem logo depois, ele é responsável por reduzir a temperatura de 95°C para entre 8°C a 20°C, isto serve para que a levedura se reproduza e leve o mosto a fermentação, vale citar que todo este decaimento deve ser rápido durando ao máximo 100 minutos para que sejam mantidos sabor, cor e aroma bem como para não eliminar a levedura. O resfriamento é extremamente custoso em relação ao gasto de energia envolvido, a fervura é gradual e leva tantas horas quanto forem indicadas pelo sensoriamento, entretanto, o resfriamento deve ser rápido e gradual, levando a indústria a possuir um sistema de resfriamento formidável e suficiente para fazer isto.

#### d) Fermentação

Na fermentação a levedura já está em contato com mosto e conduz a fermentação, esta etapa é a mais longa que as outras, durando vários dias em um imbróglgio de manejo até que se tenha o sabor e aroma desejado da cerveja. A levedura tem grande impacto caso, por algum motivo, tenha que ser trocada durante a fermentação, seu sabor e aroma não serão mais desejados pelo produtor ao final da fermentação.

#### e) Maturação

A maturação acontece próximo ao final da fabricação, ela serve para estabilizar o mosto, clarificar, maturar aromas, suavizar o sabor e certificar a classificação da cerveja. É realiza a frio com temperatura entre 0°C a 5°C, mais uma vez é posta em tanques em que a maioria da levedura e outra partículas, em sua maioria proteínas, são precipitada e são removidas, neste ponto também é controlada a quantidade de espuma para cada especificação desejada. A turbidez é um fator a se preocupar, partículas suspensas na cerveja representam ineficiência as outra etapas anteriores, como por exemplo a entrada de oxigênio na brasagem e/ou moagem, falha no sistema de filtragem e fervura com tempo além do previsto.

#### f) Carbonatação

Esta é a última etapa antes da distribuição, a carbonatação serve par equilibrar os teores de CO<sub>2</sub> já presentes na cerveja após a fermentação, é um processo que dissolve dióxido de carbono diretamente nos tanque ou nos recipientes no envasamento, seu intuito é de potencializar as propriedades organolépticas da cerveja, promovendo efervescência de sabor e textura mais agradáveis ao consumo.

Sistemas de controle de pressão são extremamente indicados e tendem a ser mais precisos nesta etapa, o dióxido de carbono precisa ser constantemente verificado e controlado, seu teor é diretamente proporcional a qualidade do produto final que, após passar por todos os processos de produção, pode ser perdido a partir da má gestão de CO<sub>2</sub>.

## **2.4 Problemas de Qualidade de Tensão em Indústrias Cervejeiras**

Os problemas de qualidade de tensão são fatores determinantes para produção industrial deste ramo alimentício. Vale citar que não somente a variação de tensão proporciona cenários de incertezas produtivas, a corrente pode indiretamente fazer este papel, uma vez que ela pode provocar subtensões através de operação de entrada de cargas de alto consumo ou blocos de setores com variados equipamentos que somados produzem o mesmo efeito nocivo. Ao final, isto representa perda potencial dos insumos presentes nas etapas de produção que, por parada inesperada ou mal funcionamento, são inesperadamente conduzidos a um estado potencial de descarte.

Atualmente todas industriais de produção de cerveja contam com sistemas direcionais de controle ou mitigação dos impactos da variação de tensão sobre seus equipamentos administrativos e maquinários de produção. Sistemas por controle de fator de potência são bem utilizados neste meio, mais também são utilizados sistemas por controle de tensão e corrente. Dizem respeito ao controle relativo a patamares permissíveis e não-permissíveis de atuação de uma dada forma de compensação para mitigação da variação de tensão.

Não obstante, a indústria cervejeira é caracterizada, como pôde ser visto anteriormente, por etapas de produção bastante variadas entre si. Elas possuem níveis de complexidade alto, sistemas específicos e técnicas bem restritivas de manejo de insumos. Isto pode denotar uma matriz produtiva complexa para a manutenção eletromecânica, em que se faz necessariamente determinada a presença de apoio técnico especializado para gerir os equipamentos de controle de tensão, mesmo com sistemas automatizados de apoio a entrada direta.

### **3. CONTROLE DE TENSÃO E COMPENSAÇÃO DE POTÊNCIA REATIVA EM INDÚSTRIAS**

#### **3.1 Introdução**

A qualidade de tensão tem várias definições para descrever o mesmo conjunto de fenômenos que afetam a amplitude e a forma de onda da tensão e corrente. Uma definição possível seria quanto a frequência e a severidade dos desvios na amplitude e forma de onda da tensão e da corrente. Outra definição diz respeito a qualquer problema na tensão, na corrente ou desvio na frequência que resulte em falha ou prejudique a operação dos equipamentos. Já uma terceira afirma que um sistema elétrico com excelente qualidade da energia elétrica é caracterizado pelo fornecimento de tensão com forma de onda senoidal pura, sem alterações em amplitude e frequência, como se emanasse de uma fonte de potência infinita.

Segundo visto em (ANEEL, 2018) de maneira mais ampla e a partir da ótica do consumo, a qualidade da tensão identificada pelo consumidor deve ser aferida a partir da conjectura de três vertentes importantes:

- g) A qualidade de fornecimento energia elétrica ou qualidade do produto, esta vertente está ligada a conformidade de perfil tensão em regime permanente e às perturbações na forma de onda de tensão. Define a terminologia, caracteriza os fenômenos e estabelece os parâmetros e valores de referência;
- h) A capacidade de qualidade do serviço da concessionária, compreende a avaliação das interrupções no fornecimento de energia elétrica, bem como seu restabelecimento;
- i) Disposições transitórias, trata do estudo dos indicadores de qualidade do produto da energia elétrica.

Vale salientar que a mesma normativa, indica que finalidade da qualidade da tensão está em procedimentos aplicados em uma gama de pontos do setor elétrico, são eles os consumidores com instalações conectadas em qualquer classe de tensão de distribuição, produtores de energia, distribuidoras, agentes importadores ou exportadores de energia elétrica e Demais Instalações de Transmissão (DIT). Mais recentemente, aplicam-se também aos Sistemas Individuais de Geração de Energia Elétrica com Fontes Intermitentes (SIGFI).

A seguir nos próximos subtópicos são tratados mais precisamente os componentes de compensação de potência reativa.

### **3.2 Componentes de Compensação de Potência Reativa Utilizados na Indústria**

Os componentes de compensação de potência reativa são alternativas mais viáveis de controle de tensão aplicada em sistemas industriais. Existem algumas possibilidades, com variadas formas de controle e instalação, com mais ou menos impacto no sistema e com especificações características de cada uma. São fundamentais e representam segurança a manutenção da tensão, seu emprego simboliza seguridade de uma perspectiva exterior e permite, até certo ponto, possíveis excursões indesejadas no sistema, além de aumentar a margem de seguridade de imperícia que eventualmente possa ocorrer na adesão de novas cargas ou manutenções técnicas mal geridas.

A tensão pode ser regulada por autotransformadores reguladores de tensão ao longo das linhas de distribuição. Isto ocorre por conta de seus *taps* internos que se alteram em função da relação do número de espiras, estas por sua vez modificam a tensão de saída. Este método é empregado em cenário de controle mais amplo de atuação, nunca empregado para correção de tensão em sistemas únicos e cargas mais isoladas. Já os bancos de capacitores e reatores ligados em paralelo com as linhas, são opções excelentes para o controle local de potência reativa, injetando ou absorvendo potência reativa do sistema.

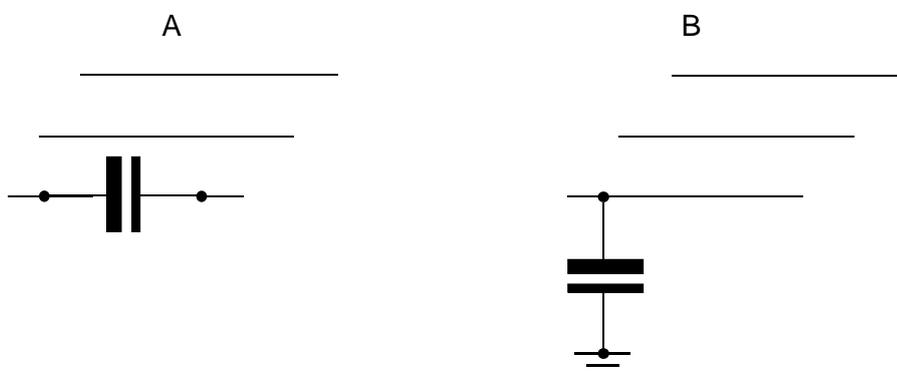
A incorporação destas formas de controle local de tensão pode ser descrita de duas formas; injeção direta de potência reativa e injeção automatizada (chaveada) de potência reativa. A primeira é convenientemente acionada em patamares de carga que tornam evidente a imediata necessidade de injeção, e possui como característica pouca ou nenhuma graduação de potência reativa injetada. Já a segunda, se caracteriza pela injeção paulatina de reativos, com ela o sistema recebe pouco-a-pouco a potência reativa necessária para elevar a tensão.

### 3.2.1 Banco de Capacitor Fixo

Existem vários sistemas elétricos com perfil de consumo pouco variável, suas cargas tendem a modificar-se minimamente durante longos períodos de sua atividade industrial, sofrendo quase nenhum acréscimo de consumo ou mesmo tendência para tal. Isto se dá, em sua maioria, por conta de sua malha elétrica desenhada exclusivamente para maquinários apropriados a certas definições de mercado e suas exigências produtivas. Um perfil de consumo estável, com pouco variação, é devidamente apropriado a aplicação de bancos de capacitores fixos, a função desta modalidade de banco é a de balancear o fator de potência do sistema e reequilibrar os níveis de tensão. Por esta razão sistemas com grande variação de carga consumida podem tornar a injeção de potência reativa por meio de bancos de capacitores fixos um grande encaço potencial, de maneira que ao tentar corrigir o problema encontrado esta mesma potência passa a extrapolar sua necessidade no sistema, e eventualmente tornando-o capacitivo.

As cargas elétricas que correspondem a necessidade de compensação de reativos são coincidentemente as mais utilizadas em malhas industriais, motores, cargas indutivas, transformadores, fornos elétricos e sistemas de iluminação são os mais notáveis nesta relação. Estes capacitores fixos que são empregados nestes sistemas industriais têm como perfil de instalação serem utilizados em serie ou em paralelo a rede, esta última é também dita neste meio como sendo a conexão *shunt*. Esta relação pode ser vista a Figura 8 abaixo.

Figura 8 — Capacitores Fixos.



Fonte: Produção do Próprio Autor.

A característica principal da ligação série, figura 8 (A), está na sua relação direta com a corrente elétrica, a medida em que há variação desta, há também, proporcionalmente, variação quadrática de injeção de potência reativa no sistema. A objeção principal de sua utilização está na potencialidade de desconexão que pode apresentar em uma eventual queima de capacitores, levando a apresenta-los como um obstáculo a passagem de tensão. A figura 8 (B) se pode ver a representação da ligação em paralelo, esta ligação não sofre com este problema em potencial, em vista que ao mesmo tempo em que é conectado à rede também é aterrado, não participando diretamente do fluxo principal.

Capacitores em paralelo são os mais utilizados para compensação de potência reativa em indústrias de bens de consumo, como é o caso das fabricas cervejeiras. Esta modalidade é caracterizada pela potência reativa entregue ser proporcional ao quadrado da tensão em que se aplica. Ao passo que também é menos crítico em sua instalação, de modo que é colocada sempre próximo as cargas que compensa. Outro ponto a que se deve ponderar é a relação que é vista nesta modalidade, onde pode ser vista a autorregulação de injeção de reativos em função da corrente na linha, de modo a contribuir beneficemente aos níveis de tensão à medida em que a corrente é atribuída a carga, já na modalidade paralela isto não ocorre.

### 3.2.2 Banco de Capacitor Chaveado

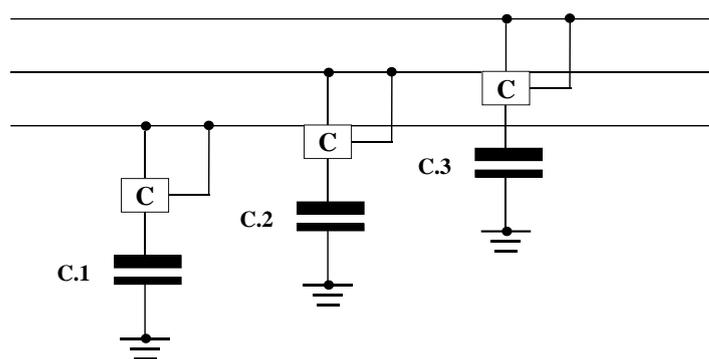
Os bancos de capacitores variáveis ou chaveados são métodos bastantes utilizadas dos bancos de capacitores fixos, em que há alguma modificação em seu sistema de controle a ponto de contribuir para que sua utilização seja de forma automática. Atualmente há muita utilização destes dispositivos industrialmente, seja para controle direto do fator de potência, ou mesmo para que sejam mantidos a retaguarda de um sistema principal de injeção de potência reativa.

Como já foi tratado anteriormente, existe a preocupação técnica em que estes sistemas elétricos possam variar seus perfis de carga de modo a inviabilizar a injeção de potência reativa através de bancos de capacitores fixos. Em outras palavras, eventualmente podem haver momentos em que a carga consuma pouca potência reativa da rede, limitando-se abaixo do reativo injetado, e então contribuindo para a um sistema capacitivo.

Esta modalidade de aplicação representa uma abertura mais viável de acomodação dos sistemas de compensação de reativos empregados em redes com períodos de baixo e alto consumo. Também há redes elétricas em que ao longo de anos de funcionamento demonstram mudanças que somadas contribuem a necessidade elevação de reativos por parte dos sistemas de compensação, deste modo o banco de capacitores chaveado pode contribuir de modo a identificar automaticamente esta discrepância e corrigi-la, empregando mais reativos ao sistema.

A Figura 9 é a representação destes capacitores conectados à rede, sua forma de atuação é normalmente baseada nos níveis de tensão, corrente ou fator de potência da rede que está monitorando. São particionados em divisões com capacitores de baixa potência que podem ser acionados em cascata a ponto de resumirem-se a um único bloco injetando potência reativa ao mesmo tempo.

Figura 9 — Capacitores Chaveados.



Fonte: Produção do Próprio Autor.

No ilustrativo acima é possível compreender melhor a formulação estrutural destes bancos no sistema elétrico. Sua posição pode variar e ainda há a possibilidade de monitorar a variável de acionamento dos bancos em outros pontos em torno do sistema.

### 3.3 Variação de Tensão segundo o Prodist

Quanto ao seu objetivo, este subtópico busca caracterizar os fenômenos de qualidade da tensão, visando estabelecer critérios para amostragem, bem como valores de referência e procedimentos correlatos à qualidade da energia. Os aspectos considerados para se mensurar qualidade da energia em regime permanente ou transitório são a tensão em regime permanente, fator de potência, harmônicos, desequilíbrio de tensão, flutuação de tensão, variações de tensão de curta duração e variação de frequência.

#### 3.3.1 Tensão em regime permanente

Neste item (3.3.1) são estabelecidos limites adequados, precários e críticos para os níveis de tensão em regime permanente, bem como indicadores individuais e coletivos de conformidade de tensão, além de critérios de medição.

No desenvolvimento deste estudo deparou-se com tensões nominais de 69kV, no ponto de alimentação na entrada da subestação, que faz parte da fábrica, e com tensões de alimentação de 0,38 kV. Estas faixas de tensão possuem níveis adequados, estes limitadores e nomenclaturas estão nas Tabelas III e IV.

Tabela III — Tensão Nominal igual ou inferior a 1 kV.

Tensão de Atendimento ( $T_A$ )	Variação da Tensão de Leitura ( $T_L$ ) em pu
Adequada	$0,92 \leq T_L \leq 1,05$
Precária	$(0,87 \leq T_L < 0,92$ ou $1,05 < T_L \leq 1,06)$
Crítica	$T_L < 0,87$ ou $T_L > 1,06$

Fonte: Adaptado de ANEEL, 2018

Tabela IV — Tensão Nominal igual ou superior a 69 kV e inferior a 230 kV.

Tensão de Atendimento ( $T_A$ )	Varição da Tensão de Leitura ( $T_L$ ) em pu em relação a tensão Referência ( $T_R$ )
Adequada	$0,95T_R \leq T_L \leq 1,05T_R$
Precária	$(0,90T_R \leq T_L < 0,95T_R$ ou $1,05T_R < T_L \leq 1,07T_R)$
Crítica	$T_L < 0,90T_R$ ou $T_L > 1,07T_R$

Fonte: Adaptado de ANEEL, 2018

A norma ainda conta com índices de indicação individuais e coletivos. No caso de indicadores individuais, este índice é calculado para saber a duração relativa da transgressão para tensão precária (DRP) e o para tensão crítica (DRC). Já para os indicadores coletivos devem ser calculados o índice de duração relativa da transgressão para tensão precária equivalente (DRPE) e o índice de duração relativa da transgressão para tensão crítica equivalente (DRCE). Estes índices possuem grande relevância para compensação de transgressão de tensões de atendimento, isto se dá porque a distribuidora deve compensar aqueles consumidores responsáveis pelas unidades consumidoras que estiverem submetidas a indicadores DRP e/ou DRC com duração fora do permissível.

Ainda segundo a mesma norma, os indicadores de tensão, coletivos ou não, são tratados a partir de medição direta em um ponto de conexão e sujeitos a comparação aos nível de tensão especificado como adequado, precário e crítico. Cita também que, valores de medições devem ser referenciados a valores contratados de tensão e estes, por sua vez, são pactuados entre os agentes responsáveis pelas unidades consumidoras em referência os limites estabelecidos em regulamentação e que devem constar em um Contrato de Conexão às Instalações de Distribuição (CCD).

Para qualquer valor que seja utilizado com função de comparação a valores obtidos de medição deve ser tratado como tensão de referência. Já com relação a tensão contratada, é sabido que:

- a) Cada derivação deve ser especificada entre a distribuidora e o responsável pela unidade consumidora, de modo que possa ser atendida pelo Sistema de Distribuição de Alta Tensão (SDAT) ou Sistema de Distribuição de Média Tensão (SDMT);

- b) Faixas de tensão contratadas devem basear-se em estudos técnicos que considerem as variações de tensão no sistema de distribuição ao longo do tempo;
- c) A tensão em regime permanente deve ser avaliada por meio de um conjunto de leituras obtidas por medição apropriada, de acordo com a metodologia descrita para os indicadores individuais e coletivos;
- d) A  $T_R$  deve ser classificada em três categorias: adequadas, precárias ou críticas. A condição de classificação deve ser baseada no afastamento do valor da tensão de leitura em relação à tensão de referência.

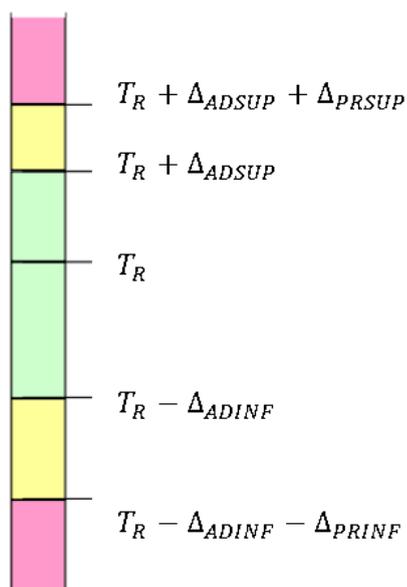
Medições adequadas devem basear-se na capacidade do equipamento utilizado, é substancial a utilização de medidores aferidos e que operem segundo o princípio da amostragem digital. Com capacidade de indicação de tabela de medição e histograma de tensão. Devem operar segundo o seguinte requisito de fabricação:

- a) taxa amostral: 16 amostras/ciclo;
- b) conversor A/D (analógico/digital) de sinal de tensão: 12 bits;
- c) precisão: até 1% da leitura.

As medições devem respeitar o tipo de ligação da unidade consumidora, abrangendo medições entre todas as fases ou entre todas as fases e o neutro. A classificação de medições deve seguir a seguinte organização:

- a) A  $T_R$  corresponderá à tensão contratada, no caso de unidades atendidas pelo SDMT ou SDAT;
- b) A  $T_R$  corresponderá tensão nominal de operação, no caso de unidades atendidas pelo Sistema de Distribuição de Baixa Tensão (SDBT).
- c) A Figura 10 delimita as faixas de tensão a partir da tensão de referência. Os valores correspondentes a estas faixas em relação aos níveis de tensão vistos nesta pesquisa são apresentados na Tabela III e IV.

Figura 10 — Faixas de Tensão em Relação à de Referência.



Fonte: Adaptado de ANEEL, 2018

Onde:

Tensão de Referência ( $T_R$ );

Faixa Adequada de Tensão ( $T_R - \Delta_{ADINF}, T_R + \Delta_{ADSUP}$ )

Faixas Precárias de Tensão ( $T_R + \Delta_{ADSUP}, T_R + \Delta_{ADSUP} + \Delta_{PRSUP}$  ou  $T_R - \Delta_{ADINF} - \Delta_{PRINF}, T_R - \Delta_{ADINF}$ )

Faixas Críticas de Tensão ( $> T_R + \Delta_{ADSUP} + \Delta_{PRSUP}$  ou  $< T_R - \Delta_{ADINF} - \Delta_{PRINF}$ )

### 3.3.2 Fator de potência

O fator de potência ( $fp$ ) é um indicador fundamental para análise de qualidade da tensão, a captação de dados de potência reativa utilizada em seu cálculo deve ser feita por instrumentos de medição preferencialmente eletrônicos, a partir do princípio da amostragem digital e aprovados pelo o órgão responsável pela regulamentação destes instrumentos.

A relação do estado atual entre potência ativa e potência reativa ou das respectivas energias pode ser expresso seguindo a Equação 1 ou 2.

$$fp = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2}} \quad (1)$$

Ou

$$fp = \frac{EA}{\sqrt{EA^2 + ER^2}} \quad (2)$$

No qual:

$P$  = Potência Ativa (Watt)

$Q$  = Potência Reativa (Volt Ampére reativo)

$S$  = Potência Aparente, por vez indicada diretamente por VI (Volt Ampére)

$EA$  = Energia Ativa (Watt);

$ER$  = Energia Reativa (Volt Ampére reativo);

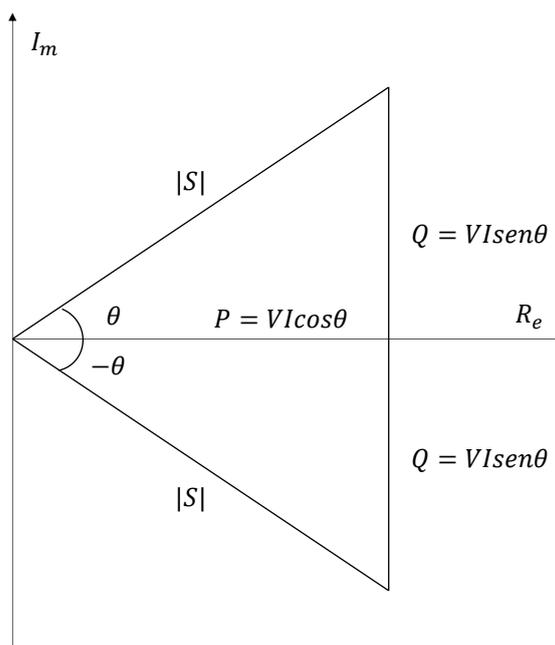
Uma condição primordial que deve ser compreendida está na indicação de trabalho útil por potência elétrica empregada, o  $fp$  permite entender a eficiência energética do sistema em relação a entrada de potência neste mesmo sistema. Segundo (CHRISTO, E. S. 2005), dispositivos indutivos como motores e transformadores, necessitam de um campo magnético interno para seu funcionamento, este efeito se dá pela passagem da corrente em seus enrolamentos.

É então que neste ponto, quando são alimentados com Corrente Alternada (CA), a energia em forma de campo magnético tende a opor-se a variação de intensidade de corrente, proporcionando um conseqüente atraso na forma de onda da corrente em relação a tensão, este evento proporciona que uma parcela da corrente não realize trabalho útil, portanto culminando em energia reativa.

A condição de controle do fator de potência é efetuada a partir de medições permanentes, para o caso de unidades consumidoras com padrão SDMT e SDAT estas medições são obrigatórias. Com exceção no caso de unidades consumidoras com padrão SDBT, na qual a medição pode ser facultativa. Para distribuidora estas medições devem ser arquivadas pelo período mínimo de 5 anos.

Quanto aos valores de referências, esta mesma normativa estabelece que o  $fp$  em cada unidade consumidora deve ser superior a 0,92 capacitivo durante 6 horas da madrugada e 0,92 indutivo durante as outras 18 horas do dia. Seu descumprimento está sujeito a multas. A relação de  $fp$  capacitivo e indutivo pode ser melhor entendida a partir da Figura 11.

Figura 11 — Triângulo de Potências.



Fonte: Produção do Próprio Autor.

Onde:

$P$  = Potência Ativa (Watt)

$Q$  = Potência Reativa (Volt Ampére reativo)

$S$  = Potência Aparente, por vez indicada diretamente por  $VI$  (Volt Ampére)

$V$  = Tensão (Volt)

$I$  = Corrente (Ampére)

O  $fp$  é um índice adimensional e com variação mínima nula e máxima unitária, quando igual a zero ( $\cos 90^\circ$ ) o fluxo de energia no sistema é inteiramente reativo. Já para  $fp$  igual a um ( $\cos 0^\circ$ ), toda a energia fornecida pela fonte é consumida pela carga, seu aproveitado é dado integralmente. Logo, para cargas indutivas,  $\theta$  e  $Q$  são positivos, já para cargas capacitivas,  $\theta$  e  $Q$  são negativos.

Por convenção, em razão da impossibilidade de compreender a natureza da carga somente cálculo do  $fp$  (na trigonometria tem-se  $\cos(\theta) = \cos(-\theta)$ ), adota-se as definições vistas na Tabela V:

Tabela V — Fator de potência indutivo e capacitivo.

Ângulo Teta	Natureza Do Fator De Potência
$\theta > 0$	Indutivo
$\theta < 0$	Capacitivo

Fonte: Produção do Próprio Autor.

Usualmente o  $fp$  é corrigido por equipamentos (bancos de indutores ou capacitores) que o conduzem para um valor próximo ao unitário. O baixo  $fp$  contribui ao aparecimento de quedas de tensão, perdas na Instalação e subutilização da capacidade instalada. As quedas de tensão ocorrem porque há aumento da corrente devido ao excesso de energia reativa, este impacto é ainda mais perceptível em senários em que a rede já se encontra altamente solicitada.

Ainda neste viés, redes com excedente de consumo de reativos tendem a produzir instabilidade de tensão no sistema. Este dado é influenciado pelos níveis de corrente de curto circuito da barra principal de seu alimentador, estes níveis quanto mais baixos forem, tendem a conduzem a rede a um estado mais susceptível a subtensão.

Com relação as perdas na Instalação, segundo (FUCHS, R. D. 1977), sua ocorrência acontece a partir do mesmo excedente de energia reativa que ao prover aumento de corrente no sistema, também provoca surgimento de perdas ôhmicas  $P_{ohm}$  nos condutores (Efeito Joule). Esta relação deve ser melhor compreendida na Equação 3.

$$P_{ohm} = 3 * I^2 * R \quad (3)$$

Onde:

$P_{ohm}$  = Potência Ativa (Watt)

$I$  = Corrente Elétrica (Ampére)

$R$  = Resistência do Condutor (Ohm)

Nota-se que o impacto da elevação de reativos é proporcional ao quadrado da corrente total, logo pode-se estabelecer uma relação inversa no que se refere a diminuição do  $fp$  e o aumento do aquecimento de condutores e equipamentos. A partir disto, uma importante análise sobre subutilização de capacidade instalada pode ser feita, segundo (WEG, 2019) de maneira interligada, a elevação da corrente provoca a necessidade de aumento de bitolas dos condutores do sistema, isto pode ser verificado na Tabela VI.

Tabela VI — Relação Entre Seção Relativa e Fator de Potência.

Seção Transversal Relativa	Fator de Potência ( $fp$ )
1,00	1,00
1,23	0,90
1,56	0,80
2,04	0,70
2,78	0,60
4,00	0,50
6,25	0,40
11,10	0,30

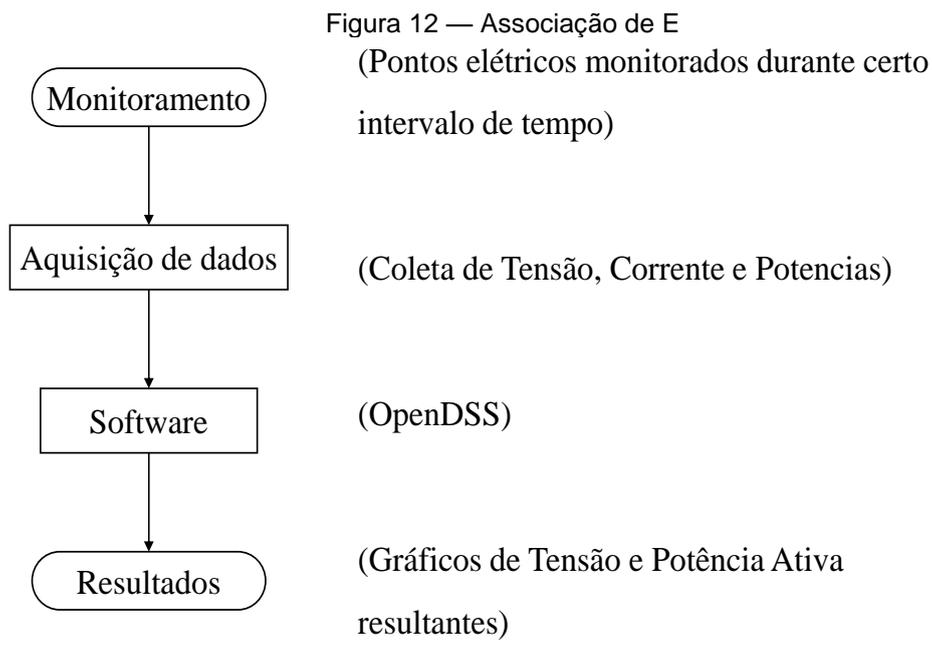
Fonte: Adaptado de WEG, 2019

Note que a proporção de aumento é elevada, chegando a quatro vezes maiores para um  $fp = 0,5$  e aproximadamente onze vezes maior para um  $fp = 0,3$ . Isto mostra que em um cenário de impossibilidade de correção do  $fp$  os aquecimentos de cabos podem trazer consequências danosas ao sistema.

## 4. ESTUDO DE CASO

### 4.1 Metodologia

A metodologia empregada para compensação de reativo de uma indústria foi subdividida em: 1) aquisição de dados e seus pontos de medição; 2) software usado nas simulações; 3) equipamento para coleta dados; e 4) mitigação do problema de variação de tensão em regime permanente. A mitigação proposta é baseada na compensação de potência reativa a partir de bancos de capacitores instalados em paralelos as cargas. A quantidade de potência reativa injetada e seu critério de injeção são estipulados a partir do fator de potência calculado para cada setor. Esta rápida descrição pode ser melhor compreendida a partir da visualização da Figura 12, na qual o fluxo de etapas exposto concebe a essência dos textos e análises feitas nos tópicos a seguir.



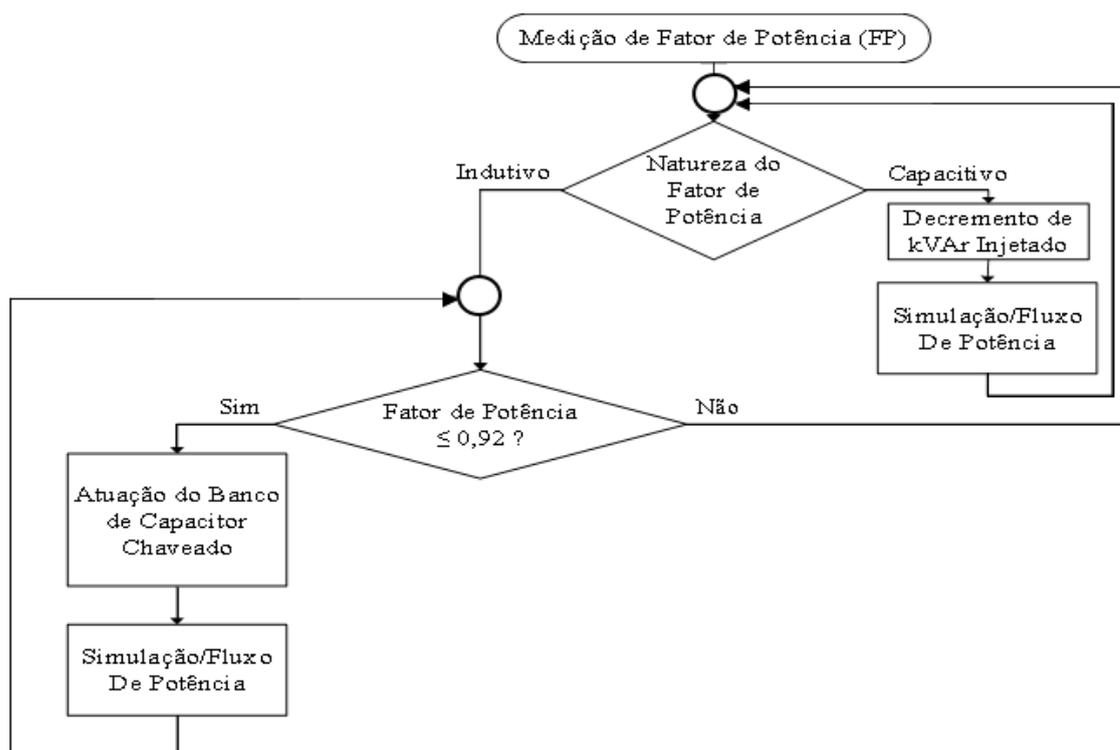
Fonte: Produção do Próprio Autor.

### 4.2 Método de Mitigação Proposto

A Fig. 13 ilustra o fluxograma do método de mitigação proposto. O método é inicializado pela monitoração do fator de potência da instalação elétrica de determinado setor da indústria. Em seguida, note que a natureza do fator de potência é verificada. Se o fator de potência é capacitivo, então uma ação de desconexão

gradual de bancos de capacitores chaveados é realizada, no sentido de reduzir a injeção de potência reativa na instalação elétrica do setor. Caso contrário, o fator de potência indutivo é verificado. Se o fator de potência indutivo é menor que 0,92, então uma ação de conexão de gradual de bancos de capacitores chaveados é realizada, no sentido de aumentar a injeção de potência reativa na instalação elétrica do setor. Caso contrário, o método é inicializado. O método é simples e apresenta fundamentos para aplicação em tempo real.

Figura 13 — Fluxograma do Método de Mitigação.



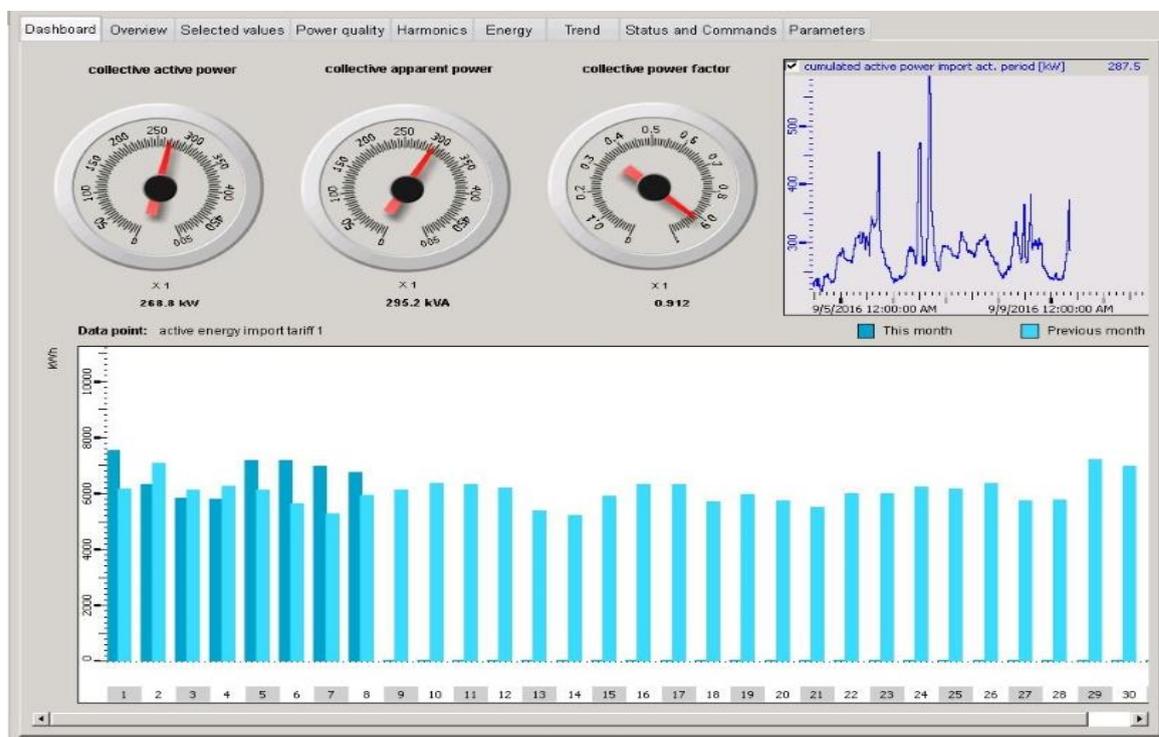
Fonte: Produção do Próprio Autor.

### 4.3 Monitoramento

O *software* de monitoramento de energia Powermanager supervisiona medidores de energia Siemens e dispositivos de proteção de baixa tensão, e fornece gerenciamento de energia que permite medir, processar, analisar, armazenar informações sobre a qualidade da tensão do sistema. Possui conectividade *Ethernet* ou *serial* via *gateway* (Modbus) com dispositivos Siemens-PAC, seus benefícios incluem visibilidade e controle dos fluxos de energia, perfil de consumo, eficiência energética e identificação das condições críticas dos sistemas baixa tensão.

Este *software* disponibiliza um resumo, visto na Figura 14, dos diferentes valores de pontos de dados medidos pelos dispositivos, dados como potência ativa, aparente e fator de potência do conjunto de cargas no sistema ou setor mensurado.

Figura 14 — Visão geral do Painel do *Software*.



Fonte: Produção do Próprio Autor.

A integração do Powermanager com SENTRON PAC4200(multimedidor) se dá pelo protocolo de comunicação de dados Modbus, o qual permite até cinquenta variáveis medidas, cinco valores de demanda de energia, cinco valores de contador de energia ativa, energia reativa e dez saídas digitais.

Para este trabalho utilizou-se mais predominantemente um guia da qualidade da energia está disponível para alguns modelos de equipamentos da série PAC, entre eles o PAC4200. Este guia exibe os valores em tempo real, mínimos e máximos do fator de potência e frequência. A Figura 15 mostra este guia.

Figura 15 — Aba de visualização da qualidade de tensão.

Power factor				Frequency		
Phase	Actual	Min	Max	Actual	Min	Max
L1		0.846	0.000	49.31 Hz	0.00 Hz	52.6 Hz
L2		0.980	0.000			
L3		0.955	0.000			
Total		0.909	0.000			

Voltage distortion				Current distortion			
Phase	Actual THD	Max THD		Phase	Actual THD	Max THD	
L1		0.49 %	0.8 %	L1		0.55 %	1.0 %
L2		0.57 %	0.8 %	L2		0.24 %	1.0 %
L3		0.55 %	0.8 %	L3		0.11 %	0.9 %

Fonte: Produção do Próprio Autor.

#### 4.4 Sentron PAC4200

Segundo (SIEMENS, 2019), SENTRON PAC4200 é um multimedidor que permite visualizar, memorizar e controlar todos os parâmetros de rede relevantes para a distribuição de energia em baixa tensão e qualidade de tensão. O medidor tem capacidade de medir correntes trifásicas e pode ser utilizado em redes com de quatro fios condutores. O equipamento também monitora o conteúdo harmônico de tensão, corrente, ângulo de fase, além da assimetria das formas de onda de tensão e corrente com relação à amplitude e fase.

A figura A se apresenta um ilustrativo indicativo presente em seu manual, em quanto que, a figura B mostra o display em funcionamento em um dos painéis onde foram coletados dados utilizados nesta dissertação.

Figura 16 — Multimedidor SENTRON PAC4200.

Figura A

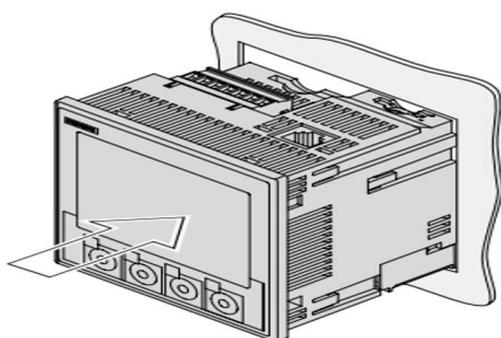


Figura B

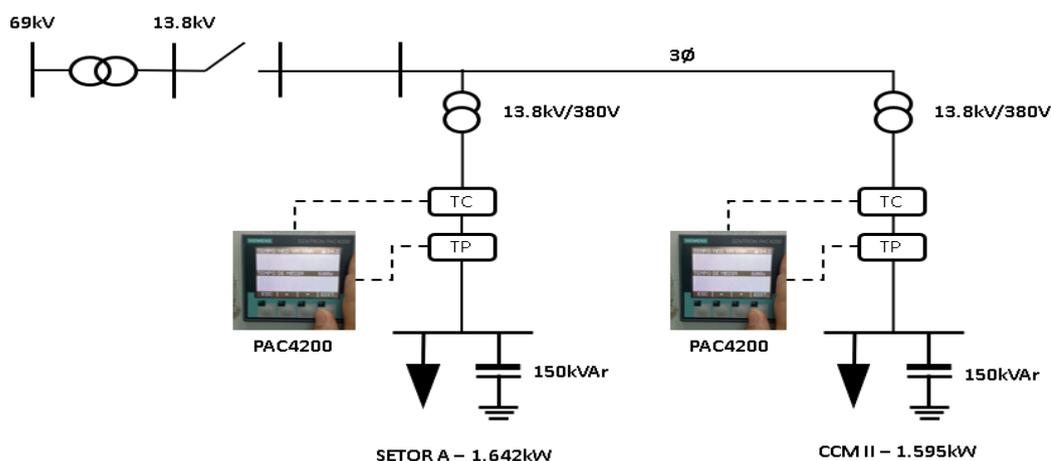


Fonte: Adaptado de SIEMENS, 2019

## 4.5 Medição

Os pontos de medição e coleta de dados de todas as curvas de carga foram coletados através de Transformadores de Corrente e Tensão (TC e TP, respectivamente) Estes dois pontos (Setor A e o CCM II), foram os mais impactados com a ausência da injeção de potência reativa. A coleta foi feita diretamente no PAC4200, no qual se utilizou o *software* Powermanager para visualização dos gráficos em tempo real e um notebook para armazenamento. A precisão de medição foi de 0,2% relativa ao valor de medição de tensão sob condições de referência. A Figura 17 mostra o esquema indicando estes pontos medidos, todos os pontos de coletas de curva de carga foram coletados como mostra a figura.

Figura 17 — Pontos de Medição no Sistema.



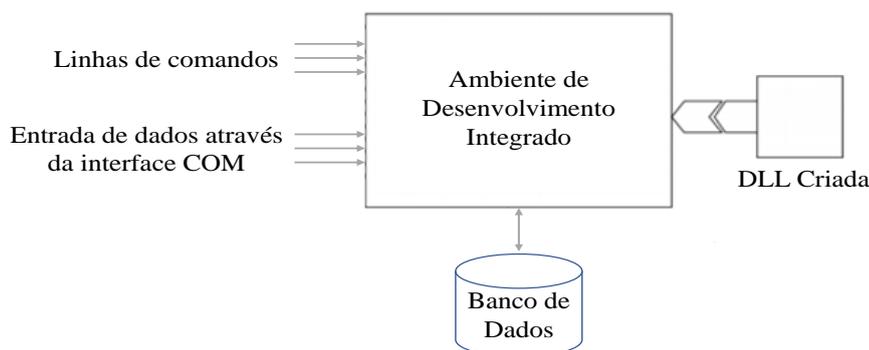
Fonte: Produção do Próprio Autor.

## 4.6 O Software OpenDSS

O software OpenDSS, inicialmente intitulado *Distribution System Simulator* (DSS) em 1997, foi desenvolvido pela Electrotek Concepts, Inc., Roger Dugan e Thomas McDemontt. Seu objetivo inicial era dar apoio a análise de redes com a presença de geração distribuída (GD), com destaque a funções que outras ferramentas não tinham frente aos novos desafios oriundos das redes de distribuição. Em 2004, o DSS foi adquirido pelo *Electric Power Research Institute, Inc.* e foi relançado com título de OpenDSS em alusão a seu novo perfil de *software* em código aberto.

Segundo a referência (DE FREITAS, P. R. R. 2015), o *software* OpenDSS é um programa baseado em linhas de comandos que definem os circuitos que podem ser oriundos de um arquivo de texto fixo ou de programas externos.

Figura 18 — Funcionamento OpenDSS.



Fonte: Produção do Próprio Autor.

A Figura 18 apresenta as interfaces do software de maneira simplificada. A interface *Component Object Model* (COM) abre as portas para outros programas que o usuário utiliza em complemento ao OpenDSS. Nesta categoria destacam-se o MATLAB, Python e o *Visual Basic for Applications* (VBA). O software também permite a manipulação de dados com armazenamento via exportação para outras ferramentas, como o MS Office, e ainda concede a possibilidade de criação de aplicações específicas para uma dada função, chamadas de *Dynamic Link Library* (DLL).

#### 4.7 Aquisição de Dados

A potência consumida de cada setor da fábrica foi devidamente monitorada e é armazenada para formação dos cenários estudados neste trabalho. Cada setor fabril foi simulado sua respectiva curva de potência obtida aquisição de dados, de acordo com a Fig. 19. Uma campanha de medição foi realizada no período de 03/09/2019 a 10/09/2019, no qual o sistema se encontrava em plena rotina de produção.

Figura 19 — Etapas de Aquisição.



Fonte: Produção do Próprio Autor.

#### 4.8 Curvas de Carga

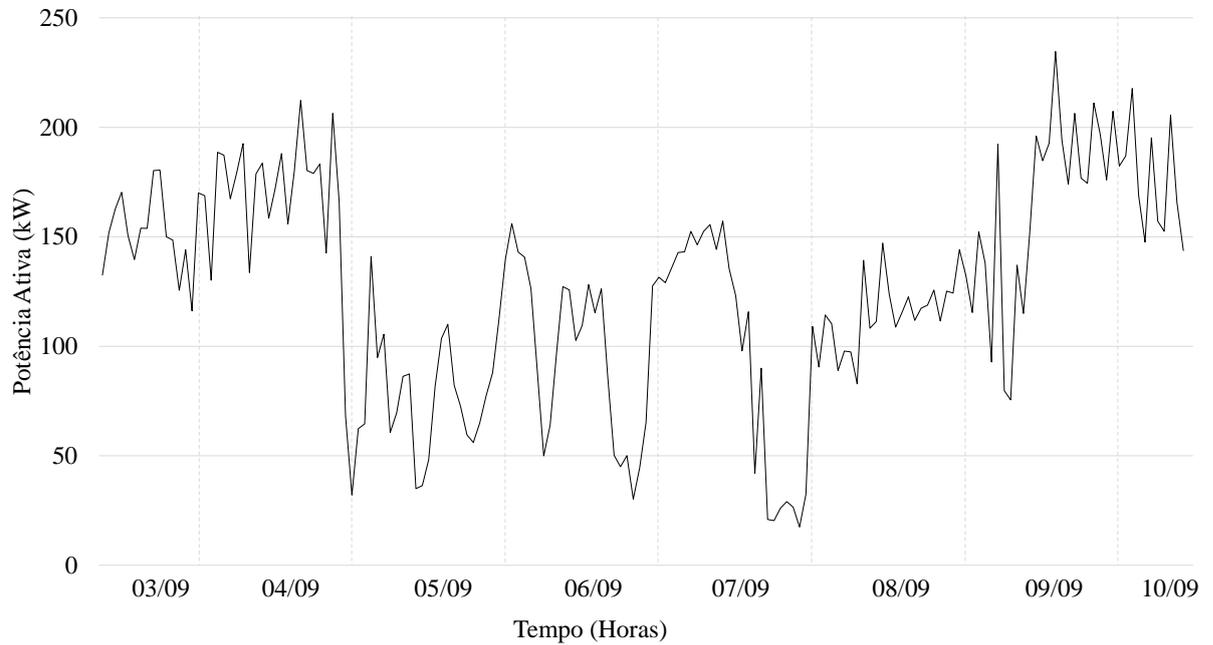
As curvas de cargas adquiridas para este trabalho foram coletadas em cada setor em um período de oito dias e com intervalo de uma hora para cada aquisição. No primeiro dia foram coletadas 15 aquisições, que se iniciaram às 09:00 horas às 23:00 horas. Do segundo ao nono dia foram coletadas 144 aquisições de maneira ininterrupta. Já no dia 10/09 foram recolhidas 11 aquisições entre 00:00 horas até 10:00 horas. Por fim, totalizando 170 amostras de potência ativa e de fator de potência.

Cada curva representa o perfil de consumo de cada setor, sendo que alguns setores possuem produção em escala diurna e noturna. Os setores A, CCM-I e II destacam-se uma vez que suas respectivas produções apresentaram pouca ou nenhuma parada. Os outros setores permaneceram atuantes no período noturno, porém com consumo reduzido.

Nas Figuras 20 e 21 são apresentadas as curvas de cargas para os Setor A e CCM-II, respectivamente. Nota-se que a primeira curva possui perfil de consumo menor, com pico aproximado de 240 kW no penúltimo dia. Já a segunda curva estabiliza seu ponto máximo com aproximadamente 430 kW no segundo dia, enquanto que seu ponto de menor consumo está no dia 08/09, com aproximadamente

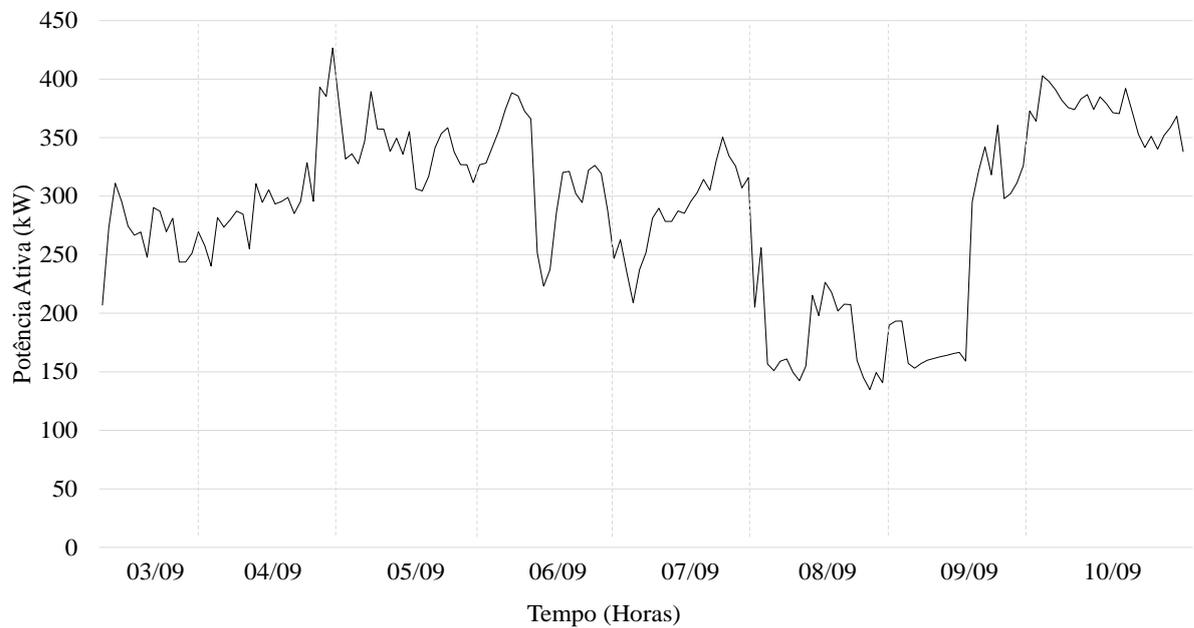
150kW.

Figura 20 — Curva de Carga do Setor A.



Fonte: Produção do Próprio Autor.

Figura 21 — Curva de Carga de CCM-II.



Fonte: Produção do Próprio Autor.

## **5. RESULTADOS**

### **5.1 Introdução**

Neste capítulo são apresentados os resultados das simulações realizadas para avaliar a qualidade da tensão nos setores A e CCM-II da indústria cervejeira. Na seção 5.2 é descrito o sistema teste usado nas simulações de fluxo de carga de séries temporais via OpenDSS.

A subseção 5.3.1 apresenta os resultados de simulação do sistema operando na situação atual com bancos de capacitores fixos. A subseção 5.3.2 contém resultados de simulação do sistema operando em carga leve com bancos de capacitores fixos. Por fim, a subseção 5.3.3 apresenta os resultados da aplicação do método de mitigação proposto neste trabalho, envolvendo banco de capacitores fixos e chaveados.

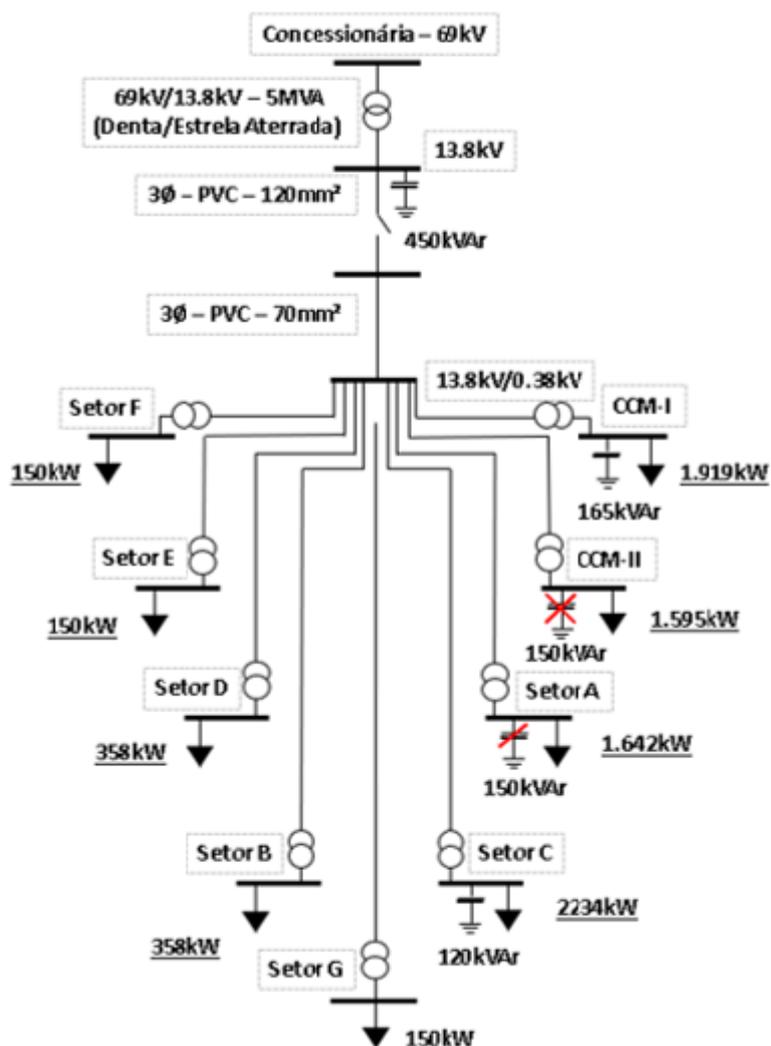
### **5.2 Dados da Instalação Fabril**

Os dados usados neste trabalho é uma instalação elétrica da indústria cervejeira, localizada no município de Benevides, no estado do Pará. A instalação elétrica da indústria mencionada é alimentada diretamente pelo sistema de distribuição de 69 kV da concessionária na entrada de sua subestação. A indústria possui uma potência instalada de máxima de 6 MVA e uma carga média mensal de 3,6 MVA. A Fig. 22 ilustra o diagrama unifilar da indústria.

A subestação principal da indústria possui uma potência de curto-circuito trifásica e monofásica de 555 MVA e 437 MVA, respectivamente. A subestação possui um transformador abaixador 69kV/13.8kV de 5 MVA.

O sistema possui treze barras, onde cada barra possui um transformador abaixador 13.8kV/0,38 KV. Não são considerados dispositivos de proteção, por não serem o foco desta pesquisa. O alimentador principal é ramificado por setores dentro da planta industrial, como os Centro de Controle de Motores I e II (CCM-I e II) que possuem cargas com alta potência com circuitos compressores de amônia e ar. O setor A possui maquinário formado em sua maioria por motores comandados por inversores de frequência bem como por fornos a resistência e iluminação de alta potência.

Figura 22 — Diagrama Unifilar da Rede Estudada.



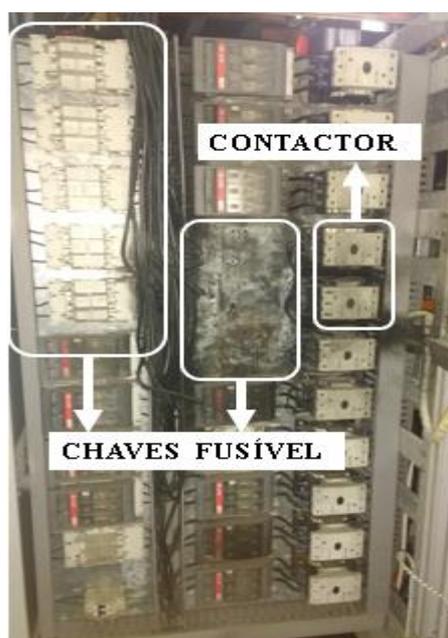
Fonte: Produção do Próprio Autor.

O Setor B é responsável pelo tratamento dos resíduos líquidos e sólidos para o descarte. O Setor C possui alta diversificação de tipos de carga, entre as quais o circuito da usina de dióxido de carbono na qual é feita captação de CO<sub>2</sub> de tanques de cerveja. Este mesmo setor possui caldeiras de vaporização, cozinha de produção e uma estação de tratamento de água. Ao todo comporta cargas em sua grande maioria de motores-bomba. O Setor D é composto por diversas cargas, como computadores, ar-condicionado e câmaras frigoríficas. Os Setores E, F e G fazem parte do tratamento e captação de água, e possuem cargas de perfil motor-bomba.

Quanto ao seu estado atual, o Setor A e CCM-II sofreram com avarias que produziram mau funcionamento. O Setor A sofreu com queimas em componentes como chaves fusíveis, contadores e capacitores, os quais faziam parte do circuito de

injeção de potência reativa da rede interna da fábrica. A Fig. 23 mostra contatores e chaves fusíveis queimados do circuito de controle do Setor A. Atualmente, em torno de 45% dos componentes do setor A encontram-se com avarias. Já no setor CCM-II, houve a queima total do quadro de distribuição, restringindo totalmente o controle de tensão por injeção de potência reativa. As Figs. 24 e 25 mostram componentes com avarias do setor CCM-II.

Figura 23 —Circuito de Controle Setor A.



Fonte: Produção do Próprio Autor.

Figura 24 — Queima CCM-II.



Fonte: Produção do Próprio Autor.

Figura 25 — Circuito de Controle CCM-II.



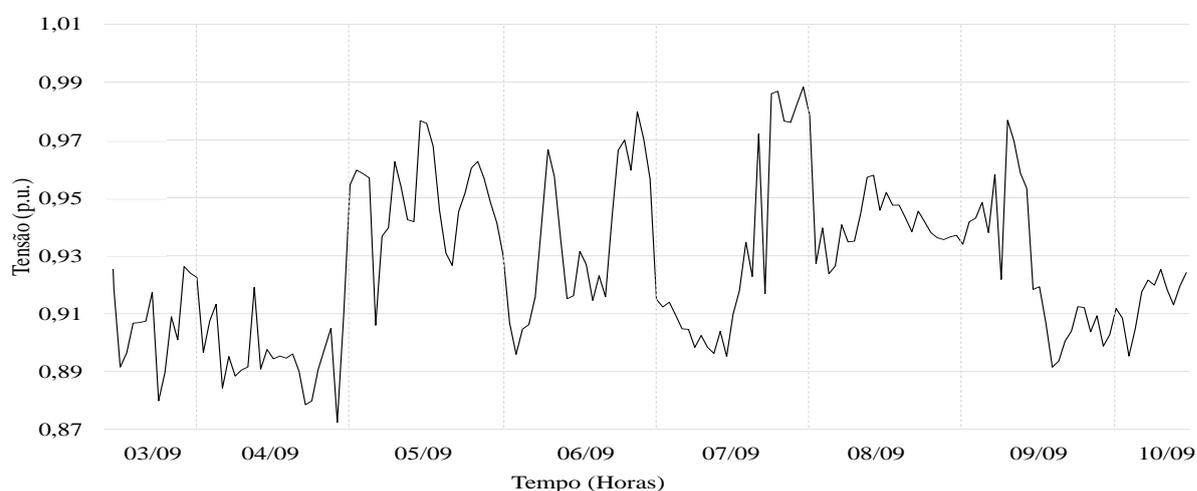
Fonte: Produção do Próprio Autor.

## 5.3 Resultados de Simulação

### 5.3.1 Sistema operando na situação atual com banco de capacitores fixos

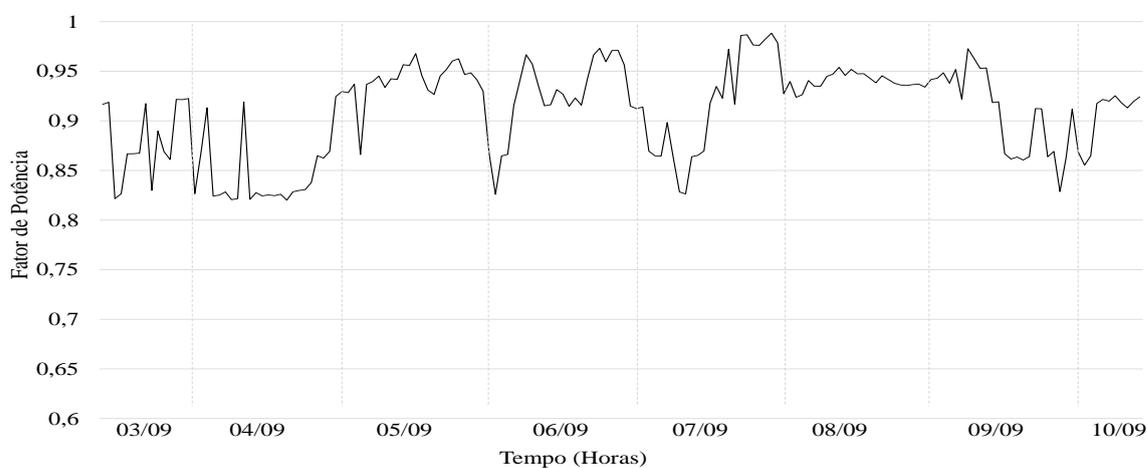
Este subtópico expõe os resultados do sistema teste operando na sua situação atual de funcionamento (Figura 22), somente com banco de capacitores fixos. Os bancos de capacitores chaveados foram desprezados nesse caso. As curvas de carga dos setores A e CCM-II obtidas na campanha de medição foram utilizadas nesse estudo de caso. As Figs. 26 e 27 mostram a tensão e fator de potência do Setor A ao longo do período de sete dias. Note a presença de subtensão e fator de potência abaixo de 0,92 em vários períodos da simulação.

Figura 26 — Resposta Atual de Tensão do Setor A.



Fonte: Produção do Próprio Autor.

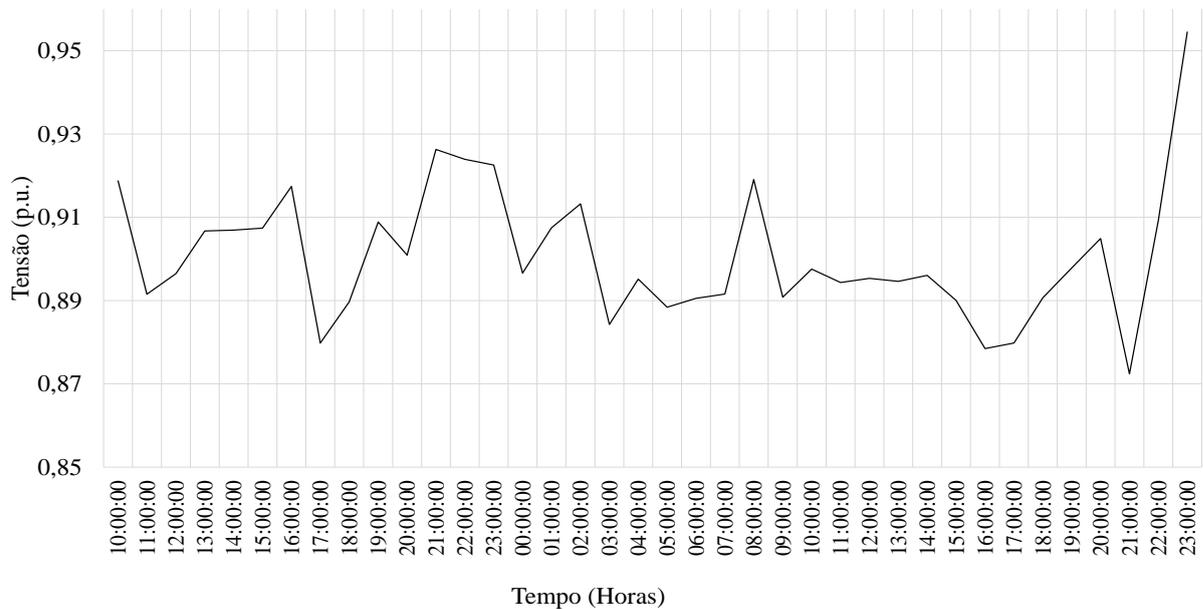
Figura 27 — Fator de Potência Atual do Setor A.



Fonte: Produção do Próprio Autor.

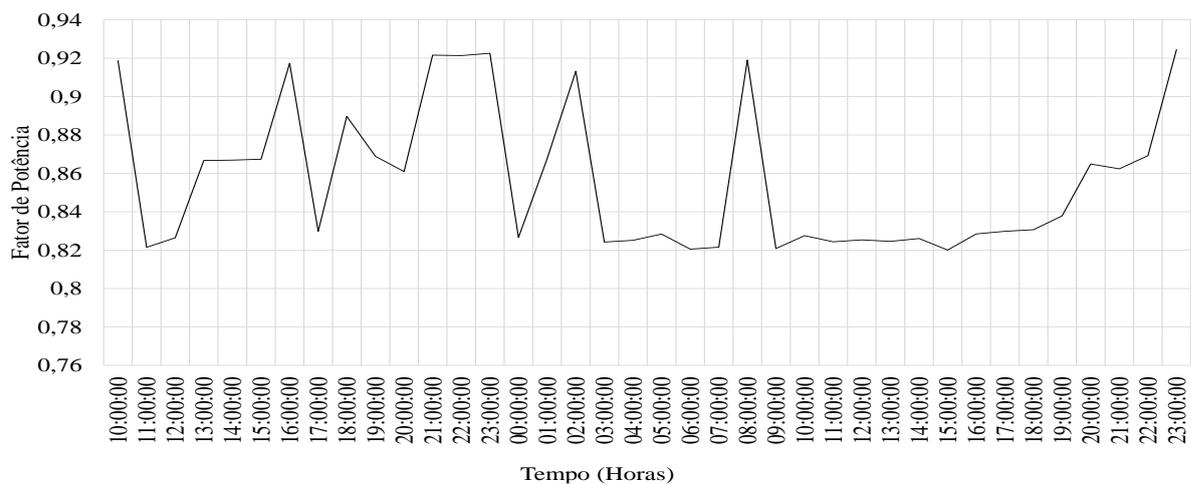
Nas Figuras 28 e 29, nota-se a ocorrência ininterrupta de subtensão (abaixo de 0,95) e fator de potência abaixo de 0,92 ao longo de 48 horas, nos dias 03/09 e 04/09. Observe que existe uma forte correlação entre patamar de carga pesada e ocorrência de subtensão e fator de potência baixo. O consumo elevado de potência reativa e suporte insuficiente de potência reativa é a causa da subtensão no setor A ao longo dos dias 03 e 04/09.

Figura 28 — Foco na infração ocorrida nos dias 03/09 e 04/09.



Fonte: Produção do Próprio Autor.

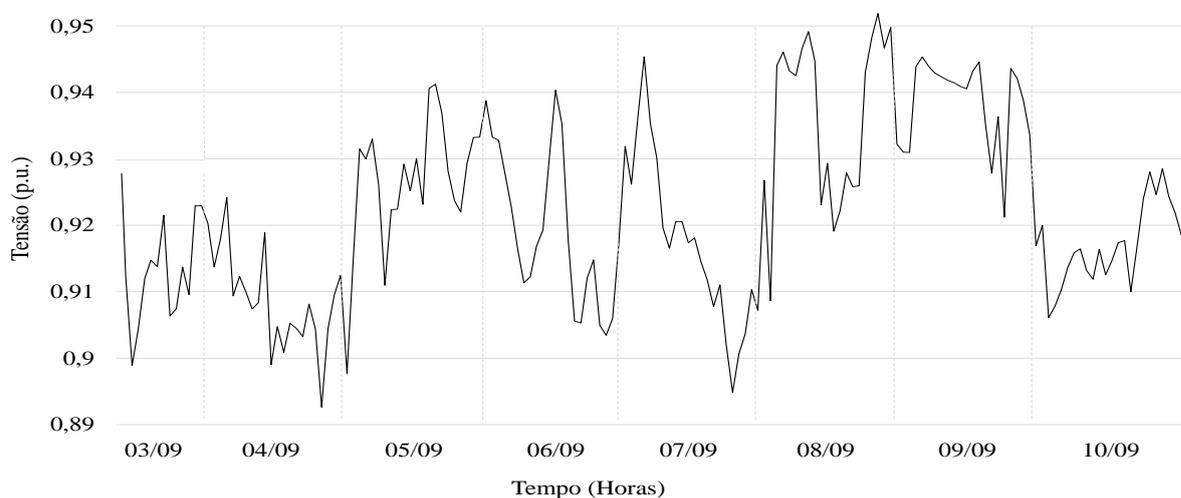
Figura 29 — Fator de Potência da infração ocorrida nos dias 03/09 e 04/09.



Fonte: Produção do Próprio Autor.

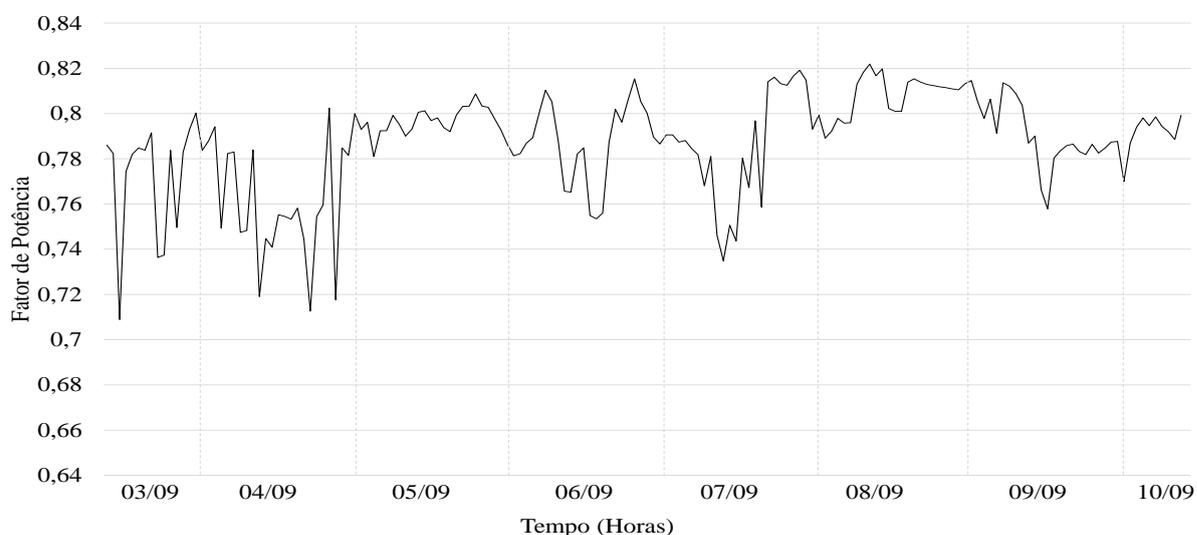
As Figs. 30 e 31 mostram a tensão e fator de potência do Setor CCM-II ao longo do período de sete dias, do dia 03 ao dia 10/09. Note a presença de subtensão e fator de potência baixo ao longo de todo o período da simulação. Os resultados mostram que a situação do setor CCM-II é mais grave do que a do setor A. Esta situação operativa gravíssima do setor A, com subtensões severas, pode estar impactando no mau funcionamento de equipamentos. O fator de potência crítico do setor A pode causar o aumento significativo de perdas ativas nos circuitos de baixa tensão, reduzindo a eficiência. Além disso, a indústria sofre perdas financeiras associadas a multas por parte da concessionária devido ao fator de potência abaixo de 0,92.

Figura 30 — Resposta Atual de Tensão do Setor CCM-II.



Fonte: Produção do Próprio Autor.

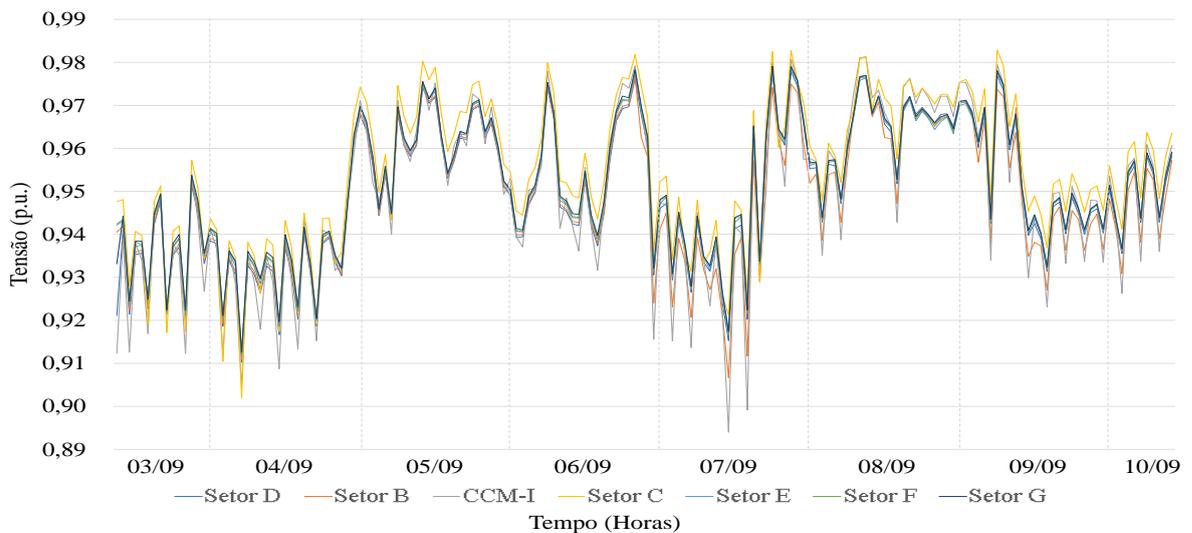
Figura 31 — Fator de Potência Atual do Setor CCM-II.



Fonte: Produção do Próprio Autor.

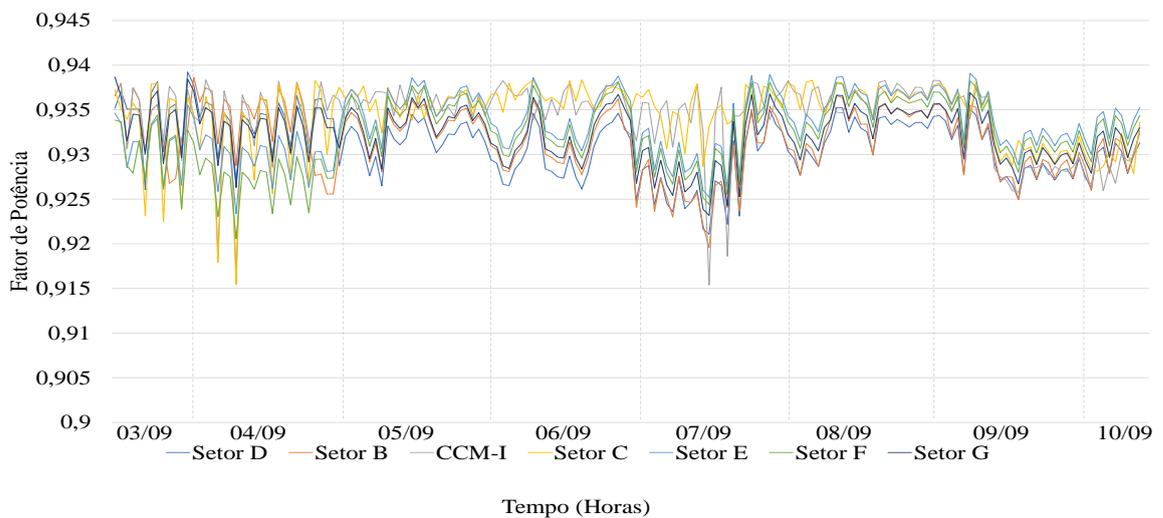
As Figs. 32 e 33 mostram as tensões e os fatores de potência dos setores D, B, CCM-I, C, E, F e G ao longo de um período de sete dias, quando compensação de potência reativa é realizada somente por banco de capacitores fixos. Note a ocorrência de subtensões em vários intervalos ao longo do período analisado. Por outro lado, os fatores de potência dos setores ficaram abaixo de 0,92 somente nos dias 04 e 07/09.

Figura 32 — Resposta atual da tensão nos terminais das cargas de outros setores.



Fonte: Produção do Próprio Autor.

Figura 33 — Fator de Potência de outros Setores.

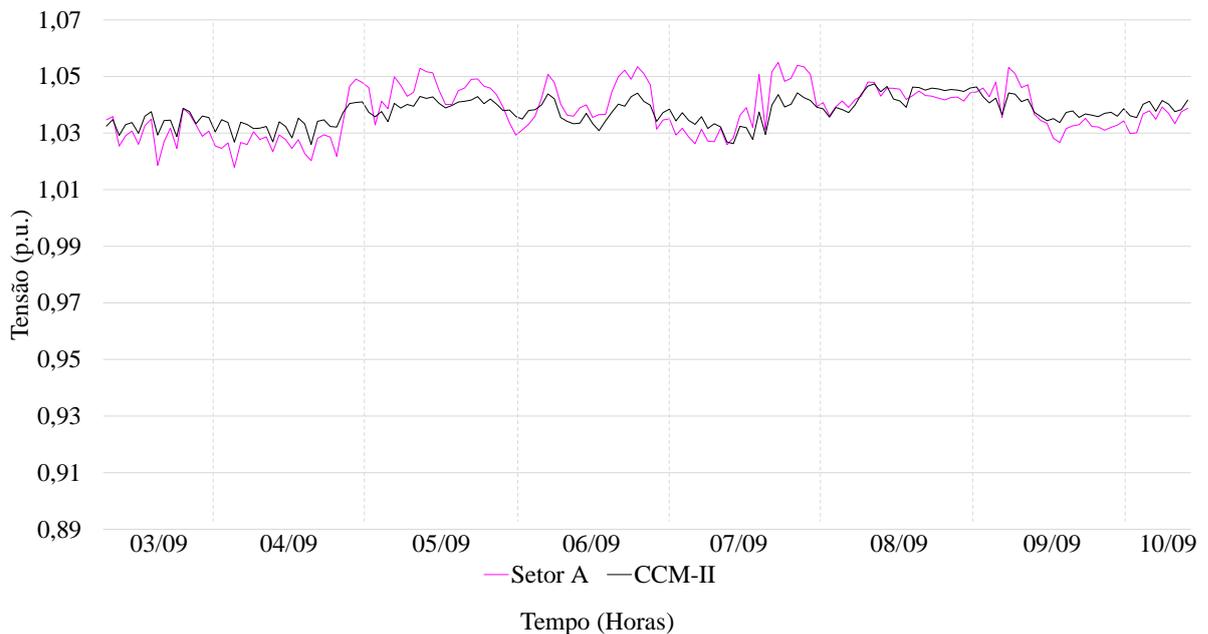


Fonte: Produção do Próprio Autor.

### 5.3.2. Sistema operando em carga leve com banco de capacitores fixos

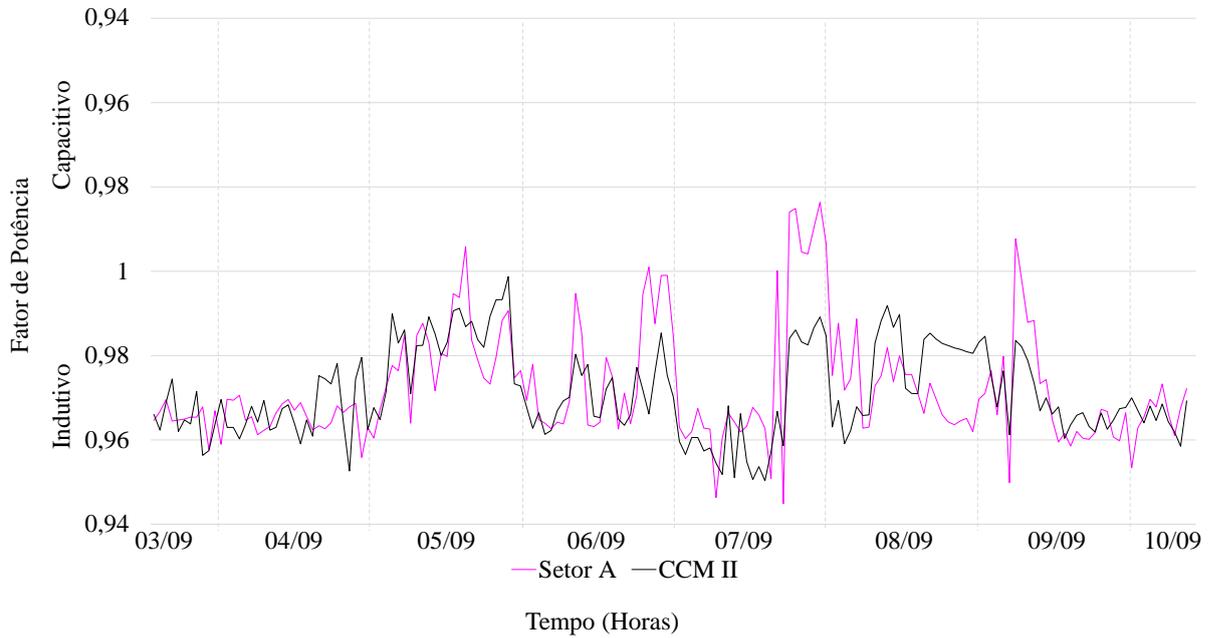
Assim como no subtópico anterior a qualidade da tensão no sistema teste foi avaliada e verificou-se a existência de sobretensão em cenários de carga, considerando 40%, 30% e 20% de redução do perfil de carga. Neste caso, as capacidades em kVAr dos bancos de capacitores fixos e chaveados foram somadas, porém os bancos de capacitores foram simulados como fixos, ligados no barramento 380V logo após aos transformadores 13.8kV/0,38 KV dos setores CCM-I, CCM-II, setor A e setor C. Esse procedimento ocorre na prática, tendo em vista que na ocorrência de queima de controladores de bancos de capacitores chaveados, tais bancos são usados como fixos na indústria. As Figs. 34 e 35 mostram as tensões e fatores de potência nos setores A e CCM-II, respectivamente, considerando 40% da demanda da curva de carga. As Figs. 36 e 37 mostram as tensões e fatores de potência do restante dos setores, considerando 40% da demanda da curva de carga.

Figura 34 — Resultado Em Tensão Setor A e CCM II Com 40% Da Carga.



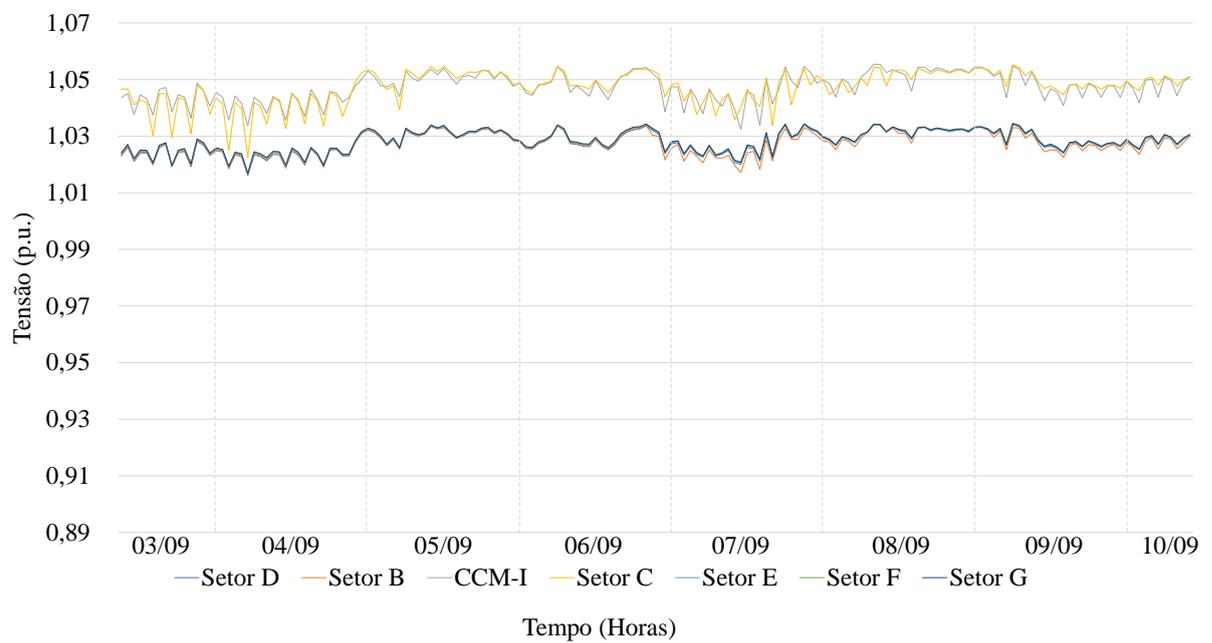
Fonte: Produção do Próprio Autor.

Figura 35— Fator de Potência Setor A e CCM II Com 40% Da Carga.



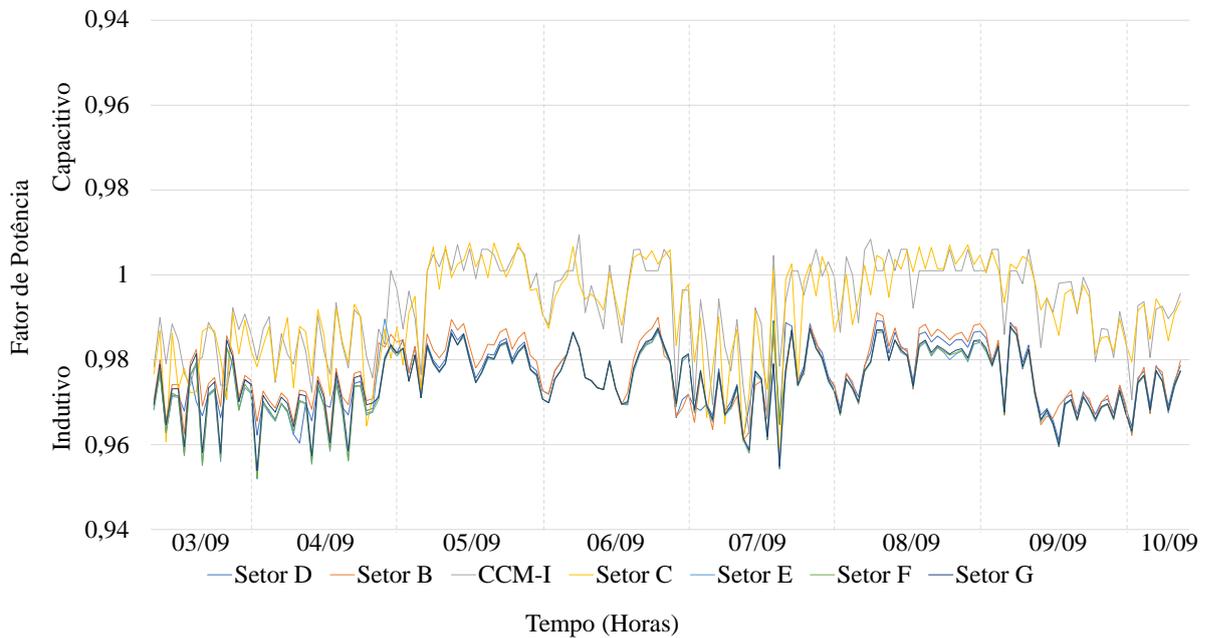
Fonte: Produção do Próprio Autor.

Figura 36 — Resultado Em Tensão Demais Setores Com 40% Da Carga.



Fonte: Produção do Próprio Autor.

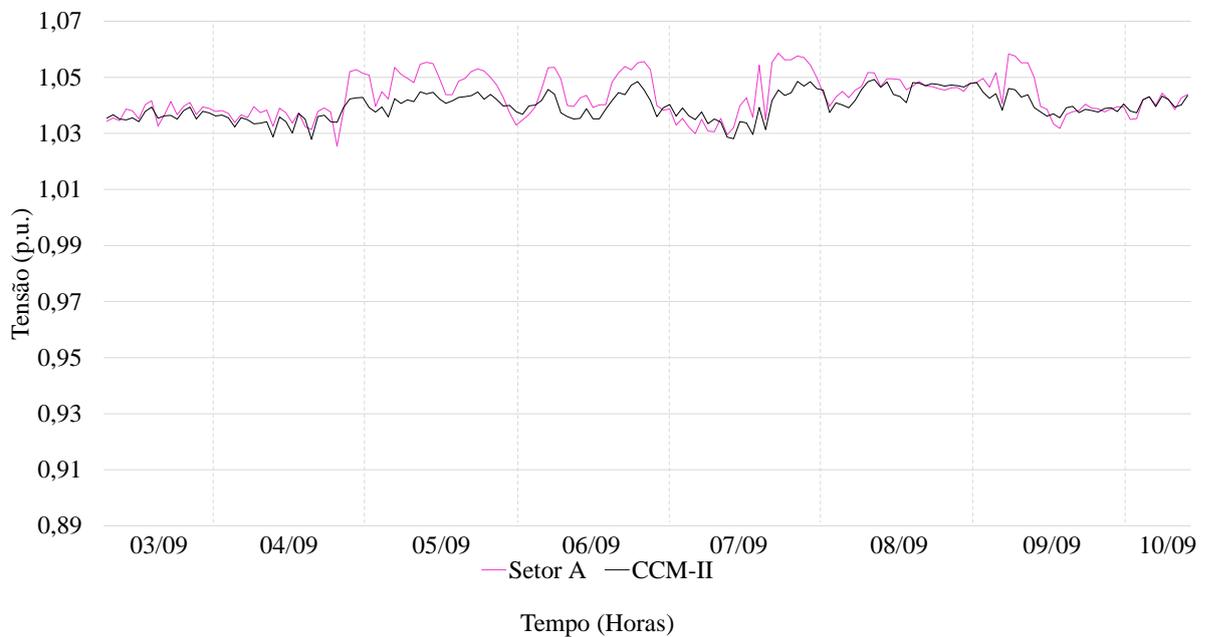
Figura 37 — Fator de Potência Demais Setores Com 40% Da Carga



Fonte: Produção do Próprio Autor.

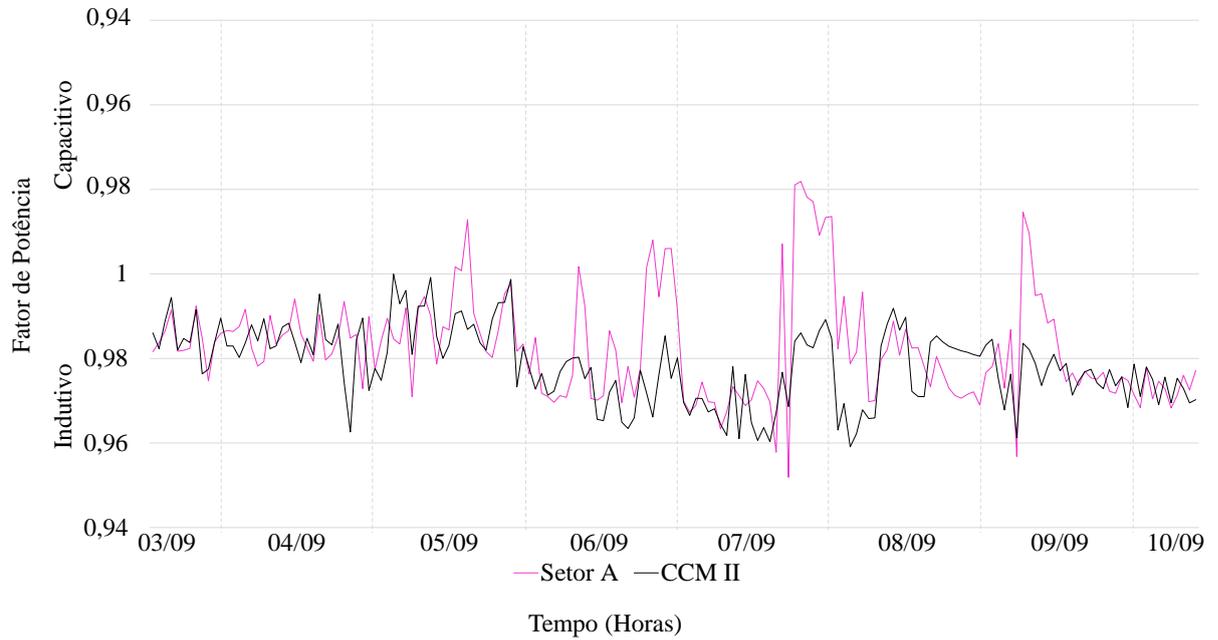
As Figuras 38 a 41 são resultados de tensão e fator de potência para uma redução de 30% da demanda da curva de carga.

Figura 38 — Resultado Em Tensão Do Setor A e CCM II Com 30% Da Carga.



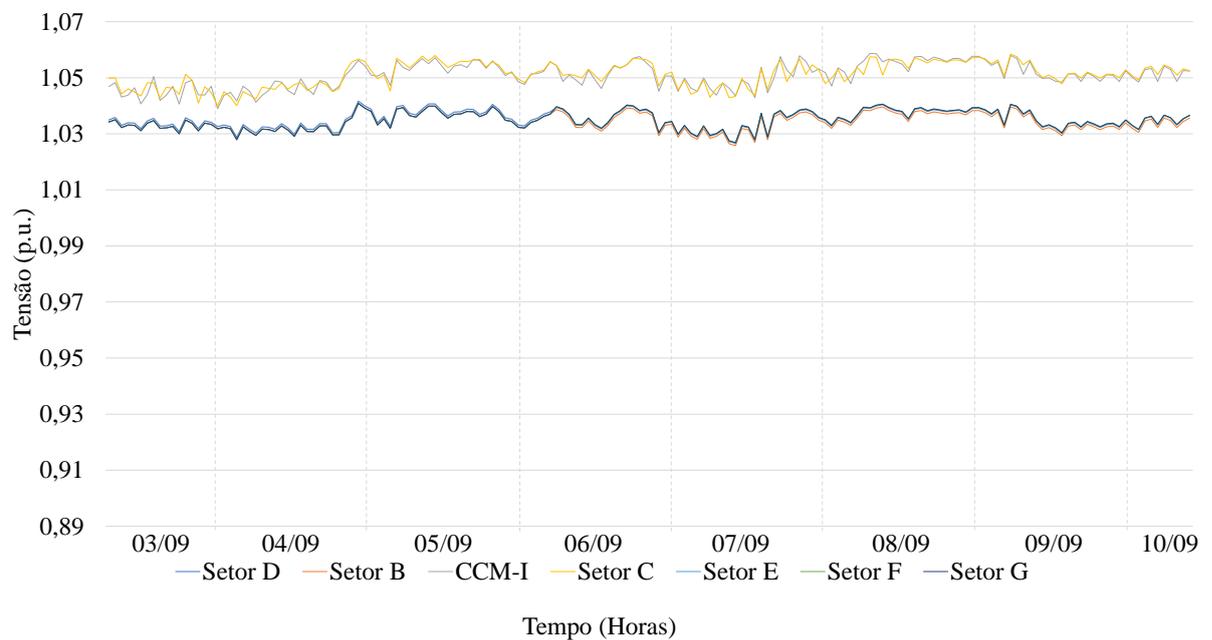
Fonte: Produção do Próprio Autor.

Figura 39 — Fator de Potência Do Setor A e CCM II Com 30% Da Carga.



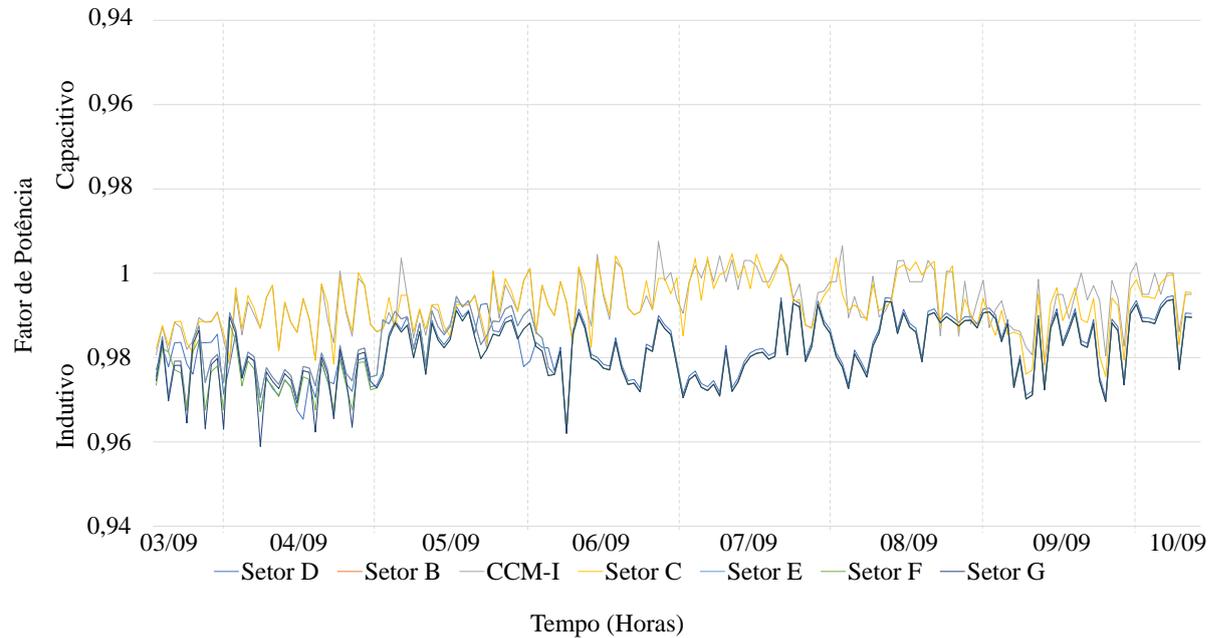
Fonte: Produção do Próprio Autor.

Figura 40 — Resultado Em Tensão Demais Setores Com 30% Da Carga.



Fonte: Produção do Próprio Autor.

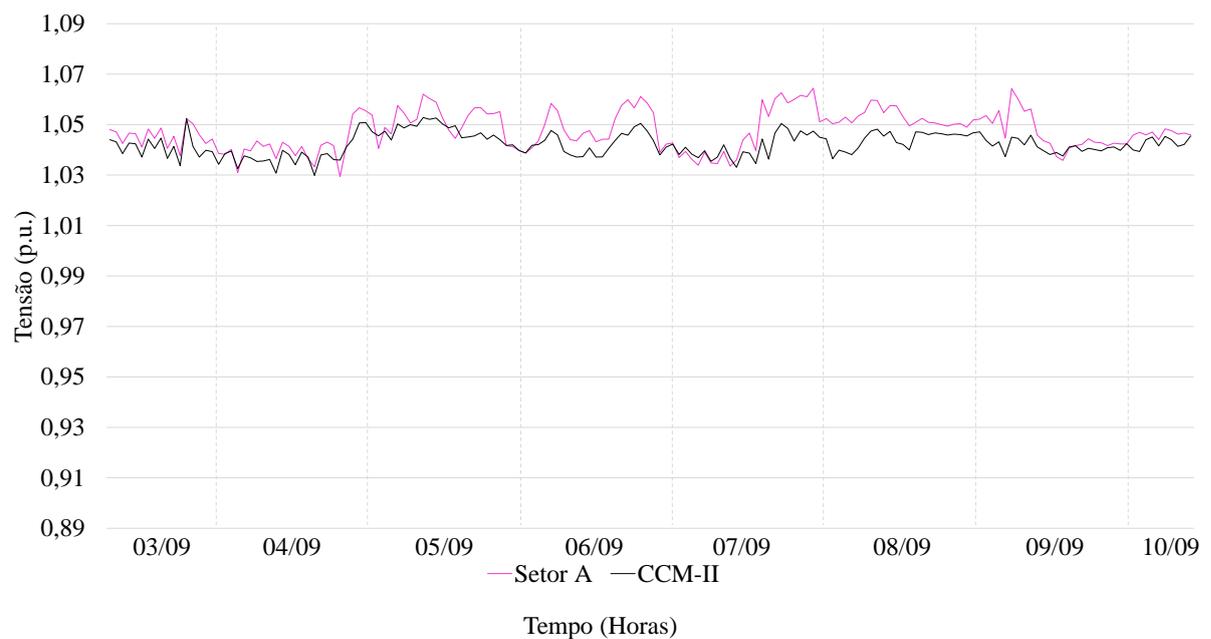
Figura 41 — Fator de Potência Demais Setores Com 30% Da Carga.



Fonte: Produção do Próprio Autor.

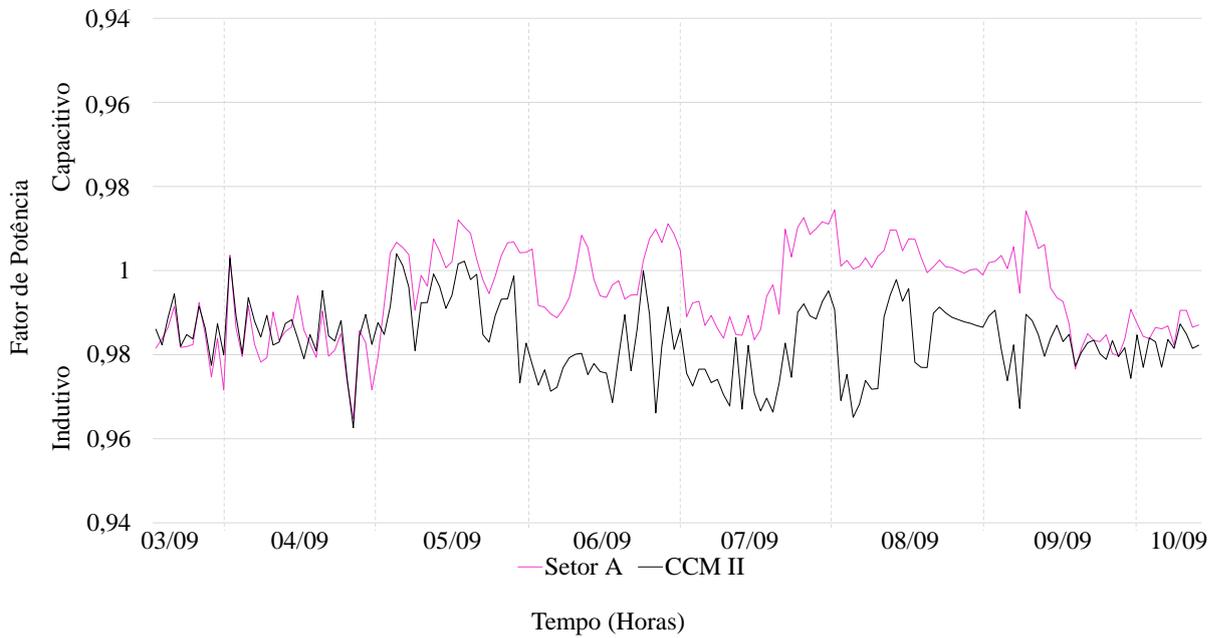
A partir da Figura 42 até a 45 são apresentados os resultados pertencentes as simulações com 20% da demanda das curvas de carga. Note que as sobretensões se agravaram para esse caso, e os fatores de potência ficaram capacitivos por períodos longos.

Figura 42 — Resultado Em Tensão Do Setor A e CCM II Com 20% Da Carga.



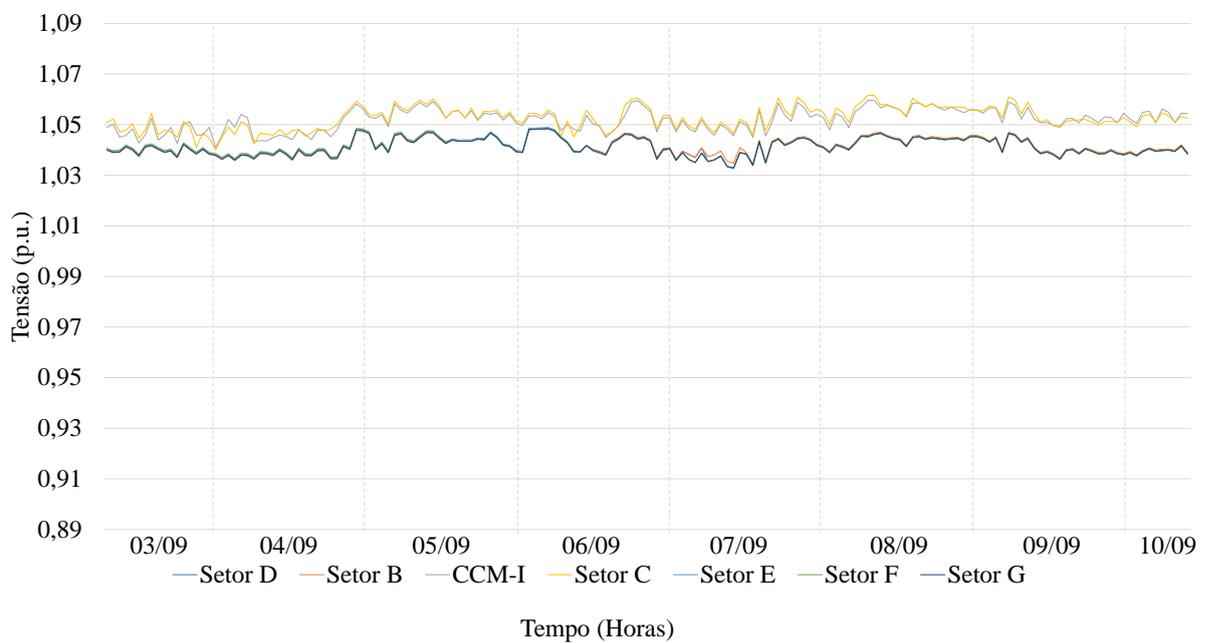
Fonte: Produção do Próprio Autor.

Figura 43 — Fator de Potência Do Setor A e CCM II Com 20% Da Carga.



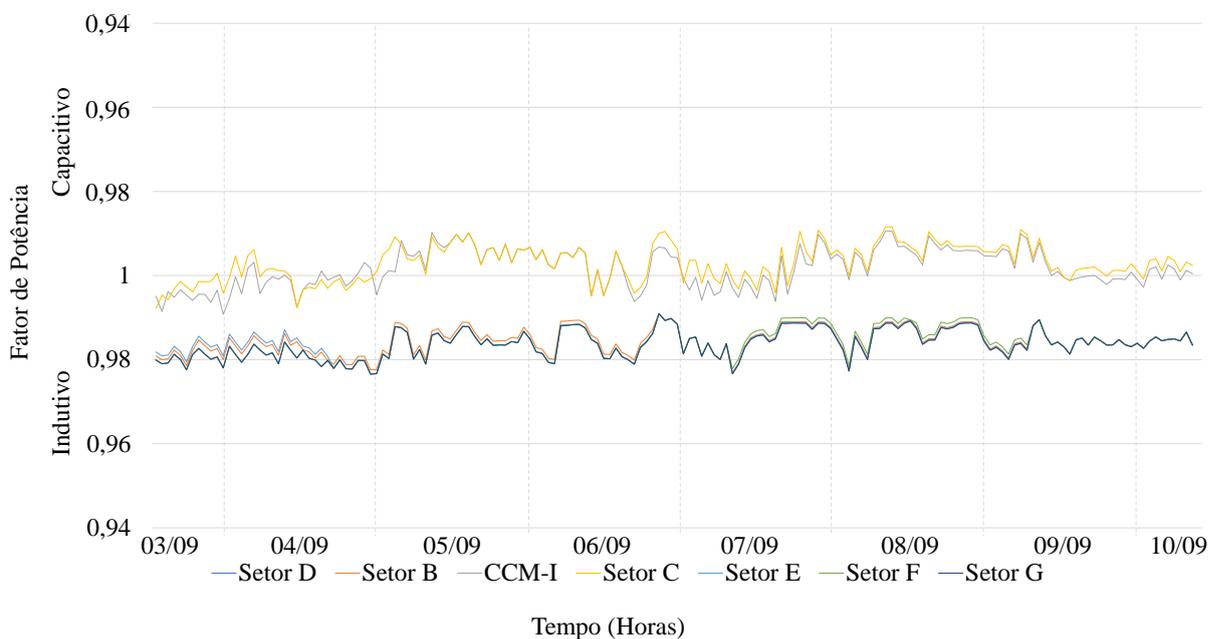
Fonte: Produção do Próprio Autor.

Figura 44 — Resultado Em Tensão Demais Setores Com 20% Da Carga.



Fonte: Produção do Próprio Autor.

Figura 45 — Fator de Potência Demais Setores Com 20% Da Carga.



Fonte: Produção do Próprio Autor.

### 5.3.3 Aplicação do Método de Mitigação

O método de mitigação está relacionado com o algoritmo descrito no fluxograma da figura 13. A tabela VII apresenta os valores de capacidade em kVAr dos bancos de capacitores fixo e chaveados aplicados nos setores CCM-II, CCM-I, A, C e subestação, respectivamente.

Tabela VII — Valores em kVAr utilizados para os bancos de capacitores fixos e chaveados.

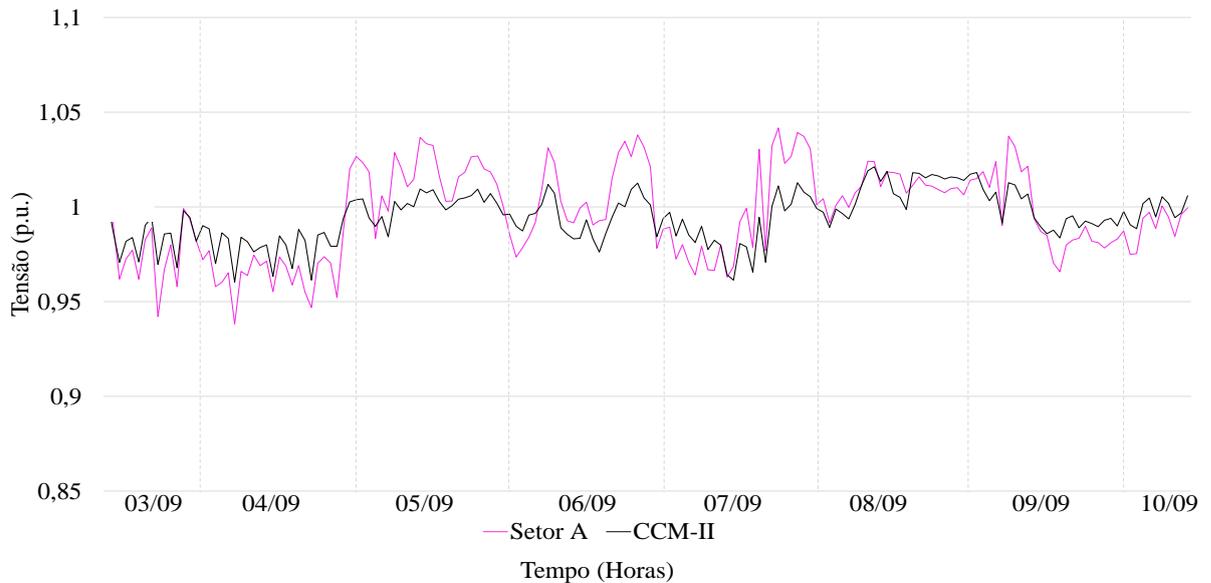
Local	Bancos de Capacitores Fixos (kVAr)	Banco de Capacitores Chaveados (kVAr)
CCM-II	150	275
CCM-I	165	275
Setor A	150	250
Setor C	120	250
Banco de Capacitores de entrada da Subestação	450	600

Fonte: Produção do Próprio Autor.

As Figs. 46 e 47 mostram as tensões e fatores de potência nos setores A e CCM-II, respectivamente, considerando 100% da demanda da curva de carga. As Figs. 48 e

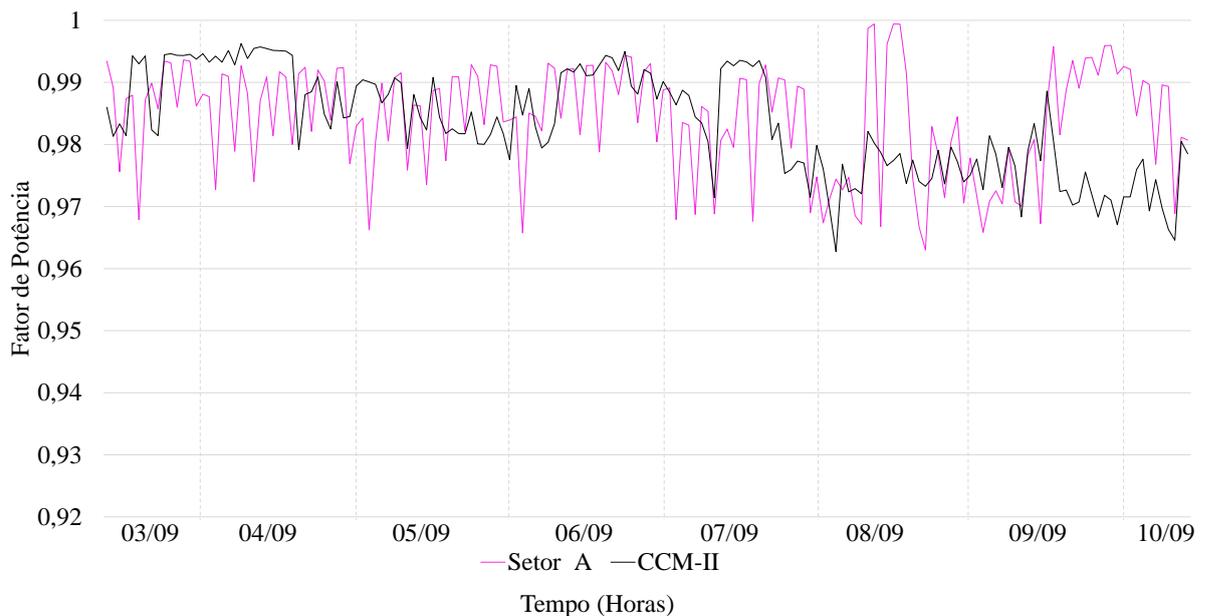
49 mostram as tensões e fatores de potência do restante dos setores, considerando 100% da demanda da curva de carga. É possível notar que o método proposto de mitigação baseado em compensação de potência reativa com banco de capacitores fixos e chaveados evita tanto violações de tensão quanto fator de potência abaixo de 0,92.

Figura 46 — Resposta Em Tensão Dos Setores A e CCM-II Após Modificação A 100% Da Carga.



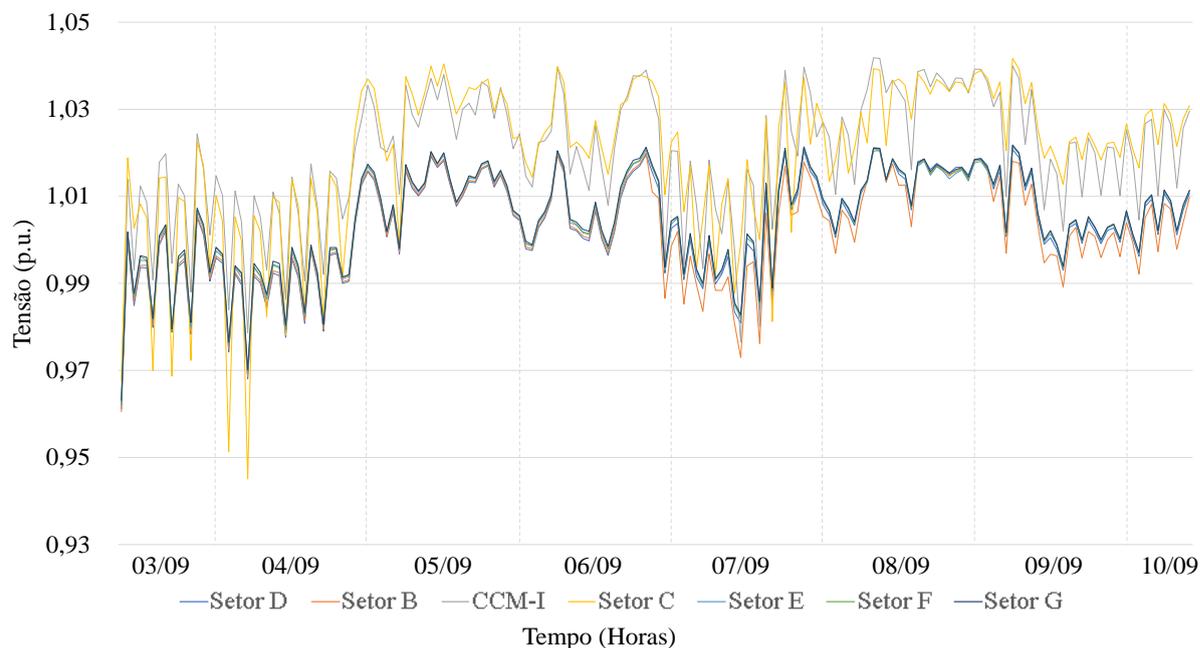
Fonte: Produção do Próprio Autor.

Figura 47 — Fator de Potência Dos Setores A e CCM-II Após Modificação A 100% Da Carga.



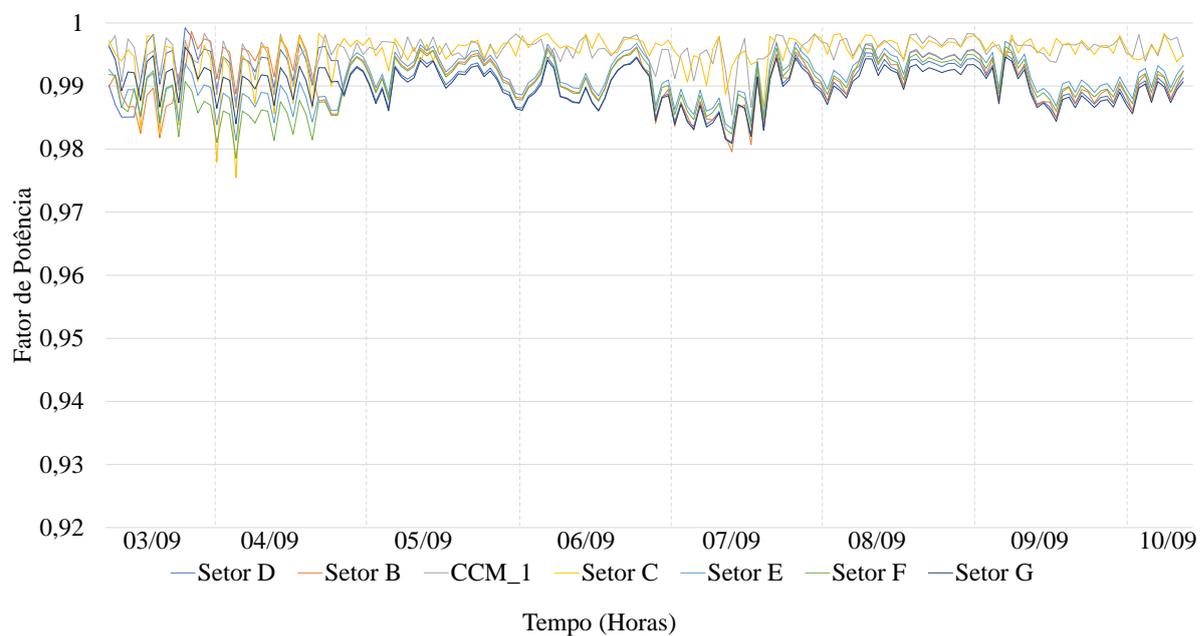
Fonte: Produção do Próprio Autor.

Figura 48 — Resposta Em Tensão Demais Setores Após Modificação A 100% Da Carga.



Fonte: Produção do Próprio Autor.

Figura 49 — Fator de Potência Demais Setores Após Modificação A 100% Da Carga.

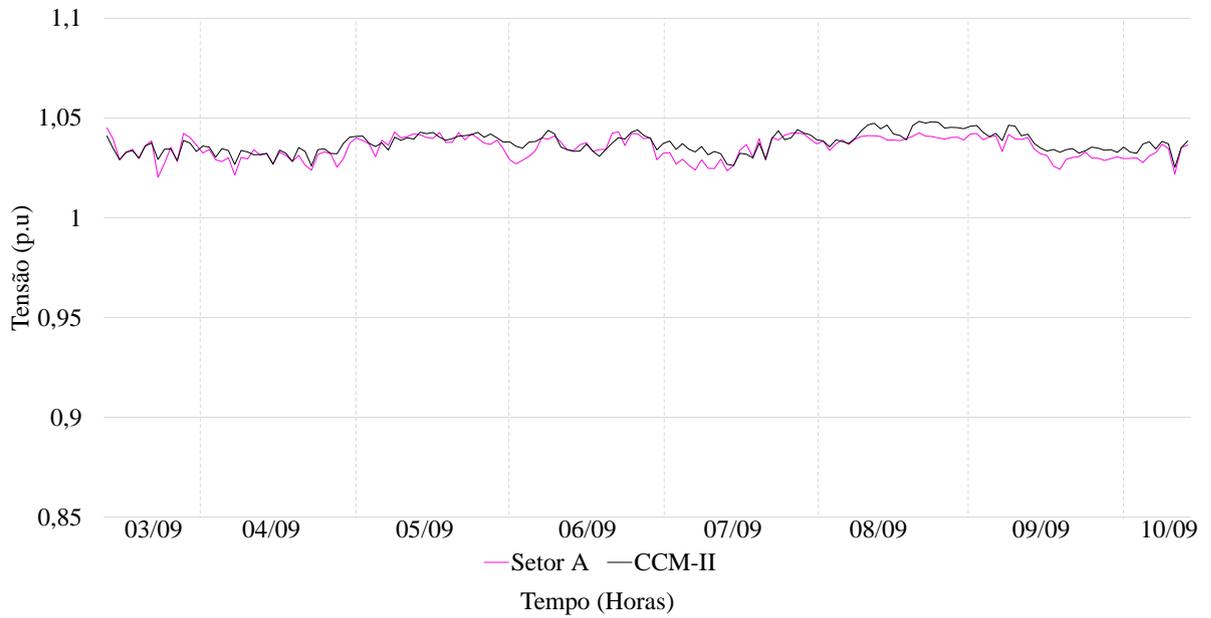


Fonte: Produção do Próprio Autor.

As Figs. 50 e 51 mostram as tensões e fatores de potência nos setores A e CCM-II, respectivamente, considerando 20% da demanda da curva de carga. As Figs. 52 e 53 mostram as tensões e fatores de potência do restante dos setores, considerando 20% da demanda da curva de carga. Observe que o método proposto de mitigação eliminou

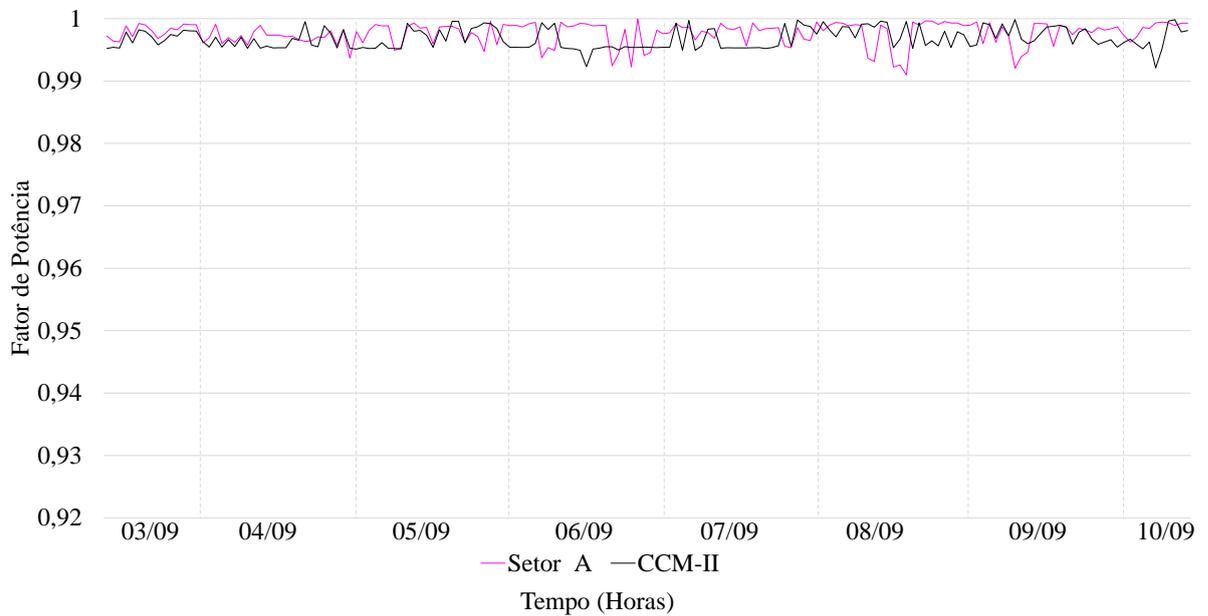
tanto sobretensão quanto fator de potência capacitivo.

Figura 50 — Resposta Em Tensão Dos Setores A e CCM-II Após Modificação A 20% Da Carga.



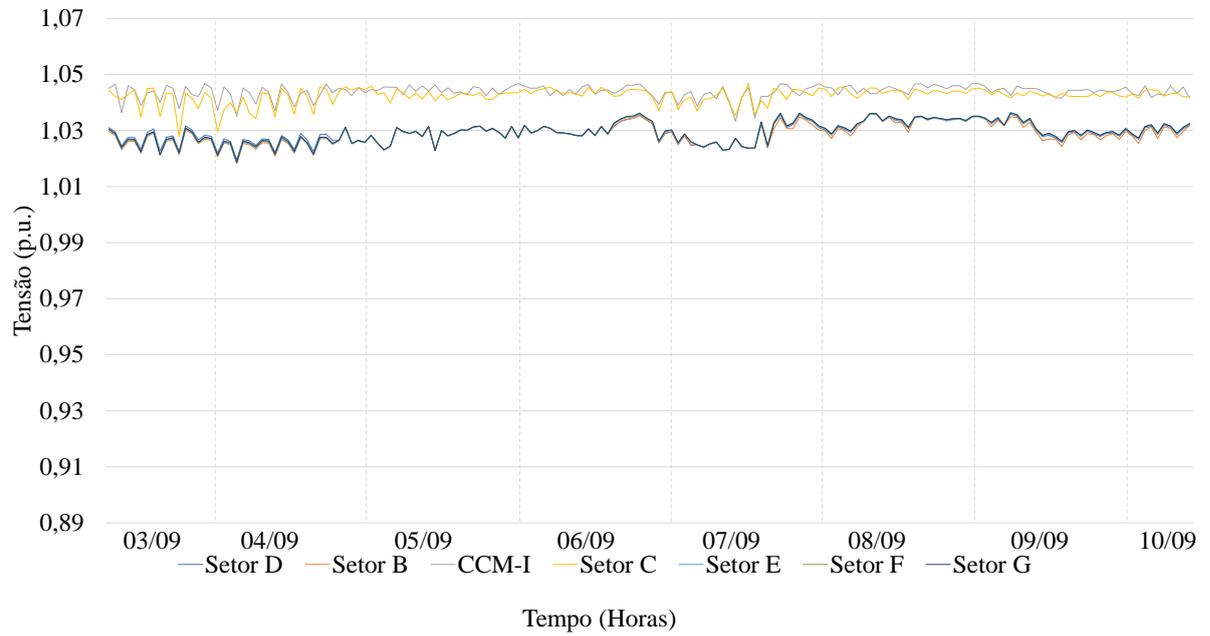
Fonte: Produção do Próprio Autor.

Figura 51 — Fator de Potência Dos Setores A e CCM-II Após Modificação A 20% Da Carga.



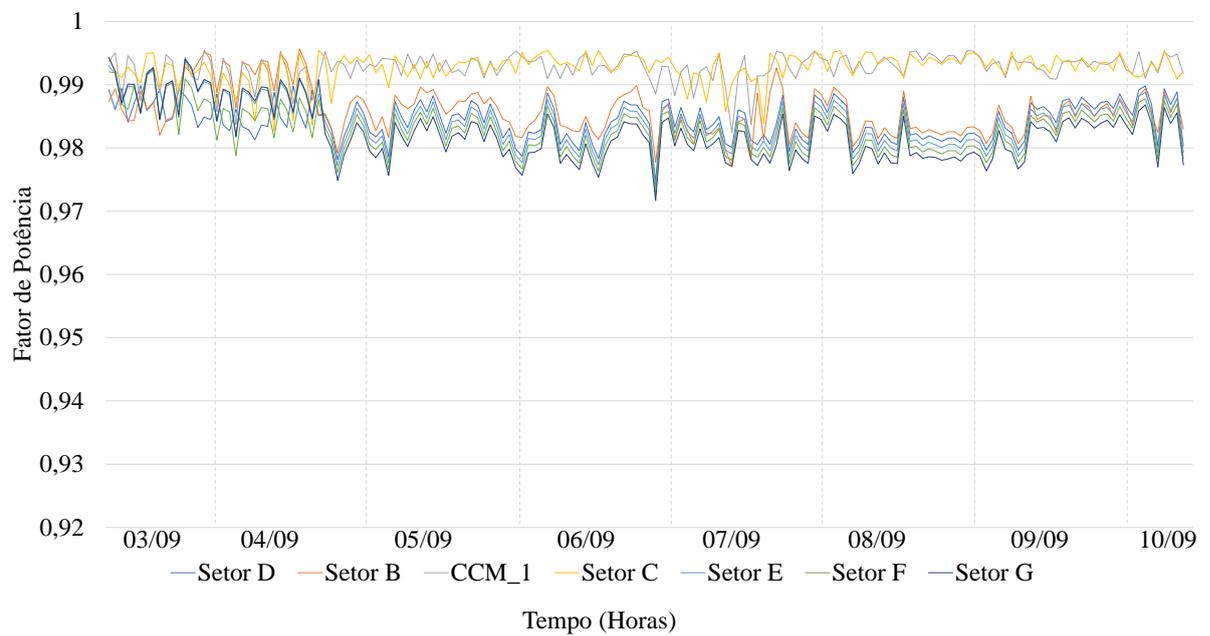
Fonte: Produção do Próprio Autor.

Figura 52 — Resposta Em Tensão Dos Demais Setores Após Modificação A 20% Da Carga.



Fonte: Produção do Próprio Autor.

Figura 53 — Fator de Potência Dos Demais Setores Após Modificação A 20% Da Carga



Fonte: Produção do Próprio Autor.

## 6. CONCLUSÃO

### 6.1 Considerações Finais

Esta dissertação de mestrado analisou o problema da variação de tensão em regime permanente em uma indústria cervejeira usando dados de uma campanha de medição realizada in loco e simulações via software OpenDSS.

Esse estudo foi motivado pela necessidade de atendimento das cargas em tensões adequadas, de forma a evitar mal funcionamento e queima em seus equipamentos na indústria, como foi mostrado, a empresa está tendo vários problemas com queima de equipamentos.

Para tanto, esta dissertação de mestrado usou um algoritmo de mitigação de variações de tensão em regime permanente (figura13) como base na compensação de potência reativa fornecida por bancos de capacitores fixos e chaveados.

Os resultados mostraram que o sistema industrial apresenta problemas de subtensões e fator de potência abaixo de 0,92 indutivo, isso quando somente banco de capacitores fixos são empregados. Vale ressaltar que esse caso representa a situação atual operativa da indústria cervejeira, onde tem banco de capacitores danificados nos setores mencionados do diagrama unifilar (figura 22) e controladores de banco de capacitores chaveados queimados. Em outro estudo de caso, os resultados mostraram que problemas de sobretensão e fator de potência capacitivo ocorrem quando a indústria opera em cenários reduzidos de carga e com banco de capacitores fixos. Cabe frisar que nesse caso, os bancos de capacitores chaveados foram considerados fixos na simulação, isso foi feito para mostrar a importância dos bancos de capacitores chaveados. E por fim, os resultados mostraram que a técnica de mitigação proposta evita violações de tensão em regime permanente e fator de potência abaixo de 0,92 e capacitivo, em cenários tanto de carga pesada quanto de carga leve. Cabe frisar que o método não provou que a variação da tensão foi a causa da queima dos equipamentos (tabela 1), pois a queima pode ser por vários motivos, como por exemplo aterramento inadequado, harmônicos, mal contato, etc.

Esta dissertação de mestrado destaca a importância do uso de bancos de capacitores fixos e chaveados para fins de controle de tensão em regime permanente em instalações elétricas industriais, principalmente para evitar sobretensões.

## 6.2 Trabalhos Futuros

- Implementar o algoritmo de mitigação proposto em hardware e realizar teste em campo;
- Estudo de viabilidade econômica da implementação do algoritmo de mitigação proposto;
- Desenvolver uma estratégia de controle de tensão na indústria usando somente banco de capacitores chaveados;
- Desenvolver um estudo de harmônicos na instalação elétrica da indústria.

## REFERÊNCIAS

ANEEL. **Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional Módulo 8 – Qualidade da Energia Elétrica**. Resolução Normativa nº 794/2017. A partir de 01/01/2018.

Boneberg, B. S. *et al.* **Qualidade de energia: estudo de caso de uma indústria metalmeccânica no sul do Brasil**. Rev. Elet. Cient. UERGS, v. 3, n. 2, p. 315-339, 2017

Christo, E. S. **Previsão de Potência Reativa**. 2005. 100 f. Tese apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Doutor pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da PUC-Rio. Rio de Janeiro. defendida em 26 de julho de 2005.

De Freitas, P. R. R. **Modelos avançados de análise de redes elétricas inteligentes utilizando o software OpenDSS**. São Paulo, 2015. 191 p.

Dugan, R. C. et al. **Electrical Power Systems Quality**. 2. ed. New York: McGrawHill Professional, 2004. 528 p. (MCGRAW HILL PROFESSIONAL ENGINEERING SERIES)

ENDRESS HAUSER. **Instrumentation In The Brewing Industry**: Automating the art of brewing, 2016.

FUCHS, R. D. **Transmissão de Energia Elétrica Linhas Aéreas**. Rio de Janeiro. LIVROS TÉCNICOS E CIENTÍFICOS EDITORA S.A, 1977.

Nakamura, R. D. R. **Instalação de Capacitores de Potência em Redes Poluídas por Harmônicos e com Baixa Potência de Curto-Circuito**. 2011. 118 f. Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da UFMG, Belo Horizonte, defendida em 27 de maio de 2011.

Natarajan, R. **Power System Capacitors**. Boca Raton: Taylor & Francis Group, 2005. 576 p.

Pimenta, R. C. **Compensação de Reativos Usando Bancos de Capacitores em Série em Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica**. Itatiba, 2011. 50 p.

Szuvovivski, I. **Alocação Simultânea de Bancos de Capacitores e Reguladores de Tensão em Sistemas de Distribuição Usando Algoritmos Genéticos e Fluxo de Potência Ótimo**. 2008. 207 f. Dissertação apresentada como requisito parcial à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica Universidade Federal do Paraná, Curitiba, defendida em 26 de março de 2008.

Siemens. **Manual Do Sistema Multimedidor Sentron PAC4200**. Edição maio de 2019. Disponível em:  
[https://cache.industry.siemens.com/dl/files/595/34261595/att\\_916603/v1/manual\\_pac4200\\_pt-BR\\_pt-BR.pdf](https://cache.industry.siemens.com/dl/files/595/34261595/att_916603/v1/manual_pac4200_pt-BR_pt-BR.pdf). Acesso em: 08 Dez. 2019.

SENAI. **Tecnologia Cervejeira**. Rio de Janeiro: GED - Gerência de Educação a Distância, 2014.

Short, T. **Electric Power Distribution Handbook**. Boca Raton: CRC Press, 2004. 898 p.

WEG. **Manual para Correção do Fator de Potência**. WEG Automação S.A. Disponível em: <https://static.weg.net/medias/downloadcenter/hea/h8b/WEG-correcao-do-fator-de-potencia-958-manual-portugues-br.pdf>. Acesso em: 08 Dez. 2019.