

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO Nº 1213

**ANÁLISE TÉCNICO-ECONÔMICA ENTRE SOLUÇÕES DE DISTÚRBIOS
DE QUALIDADE DE ENERGIA ELÉTRICA**

Bruna Rafaela Penido Conrado

DATA DA DEFESA: 27/11/2020

Bruna Rafaela Penido Conrado

**Análise Técnico-Econômica entre
Soluções de Distúrbios de Qualidade
de Energia Elétrica**

Belo Horizonte - Minas Gerais

Novembro, 2020

Universidade Federal de Minas Gerais

Escola de Engenharia

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

**ANÁLISE TÉCNICO-ECONÔMICA ENTRE SOLUÇÕES DE
DISTÚRBIOS DE QUALIDADE DE ENERGIA ELÉTRICA**

Bruna Rafaela Penido Conrado

Dissertação de Mestrado submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Danilo Iglesias Brandão

Belo Horizonte - MG

Novembro de 2020

C754a	<p>Conrado, Bruna Rafaela Penido. Análise técnico-econômica entre soluções de distúrbios de qualidade de energia elétrica [recurso eletrônico] / Bruna Rafaela Penido Conrado. - 2020. 1 recurso online (88 f. : il., color.) : pdf.</p> <p>Orientador: Danilo Iglesias Brandão. Coorientador: Alexandre Cândido Moreira</p> <p>Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.</p> <p>Anexos: f. 86-88</p> <p>Bibliografia: f. 80-85. Exigências do sistema: Adobe Acrobat Reader.</p> <p>1. Engenharia elétrica - Teses. 2. Indicadores econômicos - Teses. 3. Energia elétrica - Qualidade - Teses. I. Brandão, Danilo Iglesias. II. Moreira, Alexandre Cândido. III. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. IV. Título.</p> <p style="text-align: right;">CDU: 621.3(043)</p>
-------	---

**"Análise Técnico-econômica Entre Soluções de Distúrbios de
Qualidade de Energia Elétrica"**

Bruna Rafaela Penido Conrado

Dissertação de Mestrado submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

Aprovada em 27 de novembro de 2020.

Por:



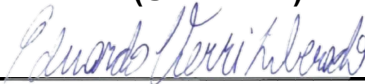
Prof. Dr. Danilo Iglesias Brandão
DEE (UFMG) - Orientador



Prof. Dr. ALEXANDRE CANDIDO MOREIRA
NIPEM (UFSJ)



Prof. Dr. Fernanda Caseño Trindade Arioli
FEEC (UNICAMP)



Prof. Dr. Eduardo Verri Liberado
Campus Rosana (UNESP)

*Dedico este trabalho à Deus e a minha família, especialmente aos meus queridos pais,
Irlene e Robson e aos meus irmãos, Junior e Carol.*

Agradecimentos

Primeiramente agradeço a Deus, por permitir que mais esse sonho fosse realizado. Por me dar força e sabedoria ao longo de toda essa jornada.

Em segundo lugar, aos meus pais Irlene e Robson, aos meus irmãos, Ana Carolina e Robson Júnior, por terem me dado apoio e condições para que chegasse até aqui, além de não medirem esforços por mais essa realização.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Danilo Iglesias, por todo apoio, pela ajuda e pelas orientações prestadas a mim ao longo do mestrado. Ao meu coorientador, Prof. Dr. Alexandre Moreira, por todo suporte, ensinamentos e “puxões de orelha”. Sem vocês esse sonho não seria realidade.

À UFMG e ao PPGEE, por proporcionar a formação profissional continuada com qualidade e competência. Em especial, aos Professores Sidelmo Silva, Igor Amariz, Frederico Gadelha e Rodney.

Ao Prof. Wesley Angelino e Prof. Eduardo Liberado, por todo conhecimento compartilhado e pelo acompanhamento desde o início desta jornada. Muito obrigada.

Aos colegas e amigos do mestrado, por todo apoio, ensinamentos, conselhos e pela amizade. Em especial, Sofia Falco, Bárbara Lemes, Laís Vitoi e Israel Divan.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

A todos o meu sincero agradecimento.

- ¹⁰ *Acolham minha disciplina, e não o dinheiro;
prefiram o conhecimento, e não o ouro puro,*
- ¹¹ *porque a Sabedoria vale mais do que as pérolas,
e nenhuma joia desejada a ela se compara.*
- ¹² *Eu, a Sabedoria, moro com a sagacidade,
tenho o conhecimento e o discernimento.*
- ¹⁷ *Eu amo os que me amam, e os que madrugam
à minha procura logo me encontrarão.*
- ¹⁸ *Comigo estão a riqueza e a honra, a fortuna
abundante e a justiça.*
- ¹⁹ *Meu fruto vale mais do que o ouro, do que o ouro mais puro,
e meus produtos valem mais do que prata selecionada.*
- Provérbios 9, 10-12;17-19*

Resumo

Esta dissertação tem como objetivo propor uma ferramenta computacional capaz de realizar uma análise técnico-econômica entre os diferentes compensadores utilizados para mitigar o excesso de circulação de potência reativa, harmônicos e desbalanço de carga em ambientes industriais. Problemas causados pelos índices de qualidade de energia elétrica baixos, como: diminuição da vida útil dos equipamentos, sobreaquecimento dos dispositivos e vibração de motores, elevado valor de corrente no condutor neutro, ressonâncias, erro no controle de conversores e o acionamento desregulado de proteções podem ser atenuados. Para tanto, é necessário realizar a instalação de diferentes equipamentos mitigadores existentes no mercado, como por exemplo, filtros ativos, filtros passivos e compensadores estáticos de reativos. A escolha do compensador adequado para mitigar o distúrbio elétrico, que mantenha os indicadores de qualidade de energia dentro dos limites estabelecidos por normas nacionais e internacionais e que seja viável economicamente é uma importante tarefa para os consumidores industriais. Dessa forma, desenvolveu-se uma ferramenta capaz de analisar o custo *versus* benefício de algumas soluções, e suas associações de compensação, verificando os benefícios econômicos da instalação do compensador e a atratividade financeira de sua implantação. Com o objetivo de avaliar essa ferramenta, tendo-se em vista condições reais de operação, foram realizados diferentes estudos de caso. Como resultado, o consumidor é informado se em um determinado período a melhor solução é o pagamento do consumo de energia reativa excedente na conta de energia elétrica, i.e., multa ou realizar investimento em equipamentos mitigadores.

Palavras-chave: Análise técnico-econômica, condicionadores, energia reativa, indicadores econômicos, qualidade da energia elétrica

Abstract

This dissertation aims at proposing a computational tool able of performing a technical-economic analysis between the different topologies of compensators used to mitigate the excessive circulation of reactive power, harmonics and unbalance load in industrial environments. Problems caused from low levels of power quality indices, such as shortened equipment life, overheating devices and motor vibration, high current value through the neutral conductor, resonances, error in converter control, mistriggering of protections, can be mitigated. Therefore, it is necessary to install different mitigating equipment available on the market, such as active filters, passive filters and static reactive compensators. The choice of the appropriate compensator to mitigate the electrical disturbance, which keeps the power quality indicators within the limits established by national and international standards and which is economically viable is an important task for industrial consumers. Thus, a tool is developed capable of analyzing the cost versus benefit of some solutions, and their compensation associations, verifying the economic benefits of installing the compensator and the financial attractiveness of its implementation. In order to evaluate this tool, considering real operating conditions, case studies are carried out. As a result, the consumer is informed whether, within a given period of time, the best solution will be paying the consumption and demand for surplus reactive energy in the electric bill or to investing in compensation equipment.

Keywords: Techno-economic assessment, conditioners, reactive energy, economic indexes, power quality

Lista de Figuras

Figura 1 – Custo das perdas financeiras estimado para a parada de até um minuto. <i>Reproduzido de Martinho [3]</i>	17
Figura 2 – Exemplo de registro de demanda.	25
Figura 3 – Exemplo de registro de demanda.	26
Figura 4 – Estrutura tarifária da atual legislação em vigor.	27
Figura 5 – Etapas da dinâmica de análise econômica.	32
Figura 6 – Diagrama de blocos da ferramenta proposta.	39
Figura 7 – Soluções de compensação do modelo classificador.	40
Figura 8 – Fluxograma do AG proposto.	50
Figura 9 – Fluxograma da ferramenta proposta.	54
Figura 10 – Diagrama unifilar do sistema elétrico simulado.	56
Figura 11 – Evolução dos indicadores antes da compensação: (a) Fator de desequilíbrio de tensão de sequência negativa e zero. (b) Distorção harmônica total de tensão. (c) Fatores de conformidade da carga e (d) Parcelas de potência da CPT para o estudo de caso 01 - cenário 01.	57
Figura 12 – Diagrama unifilar do sistema elétrico com o banco de capacitores.	58
Figura 13 – Evolução dos indicadores depois da compensação: (a) Fator de desequilíbrio de tensão de sequência negativa e zero. (b) Distorção harmônica total de tensão. (c) Fatores de conformidade da carga e (d) Parcelas de potência da CPT para o estudo de caso 01 - cenário 01.	59
Figura 14 – Evolução dos indicadores antes da compensação: (a) Fator de desequilíbrio de tensão de sequência negativa e zero. (b) Distorção harmônica total de tensão. (c) Fatores de conformidade da carga e (d) Parcelas de potência da CPT para o estudo de caso 01 - cenário 02.	60
Figura 15 – Evolução dos indicadores depois da compensação: (a) Fator de desequilíbrio de tensão de sequência negativa e zero. (b) Distorção harmônica total de tensão. (c) Fatores de conformidade da carga e (d) Parcelas de potência da CPT para o estudo de caso 01 - cenário 02.	61

Figura 16 – Evolução dos indicadores antes da compensação: (a) Fator de desequilíbrio de tensão de sequência negativa e zero. (b) Distorção harmônica total de tensão. (c) Fatores de conformidade da carga e (d) Parcelas de potência da CPT para o estudo de caso 02.	62
Figura 17 – Diagrama unifilar do sistema elétrico com filtro passivo.	63
Figura 18 – Evolução dos indicadores depois da compensação: (a) Fator de desequilíbrio de tensão de sequência negativa e zero. (b) Distorção harmônica total de tensão. (c) Fatores de conformidade da carga e (d) Parcelas de potência da CPT para o estudo de caso 02 - cenário 01.	64
Figura 19 – Evolução dos indicadores depois da compensação: (a) Fator de desequilíbrio de tensão de sequência negativa e zero. (b) Distorção harmônica total de tensão. (c) Fatores de conformidade da carga e (d) Parcelas de potência da CPT para o estudo de caso 02 - cenário 02.	66
Figura 20 – Evolução dos indicadores antes da compensação: (a) Fator de desequilíbrio de tensão de sequência negativa e zero. (b) Distorção harmônica total de tensão. (c) Fatores de conformidade da carga e (d) Parcelas de potência da CPT para o estudo de caso 03.	68
Figura 21 – Diagrama unifilar do sistema elétrico com o filtro ativo.	68
Figura 22 – Evolução dos indicadores depois da compensação: (a) Fator de desequilíbrio de tensão de sequência negativa e zero. (b) Distorção harmônica total de tensão. (c) Fatores de conformidade da carga e (d) Parcelas de potência da CPT para o estudo de caso 03.	69
Figura 23 – Evolução dos indicadores antes da compensação: (a) Fator de desequilíbrio de tensão de sequência negativa e zero. (b) Distorção harmônica total de tensão. (c) Fatores de conformidade da carga e (d) Parcelas de potência da CPT para o estudo de caso 04.	71
Figura 24 – Diagrama unifilar do sistema elétrico com o SVC.	71
Figura 25 – Evolução dos indicadores depois da compensação: (a) Fator de desequilíbrio de tensão de sequência negativa e zero. (b) Distorção harmônica total de tensão. (c) Fatores de conformidade da carga e (d) Parcelas de potência da CPT para o estudo de caso 04.	72
Figura 26 – Evolução dos indicadores antes da compensação: (a) Fator de desequilíbrio de tensão de sequência negativa e zero. (b) Distorção harmônica total de tensão. (c) Fatores de conformidade da carga e (d) Parcelas de potência da CPT para o estudo de caso 05.	73
Figura 27 – Diagrama unifilar do sistema elétrico com o SVC e filtro passivo.	74

Figura 28 – Evolução dos indicadores depois da compensação: (a) Fator de desequilíbrio de tensão de sequência negativa e zero. (b) Distorção harmônica total de tensão. (c) Fatores de conformidade da carga e (d) Parcelas de potência da CPT para o estudo de caso 05 - cenário 01.	75
Figura 29 – Diagrama unifilar do sistema elétrico com o SVC e filtro ativo.	76
Figura 30 – Evolução dos indicadores depois da compensação: (a) Fator de desequilíbrio de tensão de sequência negativa e zero. (b) Distorção harmônica total de tensão. (c) Fatores de conformidade da carga e (d) Parcelas de potência da CPT para o estudo de caso 05 - cenário 02.	76

Lista de Tabelas

Tabela 1 – Fator de potência de referência adotado em alguns países [1].	23
Tabela 2 – Subgrupos e suas respectivas tensões de fornecimento [2].	24
Tabela 3 – Feriados nacionais e suas respectivas leis federais [2].	25
Tabela 4 – Enquadramento tarifário grupo A.	27
Tabela 5 – Nomenclaturas adotadas por concessionária de energia para as parcelas de energia reativa excedente.	30
Tabela 6 – Limites de distorção de corrente para sistemas de distribuição geral [9].	42
Tabela 7 – Soluções de mitigação para compensação de reativo e harmônicos de acordo do com o sistema especialista proposto em Moreira et al. [17]. .	45
Tabela 8 – Tarifas e constantes de medição adotadas para faturamento.	46
Tabela 9 – Exemplo hipotético do custo do equipamento e dos fatores de QEE e da CPT obtidos após instalação do mesmo.	48
Tabela 10 – Dados técnicos do transformador.	56
Tabela 11 – Parâmetros da concessionária de energia supridora.	56
Tabela 12 – Faturamento de energia e demanda reativa excedente anual para o estudo de caso 01 - cenário 01.	58
Tabela 13 – Simulação do financiamento para aquisição do equipamento mitigador para o estudo de caso 01 - cenário 01.	59
Tabela 14 – Indicadores de viabilidade econômica para o estudo de caso 01 - cenário 01.	60
Tabela 15 – Faturamento de energia e demanda reativa excedente anual para o estudo de caso 01 - cenário 02.	61
Tabela 16 – Indicadores de viabilidade econômica para o estudo de caso 01 - cenário 02.	62
Tabela 17 – Faturamento de energia e demanda reativa excedente anual para o estudo de caso 02.	63
Tabela 18 – Especificações dos filtros harmônicos para o estudo de caso 02 - cenário 01.	64
Tabela 19 – Simulação do financiamento para aquisição do equipamento mitigador para o estudo de caso 02 - cenário 01.	65

Tabela 20 – Indicadores de viabilidade econômica para o estudo de caso 02 - cenário 01.	65
Tabela 21 – Especificações dos filtros harmônicos para o estudo de caso 02 - cenário 02.	65
Tabela 22 – Simulação do financiamento para aquisição do equipamento mitigador para o estudo de caso 02 - cenário 02.	66
Tabela 23 – Indicadores de viabilidade econômica para o estudo de caso 02 - cenário 02.	66
Tabela 24 – Pesos e PQI obtidos de cada uma das soluções para o estudo de caso 02.	67
Tabela 25 – Faturamento de energia e demanda reativa excedente anual para o estudo de caso 03.	68
Tabela 26 – Simulação do financiamento para aquisição do equipamento mitigador para o estudo de caso 03.	69
Tabela 27 – Indicadores de viabilidade econômica para o estudo de caso 03.	70
Tabela 28 – Faturamento de energia e demanda reativa excedente anual para o estudo de caso 04.	71
Tabela 29 – Simulação do financiamento para aquisição do equipamento mitigador para o estudo de caso 04.	73
Tabela 30 – Indicadores de viabilidade econômica para o estudo de caso 04.	73
Tabela 31 – Faturamento de energia e demanda reativa excedente anual para o estudo de caso 05.	74
Tabela 32 – Simulação do financiamento para aquisição do equipamento mitigador para o estudo de caso 05 - cenário 01.	75
Tabela 33 – Indicadores de viabilidade econômica para o estudo de caso 05 - cenário 01.	75
Tabela 34 – Simulação do financiamento para aquisição do equipamento mitigador para o estudo de caso 05 - cenário 02.	77
Tabela 35 – Indicadores de viabilidade econômica para o estudo de caso 05 - cenário 02.	77
Tabela 36 – Pesos e PQI obtidos de cada uma das soluções para o estudo de caso 05.	77

Sumário

1	Introdução	16
1.1	Objetivos	18
1.1.1	Objetivo Geral	18
1.1.2	Objetivos Específicos	18
1.2	Justificativa e Motivação	19
1.3	Organização do Texto	20
2	Fator de Potência em Instalações Consumidoras Legislação em Vigor	22
2.1	Fator de Potência	22
2.2	Considerações Preliminares	24
2.2.1	Classificação dos Consumidores e Posto Tarifário	24
2.2.2	Demanda	25
2.2.3	Modalidade Tarifária	26
2.3	Legislação em Vigor e Faturamento	28
3	Fundamentação Teórica - Análise Econômica	31
3.1	Decisão de Financiamento	32
3.2	Fluxo de Caixa	34
3.3	Análise da Viabilidade Econômica	35
3.3.1	Taxa Mínima de Atratividade	36
3.3.2	Valor Presente Líquido	36
3.3.3	Taxa Interna de Retorno	37
3.3.4	Payback Simples	37
3.3.5	Payback Descontado	37
4	Ferramenta Proposta	38
4.1	Análise da Instalação Elétrica	38
4.1.1	Classificador	40
4.2	Custo do Compensador	43
4.3	Análise do Faturamento de Energia Reativa	46
4.3.1	Revisão Tarifária	46
4.4	Análise da Viabilidade Econômica	47
4.5	Tomada de Decisão Entre Duas ou Mais Soluções de Compensação	48
4.5.1	Formulação do Problema	49
4.5.2	Algoritmo Genético	52
5	Resultados e Discussões	55
5.1	Características Gerais da Instalação Elétrica Analisada	55
5.2	Estudo de Caso 01 - Banco de Capacitores Trifásicos	57
5.2.1	Cenário 01	57

5.2.2	Cenário 02	60
5.3	Estudo de Caso 02 - Filtro Passivo Trifásico	62
5.3.1	Cenário 01	63
5.3.2	Cenário 02	65
5.4	Estudo de Caso 03 - Filtro Ativo Paralelo Trifásico	67
5.5	Estudo de Caso 04 - Compensador Estático de Reativos	70
5.6	Estudo de Caso 05 - SVC e Filtro Passivo / SVC e Filtro Ativo	73
5.6.1	Cenário 01	74
5.6.2	Cenário 02	76
6	Conclusão	79
6.1	Continuidade do Trabalho	80
6.2	Publicações	80
6.2.1	Publicações Relacionadas a Dissertação de Mestrado	80
6.2.2	Outras Publicações Durante o Período de Mestrado	81
	Referências	82
	Apêndice A Teoria de Potência Conservativa	88

Capítulo 1

Introdução

Nos últimos anos, as preocupações com os diversos temas relacionados à Qualidade da Energia Elétrica (QEE) têm sido cada vez mais comuns entre as concessionárias de energia elétrica e consumidores em geral, principalmente no segmento industrial. Por parte da concessionária, tal preocupação decorre pela obrigatoriedade da adequação às normas e legislações que regem o mercado de energia elétrica. Já para as indústrias, essa preocupação tem se tornado mais evidente devido a diversos fatores, entre os quais pode-se citar os prejuízos financeiros acarretados pelo índice de QEE baixo [1].

Hoje, a maioria das indústrias já realizam estudos sobre índices de paradas por afundamento, adequação do fator de potência ao limite estabelecido na Resolução Normativa nº414 [2], e em alguns casos estudos sobre os harmônicos, porém essa preocupação ainda é pequena se comparada com necessidade e principalmente com as perdas geradas.

Diversos termos são utilizados para definir os problemas relacionados ao baixo índice de qualidade de energia, como: sag, swell, *flicker*, afundamento/elevação de tensão, ruídos, interrupção, harmônicos, excesso de reativos, entre outros. Todas estas nomenclaturas expressam algum distúrbio de QEE, e conseqüentemente, passam a ser alvo da preocupação de profissionais encarregados de manter os níveis dentro dos limites estabelecidos em normas ou até mesmo limites estabelecidos por fabricantes de equipamentos utilizados nas indústrias. Esses fenômenos, quando ocorrem, prejudicam de uma forma ou de outra, seja a produtividade, segurança das pessoas ou a economia do setor, acarretando elevação de custos do produto [3].

Pode-se citar como exemplo uma indústria de bebidas, mas o mesmo conceito pode ser aplicado à maioria das empresas em que a automação possui um nível elevado para garantir eficiência e produtividade. Neste tipo de empresa, a qualidade de energia passa a depender de alguns parâmetros, não somente ligados à interrupção de energia de longa duração, mas com o nível de tensão e corrente, interrupção de curta duração, *flicker*, harmônicos e etc, ou seja, qualquer dano a equipamentos prejudica ou causa paradas na linha de produção, acarretando principalmente prejuízos financeiros.

Segundo Martinho [3], a simples interrupção de equipamentos em um minuto pode causar prejuízos da ordem de milhares de dólares em alguns segmentos como mostra o estudo ilustrado na Figura 1. Os maiores prejudicados são os segmentos das indústrias têxtil, siderúrgicas, refinarias de petróleo, equipamentos eletrônicos e mineração. Em média, cada minuto de interrupção chega a acarretar prejuízos nas indústrias siderúrgicas de US\$ 100 mil, para as refinarias de petróleo em torno de US\$ 280 mil e no setor têxtil cerca de US\$ 320 mil.

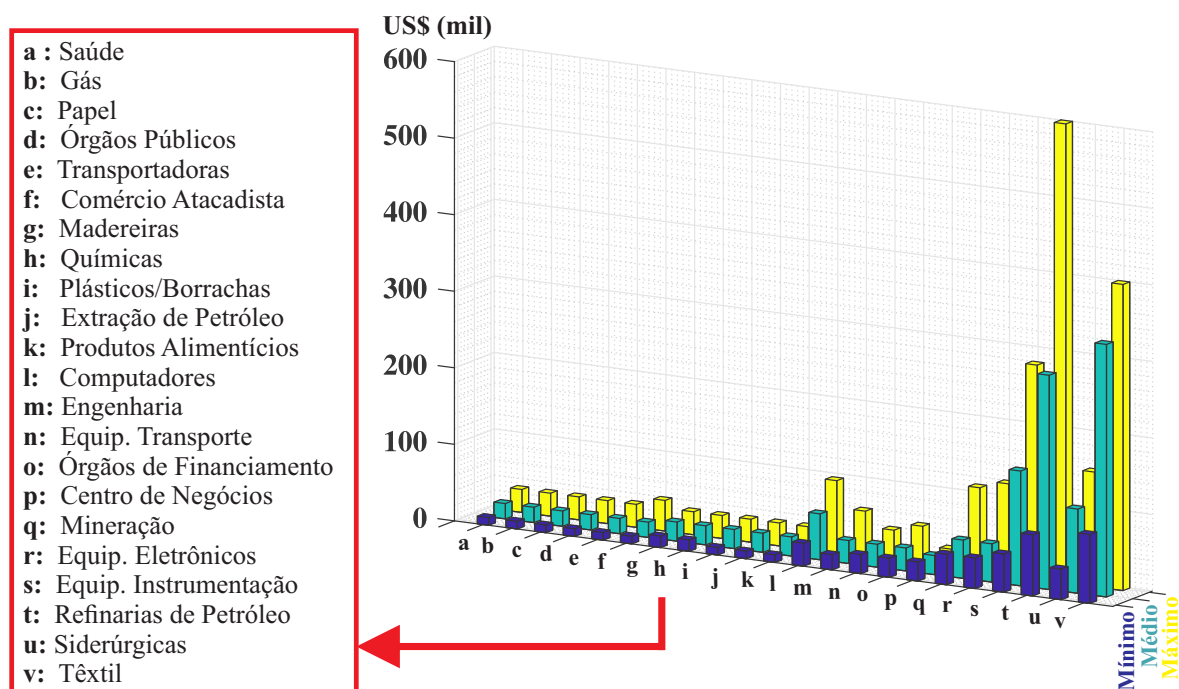


Figura 1 – Custo das perdas financeiras estimado para a parada de até um minuto. *Reproduzido de Martinho [3]*

No cenário nacional, em um relatório realizado para a ANEEL [4], os autores afirmam que para os consumidores do grupo A, a média de prejuízo é cerca de R\$ 15,70 reais para cada kWh consumido. No cenário internacional, alguns estudos apontam os custos da má qualidade de energia elétrica. Alguns estudos apontam [5–7] o custo de US\$ 10 bilhões de dólares, por ano, de prejuízo pela indústria manufatureira americana.

A norma europeia EN 50160 [8] fornece informações dos parâmetros aceitáveis de qualidade da energia sob as condições normais de operação para os consumidores no Ponto de Acoplamento Comum (PAC), para baixa, média e alta tensões no sistema de distribuição. A norma IEEE Std 519 [9], descreve os níveis aceitáveis de harmônicas para o ponto de entrega da energia pela concessionária. A norma IEC 61000 [10] apresenta vários aspectos relacionados à qualidade de energia, como medições, parâmetros para equipamentos, entre outros.

Para minimizar os efeitos dos problemas relacionados à QEE, as concessionárias

e indústrias recorrem à instalação de diferentes equipamentos mitigadores existentes no mercado, como por exemplo, filtros ativos [11], filtros passivos [12,13] e compensadores estáticos de reativos [14].

No sistema elétrico, de modo geral, para minimizar o conteúdo harmônico, recorre-se à filtragem da tensão ou da corrente. Os filtros podem ser do tipo passivo ou ativo [15]. Em relação à compensação de potência reativa, um maior grau de flexibilidade em termos de dispositivos que atendam tal demanda pode ser obtido utilizando, por exemplo, os Compensadores Estáticos de Reativos (do inglês, *Static Var Compensator* – SVC). Nestes sistemas, a impedância dos elementos armazenadores de energia pode variar no tempo dentro de um intervalo específico. Os elementos básicos dos SVCs são os Capacitores Chaveados a Tiristor (TSC) [14] e os Reatores Controlados a Tiristor (TCR) [16]. Tendo em vista o exposto, existem várias opções para a compensação da circulação de potência reativa, harmônicos e desbalanço de carga. Além disso, é possível realizar combinações entre essas soluções.

Dessa forma, desenvolveu-se uma ferramenta capaz de analisar o custo *versus* benefício de algumas soluções de compensação, instalação e atratividade financeira de sua implantação.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo Geral

Considerando o contexto exposto, no qual apresenta as questões e desafios relacionados à qualidade da energia elétrica nas redes de distribuição, este trabalho tem como objetivo apresentar a implementação de uma ferramenta computacional capaz de realizar uma análise técnico-econômica entre os diferentes compensadores utilizados para mitigar o excesso de circulação de energia reativa, harmônicos e desbalanço de carga em ambientes industriais.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Realizar um estudo detalhado e levantar o custo de cada solução de compensação proposta por Moreira et al. [17] através de buscas nas principais bases de dados e contatos com empresas especializadas na fabricação e instalação destas soluções de compensação;
- Desenvolver as formulações matemáticas para análise das soluções de compensação apresentadas pelo sistema especialista desenvolvido por Moreira et al. [17];

- Desenvolver uma ferramenta computacional que possa ser utilizada por concessionárias de energia, universidades, indústrias ou empresas de consultoria que seja capaz de indicar de forma automática a solução com melhor custo \times benefício dentre aquelas indicadas para a mitigação do distúrbio de QEE;
- Avaliação da ferramenta a ser desenvolvida através da comparação dos resultados obtidos teoricamente e por simulações computacionais de redes conhecidas afetadas com os diversos distúrbios de QEE.

1.2 Justificativa e Motivação

Verifica-se que são várias as opções para a compensação da circulação de potência reativa, harmônicos e desbalanço de carga. Além disso, existem as possíveis combinações entre as soluções para mitigar determinado distúrbio. Neste sentido, em Moreira et al. [17] apresentou-se um algoritmo para a tomada de decisões que leva em consideração a correta solução técnica para mitigação do distúrbio para determinada instalação industrial.

O Sistema Especialista (SE) desenvolvido por Moreira et al. [17], baseia-se na medição das tensões e correntes instantâneas, decomposição das parcelas de potência conforme proposto pela Teoria de Potência Conservativa (do inglês, *Conservative Power Theory* - CPT) [18] e no cálculo dos fatores de conformidade da carga [19]. Após, o modelo classificador utiliza estes dados como entrada e sugere a melhor solução técnica dentre todas as soluções disponíveis.

No entanto, o SE desenvolvido não realiza a análise do custo \times benefício das soluções sugeridas. Por exemplo, no caso de uma indústria que em determinados momentos do dia ou da semana viola do fator de potência e que, por consequência, é tarifada pelo consumo e demanda de energia reativa excedente. Neste caso, o SE irá sugerir o compensador adequado para evitar tal violação. No entanto, o consumidor não será informado se a melhor solução é manter o pagamento da tarifa na conta de energia ou o investimento em um equipamento que compense o distúrbio. É importante destacar que dependendo do comportamento da carga pode-se sugerir duas ou mais soluções, sendo classificadas em ordem de prioridade técnica. Sendo assim, o SE também não informará dentre as soluções sugeridas qual possui o menor custo ou aquela que possui a melhor relação custo \times benefício.

Desta forma, pretende-se com este trabalho agregar uma análise econômica inteligente ao algoritmo proposto em Moreira et al. [17] para a tomada de decisões que leve em consideração a correta solução para a mitigação dos distúrbios de qualidade da energia elétrica de forma a atender a concessionária e também ao interesse do consumidor (custo).

O desafio da presente proposta é realizar uma análise financeira, levando em consi-

deração o custo de cada solução, custo de instalação, as tarifas por consumo e demanda reativa excedente, violação dos indicadores de QEE, empregando-se técnicas de inteligência e análise financeira, de forma a obter a solução ótima dentre aquelas sugeridas pelo SE.

A avaliação da ferramenta proposta será realizada através de simulações computacionais de diferentes estudos de casos de uma indústria com cargas lineares e não lineares conectadas à rede. O objetivo é analisar o desempenho da ferramenta diante de diferentes distúrbios de QEE.

1.3 Organização do Texto

O presente trabalho está estruturado em seis capítulos, referências bibliográficas e apêndice, conforme a estruturação apresentada a seguir.

O Capítulo 2 propõe-se a revisar alguns aspectos importantes relativos ao fator de potência, objetivando o nivelamento inicial de informações e a apresentação de conceitos que constituem a base geral para o entendimento dos assuntos tratados nos capítulos seguintes. Além disso, aborda-se a legislação atualmente em vigor para monitoramento e faturamento do fator de potência em instalações consumidoras por parte das concessionárias de energia elétrica. O texto encontra-se estruturado de maneira sucinta e objetiva, possibilitando ao leitor o entendimento da tarifação por baixo valor do fator de potência.

O Capítulo 3 apresenta alguns aspectos relacionados a investimentos (financiamento) em equipamentos/máquinas, indicadores econômicos e algumas técnicas de análise de projetos, objetivando o nivelamento inicial de informações e a apresentação de conceitos que constituem a base geral para o entendimento da ferramenta proposta.

No Capítulo 4, expõe-se de forma detalhada a ferramenta proposta, que deve ser capaz de realizar a tomada de decisão indicando a melhor solução técnico-econômica de compensação para a rede elétrica sob análise. Sendo dividida em quatro etapas: (1) Análise da instalação elétrica; (2) Levantamento do custo da(s) solução(ões) sugerida(s); (3) Análise do faturamento do consumo e demanda de energia reativa excedente e (4) Análise da viabilidade econômica. Ao final do capítulo, apresenta-se a tomada de decisão para casos em que o classificador indique duas ou mais soluções de compensação viáveis economicamente, caso resulte em somente uma solução, essa etapa não é necessária.

No Capítulo 5, a ferramenta será analisada através de simulações computacionais para diferentes estudos de casos. Foi possível modelar e simular o sistema elétrico com diferentes combinações de cargas, com o objetivo de analisar a rede diante de diferentes distúrbios de QEE. Serão apresentados cinco estudos de casos, sendo: instalação de (1) banco de capacitores, (2) filtro passivo trifásico e banco de capacitores fixos, (3) filtro

ativo paralelo trifásico, (4) compensador estático de reativos e (5) SVC e filtro passivo série ou SVC e filtro ativo.

Por último, no Capítulo 6, apresenta-se as conclusões finais do trabalho e algumas propostas para trabalhos futuros, além de indicar publicações realizadas ao longo do desenvolvimento deste trabalho.

Capítulo 2

Fator de Potência em Instalações Consumidoras Legislação em Vigor

Neste capítulo, propõe-se revisar alguns aspectos importantes relativos ao fator de potência, objetivando o nivelamento inicial de informações e a apresentação de conceitos que constituem a base geral para o entendimento dos assuntos tratados nos capítulos seguintes. Embora a ferramenta desenvolvida neste trabalho aborde também outros indicadores de QEE, como fator de reatividade (λ_Q), fator de distorção (λ_D), fator de desbalanceamento (λ_U), fator de desequilíbrio de tensão (KV_1) e distorção harmônica total de tensão (DHT_V), este capítulo destaca aspectos do fator de potência, dado que para tarifação do consumidor na atual legislação somente sua violação é considerada.

Além disso, tem como objetivo apresentar uma síntese teórica da legislação associada ao fator de potência, apresentando os aspectos legais em vigor e os critérios relacionados a medição e cobrança na conta de energia ocasionado pelo baixo valor do fator de potência. É importante destacar que todos os fatores considerados na ferramenta influenciam no fator de potência.

2.1 Fator de Potência

O Fator de Potência (λ) é uma unidade de medida relacionada ao índice de utilização de energia elétrica. É extremamente importante, não apenas sob o ponto de vista eletroenergético, mas também, pelo fato de ser monitorado pelos sistemas de medição das concessionárias, podendo incorrer em ônus (muitas vezes significativos) nas contas de energia elétrica [1].

Por estes motivos, torna-se importante realizar a análise da rede para instalação de equipamentos mitigadores que possibilitem ajustar e manter o valor do fator de potência acima do limite mínimo permitido pela normalização em vigor [2], principalmente perante a existência de cargas cujas características de operação incorram em níveis de consumo de energia reativa que provoquem a diminuição do valor do fator de potência em intervalos

de tempo curtos e de maneira repetitiva [1].

É importante destacar a inexperiência de vários profissionais no mercado no que se refere aos sistemas de compensação. Não é difícil encontrar situações nas quais o baixo valor do fator de potência e , conseqüentemente, o ônus indesejável na conta de energia, mesmo sendo detectadas, continuam em decorrência da aplicação inadequada de sistemas de compensação convencionais e/ou pelo desconhecimento das possíveis abordagens e das soluções mais adequadas para o problema.

Alguns estudos [20, 21] afirmam que as causas mais frequentes do baixo valor do fator de potência em uma instalação elétrica são: motores de indução trabalhando a vazio; motores superdimensionados para as máquinas a eles acoplados; transformadores em operação a vazio ou em carga leve; grande número de reatores com baixo valor do fator de potência suprindo lâmpadas de descarga, fornos a arco, fornos de indução eletromagnética, máquinas de solda a transformador, equipamentos eletrônicos e um grande número de motores de pequena potência.

A título de comparação, a Tabela 1 apresenta o fator de potência de referência (f_r) atualmente adotado para alguns países.

Tabela 1 – Fator de potência de referência adotado em alguns países [1].

País	f_r
Alemanha	0,96
Argentina	0,95
Brasil	0,92
Bélgica	0,95
Coreia	0,93
Espanha	0,92
França	0,93
Portugal	0,93
Suíça	0,93

O baixo valor do fator de potência pode ocasionar alguns problemas na instalação, como por exemplo: favorecimento à ocorrência de sobrecargas na rede elétrica; aumento das perdas de energia em condutores, em decorrência da circulação de maiores parcelas de corrente de natureza reativa; redução dos níveis de tensão, principalmente em pontos mais distantes da origem da alimentação, devido às quedas de tensão originadas nos circuitos pela circulação em maiores níveis de corrente; comprometimento da capacidade dos transformadores e alimentadores apenas para suprimento da energia reativa; incidência de ônus nas contas de energia [22, 23].

O controle da energia reativa visa, principalmente, estimular os consumidores a ajustarem o fator de potência de suas instalações, com benefícios imediatos para os mesmos, reduzindo as perdas e melhorando o desempenho de suas instalações, além da melhoria da

melhoria das condições operacionais e a liberação do sistema para atendimento a novas cargas [1].

2.2 Considerações Preliminares

Antes de apresentar um resumo da legislação em vigor, é conveniente definir os atuais grupos, subgrupos de fornecimento e as modalidades tarifárias na qual os consumidores são enquadrados. Estas informações são de extrema importância para o desenvolvimento da estrutura de análise financeira que compõe a ferramenta proposta.

2.2.1 Classificação dos Consumidores e Posto Tarifário

As unidades consumidoras são classificadas em dois grupos: A e B. O grupo B é caracterizado por tarifas do tipo monômnia, sendo faturado somente o consumo em kWh para consumidores com tensão inferior a 2,3 kV. O grupo A representa as unidades consumidoras com tensão igual ou superior a 2,3 kV, ou ainda, atendidas em tensão inferior a 2,3 kV a partir de sistemas subterrâneos de distribuição e faturados pelo grupo A, sendo faturado por tarifas do tipo binômnia, ou seja, faturamento de demanda em kW e consumo em kWh. Este grupo é dividido em subgrupos de acordo com os níveis de tensão de fornecimento conforme a Tabela 2 [2].

Tabela 2 – Subgrupos e suas respectivas tensões de fornecimento [2].

Subgrupo	Tensão de Fornecimento
A1	≥ 230 kV
A2	88 kV a 138 kV
A3	Equivalente a 69 kV
A3a	30 kV a 44 kV
A4	2,3kV a 25 kV
AS	$< 2,3$ kV

Atualmente, o fator de potência é avaliado pela concessionária e passível de cobrança para consumidores atendidos em tensão primária (ou faturados como tal), ou seja, consumidores enquadrados no grupo A. Via de regra, o fator de potência não é avaliado para consumidores do grupo B, já que, em suas instalações, geralmente não há sistemas de medição que monitorem o consumo de energia reativa [1].

Na Resolução Normativa nº414 [2], definiu-se o posto tarifário como o período de tempo em horas para a aplicação das tarifas em determinadas horas do dia. Sendo composto por:

- **Horário de Ponta (HP):** Período definido pela concessionária responsável, composto por três horas consecutivas entre 17h00 e 22h00, que leva em consideração a curva de carga do seu sistema elétrico; com exceção aos sábados, domingos e feriados apresentados na Tabela 3.

- **Horário Fora de Ponta (HFP):** É composto pelo conjunto de horas diárias consecutivas e complementares às do posto tarifário de ponta.

Tabela 3 – Feriados nacionais e suas respectivas leis federais [2].

Dia e mês	Feriado nacional	Lei Federal
01 de janeiro	Confraternização Universal	662, de 06/04/1949
21 de abril	Tiradentes	662, de 06/04/1949
01 de maio	Dia do Trabalho	662, de 06/04/1949
07 de setembro	Independência	662, de 06/04/1949
12 de outubro	Nossa Senhora da Aparecida	662, de 06/04/1949
02 de novembro	Finados	662, de 06/04/1949
15 de novembro	Proclamação da República	662, de 06/04/1949
25 de dezembro	Natal	662, de 06/04/1949

2.2.2 Demanda

Ainda na Resolução Normativa nº414 [2], o consumo de demanda para consumidores do grupo A é definido como a média das potências elétricas ativas, solicitadas ao sistema elétrico pela parcela de carga instalada em operação na unidade consumidora, durante o intervalo de tempo especificado. Sendo medida em kW e em um intervalo de 15 minutos. A Figura 2 ilustra um exemplo de potência requerida ao sistema elétrico a cada 1 minuto para o intervalo de 19h46 às 20h00.

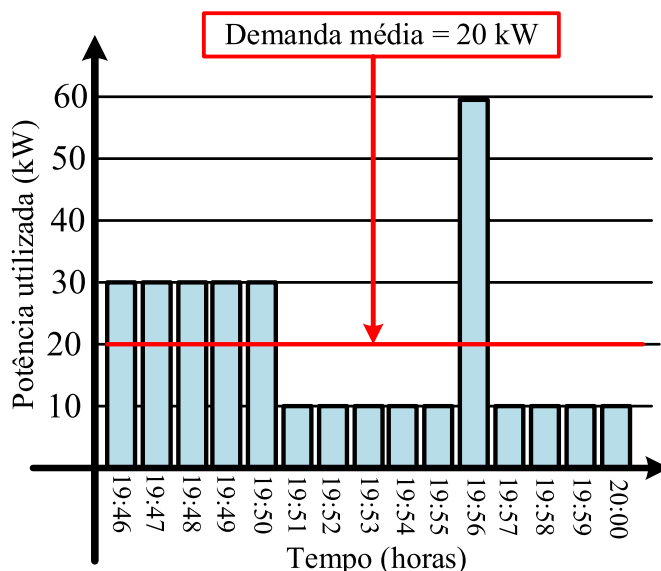


Figura 2 – Exemplo de registro de demanda.

- **Demanda medida:** A demanda medida é definida como o maior valor de demanda registrada durante o período de faturamento sendo verificada a cada 15 minutos [2]. Ou seja, em um mês, com 2.880 registros, a demanda medida será o maior valor

entres eles. A Figura 3, ilustra um exemplo das 13h00 às 21h00, neste caso, o maior valor de demanda a ser considerado dentro dos intervalos de 15 minutos será de 35 kW, desconsiderando os valores abaixo.

- **Demanda contratada:** A demanda contratada é definida como a demanda de potência ativa a ser cobrada no contrato feito entre o consumidor e a concessionária. É obrigatoriamente disponibilizada pela concessionária ao consumidor, que deverá pagar pela demanda mesmo que não seja utilizada. Por exemplo, se o consumidor contratar 200 kW e a demanda medida no mês for de 110 kW (maior registro), o valor a ser pago na fatura será referente aos 200 kW contratados.
- **Demanda de ultrapassagem:** É definida como a parcela de demanda medida que excede o valor da demanda contratada, expressa em kW. Será aplicada a tarifa de ultrapassagem, caso aquela parcela seja superior aos limites de tolerância:
 - 5% para unidade consumidora atendida em tensão de fornecimento igual ou superior a 69 kV;
 - 10% para unidade consumidora atendida em tensão de fornecimento inferior a 69 kV.

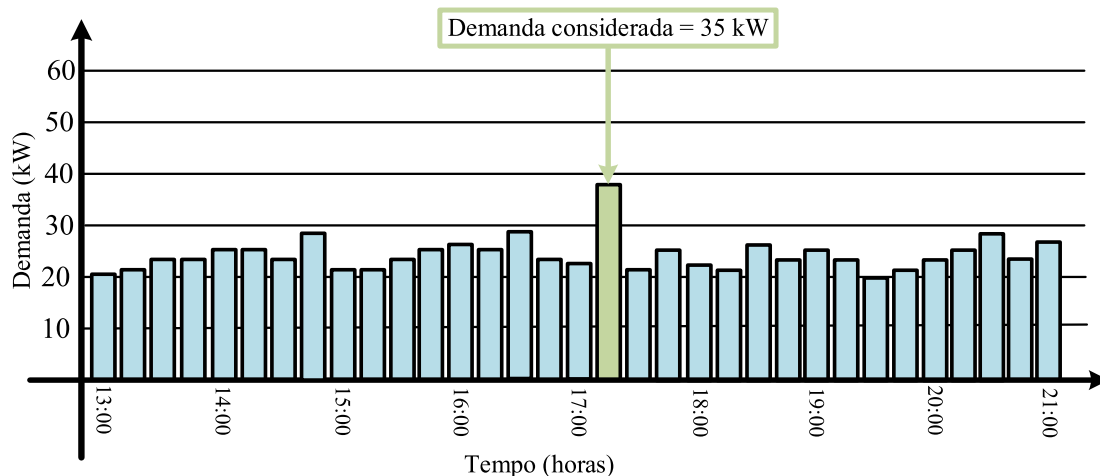


Figura 3 – Exemplo de registro de demanda.

Esta cobrança é uma forma da concessionária “multar” o consumidor, fazendo com que o mesmo mantenha sua demanda dentro dos patamares contratados, patamares os quais a concessionária mantém seu sistema de distribuição previamente preparado.

2.2.3 Modalidade Tarifária

De acordo com a Resolução Normativa nº418 [24], estrutura tarifária é um conjunto de tarifas aplicadas nas componentes de consumo de energia e de demanda de potência

ativa durante o período de faturamento de acordo com o posto horário. Como mencionado na seção anterior, o grupo A é caracterizado por tarifas binômias, nas quais encaixam-se três tipos de modalidades tarifárias: convencional, horária azul e horária verde, descritas a seguir. A Figura 4 e Tabela 4 descrevem o enquadramento tarifário apresentado na Resolução Normativa nº418 [24].

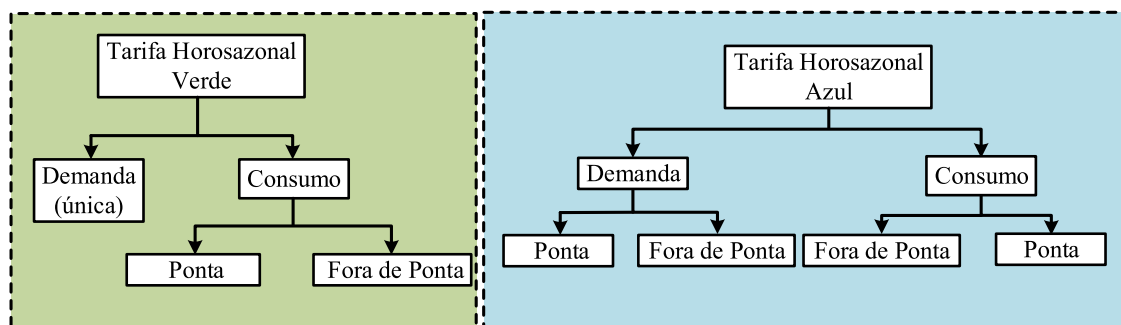


Figura 4 – Estrutura tarifária da atual legislação em vigor.

Tabela 4 – Enquadramento tarifário grupo A.

Tipo de Tarifa	Valores a serem faturados		
	Consumo (kWh)	Demanda (kW)	Ultrapassagem de demanda
Convencional	Total registrado × tarifa única	Maior valor entre: - demanda medida - demanda contratada × Tarifa única	Aplicável quando a demanda medida superar a contratada em 10%
Verde	(Total registrado no HFP × tarifa HFP) + (Total registrado no HP × tarifa HP)	Maior valor entre: - demanda medida - demanda contratada × Tarifa única	Aplicável quando a demanda medida superar a contratada em 10%
Azul	(Total registrado no HFP × tarifa HFP) + (Total registrado no HP × tarifa HP)	Maior valor entre: - demanda medida - demanda contratada × Tarifa diferenciada HFP e HP	Aplicável quando a demanda medida superar a contratada em 10%

- **Modalidade tarifária convencional:** Estrutura caracterizada pela aplicação de tarifas de consumo de energia elétrica (kWh) e/ou demanda de potência (kW) independentemente dos horários de utilização no dia e dos períodos do ano, ou seja, pela tarifa única de consumo de energia elétrica (R\$/kWh) e demanda de potência (R\$/kW). Enquadram-se nessa modalidade aqueles atendidos com tensão abaixo de 69kV e que possuem demanda contratada abaixo de 150 kW [24].

- **Modalidade tarifária horária verde:** Estrutura caracterizada por tarifas diferenciadas de consumo de energia elétrica, de acordo com as horas de utilização do dia (horário de ponta e fora de ponta), bem como uma única tarifa para demanda de potência [24].
- **Modalidade tarifária horária azul:** Estrutura caracterizada por tarifas diferenciadas de consumo de energia elétrica e de demanda de potência, de acordo com as horas de utilização do dia. Neste caso, o que será expresso na fatura é o consumo e demanda no horário de ponta e fora de ponta [24].

2.3 Legislação em Vigor e Faturamento

A atual legislação do fator de potência é regida pela Resolução Normativa nº414 da ANEEL [2]. Essa resolução estabelece os critérios para o faturamento da demanda e consumo de potência reativa excedente por posto tarifário. O fator de potência de referência “ f_r ”, indutivo ou capacitivo, tem como limite mínimo permitido o valor de $f_r = 0,92$. O faturamento corresponde à energia reativa e demanda de potência reativa, verificadas por medição apropriada, quando excederem as quantidades permitidas pelo fator de potência de referência “ f_r ”

O faturamento de energia reativa é dividido em: Faturamento de Consumo de Energia Reativa Excedente (E_{RE}) e Faturamento de Demanda Reativa Excedente (D_{RE}). Os valores do consumo de energia elétrica e demanda de potência reativas excedentes são calculados conforme (2.1) e (2.2).

$$E_{RE} = \sum_{T=1}^{n_1} \left[EEAM_T \times \left(\frac{f_r}{f_T} - 1 \right) \right] \times VR_{ERE} \quad (2.1)$$

Onde,

E_{RE} : é o valor correspondente à energia elétrica reativa excedente à quantidade permitida pelo fator de potência de referência f_r , no período de faturamento, em reais (R\$);

$EEAM_T$: é o montante de energia elétrica ativa medida em cada intervalo T de uma hora, durante o período de faturamento, em megawatt-hora (MWh);

f_r : é o fator de potência de referência igual a 0,92;

f_T : é o fator de potência da unidade consumidora, calculado em cada intervalo T de uma hora, durante o período de faturamento;

n_1 : é o número de intervalos de integralização T do período de faturamento para os postos tarifários ponta e fora de ponta;

VR_{ERE} : é o valor de referência equivalente à tarifa de energia em reais por megawatt-hora

(R\$/MWh).

$$D_{RE}(p) = \left[\text{MAX}_{T=1}^{n_2} \left(PAM_T \times \frac{f_r}{f_T} \right) - PAF(p) \right] \times VR_{DRE} \quad (2.2)$$

Onde,

$D_{RE}(p)$: é o valor correspondente à demanda de potência reativa excedente à quantidade permitida pelo fator de potência de referência f_r no período de faturamento, em reais (R\$);

PAM_T : é a demanda de potência ativa medida no intervalo de uma hora T , durante o período de faturamento, em quilowatt (kW);

$PAF(p)$: é a demanda de potência ativa faturável, em cada posto tarifário (p) no período de faturamento, em quilowatt (kW);

VR_{DRE} : é o valor de referência equivalente às tarifas de demanda de potência para o posto tarifário fora de ponta das tarifas de fornecimento aplicáveis aos subgrupos do grupo A para a modalidade tarifária horária azul;

n_2 : é o número de intervalos de integralização T , por posto tarifário p no período de faturamento;

MAX : identifica o valor máximo da equação em cada posto horário;

T : indica o intervalo de uma hora no período de faturamento;

p : indica posto tarifário ponta ou fora de ponta para as modalidades tarifárias horárias ou período de faturamento para a modalidade tarifária convencional binômia.

Além disso, para o cálculo de (2.1) e (2.2) deve-se considerar [2]:

1. O período de seis horas consecutivas, compreendido, a critério da distribuidora, entre 23h30min e 6h30min, apenas fatores de potência médios f_T inferiores a 0,92 capacitivo, verificados a cada intervalo de uma hora, T ;
2. O período complementar ao definido no inciso 1, apenas fatores de potência médios f_T inferiores a 0,92 indutivo, verificados em cada intervalo de uma hora.

Por fim, em (2.1) e (2.2) pode-se verificar que todas as parcelas de consumo de energia ativa e reativa contribuem para o ônus final na conta de energia elétrica. Além disso, para efeito de cálculo são computados apenas os valores positivos de E_{RE} e D_{RE} , ou seja, no período em que o fator de potência é superior a 0,92, atribui-se valor zero.

As nomenclaturas adotadas para expressar tais parcelas excedentes variam de concessionária para concessionária. Porém, todas elas significam as mesmas transgressões relativas ao limite mínimo permitido para o fator de potência de referência [1]. A Tabela 5 apresenta nomenclaturas adotadas em algumas concessionárias nacionais.

Tabela 5 – Nomenclaturas adotadas por concessionária de energia para as parcelas de energia reativa excedente.

Concessionária de Energia	Nomenclatura
ENEL	UFER (Unidade de faturamento de energia reativa) UFDR (Unidade de faturamento de demanda reativa)
CPFL Energia	FER (Faturamento de energia reativa) FDR (Faturamento de demanda reativa)
COPEL	UFER (Unidade de faturamento de energia reativa) UFDR (Unidade de faturamento de demanda reativa)
CEMIG	UFER (Unidade de faturamento de energia reativa) UFDR (Unidade de faturamento de demanda reativa)

Capítulo 3

Fundamentação Teórica - Análise Econômica

Neste capítulo, serão apresentados alguns aspectos relacionados a investimentos (financiamento) em equipamentos/máquinas, indicadores econômicos e algumas técnicas de análise de projetos, objetivando o nivelamento inicial de informações e a apresentação de conceitos que constituem a base geral para o entendimento da ferramenta proposta que será apresentada no Capítulo 4.

Em Bordeaux-Rego et al. [25], os autores afirmam que investimentos podem ser classificados nas categorias expansão, substituição, modernização ou intangíveis. Este trabalho trata-se de um projeto de investimento em modernização, pois consiste na “reconstrução, recondicionamento ou adaptação de uma máquina ou das instalações para maior eficiência”.

De acordo com Nogueira [26], decisões de investimento devem ser adotadas com bastante cautela e devem ser antecedidas por procedimentos de análise, dos quais serão obtidas informações importantes pelos administradores, com a finalidade de fornecer subsídios para a tomada de decisões. Em Cõnsoli et al. [27], os autores citam a análise financeira como uma etapa que precede um projeto de investimentos e tem como finalidade apoiar as decisões de investimento, utilizando-se estudos econômicos com o objetivo principal de demonstrar a viabilidade e a estruturação de um projeto.

Um projeto de investimento é um conjunto ordenado de pesquisas, suposições e conclusões que permitem avaliar a conveniência ou não de se destinarem fatores e recursos para o estabelecimento de uma unidade de produção de bens ou serviços [27].

O estudo da viabilidade econômica agrupa elementos contabilísticos que produzem as previsões da rentabilidade do projeto, sendo os principais: o levantamento do custo do(s) equipamento(s)/máquina(s), estimação do financiamento, estimação do fluxo de caixa e o cálculo dos indicadores econômicos, como ilustra a Figura 5. Cada um desses elementos

serão apresentados nas seções a seguir.

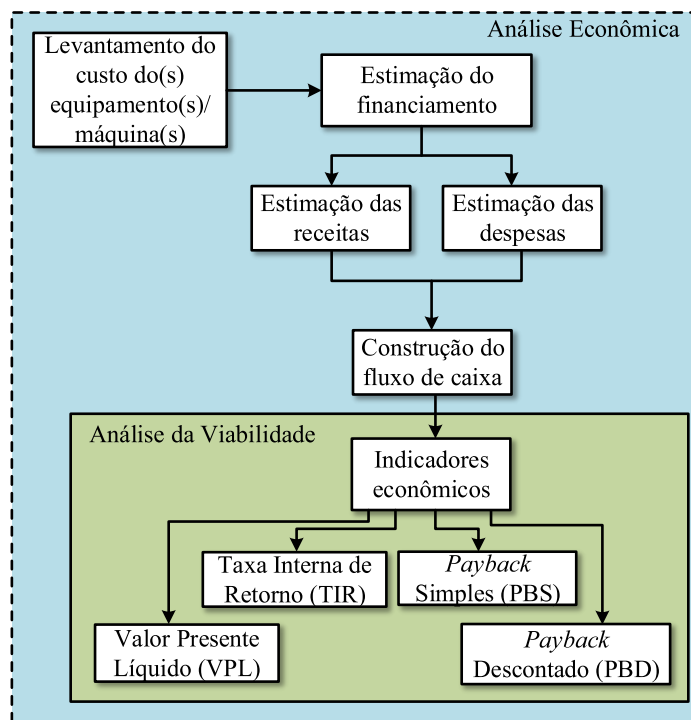


Figura 5 – Etapas da dinâmica de análise econômica.

3.1 Decisão de Financiamento

Qualquer que seja a natureza da atividade operacional, uma empresa é avaliada como tomadora de duas decisões: decisão de investimento (aplicação de recursos) e decisão de financiamento (captação de recursos) [28]. As decisões de investimento envolvem o processo de análise, avaliação, identificação e seleção das alternativas de aplicação dos recursos. As decisões de financiamento permeiam a definição da natureza dos fundos captados, ou seja, a estrutura das fontes de capital [29].

Em Gitman et al. [29], os autores afirmam que o financiamento pode ser classificado como financiamento de dívida ou de capital próprio. No financiamento de dívida, os fundos são obtidos por meio de intermediários financeiros ou emissão de títulos de dívida (privada). No financiamento de capital próprio, os fundos são obtidos em troca de participação na empresa.

Neste trabalho, a primeira etapa do estudo da viabilidade econômica é o levantamento dos custos juntamente com empresas especializadas no fornecimento e instalação dos equipamentos. Após esta etapa, realiza-se a estimativa do financiamento.

O investimento na aquisição e implantação de um equipamento pode resultar em um adiamento de investimentos de grande porte para a indústria, bem como redirecionamento

ou readequação de recursos para obras que apresentem um grau de prioridade mais elevado. Para evitar isto, neste trabalho considerou-se um financiamento para Pessoa Jurídica (PJ) via aquisição de máquinas e equipamentos. Nesta modalidade, o valor máximo financiável corresponde a 90% do valor do bem, com carência obrigatória de 03–12 meses e prazo de pagamento (p) em até 180 meses, ou seja, 15 anos.

A amortização é o pagamento de uma dívida através de pagamentos periódicos, caracterizando sua quitação. No Brasil, são utilizados dois tipos de amortização:

- Sistema de Amortização Constante (SAC);
- Sistema de Amortização Francês (Price).

O método mais utilizado é o SAC, ou também conhecido como Método Hamburguês, na qual a parcela de amortização da dívida é calculada tomando por base o total da dívida (saldo devedor) dividido pelo prazo do financiamento, como um percentual fixo da dívida. Desta forma, considera-se um sistema linear. À medida que a dívida começa a ser amortizada, a parcela dos juros e conseqüentemente a prestação como um todo tende a decrescer, uma vez que o próprio saldo devedor se reduz. O valor do saldo devedor inicial e durante o período de carência, é calculado como indicado em (3.1).

$$SD_0 = \frac{PF}{100} \times VB \quad (3.1)$$

Tal que,

SD_0 : é o saldo devedor no instante inicial e durante o período de carência, em reais (R\$);

PF : é o percentual a ser financiado, em porcentagem %;

VB : é o valor do bem, em reais (R\$).

O valor da prestação a ser pago durante o período de carência, em reais (R\$), pode ser encontrado em (3.2).

$$C = \frac{i}{100} \times SD_0 \quad (3.2)$$

Onde,

i : é a taxa de juros proporcional ao período, em porcentagem %.

O valor do saldo devedor após o período de carência no período p pode ser encontrado conforme (3.3).

$$SD_p = SD_{p-1} - A \quad (3.3)$$

Onde,

SD_{p-1} : é o saldo devedor no instante $p - 1$, ou seja, no mês anterior, dado em reais (R\$);

A : é o valor a ser amortizado constantemente após o período de carência, em reais (R\$).

O pagamento da amortização é realizado em função de um planejamento, de modo que cada prestação corresponde à soma do reembolso do capital ou do pagamento dos juros do saldo devedor, podendo ser calculado por (3.4).

$$A = \frac{SD_0}{p} \quad (3.4)$$

Onde,

SD_0 : é o saldo devedor inicial, em reais (R\$);

p : é o número de parcelas (período) a ser considerada no financiamento.

O cálculo dos juros (J) no período p é dado por (3.5).

$$J_p = i \times \sum_{p=1}^k (SD_p \times n) \quad (3.5)$$

Tal que,

SD_p : é o saldo devedor no período p , em reais (R\$);

n : é o número de parcelas que o saldo permanece inalterado.

O valor da prestação, calculado por (3.6), é resultado da soma da parcela de capital (amortização) e encargos financeiros (juros), os quais são determinados pela incidência da taxa efetiva periódica sobre o saldo devedor anterior [30].

$$PMT_p = J_p + A \quad (3.6)$$

Onde,

PMT_p : é o valor da parcela no período p após a carência, em reais (R\$).

3.2 Fluxo de Caixa

Considerando-se os aspectos econômicos, questionando se o mesmo é rentável ou não, e, por meio da aplicação de indicadores econômicos, é possível avaliar a aplicação do dinheiro, objetivando-se obter o maior retorno. Ainda de acordo com Casarotto e Kopittke [31], ao se decidir pela implantação de um projeto, deve-se levar em consideração os indicadores econômicos, a rentabilidade do investimento, os critérios financeiros e a disponibilidade de recursos.

Para esta análise é necessário, antes, realizar o levantamento do fluxo de caixa mensal. De acordo com Puccini [32], fluxo de caixa é o conjunto de entradas e saídas de dinheiro. O fluxo de caixa auxilia a identificação das maiores necessidades de capital ao longo do tempo. Em um projeto, fica possível identificar, por exemplo, quando ocorrerá a maior demanda por pagamentos possibilitando realizar as previsibilidades financeiras e, conseqüentemente, as decisões estratégicas ao longo do tempo.

O cálculo das despesas é baseado no somatório das parcelas do financiamento e do valor da manutenção anual do equipamento. O valor da manutenção baseia-se na depreciação e na vida útil do equipamento, sendo calculado por (3.7).

$$CM_a = \{VB - [D \times (a - 1)]\} \times \frac{m}{100} \quad (3.7)$$

Onde,

CM_a : é o custo da manutenção do equipamento por ano, em R\$;

VB : é o valor do bem, em reais (R\$);

D : é a depreciação do equipamento;

a : é o ano, $a = 1, 2, 3, 4, \dots, k$;

m : é a taxa de manutenção do equipamento, em %.

Resultando em,

$$despesa = \sum_{a=1}^k (PMT_a + CM_a) \quad (3.8)$$

Onde,

PMT_a : é o valor da parcelas no ano a , em reais (R\$).

Neste trabalho, as receitas foram compostas pelo faturamento do consumo e demanda do excesso de reativo, ou seja, o consumo foi considerado como uma componente positiva no fluxo de caixa. No instante zero, ou seja, na instalação do equipamento, o valor pago na conta de energia pelo consumo de energia reativa excedente deixará de ser uma despesa.

O fluxo de caixa é a estrutura sobre a qual são feitas as análises financeiras e, por isso, vale salientar, que uma vez que o fluxo de caixa é construído sobre hipóteses e projeções, não há garantia de que os resultados a serem obtidos na exploração dos serviços serão aqueles encontrados em quaisquer dos estudos, presentes ou futuros.

3.3 Análise da Viabilidade Econômica

Investimento é toda ação da qual se espera obter benefícios futuros [33] e, por haver a questão temporal, deve ser considerado o conceito de variação do valor do dinheiro no tempo. Para uma correta análise e decisão da viabilidade econômica de um investimento é necessário calcular e analisar os indicadores de viabilidade. Entre os mais tradicionais estão o Valor Presente Líquido (VPL), a Taxa Interna de Retorno (TIR), o *Payback* Simples (PBS) e o *Payback* Descontado (PBD). Não existe o melhor indicador, mas aquele que se adequa às expectativas do tomador de decisão, que podem variar de acordo com o tipo de investimento [33]. A seguir será apresentada uma revisão teórica desses indicadores.

3.3.1 Taxa Mínima de Atratividade

Define-se como Taxa Mínima de Atratividade (*TMA*) a taxa mínima alcançada pelo investimento para que ele seja viável economicamente, isto é, a taxa mínima de retorno de capital aceitável para que uma projeto econômico seja implementado. Também definida como a taxa a partir da qual o investidor considera que está obtendo ganhos financeiros. A *TMA* é única para cada investidor e não existe fórmula matemática para calculá-la, pois ela pode variar com o tempo [33].

3.3.2 Valor Presente Líquido

O Valor Presente Líquido (*VPL*) é um indicador que calcula o valor presente (ou valor atualizado) de movimentos financeiros futuros, descontados a uma taxa de juros, considerando o investimento inicial [34], indicando o potencial de geração de valor. O critério de análise do *VPL* é:

- Se $VPL > 0$, deve-se aceitar o investimento;
- Se $VPL = 0$, é indiferente aceitar ou rejeitar o investimento;
- Se $VPL < 0$, não deve-se aceitar o investimento.

Pode-se equacionar o *VPL* conforme apresentado em (3.9).

$$VPL = -SD_0 + \sum_{t=1}^n \frac{FC_t}{(1 + TMA)^t} \quad (3.9)$$

Onde,

SD_0 : é o saldo devedor inicial, em R\$;

VPL : é o valor presente líquido, em R\$;

FC : é o fluxo de caixa líquido, em R\$;

t : é o período, em anos;

n : é a vida útil do projeto, em anos;

TMA : é a taxa mínima de atratividade, dada em %.

Em Casarotto e Kopittke [31], os autores destacam algumas vantagens do método *VPL*: (1) o *VPL* usa os fluxos de caixa, em lugar dos lucros líquidos, no qual o fluxo de caixa é igual aos lucros líquidos somados a depreciação; (2) o método reconhece o valor do dinheiro no tempo, ou seja, quanto maior o tempo, maior o desconto. Nesse caso, o valor do dinheiro no tempo para um determinado projeto está refletido na taxa de desconto.

3.3.3 Taxa Interna de Retorno

A Taxa Interna de Retorno (*TIR*), também conhecida como taxa de desconto do fluxo de caixa, é a taxa de juros obtida quando se iguala o *VPL* (3.9) a zero. Neto [35] afirma que ao utilizar o método da *TIR*, a aceitação ou rejeição de determinada proposta de investimento é avaliada, em função da comparação entre a taxa interna de retorno obtida e a rentabilidade mínima almejada pelo investidor.

Caso o valor obtido para a *TIR* seja positivo, indica-se que o retorno recebido pelo investimento é superior ao capital investido inicialmente. De maneira geral, deve-se aceitar o projeto se a *TIR* for superior a *TMA*. Caso contrário, rejeita-se. Se a *TIR* = *TMA*, isso significa que é indiferente aceitar ou rejeitar o projeto. O cálculo é dado por:

$$TIR = -SD_0 + \sum_{t=1}^n \frac{FC_t}{(1 + TMA)^t} = 0 \quad (3.10)$$

3.3.4 Payback Simples

Uma importante etapa da avaliação de um investimento é determinar o tempo necessário para recuperação do capital investido a partir do fluxo de caixa estimado no projeto, dado que o aprofundamento desse estudo só deve ser realizado quando o prazo indicado esteja dentro do esperado pelo investidor. O tempo necessário para recuperar o capital investido é denominado *payback* (*PB*). Ao analisá-lo, a melhor alternativa de investimento é aquela onde o tempo de retorno do investimento é menor.

$$PBS = \frac{SD_0}{FC} \quad (3.11)$$

Em que, *PBS* é o *payback* simples, em anos.

3.3.5 Payback Descontado

O *payback* descontado (*PBD*) é o período de tempo necessário para recuperar o investimento, avaliando-se os fluxos de caixa descontados, ou seja, considerando o valor do dinheiro no tempo. De maneira geral, deve-se encontrar o tempo *t* que satisfaça (3.10).

Capítulo 4

Ferramenta Proposta

A preocupação dos consumidores industriais e/ou concessionárias de energia com a adequação às normas vem ganhando força devido aos prejuízos econômicos que os indicadores de QEE baixos podem causar. Para se adequarem a essas normas e consequentemente compensarem os distúrbios de QEE, esses consumidores investem em equipamentos compensadores, como por exemplo, banco de capacitores, filtro ativo, filtro passivo, compensador estático de reativos, entre outros, sendo possível realizar combinações entre eles. Decidir qual equipamento e se o investimento é vantajoso para o consumidor não é uma tarefa simples. Diante disso, este capítulo trata efetivamente da descrição da ferramenta proposta para análise técnico-econômica entre equipamentos condicionadores de distúrbios de QEE.

O objetivo é disponibilizar uma ferramenta que seja capaz de realizar a tomada de decisão indicando a melhor solução técnico-econômica de compensação para a rede elétrica sob análise. A característica de “tomada de decisão” da ferramenta proposta é o diferencial dos qualímetros/medidores existentes no mercado. A Figura 6 ilustra o diagrama de blocos da ferramenta que será apresentada no decorrer deste capítulo.

4.1 Análise da Instalação Elétrica

A partir dos sinais de tensões e correntes medidos, realiza-se a decomposição das parcelas de potência: potência aparente (A), potência de distorção (D), potência ativa (P), potência reativa (Q), potência de desbalanço (U) [18] e o cálculo dos fatores de conformidade da carga (λ , λ_D , λ_U , λ_Q) conforme proposto pela Teoria de Potência Conservativa (CPT) [19]. A escolha desta teoria deve-se ao fato que a CPT define termos instantâneos e médios (potência ativa e energia reativa) conservativos, que são válidos para qualquer composição de tensão e corrente (distorções e/ou assimetrias) e imunes com relação à variação da frequência da rede. Além disso, a CPT apresenta uma decomposição ortogonal da corrente onde cada termo decomposto representa uma característica específica da carga (transferência de potência da fonte para carga, armazenamento de energia e/ou defasa-

mento entre tensão e corrente, desbalanço de carga e distorção harmônica) possibilitando a identificação de cada distúrbio separadamente.

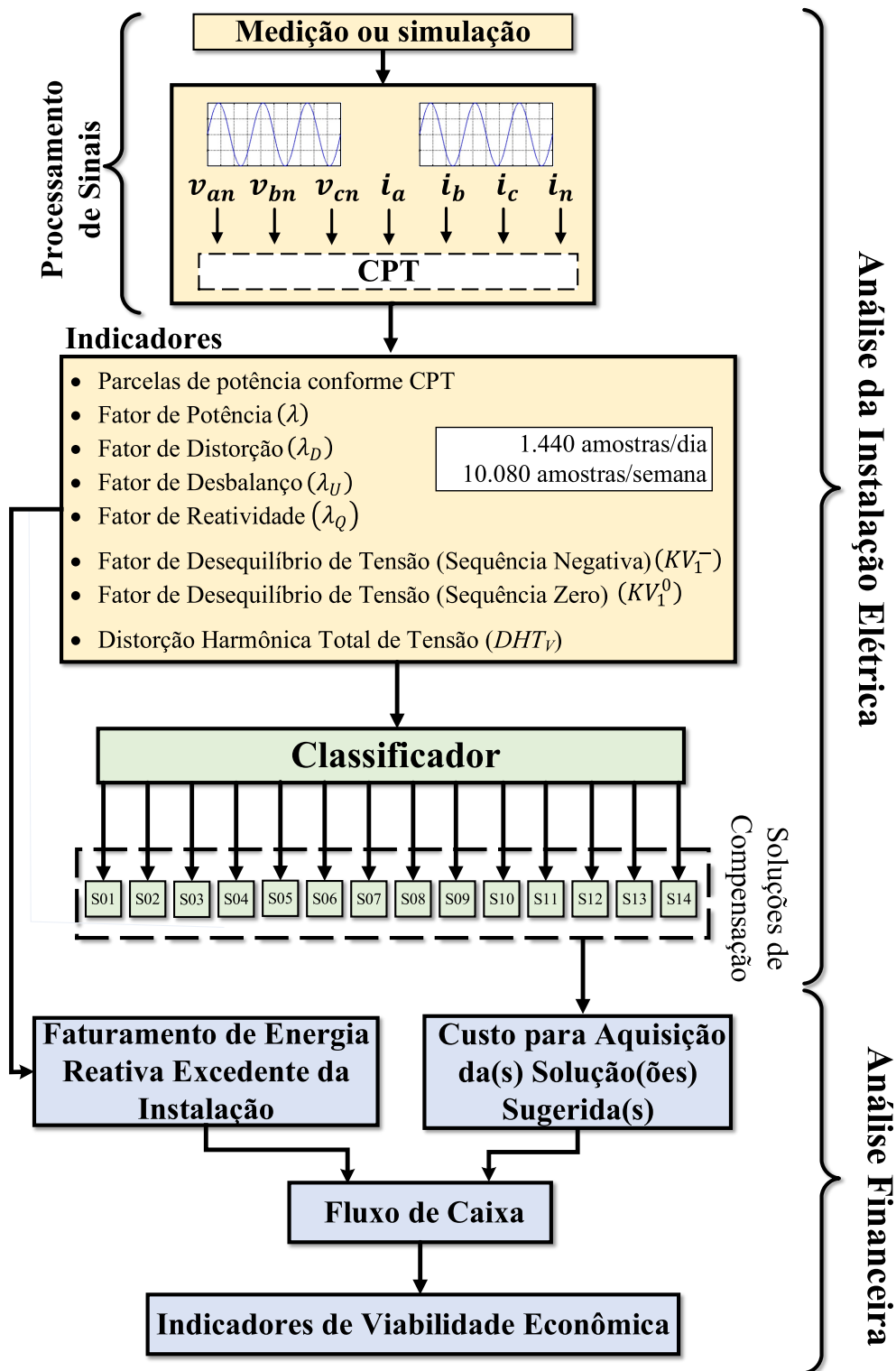


Figura 6 – Diagrama de blocos da ferramenta proposta.

A CPT permite identificar os fatores de desempenho da carga baseados em suas características de circuito equivalente, como desequilíbrio, não linearidades (componentes

harmônicas) e deslocamento de fase entre as tensões e correntes, independentemente da condição da tensão que alimenta o sistema. É importante destacar que os fatores representam a informação de como o circuito com cargas genéricas afeta a qualidade das correntes. Além disso, relacionam o sistema trifásico como um todo (coletivamente) e não somente a variáveis monofásicas. Assim, esta abordagem pode ser mais adequada do que outros indicadores de qualidade da energia, que são afetados significativamente pela tensão no PAC [17]. Estas características da CPT a torna uma alternativa interessante para o desenvolvimento da ferramenta proposta. O Apêndice A apresenta uma breve revisão teórica da CPT.

Para avaliação da tensão da rede são utilizados o fator de desequilíbrio da tensão fundamental [36] e distorção harmônica total de tensão (DHT_V) [9].

4.1.1 Classificador

Após o cálculo das parcelas de potência, dos fatores de conformidade da carga, do desequilíbrio da tensão fundamental e da distorção harmônica total de tensão, o classificador proposto por Moreira et al. [17] analisa esses indicadores e, através do conhecimento de um especialista e das técnicas de reconhecimento de padrões (*KNN*, do inglês, *K-Nearest Neighbor*), classifica a(s) melhor(es) solução(ões) técnica(s) dentre as quatorze possíveis soluções de compensação, descritas na Figura 7.

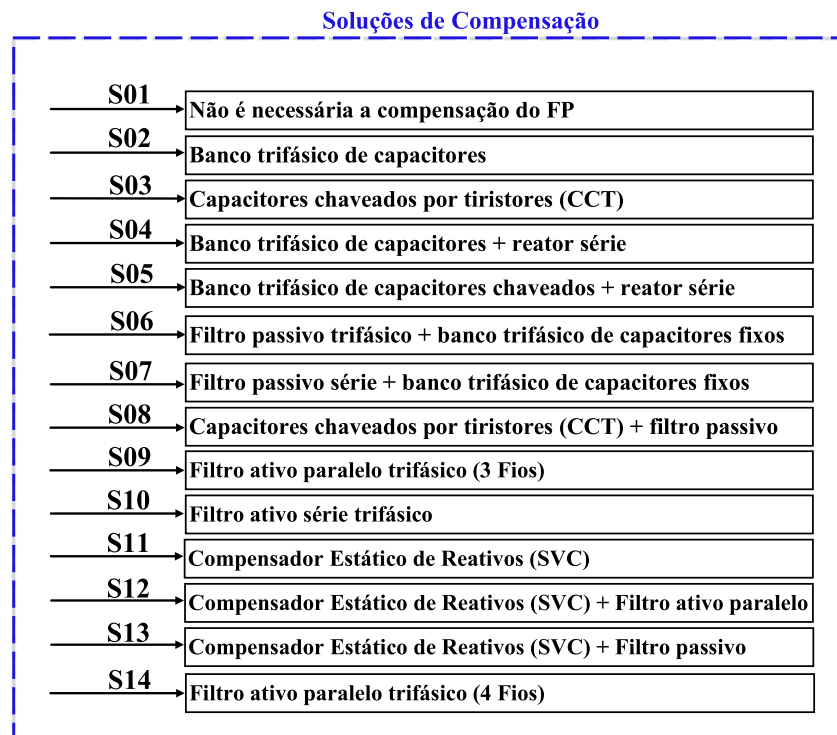


Figura 7 – Soluções de compensação do modelo classificador.

Em aprendizado de máquina, o classificador é um algoritmo responsável por identificar a qual categoria (rótulo ou classe) pertence uma nova amostra, com base em treinamento sobre um conjunto de dados com atributos e diversas instâncias rotuladas, ou seja, sendo anteriormente categorizadas por um especialista. Os classificadores são utilizados em diversas áreas e aplicações, como na identificação de “spam” ou “não-spam” [37], diagnóstico a um paciente com base em atributos clínicos (pressão arterial, presença ou ausência de certos sintomas, etc.) [38] ou em aplicações em sistemas de energia [39]. Na literatura, um classificador também é conhecido como algoritmo de reconhecimento de padrões [40].

Para os atributos utilizados pelos especialistas em Moreira et al. [17], alguns têm seus limites estabelecidos em normas, enquanto outros não. Em relação ao desbalanço de tensão, a norma ANSI C84.1-2006 [41] recomenda que os sistemas de alimentação operem com um limite máximo de 3%. O padrão IEC [10,42] recomenda que o desbalanço máximo de tensão deve ser limitado a 2%. As recomendações da IEEE [43,44] indicam que alguns equipamentos eletrônicos (como computadores) podem apresentar problemas se o desbalanço de tensão for superior a 2% - 2,5%. Com base nas normas citadas, em Moreira et al. [17] os autores adotaram o limite de 2% para o desbalanço de tensão fundamental durante a fase de treinamento do classificador.

Para avaliar o desbalanço de carga, em Moreira et al. [17] os autores utilizam o fator de desbalanço (λ_V). Esse atributo não está definido em normas. Porém, a Associação Nacional de Fabricantes de Equipamentos (do inglês, *National Electrical Manufacturers Association* - NEMA) [45] especifica que para cada 1% de desbalanço de tensão pode-se causar entre 6% - 10% de desbalanço de corrente. Diante do exposto, para o limite de 2% de desbalanço de tensão (KV_1^-/KV_1^0), Moreira et al. [17] propõem o limite de 20% para o fator de desbalanço (λ_V).

A norma IEEE Std 519 [9] define o indicador denominado Taxa de Distorção Harmônica (do inglês, *Total Demand Distortion* - TDD). Este indicador é semelhante à DHT_i , exceto que a distorção é expressa como um percentual da máxima demanda da corrente de carga demandada de 15 ou 30 minutos. Os limites propostos pela IEEE Std 519 para a TDD levam em consideração a relação de curto-circuito (I_{sc}/I_L), ou seja, a capacidade do sistema da concessionária em relação à potência da carga. A Tabela 6 apresenta os limites de distorção para corrente para sistemas de 120 V a 69 kV.

Tabela 6 – Limites de distorção de corrente para sistemas de distribuição geral [9].

120 V \leq $V_n \leq$ 69 kV [%]						
Ordem individual das harmônicas (harmônicas ímpares)						
I_{SC}/I_L	$h < 11$	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \leq h$	TDD
< 20	4,0	2,0	1,5	0,6	0,3	5,0
$20 < 50$	7,0	3,5	2,5	1,0	0,5	8,0
$50 < 100$	10,0	4,5	4,0	1,5	0,7	12,0
$100 < 1000$	12,0	5,5	5,0	2,0	1,0	15,0
> 1000	15,0	7,0	6,0	2,5	1,4	20,0

As harmônicas pares são limitadas em 25% dos limites das harmônicas ímpares acima

Verifica-se que para uma baixa relação de curto-circuito (I_{sc}/I_L), “rede fraca”, o limite para a TDD é mais rigoroso para as distorções na forma de onda da corrente (5%), enquanto que uma elevada relação de curto-circuito, “rede forte”, permite um limite menos rigoroso (20%) para distorção harmônica na corrente.

Neste trabalho, as distorções harmônicas na forma de onda da corrente são avaliadas através do fator de distorção (λ_D) proposto pela CPT. Em Moreira et al. [17], a base de dados utilizada para treinamento do classificador foi construída levando-se em consideração a TDD , bem como os limites propostos pela recomendação IEEE Std 519 [9]. Desta forma, ao analisar o fator de distorção, o classificador leva em consideração a relação de curto-circuito bem como os limites da Tabela 6 para a tomada de decisão em relação as possíveis soluções que visam a mitigação da distorção harmônica de corrente. O uso deste indicador ao invés da DHT_i , deve-se ao fato que a distorção harmônica total de corrente pode ser mal interpretada. Por exemplo, em medições realizadas aos finais de semana, onde cargas lineares de grande potência encontram-se desligadas. Neste caso, a magnitude da corrente fundamental é baixa, embora a distorção relativa seja alta devido apenas o uso de lâmpadas. Ao analisar a DHT_i , o classificador pode indicar como solução o filtro ativo devido ao alto nível de distorção na corrente.

A norma IEEE Std 519 [9], publicada em 1992, apresenta as recomendações práticas para consumidores individuais de energia elétrica que estejam conectados ao PAC e determina os limites para os harmônicos de tensão nos sistemas de transmissão e distribuição e harmônicos de correntes com o sistemas de distribuição industrial. Em [17], os autores adotaram um limite de 5% para a DHT_V . Para o fator de potência (λ), adotou-se o limite de 0,92, de acordo com a legislação em vigor [2] apresentada no Capítulo 2.

Em Moreira et al. [17], utilizou-se o método de classificação supervisionado. Para a fase de treinamento e de construção do modelo de classificação, uma base de dados foi empregada com amostras previamente rotuladas por um especialista (*expertise*) e, para a fase de classificação com novas medições no PAC, os indicadores são calculados e o algoritmo retorna a estratégia de compensação (solução) recomendada para a medição.

A Tabela 7 apresenta as quatorze possíveis soluções do classificador, na qual os marcadores indicam a violação dos indicadores e a análise do sinal da energia reativa ao longo do tempo, considerados para análise de cada solução. Por exemplo, na solução 6, os marcadores (●) indicam que se existe violação do fator de potência (λ) e do fator de distorção (λ_D), o equipamento de compensação sugerido é o filtro passivo trifásico associado a banco de capacitores fixos.

O modelo classificador leva em consideração o sinal da energia reativa para identificar se a carga possui uma característica do tipo “fonte de tensão harmônica” ($W_r < 0$) ou “fonte de corrente harmônica” ($W_r > 0$). Esta informação permite ao classificador informar ao usuário se a solução de compensação será instalada em “série” ou “paralelo” com a carga. Para o correto diagnóstico, assume-se que 1.440 amostras diárias por um período de 7 dias consecutivos (incluindo finais de semana) são suficientes para caracterização da variação das cargas. Assim, na prática, o medidor deve armazenar uma amostra dos indicadores a cada minuto.

4.2 Custo do Compensador

Após o diagnóstico e de posse sobre qual(is) solução(ões) mitigam determinado(s) distúrbio(s), a próxima etapa é levantar o custo com empresas especializadas no fornecimento e instalação de cada compensador. Os custos para cada estudo de caso serão apresentados no Capítulo 5 .

Para esta análise, é importante considerar a vida útil dos equipamentos, que pode variar de acordo com a manutenção anual e o regime de operação. Essa informação pode ser encontrada no *datasheet* de cada equipamento, em horas ou anos. Além da vida útil, a depreciação do equipamento deve ser levada em consideração. Neste trabalho, o valor da depreciação será calculado pelo método linear através de (4.1), ou seja, seu custo anual será sempre o mesmo, do início ao fim da vida útil do equipamento [46–48].

$$D = \frac{(VB - R)}{n} \quad (4.1)$$

Onde,

D : é a quota anual de depreciação, em reais (R\$);

VB : é o valor inicial do bem, em reais (R\$);

R : é o valor residual, em reais (R\$);

n : é a vida útil esperada, em anos.

O valor residual pode ser calculado por (4.2) [46–48].

$$R = \frac{(10 \times VB)}{100} \quad (4.2)$$

Desta forma, para os estudos de caso que serão apresentados no Capítulo 5, considerou-se como valor inicial os custos com a aquisição do equipamento, o valor da manutenção como 10% do valor do bem, ou seja, 4,88% ao semestre (a.s.), e o valor residual de 10% do valor inicial. A depreciação foi calculada com base no valor inicial do equipamento, não entrando no cálculo os valores previstos com a mão de obra para instalação.

Tabela 7 – Soluções de mitigação para compensação de reativo e harmônicos de acordo do com o sistema especialista proposto em Moreira et al. [17].

Solução	Equipamento de Compensação	λ	λ_D	λ_U	DHT_V	ΔQ	KV_1^- or KV_1^0	Energia Reativa
1	Compensação não necessária							
2	Banco de trifásico de capacitores	•						
3	Capacitores chaveados por tiristores	•				•		
4	Banco de capacitores + reator série	•			•			
5	Banco de capacitores chaveados + reator série	•			•	•		
6	Filtro passivo trifásico + banco de capacitores fixos	•	•					>0
7	Filtro passivo série + banco de capacitores fixo	•	•					<0
8	Capacitores chaveados por tiristores + filtro passivo	•	•			•		
9	Filtro ativo paralelo trifásico	•	•		•			>0
10	Filtro ativo série trifásico	•	•		•		•	<0
11	Compensador estático de reativos	•		•				
12	Compensador estático de reativos + filtro ativo	•		•	•			
13	Compensador estático de reativos + filtro passivo	•	•	•				
14	Filtro ativo paralelo trifásico (4 fios)	•	•	•	•			

É importante destacar que para a manutenção no primeiro semestre, considerou-se o valor do equipamento previsto para o décimo semestre e para a manutenção no segundo semestre, considerou como valor do equipamento o valor previsto para o nono semestre. Ou seja, no primeiro ano, o valor de manutenção correspondeu ao valor depreciado do equipamento previsto para o último ano. O mesmo raciocínio foi aplicado para os anos subsequentes. Sendo assim, os valores referentes à manutenção tornam-se crescentes no decorrer da vida útil do equipamento.

4.3 Análise do Faturamento de Energia Reativa

Após o levantamento do custo do compensador, o próximo passo é realizar a estimação do faturamento do consumo de energia reativa excedente (E_{RE}) em horário de ponta, fora de ponta e demanda de potência reativa excedente (D_{RE}) da instalação consumidora. Esse cálculo é feito através das equações (2.1) e (2.2), apresentadas no Capítulo 2.

As tarifas foram retiradas de faturas referentes ao ano de 2019 da concessionária de energia ENEL Brasil Distribuição São Paulo. O horário de ponta adotado pela concessionária é compreendido entre 17h e 20h. Além disso, a mesma admite que a leitura é dada por (4.3) e o faturamento para cada um dos produtos ($E_{RE_{\text{ponta}}}$, $E_{RE_{\text{fora de ponta}}}$ e D_{RE}) pode ser calculada por (4.4).

$$\text{Leitura} = (\text{leitura atual} - \text{leitura anterior}) \times \text{constante de medição} \quad (4.3)$$

$$\text{Faturamento} = (\text{Leitura}) \times \text{Tarifa} \quad (4.4)$$

As tarifas e constantes de medição adotadas pela concessionária estão apresentadas na Tabela 8.

Tabela 8 – Tarifas e constantes de medição adotadas para faturamento.

Especificação	Constante de medição	Tarifa
Demanda de potência reativa excedente	0,420	26,79921 R\$/kvar
Energia reativa excedente horário de ponta	10,500	0,46215 R\$/kvarh
Energia reativa excedente horário fora de ponta	0,105	0,46214 R\$/kvarh

4.3.1 Revisão Tarifária

Para estimar o faturamento do consumo e demanda de energia reativa excedente é importante levar em consideração o ajuste tarifário anual. A revisão tarifária é de fundamental importância nos processos de regulação econômica. Estabelece tarifas que consi-

gam manter o devido equilíbrio entre o investimento desembolsado pelas concessionárias de distribuição e preços justos para os consumidores. Porém a regulação possui um grande problema: a assimetria de informação, que aumenta os custos envolvidos na regulação de serviços como um todo. Existem dois tipos de revisões tarifárias, a revisão periódica e o revisão anual [49]. Sendo:

- **Revisão Periódica:** É um processo que possui um período de ocorrência sendo definido previamente. Possui o intuito de aferir a estabilidade econômico-financeira da concessão e avaliar os custos efetivos diante da necessidade de investimentos. Essa revisão é feita usualmente a cada 3,4 ou 5 anos. A ANEEL leva em consideração os investimentos diversos, como em infraestrutura, eficiência na gestão dos custos, níveis mínimos de qualidade, ganhos de escala (o quanto se aumentou o número de consumidores no período), além da variação da inflação no ano anterior, já que no ano em que há revisão tarifária periódica não há revisão tarifária anual [49].
- **Revisão Anual:** É um processo que tem como objetivo de firmar um controle na aquisição da receita obtida através da realização das tarifas aplicadas pela concessionária. Os reajustes acontecem anualmente, porém, nos anos em que ocorrem as revisões tarifárias periódicas, os reajustes não são realizados [49].

Neste trabalho, considerou-se apenas a revisão tarifária anual. O valor foi estimado com base na média da série histórica dos reajustes tarifários dos anos de 2008 a 2018. Desta forma, foi inferido um reajuste tarifário de 5,57% ao ano (a.a.). Os dados futuros foram estimados sobre a média de cada mês da série histórica de contas anteriores, com o devido reajuste anual.

4.4 Análise da Viabilidade Econômica

A análise da viabilidade econômica é realizada em três etapas, descritas a seguir:

1. **Financiamento:** Após o levantamento do custo da(s) solução(ões) de compensação e do levantamento do faturamento de consumo e demanda de energia reativa excedente, a ferramenta deve simular o financiamento do(s) equipamento(s). Para a estimação, a ferramenta utiliza as equações apresentadas na Seção 3.1.
2. **Fluxo de caixa:** O fluxo de caixa registra todas as entradas (receitas) e saídas (despesas) de caixa ao longo do tempo. É uma etapa importante para realizar a análise da viabilidade econômica de forma correta. O cálculo das despesas é baseado no somatório das parcelas do financiamento e do valor da manutenção anual do equipamento. Já as receitas são compostas pelo faturamento do consumo (E_{RE}) e

demanda (D_{RE}) do excesso de reativo, ou seja, o consumo foi considerado como uma componente positiva no fluxo de caixa. No instante zero, ou seja, na instalação do equipamento, o valor pago na conta de energia pelo consumo de energia reativa excedente deixará de ser uma despesa. As equações utilizadas para o cálculo estão descritas na Seção 3.2.

3. **Indicadores de viabilidade econômica:** Por último, a ferramenta calcula os indicadores econômicos apresentados na Seção 3.3.

4.5 Tomada de Decisão Entre Duas ou Mais Soluções de Compensação

Como citado anteriormente, para uma resposta confiável do classificador, é necessário um período de observação de, no mínimo, uma semana completa com 1.440 amostras diárias. Dependendo do comportamento da carga ou do tipo de instalação sob análise, o classificador pode, em alguns casos, sugerir mais de uma solução de compensação. Nestes casos, a ferramenta proposta deve realizar uma tomada de decisão levando em consideração o custo de cada compensador, o faturamento de energia reativa, a viabilidade econômica e os fatores de QEE e da CPT, de forma a selecionar qual proposta é mais atrativa financeiramente para o consumidor.

Tem-se o seguinte exemplo hipotético, uma determinada instalação industrial que apresenta violação do fator potência e violação do fator de distorção e em alguns momentos do dia, violação da distorção harmônica total de tensão. Neste caso, o classificador, utilizando-se de técnicas de reconhecimento de padrões, irá sugerir como opções de soluções de compensação: Opção 1 - Filtro passivo; Opção 2 - Filtro ativo.

Em um primeiro momento, o consumidor pode optar pelo equipamento com menor custo, sem analisar a viabilidade econômica de ambos os projetos, os indicadores de QEE e os fatores da CPT após a instalação dos mesmos. Porém, essa escolha pode não ser a mais atrativa ao consumidor. Ainda nesse exemplo, a Tabela 9 descreve os custos (representado por pesos) e os fatores de QEE e da CPT, obtidos através de simulação de uma rede conhecida, após a instalação dos compensadores.

Tabela 9 – Exemplo hipotético do custo do equipamento e dos fatores de QEE e da CPT obtidos após instalação do mesmo.

Solução	λ	λ_D	λ_U	λ_Q	DHT_V	KV_1^0	KV_1^-	Custo (pu)
Filtro passivo	0,922	0,120	0,110	0,000	5,100	0,00	0,00	x
Filtro ativo	0,950	0,980	0,090	0,000	2,300	0,00	0,00	$2x$

Pode-se observar, que mesmo ao instalar o filtro passivo, solução com custo x , o fator

de distorção (λ_D) continuará violando, como destacado na Tabela 9. Neste caso, tem-se duas opções: (1) Instalar o filtro passivo, o fator de distorção continuar violando, investir menos e ter um retorno financeiro mais rápido ou (2) Instalar o filtro ativo, a violação de todos os fatores ser corrigida, investir mais e ter um retorno financeiro mais lento. Surge então um impasse, ao optar pela instalação do filtro passivo, o quão prejudicial será a distorção de corrente para a rede. Diante do exposto, esta seção apresenta a metodologia utilizada para quantificar esses fatores e auxiliar na tomada de decisão para casos em que o classificador indique duas ou mais soluções.

4.5.1 Formulação do Problema

Diante do exposto na seção anterior, formulou-se um problema de otimização para atribuir pesos aos fatores de QEE e aos fatores da CPT, com o objetivo de auxiliar na tomada de decisão da análise técnico-econômica da ferramenta em situações que o classificador indique duas ou mais soluções viáveis economicamente. O problema pode ser modelado como:

$$\min PQI = \sum_{p=1}^{N_p} w_p \cdot F_p \quad (4.5)$$

Onde,

N_p : é o número de fatores selecionados que afetam QEE;

F_p : é valor medido do fator p ;

W_p : é o peso atribuído ao fator p ;

p : é o fator de QEE e da CPT.

O PQI (do inglês, *Power Quality Index*) é o somatório dos pesos multiplicado pelos fatores medidos. O objetivo deste problema é minimizar o Índice de Qualidade de Energia [50], sujeito às restrições que serão apresentadas a seguir.

Em Elbasuony et al., [50] os autores propõem o uso do PQI para avaliar a performance dos parâmetros de qualidade de energia (distorção harmônica total de tensão, distorção harmônica total de corrente, variação de frequência, afundamento de tensão, *flicker* e fator de potência) em diferentes barramentos conectados a geradores distribuídos trifásicos: sistema de geração eólica, sistema fotovoltaico, sistemas híbridos (fotovoltaico/eólico). Os resultados apresentados mostram que o índice proposto facilita a avaliação dos parâmetros de QEE em sistemas em diferentes condições de operação [50].

Diferentemente da metodologia apresentada por Elbasuony et al. [50], que utiliza o Processo de Análise Hierárquica (do inglês, *Analytic Hierarchy Process - AHP*) para quantificar a importância dos parâmetros de QEE em diferentes cenários, ou seja, atribuir pesos, em [51,52] os autores utilizam Algoritmos Genéticos (do inglês, *Genetic Algorithm -*

AG). O método AHP possui algumas desvantagens: destaca-se o fato do método necessitar da transformação de critérios qualitativos em quantitativos e alguns problemas quanto à análise de sensibilidade, que pode não ser convenientemente medida, tendo uma influência significativa nos resultados do método. E ainda a necessidade de limitar em nove o número máximo de elementos (parâmetros) a serem avaliados, para assim garantir uma maior precisão nas comparações.

Pelos motivos citados acima, optou-se utilizar AG para encontrar o peso dos fatores e minimizar o PQI, considerando as restrições apresentadas em (4.7), (4.8), (4.9) e (4.10) [51]. A Figura 8 apresenta um fluxograma do algoritmo proposto.

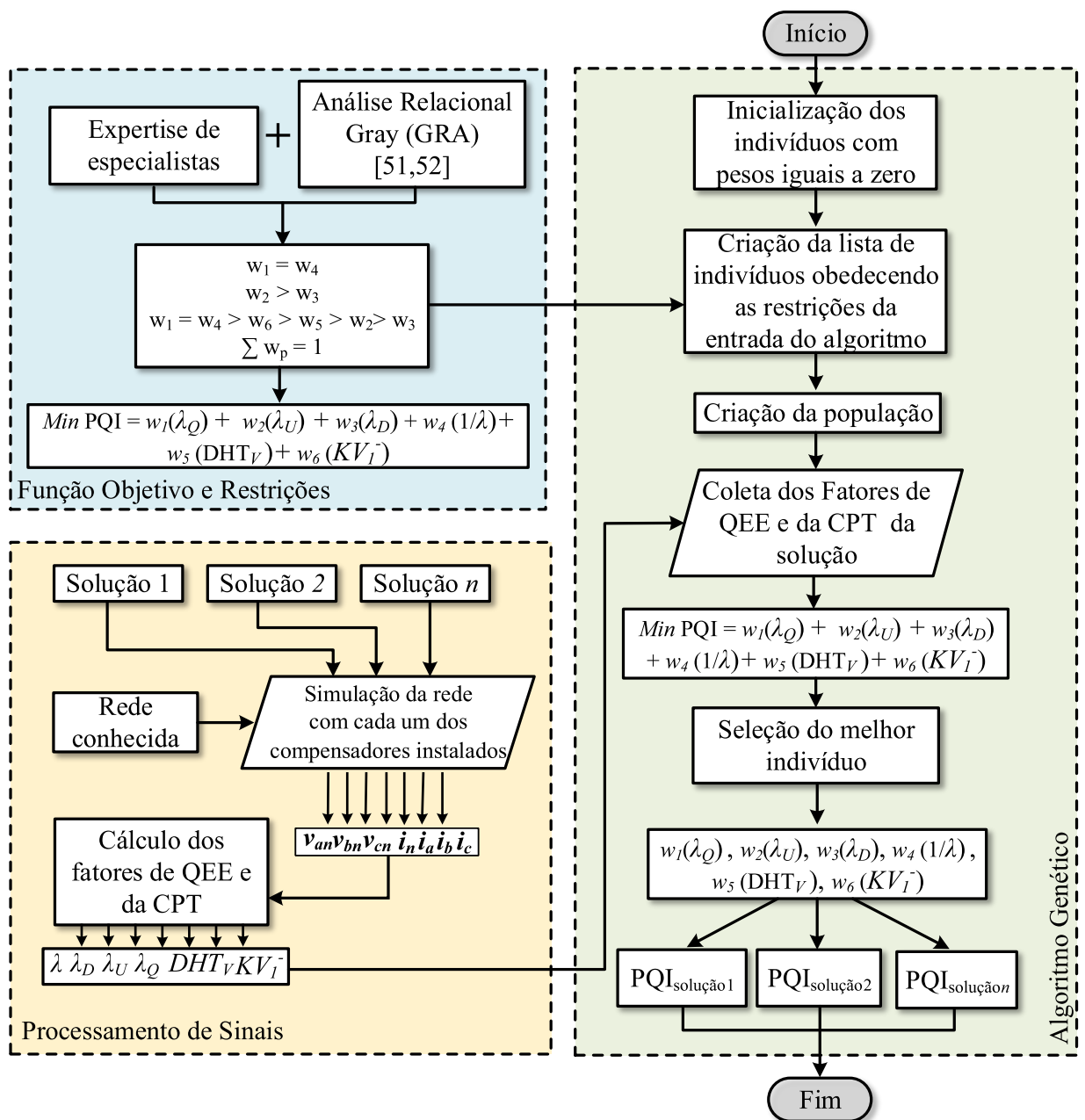


Figura 8 – Fluxograma do AG proposto.

$$\sum_{p=1}^{N_p} w_p = 1 \quad (4.6)$$

Ou seja,

$$w_1 + w_2 + w_3 + w_4 + w_5 + w_6 = 1 \quad (4.7)$$

E ainda,

$$w_1 = w_4 \quad (4.8)$$

$$w_2 > w_3 \quad (4.9)$$

$$w_1 = w_4 > w_6 > w_5 > w_2 > w_3 \quad (4.10)$$

Assumindo que,

w_1 : é o peso atribuído ao fator de reatividade (λ_Q);

w_2 : é o peso atribuído ao fator de desbalanço (λ_U);

w_3 : é o peso atribuído ao fator de distorção (λ_D);

w_4 : é o peso atribuído ao fator de potência (λ);

w_5 : é a peso atribuído ao distorção harmônica total de tensão (DHT_V);

w_6 : é o peso atribuído ao fator de desequilíbrio da tensão fundamental de sequência negativa (KV_1^-).

Então:

$$PQI = w_1(\lambda_Q) + w_2(\lambda_U) + w_3(\lambda_D) + w_4\left(\frac{1}{\lambda}\right) + w_5(DHT_V) + w_6(KV_1^-) \quad (4.11)$$

De acordo com a Seção 4.1, para os estudos de casos que serão apresentados no Capítulo 5, os limites para os fatores considerados estão apresentados em (4.12), (4.13), (4.14), (4.15) e (4.16), a seguir.

$$0,92 \leq \lambda \leq 1,0 \quad (4.12)$$

$$0,0 \leq \lambda_D \leq 0,1 \quad (4.13)$$

$$0,0 \leq \lambda_N \leq 0,2 \quad (4.14)$$

$$0\% \leq DHT_V \leq 5\% \quad (4.15)$$

$$0\% \leq KV_1^- \leq 2\% \quad (4.16)$$

4.5.2 Algoritmo Genético

O Algoritmo Genético (AG) é uma técnica de otimização baseada em busca na qual é fundamentada no princípio das áreas de genética e de seleção natural [53]. O AG é frequentemente utilizado para encontrar soluções ótimas ou quase-ótimas para problemas computacionais baseadas em função objetivo. A otimização no AG refere-se a encontrar os melhores valores, que satisfaçam as condições ótimas de saída.

Como o AG é bioinspirado, tem-se como premissa a construção de diversos indivíduos, preenchendo o máximo de possíveis soluções. Após o preenchimento do espaço de soluções, há a escolha de indivíduos que possuem o melhor desempenho, ou seja, que apresentam os melhores resultados para a função objetivo. Tais indivíduos então “sofrem” recombinações e mutações (assim como no processo genético natural), produzindo “filhos” – ou seja, uma nova geração ou processo iterativo para análise da melhor escolha. Tal processo da mutação apresentada nas linhagens de descendência é alinhado com a teoria *Darwiana* de escolha do melhor indivíduo. O processo de evolução se repete no AG até que se chegue no critério de parada, que corresponde à seleção do melhor indivíduo.

Na abordagem deste trabalho, o AG desenvolvido possui as seguintes etapas:

- **Criação da população:** É o processo que inicia a solução de teste, preenchendo indivíduos, compostos por valores de aleatórios dos pesos w_1, w_2, w_3, w_4, w_5 e w_6 dentro do espaço de soluções e respeitando as restrições apresentadas em (4.7), (4.8), (4.9) e (4.10). Realizou-se uma escolha aleatória independente para cada indivíduo, isto é, escolheu-se $n = 250.000$ indivíduos dentro do espaço de soluções. Essa técnica permitiu gerar uma boa distribuição, cobrindo um espaço maior no espaço de busca, sem interessar se são boas soluções ou não. Tem-se, assim como na natureza, a diversidade entre indivíduos e dentre estes, um grupo dos melhores.
- **Fitness e seleção dos melhores indivíduos:** É utilizada para determinar a qualidade de um individuo como solução do problema, ou seja, esta etapa é uma forma de mensurar quão aptos estão os indivíduos da população e selecionar os melhores. A Equação (4.11) retorna os valores de PQI para cada indivíduo. Quanto menor o valor, melhor a solução e quanto maior o valor, pior a solução;
- **Escolha dos pais:** os indivíduos selecionados são aqueles usados para o processo de geração de descendentes. Portanto, esta etapa simula o mecanismo de seleção natural, ou ainda, a “sobrevivência dos mais fortes”, em que os pais mais aptos geram

filhos. Neste caso, selecionou-se 10% dos indivíduos classificados como melhores, baseado no *fitness*, para realizar o cruzamento;

- **Cruzamento:** conhecido também como *crossover*, é um processo análogo à recombinação de partes das sequências de caracteres entre pares de cromossomos, com o objetivo de gerar nova descendência. Neste caso, cada par de indivíduos gera dois filhos com a recombinação dos valores, de acordo com a troca do valor do w_2 dos pais, mantendo os pesos w_1 e w_4 e ajustando o w_3 conforme as restrições (4.7), (4.8), (4.9) e (4.10);
- **Mutação:** este processo é responsável pela introdução e manutenção da diversidade genética na população. Neste trabalho, 30% dos filhos gerados no **Cruzamento** sofrem mutação. Gerou-se uma variação aleatória no w_4 e em seguida ajustou-se de acordo com as restrições (4.7), (4.8), (4.9) e (4.10);
- **Seleção dos sobreviventes:** Após a realização dos passos descritos acima, a nova população é avaliada (o conjunto de filhos torna-se a geração dos indivíduos da população da etapa de **Fitness** e o processo se repete enquanto existir mais do que um indivíduo sobrevivente). No fim, a **Seleção dos sobreviventes** tem como critério de parada a seleção de um único indivíduo, quando não resta nenhum outro concorrente.

Como resultado, o AG retorna os parâmetros dos melhores pesos w_1 , w_2 , w_3 , w_4 , w_5 e w_6 para o cálculo do *PQI* para cada solução de compensação. Quanto menor o valor do *PQI*, melhor a solução e quanto maior o valor do *PQI*, pior a solução. A ferramenta deve sugerir então a instalação da solução com o menor valor de *PQI*. A Figura 9 apresenta um fluxograma da ferramenta proposta.

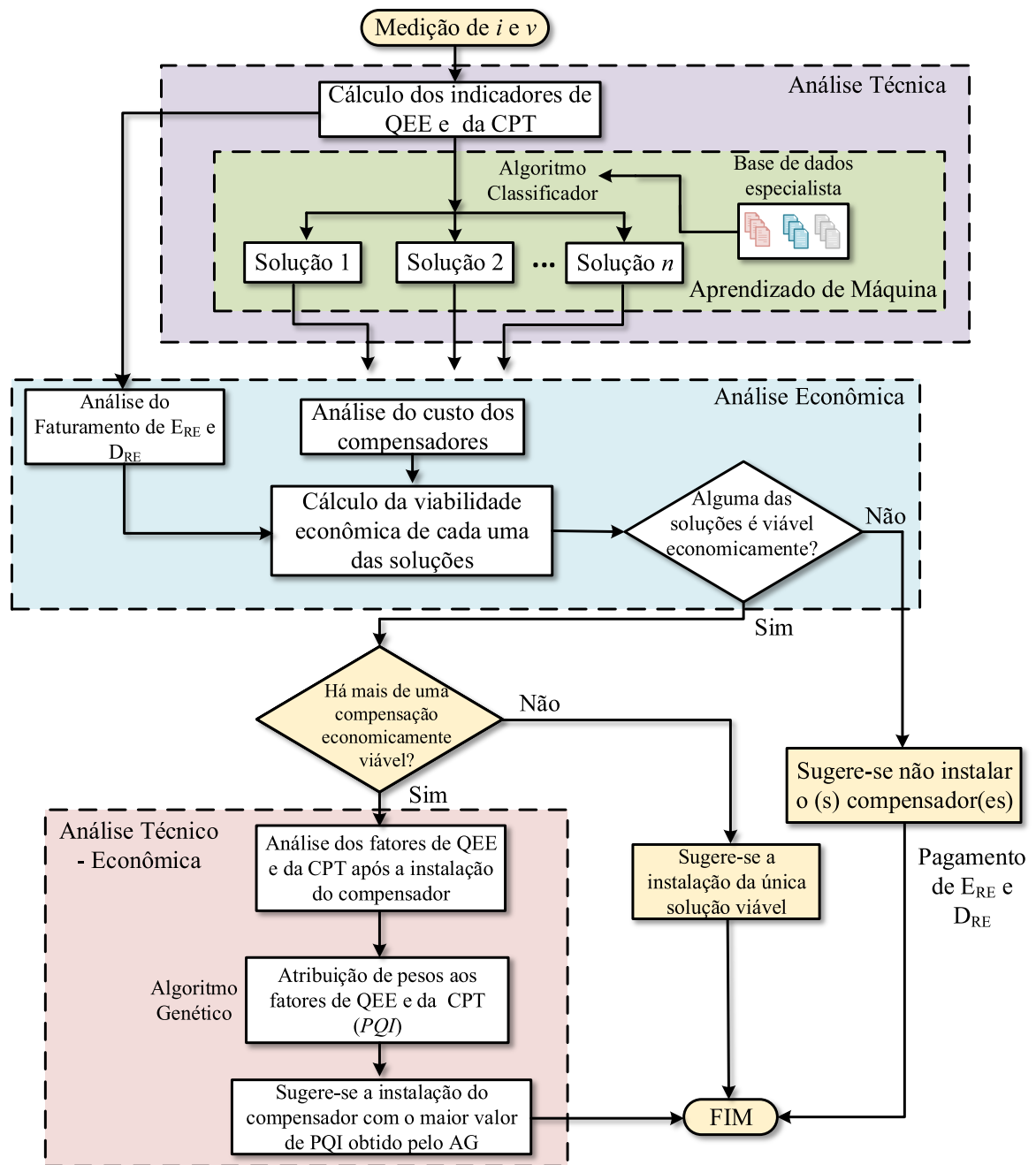


Figura 9 – Fluxograma da ferramenta proposta.

Capítulo 5

Resultados e Discussões

5.1 Características Gerais da Instalação Elétrica Analisada

Neste capítulo, a ferramenta será avaliada através de simulações computacionais para diferentes estudos de casos. O objetivo será analisar o desempenho da ferramenta em uma rede conhecida com a presença de elementos armazenadores de energia, não linearidades das cargas, desbalanço e desequilíbrios. Neste sentido, serão avaliados aspectos técnicos, como distorção harmônica de tensão (DHT_V), fator de potência (λ), fator de distorção (λ_D), fator de desbalanço (λ_U) e fator de desequilíbrio da tensão fundamental.

A ferramenta será avaliada através de simulações de uma indústria com diferentes cargas lineares e não lineares conectadas à rede. Os dados das tensões de alimentação, equivalente de rede e os parâmetros do transformador foram obtidos junto a uma indústria metalúrgica localizada no interior do estado de São Paulo. A unidade consumidora opera no horário de 6h00 às 21h00, de segunda a sexta-feira, com nível de tensão de 11,9 kV. De acordo com a Resolução Normativa nº 414, art. 76 da ANEEL [2], o consumidor se enquadra no grupo A e subgrupo A4. Na modalidade tarifária, enquadra-se na categoria horo-sazonal verde, com uma demanda contratada de 750 kW.

A modelagem da indústria com as cargas conectadas e a medição de tensões e correntes no PAC foi realizada com auxílio do software PSCAD [54]; o cálculo dos atributos (parcelas de potência, fatores de conformidade da carga, fator de desequilíbrio da tensão fundamental e a distorção harmônica total de tensão), a análise tarifária e a viabilidade econômica foram executadas com o auxílio do software Matlab [55]; para a tomada de decisão e o algoritmo genético utilizou-se a linguagem Python [56]. É importante destacar no entanto, que também é possível obter os dados de tensões e correntes no PAC através de medições em campo. A Figura 10 apresenta o diagrama unifilar do sistema elétrico simulado.

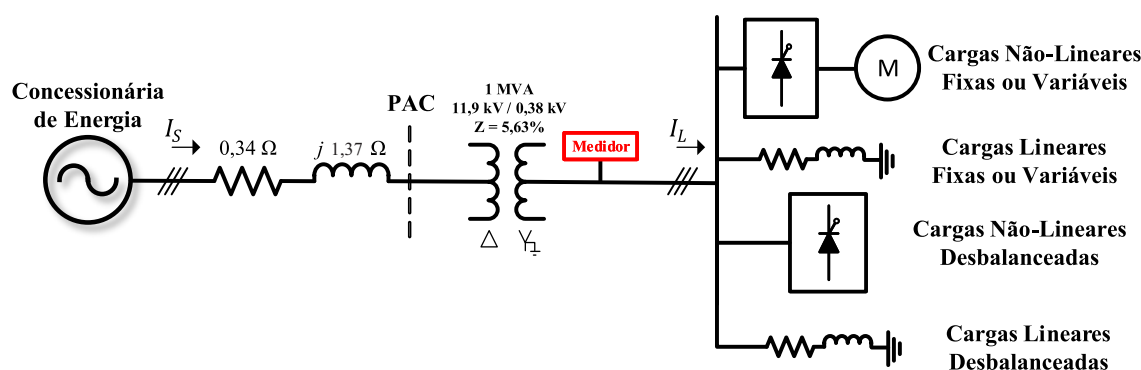


Figura 10 – Diagrama unifilar do sistema elétrico simulado.

Nas Tabelas 10 e 11 são apresentados os dados técnicos do transformador e da concessionária de energia supridora.

Tabela 10 – Dados técnicos do transformador.

S_{nom}	Tipo de conexão	Relação do Transformador	Reatância
1 MVA	$\Delta - Y$	11,9 kV / 0,38 kV	5,63 %

Tabela 11 – Parâmetros da concessionária de energia supridora.

Descrição	Valor
Potência de curto-circuito	100 MVA
Tensão nominal no PAC	11,9 kV
Frequência fundamental	60 Hz

Com base nos dados mencionados acima, foi possível modelar e simular o sistema elétrico com diferentes combinações de cargas, de modo a produzir diferentes soluções de compensação por parte da ferramenta proposta. Na sequência, foram realizados cinco estudos de casos, a fim de analisar o desempenho da ferramenta diante de diferentes distúrbios de QEE, sendo:

- Estudo de caso 01 - instalação de banco de capacitores trifásicos;
- Estudo de caso 02 - instalação de filtro passivo trifásico + banco trifásico de capacitores fixos;
- Estudo de caso 03 - instalação de filtro ativo paralelo trifásico (3 fios);
- Estudo de caso 04 - instalação de Compensador Estático de Reativos (SVC);
- Estudo de caso 05 - instalação de SVC e filtro passivo série ou SVC e filtro ativo.

5.2 Estudo de Caso 01 - Banco de Capacitores Trifásicos

Este caso representa o sistema elétrico da Figura 10 alimentando uma carga linear balanceada. Assim como em uma instalação industrial em situação real de operação, o consumo de energia e o fator de potência sofrem variações ao longo do dia. Serão apresentados dois cenários de consumo diferentes: a unidade consumidora (1) viola o fator de potência apenas no horário fora de ponta, ou seja, das 6h00 às 16h00 e das 20h00 e 21h00; (2) viola o fator de potência somente no horário de ponta, ou seja, das 16h00 às 20h00.

5.2.1 Cenário 01

O primeiro cenário está apresentado na Figura 11, que ilustra a evolução dos indicadores de QEE, como os fatores de conformidade da carga, parcelas de potência, fator de desequilíbrio da tensão e distorção harmônica de tensão medidos durante um dia de funcionamento da indústria.

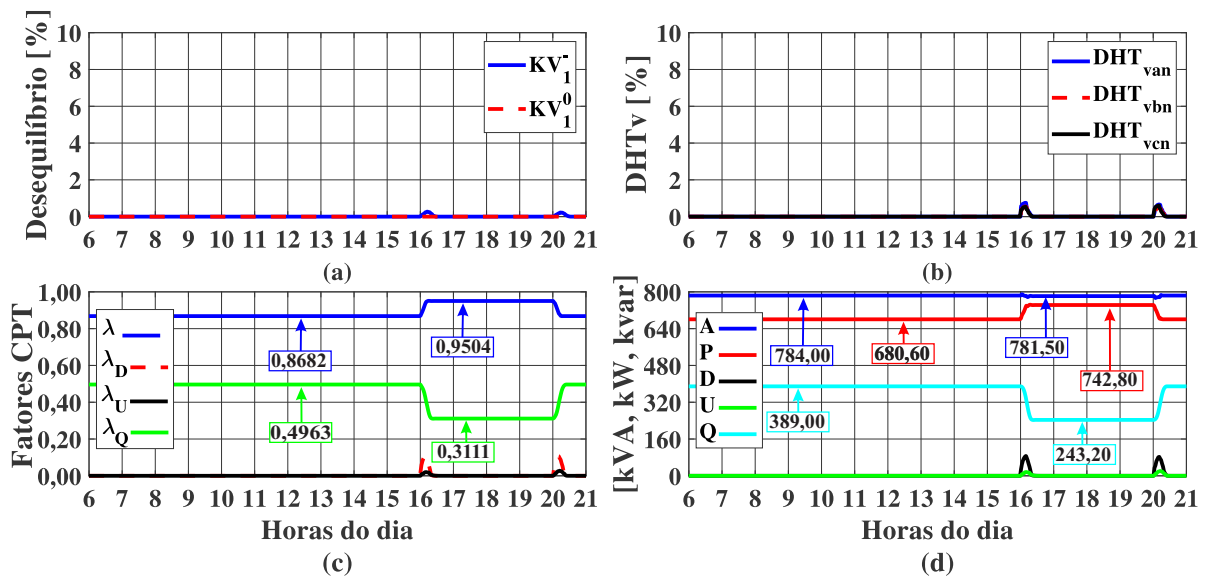


Figura 11 – Evolução dos indicadores antes da compensação: (a) Fator de desequilíbrio de tensão de sequência negativa e zero. (b) Distorção harmônica total de tensão. (c) Fatores de conformidade da carga e (d) Parcelas de potência da CPT para o estudo de caso 01 - cenário 01.

Pode-se observar que neste caso, Figura 11(c), ocorre violação do limite do fator de potência (λ) somente no horário fora de ponta, alcançando o valor de 0,8682. Os outros fatores não violam os limites pré-estabelecidos. A potência ativa e reativa, durante o período fora de ponta, alcançam 680,60 kW e 389,00 kvar. Quando ocorre apenas a violação do fator de potência, o classificador sugere a instalação do banco de capacitores

trifásico. Das 18.900 amostras, 13.747 apresentam o compensador 01 como solução (ver Tabela 7). O diagrama unifilar da solução está ilustrado na Figura 12.

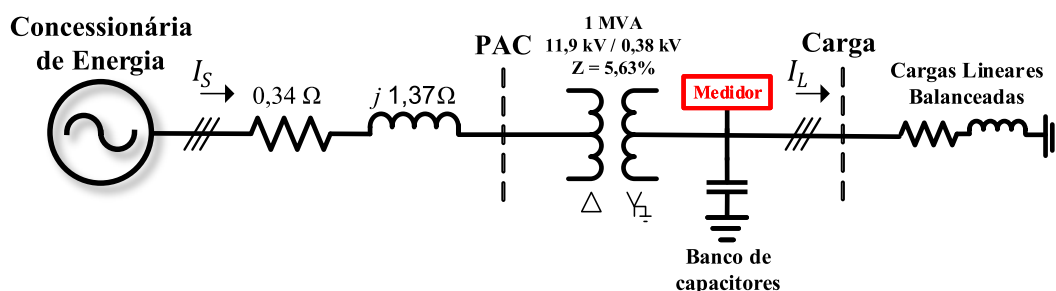


Figura 12 – Diagrama unifilar do sistema elétrico com o banco de capacitores.

Através da ferramenta proposta, foi possível estimar os valores pagos pelo consumo excedente de energia reativa (E_{RE}) em horário de ponta, fora de ponta e demanda de potência reativa excedente (D_{RE}). Como mencionado anteriormente, Capítulo 4, as tarifas foram retiradas de faturas referentes ao ano de 2019 da concessionária de energia ENEL Brasil Distribuição São Paulo. O faturamento da energia e demanda reativa excedente anual é apresentado na Tabela 12.

Tabela 12 – Faturamento de energia e demanda reativa excedente anual para o estudo de caso 01 - cenário 01.

Especificação	Faturamento
Demanda de potência reativa excedente	R\$ 0,00
Energia reativa excedente - horário de ponta	R\$ 0,00
Energia reativa excedente - horário fora de ponta	R\$ 5.725,20
Total	R\$ 5.725,20

Após o dimensionamento do banco de capacitores, a potência reativa a ser compensada pelo banco de capacitores a ser instalado é de 94,1 kvar. Para tanto, foram cotados orçamentos em empresas especializadas no fornecimento e instalação de dois bancos de capacitores, sendo um de 30 kvar e outro de 70 kvar com vida útil de 100.000 horas, ou seja, 11 anos. O valor mais atrativo obtido foi de R\$ 39.722,87. Partindo do pressuposto que neste trabalho a rede é conhecida, simulou-se o funcionamento da indústria com o banco de capacitores, a Figura 13 ilustra a evolução dos indicadores de QEE obtidos.

Pode-se observar que neste caso, na Figura 13(c), a violação do fator de potência (λ) no horário fora de ponta foi corrigida, alcançando o valor de 0,9205. Os outros fatores continuaram não violando os limites pré-estabelecidos. A potência ativa, durante o período fora de ponta, alcança 694,30 kW, ou seja, teve um aumento de 2,05%. Já a potência reativa, atingiu 389,0 kvar, ou seja, a instalação do banco de capacitores dimensionado irá compensar 94,1 kvar.

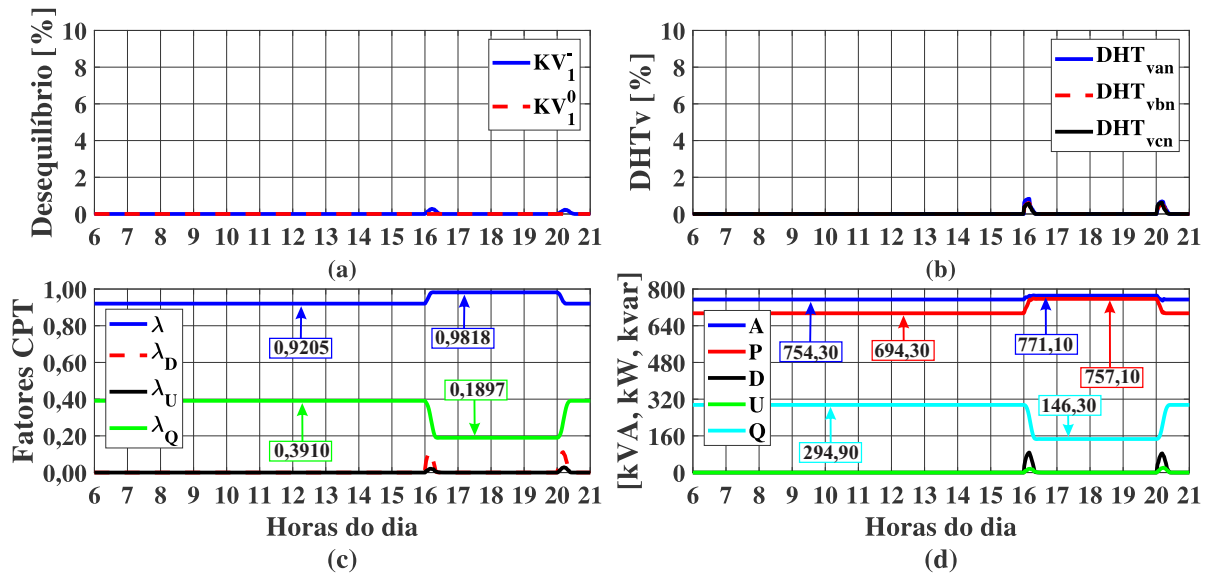


Figura 13 – Evolução dos indicadores depois da compensação: (a) Fator de desequilíbrio de tensão de sequência negativa e zero. (b) Distorção harmônica total de tensão. (c) Fatores de conformidade da carga e (d) Parcelas de potência da CPT para o estudo de caso 01 - cenário 01.

Em seguida, a ferramenta simulou o financiamento da aquisição do equipamento, os resultados obtidos estão apresentados na Tabela 13. Para a simulação, considerou-se um período de 36 meses, ou seja, 33 parcelas e carência de 3 meses, totalizando um período de 3 anos, com juros de 1,2% a.m. O valor máximo permitido para financiamento corresponde a 90% do valor do bem, ou seja, R\$ 35.750,58. No primeiro mês, os juros atingem o valor de R\$ 429,01 e no último, R\$ 13,00. O valor financiado sofre amortização mensal, totalizando ao final do período o valor de R\$ 44.330,72.

Tabela 13 – Simulação do financiamento para aquisição do equipamento mitigador para o estudo de caso 01 - cenário 01.

Especificação	Resultado
Valor a ser financiado	R\$ 35.750,58
Parcelas	33
Amortização	R\$ 1.083,35
Carência	R\$ 429,01

Por fim, a ferramenta calculou os indicadores para análise da viabilidade econômica. A Taxa Mínima de Atratividade (TMA) foi indicada pela média da taxa SELIC no ano de 2019, ou seja, $TMA = 5,95\%$ a.a. Após o levantamento dos valores futuros das contas de energia elétrica para o período estudado, com base na progressão anual de 5,57% [46] como taxa de reajuste, calculou-se o fluxo de caixa mensal.

É importante destacar, como citado no Capítulo 3, que as receitas foram compostas pelo somatório do consumo reativo e pelo valor residual do equipamento no último semestre. O consumo e demanda de energia reativa excedente foram considerados como

componente positiva do fluxo de caixa, uma vez que deixa de ser uma despesa excedente em razão dos valores que seriam pagos a concessionária de energia. Nas despesas, foram incluídos os gastos com juros e amortização do financiamento, além da manutenção e depreciação do equipamento. Considerando as projeções de valores de consumo de energia reativa para os três anos após a instalação do banco de capacitores, a indústria deixará de gastar a quantia de R\$ 18.149,99. Os indicadores de viabilidade calculados estão apresentados na Tabela 14.

Tabela 14 – Indicadores de viabilidade econômica para o estudo de caso 01 - cenário 01.

Indicadores econômicos	Resultado
VPL	- R\$ 63.928,31
TIR	-155,50%

O cálculo do VPL e o TIR resultaram em valores negativos, -R\$63.928,31 e -155,50%, respectivamente. Neste caso, como descrito no Capítulo 3, recomenda-se rejeitar o investimento, ou seja, neste caso, não é economicamente viável o investimento em um compensador.

5.2.2 Cenário 02

O segundo cenário está apresentado na Figura 14, que ilustra a evolução dos indicadores de QEE, como os fatores de conformidade da carga, parcelas de potência, fator de desequilíbrio da tensão e distorção harmônica de tensão medidos durante um dia de funcionamento da indústria.

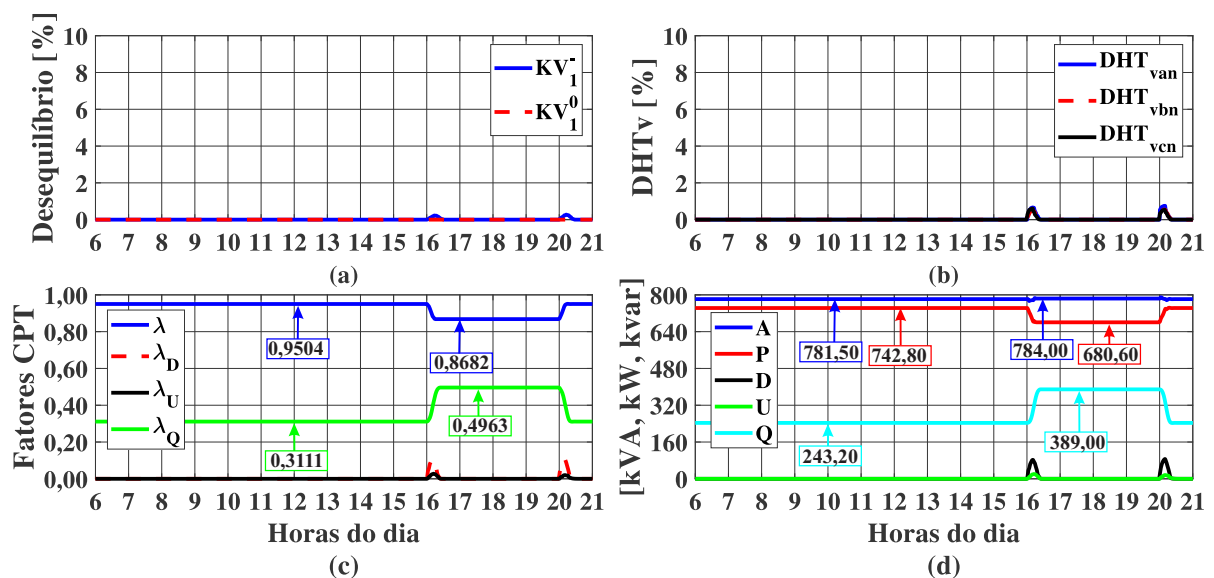


Figura 14 – Evolução dos indicadores antes da compensação: (a) Fator de desequilíbrio de tensão de sequência negativa e zero. (b) Distorção harmônica total de tensão. (c) Fatores de conformidade da carga e (d) Parcelas de potência da CPT para o estudo de caso 01 - cenário 02.

Pode-se observar que neste caso, Figura 14(c), ocorre violação do limite do fator de potência (λ) no horário fora de ponta e ponta, ou seja, de 16h00 às 20h00, alcançando o valor de 0,8682. Os outros fatores não violam os limites pré-estabelecidos. A potência ativa e reativa, durante o período de violação, alcançam 680,60 kW e 389,00 kvar. Assim como no primeiro cenário, o classificador sugere a instalação do banco de capacitores trifásico. Das 18.900 amostras, 13.626 indicam a instalação do compensador 01 como solução (ver Tabela 7). O faturamento da energia e demanda reativa excedente anual é apresentado na Tabela 15.

Tabela 15 – Faturamento de energia e demanda reativa excedente anual para o estudo de caso 01 - cenário 02.

Especificação	Faturamento
Demanda de potência reativa excedente	R\$ 0,00
Energia reativa excedente - horário de ponta	R\$ 156.144,72
Energia reativa excedente - horário fora de ponta	R\$ 520,44
Total	R\$ 156.665,16

Após o dimensionamento do banco de capacitores, a potência reativa a ser compensada pelo banco de capacitores a ser instalado é de 94,1 kvar, o mesmo do cenário anterior, dado que os níveis de potência são iguais, só diferenciando o horário de consumo. Sendo assim, o preço do banco de capacitores deve ser o mesmo. Novamente, simulou-se o funcionamento da indústria com o banco de capacitores, a Figura 15 ilustra a evolução dos indicadores de QEE durante um dia de funcionamento.

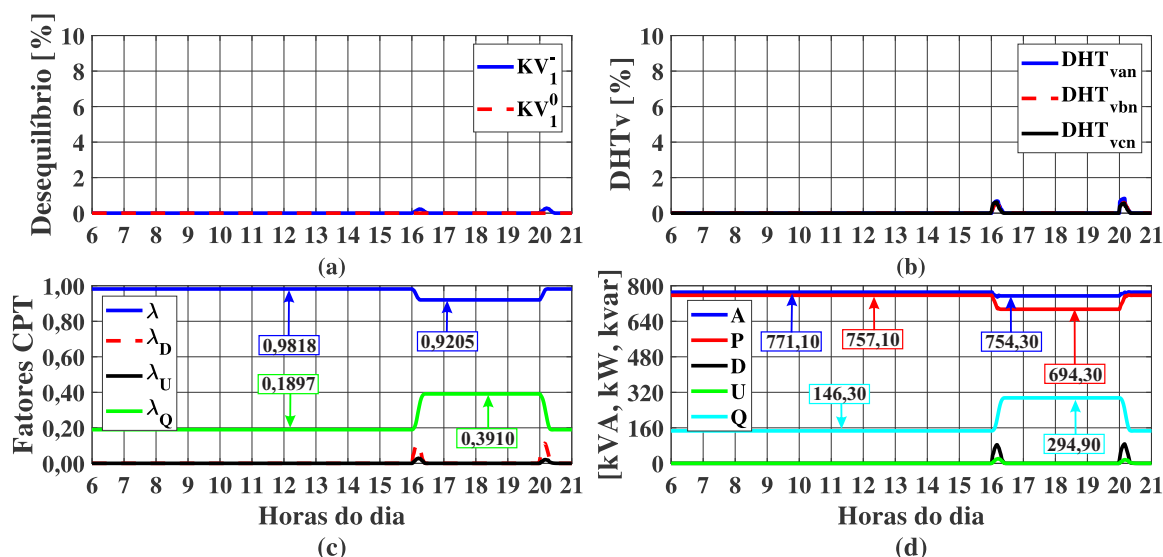


Figura 15 – Evolução dos indicadores depois da compensação: (a) Fator de desequilíbrio de tensão de sequência negativa e zero. (b) Distorção harmônica total de tensão. (c) Fatores de conformidade da carga e (d) Parcelas de potência da CPT para o estudo de caso 01 - cenário 02.

Pode-se observar que neste caso, na Figura 15(c), a violação do fator de potência (λ) no horário fora de ponta e ponta foi corrigida, alcançando o valor de 0,9205. Os outros

fatores continuaram não violando os limites pré-estabelecidos. A potência ativa, durante o período fora de ponta, alcança 694,30 kW, ou seja, teve um aumento de 2,05%. Verifica-se que a potência reativa atingiu 389,0 kvar, ou seja, a instalação do banco de capacitores compensaria 94,1 kvar. Por se tratar da mesma solução e potência do cenário anterior, a simulação do financiamento a ser considerada é a mesma apresentada na Tabela 13.

Considerando as projeções de valores de consumo de energia reativa para os três anos após a instalação do banco de capacitores, a indústria deixou de gastar a quantia de R\$496.656,45. Os indicadores de viabilidade estão descritos na Tabela 16.

Tabela 16 – Indicadores de viabilidade econômica para o estudo de caso 01 - cenário 02.

Indicadores econômicos	Resultado
VPL	R\$ 359.944,63
TIR	393,55%
<i>Payback</i> simples	3 meses e 5 dias
<i>Payback</i> descontado	3 meses e 9 dias

O cálculo do VPL e o TIR resultaram em valores positivos, R\$ 359.944,63 e 393,55%. O *payback* seria de aproximadamente 3 meses, ou seja, ainda no primeiro ano. Recomendando-se aceitar o investimento. Neste caso, é economicamente viável o investimento em um compensador.

5.3 Estudo de Caso 02 - Filtro Passivo Trifásico

Este caso representa o sistema elétrico da Figura 10 alimentando uma carga não linear balanceada. A Figura 16 ilustra a evolução dos indicadores de QEE calculados durante um dia de funcionamento da industria.

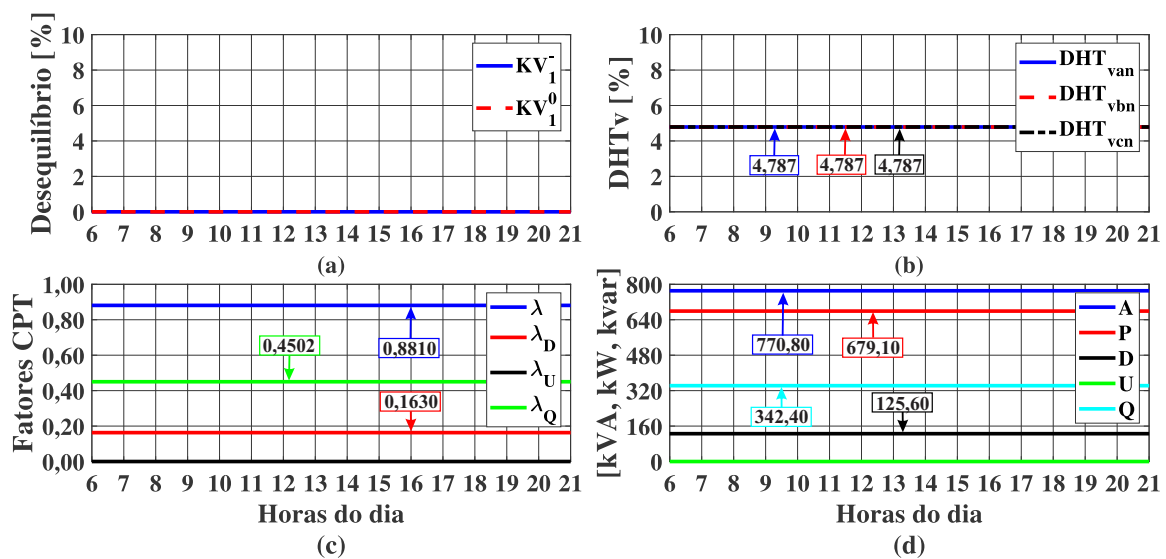


Figura 16 – Evolução dos indicadores antes da compensação: (a) Fator de desequilíbrio de tensão de sequência negativa e zero. (b) Distorção harmônica total de tensão. (c) Fatores de conformidade da carga e (d) Parcelas de potência da CPT para o estudo de caso 02.

Pode-se observar que neste caso, Figura 16(c), ocorre violação do limite do fator de potência (λ) e do fator de distorção (λ_D) durante todo o horário de funcionamento da indústria, atingindo os valores de 0,8810 e 0,1630. A violação do fator de distorção (λ_D) ocorre devido às não linearidades entre as ondas de tensões e correntes. Os outros fatores não violam os limites pré-estabelecidos. A potência ativa e reativa alcançam 679,10 kW e 342,40 kvar. O faturamento da energia e demanda reativa excedente anual é apresentado na Tabela 17.

Tabela 17 – Faturamento de energia e demanda reativa excedente anual para o estudo de caso 02.

Especificação	Faturamento
Demanda de potência reativa excedente	R\$ 0,00
Energia reativa excedente - horário de ponta	R\$ 115.566,72
Energia reativa excedente - horário fora de ponta	R\$ 4.659,04
Total	R\$ 120.224,87

Neste caso, o classificador proposto por Moreira et al. [17] sugere a instalação de filtro passivo, quando houver violação do fator de potência (λ) e do fator de distorção (λ_D). Das 18.900 amostras, todas indicaram a instalação da solução 6 (ver Tabela 7). O diagrama unifilar da solução está ilustrado na Figura 17.

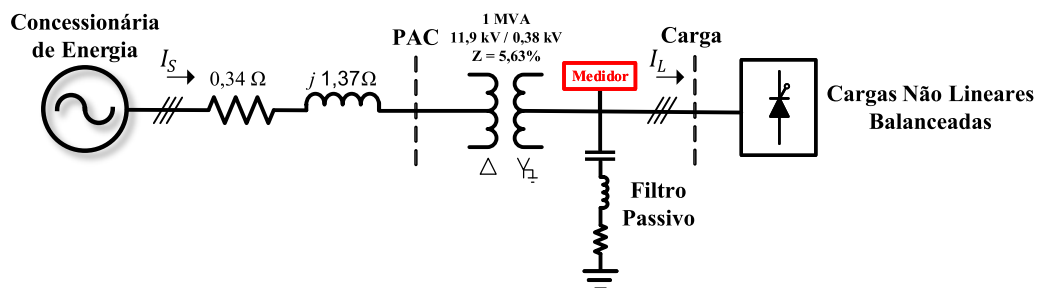


Figura 17 – Diagrama unifilar do sistema elétrico com filtro passivo.

O objetivo desta solução é projetar um sistema com filtros que forneçam uma redução adequada dos harmônicos na corrente e também forneça uma pequena parcela de energia reativa para a frequência fundamental. Os filtros podem ser conectados em estrela (Y) ou em delta (Δ). A conexão (Y) é a mais utilizada, pois permite o fácil monitoramento da corrente no neutro. Quanto maior a intensidade dos harmônicos, menor sua ordem, o que leva ao uso de filtros de baixa impedância para frequências iguais ou próximas a esses harmônicos. Serão apresentados dois cenários de compensação diferentes: (1) instalação do filtro passivo que elimine a 5ª e 7ª componentes harmônicas; (2) instalação do filtro passivo que elimine a 5ª, 7ª e 11ª componentes harmônicas.

5.3.1 Cenário 01

Neste cenário, implementou-se um filtro harmônico sintonizado objetivando-se corrigir o fator de potência e reduzir a distorção harmônica das cargas. Projetou-se o filtro

para eliminar a 5ª e 7ª ordens harmônicas, seguindo as especificações apresentadas na Tabela 18.

Tabela 18 – Especificações dos filtros harmônicos para o estudo de caso 02 - cenário 01.

Componente	5ª ordem	7ª ordem
R	17,04 $m\Omega$	59,57 $m\Omega$
L	271,25 μH	671,13 μH
C	1,04 mF	0,21 mF

Após o dimensionamento do filtro, levantou-se o custo do mesmo, sendo o melhor valor encontrado R\$ 97.006,67. Assim como no caso anterior, através da rede conhecida, simulou-se o funcionamento da indústria com o filtro passivo, a Figura 18 ilustra a evolução dos indicadores de QEE.

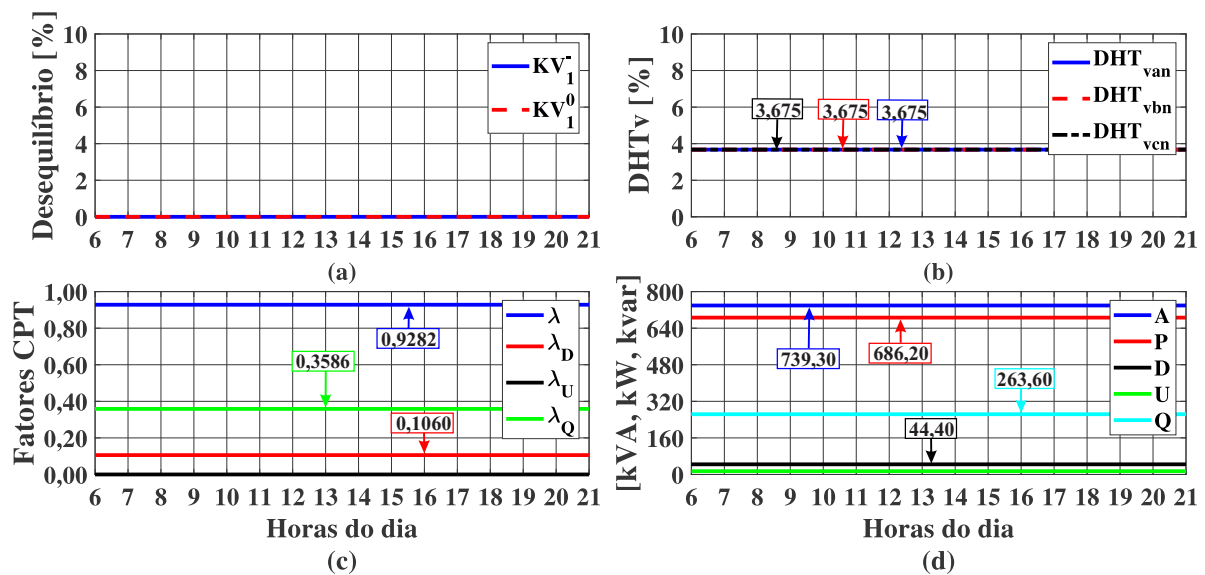


Figura 18 – Evolução dos indicadores depois da compensação: (a) Fator de desequilíbrio de tensão de sequência negativa e zero. (b) Distorção harmônica total de tensão. (c) Fatores de conformidade da carga e (d) Parcelas de potência da CPT para o estudo de caso 02 - cenário 01.

Pode-se observar na Figura 18(c), a violação do fator de potência (λ) foi corrigida, alcançando o valor de 0,9282, porém o fator de distorção continua violando, atingindo o valor de 0,1060. Na Figura 18(d), a potência de distorção e potência aparente assumem respectivamente os valores de 44,4 kVA e 739,30 kVA. A potência ativa alcança 686,20 kW, ou seja, um aumento de 1,05%. Já a potência reativa, atinge 263,60 kvar, ou seja, o filtro compensaria 78,8 kvar. Após, a ferramenta realizou a simulação do financiamento, Tabela 19, sob as mesmas condições apresentadas no caso anterior.

Considerando as projeções de valores de consumo de energia reativa para os três anos após a instalação do banco de capacitores, a indústria deixaria de gastar a quantia de R\$ 381.136,97. Os indicadores de viabilidade estão descritos na Tabela 20.

Tabela 19 – Simulação do financiamento para aquisição do equipamento mitigador para o estudo de caso 02 - cenário 01.

Especificação	Resultado
Valor a ser financiado	R\$ 87.306,00
Parcelas	33
Amortização	R\$ 2.645,64
Carência	R\$ 1.047,67

Tabela 20 – Indicadores de viabilidade econômica para o estudo de caso 02 - cenário 01.

Indicadores econômicos	Resultado
VPL	R\$ 142.307,43
TIR	79,32%
<i>Payback</i> simples	1 ano, 1 mês e 3 dias
<i>Payback</i> descontado	1 ano, 1 mês e 29 dias

O cálculo do VPL e o TIR resultaram em valores positivos, R\$ 142.307,43 e 79,32%. O *payback* seria de aproximadamente 1 ano e 2 meses, ou seja, no segundo ano. Neste caso, a ferramenta proposta recomenda aceitar o investimento, ou seja, é economicamente viável o investimento no filtro sintonizado.

5.3.2 Cenário 02

Neste segundo cenário, projetou-se filtros para eliminar a 5ª, 7ª e 11ª ordens harmônicas, seguindo as especificações apresentadas na Tabela 21.

Tabela 21 – Especificações dos filtros harmônicos para o estudo de caso 02 - cenário 02.

Componente	5ª ordem	7ª ordem	11ª ordem
R	4,96 $m\Omega$	14,35 $m\Omega$	47,59 $m\Omega$
L	79,01 μH	163,11 μH	344,27 μH
C	3,56 mF	0,88 mF	0,17 mF

O valor mais atrativo obtido para o filtro projetado é de R\$ 150.320,81. A Figura 19 ilustra a evolução dos indicadores de QEE durante um dia de funcionamento da indústria com o compensador instalado.

Através da Figura 19(c), pode-se observar que a violação do fator de potência (λ) e do fator de distorção foram corrigidas, alcançando o valor de 0,9923 e 0,0625, respectivamente. Na Figura 19(d), a potência de distorção e potência aparente assumem respectivamente os valores de 44,4 kVA e 710,80 kVA. A potência ativa alcança 705,40 kW, ou seja, um aumento de 3,87%. Em seguida, a potência reativa, atinge 75,75 kvar, ou seja, o filtro compensa 266,65 kvar. Após, a ferramenta realizou a simulação do financiamento, Tabela 22, sob as mesmas condições apresentadas no caso anterior. Os indicadores de viabilidade obtidos estão descritos na Tabela 23.

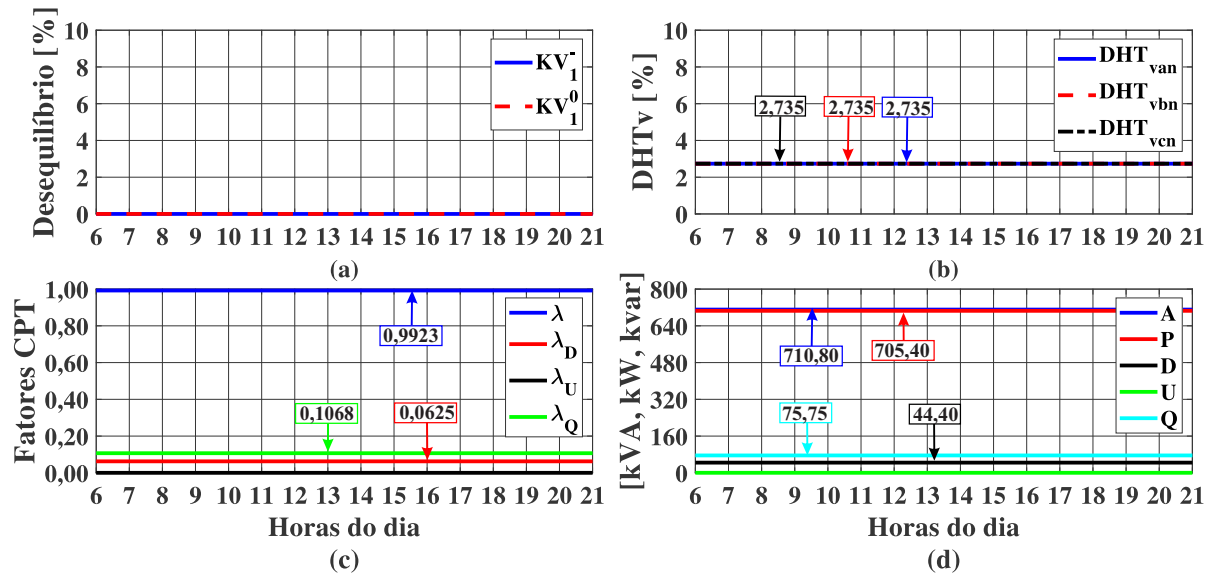


Figura 19 – Evolução dos indicadores depois da compensação: (a) Fator de desequilíbrio de tensão de sequência negativa e zero. (b) Distorção harmônica total de tensão. (c) Fatores de conformidade da carga e (d) Parcelas de potência da CPT para o estudo de caso 02 - cenário 02.

Tabela 22 – Simulação do financiamento para aquisição do equipamento mitigador para o estudo de caso 02 - cenário 02.

Especificação	Resultado
Valor a ser financiado	R\$ 135.288,73
Parcelas	33
Amortização	R\$ 4.099,66
Carência	R\$ 1.623,46

Tabela 23 – Indicadores de viabilidade econômica para o estudo de caso 02 - cenário 02.

Indicadores econômicos	Resultado
VPL	R\$ 26.865,43
TIR	15,91%
Payback simples	2 anos, 3 meses e 28 dias
Payback descontado	2 anos, 6 mês e 10 dias

O cálculo do VPL e o TIR resultaram em valores positivos, R\$ 26.865,43 e 15,91%. O *payback* seria de aproximadamente 2 ano e 6 meses, ou seja, no segundo ano. Recomendando-se aceitar o investimento, ou seja, é economicamente viável o investimento no filtro sintonizado.

Um fato importante que deve ser mencionado no comportamento dos filtros é a ocorrência de ressonância paralela em frequências abaixo das frequências de sintonia de cada filtro. Assim, o filtro de 7ª ordem não pode ser inserido no sistema com ausência do filtro de 5ª ordem e o filtro de 11ª ordem não pode ser inserido no sistema sem a presença do filtro de 7ª ordem. Caso isso aconteça, ao invés do equipamento reduzir o conteúdo

harmônico, causaria um aumento, resultando em danos a equipamentos.

Como pode-se observar, os dois cenários apresentam indicadores de viabilidade positivos, ou seja, ambos são economicamente viáveis. Neste caso, tem-se duas opções: (1) Instalar o filtro passivo que elimine a 5ª e 7ª componentes harmônicas, o fator de distorção continuar violando, investir menos e ter um retorno financeiro mais rápido ou (2) Instalar o filtro passivo que elimine a 5ª, 7ª e 11ª componentes harmônicas, a violação de todos os fatores ser corrigida, investir mais e ter um retorno financeiro mais lento. Surge então um impasse, ao optar pela solução com menor custo, o quanto prejudicial será a distorção de corrente para a rede.

Diante desse impasse, a ferramenta calculou os pesos para cada indicador e o PQI (Índice de Qualidade de Energia) de cada uma das soluções, como apresentado na Tabela 24.

Tabela 24 – Pesos e PQI obtidos de cada uma das soluções para o estudo de caso 02.

Estudo de Caso 02	w_1	w_2	w_3	w_4	w_5	w_6	PQI
Cenário 1	0,33808	0,00091	0,00039	0,33808	0,000145	0,32109	0,44033478
Cenário 2	0,33808	0,00091	0,00039	0,33808	0,00145	0,32109	0,67564625

Como citado no Capítulo 4 (Seção 4.5.2), quanto maior o valor do PQI, melhor a solução e quanto menor o valor, pior a solução; conseqüentemente a ferramenta indica a instalação da solução com o maior valor do PQI. Sendo assim, sugere-se a instalação do filtro passivo para eliminar a 5ª, 7ª e 11ª harmônica. Além disso, é possível afirmar que o PQI no primeiro cenário é 34,83% menor que no segundo cenário. É importante ressaltar que a circulação de harmônicos na rede, pode causar diminuição do valor do fator de potência, ocasiona diminuição da vida útil de motores, aumento da temperatura de motores de indução, diminuição da capacidade de condução de corrente, maior susceptibilidade a sags, *flicker*, entre outros problemas [57].

5.4 Estudo de Caso 03 - Filtro Ativo Paralelo Trifásico

Este caso representa o sistema elétrico da Figura 10 alimentando uma carga não linear balanceada. A Figura 20 ilustra a evolução dos indicadores de QEE calculados durante um dia de funcionamento da indústria.

Pode-se observar que neste caso, Figura 20(c), ocorre violação do limite do fator de potência (λ) e do fator de distorção (λ_D) durante todo o período de funcionamento da indústria, atingindo os valores de 0,8544 e 0,1600, respectivamente. Além disso, Figura 20(d), a distorção harmônica total de tensão ultrapassa o limite pré-estabelecido

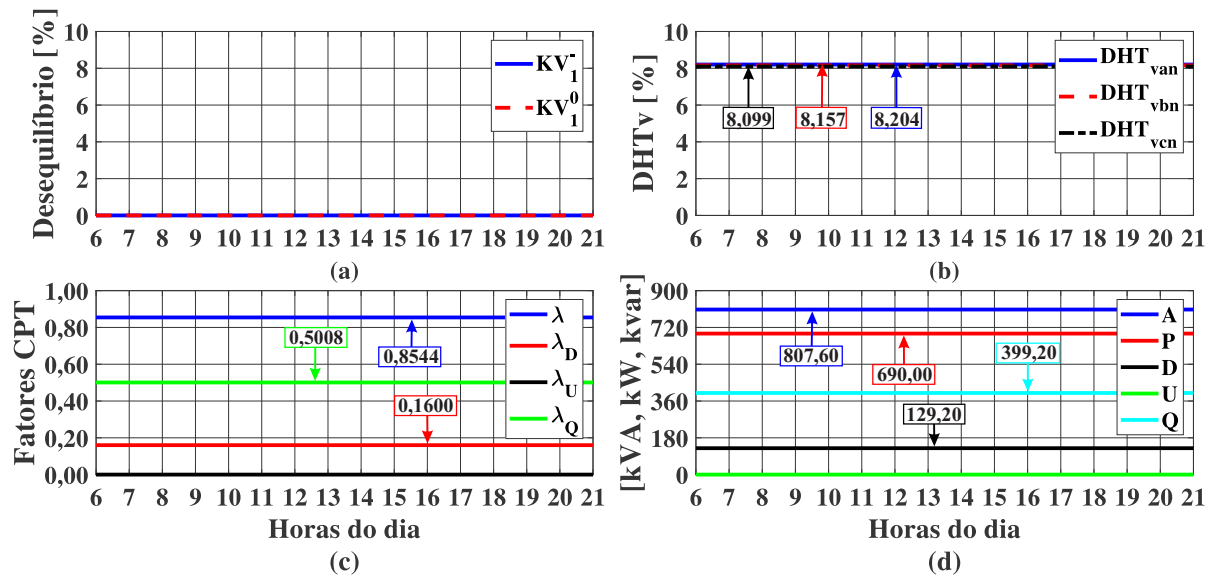


Figura 20 – Evolução dos indicadores antes da compensação: (a) Fator de desequilíbrio de tensão de sequência negativa e zero. (b) Distorção harmônica total de tensão. (c) Fatores de conformidade da carga e (d) Parcelas de potência da CPT para o estudo de caso 03.

de 5%. A potência ativa e reativa alcançam 690,00 kW e 399,20 kvar, respectivamente. O faturamento da energia e demanda reativa excedente anual é apresentado na Tabela 25.

Tabela 25 – Faturamento de energia e demanda reativa excedente anual para o estudo de caso 03.

Especificação	Faturamento
Demanda de potência reativa excedente	R\$ 0,00
Energia reativa excedente - horário de ponta	R\$ 203.605,44
Energia reativa excedente - horário fora de ponta	R\$ 8.822,76
Total	R\$ 212.428,20

O classificador sugere a instalação de filtro ativo quando houver violação do fator de potência (λ), do fator de distorção (λ_D) e da distorção harmônica total de tensão (DHT_V). Das 18.900 amostras, todas indicaram a instalação da solução 9 (ver Tabela 7). O diagrama unifilar da solução está ilustrado na Figura 21.

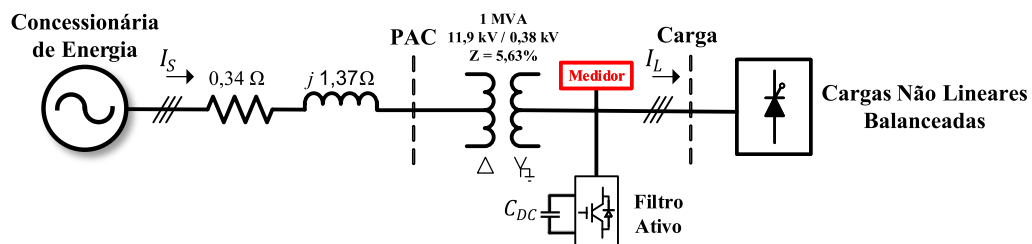


Figura 21 – Diagrama unifilar do sistema elétrico com o filtro ativo.

O objetivo desta solução é injetar no sistema magnitudes de harmônicos de corrente igual aos gerados pelas cargas e defasamento de ângulo de fase de 180 graus para que elas sejam canceladas com as outras. Esta compensação paralela atua como fonte de corrente alternada controlada, sendo usada principalmente em sistemas que apresentem cargas não lineares conectadas.

Para o filtro ativo dimensionado, o menor custo encontrado foi de R\$ 225.625,91. A Figura 22 ilustra a evolução dos indicadores de QEE obtidos para a simulação da indústria com o compensador instalado.

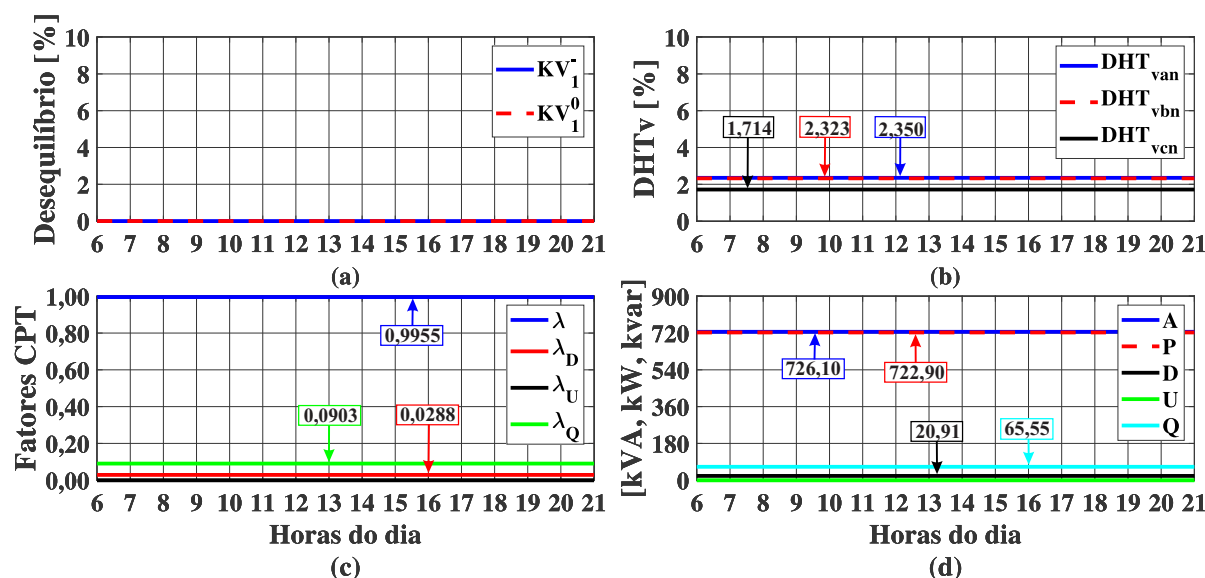


Figura 22 – Evolução dos indicadores depois da compensação: (a) Fator de desequilíbrio de tensão de sequência negativa e zero. (b) Distorção harmônica total de tensão. (c) Fatores de conformidade da carga e (d) Parcelas de potência da CPT para o estudo de caso 03.

Na Figura 22(c), pode-se observar que a violação do fator de potência, fator de distorção e distorção harmônica total de tensão foram corrigidas. A potência ativa alcança 722,90 kW, ou seja, um acréscimo de 4,76%. Já a potência reativa, atinge 65,55 kvar, ou seja, a instalação do filtro compensaria 333,65 kvar. Após, a ferramenta realizou a simulação do financiamento, Tabela 26, sob as mesmas condições apresentadas no caso anterior.

Tabela 26 – Simulação do financiamento para aquisição do equipamento mitigador para o estudo de caso 03.

Especificação	Resultado
Valor a ser financiado	R\$ 203.063,32
Parcelas	33
Amortização	R\$ 6.153,43
Carência	R\$ 2.436,76

Considerando as projeções de valores de consumo de energia reativa para os três anos após a instalação do banco de capacitores, a indústria deixaria de gastar a quantia de R\$ 673.440,23 . Os indicadores de viabilidade calculados estão apresentados na Tabela 27.

Tabela 27 – Indicadores de viabilidade econômica para o estudo de caso 03.

Indicadores econômicos	Resultado
VPL	R\$ 142.467,80
TIR	39,67%
<i>Payback</i> simples	1 ano, 8 meses e 16 dias
<i>Payback</i> descontado	1 ano, 10 meses e 3 dias

O cálculo do VPL e o TIR resultaram em valores positivos, R\$ 142.467,80 e 39,67%, respectivamente. O *payback* seria de aproximadamente 1 ano e 10 meses, ou seja, no segundo ano. Neste caso, recomenda-se aceitar o investimento, indicando a viabilidade do investimento.

5.5 Estudo de Caso 04 - Compensador Estático de Reativos

Este caso representa o sistema elétrico da Figura 10 alimentando uma carga linear desbalanceada. A Figura 23 ilustra a evolução dos indicadores de QEE durante um dia de funcionamento da indústria.

Na Figura 23(a), pode-se observar que diferentemente dos casos anteriores existe desequilíbrio de tensão fundamental de sequência negativa (KV_1^-), porém abaixo do limite estabelecido. A presença da carga desbalanceada implica em correntes desbalanceadas circulando na rede, devido ao nível de potência da carga em relação ao sistema de energia. Esse distúrbio proveniente da carga impacta diretamente na tensão da rede criando assim desequilíbrio das tensões ($KV_1^- \neq 0$), aumento das perdas na rede e redução do fator de potência com o aumento de λ_U . Na Figura 23(c), ocorre violação do limite do fator de potência (λ) e do fator de desbalanço (λ_U), atingindo os valores de 0,8272 e 0,2222, respectivamente. Diferentemente dos outros casos apresentados, verifica-se a presença da potência de desbalanço (λ_U).

O fator de reatividade (λ_Q) durante todo o período apresenta o valor próximo de 0,5293, devido ao circuito não ser puramente reativo e possuir elementos armazenadores de energia. Este indicador quanto mais próximo de 1 (um) pior para a instalação. Além disso, observa-se que o fator de distorção (λ_D) é nulo, sendo esperado, uma vez que a carga é linear, logo, não existe distorção de corrente. O faturamento da energia e demanda reativa excedente anual é apresentado na Tabela 28.

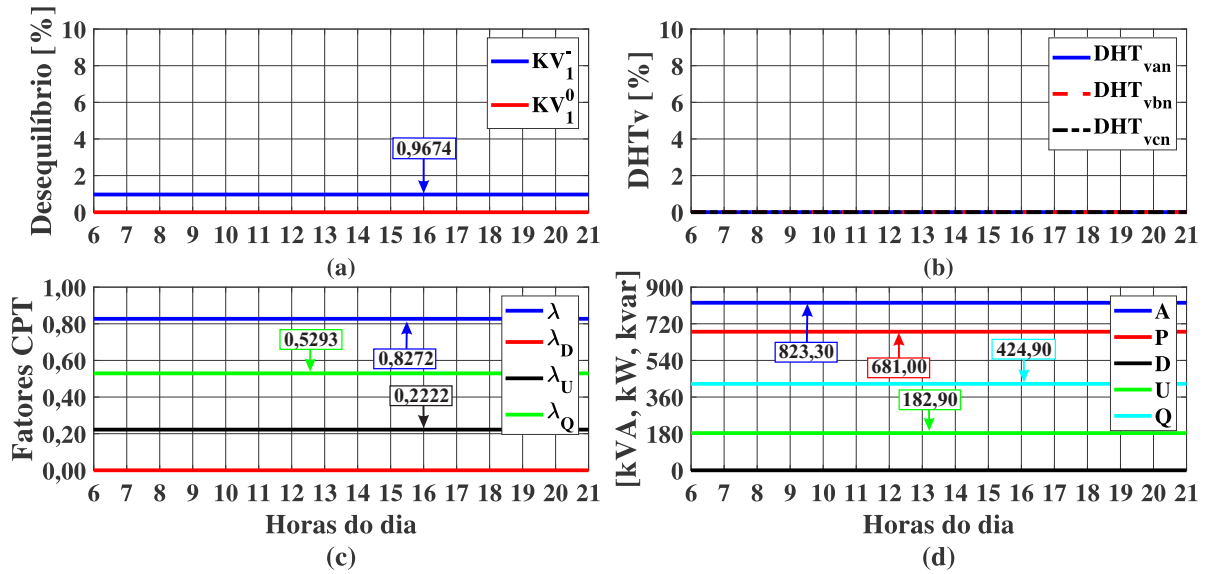


Figura 23 – Evolução dos indicadores antes da compensação: (a) Fator de desequilíbrio de tensão de sequência negativa e zero. (b) Distorção harmônica total de tensão. (c) Fatores de conformidade da carga e (d) Parcelas de potência da CPT para o estudo de caso 04.

Tabela 28 – Faturamento de energia e demanda reativa excedente anual para o estudo de caso 04.

Especificação	Faturamento
Demanda de potência reativa excedente	R\$ 0,00
Energia reativa excedente - horário de ponta	R\$ 293.592,24
Energia reativa excedente - horário fora de ponta	R\$ 11.743,44
Total	R\$ 305.335,68

Quando houver violação do fator de potência (λ) e fator de desbalanço (λ_U), o classificador deve sugerir a instalação do compensador estático de reativos. Neste caso, das 18.900 amostras, 17.200 indicaram a instalação da solução 11. O diagrama unifilar da solução está ilustrado na Figura 24, sendo composto de uma associação de CCTs (Capacitor Chaveado a Tiristor) e RCTs (Reator Controlado por Tiristor), ligados em delta.

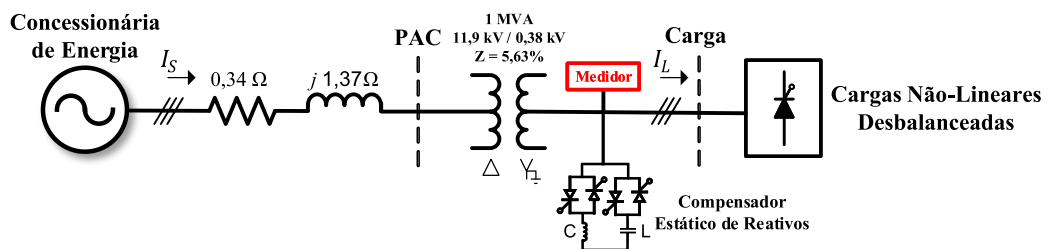


Figura 24 – Diagrama unifilar do sistema elétrico com o SVC.

O funcionamento desta solução baseia-se no chaveamento dos tiristores de forma a aumentar ou diminuir o valor da capacitância equivalente, fornecendo reativos à rede conforme as variações de tensão e carga. Sendo assim, o objetivo é compensar distúrbios de corrente causados pela carga. SVC para compensar 391,20 kvar de potência. O menor custo encontrado foi de R\$ 203.612,81. A Figura 25 apresenta os indicadores de QEE durante um dia de funcionamento da indústria depois da conexão do compensador ao circuito.

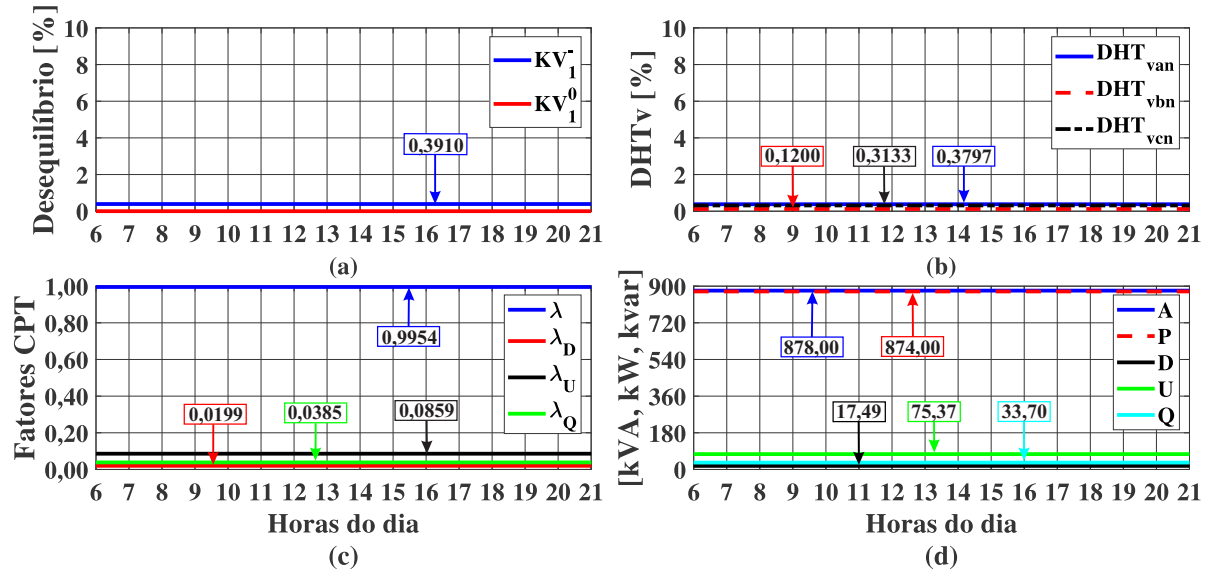


Figura 25 – Evolução dos indicadores depois da compensação: (a) Fator de desequilíbrio de tensão de sequência negativa e zero. (b) Distorção harmônica total de tensão. (c) Fatores de conformidade da carga e (d) Parcelas de potência da CPT para o estudo de caso 04.

Os valores mostram que, após a inserção do compensador, a rede passou a fornecer apenas a potência ativa ($P = 874,00$ kW) à carga, e os reativos passaram a ser fornecidos pelo capacitor. Sendo assim, o fator de potência ficou praticamente unitário, $\lambda = 0,9954$, e o fator de reatividade tornou-se praticamente nulo, $\lambda_Q = 0,0385$. Além disso, na Figura 25(c), observa-se que a violação do fator de potência e do fator de desbalanço foram corrigidas. Verifica-se também um pequeno aumento na distorção harmônica de corrente ($\lambda_D = 0,0199$). Embora a carga seja linear, isto ocorre devido ao chaveamento do TCR, sendo em alguns casos obrigatório o uso de filtros passivos para corrigir esta distorção. Em seguida, a ferramenta realizou a simulação do financiamento, como mostra a Tabela 29.

Considerando as projeções de valores de consumo de energia reativa para os três anos após a instalação do SVC, a indústria deixou de gastar a quantia de R\$ 967.975,81. Os indicadores de viabilidade estão descritos na Tabela 30.

O cálculo do VPL e o TIR resultaram em valores positivos. O *payback* seria de aproximadamente 11 meses, ou seja, ainda no primeiro ano. Neste caso, recomenda-se

Tabela 29 – Simulação do financiamento para aquisição do equipamento mitigador para o estudo de caso 04.

Especificação	Resultado
Valor a ser financiado	R\$ 183.251,53
Parcelas	33
Amortização	R\$ 5.553,08
Carência	R\$ 2.199,02

Tabela 30 – Indicadores de viabilidade econômica para o estudo de caso 04.

Indicadores econômicos	Resultado
VPL	R\$ 447.750,28
TIR	111,94%
Payback simples	10 meses e 2 dias
Payback descontado	10 meses e 22 dias

aceitar o investimento, indicando a viabilidade do investimento.

5.6 Estudo de Caso 05 - SVC e Filtro Passivo / SVC e Filtro Ativo

Este caso representa o sistema elétrico da Figura 10 alimentando por cargas não lineares desbalanceadas. A Figura 26 ilustra a evolução dos indicadores de QEE calculados durante um dia de funcionamento da indústria.

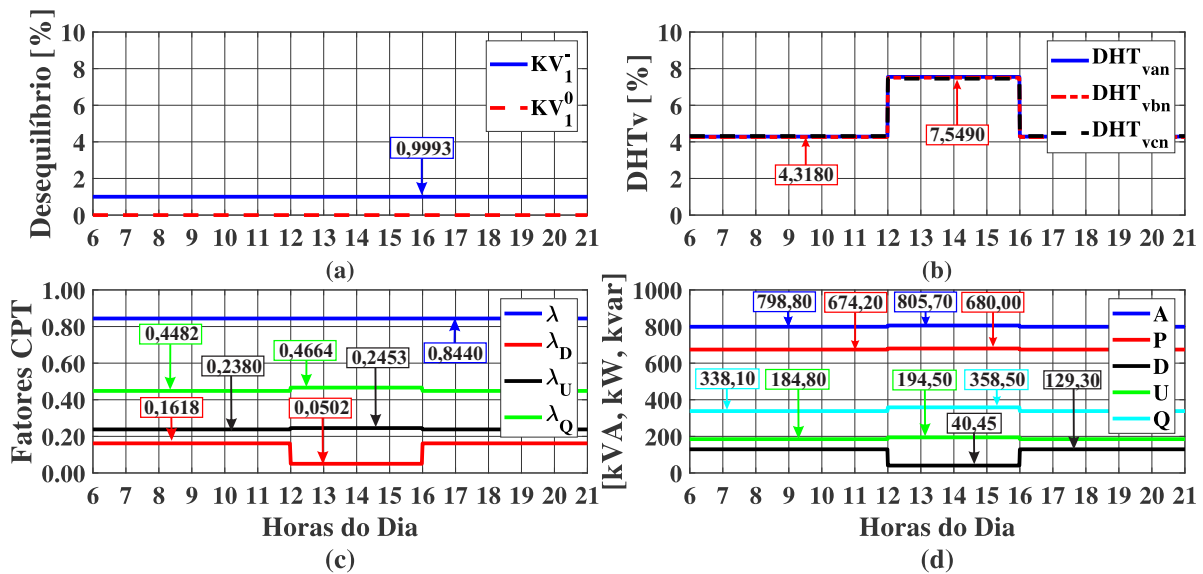


Figura 26 – Evolução dos indicadores antes da compensação: (a) Fator de desequilíbrio de tensão de sequência negativa e zero. (b) Distorção harmônica total de tensão. (c) Fatores de conformidade da carga e (d) Parcelas de potência da CPT para o estudo de caso 05.

Pode-se observar que neste caso, Figura 26(b), ocorre violação da distorção harmônica de tensão de 12h00 às 16h00, violação do fator de potência (λ) e do fator de desbalanço durante todo o período de funcionamento da indústria, Figura 26(c). Além disso, o fator de distorção (λ_D) atinge 0,1618 das 6h00 às 12h00 e 16h00 às 21h00. O faturamento da energia e demanda reativa excedente mensal é apresentado na Tabela 31.

Neste caso, o classificador sugere a instalação: (1) SVC e filtro passivo, para compensar λ , λ_D e λ_U ou (2) SVC e filtro ativo, para compensar λ , λ_U e DHT_v . Das 18.900 amostras, 13.861 indicam a instalação da solução 12, enquanto 5.039 indicam a instalação da solução 13. Serão apresentados a seguir estes dois cenários de compensação.

Tabela 31 – Faturamento de energia e demanda reativa excedente anual para o estudo de caso 05.

Especificação	Faturamento
Demanda de potência reativa excedente	R\$ 0,00
Energia reativa excedente - horário de ponta	R\$ 233.331,24
Energia reativa excedente - horário fora de ponta	R\$ 9.353,04
Total	R\$ 242.684,28

5.6.1 Cenário 01

Neste primeiro cenário, projetou-se o filtro harmônico sintonizado e o SVC objetivando-se corrigir o fator de potência, reduzir a distorção harmônica de corrente e corrigir o desbalanço na rede. O filtro passivo foi projetado para eliminar as 3^ª, 5^ª e 7^ª ordens harmônicas.

O custo encontrado para esta solução foi de R\$ 250.254,08. As Figura 27 e 28 ilustram o diagrama unifilar do sistema elétrico e os indicadores de QEE calculados após a conexão do compensador à rede.

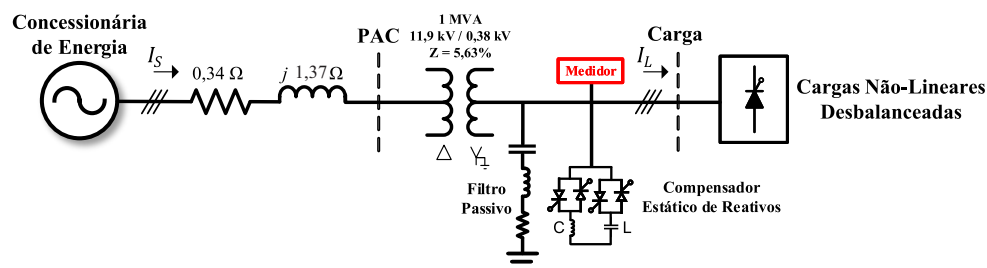


Figura 27 – Diagrama unifilar do sistema elétrico com o SVC e filtro passivo.

Pode-se observar que na Figura 28(b), a distorção harmônica de tensão foi corrigida. Além disso, na 28(c), o fator de potência que violava durante todo o período foi corrigido. Porém, o fator de distorção embora tenha reduzido de 0,1618 para 0,1099, não foi corrigido completamente. Em termos de tarifação por violação do λ a indústria não terá problemas, no entanto, esta distorção pode prejudicar cargas próximas ou criar ressonâncias.

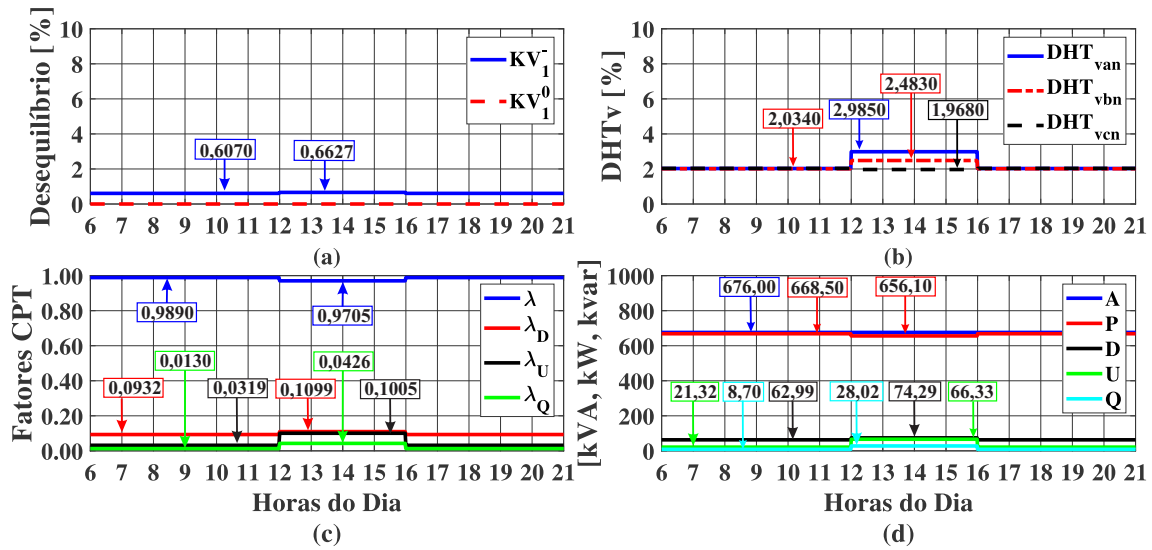


Figura 28 – Evolução dos indicadores depois da compensação: (a) Fator de desequilíbrio de tensão de sequência negativa e zero. (b) Distorção harmônica total de tensão. (c) Fatores de conformidade da carga e (d) Parcelas de potência da CPT para o estudo de caso 05 - cenário 01.

O fator de desbalanço que estava em 0,2353 foi corrigido para 0,0319, porém em algumas horas do dia (12h00 - 16h00) pode chegar a 0,1005, reduzindo o fator de potência de 0,9890 para 0,9705 neste mesmo intervalo de tempo. Após, a ferramenta realizou a simulação do financiamento, Tabela 32, sob as mesmas condições apresentadas nos casos anteriores.

Tabela 32 – Simulação do financiamento para aquisição do equipamento mitigador para o estudo de caso 05 - cenário 01.

Especificação	Resultado
Valor a ser financiado	R\$ 225.228,67
Parcelas	33
Amortização	R\$ 6.825,11
Carência	R\$ 2.702,74

Considerando as projeções de valores de consumo de energia reativa para os três anos após a instalação do compensador, a indústria deixou de gastar a quantia de R\$ 769.358,13. Os indicadores de viabilidade calculados estão apresentados na Tabela 33.

Tabela 33 – Indicadores de viabilidade econômica para o estudo de caso 05 - cenário 01.

Indicadores econômicos	Resultado
VPL	R\$ 177.873,51
TIR	43,60%
Payback simples	1 ano, 7 meses e 17 dias
Payback descontado	1 ano, 8 meses e 27 dias

O cálculo do VPL e o TIR resultaram em valores positivos. O *payback* seria de aproximadamente 1 ano e 9 meses, ou seja, no segundo ano. Recomendando-se aceitar o

investimento, ou seja, é economicamente viável o investimento no compensador.

5.6.2 Cenário 02

Por último, implementou-se o filtro ativo e o SVC objetivando-se corrigir o fator de potência, reduzir a distorção harmônica de tensão e corrigir o desbalanço na rede. As Figura 29 e 30 ilustram o diagrama unifilar do sistema elétrico e os indicadores de QEE após a conexão do compensador ao circuito.

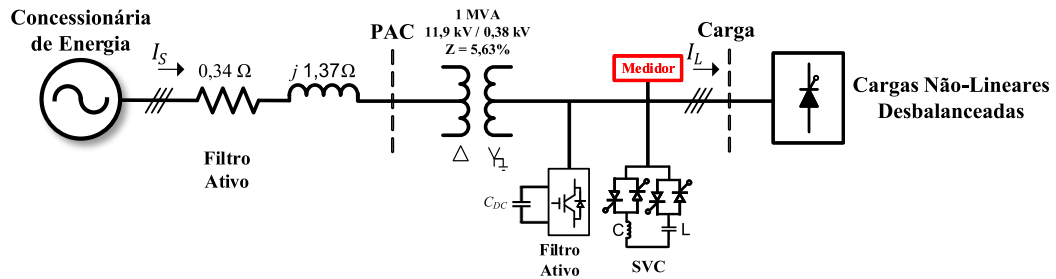


Figura 29 – Diagrama unifilar do sistema elétrico com o SVC e filtro ativo.

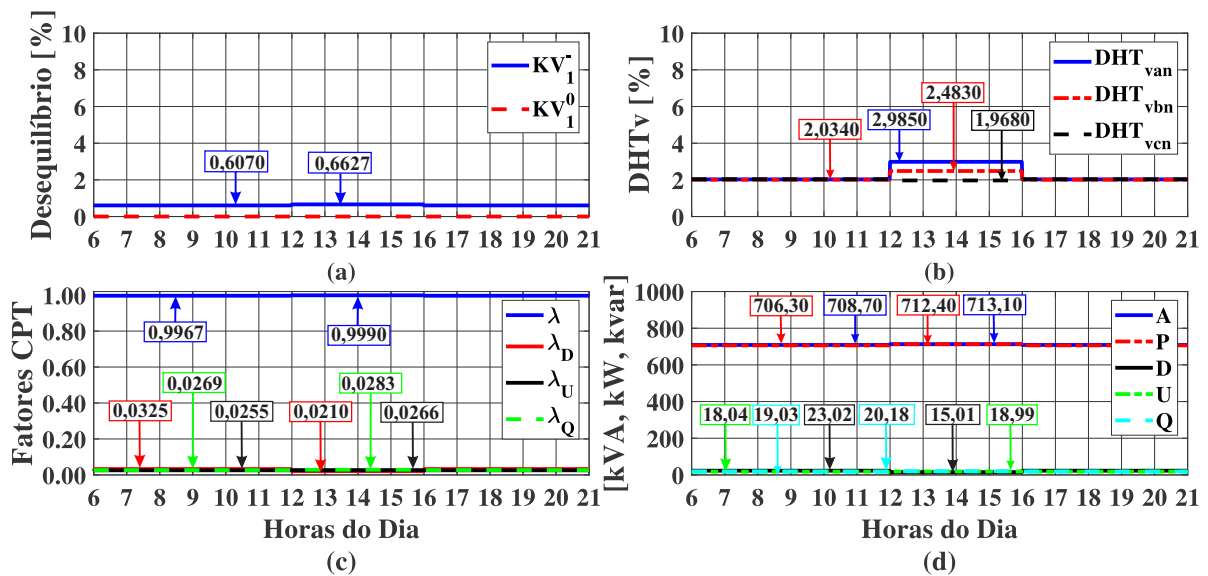


Figura 30 – Evolução dos indicadores depois da compensação: (a) Fator de desequilíbrio de tensão de seqüência negativa e zero. (b) Distorção harmônica total de tensão. (c) Fatores de conformidade da carga e (d) Parcelas de potência da CPT para o estudo de caso 05 - cenário 02.

Pode-se observar através da Figura 30(b) que a distorção harmônica de tensão reduz em relação ao sistema sem compensação, Figura 26(b). O fator de potência que inicialmente encontrava-se em 0,8440, Figura 26(c), após a compensação alcançou 0,9967. Além disso, com o filtro ativo, o λ_D sofreu uma redução para 0,0325. Ou seja, uma redução de 79,91% quando comparado com o sistema sem compensação ($\lambda_D = 0,1618$) e uma redução de 70,43% quando comparado com a solução do primeiro cenário (0,1099).

O fator de desbalanço (λ_U) que estava em 0,2453, após a compensação sofreu uma redução de 89,15% (0,0266). Quando comparado com a solução do cenário anterior, λ_U em algumas horas do dia alcançava o valor de 0,1005. O custo encontrado para esta solução foi de R\$ 313.810,68. Logo em seguida, a ferramenta realizou a simulação do financiamento, o resultado é apresentado na Tabela 34. Os indicadores de viabilidade calculados estão apresentados na Tabela 35.

Tabela 34 – Simulação do financiamento para aquisição do equipamento mitigador para o estudo de caso 05 - cenário 02.

Especificação	Resultado
Valor a ser financiado	R\$ 282.436,81
Parcelas	33
Amortização	R\$ 8.558,69
Carência	R\$ 3.389,24

Tabela 35 – Indicadores de viabilidade econômica para o estudo de caso 05 - cenário 02.

Indicadores econômicos	Resultado
VPL	R\$ 49.908,34
TIR	15,09%
<i>Payback</i> simples	2 anos, 6 meses e 3 dias
<i>Payback</i> descontado	2 anos, 8 meses e 13 dias

O cálculo do VPL e o TIR resultaram em valores positivos. O *payback* seria de aproximadamente 2 anos e 8 meses, ou seja, em aproximadamente 3 anos. Recomendando-se aceitar o investimento, ou seja, é economicamente viável o investimento no compensador.

Como pode-se observar, os dois cenários apresentam indicadores de viabilidade positivos, ou seja, ambos são economicamente viáveis. Neste caso, tem-se duas opções: (1) Instalar o filtro passivo + SVC, corrigir o fator de potência e o fator de desbalanço, continuar violando o fator de distorção, investir menos e ter um retorno financeiro mais rápido ou (2) Instalar o filtro ativo + SVC, corrigir todos os fatores, investir mais e ter um retorno financeiro mais lento.

Assim como no estudo de caso 02, a ferramenta calculou os pesos para cada indicador e o PQI (Índice de Qualidade de Energia) de cada uma das soluções, como apresentado na Tabela 36.

Tabela 36 – Pesos e PQI obtidos de cada uma das soluções para o estudo de caso 05.

Estudo de Caso 05	w_1	w_2	w_3	w_4	w_5	w_6	PQI
Cenário 1	0,50000	0,00000	0,00000	0,50000	0,00000	0,00000	0,51465101
Cenário 2	0,50000	0,00000	0,00000	0,50000	0,00000	0,00000	0,53653403

Diante dos valores obtidos de PQI para cada um dos cenários, a ferramenta deve indicar a instalação do filtro ativo associado ao SVC. Porém, é importante destacar que o PQI no primeiro cenário é 4,08% menor que no segundo cenário, o que sugere que mesmo violando o fator de distorção, a QEE da rede caso o consumidor instale o filtro passivo associado ao SVC (opção com custo inferior de R\$ 63.556,60) é próxima a QEE do segundo cenário, onde todos os indicadores respeitam os limites pré-estabelecidos.

Capítulo 6

Conclusão

Este trabalho apresentou uma ferramenta para análise técnico-econômica da instalação de equipamentos condicionadores de distúrbios de qualidade de energia elétrica. Verifica-se que a ferramenta neste trabalho é bastante promissora em ambientes industriais, pois pode ser aplicada a sinais de tensão e corrente não senoidais ou desequilibrados, realiza a tomada de decisão a respeito da solução de compensação do distúrbio de qualidade de energia elétrica de forma automática, além de fornecer ao usuário ou especialista responsável uma análise financeira a respeito das soluções propostas. Além disso, pode ser facilmente adaptada em função de novas legislações ou de interesses da concessionária ou da indústria, por exemplo, através da manipulação dos limites estabelecidos.

A ferramenta foi capaz de realizar uma análise técnico-econômica, levando em consideração o custo de cada solução, custo de instalação, as tarifas por consumo e demanda reativa excedente, violação dos indicadores, bem como realizar para o usuário a simulação do financiamento da instalação da solução, fornecendo os indicadores econômicos, visando indicar a viabilidade econômica do projeto. Além disso, para casos em que o classificador indicasse duas ou mais soluções de compensação viáveis economicamente, formulou-se um problema de otimização para o cálculo do índice de qualidade de energia e atribuição de pesos aos indicadores de qualidade de energia elétrica e da teoria de potência conservativa. É importante destacar que quanto maior o valor do índice de qualidade de energia, melhor a solução e quanto menor o valor, pior a solução. A ferramenta sugere então a instalação da solução com o maior valor do índice de qualidade de energia.

Para avaliação da ferramenta realizou-se simulações computacionais de diferentes estudos de casos de uma indústria com cargas lineares e não lineares conectadas à rede, diante de diferentes distúrbios de qualidade de energia elétrica. Foram apresentados cinco estudos de casos, sendo: instalação de (1) banco de capacitores, (2) filtro passivo trifásico e banco de capacitores fixos, (3) filtro ativo paralelo trifásico, (4) compensador estático de reativos e (5) compensador estático de reativos e filtro passivo série ou compensador estático de reativos e filtro ativo. De todos os casos, somente um a ferramenta indicou

a não-viabilidade econômica da instalação do compensador. Além disso, em dois estudos de casos a ferramenta calculou o PQI e atribuiu pesos aos indicadores de qualidade de energia elétrica e fatores de conformidade da carga .

É importante ressaltar que, na análise econômica, por se tratar do valor monetário no tempo e por depender de algumas variáveis que sofrem alterações no decorrer dos meses (como a taxa SELIC, valor do compensador e tempo de financiamento), os valores apresentados neste trabalho podem sofrer variações.

6.1 Continuidade do Trabalho

Diante dos resultados obtidos por meio das simulações apresentadas nos capítulos anteriores, passa a ser interessante a realização de outros estudos complementares com o intuito de validar a ferramenta e maximizar o seu desempenho em aplicações reais, sendo:

- Estudo e implementação de outras soluções de compensação para complementação da base de dados e realização de novos treinamentos no classificador;
- Este trabalho realizou simulações em uma rede conhecida para obtenção dos indicadores de qualidade após a instalação do compensador, porém sugere-se o desenvolvimento de um modelo para realizar a estimação dos indicadores de qualidade de energia elétrica e fatores de conformidade da carga de forma a obter informações do comportamento da rede após a instalação da solução. Estas informações poderão auxiliar na estratégia de escolha das soluções.

6.2 Publicações

6.2.1 Publicações Relacionadas a Dissertação de Mestrado

[1] B. R. P. Conrado, D. I. Brandão, E. V. Liberado, Wesley A. de Souza, A. C. Moreira. Análise da Viabilidade Técnico-Econômica para a Instalação de Condicionadores de QEE, *VIII Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos*, 2020.

[2] B. R. Conrado, S. M. Silva, D. I. Brandão, W. A. de Souza, A. C. Moreira, H. K. M. Paredes. Classificação de Cargas em Microrredes Utilizando a Análise Relacional Grey e Fatores de Desempenho da Carga, *VIII Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos (SBSE)*, 2020.

6.2.2 Outras Publicações Durante o Período de Mestrado

- [1] A. C. Moreira, W. A. de Souza, B. R. P. Conrado, H. K. M. Paredes. Disturbing Load Classification Based on the Grey Relational Analysis Method and Load Performance Index, *Journal of Control, Automation and Electrical Systems*, v. 30, p. 1-12, 2019.
- [2] D. O. Assunção, M. V. S. Cota, A. C. Moreira, B. R. P. Conrado, W. A. de Souza, H. K. M. Paredes. Technical Impacts Caused by the Connection of a Gas Microturbine in Low-Voltage Grids, *XIII Conferência Brasileira sobre Qualidade de Energia Elétrica*, São Caetano do Sul, 2019, p. 1-6.
- [3] D. O. Assunção, W. A. de Souza, A. C. Moreira, B. R. P. Conrado, L. A. A. Pereira, H. K. M. Paredes. Metodologia Heurística para Operação de uma Microturbina a Gás Conectada ao Sistema Elétrico, *14^o Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente*, Ouro Preto - MG, 2019, p. 1-6.

Referências

- [1] M. C. I. Silva. Correção do fator de potência de cargas industriais com dinâmica rápida. Master's thesis, Universidade Federal de Minas Gerais, 2009.
- [2] ANEEL. Resolução normativa nº 414 de 9 de setembro de 2010. Technical report, ANEEL, 2010.
- [3] E. Martinho. *Distúrbios da Energia Elétrica*, volume 3. Editora Érica, 2009.
- [4] Sinapsis. Avaliação dos custos relacionados às interrupções de energia elétrica e suas implicações na regulação. Technical report, Sinapsis Inovação em Energia, 2016.
- [5] S. Elphick, P. Ciufu, V. Smith, and S. Perera. Summary of the economic impacts of power quality on consumers. In *Australasian Universities Power Engineering Conference (AUPEC)*, pages 1–6, 2015.
- [6] M. J. Sullivan, T. Vardell, and M. Johnson. Power interruption costs to industrial and commercial consumers of electricity. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 33(6):1448–1458, 1997.
- [7] S. A. Yin, C. L. Su, and R.F. Chang. Assessment of power quality cost for high-tech industry. In *IEEE Power India Conference*, 2006.
- [8] EN 50160. Voltage characteristics of electricity supplied by public distribution networks. Technical report, EN 50160, 2001.
- [9] IEEE. Recommended practices and requirements for harmonic control in electrical power system. Technical report, IEEE Std 519, 1992.
- [10] IEC. Electromagnetic compatibility (emc) part 3-13: Limits assessment of emission limits for the connection of unbalanced installations to mv, hv and ehv power systems. Technical report, IEC/TR 61000-3-13, 2008.
- [11] B. Singh, K. Al-Haddad, and A. Chandra. A review of active filters for power quality improvement. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 46(5):960–971, 1999.
- [12] F. Z. Peng. Harmonic sources and filtering approaches. *IEEE Industry Applications Magazine*, 7(4):18–25, 2001.

- [13] S. M. Deckmann, J. A. Pomilio, E. A. Mertens, and L. F. S. Dias. Uso de filtros passivos em redes de distribuição com cargas não lineares. *XV Congresso Brasileiro de Automática (CBA)*, 2004.
- [14] T. J. E. Miller. *Reactive power control in electric systems*. Wiley, 1982.
- [15] R. C. A. Filho, M. F. Braga, and S. M. Silva. Aplicação de filtros ativos e passivos de potência: estudo de caso. *VIII Conferência Internacional de Aplicações Industriais (INDUSCON)*, 2008.
- [16] S. Das, D. Chatterjee, and S. K. Goswami. A reactive power compensation scheme for unbalanced four-wire system using virtual y-tcr model. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 65(4):3210–3219, April 2018.
- [17] A. C. Moreira, H. K. M. Paredes, W. A. de Souza, F. P. Marafão, and L. C. P. da Silva. Intelligent expert system for power quality improvement under distorted and unbalanced conditions in three-phase ac microgrids. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 9(6):6951–6960, Nov 2018.
- [18] P. Tenti, A. Costabeber, P. Mattavelli, F. P. Marafão, and H. K. M. Paredes. Load characterization and revenue metering under non-sinusoidal and asymmetrical operation. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 63(2):1–1, 2013.
- [19] H. K. M. Paredes, F. P. Marafão, P. Mattavelli, and P. Tenti. Application of conservative power theory to load and line characterization and revenue metering. In *Proceedings of the IEEE International Workshop on Applied Measurements for Power Systems*, pages 1–6, Sep. 2012.
- [20] J. M. Filho. *Instalações Elétricas Industriais*, volume 9. LTC - Livros Técnicos e Científicos Editora Ltda, 2017.
- [21] CEMIG. Manual de gerenciamento de energia. Technical report, CEMIG - Companhia Energética de Minas Gerais, 2011.
- [22] CODI. Manual de orientação aos consumidores: Energia reativa excedente. Technical report, CODI - Comitê de Distribuição de Energia Elétrica, 2004.
- [23] A. A. M. B. Cotrim. *Instalações Elétricas Industriais*, volume 5. Pearson Universidades, 2008.
- [24] ANEEL. Resolução normativa nº418 de 09 de setembro de 2010. Technical report, ANEEL, 2010.
- [25] R. Bordeaux-Rego, G. P. Paulo, I. M. de P. A. Spritzer, and L. P. Zotes. *Viabilidade Econômico-Financeira de Projetos*. Editora FGV, 2013.

- [26] E. Nogueira. *Análise de Investimentos*, volume 5. SP: Atlas, 2009.
- [27] M. A. Cõnsoli, F. F. Lopes, and M. F. Neves. *Análise Financeira de Projetos em Sistemas de Alimentos e Bioenergia*. SP: Atlas, 2007.
- [28] A. A. Neto. *A Dinâmica das Decisões Financeiras*. 1997.
- [29] L. J. Gitman and J. Madura. *Administração Financeira: Uma Abordagem Gerencial*. São Paulo. Pearson: Addison Wesley, 2003.
- [30] J. C. Sandrini. Sistemas de amortização de empréstimos e a capitalização de juros: Análise dos impactos financeiros e patrimoniais. Master's thesis, Universidade Federal do Paraná, 2008.
- [31] N. F. Casarotto and B. H. Kopittke. *Análise de Investimentos: Matemática Financeira, Engenharia Econômica, Tomada de Decisão, Estratégia Empresarial*, volume 10. SP: Atlas, 2007.
- [32] A. de L. Puccini. *Matemática financeira: Objetiva e Aplicada*. São Paulo: Saraiva, 7 edition, 2004.
- [33] I. C. Oliveira, A. C. C. F. Rosa, B. D. Bonatto, H. Arango, J. L. R. Pereira, and P. F. Ribeiro. Analysis of economic return of the installation of photovoltaic panels at the campus of the federal university of itajubá. In *Anais do Simposio Brasileiro de Sistemas Elétricos*, pages 1–6, May 2018.
- [34] J. Diniz, W. Uturbey, E. N. Cardoso, and B. M. Lopes. Análise de risco para o investimento em geração distribuída fotovoltaica. In *Anais do Congresso Brasileiro de Energia Solar*, pages 1–8, April 2016.
- [35] A. A. Neto. *Finanças Corporativas e Valor*. São Paulo: Atlas, 2003.
- [36] ANEEL. Procedimentos de distribuição de energia elétrica no sistema elétrico nacional prodist - módulo 8. Technical report, ANEEL, 2020.
- [37] R. M. Silva, A. G. Vaz, T. A. Almeida, and A. Yamakami. Avaliação de desempenho de métodos de classificação aplicados na identificação de spam hosts. *Revista Brasileira de Sistemas de Informação*, 5(1), 2013.
- [38] L. Verde, G. De Pietro, and G. Sannino. Voice disorder identification by using machine learning techniques. *IEEE Access*, 6:16246–16255, 2018.
- [39] A. C. Moreira, H. K. M. Paredes, W. A. de Souza, P. H. J. Nardelli, F. P. Marafão, and L. C. P. da Silva. Evaluation of pattern recognition algorithms for applications on power factor compensation. *Journal of Control, Automation and Electrical Systems*, 2018.

- [40] W. A. Souza, F. P. Marafão, E. V. Liberado, M. G. Simões, and L. C. P. da Silva. A nilm dataset for cognitive meters based on conservative power theory and pattern recognition techniques. *Journal of Control, Automation and Electrical Systems*, 29(6):742–755, Dec 2018.
- [41] ANSI. Electric power systems and equipment - voltage ratings (60 hertz). Technical report, ANSI C84.1-2011, 2011.
- [42] IEC. Electromagnetic compatibility (emc) - part 3: Limits - section 6: Assessment of emission limits for distorting loads in mv and hv power systems. Technical report, IEC/TR 61000-3-6, 1996.
- [43] IEEE. Recommended practice for electric power distribution for industrial plants. Technical report, IEEE Std 141, 1993.
- [44] IEEE. Recommended practice for electric power systems in commercial buildings. Technical report, IEEE Std 241, 1990.
- [45] NEMA. Motors and generators. Technical report, NEMA Standards Publication MG1, 2016.
- [46] G. Veloso and M. P. de Camargo. Viabilidade econômica da implantação de um banco de capacitores em unidade armazenadora de grãos. *IPecege*, 3(3):28–39, 2017.
- [47] J. A. Frizzone and A. S. Andrade Júnior. *Planejamento de irrigação: Análise de decisão e investimentos*. Embrapa Informação Tecnológica, 2005.
- [48] W. L. C. Júnior, R. A. de Oliveira, S. de F. R. Silveira, and A. S. de A. Júnior. Viabilidade econômica de tecnologias de manejo da irrigação na produção do feijão-caupi, na região dos cocais-ma. *Journal of the Brazilian Association of Agricultural Engineering*, 35(3):406–418, 2015.
- [49] S. M. Soares. Revisão tarifária periódica e equilíbrio econômico financeiro das distribuidoras de energia elétrica. Master’s thesis, Fundação Getúlio Vargas, 2019.
- [50] G. S. Elbasuony, S. H. E. A. Aleem, A. M. Ibrahim, and A. M. Sharaf. A unified index for power quality evaluation in distributed generation systems. *Energy*, 149:607–622, 2018.
- [51] A. C. Moreira, W. A. de Souza, B. R. Conrado, and H. K. M. Paredes. Disturbing load classification based on the grey relational analysis method and load performance index. *Journal of Control, Automation and Electrical Systems*, 31:141–152, 2020.

- [52] B. R. Conrado, S. M. Silva, D. I. Brandão, W. A. de Souza, A. C. Moreira, and H. K. M. Paredes. Classificação de cargas em microrredes utilizando a análise relacional grey e fatores de desempenho da carga. *VIII Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos*, 2020.
- [53] Stephanie Forrest. Genetic algorithms: principles of natural selection applied to computation. *Science*, 261(5123):872–878, 1993.
- [54] PSCAD. *Manitoba HVDC Research Centre*, 2011. Disponível em: www.pscad.com.
- [55] MATLAB. *Version 9.4.0.813654 (R2018a)*, 2018. Disponível em: <https://www.mathworks.com/>.
- [56] Python. *Version 2.0*, 2001. Disponível em: <https://www.python.org/>.
- [57] I. A. Pires. Caracterização de harmônicos causados por equipamentos eletroeletrônicos residenciais e comerciais no sistema de distribuição de energia elétrica. Master’s thesis, Universidade Federal de Minas Gerais, 2006.
- [58] P. Tenti, H. K. M. Paredes, and P. Mattavelli. Conservative power theory, a framework to approach control and accountability issues in smart microgrids. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 26(3):664–673, 2011.
- [59] P. Tenti, H. K. M. Paredes, F. P. Marafao, and P. Mattavelli. Accountability in smart microgrids based on conservative power theory. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 60(9):3058–3069, 2011.
- [60] C. I. Budeanu. The different options and conceptions regarding active power in nonsinusoidal systems. *Instytut Romain de l’Energie*, (4), 1927.
- [61] C. I. Budeanu. Puissances reactives et fictives. *Instytut Romain de l’Energie*, (2), 1927.
- [62] S. Fryze. Active, reactive and apparent power in electrical circuits with non-sinusoidal currents, current and voltage. *ETZ-A Elektrotech Zeitschrift*, 53(25):596–599, 1932.
- [63] IEEE. Standard definitions for the measurement of electric power quantities under sinusoidal, nonsinusoidal, balanced and unbalanced conditions. *Std 1459-2010 (Revision of IEEE Std 1459-2000)*, pages 1–50, 2010.
- [64] M. Depenbrock. The fbd-method, a generally applicable tool for analyzing power relations. *IEEE Trans. on Power Systems*, 8(2):381–387, 1993.
- [65] E. H. Watanabe, H. Akagi, and M. Aredes. Instantaneous p-q power theory for compensating nonsinusoidal systems. *Przegld Elektrotechniczny*, (6):28–37, 2008.

-
- [66] H. Akagi, Y. Kanazawa, and A. Nabae. Generalized theory of the instantaneous reactive power in three-phase circuits. *IPEC International Power Electronics Conference*, pages 1375–1386, 1983.
- [67] H. Akagi, E. H. Watanabe, and M. Aredes. *Instantaneous Power Theory and Applications to Power Conditioning*. Hoboken, New Jersey, John Wiley-IEEE Press, 2017.
- [68] H. K. M. Paredes, D. I. Brandão, E. V. Liberado, and F. O. Marafão. Compensação ativa paralela baseada na teoria de potência conservativa. *Eletrônica de Potência*, 17(1):409–418, 2012.
- [69] H. K. M. Paredes. *Teoria de Potência Conservativa: Uma abordagem para o Controle Cooperativo de Condicionadores de Energia e Considerações sobre Atribuição de Responsabilidades*. PhD thesis, Universidade Estadual de Campinas, 2011.

Apêndice A

Teoria de Potência Conservativa

A Teoria de Potência Conservativa (CPT) definida em 2011 por Tenti *et al.* [18, 58, 59], baseia-se na decomposição da corrente em parcelas ortogonais, além de fornecer uma formulação teórica para analisar circuitos elétricos concentrando no comportamento da carga. Ao contrário de outras teorias de potência [60–67] que misturam o comportamento da fonte e as características da carga, a CPT, pode identificar termos de potência/corrente associados a cada distúrbio da carga de forma individual, como desequilíbrio, desbalanço e deslocamento de fase entre tensões e correntes. Sendo assim, a CPT vem sendo utilizada para gerar os sinais de referência para compensadores, pois possibilita escolher o distúrbio desejado a ser compensado, ou seja, apresenta uma característica seletiva de compensação.

Pode-se caracterizar a operação da carga através dos fatores relacionados a potência aparente (A), potência de distorção (D), potência de desbalanço (U), potência reativa (Q) e potência ativa (P).

Para cada parcela de corrente, tem-se associada uma parcela de potência, obtida pelo produto entre o valor eficaz da tensão e o valor RMS da corrente corresponde, como segue [68, 69]:

- **Potência Ativa (P):** é o consumo médio de potência do circuito, representando a realização de trabalho útil na carga.

$$P = \mathbf{V} \cdot \mathbf{I}_a^b \quad (\text{A.1})$$

I_a^b : é a corrente ativa balanceada, correspondendo ao mínimo valor RMS de corrente capaz de transferir a potência ativa demandada pelo sistema/carga.

- **Potência Reativa (Q):** é a parcela de potência característica que representa a defasagem entre tensões e correntes.

$$Q = \mathbf{V} \cdot \mathbf{I}_r^b \quad (\text{A.2})$$

I_r^b : é a corrente reativa balanceada, correspondendo ao mínimo valor RMS de corrente capaz de transferir a potência reativa demandada pelo sistema/carga. Diz respeito ao armazenamento e transferência de energia associado a indutores e capacitores.

- **Potência de Desbalanço** (U): é a parcela de potência que representa o desbalanço da carga. Em circuitos monofásicos, esta componente desaparece.

$$U = \mathbf{V} \cdot \mathbf{I}^u \quad (\text{A.3})$$

I^u : é a corrente de desbalanço, sendo composta por uma parcela ativa e outra reativa ($I^{u^2} = I_a^{u^2} + I_r^{u^2}$), respectivamente, e representam os diferentes valores de condutância e reatidade equivalente por fase.

- **Potência de Distorção** (D): parcela de potência consumida devido à presença de não linearidades no circuito, ou seja, não-linearidades entre tensão e corrente.

$$D = \mathbf{V} \cdot \mathbf{I}_v \quad (\text{A.4})$$

\mathbf{I}_v : é a corrente de distorção, sendo aquela que não transfere potência ativa, nem energia reativa. É a parcela de corrente que representa as não linearidades entre a tensão fornecida e a corrente consumida pela carga.

- **Potência Aparente** (A): é a potência total do circuito. Algebricamente, o quadrado da potência aparente é igual à soma dos quadrados de todas as parcelas.

$$A = \mathbf{V} \cdot \mathbf{I} = \sqrt{P^2 + Q^2 + U^2 + D^2} \quad (\text{A.5})$$

Onde:

$$\mathbf{V} = \sqrt{V_a^2 + V_b^2 + V_c^2} \quad (\text{A.6})$$

$$\mathbf{I} = \sqrt{\mathbf{I}_a^2 + \mathbf{I}_r^2 + \mathbf{I}_v^2} \quad (\text{A.7})$$

$$\mathbf{I}^2 = \mathbf{I}_a^{b^2} + \mathbf{I}_r^{b^2} + \mathbf{I}^{u^2} + \mathbf{I}_v^2 \quad (\text{A.8})$$

As equações (A.6) e (A.7) fornecem os valores coletivos RMS da tensão (\mathbf{V}) e corrente (\mathbf{I}). Observa-se que (A.6) é dada em função das tensões de fase, enquanto que (A.7) é dada em função do valor coletivo RMS da corrente reativa ($\mathbf{I}_a = \sqrt{I_{aa}^2 + I_{ab}^2 + I_{ac}^2}$, do valor coletivo RMS da corrente reativa ($\mathbf{I}_r = \sqrt{I_{ra}^2 + I_{rb}^2 + I_{rc}^2}$ e do valor coletivo RMS da corrente de distorção ($\mathbf{I}_v = \sqrt{I_{va}^2 + I_{vb}^2 + I_{vc}^2}$).

A partir do cálculo das potências, pode-se definir fatores de conformidade (ou desempenho), os quais permitem caracterizar as cargas, em função de suas condições de operação. Pode-se citar:

- **Fator de Distorção** (λ_D): indica a presença de não linearidades entre tensão e corrente, ou seja, indica a presença de potência de distorção.

$$\lambda_D = \frac{D}{A} \quad (\text{A.9})$$

- **Fator de Reatividade** (λ_Q): indica defasamento entre tensão e corrente em condições não senoidais.

$$\lambda_Q = \frac{Q}{\sqrt{P^2 + Q^2}} \quad (\text{A.10})$$

- **Fator de Desbalanço** (λ_U): indica a presença de cargas desbalanceadas. Em circuitos monofásicos, esta componente desaparece.

$$\lambda_U = \frac{U}{\sqrt{P^2 + Q^2 + U^2}} \quad (\text{A.11})$$

- **Fator de Potência** (λ):

$$\lambda = \frac{P}{A} = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2 + U^2 + D^2}} \quad (\text{A.12})$$

Observa-se que o fator de potência relaciona a potência ativa com todos os demais termos de potência por meio da potência aparente. O fator de potência será verdadeiramente unitário apenas se a carga for puramente resistiva e balanceada. Caso contrário, a presença de elementos armazenadores de energia, cargas desequilibradas e desbalanceadas, reduzirão o fator de potência.

