

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA
PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

HUMBERTO CUNHA DE OLIVEIRA

**CONDICIONADORES DE AR INVERTER: MODELAGEM COMPUTACIONAL
E CURVAS DE SUPORTABILIDADE PARA ESTUDOS DE PEDIDOS DE
RESSARCIMENTO POR DANOS ELÉTRICOS**

**UBERLÂNDIA
Fevereiro de 2020**

HUMBERTO CUNHA DE OLIVEIRA

**CONDICIONADORES DE AR INVERTER: MODELAGEM COMPUTACIONAL
E CURVAS DE SUPORTABILIDADE PARA ESTUDOS DE PEDIDOS DE
RESSARCIMENTO POR DANOS ELÉTRICOS**

Dissertação de mestrado apresentada à Faculdade de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Uberlândia como parte dos requisitos necessários para obtenção do título de mestre em ciências.

Orientador: Prof. Dr. Ivan Nunes Santos

Coorientador: Prof. Dr. Isaque Nogueira Gondim

Uberlândia

Fevereiro de 2020

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA - UFU

Ficha Catalográfica Online do Sistema de Bibliotecas da UFU
com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).

O48 2020	<p>Oliveira, Humberto Cunha de, 1993- Condicionadores de Ar Inverter: Modelagem Computacional e Curvas de Suportabilidade para Estudos de Ressarcimento por Danos Elétricos [recurso eletrônico] / Humberto Cunha de Oliveira. - 2020.</p> <p>Orientador: Ivan Nunes Santos. Coorientador: Isaque Nogueira Gondim. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Uberlândia, Pós-graduação em Engenharia Elétrica. Modo de acesso: Internet. Disponível em: http://doi.org/10.14393/ufu.di.2020.309 Inclui bibliografia.</p> <p>1. Engenharia elétrica. I. Santos, Ivan Nunes, 1979-, (Orient.). II. Gondim, Isaque Nogueira, 1983-, (Coorient.). III. Universidade Federal de Uberlândia. Pós-graduação em Engenharia Elétrica. IV. Título.</p> <p style="text-align: right;">CDU: 621.3</p>
-------------	------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

Bibliotecários responsáveis pela estrutura de acordo com o AACR2:
Gizele Cristine Nunes do Couto - CRB6/2091
Nelson Marcos Ferreira - CRB6/3074

HUMBERTO CUNHA DE OLIVEIRA

**CONDICIONADORES DE AR INVERTER: MODELAGEM COMPUTACIONAL
E CURVAS DE SUPORTABILIDADE PARA ESTUDOS DE PEDIDOS DE
RESSARCIMENTO POR DANOS ELÉTRICOS**

Dissertação de mestrado apresentada à Faculdade de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Uberlândia como parte dos requisitos necessários para obtenção do título de mestre em ciências.

Uberlândia, 28 de fevereiro de 2020

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Ivan Nunes Santos - UFU

Prof. Dr. Isaque Nogueira Gondim - UFU

Prof. Dr. Paulo Henrique Oliveira Rezende - UFU

Prof. Dr. João Areis Ferreira Barbosa Júnior – IFGoiano



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
 Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica
 Av. João Naves de Ávila, 2121, Bloco 3N - Bairro Santa Mônica, Uberlândia-MG, CEP 38400-902
 Telefone: (34) 3239-4707 - www.posgrad.feelt.ufu.br - copel@ufu.br



ATA DE DEFESA - PÓS-GRADUAÇÃO

Programa de Pós-Graduação em:	Engenharia Elétrica				
Defesa de:	Dissertação de Mestrado Acadêmico, 731, PPGEELT				
Data:	Vinte e oito de fevereiro de dois mil e vinte	Hora de início:	13:30	Hora de encerramento:	17:00
Matrícula do Discente:	11812EEL016				
Nome do Discente:	Humberto Cunha de Oliveira				
Título do Trabalho:	Condicionadores de Ar Inverter: Modelagem Computacional e Curvas de Suportabilidade para Estudos de Pedidos de Ressarcimento por Danos Elétricos				
Área de concentração:	Sistemas de energia elétrica				
Linha de pesquisa:	Qualidade e racionalização da energia elétrica				
Projeto de Pesquisa de vinculação:	Título: Desenvolvimento de subestação subterrânea hermética, pressurizada, automatizada e isolada . Agência Financiadora: CEB (Companhia Energética de Brasília) através de P&D ANEEL . Início: 23/11/2018. Término: 23/11/2021. No. do Projeto na agência: PD-05160-1803/2018 (Código ANEEL do projeto). Professor Coordenador: Ivan Nunes Santos				

Reuniu-se no Anfiteatro 1E, Campus Santa Mônica, da Universidade Federal de Uberlândia, a Banca Examinadora, designada pelo Colegiado do Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, assim composta: Professores Doutores: Isaque Nogueira Gondim - FEELT/UFU; Paulo Henrique Oliveira Rezende - FEELT/UFU; João Areis Ferreira Barbosa Júnior - IFGOIANO; Ivan Nunes Santos - FEELT/UFU, orientador(a) do(a) candidato(a).

Iniciando os trabalhos o(a) presidente da mesa, Dr(a). Ivan Nunes Santo, apresentou a Comissão Examinadora e o candidato(a), agradeceu a presença do público, e concedeu ao Discente a palavra para a exposição do seu trabalho. A duração da apresentação do Discente e o tempo de arguição e resposta foram conforme as normas do Programa.

A seguir o senhor(a) presidente concedeu a palavra, pela ordem sucessivamente, aos(às) examinadores(as), que passaram a arguir o(a) candidato(a). Ultimada a arguição, que se desenvolveu dentro dos termos regimentais, a Banca, em sessão secreta, atribuiu o resultado final, considerando o(a) candidato(a):

Aprovado.

Esta defesa faz parte dos requisitos necessários à obtenção do título de **Mestre**.

O competente diploma será expedido após cumprimento dos demais requisitos, conforme as normas do Programa, a legislação pertinente e a regulamentação interna da UFU.

Nada mais havendo a tratar foram encerrados os trabalhos. Foi lavrada a presente ata que após lida e achada conforme foi assinada pela Banca Examinadora.



Documento assinado eletronicamente por **Ivan Nunes Santos, Professor(a) do Magistério Superior**, em 28/02/2020, às 16:57, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Isaque Nogueira Gondim, Professor(a) do Magistério Superior**, em 28/02/2020, às 16:58, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Paulo Henrique Oliveira Rezende, Professor(a) do Magistério Superior**, em 28/02/2020, às 17:00, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **João Areis Ferreira Barbosa Júnior, Usuário Externo**, em 28/02/2020, às 17:02, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://www.sei.ufu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **1792932** e o código CRC **4112CB29**.

Dedico este trabalho aos meus pais Reginaldo e Inês, por todos os sacrifícios, oportunidades, incentivos e apoio fornecidos para o meu crescimento e formação.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus, por me dar força, paciência e perseverança para a superação dos obstáculos encontrados ao longo da realização deste trabalho.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Ivan Nunes Santos, meus sinceros agradecimentos pela oportunidade de realização do mestrado, amizade e profissionalismo durante a condução da minha pesquisa.

Ao meu coorientador, Prof. Dr. Isaque Nogueira Gondim, pelos ensinamentos, apoio e compreensão durante a concretização deste trabalho.

Aos meus amados pais Reginaldo Borba e Inês Naves, agradeço pelos sacrifícios realizados para concretização dos meus sonhos, incentivos dados, amor e prontidão para atender as minhas necessidades durante toda a minha vida. Serei eternamente grato.

Aos meus irmãos, Henrique Cunha, Carolina Naves e Hugo Cunha, agradeço pela amizade, união, convivência e incentivos dados todos os dias.

Aos meus amigos de longa data, Fábio Donisete, Igor Alvarenga e Matheus Rodrigues, pela confiança, apoio, discussões e companhia. Obrigado pela presença em minha vida, pela participação, de perto ou de longe, nessa conquista.

Aos amigos Bárbara Giancesini, Camila Dias, Michelly Lima, Raquel Filiagi, e Vinicius Brito pela amizade, confiança, consideração e suporte, principalmente nos momentos que eu mais precisei, meu eterno obrigado.

Aos demais amigos e companheiros do NQEE: Ábner César, Adrian Ferreira, Arthur Costa, Celso Júnior, Giordanni Troncha, Fabrício Montes, Márcio Arvelos, pela amizade, apoio e agradável convivência durante os períodos de trabalho e lazer.

Aos professores Antônio Carlos Delaiba, Arnaldo, José Wilson Resende, José Rubens e José Carlos de Oliveira pelo auxílio e conhecimentos compartilhados que com certeza enriqueceram a minha formação.

Em especial, aos companheiros de pós-graduação Henrique Tánnus e professor Dr., Paulo Henrique, pela disponibilidade, ações, auxílio, conhecimentos transmitidos e contribuições diretas para a conclusão desta pesquisa.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil, CAPES pelo apoio financeiro.

*“Nosso maior medo não é sermos inadequados.
Nosso maior medo é não saber que nós somos
poderosos, além do que podemos imaginar”*

Marianne Williamson

RESUMO

O aumento considerável de pedidos de indenização por danos elétricos vem causando diversos infortúnios as concessionárias de energia e seus consumidores, compreendendo não somente prejuízos financeiros, mas também impactos sociais resultantes de conflitos judiciais entre ambas as partes. Tais preocupações desencadearam o surgimento da área denominada como Pedidos de Indenização por Danos (PIDs), direcionada principalmente a aprimorar e sistematizar o processo de verificação de casos de ressarcimento, disposto pela Agência Nacional de Energia Elétrica. Ao incluir fundamentos matemáticos, computacionais e ensaios laboratoriais na metodologia de análise da consistência denexo causal, as distribuidoras poderão fornecer um parecer justo e coeso na avaliação de casos. Assim, a partir de trabalhos relativos ao tema já realizados, constata-se hoje a existência de uma base científica sólida que justifique a inclusão de estudos para novos equipamentos eletrônicos, alvo destas solicitações, em ambiente computacional. Tendo em foco a tecnologia *inverter* integrada a condicionadores de ar *split* que pelas estatísticas antecipam o aumento substancial nas residências e comércios, esta dissertação encontra-se direcionada ao desenvolvimento de um estudo de ressarcimento capaz de prover as informações necessárias para avaliação de casos que envolvam estes aparelhos. Nesse contexto, objetiva-se propor um modelo computacional elétrico do condicionador de ar, responsável por prover as solicitações dielétrica e térmica impostas ao aparelho, em conjunto com a obtenção de suas curvas de suportabilidade dielétrica e térmica, para comparação e constatação da veracidade de causa e efeito entre o equipamento e distúrbios no qual ele pode ser submetido. Portanto, espera-se deste trabalho, que, por meio dos novos parâmetros e métodos apresentados, análises mais consistentes de PIDs possam ser feitas.

Palavras-chave: Qualidade de energia, suportabilidade térmica, suportabilidade dielétrica, ATPDraw, nexocausal em ressarcimento.

ABSTRACT

The considerable increase in claims by electrical damages has caused several misfortunes to energy utilities and their consumers. These claims comprise not only financial losses, but also social impacts resulting from legal conflicts between both parties. Such concerns triggered the emergence of the area called Damage Compensation Claims, mainly aimed at improving and at systematizing the process of verifying reimbursement cases, provided by the Brazilian Electricity Regulatory Agency. After including in the causal nexus consistency analysis methodology new mathematical and computational fundamentals and laboratory tests, utilities can perform fair and cohesive cases assessment. Based on works found in the literature, there is scientific basis that justifies the inclusion of studies for new electronic equipment in a computational environment. Thus, with a focus on the new inverter technology integrated with split air conditioners, this master thesis is addressed to develop a comprehensive reimbursement study that provides the necessary information for evaluating the cases with these devices. In this context, the objective is to propose an electrical computational model of the air conditioner, responsible for providing the dielectric and thermal stresses imposed on the device, with its dielectric and thermal withstand limits. From this information, it will be possible to compare and verify the veracity of cause and effect between the equipment and disturbances manifested in the networks. Therefore, it is expected from this work that more consistent analyses of possible reimbursement cases are conducted with new parameters and methods.

Keywords: Power quality, thermal supportability, dielectric supportability, ATPDraw, reimbursement casual nexus.

SUMÁRIO

Capítulo I

1	INTRODUÇÃO	27
1.1	Considerações iniciais	27
1.2	Contextualização do tema dessa dissertação	30
1.2.1	Análise quantitativa e qualitativa de PID's a nível nacional	30
1.2.2	Abordagem Jurídica relacionada a PID's	34
1.3	Revisão bibliográfica para realização deste trabalho	36
1.3.1	Modelagem computacional de equipamentos elétricos	37
1.3.2	Sensibilidade e Suportabilidade de Equipamentos Elétricos.....	37
1.3.3	Pesquisas e produtos voltados para a análise do nexa causal no âmbito da UFU.....	38
1.4	As contribuições desta dissertação	40
1.5	Estrutura da Dissertação	40

Capítulo II

2	CARACTERÍSTICAS GERAIS DE APARELHOS CONDICIONADORES DE AR..	43
2.1	Considerações iniciais	43
2.2	Introdução a aparelhos condicionadores de ar.....	43
2.3	A história da refrigeração no ponto de vista de condicionamento de ar	44
2.4	Princípio de funcionamento de sistemas condicionadores de ar	46
2.5	Classificação dos aparelhos ou sistemas condicionadores de ar	50
2.5.1	Condicionadores de ar tipo compactos ou <i>packaged</i>	51
2.5.2	Condicionadores de ar tipo divididos ou <i>split</i>	52
2.5.3	Condicionadores de ar tipo chiller.....	53
2.6	Crescimento e tendências dos condicionadores de ar.....	55
2.7	Componentes de um sistema de refrigeração	58
2.7.1	Componentes mecânicos	58
2.7.2	Componentes elétricos.....	67

2.8	A tecnologia inverter	71
2.9	Considerações finais	73

Capítulo III

3	MODELAGEM COMPUTACIONAL DE APARELHOS CONDICIONADORES DE AR SPLIT INVERTER	75
3.1	Considerações iniciais	75
3.2	Estrutura física da unidade evaporadora.....	76
3.3	Estrutura física da unidade condensadora	76
3.3.1	Etapa de retificação	77
3.3.2	Etapa de filtragem.....	78
3.3.3	Etapa de inversão.....	81
3.4	Conversores boost aplicados a condicionadores de ar.....	84
3.4.1	Razão Cíclica e Ganho Estático.....	84
3.4.2	Modos de condução dos conversores CC-CC	87
3.4.3	Análise de Funcionamento do Conversor Boost em modo de Condução Continua.....	89
3.4.4	Princípios de Controle Ativo	92
3.5	Inspeção Física de um Modelo de Condicionador de Ar Inverter	102
3.6	Estratégia para Modelagem do Condicionador de Ar Inverter.....	104
3.6.1	Modelagem e implementação computacional da evaporadora.....	104
3.6.2	Modelagem e implementação computacional da condensadora.....	107
3.7	Implementação computacional final do condicionador de ar inverter no simulador ATP.....	130
3.8	Considerações Finais	131

Capítulo IV

4	VALIDAÇÃO DO MODELO COMPUTACIONAL DO APARELHO CONDICIONADOR DE AR SPLIT INVERTER.....	133
4.1	Considerações iniciais	133
4.2	Estrutura para realização dos ensaios experimentais.....	133

4.3	Avaliação de desempenho do condicionador de ar inverter a condições ideais e não ideais de suprimento.....	135
4.3.1	Caso 1: Condição Ideal.....	137
4.3.2	Caso 2: Elevação na Tensão de Suprimento.....	139
4.3.3	Caso 3: Afundamento da tensão de suprimento	141
4.3.4	Caso 4: Interrupção da tensão de suprimento	142
4.3.5	Caso 5: Flutuação na tensão de suprimento	144
4.3.6	Caso 6: Tensão de suprimento com distorção harmônica	145
4.4	Considerações Finais	148

Capítulo V

5	OBTENÇÃO DAS CURVAS DE SUPORTABILIDADE TÉRMICA E DIELÉTRICA PARA O CONDICIONADOR DE AR INVERTER.....	149
5.1	Considerações iniciais	149
5.2	Fundamentação Teórica para Obtenção das Curvas de Suportabilidade.....	149
5.2.1	Suportabilidade térmica.....	150
5.2.2	Suportabilidade dielétrica.....	151
5.3	Curva de Suportabilidade Térmica Obtida	153
5.4	Curva de Suportabilidade Dielétrica Obtida.....	156
5.4.1	Ensaio de transitórios impulsivos.....	156
5.4.2	Ensaio de sobretensão em BT.....	157
5.5	Considerações Finais	159

Capítulo VI

6	ESTUDOS DE CASOS COMPUTACIONAIS DO CONDICIONADOR DE AR INVERTER SUBMETIDO A DISTÚRBIOS DE TENSÃO E CORRENTE.....	161
6.1	Considerações iniciais	161
6.2	Cálculo para as solicitações térmica e dielétrica do condicionador de ar.	162
6.3	Estudo de caso 1: Elevação de Tensão de 2pu por 10 ciclos.....	163
6.3.1	Suportabilidade dielétrica.....	163

6.3.2	Suportabilidade térmica.....	166
6.4	Estudo de caso 2: Incidência de um surto de corrente de magnitude 5kA no condicionador de ar	168
6.4.1	Suportabilidade dielétrica.....	168
6.4.2	Suportabilidade térmica.....	170
6.5	Considerações Finais	171

Capítulo VII

7 CONCLUSÕES.....	173
--------------------------	------------

Referências Bibliográficas

Referências Bibliográficas	176
-----------------------------------------	------------

Apêndices

Apêndices.....	181
-----------------------	------------

Apêndice I – Modelagem no ATPDraw– Modulador PWM Para o PFC Boost

Apêndice II –Modelagem no ATPDraw– Modulador PWM para o Inversor da Unidade Condensadora

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 - Número de pedidos de indenização por danos elétricos - ano de 2017- 10 empresas distribuidoras - dados fornecidos pela ANEEL	30
Figura 1.2 - Custos totais ressarcidos por pedidos de indenização por danos elétricos – ano de 2017- 10 empresas distribuidoras – dados fornecidos pela ANEEL	31
Figura 1.3 - Histórico de procedência de solicitações de ressarcimento	31
Figura 1.4 – (a) DEC médio para distribuidoras brasileiras de 2010 a 2017 – (b) FEC médio para distribuidoras brasileiras entre 2010 a 2017.	32
Figura 1.5 - Principais equipamentos reclamados para uma distribuidora X.	33
Figura 1.6 – Participação do consumo final de eletricidade por equipamento no setor residencial no Brasil.	33
Figura 1.7 - Principais fenômenos associados a PID's para a concessionária Y.	34
Figura 1.8- Direções possíveis para o consumidor realizar pedidos de indenização por danos.	35
Figura 2.1 - Esquema do ciclo de refrigeração específico para condicionadores de ar split.	47
Figura 2.2 - Exemplo de um diagrama de Mollier para fluidos frigorigêneos.	48
Figura 2.3 - Esquema do ciclo de refrigeração reverso para um condicionador de ar split.49	
Figura 2.4 - Condicionamento de ar pela climatização evaporativa.....	49
Figura 2.5 - Esquema simplificado do funcionamento de um sistema de refrigeração chiller.	50
Figura 2.6 - Condicionador de ar compacto tipo janela.	51
Figura 2.7 - Condicionador de ar compacto tipo portátil.	51
Figura 2.8- Condicionador de ar compacto tipo terraço.	52
Figura 2.9 - Condicionador de ar mini-split.	52
Figura 2.10 - Condicionadores de ar multi-split.....	53
Figura 2.11 - Condicionadores de ar tipo splits centrais.	53
Figura 2.12- Chiller resfriado a água.....	54
Figura 2.13- Chiller resfriado a ar.	54
Figura 2.14 - Divisão do uso de condicionadores de ar em escala global até o final de 2016.	56
Figura 2.15 - Quantificação dos tipos de condicionadores de ar utilizados globalmente até o final de 2016.	56
Figura 2.16 - Demanda energética destinada a suprir o uso de equipamentos de refrigeração em 2016.	57
Figura 2.17 – Consumo médio de eletricidade de ar-condicionado do setor residencial.58	
Figura 2.18- a) evaporadora desconstruída de um condicionador de ar split. - b) condensadora desconstruída da condensadora de um condicionador de ar split.....	59

Figura 2.19- a) Tubo capilar empregado em condicionadores de ar – b) Vista interna de um tubo capilar.	59
Figura 2.20 - a) Vista externa da válvula de expansão termostática - b) Esquemático do funcionamento interno de uma válvula de expansão termostática.	60
Figura 2.21 - a) Vista externa de um filtro secador. - b) Vista interna de um filtro secador.	61
Figura 2.22- a) Ilustração de um compressor hermético utilizado em geladeiras. - b) Compressor hermético comumente utilizado em condicionadores de ar.	62
Figura 2.23- Vista frontal fechada e aberta de um compressor semi-herméticos.....	62
Figura 2.24- Exemplo de compressor aberto.....	63
Figura 2.25 - Vista interna de um compressor tipo alternativo	63
Figura 2.26 - Vista interna de um compressor tipo scroll.	64
Figura 2.27 – Princípio de compressão para um compressor rotativo	65
Figura 2.28 - Vista interna de um compressor tipo rotativo	65
Figura 2.29 - Vista interna frontal de um compressor tipo parafuso.....	66
Figura 2.30 – Princípio de funcionamento de um compressor tipo centrífugo.	66
Figura 2.31- Termostato utilizado em condicionadores de ar.	67
Figura 2.32- a) Vista externa de um protetor térmico. – b) Componentes internos de um protetor térmico.	68
Figura 2.33 - Capacitor empregado em condicionadores de ar.	68
Figura 2.34 - Relé utilizado em condicionadores de ar.	69
Figura 2.35- PTC empregado em condicionadores de ar.	69
Figura 2.36 - Bobina da válvula reversora empregado em condicionadores de ar com o cliço reverso.	70
Figura 2.37 - Reator utilizado em condicionadores de ar para controle do fator de potência.	70
Figura 2.38 – Características e econômica provida pela tecnologia inverter.	72
Figura 2.39 – Estabilidade térmica oferecida pela tecnologia inverter.	72
Figura 3.1 - Diagrama elétrico equivalente para o condicionador de ar inverter utilizado ao estudo.....	76
Figura 3.2 - Etapas de funcionamento de uma unidade condensadora para um condicionador de ar inverter.....	77
Figura 3.3 - Retificação da tensão de alimentação para um retificador de onda completa.....	77
Figura 3.4 - Corrente resultante da operação de um retificador com seu espectro harmônico correspondente.....	78
Figura 3.5 - Filtragem LC passiva comum para um circuito retificador.	79
Figura 3.6 - Filtragem passiva RLC alternativa em circuitos retificadores.....	80
Figura 3.7 – Exemplo de filtragem ativa integrada em circuitos retificadores.....	80

Figura 3.8- Diagrama elétrico expandido da etapa de inversão.	81
Figura 3.9 – Tensões fase neutros resultantes da etapa de inversão.	82
Figura 3.10 - Ação do modulador PWM.	83
Figura 3.11- Modulação por largura de pulso escalar - PWM	83
Figura 3.12 - Circuito CC abaixador elementar.	85
Figura 3.13 - Circuito abaixador elementar operando para a chave fechada.	85
Figura 3.14 - Circuito elementar abaixador operando com a chave aberta.	85
Figura 3.15 - Perfis de tensão e corrente para o circuito abaixador elementar.	86
Figura 3.16- Modo de condução de corrente descontinuo.	88
Figura 3.17 - Modo de condução de corrente contínuo.	88
Figura 3.18 - Modo de condução de corrente crítico.	88
Figura 3.19 - Conversor elevador de tensão (boost) CC-CC.	89
Figura 3.20 - Operação do conversor boost para a chave 1 conduzindo.	89
Figura 3.21- Operação de um circuito elevador de tensão para a chave aberta.	91
Figura 3.22 - Diagrama elétrico genérico do conversor CC-CC boost aplicado como controlador de fator de potência	93
Figura 3.23 - Corrente de entrada típica de um circuito boost operando como PFC integrado em equipamentos eletroeletrônicos.	94
Figura 3.24 Visão expandida da corrente controlada.	95
Figura 3.25 – Diagrama de controle de um circuito PFC boost operando pela técnica de corrente de pico.	96
Figura 3.26 - Perfil da corrente para um circuito <i>PFC boost</i> operando pela técnica de controle por corrente de pico.	96
Figura 3.27 – Diagrama de controle para um circuito <i>PFC boost</i> operando pela técnica de corrente média.	97
Figura 3.28 - Perfil de corrente controlada de um circuito <i>PFC boost</i> operando pela técnica de controle por corrente média.	98
Figura 3.29 – Diagrama de controle de um circuito <i>PFC boost</i> operando pela técnica histerese.	99
Figura 3.30 - Perfil da corrente controlada de um circuito <i>PFC boost</i> operando pela técnica de controle por histerese.	99
Figura 3.31 – Diagrama de controle de um circuito <i>PFC boost</i> operando pela técnica por fronteira.	100
Figura 3.32 - Perfil da corrente controlada de um circuito <i>PFC boost</i> operando pela técnica de controle por fronteira.	101
Figura 3.33 – Diagrama de controle circuito <i>PFC boost</i> operando pela técnica PWM descontinuo.	101
Figura 3.34 - Perfil da corrente controlada de um circuito <i>PFC boost</i> operando com a técnica de controle descontinuo.	102

Figura 3.35 - Unidade evaporadora e condensadora do condicionador de ar <i>inverter</i> utilizado na modelagem.....	102
Figura 3.36 - Unidade evaporadora do condicionador de ar <i>inverter</i> utilizado para a modelagem.	103
Figura 3.37 - Vista frontal aberta da unidade condensadora do condicionador de ar <i>inverter</i>	104
Figura 3.38 – Medição experimental da corrente de alimentação da unidade evaporadora do condicionador de ar.	105
Figura 3.39 - Vista frontal da placa eletrônica da unidade evaporadora do condicionador de ar.	105
Figura 3.40 - Diagrama elétrico equivalente para a unidade evaporadora do condicionador de ar.	106
Figura 3.41 - Equivalente computacional da unidade evaporadora implementado ao software ATPDraw.....	106
Figura 3.42 - Perfis de tensão e corrente para unidade evaporadora obtidos computacionalmente.....	107
Figura 3.43 - Modelo computacional implementado para a unidade evaporadora do condicionador de ar.	107
Figura 3.44 - Placa eletrônica da unidade condensadora do condicionador de ar com a identificação dos seus principais componentes.	108
Figura 3.45 - Reator conectado a unidade condensadora e utilizado no circuito controlador do fator de potência.	109
Figura 3.46 - Diagrama elétrico do circuito equivalente da unidade condensadora do condicionador de ar.	109
Figura 3.47 - Circuito integrado responsável pelo controle de fator de potência do condicionador de ar.	110
Figura 3.48 - Circuito de controle para o <i>boost PFC</i> do condicionador de ar a ser modelado.	110
Figura 3.49 - Tensão invertida na entrada do compressor do condicionador de ar obtida via medição laboratorial.	111
Figura 3.50 - Circuito equivalente final para a unidade condensadora do condicionador de ar.	112
Figura 3.51 - Implementação computacional da etapa de inversão referente a unidade condensadora.	112
Figura 3.52 - Perfis de tensão e corrente para a etapa de retificação obtidos computacionalmente.....	113
Figura 3.53 - Espectro harmônico da corrente da unidade condensadora apresentando somente a etapa de retificação.	113
Figura 3.54 - Implementação computacional da malha de controle da corrente do <i>PFC boost</i>	114
Figura 3.55 - Sinal de referência de tensão para a malha de controle de corrente do circuito.	114

Figura 3.56 - Medição laboratorial da tensão contínua da unidade condensadora do condicionador de ar.	115
Figura 3.57 - Implementação computacional da malha de corrente da unidade condensadora.	116
Figura 3.58 - Implementação computacional do circuito da unidade condensadora no software PSIM.	117
Figura 3.59 – Ferramenta “Parameter Sweep” do PSIM para determinação dos ganhos para os controladores proporcionais-integrais.	117
Figura 3.60 – Exemplo de simulação de múltiplos circuitos com a ferramenta <i>parameter sweep</i>	118
Figura 3.61 – Resultados computacionais da corrente controlada no indutor para a unidade condensadora após implementação da malha de corrente.	119
Figura 3.62 – Perfis de tensão e corrente de alimentação do condicionador de ar obtidos computacionalmente após implementação da malha de controle de corrente ao circuito PFC boost na unidade condensadora.	119
Figura 3.63 – Tensão controlada no barramento CC da unidade condensadora obtida computacionalmente em função da referência.	120
Figura 3.64 - Implementação computacional da malha de controle de tensão do circuito boost PFC da unidade condensadora.	120
Figura 3.65 – Tensão contínua no elo CC no momento do afundamento.	121
Figura 3.66 - Perfil da corrente no indutor após implementação do controle de corrente e tensão para o <i>PFC boost</i> da unidade condensadora	122
Figura 3.67 - Perfil da tensão contínua da unidade condensadora obtido computacionalmente em função da referência.	122
Figura 3.68 - Perfis de tensão e corrente de alimenta da unidade condensadora após implementação completa do controle para o PFC boost.	123
Figura 3.69 - Comportamento da tensão contínua frente a variações de tensão obtidos computacionalmente.	123
Figura 3.70 – Circuito equivalente para a etapa de inversão do condicionador de ar. .	125
Figura 3.71 – Interface do módulo PWM desenvolvido pela ferramenta MODELS do ATPDraw.	125
Figura 3.72- Perfil das tensões invertidas obtida na etapa de inversão	126
Figura 3.73 – Tensão no compressor para o condicionador de ar operando a 25% de carga térmica.	127
Figura 3.74 – Velocidade do compressor quando ele opera a 25% de carga térmica. .	127
Figura 3.75 - Tensão no compressor para o condicionador de ar operando a 50% de carga térmica.	128
Figura 3.76 - Velocidade do compressor operando a 50% de carga térmica.	128
Figura 3.77 – Tensão de alimentação do compressor operando a 100% de carga térmica.	129
Figura 3.78 - Velocidade do compressor quando ele opera a 100% de carga térmica. .	129

Figura 3.79 –Etapa de inversão da unidade condensadora.....	129
Figura 3.80 – Circuito completo da unidade condensadora implementado no ATPDraw.130	
Figura 3.81 – Modelo computacional do condicionador de inverter implementado no ATPDraw.....	131
Figura 4.1 – Instalação do laboratorial aparelho condicionador de ar.....	134
Figura 4.2 – Estrutura laboratorial para os ensaios de qualidade da energia no condicionador de ar.	134
Figura 4.3 – Montagem laboratorial para ensaios de qualidade de suprimento ao condicionador de ar.	135
Figura 4.4 – Perfis de tensão e corrente para o condicionador de ar sob condições ideais de suprimento obtidos via ensaio laboratorial.....	137
Figura 4.5 – Espectro harmônico para a corrente do condicionador de ar obtida via medição experimental.	137
Figura 4.6 – Perfis de tensão e corrente para o condicionador de ar obtidos via modelo computacional.....	138
Figura 4.7 – Espectro harmônico da corrente de entrada do condicionador de ar obtida via modelagem computacional.....	138
Figura 4.8- Perfis de tensão e corrente para o condicionador de ar para uma elevação na tensão de suprimento obtidos via ensaio laboratorial.....	139
Figura 4.9 - Perfis de tensão e corrente para o condicionador de ar obtidos para a condição de elevação de tensão via modelo computacional.....	140
Figura 4.10 – Perfis de tensão e corrente para o condicionador de ar para um afundamento de tensão obtidos via ensaio laboratorial.....	141
Figura 4.11 - Perfis de tensão e corrente para o condicionador de ar para um afundamento de tensão obtidos via modelo computacional.....	142
Figura 4.12- Perfis de tensão e corrente do condicionador de ar para uma interrupção de tensão obtidos via ensaio laboratorial.....	143
Figura 4.13- Perfis de tensão e corrente para uma interrupção de tensão obtidos via modelo computacional.....	143
Figura 4.14- Perfis de tensão e corrente do condicionador de ar para uma flutuação de tensão obtidos via ensaio laboratorial.....	144
Figura 4.15 - Perfis de tensão e corrente do condicionador de ar para uma interrupção de tensão obtidos via modelo computacional.....	145
Figura 4.16 - Perfis de tensão e corrente do condicionador de ar durante a aplicação de uma tensão harmônica obtidos via ensaio laboratorial.....	146
Figura 4.17 – Espectro harmônico de tensão e corrente para a medição experimental.146	
Figura 4.18 - Perfis de tensão e corrente do condicionador de ar durante a aplicação de uma tensão harmônica obtidos via modelo computacional.....	147
Figura 4.19 – Espectro harmônico para a correntes e tensão computacional.....	147
Figura 5.1 – Aspecto da curva de suportabilidade térmica para equipamentos elétricos.151	

Figura 5.2 – Curva de suportabilidade dielétrica típica para equipamentos elétricos. .	151
Figura 5.3 – Estrutura laboratorial para o ensaio de transitórios impulsivos de corrente no condicionador de ar.	153
Figura 5.4 –Impulso característico de corrente para ensaios destrutivos no condicionador de ar.	154
Figura 5.5 – Perfis de tensão e corrente durante o ensaio transitório impulsivo no condicionador de ar.	154
Figura 5.6 – Perfil da corrente quadrática resultante do ensaio de impulso ao condicionador de ar.	155
Figura 5.7 – Curva de suportabilidade térmica obtida para o condicionador de ar.	155
Figura 5.8 -Impulso característico para ensaios destrutivos no condicionador de ar. ...	156
Figura 5.9 - Impulso característico de tensão para ensaios destrutivos no condicionador de ar.	157
Figura 5.10 – Estrutura laboratorial para realização do ensaio de sobretensão em BT	157
Figura 5.11 – Curva de suportabilidade dielétrica do condicionador de ar inverter obtida.	159
Figura 6.1 – Perfis de tensão e corrente para o condicionador de ar submetido a uma elevação de tensão de valor 2pu em uma duração de 10 ciclos.	163
Figura 6.2 – Metodologia para o cálculo das solicitações térmica e dielétrica do condicionador de ar.	164
Figura 6.3 – Análise denexo causal para o condicionador de ar submetido a uma elevação de tensão de 2pu.	165
Figura 6.4 - Análise denexo causal para o condicionador de ar submetido a uma elevação de tensão de 2pu.	167
Figura 6.5 – Perfil de tensão e corrente resultantes do modelo computacional do condicionador de ar submetido a um surto de corrente de 5kA.	168
Figura 6.6 - Análise da solicitação x suportabilidade dielétrica para o condicionador de ar submetido a um surto de corrente de 5kA.	169
Figura 6.7- Análise da solicitação x suportabilidade térmica para o condicionador de ar submetido a um surto de corrente de 5kA.	171

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1 - Dissertações de mestrado e teses de doutorado pelo Núcleo de Qualidade da Energia Elétrica para área de ressarcimento de danos elétricos – atualizada para o ano de 2019.....	38
Tabela 2.1 – Quantitativo de unidades instaladas de condicionadores de ar ao final do ano de 2016.	55
Tabela 3.1 – Intervalos de condução para as chaves da etapa de inversão.....	82
Tabela 3.2 – Dados de placa do condicionador de ar utilizado na modelagem computacional	103
Tabela 3.3 – Dados de placa de um motor de indução trifásico simulando um compressor hermético.....	124
Tabela 4.1 – Tabela resumo dos casos de suprimento de tensão aplicados ao condicionador de ar	136
Tabela 4.2 – Erros percentuais entre os resultados experimentais e computacionais para condição ideal de suprimento	139
Tabela 4.3 - Erros percentuais entre os resultados experimentais e computacionais o caso de elevação de tensão	141
Tabela 4.4 - Erros percentuais entre os resultados experimentais e computacionais condição de afundamento de tensão.....	142
Tabela 4.5 - Erros percentuais entre os resultados experimentais e computacionais condição de interrupção de tensão.	144
Tabela 4.6 - Erro percentual entre o resultado experimental e computacional para a condição de flutuação de tensão.....	145
Tabela 4.7 - Componentes harmônicas da tensão aplicada ao segundo ensaio laboratorial.	146
Tabela 4.8 – Comparativo entre as componentes harmônicas experimentais e computacionais	148
Tabela 5.1 – Resultado dos ensaios destrutivos de tensão ao condicionador de ar.....	158
Tabela 5.2 – Coeficientes da curva de suportabilidade dielétrica do condicionador de ar.	158
Tabela 5.3 – Resultados finais de suportabilidade térmica e dielétrica para o condicionador de ar	159
Tabela 6.1 – Solicitação dielétrica do condicionador de ar durante o fenômeno de elevação de tensão.	164
Tabela 6.2 – Solicitação e suportabilidade dielétrica do condicionador de ar durante o fenômeno de elevação de tensão.	165
Tabela 6.3 - Solicitação dielétrica do condicionador de ar durante o fenômeno de elevação de tensão.	166
Tabela 6.4 - Solicitação e suportabilidade dielétrica do condicionador de ar durante o fenômeno de elevação de tensão.	167

Tabela 6.5 - Solicitação dielétrica do condicionador de ar durante o fenômeno de surto de corrente.	169
Tabela 6.6 - Solicitação e suportabilidade dielétrica do condicionador de ar durante o fenômeno de surto de corrente.....	169
Tabela 6.7 - Solicitação térmica do condicionador de ar durante o fenômeno de surto de corrente.	170
Tabela 6.8 - Solicitação e suportabilidade térmica do condicionador de ar durante o fenômeno de surto de corrente.....	170

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABRAVA – Associação Brasileira de Refrigeração, Ar Condicionado, Ventilação e Aquecimento;

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica;

APR – Analisador de Pedidos de Ressarcimento;

ATP – Alternative Transient Program;

BLDC – Brushless DC Electric Motor;

CC – Corrente Contínua;

CA – Corrente Alternada;

DEC – Duração Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora;

EPE – Empresa de Pesquisa Energética.

FEC – Frequencia Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora;

HCFC – Clorofluorcarbonetos;

HFC – Hidrofluorcarbonetos;

IEA – International Energy Agency;

IGBT - Insulated Gate Bipolar Transistor;

MCC – Modo de Condução Contínuo.

MME – Ministério de Minas e Energia.

MOSFET - Metal-Oxide-Semiconductor Field Effect Transistor;

PFC – Power Factor Control;

PFP – Pré-reguladores de Fator de Potência;

PI – Proporcional Integral

PID – Pedido de Indenização por Danos;

PRODIST – Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional;

PWM – Pulse Width Modulation;

SIN – Sistema Interligado Nacional;

UFU – Universidade Federal de Uberlândia.

LISTA DE SÍMBOLOS

Twh	– Terawatt hora;
Rpm	– Rotações por minuto;
t_{on}	– Tempo que a chave do <i>boost</i> permanece aberta durante um ciclo (s);
t_{off}	– Tempo que a chave do <i>boost</i> permanece fechada durante um ciclo (s);
Ts	– Soma de t_{on} e t_{off} (s);
D	– Ciclo de trabalho da chave de um conversor CC-CC qualquer;
G	– Ganho estático de um conversor CC-CC qualquer;
Ch_1	– Chave do conversor <i>boost</i> ;
D_{rd}	– Diodo de roda livre pertencente ao conversor <i>boost</i> ;
C	– Capacitor (F);
L	– Indutor (H);
R_0	– Resistência representativa de uma carga para o conversor <i>boost</i> (Ω);
I_L	– Corrente que flui pelo indutor (A);
V_L	– Tensão no indutor (V);
V_{ac}	– Tensão alternada na entrada do condicionador de ar (V);
V_{in}	– Tensão no início do conversor <i>boost</i> , após retificação (V);
V_{dc}	– Tensão contínua entregue a carga (V);
V_{ref}	– Tensão contínua de referência imposta ao controle do conversor <i>boost</i> ;
I_{Lref}	– Corrente referência no indutor presente no conversor <i>boost</i> (A);
J	– Energia máxima admissível (J);
I_{sp}	– Suportabilidade térmica (A);
V_{sp}	– Suportabilidade Dielétrica (V);
α	– Coeficiente angular da equação da curva de suportabilidade dielétrica;
β	– Coeficiente linear da equação da curva de suportabilidade dielétrica;
V_k	- Solicitação dielétrica de um equipamento em determinado instante(V);
V_i	- Tensão no equipamento em determinado instante (V);
I_k	- Solicitação térmica de um equipamento em determinado instante (A);
I_i	- Corrente no equipamento em determinado instante (A).

1 INTRODUÇÃO

1.1 Considerações iniciais

As transformações ocorridas ao setor elétrico nos últimos anos como, por exemplo, processos de privatização inserindo novos conceitos de competição neste mercado, têm afetado os consumidores de forma significativa. Este novo modelo transfere para a iniciativa privada a responsabilidade de fornecer energia com qualidade, ficando com o Estado o dever de estabelecer regras e padrões de serviços, fiscalizar e coibir seu descumprimento através de seus órgãos responsáveis. Ao consumidor resta a incumbência de recorrer aos órgãos de defesa do consumidor e agências fiscalizadoras em casos de suspeitas sobre a qualidade do fornecimento de energia e de serviços a preços compatíveis.

Entende-se como alterações na qualidade de fornecimento da energia elétrica, qualquer variação na forma de onda, magnitude (fase e ângulo), e frequência da tensão e/ou corrente elétrica. Questões desta natureza, que no século XX não eram facilmente relatadas e não causavam impactos significativos no sistema, são atualmente de grande relevância para o setor, pois, vêm provocando efeitos anormais e prejudiciais nos elementos conectados à rede. Outras questões com grande dificuldade de resolução estão relacionadas a não trivialidade de encontrar a fonte de origem e quem são os responsáveis por estas perturbações[1].

Os principais distúrbios responsáveis por problemas de qualidade de suprimento sucedem da dinâmica operacional do SIN e redes de distribuições em conjunto com fenômenos naturais não controlados. O crescimento da dimensão e complexidade da rede elétrica têm propiciado um maior número operações cotidianas da área, como por exemplo, entrada e saída de grandes cargas, chaveamento de elementos básicos do sistema e religamentos automáticos. Tais manobras causam variações indesejáveis nas magnitudes de tensão e corrente nominais da rede. Ademais, perturbações de qualidade podem originar-se, também, de fenômenos não controlados e/ou naturais como as descargas atmosféricas e curtos-circuitos. Seus efeitos prejudicam de maneira equivalente e/ou com maior severidade o comportamento das grandezas elétricas[2], [3].

Com o aumento dos distúrbios elétricos constatados na rede, é verificado, nos últimos anos, uma maior quantidade de pedidos de ressarcimento por danos elétricos, por parte dos consumidores de energia, vinculadas ao mau funcionamento e as vezes danos irreversíveis a equipamentos nela conectados[4]. Os impactos presenciados nestas cargas estão relacionados ao crescimento considerável no uso de equipamentos eletroeletrônicos pela população em detrimento dos antigos equipamentos eletromecânicos. A adição de novas funcionalidades e o desenvolvimento inteligência artificial destes aparelhos refletem diretamente na quantidade de microcontroladores e componentes eletrônicos integrados em seus circuitos elétricos. Como resultado, eles vêm apresentando grande sensibilidade a alteração da qualidade da energia em sua alimentação, sendo, portanto, mais susceptíveis a apresentarem problemas na presença destas anomalia[5], [6].

Amparados por lei, os consumidores têm o direito a indenização de seus equipamentos após a constatação de que os danos observados nos mesmos foram provocados por distúrbios na rede elétrica. Desse modo, com o propósito de proferir normativas para ressarcimento de danos elétricos, surge a autarquia responsável pela legislação da geração, distribuição, transmissão, e comercialização de energia, a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). O órgão estabeleceu documentos voltados para questões de ressarcimento a partir da divulgação da resolução normativa nº61/2004[7] substituída pela nova nº 414/2010[8]. As regulamentações atuais podem ser encontradas no módulo 9 dos Procedimentos de Rede de Distribuição - PRODIST[9], as quais estão em conformidade e harmonia com a Constituição Federal e o Código de Defesa do Consumidor. Os regimentos impõem as concessionárias de energia a responsabilidade de efetuação do ressarcimento. A verificação para estas solicitações é embasada na avaliação de existência do nexo causal, definido como a confirmação de casualidade entre o distúrbio elétrico ocorrido e data da ocorrência de dano ao equipamento.

Em razão ao maior conhecimento da população com relação a seus direitos como consumidores em uma rede de distribuição de energia elétrica, aliado a maior sensibilidade de novos equipamentos elétricos no mercado e maior ocorrência de perturbações elétricas na rede elétrica, é constatado um aumento significativo no número de pedidos de indenização por danos registrados nas concessionárias de energia. Ao conceder muitas indenizações, essas empresas desembolsam quantias milionárias para reparo de componentes ou troca destes equipamentos, tendo, como consequência, grandes prejuízos financeiros. Conjuntamente ao fato anterior, elas enfrentam também conflitos judiciais com clientes que, em desacordo com o indeferimento de suas solicitações, tendem a buscar seu direito por vias jurídicas[10].

Um dos principais focos dos problemas correlacionados ao crescimento descontrolado das solicitações de ressarcimento, deve-se a metodologia para verificação destes casos proposta pela ANEEL. Justificada somente pela casualidade, baseada normalmente em laudos de assistência técnica que sugerem a origem do defeito sem a necessidade da inclusão de informações adicionais, como,

por exemplo, as características de tolerância dos equipamentos e comportamento perante problemas de qualidade, as concessionárias de energia, que não podem afirmar com exatidão se o dano reclamado ocorreu exclusivamente pelo distúrbio elétrico da rede, muitas vezes ainda assim ressarcem os produtos reclamados para evitar o desgaste diante os seus consumidores.

Agindo para conter estas problematizações, a área de pesquisa conhecida por “Pedidos de Indenização por Danos” surgiu. Ela tem mobilizado ao longo dos anos a atenção destas empresas juntamente com a ANEEL, pesquisadores e órgãos governamentais. As buscas estão direcionadas para o desenvolvimento de mecanismos, fundamentados em argumentos matemáticos, simulações computacionais e testes laboratoriais, capazes de equiparar as solicitações de tensão e corrente presenciadas nos equipamentos, durante a ocorrência de distúrbios, com seus respectivos limites de suportabilidade a essas grandezas. Alguns procedimentos já propostos podem ser encontrados em [9], [11], [12].

O desenvolvimento de uma metodologia capaz de argumentar cientificamente quais fenômenos são efetivamente os responsáveis por acarretar danos nos equipamentos reclamados e aceita por todas as partes (supridor, consumidores, agência reguladoras e órgãos de apoio ao consumidor) proporcionará a concessionárias subsídios necessários para balizar suas decisões a respeito das solicitações de ressarcimento. Desse modo, essas empresas, procedendo de forma justa e coesa, possuem uma melhor relação e imagem aos olhos de seus consumidores e evitam simultaneamente envolvimento em ações judiciais longas e com custo expressivo.

No que tange aos estudos direcionados a investigações acerca de PIDs, grande parte das indagações presentes atualmente tem relação com o comportamento de equipamentos de linha branca, em sua maioria eletrodomésticos, frente a distúrbios de qualidade na rede elétrica. Abordando especificamente as diligências relacionadas a correlação de solicitação *versus* suportabilidade, os principais produtos passíveis de reembolso, conforme avaliações estatísticas fornecidas pelas próprias empresas de energia, já apresentam, em sua maioria, estudos publicados envolvendo questionamentos e resultados para a resolução de PIDs. Contudo, com o avanço tecnológico em escala global advindo com o passar dos anos, esses mesmos produtos estão se tornando obsoletos e pouco eficientes. De modo consequente, eles vêm sendo substituídos gradativamente por versões atualizadas, apresentando novas componentes elétricos/mecânicos e também diferentes princípios de funcionamento. Assim sendo, eles não obedecem, via de regra, o comportamento elétrico constatado anteriormente e requerem, portanto, novos estudos de desempenho e suportabilidade.

Equipamentos que utilizam de componentes mecânicos com força motriz como parte essencial de seu funcionamento, como geladeiras, freezers e condicionadores de ar, costumam apresentar, em suas novas versões, uma tecnologia para controle de rotação da referida peça, denominada globalmente como “inverter”. As principais implicações para a inclusão dessa tecnologia a novos

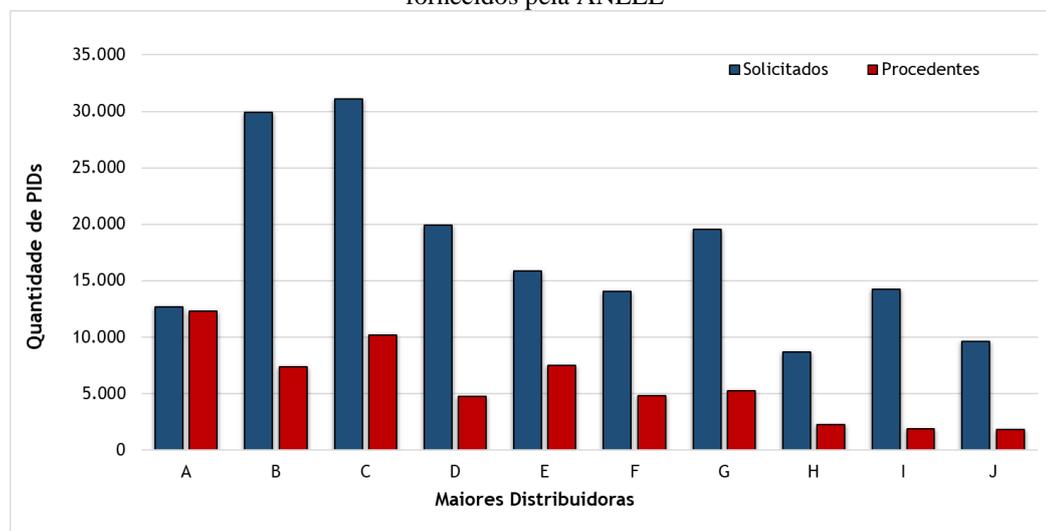
produtos são a necessidade de um maior número de componentes eletrônicos e circuitos de controle integrados ao equipamento[13]. Como consequência, os mesmos têm suas características de sensibilidade e suportabilidade alteradas, fato esse que suscita a necessidade de execução de novos estudos relacionados a área de PID's. Logo, o presente trabalho propõe a realização de um novo estudo de desempenho e obtenção de curvas suportabilidade elétrica para equipamentos condicionadores de ar *inverter*. As principais particularidades e constatações dessa modernização tal qual do produto como um todo são pormenorizadas nas seções seguintes.

1.2 Contextualização do tema dessa dissertação

1.2.1 Análise quantitativa e qualitativa de PID's a nível nacional

Buscando elucidar a relevância do tema a nível nacional, a figura 1.1 apresenta uma síntese quantitativa dos números de solicitações encaminhadas para as 10 maiores concessionárias de energia no Brasil ao longo do ano de 2017. Estima-se que foram realizados cerca de 285.187 pedidos de ressarcimento, dos quais aproximadamente 30% foram julgados procedentes e 70% improcedentes.

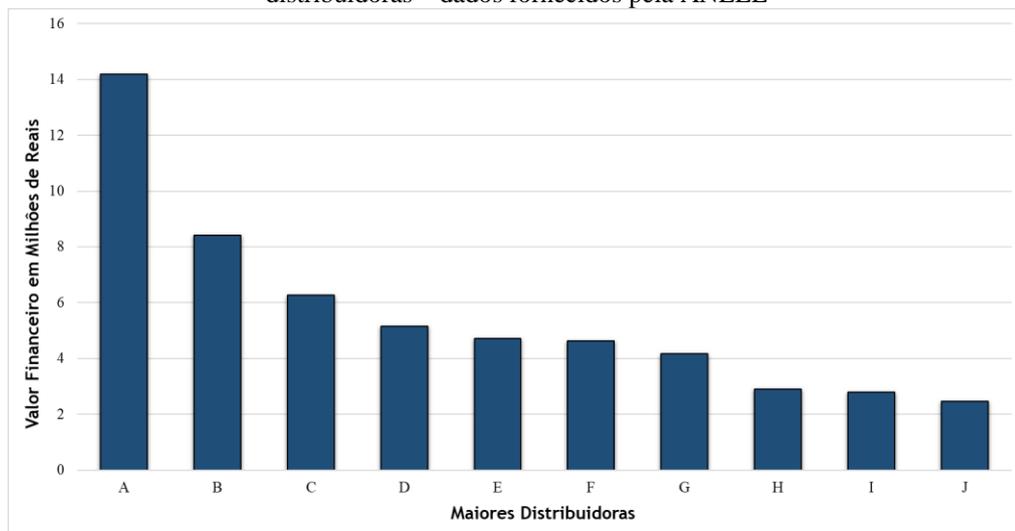
Figura 1.1 - Número de pedidos de indenização por danos elétricos - ano de 2017- 10 empresas distribuidoras - dados fornecidos pela ANEEL



Fonte: Autor Próprio.

Uma primeira análise a ser feita da figura 1.1 é a quantidade expressiva de pedidos de ressarcimento feitas apenas para 10 empresas nacionais. A consequência direta para a aprovação dessas solicitações é a quantidade financeira envolvida nos tramites de indenização. Os valores pagos pelas concessionárias de energia, que alcançam anualmente a faixa dos milhões de reais, têm sido na última década fontes de grandes perdas para essas empresas e demonstram um problema que deve ser solucionado. À título de ilustração, a figura 1.2 mostra a quantidade desembolsada em PID's para as mesmas concessionárias no ano de 2017. Estima-se que foram gastos um total de R\$ 78.040.274,44 ao longo do período.

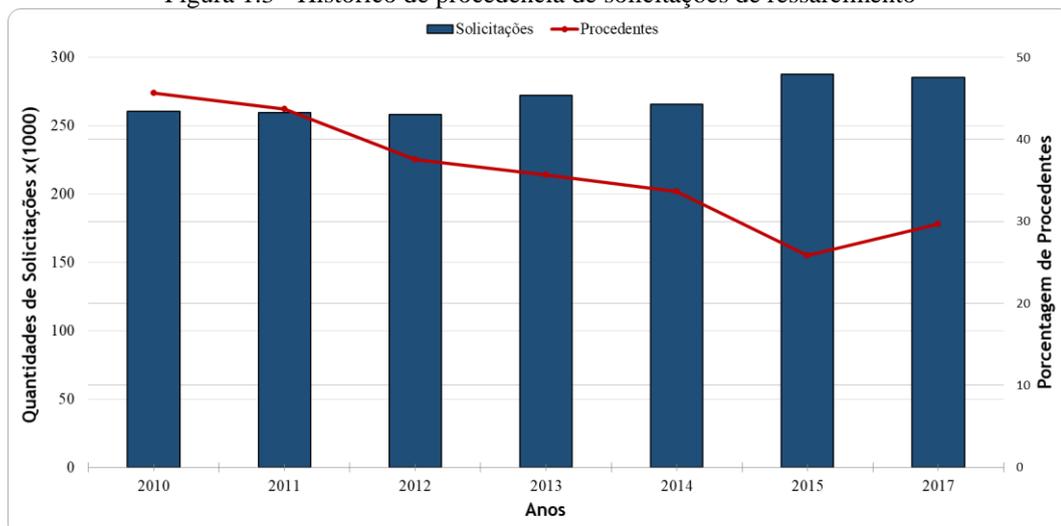
Figura 1.2 - Custos totais ressarcidos por pedidos de indenização por danos elétricos – ano de 2017- 10 empresas distribuidoras – dados fornecidos pela ANEEL



Fonte: Autor próprio.

Além dos números fornecidos pelas concessionárias de energia, existem também aqueles provenientes da ouvidoria da ANEEL[14]. Essas reclamações ocorrem quando não há consenso entre as partes. De fato, conforme constatado na figura 1.1, a grande quantidade de indeferimento de solicitações somada as requisições enviadas a ANEEL apontam para uma maior probabilidade de conflitos, podendo esses se estender e somente ser resolvidos a âmbito judicial. Complementando a afirmação acima, na figura 1.3, está indicado o histórico procedência de solicitações de ressarcimento no cenário brasileiro entre 2010 e 2017[4].

Figura 1.3 - Histórico de procedência de solicitações de ressarcimento



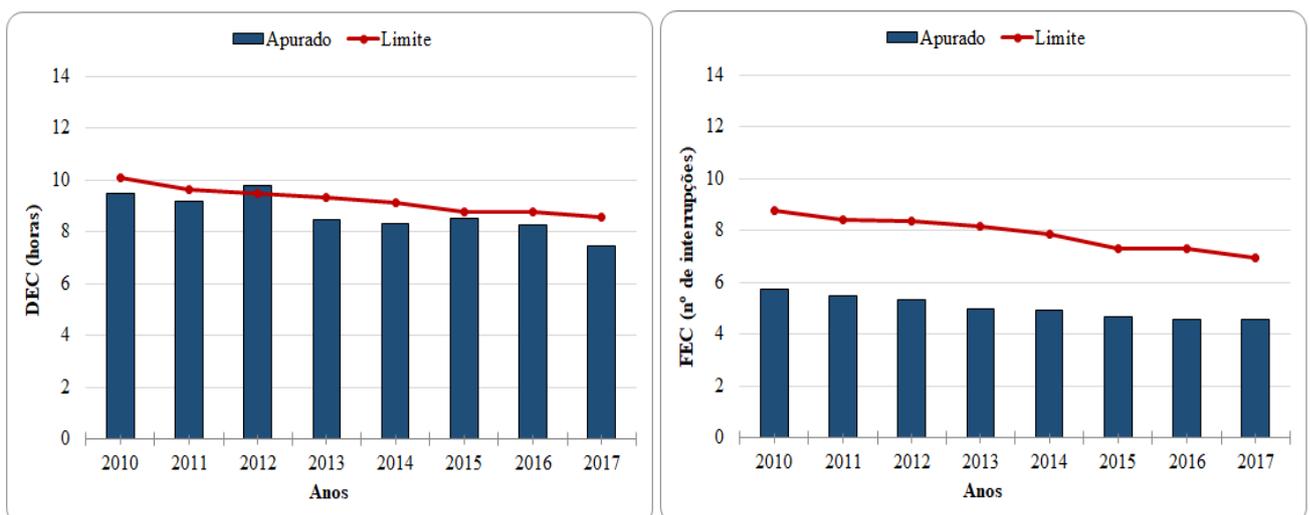
Fonte: Adaptado de [4].

É notório a tendência da redução de deferimentos de PID's ao longo dos anos. As improcedências advêm do resultado de investimentos realizados pelas empresas em investigações

científicas acerca do comportamento elétrico dos equipamentos frente a distúrbios de energia. Outro fator a ser ponderado está relacionado a vasta experiência adquirida pelas mesmas ao solucionar uma grande quantidade de casos de ressarcimento. Ao indenizar o mesmo tipo de equipamento repetidas vezes, os funcionários das empresas, responsáveis por verificar e efetuar laudos de oficina relativos as solicitações, têm maior conhecimento adquirido acerca da correlação entre quais distúrbios são os prováveis responsáveis por danificar o equipamento reclamado. Apesar da inferência empírica, o processo torna-se recorrente e resulta em maiores deferimentos pela conclusão da ausência de nexo causal.

Não obstante as afirmações anteriores, ao analisar as quantificações totais das solicitações efetuadas, constata-se que elas não apresentam, no geral, um padrão de aumento ou redução ao longo dos anos e tais números representam para as concessionárias de energia grandes prejuízos financeiros. A luz dos fatos apresentados, mostra-se, através da figura 1.4, os indicadores DEC e o FEC médios calculados considerando uma distribuidora no Brasil entre o período de 2010 a 2017. Eles são classificados pelo PRODIST como fatores representativos da qualidade do serviço realizado pelas concessionárias de energia[15]. Ao mesmo tempo que o valor do indicador DEC se mostra praticamente constante ao longo dos anos, o FEC tem uma redução significativa e crescente até o fim do período de amostra. Estes números expressam que os investimentos realizados por essas empresas para melhorar a robustez da rede e assegurar a continuidade e qualidade do fornecimento da energia não são suficientes para reduzir a grande demanda de PID's.

Figura 1.4 – (a) DEC médio para distribuidoras brasileiras de 2010 a 2017 – (b) FEC médio para distribuidoras brasileiras entre 2010 a 2017.

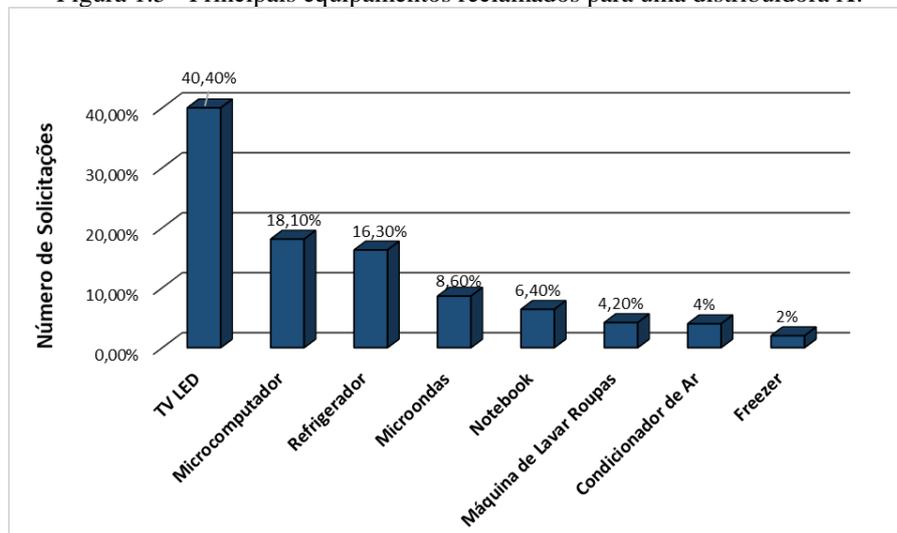


Fonte[16].

Com relação aos principais equipamentos reclamados pelo consumidor, esses são em sua maioria eletrodomésticos comuns de se encontrar na maioria dos estabelecimentos residenciais. Ilustrando a questão, a figura 1.5 mostra um levantamento estatístico de uma determinada

concessionária de energia, denominada neste trabalho como “X”, dos principais produtos atrelados a solicitações de indenização[4]. Em suma, observa-se que a grande variedade desses, dentre os residenciais conhecidos, são os que apresentam custo maior de reparo e/ou substituição, característica essa que reflete diretamente nos custos envolvidos no processo para as empresas de energia conforme já evidenciado na figura 1.2.

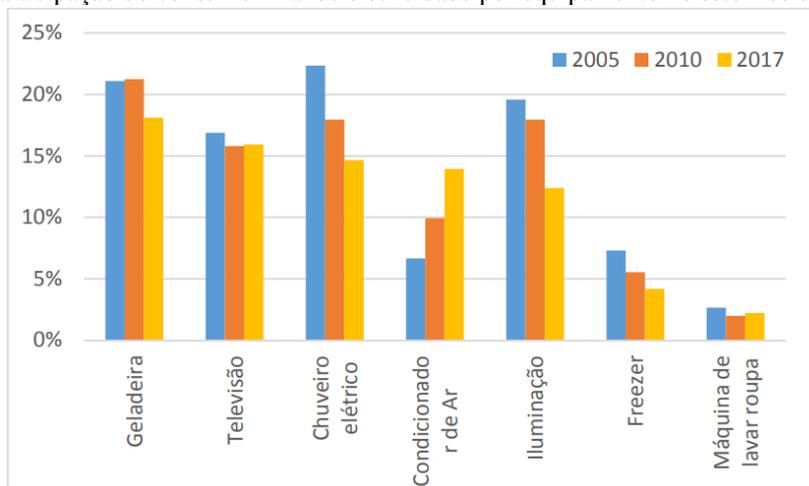
Figura 1.5 - Principais equipamentos reclamados para uma distribuidora X.



Fonte: [4].

É notório que os aparelhos televisores, computadores e geladeiras ocupem as primeiras posições, pois, são comumente encontrados na maioria das residências. Contudo, em termos consumo de energia elétrica, novos equipamentos vêm ganhando espaço no ambiente e pesquisas mostram que eles tendem a aparecer cada vez mais em solicitações de PIDs. A figura 1.6 sintetiza uma pesquisa, realizada pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE) do Ministério de Minas e Energia (MME), relacionada a participação de consumo para eletrodomésticos residenciais típicos no período de 2005 a 2017[17].

Figura 1.6 – Participação do consumo final de eletricidade por equipamento no setor residencial no Brasil.

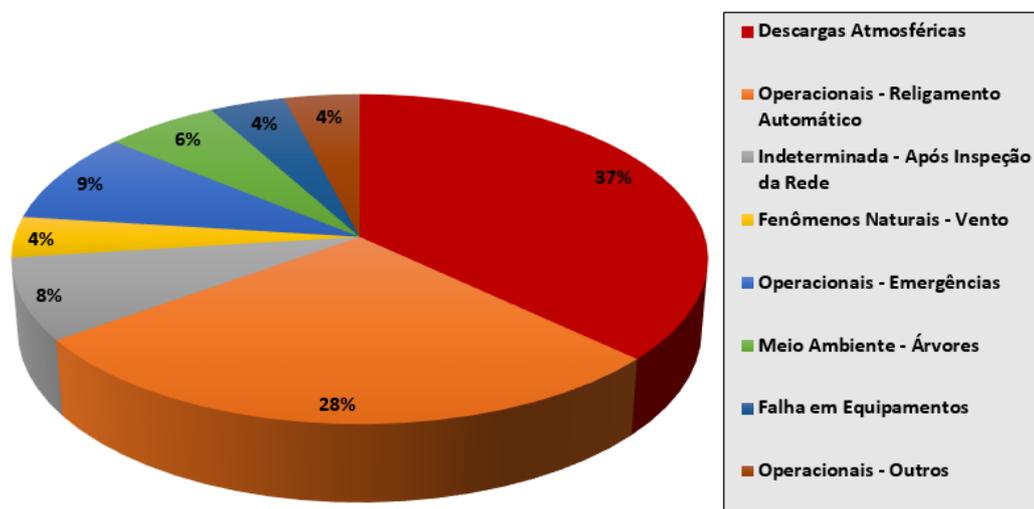


Fonte: [17].

Os aparelhos condicionadores de ar, que nos resultados das pesquisas mostrados pela figura 1.5 ocupavam 4% dos PIDs, tiveram um aumento considerável de consumo de 2005 a 2017 ao mesmo tempo que o restante dos equipamentos analisados revelaram uma leve redução. O valor de 14% informado pela figura advém do crescimento de venda de unidades de condicionadores de ar e sua subsequente presença em ambientes residenciais[18]. Pelo fato anterior e também pela modernização destes equipamentos, eles tendem a aparecer cada vez mais em solicitações de PIDs o que instiga novos estudos destes equipamentos direcionados ao tema em questão.

Por fim, tem-se na figura 1.7 a relação dos distúrbios relativos e julgados responsáveis por provocar danos aos equipamentos do consumidor. Os dados apresentados são referentes a uma outra distribuidora de energia, aqui denominada como “Y”. A causa da maioria das reclamações, conforme avaliação da concessionária, é resultado da ocorrência de descargas atmosféricas e religamentos automáticos. Identifica-se ainda situações onde não foram encontrados registros suficientes para se estabelecer um nexo causal o que, provavelmente, indeferiria a solicitação realizada pelo consumidor. Tais correlações são ainda razões de questionamento, pois, não condizem inegavelmente a verdadeira causa dos danos ocasionados a outrem e apontam para a deficiência da metodologia atual disposta pela ANEEL. Esse processo é, ainda hoje, alvo de grandes discussões e requer avaliações e revisões criteriosas para que o mesmo se torne viável, em termos sociais e financeiros, para ambas as partes.

Figura 1.7 - Principais fenômenos associados a PID's para a concessionária Y.



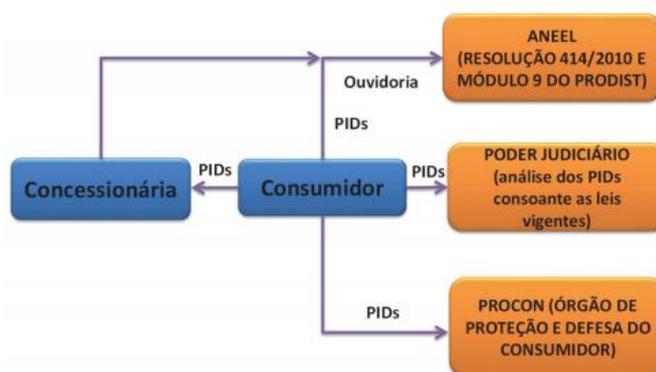
Fonte: Adaptado de [4].

1.2.2 Abordagem Jurídica relacionada a PID's

Em consonância com o determinado no artigo 6º, §1 do Código Civil, no artigo 31 da Lei 8.967/95 e no art.4º, II, “d” da Lei 8.078/90, a energia elétrica é considerada um bem essencial para

a população e deve ser ofertada continuamente e apresentando padrões de qualidade dentro das normas dispostas pelos órgãos regulamentadores responsáveis. Desse modo, sendo a comercialização de energia elétrica tratada como um serviço público, é atribuída a incumbência a prestadora deste serviço, as quais se inserem as concessionárias de energia elétrica, a responder por quaisquer danos que venham a ocorrer por falhas ou defeitos durante a execução de seus trabalhos a outrem[10]. À título de ilustração, tem-se na figura 1.8, os caminhos possíveis para que um consumidor possa recorrer a seus direitos. Constatase que além do caminho tradicional relativo a concessionária, existem também outras alternativas a qual o consumidor pode recorrer caso não se verifique um acordo entre as partes.

Figura 1.8- Direções possíveis para o consumidor realizar pedidos de indenização por danos.



Fonte: [4].

No que diz respeito ao direito pátrio, a responsabilidade civil das concessionárias de energia, pende-se na teoria do risco administrativo o que, substancialmente, refere-se à responsabilidade de resposta objetiva perante aos seus administrados[19]. Logo, não é necessária a corroboração de culpa por parte do agente prejudicado perante os responsáveis pela indenização dos danos ocasionados. Contudo, há situações em que estas prestadoras de serviços podem ter por excluídas a obrigação de indenizar tais prejuízos. Essas ocorrências sucedem da constatação de algum excludente de responsabilidade aos administradores, ou seja, elas decorrem da impossibilidade de se estabelecer um nexo causal entre a ação ou omissão por parte destas empresas e os respectivos danos acarretados aos seus consumidores.

No âmbito do ressarcimento de danos elétricos, é sabido que não é todo e qualquer distúrbio no sistema elétrico que tem a aptidão necessária para provocar danos aos equipamentos dos consumidores de energia. Fato esse que fomenta a indispensabilidade de se estabelecer uma apuração concreta do nexo causal de modo a esclarecer o que é efetivamente é fruto das ações ou omissões das concessionárias de energia, culpa exclusiva do agente consumidor, ato ilícito ou é resultado da impossibilidade de correlacionar a perturbação e o efeito ocasionado ao produto do usuário.

Todavia, o que se presencia atualmente por parte das distribuidoras de energia elétrica é a tentativa de desviar de seus deveres como prestadoras de serviços públicos ao afirmar, mesmo havendo a existência de falhas na prestação de serviços, que os danos observados nos equipamentos reclamados não condizem com a severidade dos distúrbios registrados no sistema. Os consumidores, não satisfeitos com a recusa informada pela empresa, dão origem a diversas contendas, que em diversas ocasiões, se estendem e que se extinguem somente perante efetuação de ações judiciais. Por outro lado, não se pode eximir totalmente a culpa dos consumidores em avaliações de processos de indenização. Agindo de má fé, há ocasiões onde os mesmos declaram falsamente terem sofrido danos decorrentes das atividades da concessionária com objetivando enriquecer-se ilegitimamente.

A ANEEL, além regulamentar e fiscalizar o setor elétrico, possui um papel fundamental na minimização da grande quantidade de contendas instauradas por consumidores insatisfeitos com as ações e resoluções das concessionárias de energia e vice-versa. Ao exprimir a competência de determinar ações necessárias para o cumprimento suas resoluções relativas a ressarcimento de danos, cuja normativa vigente encontra-se em harmonia com os direitos dispostos aos consumidores pelo Código de Defesa do Consumidor e Continuação Federal[20], ela tem autoridade para aprovar novos critérios e/ou metodologias que apontam para o estabelecimento da verdade e que tem o potencial de prover uma melhor correlação do dano causado a um equipamento eletroeletrônico por uma determinada anomalia na rede elétrica.

À luz desses argumentos, percebe-se que, a falta de conhecimento dos consumidores de situações onde a concessionária se enquadra em excludente de responsabilidade e, por essa razão, é isenta de realizar pagamentos de indenização, é a causa primordial para existência de conflitos entre as partes. Assim, para ocorrência efetiva desse ato pela concessionária ao seu consumidor, torna-se indispensável a averiguação existência de um nexo causal, ou seja, deve ser comprovada a relação de causa e efeito entre distúrbio elétrico e equipamento danificado. Desta maneira, faz-se necessário a adoção de um procedimento padronizado pelas empresas para resolução de PID's. A sistematização do processo de análise alicerçada a critérios técnico-científicos embasados em ensaios laboratoriais e programas computacionais proporcionarão uma maior precisão do que realmente é fruto de adversidades da rede e do que é alegado indevidamente.

1.3 Revisão bibliográfica para realização deste trabalho

Reconhece-se que, apesar de ser classificado como um tema relativamente recente, a bibliografia alusiva a pesquisas relacionadas ao tema de PID's é vasta e possui volume expressivo. Desse modo, concentra-se nessa seção a menção de textos referentes aos conceitos de modelagem, sensibilidade e suportabilidade de equipamentos, estudos no qual o presente trabalho é fundamentado.

Por fim, para evidenciar a relevância da Universidade Federal de Uberlândia na área, mostra-se um esquemático temporal de todas as pesquisas desenvolvidas na universidade durante o período.

1.3.1 Modelagem computacional de equipamentos elétricos

O software adotado a modelagem de equipamentos e sistemas elétricos no domínio do tempo escolhido e utilizado no presente trabalho é o Alternative Transient Program (ATP). Na referência [21] podem ser encontrados características e recursos disponibilizados pelo programa e que são de grande valia para execução e validação da modelagem de produtos alvos de PID's. Ressalta-se que o uso do ATP para execução de trabalhos relacionados ao tema ressarcimento de danos é instigada pelas inúmeras publicações obtidas em congressos e periódicos nacionais e internacionais.

Encontra-se a partir das referências [3], [22]–[24] e inúmeras outras, modelagens elétricas computacionais equipamentos eletroeletrônicos, a exemplo, de aparelhos televisores, de som, maquinas de lavar. Nos documentos são encontradas estratégias e metodologias para representação dos diversos no software ATP. A legitimidade do modelo em todos os casos se dá pela comparação de medições experimentais, obtidos via realização de ensaios laboratoriais do produto físico, com os respectivos resultados proporcionados pelo respectivo modelo computacional. Enfatiza-se que a validação ocorre não tão somente para condições suprimento equivalentes ao regime permanente, sendo também consideradas situações onde há adversidades na qualidade de alimentação do equipamento.

Em especial, destaca-se o trabalho [25], o qual descreve a modelagem computacional para um condicionador de ar *split*. Ainda que, conforme elucidado nos próximos capítulos, a inclusão tecnologia *inverter* no aparelho acarrete uma mudança na sua estrutura física e na sua lógica de operação, principalmente no que tange o circuito eletrônico da unidade condensadora, o referido documento foi de grande valia para a compreensão de diversos conceitos e princípios físicos de funcionamento do equipamento.

1.3.2 Sensibilidade e Suportabilidade de Equipamentos Elétricos

A metodologia para obtenção das curvas de suportabilidade térmica e dielétrica para o condicionador de ar *inverter* fundamentou-se nos tópicos abordados nas referências [26], [27]. Nelas, há descrito a fundamentação teórica e procedimentos experimentais para levantamento da curva de diversos equipamentos eletroeletrônicos como, aparelhos de som, televisores, DVD's refrigeradores, rádios e computadores pessoais. Os ensaios são efetuados a nível destrutível e compreendem a submissão dos equipamentos supramencionados a sobretensões e/ou sobrecorrentes de diferentes níveis que variam entre valores em baixa/média tensão a transitórios impulsivos.

Outras referências complementares como as [28], [29], compreendem da abordagem de características particulares de alguns equipamentos em específico e proporcionam uma melhor

percepção dos efeitos e consequências da submissão dos mesmos a magnitudes de tensão e/ou correntes destrutivas. Além disso, são evidenciados quais são os principais componentes, pertencentes aos equipamentos, afetados pelos distúrbios. Dessa maneira, é possível inferir um padrão de quais são os prováveis efeitos ao produto conforme alteração do seu tipo e definir estratégias de mitigação correspondentes as conclusões observadas.

Destacam-se ainda os documentos [30]–[33], responsáveis por proferir orientações para realizações de ensaios destrutivos em equipamentos. Neles há a definição de valores para aplicação transitórios impulsivos de tensão e/ou corrente em equipamentos elétricos, bem como sugestões de procedimento para execução de ensaios em baixa e média tensão. Em posse da vasta gama de informações, torna-se se possível a reprodução das estratégias propostas ao condicionador de ar utilizado nesta dissertação.

1.3.3 Pesquisas e produtos voltados para a análise do nexo causal no âmbito da UFU

Dando continuidade ao levantamento de trabalhos relacionados a ressarcimento de danos elétricos produzidos na Universidade Federal de Uberlândia, realizado em [4], tem-se na tabela 1.1 a síntese dos documentos atualizada até o ano de 2019.

Tabela 1.1 - Dissertações de mestrado e teses de doutorado pelo Núcleo de Qualidade da Energia Elétrica para área de ressarcimento de danos elétricos – atualizada para o ano de 2019.

AUTOR	TIPO DE TRABALHO	ANO	TÍTULO DO TRABALHO
Paulo Henrique Oliveira Rezende	Tese de Doutorado	2016	Contribuições para os estudos computacionais de ressarcimento por danos elétricos: limites de suportabilidade e induções eletromagnéticas
Afonso Bernardino de Almeida Junior	Tese de Doutorado	2016	Contribuições aos Estudos Computacionais do Nexo Causal Associados com Ressarcimento por Danos Elétricos Devido a Descargas Atmosféricas Diretas e Indiretas
Paulo Henrique de Oliveira Rezende	Dissertação de Mestrado	2012	Uma proposta de modelagem de condicionadores de ar <i>split</i> visando a análise de pedidos de ressarcimento por danos elétricos.
Isaque Nogueira Gondim	Tese de Doutorado	2012	Contribuição para o aplicativo APR: Novos limites de Suportabilidades, perturbações via medições e sistematização no processo da configuração da rede.
Jomil Marques Borges	Dissertação de Mestrado	2012	Desenvolvimento de uma Metodologia para Análise de Ressarcimento de Aparelhos de Som Associados aos Distúrbios na Rede Elétrica da CEMIG Testando Dispositivos Mitigadores.
Claudinei Jeremias de Ávila	Dissertação de Mestrado	2012	Curvas de Suportabilidade Dielétrica e Térmica para Televisores Integrados ao APR e ao Banco de Dados da CEMIG Distribuição SA.
José Nelson Quadrado Júnior	Dissertação de Mestrado	2012	Estudos Avaliativos de Desempenho do Aplicativo APR Através de Caso Reais de Consumidores da Região Metropolitana de Cuiabá.
Edécio Antônio Martins	Dissertação de Mestrado	2012	Elaboração de Curvas de Suportabilidade para Microcomputadores e Estudos de Desempenhos de Dispositivos Mitigadores para Subsidiar PIDs.

Fernando Gadenz	Dissertação de Mestrado	2010	Uma Proposta para a Inserção do Tempo de Uso dos Equipamentos no Aplicativo APR e Estudos Avaliativos de Casos Reais de PIDs.
Orlando Adolfo da Silva	Dissertação de Mestrado	2010	Metodologia para subsidiar a análise de Solicitações de ressarcimento com dispositivos de proteção contra surtos.
Marcus Vinicius Borges Mendonça	Tese de Doutorado	2010	Contribuições ao Processo Computacional para Análise de Pedidos de Indenização por Danos em Equipamentos Elétricos.
Ivandro Antonio Bacca	Dissertação de Mestrado	2008	Modelagem para Análise de Desempenho de Eletrodomésticos à Força-Motriz Diante de Distúrbios de Qualidade da Energia.
Carlos Eduardo Tavares	Tese de Doutorado	2008	Uma Estratégia Computacional para a Análise Técnica de Pedidos de Ressarcimento a Consumidores.
Rodrigo Antônio Peniche	Dissertação de Mestrado	2004	Modelagem e Análise de Desempenho de Equipamentos Eletroeletrônicos diante de Distúrbios da Qualidade da Energia - Enfoque: Aparelhos de DVD, Fax e Telefone sem fio.
Carlos Eduardo Tavares	Dissertação de Mestrado	2004	Modelagem e Análise de Desempenho de Equipamentos Eletroeletrônicos diante de Distúrbios da Qualidade da Energia - Enfoque: Televisores, VCR's e Som.
Mateus Duarte Teixeira	Dissertação de Mestrado	2003	Uma Estrutura Laboratorial para Testes de Desempenho de Equipamentos no Contexto da Qualidade da Energia Elétrica.
Ricardo Nogueira Magalhães	Dissertação de Mestrado	2003	Controlador Lógico Programável no Contexto da Qualidade da Energia.
Bismarck Castilho Carvalho	Dissertação de Mestrado	2003	Desempenho de Aparelho Condicionador de Ar no Contexto da Qualidade da Energia Elétrica.
Ana Carolina Azevedo	Dissertação de Mestrado	2003	Desempenho de Refrigeradores Domésticos no Contexto da Qualidade da Energia Elétrica.
Ana Cláudia Daroz dos Santos	Dissertação de Mestrado	2001	Desempenho de Fontes Lineares e Chaveadas no Contexto da Qualidade da Energia Elétrica.

Fonte: Adaptado de [4].

Além de quantidade volumosa de publicações em congressos e períodos nacionais e internacionais resultantes dos referidos trabalhos, destaca-se, a produção do programa computacional denominado por Analisador de Pedidos de Ressarcimento (APR) criado pela UFU. O propósito deste programa é analisar de maneira sistematizada e automática a consistência entre a relação entre a ocorrência de distúrbios elétricos e os danos ocasionados a equipamentos eletrodomésticos. Para isso ele utiliza os modelos computacionais, implementados no ATP, com os seus respectivos limites de suportabilidade térmico e dielétrico. Ao final, ele é capaz de calcular e concluir se procede ou não a existência nexu causal na solicitação do consumidor.

Mesmo promovendo resultados com embasamentos científicos, em 5 maio de 2015, a ANEEL determinou que “Simulações computacionais de eventos na rede não afastam o nexu de causalidade e não eximem a distribuidora da responsabilidade pelo ressarcimento”. Contudo, a metodologia desenvolvida ao longo dos anos se mostra com grande potencial para auxiliar as concessionárias de

energia na análise de PID's[34]. Desse modo, a busca pela sistematização do processo de avaliação de PID's ainda é hoje um desafio para trabalhos futuros assim como a modelagem computacional e investigação dos limites de suportabilidade de novos equipamentos eletrodomésticos.

1.4 As contribuições desta dissertação

Como uma primeira contribuição individual, nesta dissertação encontram-se classificados os principais tipos de condicionadores de ar existentes no mercado. Ademais, têm-se também, a elucidação sobre as principais tecnologias que compõem esses aparelhos, bem como, suas principais vantagens em relações a suas versões anteriores.

Em seguimento, o trabalho contribui com a elaboração de uma modelagem computacional correspondente ao funcionamento e características elétricas particulares de um aparelho condicionador de ar tipo *split inverter*.

A validação da consistência do modelo implementado é feita através da comparação dos resultados obtidos nas simulações com os ensaiados em laboratório sob condições de suprimento ideais e não-ideais. Com todos os requisitos assimilados, é possível a análise do desempenho elétrico do condicionador de ar em softwares especializados na área sem a presença física do equipamento.

Além de reproduzir o comportamento do condicionador de ar frente a problemas de qualidade comuns, tais como, afundamentos, distorções harmônicas, elevações e flutuações de tensão. Esta pesquisa contribui também, com a obtenção dos níveis de suportabilidade térmica e dielétrica do equipamento. Obtidos através de ensaios a nível destrutivo, estes dados promovem um melhor entendimento das características do mesmo na presença de surtos de tensão e corrente. Tais informações são de grande importância para estudos relacionados a ressarcimento por danos elétricos e podem subsidiar trabalhos futuros.

Conclui-se que as contribuições gerais desta dissertação estão direcionadas ao acréscimo de informações científicas pertinentes na área de PID's. Como foco central, os resultados alcançados promovem uma evolução na abordagem computacional do tema.

1.5 Estrutura da Dissertação

Além do capítulo introdutório, o presente trabalho encontra-se estruturado da seguinte forma:

Capítulo II Características gerais a respeito dos aparelhos condicionadores de ar

O capítulo em questão detalha características históricas e físicas dos aparelhos condicionadores de ar. Primeiramente é abordado surgimento e expansão ao longo do século do condicionador de ar. Seguidamente, tem-se a explanação

princípio básico de funcionamento destes aparelhos, os seus principais componentes e suas respectivas funções. Posteriormente, são classificados os vários tipos de condicionadores de ar encontrados na atualidade, com suas principais vantagens e onde são comumente encontrados. Por fim, com ênfase ao *split inverter*, são apresentadas características da tecnologia retratando quais principais aspectos que a tornam atraente para sua inclusão em equipamentos elétricos modernos.

Capítulo III Modelagem Computacional de Aparelhos Condicionadores de Ar *Split Inverter*

Esta unidade da dissertação encontra-se voltada para a investigação do desempenho de condicionador de ar *inverter* ao ser submetido em condições não de suprimento ideais e não-ideais. Preliminarmente é elucidado o funcionamento elétrico relativo as partes evaporadora e condensadora do equipamento identificando as características prováveis de serem constatadas na inspeção física. Sob a luz dessas informações, em sequência, há a descrição do circuito conversor eletrônico elevador de tensão, essencial para o emprego do controle de fator de potência existente no aparelho e, por consequência, de sua modelagem. Conhecida sua lógica de operação, é então apresentado o circuito equivalente para ambas e as suas respectivas implementações computacionais.

Capítulo IV Validação do Modelo Computacional do Aparelho Condicionador de Ar *Split Inverter*

O capítulo IV tem o propósito de validar o modelo desenvolvido nesta dissertação. Desse modo, são realizados testes laboratoriais sob condições ideais e não-ideais de suprimento no condicionador de ar *split inverter*. Cujos resultados são comparados com os fornecidos pelo modelo computacional.

Capítulo V Obtenção das Curvas de Suportabilidade Térmica e Dielétrica para o Condicionador de Ar *Inverter*

Este capítulo, tem como objetivo a obtenção dos limites de suportabilidade térmico e dielétrico do condicionador de ar *split inverter*. Assim procedendo, são descritos os respectivos fundamentos teóricos e metodologia laboratorial abordada para a aquisição das curvas de suportabilidade.

Capítulo VI Avaliação Computacional de Casos Anormais de Suprimento ao Condicionador de Ar Inverter

Nesta unidade, são realizados estudos de casos de pedidos de ressarcimento envolvendo o modelo do condicionador de ar com distúrbios elétricos comuns em uma típica rede de distribuição. Por fim, é comparada a solicitação térmica e dielétrica imposta ao equipamento com os novos limites obtidos.

Capítulo VII Conclusões

Neste capítulo são apresentadas considerações e conclusões dos capítulos precedentes, destacando as questões relevantes mais relevantes identificadas ao longo da realização dos trabalhos. Por fim, são descritas os aspectos relacionados as contribuições deste trabalho e também de futuros desenvolvimentos.

CAPÍTULO II

2 CARACTERÍSTICAS GERAIS DE APARELHOS CONDICIONADORES DE AR

2.1 Considerações iniciais

Tendo em foco nesta pesquisa o estudo das características do condicionador de ar *inverter* com a sua modelagem computacional, será abordado neste capítulo, um breve histórico acerca de sistemas de refrigeração, a elucidação do ciclo da refrigeração, as principais classificações de condicionadores de ar encontradas no mercado e as tecnologias que os compõe.

Sucessivamente, são apresentados alguns dados correlacionados aos perfis de uso global para estes aparelhos com algumas implicações para o sistema elétrico. Com ênfase no modelo “*split*”, tem-se em sequência a descrição dos principais componentes elétricos/mecânicos dos condicionadores de ar, englobando a sua identificação e respectivas funcionalidades. Por fim, abordando a tecnologia *inverter*, são elucidadas suas características e vantagens em relação a versão *split* comum.

2.2 Introdução a aparelhos condicionadores de ar

O condicionamento de ar é o termo dado a sistemas que provém, em ambientes fechados, tratamento e regulação da qualidade do ar. Dentre os principais aspectos de qualidade encontram-se o ajuste de temperatura, umidade, purificação e ventilação. Para atingir estas condições, estes sistemas utilizam de funções de aquecimento, arrefecimento, umidificação, filtragem e circulação do ar[35].

No geral, estes sistemas possuem duas aplicabilidades distintas, a primeira diz respeito ao conforto que eles proporcionam ao fornecer resfriamento/aquecimento e umidificação do ambiente. Para esse tipo de função, eles são fabricados para serem instalados em casas/edifícios residenciais, estabelecimentos comerciais e veículos automotores.

Na segunda finalidade, sistemas condicionadores de ar são peça fundamental para execução de processos através do controle da temperatura local. Dentre os principais exemplos de uso têm-se: aplicações hospitalares, como laboratórios biológicos e salas de cirurgias, viveiros para criações de animais, estufas para plantações, frigoríficos e instalações de processamento de alimentos. Apesar do

ambiente refrigerado em alguns casos também proporcionar conforto conforme os padrões humanos, o que define a necessidade de uso destes equipamentos são as condições necessárias para realização satisfatória dos processos.

Os condicionadores de ar disponíveis atualmente variam enormemente em escala e custo. Eles podem ser desenvolvidos para resfriar um único ambiente e, por essa razão, apresentarem porte pequeno até mesmo em versões portáteis, ou condicionar sistemas de grande escala, como grandes edifícios, complexos de escritórios, shoppings, hotéis, hospitais e conseqüentemente dispõem tamanho considerável. Todos os tipos de configurações são supridos por eletricidade, embora grandes sistemas também possam ser alimentados por gás natural. Estes equipamentos de refrigeração são comumente encontrados em áreas urbanas e seu uso se estende de países industrializados com grande desenvolvimento tecnológico a países de economia emergentes.

A escolha do tipo sistemas de condicionadores de ar é determinada a partir de alguns fatores, incluindo a facilidade e custo da instalação e operação do sistema, o tamanho do espaço necessário a refrigeração, restrições de espaços internos e aplicabilidade de temperaturas mais baixas ou mais altas. A escolha do sistema pode ter um maior impacto no custo e na eficiência energética. O fluido refrigerante, agente químico responsável pelo transporte de calor do ambiente interior a ser resfriado para o exterior, também afeta a eficiência do equipamento[36].

2.3 A história da refrigeração no ponto de vista de condicionamento de ar

A utilização generalizada de refrigeração e ar condicionado possibilitou inúmeros avanços no modo de viver na sociedade. O seu desenvolvimento se estendeu de maneira continua durante o século XX. Nas primeiras décadas do período, devido à ausência de refrigeração, era comum encontrar somente alimentos frescos e que poderiam ser cultivados próximos ao local onde seriam utilizados. Outros tipos de alimento, como carnes e laticínios, deveriam ser adquiridos e consumidos preferencialmente no dia da aquisição tendo como opção resguardar aquele alimento no máximo 2 ou 3 dias corridos.

Com a inexistência de condicionamento de ar, as construções planejadas deviam levar em consideração a refrigeração do ambiente. Na época, prédios e residências eram construídos com tetos mais altos e varandas profundas e sombreadas, suas janelas eram posicionadas de modo a aproveitar ao máximo a ventilação cruzada. Para combater o calor, quase todas estas edificações também contavam com a ajuda de toldos em suas janelas e ventiladores de teto ou mesa em seu interior.

Todo este estilo de viver foi continuamente alterado a partir da invenção precursora e base para o funcionamento dos equipamentos condicionadores de ar atuais. Ela foi constatada em 1902 e feita pelo engenheiro mecânico Willis Carrier que desenvolveu, para a empresa gráfica Lithographing Sackett-Wilhelms & Publishing Company of Brooklyn em Nova York[37], um processo mecânico capaz de condicionar o ar local. A companhia enfrentava problemas com a impressão de imagens coloridas, pois, com as flutuações de calor e umidade, as dimensões do papel se alteravam e desalinham com as tintas utilizadas no processo. Para solucionar a questão, Carrier visualizou que poderia retirar a umidade da fábrica através da refrigeração do ar com a ajuda de um agente refrigerante. Desta forma, projetou uma máquina capaz de promover a circulação deste ar em dutos refrigerados artificialmente resultando no controle da temperatura e umidade daquele ambiente.

Apesar de Carrier ser conhecido como o “pai do ar condicionado”, o termo propriamente dito “ar condicionado” foi registrado em 1906 por Stuart Cramer, ao solicitar, em sua fábrica, um dispositivo que acrescentaria umidade do ar para reduzir a eletricidade estática gerada pelos tecidos. O resultado facilitava o manuseamento destas fibras impulsionando a produção de roupas. Posteriormente o nome foi difundido pelo mercado sendo também adotado por Carrier. A princípio, todos os gases utilizados nestas máquinas eram altamente tóxicos e/ou inflamáveis. Tem-se como exemplo de utilização a amônia e propano, ambos provocariam acidentes fatais caso houvesse algum vazamento.

No início da década de 1910, as indústrias ainda não haviam percebido o potencial das máquinas de refrigeração, tendo a primeira instalação residencial destas máquinas ocorrendo somente em 1914. No mesmo ano, a partir da necessidade de reduzir a mortalidade por desidratação de crianças prematuras, houve também a instalação do primeiro sistema de refrigeração hospitalar que fornecia umidade extra aos berçários. Em 1915 Carrier fundou sua empresa e a nomeou com seu sobrenome.

Os sistemas de condicionamento de ar de favoreciam vários tipos de comércio, que incluíam desde a fabricação de doces e pães até explosivos. A indústria cinematográfica também foi altamente beneficiada pela refrigeração. A frequência de uso dos cinemas caía muito devido ao excesso calor em salas de exibição. Com a instalação de máquinas condicionadoras de ar em uma sala em Detroit no ano de 1919, o seguimento se desenvolveu atraindo público e é atualmente um dos tipos de negócios mais rentáveis do planeta[38].

Devido a instalação continua de novos sistemas de refrigeração, os empresários verificavam que ambiente refrigerado favorecia seus trabalhadores aumentando a sua produtividade. Por esta razão, a busca das indústrias por estes equipamentos cresceu significativamente na década de 1920. Em 1929 a climatização atingia a Câmara dos Deputados e o Senado dos EUA. Nas décadas de 1930 e 1940, os automóveis e aviões já possuem sistemas de refrigeração. Hotéis, pousadas, teatros, bares

e escritórios começavam a serem planejados de forma alternativa, ou seja, era considerado, durante a fase de criação de projetos para essas construções, estruturas físicas necessárias para comportar a instalação de sistemas de refrigeração.

No ano de 1950 Carrier faleceu, mas sua empresa permaneceu no ramo e anunciou, em 1952, unidades condicionadoras de ar centrais para residências. O lançamento foi um sucesso e seu estoque foi esgotado em apenas duas semanas. Em 1957 o modelo foi aprimorado com a inclusão do primeiro compressor rotativo no equipamento reduzindo o tamanho do produto e os ruídos provocados por ele.

Na década de 1960 a venda de condicionadores de ar se estendeu a nível mundial, vários países começavam a investir em desenvolvimentos tecnológicos para estes equipamentos iniciando uma grande disputa internacional. Em 1970 surgiram os, hoje classificados, modelos janelas. Estes aparelhos possuíam serpentinas, ventilador e condensador e o agente refrigerante utilizado no seu funcionamento era o R-12 ou freon-12. No ano de 1977, o ciclo de refrigeração reverso (aquecimento) era lançado.

Durante a década de 1980 os condicionadores de ar tipo janela eram difundidos no mercado. A procura por estes equipamentos aumentava consideravelmente, pois, os novos modelos ocupavam menos espaço nas residências e proporcionavam mais conforto aos usuários. Em 1990, com o uso exponencial destes equipamentos, surgiu uma extrema preocupação com o meio ambiente e a sustentabilidade do planeta. Foi constatado na época que o fluido Freon-12 era extremamente prejudicial para a camada de ozônio sendo proibido sua utilização em vários países.

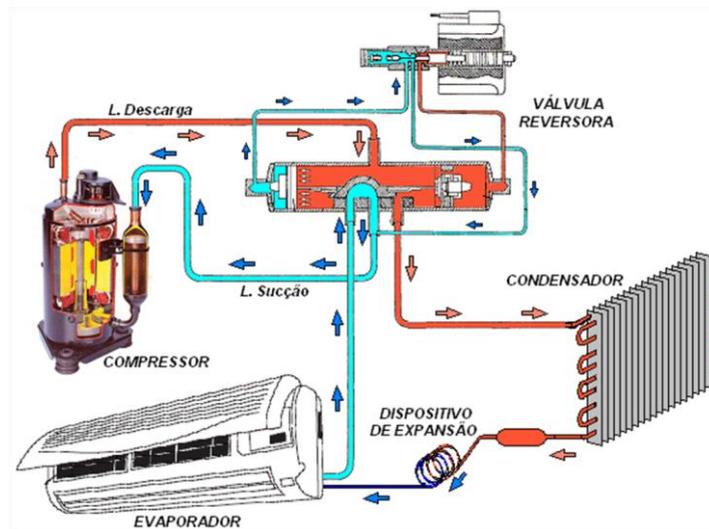
Com a proibição do Freon-12, os fabricantes de condicionadores de ar deveriam considerar durante o desenvolvimento de seus produtos a aspecto ecológico além da eficiência. Por conseguinte, nos anos 2000 surgiu a versão *split* que consiste na separação das unidades evaporadora e condensadora do equipamento, se tornando atualmente o modelo mais utilizado nas residências.

2.4 Princípio de funcionamento de sistemas condicionadores de ar

O processo de resfriamento realizado por condicionadores de ar se assemelha com outros equipamentos de refrigeração como geladeiras e freezers, tendo como diferencial os seus componentes elétricos/mecânicos. Basicamente, a funcionalidade destes é retirar calor de um ambiente fechado para libera-lo em outro. Para conseguir tal feito, o funcionamento da tecnologia integrada nestes equipamentos é baseado na lei física da conversão de fase. Essa afirma que quando um líquido é convertido em um gás, através da evaporação, ele absorve calor do meio em que está localizado. Analogamente, quando o processo inverso ocorre, ou seja, quando o mesmo gás é convertido novamente para seu estado líquido, pelo processo físico de condensação, ele liberará calor para o ambiente.

Os condicionadores de ar exploram a conversão de fase através do uso de componentes químicos, naturais ou artificiais, cientificamente classificados como agentes ou fluidos refrigerantes. Esses são os transportadores do calor presente no ambiente interno para o externo e, simplificada, evaporam e condensam repetitivamente em um ciclo fechado, denominado como o ciclo da refrigeração. Os agentes utilizados atualmente possuem características que os possibilita mudar seu estado físico a temperaturas relativamente baixas. A figuras 2.1 sintetiza o princípio básico de funcionamento destes equipamentos.

Figura 2.1 - Esquema do ciclo de refrigeração específico para condicionadores de ar *split*.



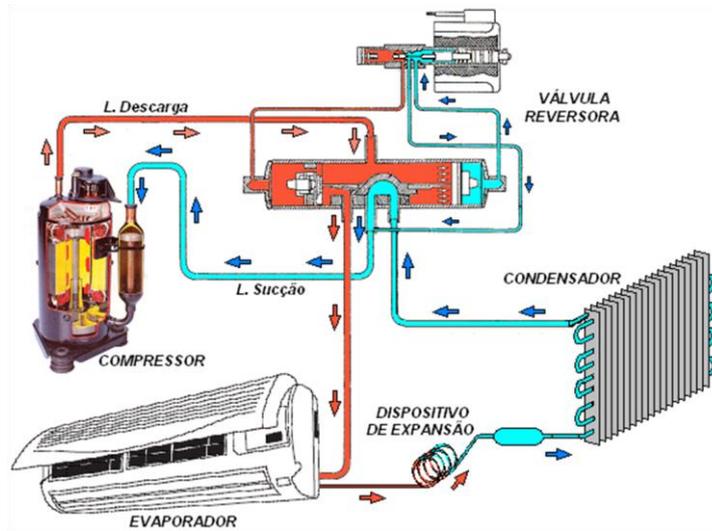
Fonte: [39].

De acordo com a figura 2.1, um ciclo de refrigeração é composto de quatro elementos básicos: o condensador, compressor, evaporador e a válvula de expansão ou tubo capilar. Inicialmente, o compressor recebe o agente refrigerante no estado gasoso com a pressão e a temperatura baixas e o comprime. Como resultado, a temperatura e pressão do gás na saída do compressor aumentam. Ele é então direcionado a unidade condensadora possuindo uma temperatura maior que a do ambiente externo onde ela está efetivamente localizada. Desta forma, para atingir o equilíbrio térmico, o agente cede calor latente ao ambiente com o auxílio de um motor ventilador conectado ao equipamento.

Com a perda de calor para o meio o agente é condensado e atinge o estado físico de líquido saturável. Seguidamente, ele é encaminhado para a válvula de expansão (ou tubo capilar) que altera o seu estado para uma mistura de líquido e vapor, semelhante a gotas de chuva. Na unidade evaporadora a temperatura do agente refrigerante estará menor que a do recinto e, por consequência, ele absorverá o calor latente deste espaço. Por efeito da absorção, o fluido presente na evaporadora aquecerá e vaporizará atingindo novamente o estado de gás. Por fim, ele é direcionado para o compressor onde o ciclo recomeçará.

eficiência energética maior do que aquecedores elétricos ou sistemas alimentados por queima de combustíveis fósseis. A figura 2.3 ilustra o ciclo reverso para um condicionador de ar *split*.

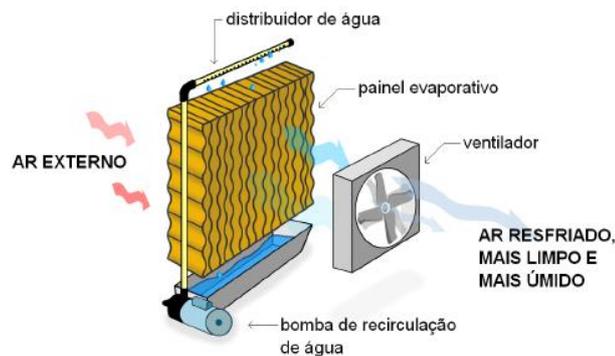
Figura 2.3 - Esquema do ciclo de refrigeração reverso para um condicionador de ar *split*.



Fonte: [41].

Uma forma menos comum, simples e econômica para o condicionamento de ar é a chamada climatização evaporativa. O sistema é composto por um ventilador, painel evaporativo, bomba de água e um cano distribuidor de água. Sua composição é ilustrada na figura 2.4. O ventilador atua atraindo o ar externo para o interior do painel evaporativo onde a água circula continuamente em função da atuação da bomba. Dentro do painel, ocorrem as trocas de calor entre o ar quente e a água. A água recebendo calor, evapora e fornece maior umidade ao ar resfriado. Posteriormente, a água é repostada pela bomba e tem o seu nível constante favorecendo as trocas de calor durante todo o processo[42], [43].

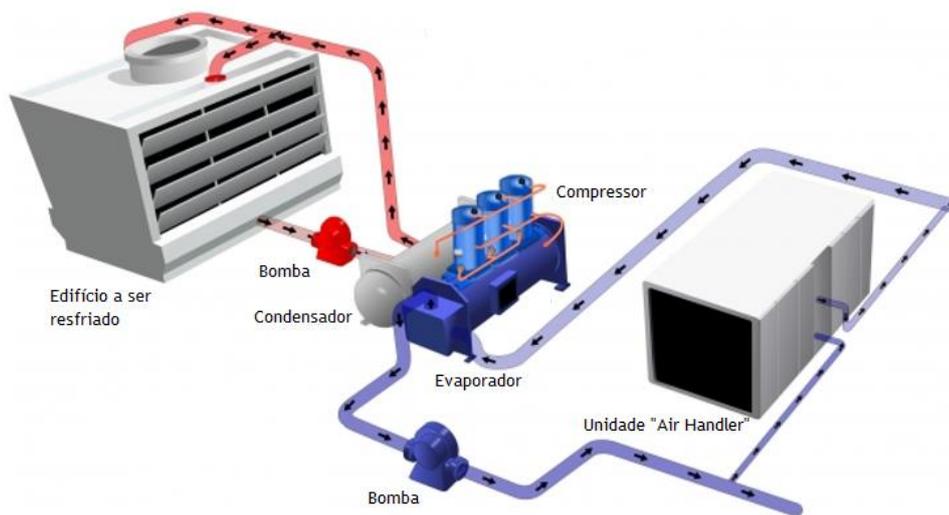
Figura 2.4 - Condicionamento de ar pela climatização evaporativa.



Fonte:[43].

Outro tipo de condicionamento tipicamente usado no setor comercial, é conhecido como “*thermally driven*” ou chiller. Os chillers são largos condicionadores de ar que produzem água gelada e a transporta para uma estrutura chamada de “Air Handlers”. Essa, por sua vez, constitui de uma caixa larga de metal contendo ventiladores, ou elementos para aquecimento ou resfriamento. Ela é a responsável por regular a temperatura e circulação do ar e o distribuem por um edifício ou complexo por meio de tubulações. Os compressores destes equipamentos costumam variar entre os tipos alternativos, parafusados ou centrífugos. O ciclo de trabalho de um equipamento chiller é mostrado na figura 2.5. Eles funcionam geralmente por eletricidade, embora possam também ser alimentados por gás natural ou outras fontes de calor, como o calor excessivo industrial ou energia solar térmica.

Figura 2.5 - Esquema simplificado do funcionamento de um sistema de refrigeração chiller.



Fonte:[44].

2.5 Classificação dos aparelhos ou sistemas condicionadores de ar

Na prática, os condicionadores de ar convencionais estão disponíveis em duas diferentes configurações: eles podem ter a parte evaporadora e condensadora integradas em um mesmo local/caixa, conhecidos como compactos ou em inglês “*packaged*”, ou ter a parte evaporadora e condensadora divididas entre ambientes interno e externo, comumente chamados de “*split*”. Outros tipos de diferenciação destes equipamentos decorrem da existência de dutos de refrigeração; portabilidade ou não destes equipamentos e/ou variações de tamanho. Salienta-se que as classificações aqui apresentadas foram definidas pelo livro “*The Future of Cooling*” elaborado pela Agência Internacional de Energia (IEA) em 2018 e disponível online e gratuitamente em [18].

2.5.1 Condicionadores de ar tipo compactos ou *packaged*

Os condicionadores de ar tipo compactos, em inglês “*packaged*”, podem ser projetados para resfriar um ou vários ambientes. Eles são conhecidos também como sistemas unitários, pois, possuem a parte condensadora e evaporadora integradas em uma única caixa ou ambiente. O primeiro exemplo para equipamentos deste tipo são os modelos chamados janelas. Conforme ilustra a figura 2.6, onde é comparado o tamanho de um condicionador de ar deste tipo com uma moldura de janela padrão ideais para residências. Esse tipo de configuração é antiga e tende a entrar em desuso nas próximas décadas.

Figura 2.6 - Condicionador de ar compacto tipo janela.



Fonte: [18].

A figura 2.7 corresponde a sistemas compactos portáteis. Eles são desenvolvidos para serem transportados facilmente entre salas e escritórios. Em sua composição há uma mangueira conectada a ele responsável em evacuar o ar quente do interior do recinto para um ambiente externo onde se encontra sua outra extremidade.

Figura 2.7 - Condicionador de ar compacto tipo portátil.



Fonte: [18].

Os sistemas compactos de telhado/terraço, ilustrados na figura 2.8, são resfriadores de maior porte designados para sistemas maiores, como, por exemplo, hotéis em grandes edifícios ou

complexos comerciais. Eles fornecem ar condicionado para o todo a construção onde estão inseridos e o transporte é feito pelo uso de dutos de ar.

Figura 2.8- Condicionador de ar compacto tipo terraço.



Fonte: [18].

2.5.2 Condicionadores de ar tipo divididos ou *split*

Os condicionadores de tipos divididos, ou em inglês *split*, variam de pequenas unidades a grandes sistemas que podem também resfriar um complexo de localidades. São os equipamentos mais presentes nas residências e pequenas lojas comerciais atualmente. Em todos os casos, o condensador está fixado em um ambiente externo a sala onde a unidade interna está inserida. As duas partes estão separadas por tubulações onde transita o agente refrigerante.

Os sistemas *mini-split*, ilustrados na figura 2.9, não tem dutos em sua composição e proporcionam a refrigeração através da canalização do agente refrigerante entre uma unidade de condensação externa ao ambiente e uma unidade de evaporação interna fixada em uma parede ou teto. Sistemas sem dutos tem a vantagem sobre os sistemas com duto, incluindo menores perdas de distribuição, aumento da eficiência energética e do controle de temperatura da sala.

Figura 2.9 - Condicionador de ar mini-split.

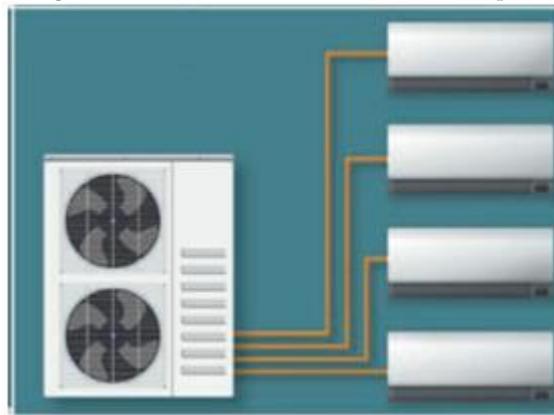


Fonte: [18].

Os sistemas *multi-split*, conforme figura 2.10, apresentam com funcionamento semelhante aos *mini-splits*. Porém, são capazes de permitir que várias salas sejam resfriadas a partir de uma única

unidade condensadora e várias unidades evaporadoras. A principal vantagem deste sistema é o número reduzido de unidades externas, mantendo a flexibilidade de refrigeração de salas individuais. O controle do fluxo do agente refrigerante é um ponto a ser considerado, pois, o fluido deve variar de acordo com as necessidades de cada sala a ser resfriada. Por essa razão, eles costumam ter em sua constituição um sistema de controle dedicado a atuar em suas operações.

Figura 2.10 - Condicionadores de ar *multi-split*.



Fonte: [18].

Os sistemas *split* centrais fornecem arrefecimento através do ar canalizado, onde o evaporador é colocado em um único local central, fornecendo refrigeração para toda uma área residencial/comercial através de um sistema de dutos. A temperatura de cada localidade pode ser controlada separadamente. A figura 2.11 exibe este tipo de configuração.

Figura 2.11 - Condicionadores de ar tipo *splits* centrais.



Fonte: [18].

2.5.3 Condicionadores de ar tipo chiller

Os chillers são classificados conforme o mecanismo utilizado resfriamento da água e, por essa razão, são divididos em dois principais tipos, a saber: os resfriados a água ou os resfriados a ar.

Um chiller refrigerado a água, conforme ilustra a figura 2.12, usa um condensador para rejeitar o calor da água, que é bombeada para uma torre de resfriamento e circula por aletas para expelir o calor para a atmosfera (normalmente através da evaporação). Em certos casos, as torres de resfriamento podem ser substituídas por trocadores de calor, o que pode reduzir a quantidade de água a ser evaporada. Eles são normalmente instalados em ambientes internos e por essa razão tem uma durabilidade maior.

Figura 2.12- Chiller resfriado a água



Fonte: [18].

Os chillers resfriados a ar, ilustrados na figura 2.13, utilizam de ventiladores de hélice ou ciclos convencionais de refrigeração para rejeitar o calor diretamente do ar externo resfriando assim as bobinas trocadores de calor e condensar o fluido refrigerante.

Figura 2.13- Chiller resfriado a ar.



Fonte: [18].

Embora chillers resfriados a água sejam mais eficientes e apresentem maior durabilidade, os resfriados a ar são utilizados com mais frequência. Isso decorre da maior necessidade de bombas e manutenção para o primeiro tipo de configuração, pois, deve haver tratamento da água do condensador e nas torres de resfriamento constantemente.

2.6 Crescimento e tendências dos condicionadores de ar

Com acesso a condicionadores de ar mais baratos e o aumento dos dias mais quentes, nos últimos anos a um crescimento considerado desde produto. Diante disso, uma pesquisa recente, realizada pela IEA nos EUA[18], que detalha o panorama regional e mundial a respeito das instalações e vendas de condicionadores de ar no ano de 2016, de acordo com a tabela 2.1. Em termos de unidades vendidas, no período, a venda destes equipamentos quase quadruplicou para 135 milhões de unidades. Contabilizando o número de produtos previamente instalados, foi estimado que, no final de 2016, já havia mundialmente 11675 GW de capacidade de refrigeração, aproximadamente três vezes o valor de 4000GW registrado em 1990. Ressalta-se também a tendência destes aparelhos aparecerem cada vez mais em residências. Na China, Japão, União Europeia e até mesmo no Brasil, as unidades vendidas com destino residencial ultrapassam 60% do total.

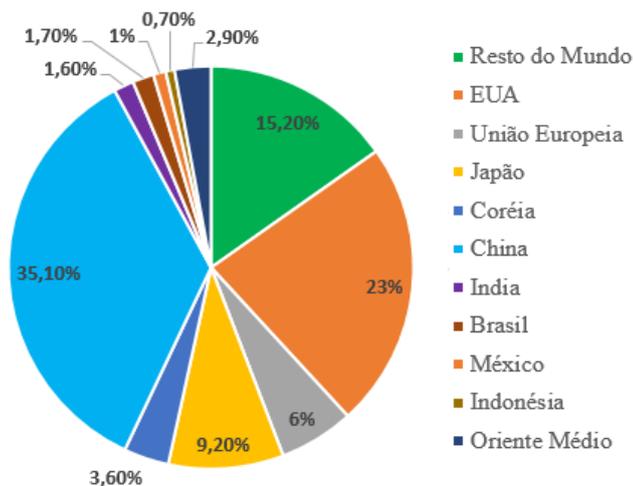
Tabela 2.1 – Quantitativo de unidades instaladas de condicionadores de ar ao final do ano de 2016.

	Unidades Instaladas					
	Milhões de Unidades			Capacidade Térmica (GW)		
	Res	Com	Total	Res	Com	Total
EUA	241	132	374	2295	2430	4726
EU	43	53	97	192	654	847
Japão	116	33	148	407	352	759
Coreia	30	29	59	129	220	348
México	7	9	16	40	65	105
China	432	138	569	2092	807	2899
Índia	14	13	27	77	72	149
Indonésia	7	5	12	32	27	59
Brasil	14	14	27	59	68	127
África do Sul	1	1	3	6	15	22
Oriente Médio	30	18	47	147	153	299
Global	1093	529	1622	6181	5491	11673

Fonte: [18].

Das 1,6 bilhões de unidades utilizadas no mundo ao final do ano de 2016, 570 milhões de unidades estão instaladas apenas na China e 375 milhões nos EUA. No Brasil existem cerca de 27 milhões de unidades equivalendo a aproximadamente 1,7% da quantidade global avaliada. Na figura 2.14 [18] tem-se com detalhes estas informações.

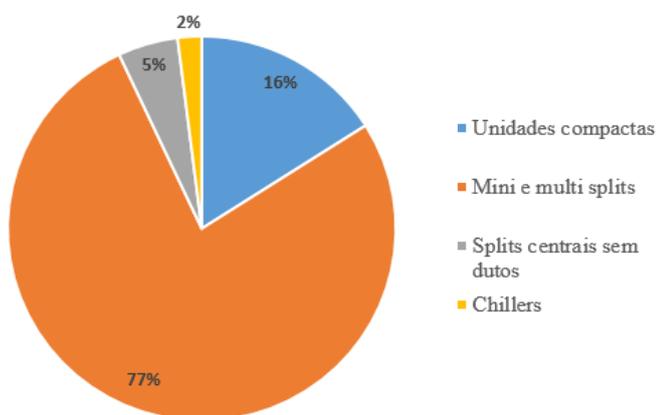
Figura 2.14 - Divisão do uso de condicionadores de ar em escala global até o final de 2016.



Fonte: Adaptado [18].

A figura 2.15 contabiliza as diferentes classificações de condicionadores de ar utilizados globalmente[18]. Cerca de 77% dos aparelhos constatados são do modelo mini e multi-*split*. As versões centrais e compactas ocupam respectivamente 5% e 16% da quantia. Esses dois últimos modelos vêm sendo constantemente substituídos por versões *splits* por oferecerem maior praticidade e economia durante a instalação e funcionamento. Os chillers, em sua maioria, são destinados a aplicações comerciais e/ou residências de grande porte. Estima-se um uso de aproximadamente 47 milhões de unidades globalmente, sendo aproximadamente 35 milhões alimentados por energia elétrica.

Figura 2.15 - Quantificação dos tipos de condicionadores de ar utilizados globalmente até o final de 2016.

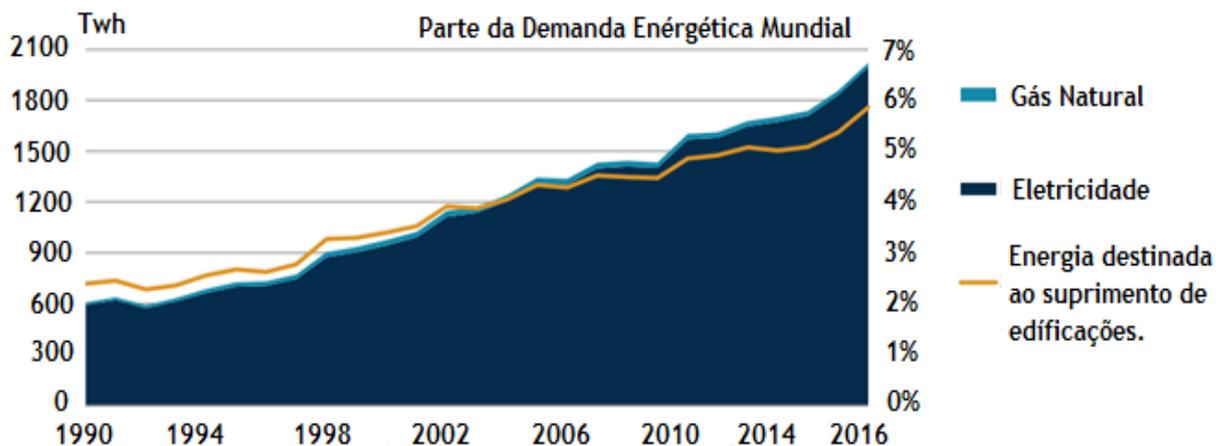


Fonte: Adaptado de [18].

Conforme indica a figura 2.16, a demanda de energia elétrica destinada a suprir eletricamente condicionadores de ar e ventiladores elétricos cresce de maneira expressiva e alarmante. Globalmente, o consumo de energia destinado a estes equipamentos triplicou, entre os anos de 1990

e 2016, atingindo um patamar de gasto de 2020 TWh equivalente a aproximadamente 10% do total da energia mundialmente utilizada em todos os setores[18].

Figura 2.16 - Demanda energética destinada a suprir o uso de equipamentos de refrigeração em 2016.



Fonte: Adaptado de [18].

Segundo dados apresentados pela EPE, através da nota técnica “Uso de Ar Condicionado no Setor Residencial Brasileiro: Perspectivas e Contribuições para o avanço em eficiência energética[17], há uma estimativa de crescimento anual de 5,4% de condicionadores de ar em residências e esse crescimento pode refletir em um consumo de energia elétrica de 48 TWh em 26 anos. O crescimento da conexão de cargas como condicionadores de ar e ventiladores elétricos tem impacto notável ao solicitar uma maior demanda energética da rede e agravar os horários de pico de carga.

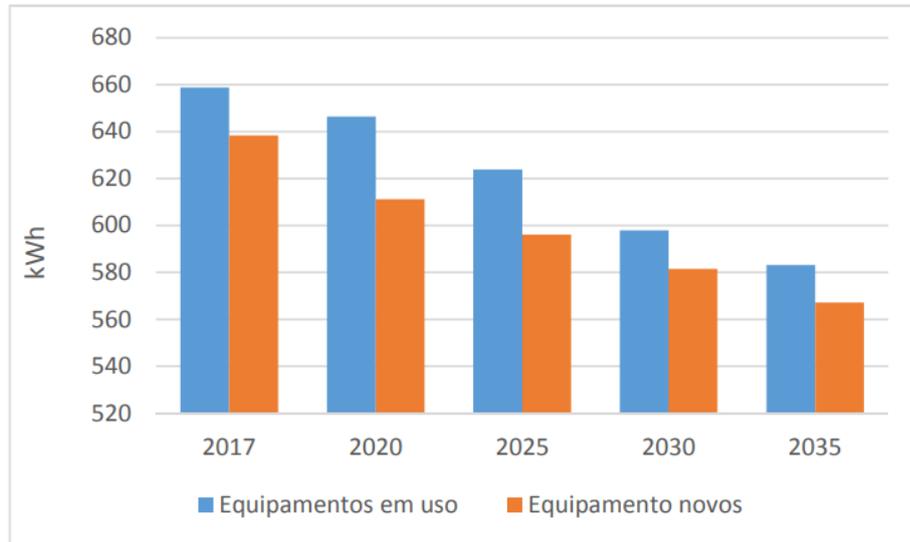
Para maioria dos sistemas elétricos, o pico diário ocorre no início da manhã e ao final da tarde. O resfriamento pode ser responsável por colocar maior pressão na energia do sistema nestes horários, principalmente em períodos de extremo calor. Os operadores de sistemas de energia devem atender ao pico de carga esperado gerando ou remanejando energia elétrica. Se a demanda de pico exceder a oferta máxima que o sistema pode fornecer, quedas de energia não planejadas podem ocorrer nas localidades.

Desse modo, para contornar a situação e reduzir o horizonte de consumo estimado, podem vir a ser implementados índices mínimos de eficiência mais rigorosos. Para atender esses índices e promover uma melhor eficiência, os equipamentos eletrodomésticos atuais de consumo e com elementos eletromotrizes vêm sendo substituídos por modelos *Inverter*, de velocidade variável e menor consumo de energia. A tendência de consumo destas cargas em uma perspectiva futura é de apresentarem uma redução significativa no consumo de energia elétrica.

Para ilustrar a questão, a figura 2.17 mostra projeções de consumos para aparelhos condicionadores de ar que atualmente vem sendo modificados, através da inclusão da tecnologia

inverter, para apresentarem uma melhor eficiência energética e conseqüentemente menor consumo. Constata-se que a projeção para 2035 é que estes aparelhos tenham um aumento gradativo e significativo na sua eficiência.

Figura 2.17 – Consumo médio de eletricidade de ar-condicionado do setor residencial.



Fonte: [17].

2.7 Componentes de um sistema de refrigeração

No que tange os principais elementos pertencentes a um ciclo de refrigeração de um equipamento condicionador de ar e com enfoque nos modelos residenciais *splits*, objetivo de estudo deste trabalho, têm-se a seguir a descrição dos principais componentes mecânicos e elétricos presentes nestes equipamentos [36], [43], [45].

2.7.1 Componentes mecânicos

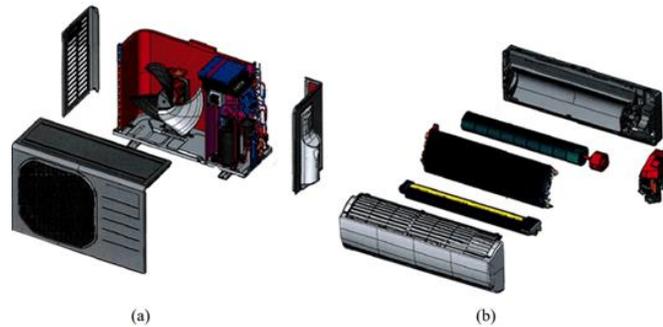
Por meio do ciclo de refrigeração, sabe-se que um condicionador de ar é formado por quatro partes mecânicas básicas a saber: evaporador, condensador, compressor e dispositivos de expansão. Em alguns casos, eles também possuem compondo seu interior um filtro secador. A seguir serão detalhados cada um destes componentes com suas principais características e funções.

2.7.1.1 Evaporadores e condensadores

Tanto os evaporadores quanto os condensadores são caracterizadas como trocadoras de calor com a função principal de alterar o estado físico do gás refrigerante. Ambos possuem integrado em suas configurações, motores ventiladores com a finalidade de contribuir com a troca de calor entre os meios. Para o condicionador de ar, suas serpentinas são geralmente constituídas de cobre, enquanto

que no caso dos refrigeradores o material muda para o alumínio. Na figura 2.18 encontra-se um esquemático das duas unidades apresentando os seus principais componentes.

Figura 2.18- a) evaporadora desconstruída de um condicionador de ar *split*. - b) condensadora desconstruída da condensadora de um condicionador de ar *split*.

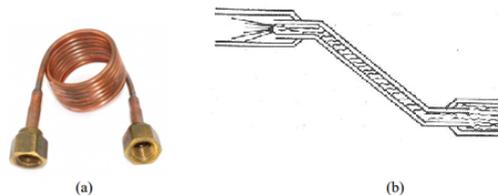


Fonte:[4].

2.7.1.2 Dispositivos de expansão

Os dispositivos de expansão são os responsáveis pela perda de carga térmica controlada do agente refrigerante entre a linha de alta e baixa pressão do sistema. Um dispositivo de expansão muito utilizado em aplicações mais leves como geladeiras, condicionadores de ar e freezers, é o tubo capilar, mostrado na figura 2.19.

Figura 2.19- a) Tubo capilar empregado em condicionadores de ar – b) Vista interna de um tubo capilar.

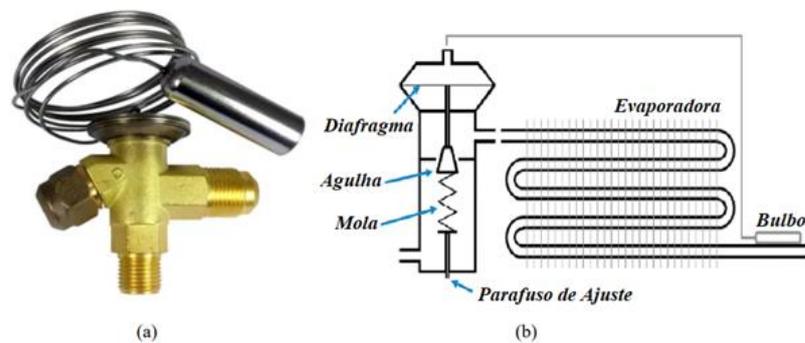


Fonte:[46].

Sua composição consiste somente em um tubo comprido, normalmente feito de cobre, com o diâmetro muito estreito. Ao passar por ele, o agente refrigerante encontra uma certa resistência, em consequência da restrição de diâmetro do tubo, e perde pressão ao longo do percurso. No final, o fluido entrará na unidade evaporadora com o fluxo regulado apresentando baixa pressão. O aumento do comprimento do tubo e redução excessiva do diâmetro ocasionam uma maior queda de pressão do agente refrigerante restringindo a entrada dele no evaporador. As principais consequências da falta de regulação desse agente é a possibilidade de danos ao compressor do equipamento.

Outro dispositivo de expansão utilizado em larga escala é a válvula de expansão termostática e sua aparência é mostrada na figura 2.20. Seus principais elementos são o bulbo, a mola, agulha e o diafragma.

Figura 2.20 - a) Vista externa da válvula de expansão termostática - b) Esquemático do funcionamento interno de uma válvula de expansão termostática.



Fonte:[47]

O agente refrigerante entra resfriado a alta pressão pelo lado inferior esquerdo e ao passar pela agulha sofre expansão atingindo o estado de líquido saturável em baixa pressão. O bulbo tem o contato direto com o tubo de descarga do evaporador e deve ser coberto com isolante térmico para capturar as diferenças de temperatura em sua saída. A função dele é regular a pressão necessária para que o agente refrigerante chegue no compressor na temperatura estipulada no projeto.

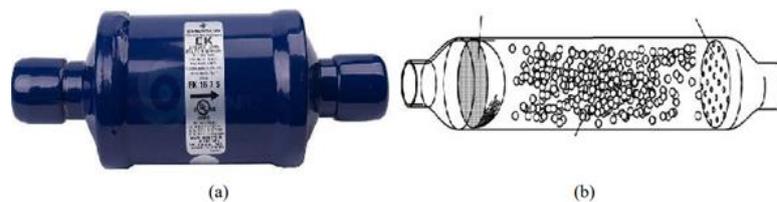
Dependendo do calor absorvido pelo fluido ao longo do caminho percorrido pela unidade evaporadora, ele vaporizará mais rápido ou mais lento apresentando respectivamente, na entrada do compressor, superaquecimento ou sub-resfriamento. Esse controle é necessário, pois, a entrada do agente refrigerante em compressores com características diferentes das oferecidas em catálogos podem causar danos irreversíveis aos mesmos.

O bulbo então, com a mesma temperatura do fluido, envia a mensagem, através de um sensor de temperatura, para a válvula de expansão. No caso de o agente refrigerante apresentar superaquecimento, a válvula ajusta o diafragma, a parte móvel do dispositivo, empurrando-a para baixo e aumentando a diferença de pressão necessária para reajustar o fluxo deste agente na entrada do compressor. No caso de sub-resfriamento o diafragma praticamente fecha a válvula termostática e mantém o caminho livre.

2.7.1.3 Filtro Secador

O filtro secador, representado na figura 2.21, tem a função de reter partículas sólidas (como partículas de sujeira) que se desprendem do condicionador de ar durante seu funcionamento e podem obstruir e causar danos permanentes ao compressor. Também é o responsável por absorver a umidade residual do sistema não removida pelo vácuo, evitando obstruções por congelamento, formação de ácidos e corrosões no interior do equipamento.

Figura 2.21 - a) Vista externa de um filtro secador. - b) Vista interna de um filtro secador.



Fonte:[46].

Os filtros secadores são constituídos de cobre ou ferro, têm em seu interior duas telas com espessuras distintas e partículas dessecantes entre elas para absorver a umidade. Essas partículas devem ser selecionadas conforme finalidade da aplicação, consideração do agente refrigerante, faixa de pressões de atuação e fluxo de massa dos fluidos.

2.7.1.4 Compressores

Os compressores são caracterizados por serem um dos principais elementos constituintes de sistemas de condicionador de ar e que demandam grande potência da rede elétrica. Eles são os responsáveis pela criação de fluxo, sucção e condução, do agente refrigerante no equipamento e elevam a sua pressão e temperatura ao longo da passagem pela unidade evaporadora para a condensadora. Eles são diferenciados primordialmente pelo seu princípio de funcionamento tecnicamente denominado como tipo de compressão. Uma classificação complementar e importante, principalmente para o ramo industrial, envolve o tipo de fechamento da estrutura do equipamento.

- **Estrutura dos compressores**

Em relação ao fechamento da estrutura, os compressores são classificados como herméticos, semi-herméticos e abertos. Na configuração hermética, o motor elétrico está instalado junto ao compressor em uma câmara com o interior inacessível não havendo, portanto, possibilidade de manutenção do equipamento. A principal vantagem desta configuração é a baixa incidência de vazamentos do fluido refrigerante durante o seu funcionamento. Caso ocorra alguma falha no mesmo, ele deverá ser trocado por uma peça inteiramente nova.

Suas aplicações estão direcionadas para situações que requerem pequena carga térmica e, por essa razão, são frequentemente encontrados instalados em equipamentos como geladeiras, pequenos condicionadores de ar residenciais/comerciais ou câmaras frigoríficas de menor porte. Este tipo de compressor atua normalmente com dois pistões com a potência não ultrapassando 6HP. A título de ilustração, na figura 2.22, têm-se exemplos de compressores hermeticamente fechados.

Figura 2.22- a) Ilustração de um compressor hermético utilizado em geladeiras. - b) Compressor hermético comumente utilizado em condicionadores de ar.



Fonte:[48].

Os compressores semi-herméticos, conforme na figura 2.23, têm a construção semelhante aos compressores herméticos, mas, neste caso, há a possibilidade de acesso ao interior da câmara para realizações de manutenções e vistorias. São máquinas de maior porte direcionadas a situações um pouco mais severas onde é exigido uma maior carga térmica. As aplicações abrangem sistemas comerciais e industriais como supermercados e shoppings centers.

Figura 2.23- Vista frontal fechada e aberta de um compressor semi-herméticos.



Fonte:[48].

Já os compressores abertos, figura 2.24, não possuem o motor elétrico acionando diretamente o compressor e a transmissão da energia mecânica ocorrem por eixo, correia ou polia. Neste tipo de configuração é comum a amônia atuando como o agente refrigerante do sistema. Este agente químico reagindo com o cobre, abundantemente presente na construção do motor elétrico, implicada na obrigatoriedade de não haver contato entre as partes.

A grande desvantagem deste tipo de compressor são os maiores riscos de ocorrerem vazamentos necessitando consequentemente de maiores manutenções. São mais presentes na refrigeração industrial devido a facilidade de reparo e maior capacidade de refrigeração.

Figura 2.24- Exemplo de compressor aberto.



Fonte:[48].

2.7.1.5 Sistemas de compressão

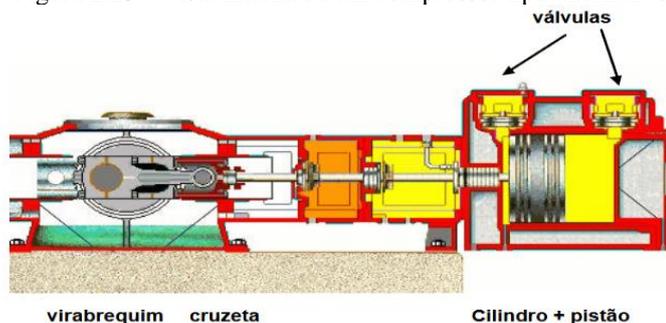
A respeito das diferenciações quanto ao princípio de funcionamento, os compressores são classificados conforme atuação de suas partes mecânicas. Neste aspecto os tipos conhecidos compreendem os: rotativos, scroll, alternativos, parafuso e centrífugos[45].

- **Compressores alternativos**

Os compressores alternativos, também conhecidos como recíprocos possuem um sistema biela manivela que aciona os pistões de compressão realizando os processos de admissão e compressão do agente refrigerante. A composição interna deste tipo de configuração e exibida na figura 2.25.

Ao entrar na máquina pela válvula a esquerda, o gás refrigerante é succionado para o cilindro e comprimido pela atuação do pistão em um movimento linear desenvolvido pelo virabrequim e cruzeta. No instante que a pressão vence a resistência do sistema de descarga, o gás é então direcionado, por meio da atuação da válvula de saída, para a unidade condensadora. Os compressores alternativos são atualmente integrados em sistemas de refrigeração *splits* até 30000 btus e encontrados, em sua maioria, na configuração semi-hermética. Entretanto, a tendência destas máquinas é serem substituídas por compressores tipo rotativos em virtude da praticidade de instalação e economia oferecida por eles.

Figura 2.25 - Vista interna de um compressor tipo alternativo

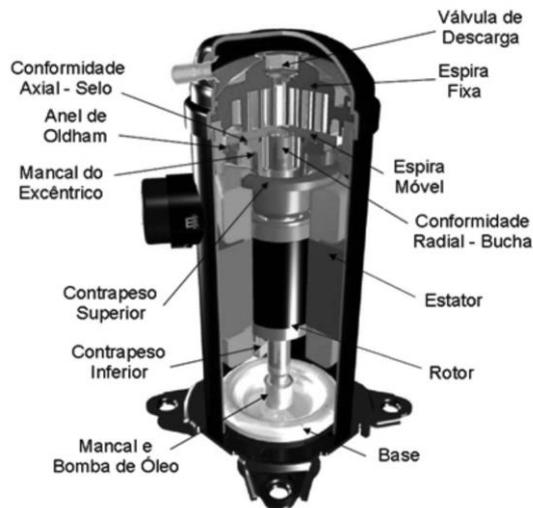


Fonte:[49] .

- **Compressores scroll**

A tecnologia scroll proporciona aos compressores uma operação silenciosa, contínua e eficiente. Eles são constituídos de dois rotores de formatos espirais, com uma parte permanecendo fixa e outra móvel. Tem-se na figura 2.26 ilustrado o interior deste modelo.

Figura 2.26 - Vista interna de um compressor tipo scroll.



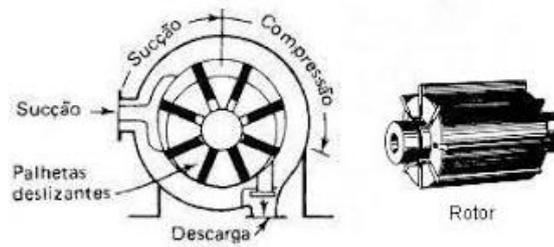
Fonte: [50].

No seu funcionamento, a rotação do espiral móvel induz a movimentação do fluido refrigerante para centro da espira e, ao longo do percurso para o centro, o volume deste é progressivamente reduzido. Posteriormente, no tubo de descarga, ele entra na unidade condensadora com pressão elevada. Geralmente eles possuem acabamento hermético, mas também podem ser encontrados em versões semi-herméticos.

- **Compressores rotativos**

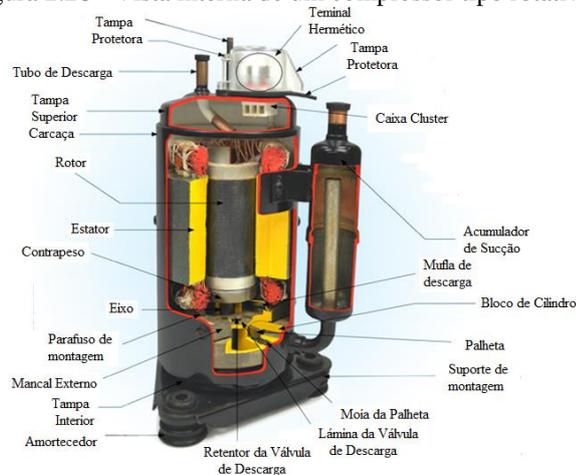
O processo de compressão e a estrutura interna de um compressor rotativo é mostrada na figura 2.27 e figura 2.28. O fluido refrigerante é sugado pelo acionamento de palhetas deslizantes apresentando uma disposição simples ou dupla e que foram câmaras de compressão. O agente, ao passar por estas câmaras é comprimido saindo pelo tudo de descarga. Este tipo de compressor é muito utilizado em equipamentos condicionadores de ar tipo janela e também em bombas de vácuo.

Figura 2.27 – Princípio de compressão para um compressor rotativo



Fonte: [51].

Figura 2.28 - Vista interna de um compressor tipo rotativo



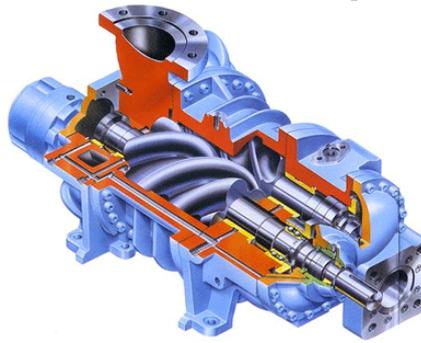
Fonte: [51].

- **Compressores parafuso**

Os compressores do tipo parafuso possuem dois rotores com formato de parafuso sem pontas sendo um macho e um fêmea. Esses rotores são dimensionados de forma que um encaixe perfeitamente no outro. Quando o fluido entra na máquina, ele será conduzido pelas roscas ao longo do eixo rotor. Ao atingir o final do percurso pelos parafusos, imediatamente antes de entrar na unidade condensadora, o agente refrigerante terá sua pressão aumentada.

São equipamentos de grande capacidade, podendo ser dimensionados com uma potência de até 160HP. Por apresentarem grande porte, esta configuração de compressor é capaz de simplificar projetos de sistemas de refrigeração, reduzindo, conseqüentemente, a necessidade de dutos, cabos, unidades compressoras adicionais e arranjos de circuitos elétricos. Outros tipos de vantagem incluem baixo ruído, menor vibração e alta eficiência volumétrica. A vista interna do compressor é representada na figura 2.29.

Figura 2.29 - Vista interna frontal de um compressor tipo parafuso

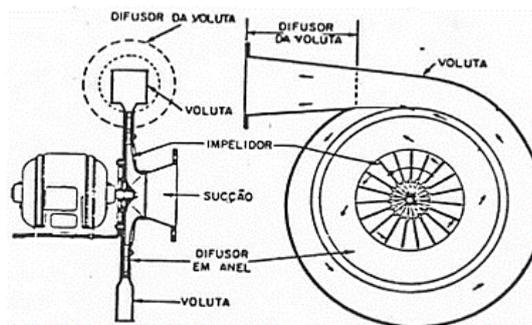


Fonte:[52].

- **Compressores centrífugos**

Os compressores centrífugos, também nomeados como compressores radiais, são máquinas pneumáticas com grande presença no setor industrial. Estas máquinas possuem um impulsor com pás de rotação e podem alcançar velocidades de 3000 a 20000 rpm. A figura 2.30 ilustra a composição externa e interna deste modelo. São máquinas de maior porte sendo direcionadas a situações mais severas que exigem maior capacidade de refrigeração.

Figura 2.30 – Princípio de funcionamento de um compressor tipo centrífugo.



Fonte: [53].

O agente refrigerante no estado de vapor é aspirado para o centro do impulsor do equipamento. Esse por sua vez, ao girar em alta velocidade, induz o fluido a se deslocar radialmente para a parte externa deste rotor estabelecendo um fluxo contínuo deste gás. Como resultado, ele, em alta velocidade, desacelera e expande tendo sua pressão aumentada e volume reduzido. Posteriormente, o mesmo gás pode ser enviado a condensadora ou succionado para um segundo propulsor que atuara semelhante ao primeiro, aumentando ainda mais a pressão do agente refrigerante. Em aplicações industriais este tipo de compressor pode ter até 4 estágios de compressão.

2.7.2 Componentes elétricos

Com foco nos sistemas de refrigeração de menor porte, esse item apresenta a descrição dos principais componentes elétricos que compõe estes equipamentos. Portanto, os principais componentes destacados são: termostato, protetor térmico, capacitores, bobina da válvula reversora (para sistemas com ciclo reverso), relés, PTC e reator para controle de fator de potência.

- **Termostato**

O termostato, exibido figura 2.31, é o responsável por regular a temperatura ambiente em um sistema de condicionamento de ar. Constituído de um bulbo, um capilar e contatos elétricos, ele controla a atuação do compressor fundamentado no princípio de dilatação de corpos. As moléculas do gás contido no interior do seu capilar contraem ou dilatam em função da temperatura do recinto. As alterações nas dimensões deste gás são transmitidas a uma peça móvel responsável por fechar ou abrir os contatos do compressor.

Figura 2.31- Termostato utilizado em condicionadores de ar.



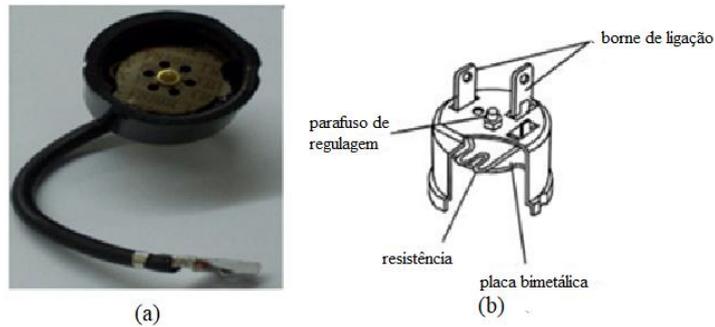
Fonte:[46].

Em modelos que possuem o ciclo reverso, existe também denominado termostato descongelante. Ele é necessário para inversão do ciclo de refrigeração e atua conforme for constatado um congelamento na unidade condensadora.

- **Protetor Térmico**

O protetor térmico é utilizado para proteção contra sobrecorrentes no equipamento e é ligado em série com a placa eletrônica de que alimenta o compressor. O seu funcionamento também é baseado no princípio da dilatação térmica. Na sua composição existem dois metais com propriedades de dilatação distintas. Quando o equipamento é submetido a altas temperaturas, em função da elevação de corrente, um dos metais da placa bimetálica dilata e, por consequência, abre o circuito.

Figura 2.32- a) Vista externa de um protetor térmico. – b) Componentes internos de um protetor térmico.



Fonte:[46].

- **Capacitores**

Em sistemas de refrigeração são usados normalmente dois tipos de capacitores. Os capacitores eletrolíticos ou de partida são responsáveis por armazenar energia elétrica para favorecer a partida do compressor. Eles são essenciais para aplicações que necessitam de um motor com alto torque de partida. Os capacitores de marcha, também chamados de fase ou permanentes, melhoram o fator de potência do condicionador de ar e as características de torque do compressor.

Figura 2.33 - Capacitor empregado em condicionadores de ar.



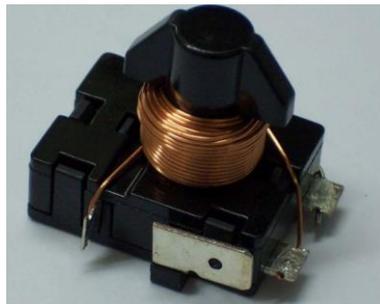
Fonte:[46].

- **Relé**

O relé é classificado como uma chave automática responsável por alternar entre o circuito auxiliar, necessário para a partida do compressor e o circuito principal da unidade condensadora. O momento de troca ocorre no instante que a velocidade de rotação desta máquina, pré-determinada conforme a temperatura de refrigeração desejada, é atingida.

A bobina do relé é conectada em série entre uma das fases do compressor e o seu terminal comum. Quando houver a existência do capacitor eletrolítico de partida, ele também é conectado ao enrolamento auxiliar. A tensão desta bobina aumenta conforme o compressor ganha velocidade de rotação. Na velocidade nominal estipulada, a tensão, no seu valor nominal, induzirá um campo magnético e este, por sua vez, desligará os contatos do enrolamento se desconectando do circuito.

Figura 2.34 - Relé utilizado em condicionadores de ar.



Fonte:[46].

- **PTC**

O PTC desempenha a mesma função abordada no relé de partida do compressor. A diferença entre ambos está na composição física dos componentes. Enquanto o relé necessita de componentes eletromecânicos para seu funcionamento, o PTC não. Ele é formado apenas de uma pastilha moldada de um material semiconductor. O material presente na pastilha permite a passagem de corrente quando submetida a temperatura ambiente. Dessa forma, quando a corrente da unidade condensadora é elevada, em função da partida do compressor, este material sofrerá um rápido acréscimo de resistência ôhmica e dificultará a passagem da mesma.

Para o circuito conduzir novamente, o compressor deverá estar desligado tempo suficiente para que a temperatura do PTC abaixe. Com o PTC instalado é possível a adição de um capacitor em série para aumentar a eficiência do motor. O componente também garante uma confiabilidade maior em comparação com o relé eletromecânico.

Figura 2.35- PTC empregado em condicionadores de ar.



Fonte:[54].

- **Bobina da Válvula Reversora**

A bobina solenoide é aplicável somente em versões de condicionadores de ar que possuem o ciclo reverso. Sua principal função é *inverter* o fluxo do agente refrigerante, trocando a função da unidade evaporadora para a condensadora e vice-versa.

Figura 2.36 - Bobina da válvula reversora empregado em condicionadores de ar com o cliço reverso.



Fonte:[46].

- **Motores Elétricos do Ventilador e Compressor**

Tanto o motor ventilador da unidade interna quanto da externa são responsáveis por favorecer a troca de calor entre os meios. São motores de baixa potência em comparação ao motor elétrico do compressor. Esse, por sua vez, é o responsável pela transformação da energia elétrica fornecida pela rede na energia mecânica necessária para rotação do compressor. Geralmente os motores integrados ao compressor são os conhecidos tipo indução com rotor em gaiola de esquilo, mas também existem os modelos de corrente contínua sem escovas ou *brushless DC* (BLDC).

- **Reator**

As versões mais recentes de condicionadores de ar, principalmente os modelos com a tecnologia *inverter*, possuem um controle sofisticado para regulação do fator de potência do equipamento denominado como *Power Factor Control – PFC* ou circuitos pré-reguladores do fator de potência. Integrando o circuito responsável pelo ato, está o reator. Ele é peça fundamental para funcionamento da lógica de controle e é utilizado após a retificação da tensão de entrada, no elo de corrente contínua. A importância do reator no processo do *PFC* será descrita com mais detalhes no capítulo 3.

Figura 2.37 - Reator utilizado em condicionadores de ar para controle do fator de potência.



Fonte:[55].

2.8 A tecnologia *inverter*

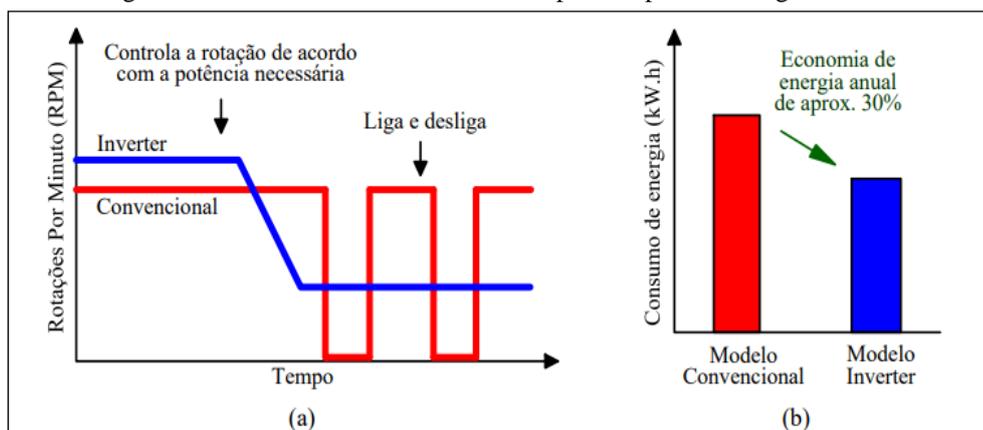
O controle de velocidade de rotação para os compressores rotativos é um fator determinístico na aquisição de um condicionador de ar. Estes componentes presentes no interior desses equipamentos podem apresentar velocidade fixa ou variável. Na velocidade fixa, o compressor trabalha conforme a necessidade de refrigeração averiguada pelo termóstato, em uma temperatura pré-determinada. Ao atingir a temperatura definida, ele desligará e permanecerá nesse estado. Quando houver novamente acréscimo de temperatura no ambiente, detectada pelo mesmo termóstato, o compressor será acionado para que assim possa resfria-lo.

Os compressores de velocidade variável, também nomeados como *inverter*, não são desligados durante a funcionamento do condicionador de ar. A rotação desta maquina varia de acordo com a temperatura captada no recinto. Grandes diferenças entre a temperatura ambiente e a solicitada no equipamento, irão demandar do compressor um esforço maior e conseqüentemente uma rotação maior, próxima a nominal. Se a diferença de temperatura entre os ambientes for baixa, o compressor não necessitará de muito esforço para manter o ambiente refrigerado e, por essa razão, rotacionará em um ritmo mais lento[13].

A tecnologia *inverter* possui inúmeras vantagens. O primeiro fator e o mais considerado para a procura destes equipamentos, é a economia de energia fornecida por estes sistemas. Eles podem oferecer uma economia de 20 a 40% a menos de energia elétrica comparado a um condicionador de ar convencional[56]. Para atingir a temperatura desejada o mais rápido possível, há uma solicitação maior de energia durante a partida do compressor *inverter*. Entretanto, ela é logo compensada durante o restante de seu funcionamento, pois, devido a capacidade em manter a temperatura estável e próxima a um patamar estabelecido, não há picos de correntes de partida durante a ação continua do compressor. Sua operação torna-se para o usuário, portanto, mais confortável e silenciosa.

A luz das afirmações anteriores é mostrada, conforme experimento realizado pela fornecedora Daikin, a economia de energia fornecida pelo funcionamento de dois de seus aparelhos condicionadores de ar, um com a tecnologia *inverter* e outro a convencional. Os resultados são ilustrados na figura 2.38. A primeira mostra a rotação dos respectivos compressores e a energia gasta por eles.

Figura 2.38 – Características e econômica provida pela tecnologia inverter.

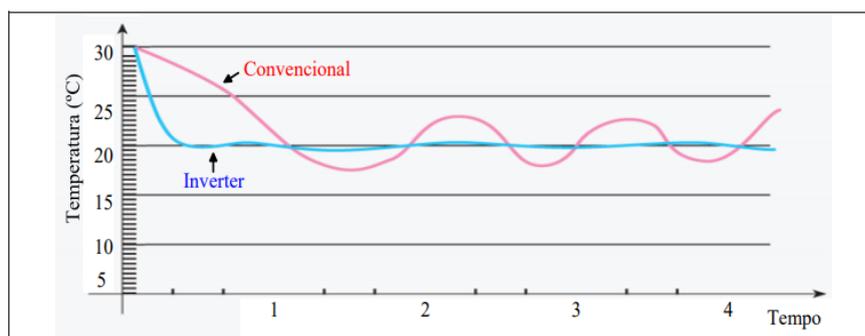


Fonte:[57]

Na figura 2.38, que no instante em que o compressor é acionado na unidade condensadora atinge sua velocidade máxima de funcionamento para ambos os tipos de *split*. Após atingir esta rotação, o controle de temperatura do equipamento será acionado para que o fluxo de fluido refrigerante se adeque a temperatura desejada pelo usuário. No caso do modelo convencional (em vermelho), o tempo para resfriar o ambiente na temperatura desejada ocorre no instante imediatamente anterior a queda de rotação para 0 RPM. Ao alcançar a temperatura pré-determinada, é possível observar o desligamento e subsequente acionamento em função da mudança da temperatura do recinto.

No modelo *inverter* observa-se que o compressor em nenhum momento tem sua rotação zerada. Ademais, é possível também perceber que ele atinge a temperatura pré-determinada pelo usuário mais rápido que o seu correspondente convencional. Ao atingir esta temperatura o controle do equipamento trabalha para manter a rotação constante de modo a preservar a temperatura na faixa selecionada. Como consequência, os condicionadores de ar *inverter* proporcionam uma maior estabilidade térmica durante o seu funcionamento. A figura 2.39 mostra a estabilidade térmica oferecida pelo modelo *inverter* no estudo realizado e demonstrado na figura 2.38.

Figura 2.39 – Estabilidade térmica oferecida pela tecnologia *inverter*.



Fonte:[57]

Um outro estudo diz respeito a uma análise comparativa de consumo de energia entre o ar condicionado *split inverter* e o ar condicionado *split* convencional. Nele, foram realizados dois estudos onde eram colocados os condicionadores de ar (convencional e *inverter*) para resfriar um ambiente de 10m². A comparação foi feita sob as mesmas condições para ambos os aparelhos, ou seja, o ambiente de ensaio possuía o mesmo numero de pessoas, mesma temperatura selecionada, e mesmo número de equipamentos fontes de calor em funcionamento. Ao final, foi constado uma economia de aproximadamente 46,5% para o modelo *inverter* em função da ação da sua variação de frequência para a rotação do compressor conforme explicado anteriormente[58].

Outra vantagem notável para os condicionadores de ar *inverter*, é a utilização, em sua maioria, do fluido refrigerante R410a, o qual contém apenas HFC. Ao comparar com o agente R22(FREON), que contém HCFC, o primeiro é ecologicamente aceito e não polui a camada de ozônio do planeta. A busca pela eficiência energética no condicionamento de ar é crescente, e a tendência para os sistemas *inverter* é estarem na maioria dos condicionadores de ar, geladeiras ou refrigeradores residenciais nas próximas décadas.

Quanto às implicações elétricas, o emprego de inversão de frequência em um compressor hermético conforme a sensação de temperatura, resulta na utilização de dispositivos eletrônicos semicondutores de chaveamento, MOSFETS(Metal-Oxide-Semiconductor Field) ou IGBT's (Insulated Gate Bipolar Transistor), adicionais para execução deste tipo controle no condicionador de ar. Desse modo, para desenvolvimento de uma modelagem computacional fidedigna ao equipamento, é necessária uma investigação minuciosa de seu circuito eletrônico envolvendo o entendimento das técnicas de controle utilizadas no processo da refrigeração.

2.9 Considerações finais

Inicialmente, foi abordado uma breve introdução em relação aos condicionadores de ar, ilustrando o seu desenvolvimento durante o século XX e sua relevância para a transformação da sociedade.

Após elucidação das características gerais dos condicionadores de ar, foi realizada uma investigação interna de um sistema de refrigeração no qual, explanou os princípios de funcionamento dos ciclos de refrigeração predominantemente constatados nestes equipamentos.

Sucessivamente, foram classificados os principais tipos de condicionadores de ar utilizados atualmente conforme avaliação da IEA. Para a contextualização e quantificação dos condicionadores utilizados globalmente, separou-se um tópico em especial para discussão do crescimento de continuo de vendas, do consumo energia elétrica gastos por esses equipamentos e quais são as prováveis implicações para o setor elétrico.

Como foco dessa dissertação, foi apresentado os componentes mecânicos e elétricos comumente encontrados nos condicionadores de ar *split* discorrendo também as suas respectivas funções. Por fim, exemplificou-se a tecnologia *inverter* com suas características e vantagens de uso nos modelos *splits*.

CAPÍTULO III

3 MODELAGEM COMPUTACIONAL DE APARELHOS CONDICIONADORES DE AR SPLIT INVERTER

3.1 Considerações iniciais

O crescimento de uso de técnicas envolvendo teorias de eletrônica de potência, suscitaram métodos inovadores para controle dos parâmetros de saída dos compressores dos condicionadores de ar, denominados como sistemas *inverter*. O principal fator que diferencia os sistemas *splits inverter* em relação aos tipos convencionais é o acionamento do motor elétrico do compressor por um inversor de frequência, possibilitando uma maior velocidade de resposta do equipamento a alterações de temperatura no ambiente refrigerado o que, conseqüentemente, gera maior estabilidade, economia de energia e conforto durante a operação.

Atualmente são encontrados vários novos componentes eletrônicos, como IGBT's e microcontroladores, por exemplo, compondo o circuito elétrico destes sistemas. Por possuir componentes que exigem controles específicos e também uma maior potência da rede elétrica, a maioria dos componentes eletrônicos localizam-se na unidade condensadora do equipamento. Como resultado, a estrutura elétrica destes equipamentos, principalmente no que se refere a condensadora, é mais complexa.

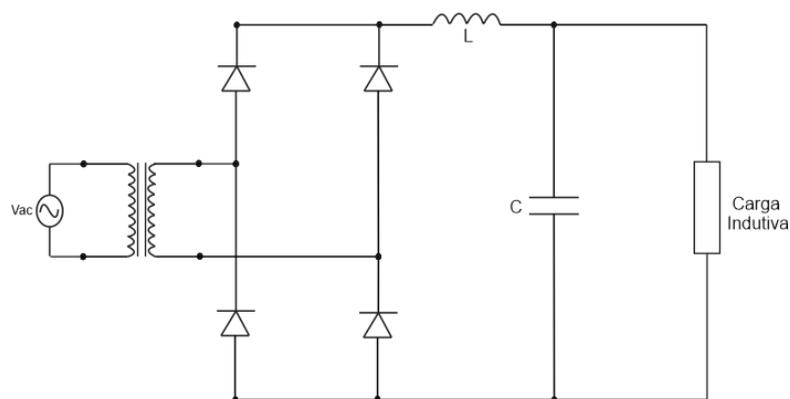
Considerando os aspectos apresentados anteriormente, para modelagem de um condicionador de ar *split inverter*, deve-se analisar as estruturas físicas das unidades evaporadoras e condensadoras destes modelos separadamente. Cada uma das unidades tem contribuição, majoritária e minoritária na composição da corrente de alimentação do equipamento bem como na disposição de sua forma de onda.

3.2 Estrutura física da unidade evaporadora

No que tange ao funcionamento elétrico dos condicionadores *inverters*, as suas unidades evaporadoras não apresentam grandes distinções comparadas aos modelos convencionais[25]. São partes de baixa potência, visto que existem poucos dispositivos eletroeletrônicos ligados em seu circuito. Essa unidade pode apresentar também um transformador com tensão secundária de 12V, pois, alimenta componentes de alta sensibilidade a tensão.

Ao ser comparada com a unidade condensadora, cuja potência ultrapassa a faixa dos 1 kW já para a menor capacidade de refrigeração destes equipamentos, a evaporadora terá influência insignificante na composição da corrente solicitada pelos condicionadores de ar. Por essa razão, sua estrutura é representada na figura 3.1, simplesmente por um retificador que representa um modelo de fonte chaveada com uma carga indutiva pequena localizada no elo de corrente contínua[25].

Figura 3.1 - Diagrama elétrico equivalente para o condicionador de ar *inverter* utilizado ao estudo.

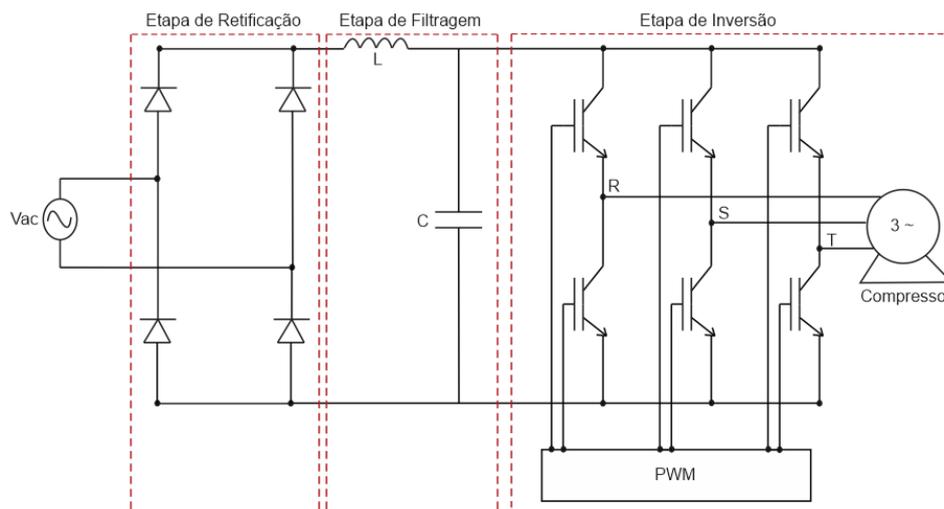


Fonte: Autor próprio.

3.3 Estrutura física da unidade condensadora

Apesar da exigência de se realizar um novo estudo para modelagem da unidade condensadora em versões *inverter* de diferentes fabricantes, sua estrutura básica é comum para maioria deles. Essencialmente, a arquitetura deste equipamento, já encontrada na literatura por [59], possui três etapas distintas, a saber: retificação, filtragem e inversão. A representação dessas etapas é mostrada na figura 3.2.

Figura 3.2 - Etapas de funcionamento de uma unidade condensadora para um condicionador de ar *inverter*.



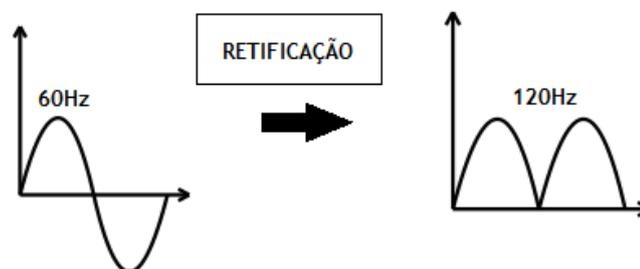
Fonte: Autor próprio.

3.3.1 Etapa de retificação

Conforme observa-se na figura 3.2, a etapa de retificação é constituída normalmente por uma ponte de onda completa apresentando 4 diodos posicionados para conduzir em pares. A alternância da condução ocorre com a mudança do semiciclo positivo da tensão de entrada para o negativo [60].

A tensão que alimenta o retificador tem característica senoidal, alternada e sua frequência é de 60Hz. Como a condução pelos diodos ocorre em pares, a tensão presente no circuito contínuo após a retificação e antes da etapa de filtragem, terá característica unidirecional e frequência de 120Hz. A figura 3.3 mostra as formas de ondas típicas da tensão na entrada do circuito alternado e contínuo.

Figura 3.3 - Retificação da tensão de alimentação para um retificador de onda completa.

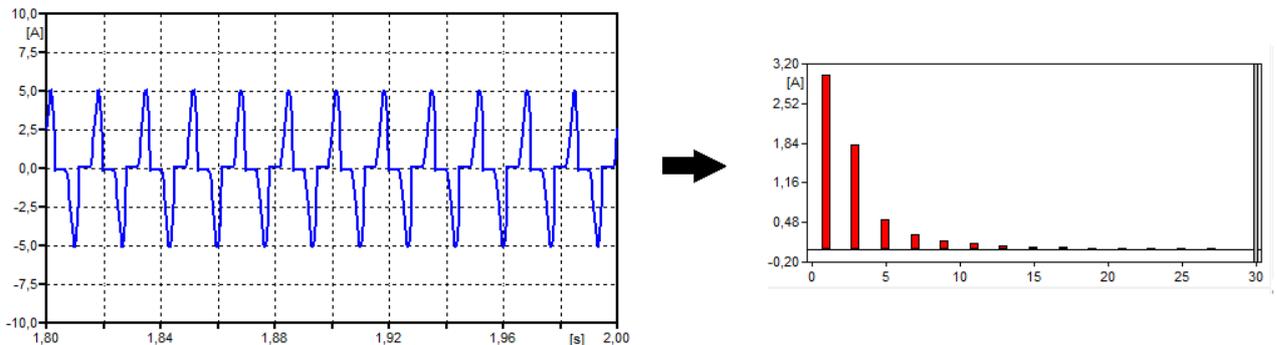


Fonte: Autor Próprio.

Sem nenhum tipo de filtragem, a corrente de alimentação dos condicionadores de ar tem grande distorção harmônica. Tal característica deve-se principalmente a presença destes retificadores na entrada dos equipamentos. Como resultado dessas distorções, o aspecto físico dessas correntes consiste em picos de amplitude pontiagudos no meio dos semiciclos de condução e valores baixos no

restante dos intervalos. A título de ilustração, tem-se na figura 3.4, a forma de onda genérica da corrente de alimentação das fontes com retificadores em conjunto com seu espectro harmônico.

Figura 3.4 - Corrente resultante da operação de um retificador com seu espectro harmônico correspondente



Fonte: Autor próprio.

A circulação excessiva de harmônicos na rede elétrica causa efeitos indesejáveis em vários aspectos do sistema. Como exemplo, pode-se destacar: a redução do fator de potência dos equipamentos e instalações, a indução de tensões harmônicas em alimentadores, o estresse térmico em transformadores e motores, sobrecorrentes nos cabos de alimentação, a sobrecarga do condutor neutro, a ressonância em capacitores, os ruídos, as interferências em sistemas de comunicação, a redução da transmissão de potência [1].

3.3.2 Etapa de filtragem

No barramento DC ocorre a etapa de filtragem. Convencionalmente, nele, há a presença de um capacitor que desempenha a função de filtro de *ripple* para a tensão contínua, ou seja, o componente é responsável por alisar a sua forma de onda [61]. Ademais, novos modelos de condicionadores de ar, principalmente aqueles que possuem sistema de inversão, têm, em sua composição, dispositivos eletrônicos dedicados a aplicação de diferentes técnicas de controle da tensão e corrente de alimentação do equipamento. Esses artifícios são utilizados, pois, estes aparelhos geram uma quantidade demasiada de componentes harmônicas e são sensíveis a pequenas variações na sua tensão de alimentação[5].

Existem atualmente, normativas e recomendações internacionais, como a IEC 61000-3-2, que estabelecem valores máximos de harmônicas de correntes injetadas na rede por equipamentos eletroeletrônicos cuja corrente nominal por fase seja menor que 16A. Atentando-se as essas regulamentações, têm-se constatado, com maior frequência, técnicas, passivas e ativas, para a correção do fator de potência presentes no interior destes equipamentos. Define-se o controle do fator de potência como o alinhamento dessa corrente com a tensão de alimentação vinda da rede e que tem como consequência a redução do conteúdo harmônico da corrente de entrada destes aparelhos. Essas

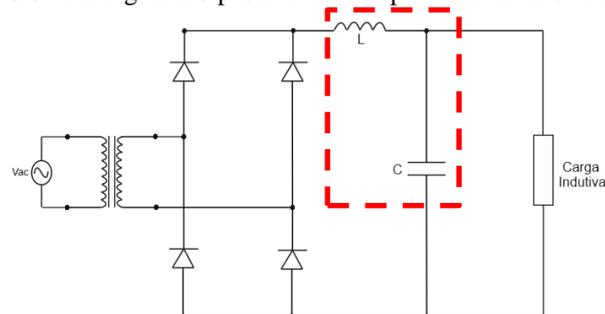
alterações têm por objetivo agregar valor ao equipamento, reduzir os custos de projeto e/ou produto ou simplesmente atender com a normativa vigente[62].

No que tange aos filtros passivos, esta técnica consiste na manipulação de indutores e capacitores lineares para melhorar os indicadores de fator de potência e distorções harmônicas do equipamento[63], [64]. Em cargas lineares esse método funciona bem, pois, sabendo a quantidade de reativo indesejada ou necessária para a regulação, é possível compensar esse valor pela adição ou redução do componente reativo oposto. Já para perfis com não linearidade o projeto de filtros é dificultado e as soluções ativas mostram-se mais atraentes.

A compensação passiva é mais adequada para aplicações em eletroeletrônicos de baixa potência, pois, projetos de filtros com altas demandas energéticas requerem grandes valores de capacitância/indutância e tornam o equipamento mais pesado e volumoso. Algumas desvantagens do método ainda incluem: resposta dinâmica pobre, difícil dimensionamento, ausência de controle de tensão e baixa faixa de operação.

Em cargas não lineares do tipo fonte de corrente, normalmente associadas a acionamento de máquinas como os compressores presentes nos condicionadores de ar, a regulação do fator de potência dos equipamentos é feita mediante a inserção de um indutor na saída do retificador. No entanto, pelo fato de grandes valores de indutância serem indesejáveis, em razão de exigirem componentes demasiadamente grandes, usa-se comumente filtros LC, conforme destacado na figura 3.5. O fator de potência regulado terá valor semelhante ao obtido somente com a aplicação do indutor, mas, nesse caso, os elementos presentes nos circuitos serão significativamente menores.

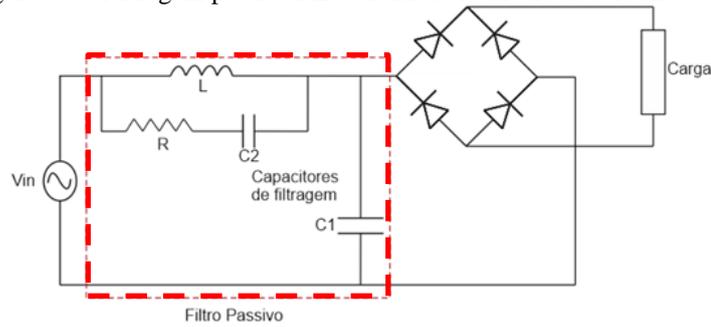
Figura 3.5 - Filtragem LC passiva comum para um circuito retificador.



Fonte: Autor próprio.

Outra solução passiva compreende a inserção de filtros sintonizados LCR em paralelo com a entrada da ponte retificadora. O filtro, ilustrado na figura 3.6, não altera a componente fundamental da corrente e pode elevar o fator de potência do equipamento a um patamar desejável (0,92), principalmente em situações em que há grande quantidade de terceira ordem harmônica.

Figura 3.6 - Filtragem passiva RLC alternativa em circuitos retificadores.



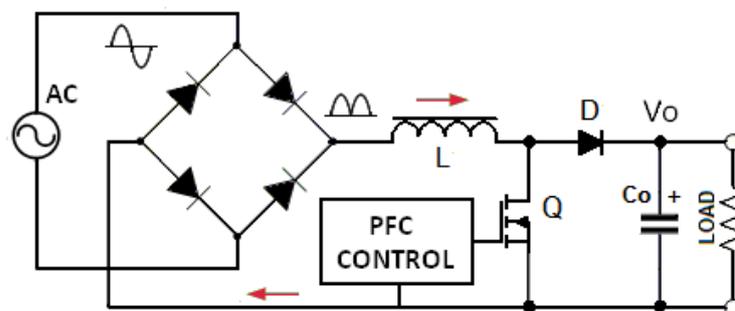
Fonte: Autor próprio.

Em relação as técnicas ativas, estas proporcionam uma melhor performance e maior extensão de aplicabilidades. Essencialmente, a filosofia do controle ativo é forçar a corrente de entrada do equipamento a seguir as características da sua tensão aplicada[65]. Dessa maneira, a corrente controlada possuirá a forma de onda e ângulo fase semelhante ao da tensão. Do ponto de vista da rede de conexão, o circuito eletrônico terá comportamento equivalente ao de uma carga resistiva, apresentando, portanto, elevado fator de potência.

É importante ressaltar que a corrente, neste tipo de filtragem, é o espelho da forma de onda da tensão, conseqüentemente apresentando os mesmos níveis de distorção harmônica. Então, caso a tensão aplicada não seja puramente senoidal, essa característica será refletida na forma de onda da corrente e reduzirá o fator de potência. Outros efeitos não desejados na tensão de alimentação, como, por exemplo, a presença de flutuações, também serão notados na composição da corrente.

Os dispositivos que utilizam filtros ativos, também conhecidos como pré-reguladores de fator de potência –PFP (ou *PFC* globalmente) cujo um exemplo é ilustrado na figura 3.7, utilizam da ação de interruptores controlados em conjunto com elementos passivos (capacitores/indutores). O chaveamento em alta frequência é mais adequado, pois proporciona maior eficiência do controle e possibilita uma redução dos valores de capacitores e indutores do circuito.

Figura 3.7 – Exemplo de filtragem ativa integrada em circuitos retificadores.



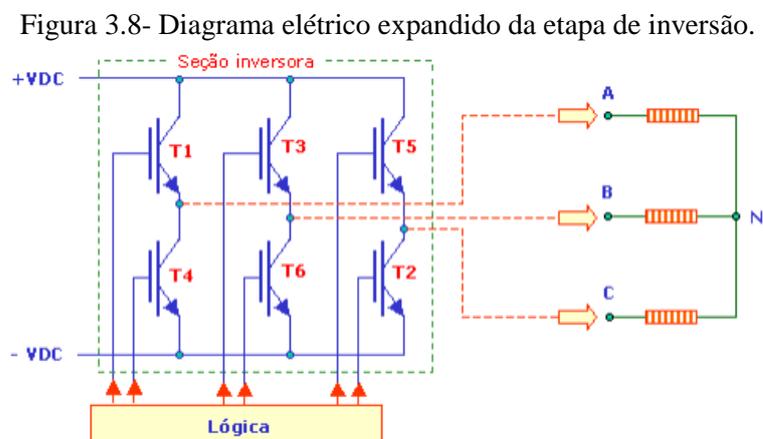
Fonte: Adaptado de [65].

Para aplicações em fontes chaveadas com a presença de retificadores de tensão na entrada, emprega-se conversores CC/CC não isolados como PFP's/*PFC*. Entende-se eles como circuitos não isolados aqueles que não utilizam da ação de transformadores isoladores. Os conversores são os responsáveis pelo aumento ou redução da tensão e corrente contínua, podendo ser classificados como, circuito elevador (*boost*), abaixador(*buck*), *Cuk*, SEPIC e ZETA. O principal fator que determinará o tipo do conversor empregado ao circuito eletrônico de um equipamento é a característica de tensão contínua desejada a ser entregue para a carga[66].

Para condicionadores de ar, o conversor elevador de tensão (*boost*) tem sido o mais adequado para ser utilizado como *PFC*, por fornecer um ganho de tensão na entrada do motor elétrico do compressor, aumentando a eficácia do controle da tensão perante oscilações na rede. Além disso, com a presença de um indutor antes da etapa de retificação, promove a redução de variações bruscas na alimentação e auxilia na filtragem da corrente de entrada [67]. Outras vantagens ainda incluem a facilidade de implementação em circuitos eletrônicos, maior compatibilidade com dispositivos integrados e custos reduzidos.

3.3.3 Etapa de inversão

Uma vez a tensão retificada e filtrada, a mesma será novamente convertida em alternada e diferente da entrada, será transformada em um sistema trifásico. Esta função é atribuída à um conjunto de seis IGBTs atuando em corte (chave aberta) e saturação (chave fechada). O diagrama elétrico expandido da etapa de inversão é ilustrado na figura 3.8. Para compressores rotativos *inverter*, a saída mais próxima possível de uma forma de onda puramente senoidal é adquirida na condição onde a lógica de controle realiza os pulsos de disparos pelos 6 IGBTs de forma que cada chave conduza por 120°[68].



Fonte:[69].

Somente duas chaves do circuito apresentado podem conduzir em determinado instante. Assim sendo, tendo em mente que o grupo do semiciclo positivo é composto pelos dispositivos T₁,

T_3 e T_5 e o negativo pelos T_4 , T_6 e T_2 , constata-se que existem seis combinações possíveis, as quais são: V_{AB} , V_{AC} e V_{BC} que conduziriam do potencial positivo para o negativo e V_{BA} , V_{CA} e V_{CB} que conduziriam do potencial negativo para o positivo. A tabela 3.1 mostra as possíveis condições para as chaves supramencionadas em função do intervalo de condução da tensão, sendo 0 (zero) condição aberta e 1 (um) condição fechada.

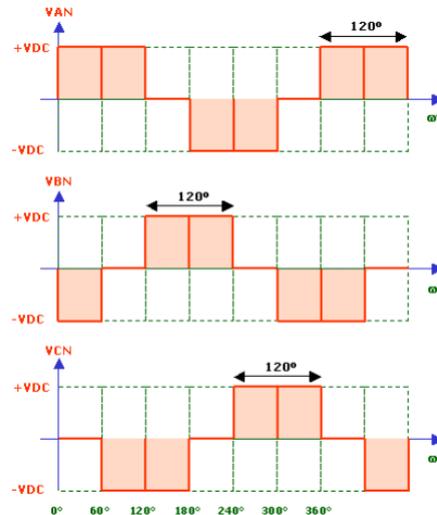
Tabela 3.1 – Intervalos de condução para as chaves da etapa de inversão.

Intervalo	T_1	T_2	T_3	T_4	T_5	T_6	V_{an}	V_{bn}	V_{cn}
0-60°	1	0	0	0	0	1	$+V_{DC}/2$	$-V_{DC}/2$	0
60-120°	1	1	0	0	0	0	$+V_{DC}/2$	0	$-V_{DC}/2$
120-180°	0	1	1	0	0	0	0	$+V_{DC}/2$	$-V_{DC}/2$
180-240°	0	0	1	1	0	0	$-V_{DC}/2$	$+V_{DC}/2$	0
240-300°	0	0	0	1	1	0	$-V_{DC}/2$	0	$+V_{DC}/2$
300-360°	0	0	0	0	1	1	0	$-V_{DC}/2$	$+V_{DC}/2$

Fonte:[69].

Baseado nos intervalos de condução das chaves apresentados, tem-se como resultado da inversão as tensões fase-neutro (V_{AN} , V_{BN} e V_{CN}) defasadas de 120° conforme mostra a figura 3.9.

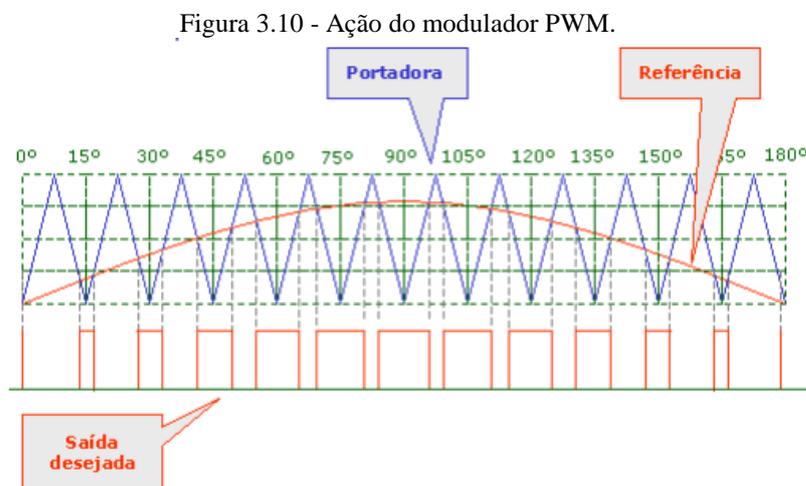
Figura 3.9 – Tensões fase neutros resultantes da etapa de inversão.



Fonte:[69].

Em aplicações direcionadas a condicionadores de ar onde o compressor necessita de uma alimentação trifásica próxima da característica senoidal, a lógica de chaveamento ocorre geralmente por meio da técnica de controle intitulada como modulação por largura de pulso (ou PWM) escalar senoidal. Ela consiste na comparação de dois sinais de tensão pela atuação de um circuito modulador, sendo um de baixa frequência, considerado a referência do circuito, o qual representa a imagem desejada ao sinal alternado, e o outro em alta frequência nomeado como portador, normalmente

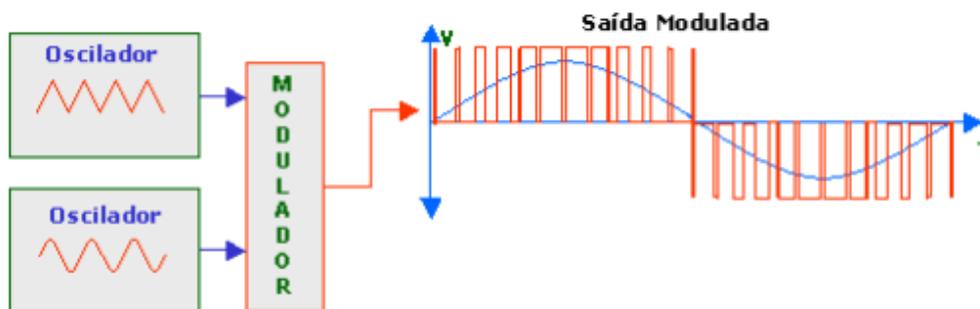
triangular possuindo cerca de 10 vezes o sinal de referência para uma boa reprodução na entrada do compressor. No instante que a amplitude da referência for maior que a da portadora haverá condução, caso contrário, a chave permanecerá aberta. Á título de ilustração, a figura 3.10 mostra o processo acima descrito.



Fonte:[69].

A saída modulada, ilustrada na figura 3.11, terá formato retangular, porém, aspecto do sinal de referência imposto. Essa característica deve-se a diferenciação dos intervalos de condução semiciclo de tensão as chaves. Elas conduzem com maior frequência no meio do período, pois, devido a maior amplitude da referência senoidal, nota-se uma maior quantidade de instantes onde há condução, resultando assim em pulsos mais largos e próximos um ao outro. Por outro lado, nas extremidades, os pulsos são mais escassos e estreitos devido a, neste caso, amplitude baixa da tensão de referência em relação a portadora.

Figura 3.11- Modulação por largura de pulso escalar - PWM



Fonte:[69].

A carga conectada sob a alimentação da tensão invertida é o compressor hermético. Conforme elucidado do capítulo dois, os principais tipos de motores empregados são do tipo de indução trifásico e os BLDC. O controle do circuito é projeto de forma a manter a potência entregue a estas maquinas constantes mesmo em situações onde a tensão de alimentação é precária.

Muito embora a etapa de inversão seja essencial para funcionamento real do compressor de um condicionador de ar *inverter*, esta, apresenta uma pequena parcela de influência na corrente de alimentação do equipamento na presença de reguladores ativos de fator de potência integrados ao barramento contínuo. Esse fato é justificado pelo controle de tensão proporcionado pelos conversores CC-CC de modo a manter a potência entregue a máquina constante, ou seja, a carga conectada a inversor de frequência se comportará como um resistor conectado ao circuito. No que se refere ao estudo de consistência denexo causal em ressarcimento de danos elétricos, um modelo equivalente capaz de reproduzir a corrente de entrada do equipamento alvo para condições normais e anormais de suprimento já é considerado suficiente para avaliações da procedência de casos.

Como resultado, deve-se ter o entendimento aprofundado do conversor CC-CC integrado ao condicionador de ar como também da técnica de controle de tensão e corrente empregadas no funcionamento do mesmo.

3.4 Conversores *boost* aplicados a condicionadores de ar

Reconhecendo as vantagens do conversor CC-CC *boost* como *PFC* aplicado a equipamentos eletroeletrônicos e considerando a necessidade de seu entendimento para a modelagem computacional do condicionador de *inverter* utilizado neste trabalho, tem-se a seguir informações pertinentes relacionadas a este tipo de circuito.

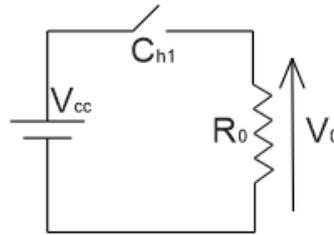
Os tópicos abordados englobam:

- Estrutura física e operação desse regulador;
- Técnicas de controle de tensão/corrente;
- Variações encontradas em placas eletrônicas de equipamentos.

3.4.1 Razão Cíclica e Ganho Estático

Para definição da razão cíclica ou também chamado ciclo de trabalho de um conversor CC-CC, tem-se a seguir a análise de um circuito elementar abaixador. Ele utiliza da ação de um interruptor controlado para que assim possa ocorrer o fluxo de potência no circuito. Desse modo, representado na figura 3.12, encontra-se um circuito simples possuindo uma tensão contínua V_{CC} , um interruptor controlado C_{h1} ideal e uma resistência representando uma carga R_0 . Em um dispositivo ideal não existem perdas geradas pela condução do interruptor e nem perdas por comutação da chave.

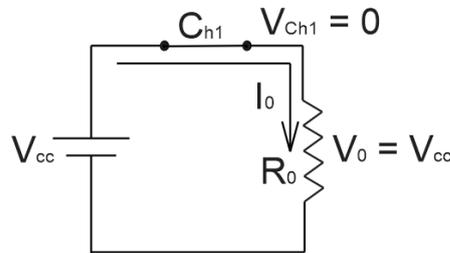
Figura 3.12 - Circuito CC abaixador elementar.



Fonte: Adaptado de [66]

O circuito anterior pode operar em dois modos distintos que variam em função da atuação da chave C_{h1} . No intervalo de tempo que C_{h1} está fechada (t_{on}), conforme mostra a figura 3.13, existirá um caminho entre a tensão V_{cc} e a carga R_0 . Conseqüentemente, a tensão na chave C_{h1} será zero e uma corrente, nomeada como I_0 , irá fluir pela malha.

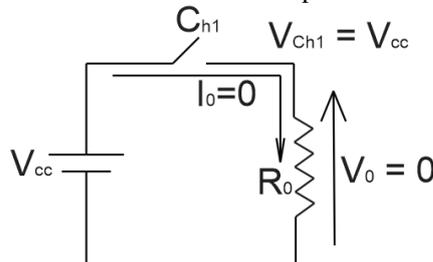
Figura 3.13 - Circuito abaixador elementar operando para a chave fechada.



Fonte: Adaptado de [66]

No segundo estado (t_{off}), ilustrado na figura 3.14, a chave C_{h1} estará aberta e comportamento do conversor será semelhante ao de um circuito aberto. A tensão na chave C_{h1} será igual a tensão de entrada V_{cc} e a corrente I_0 que fluía pelo circuito durante a etapa anterior será interrompida e terá valor zero.

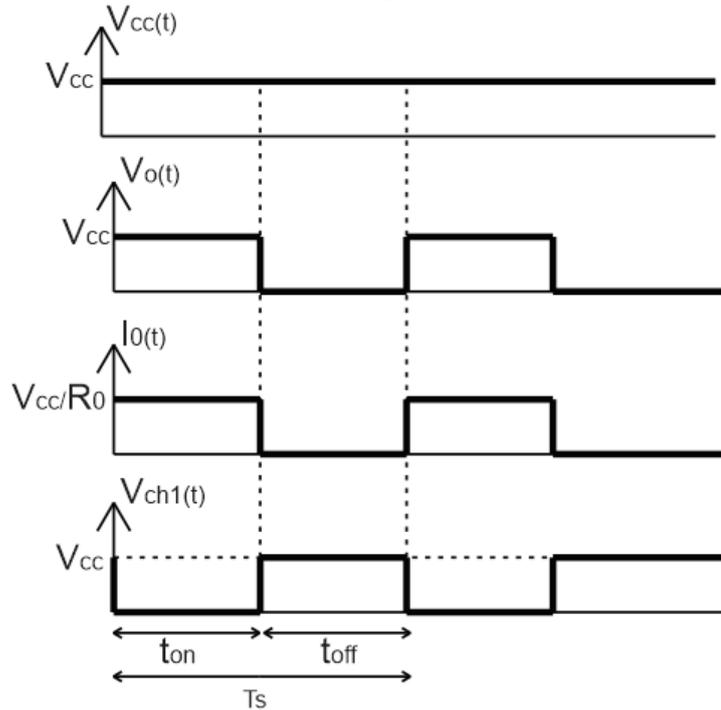
Figura 3.14 - Circuito elementar abaixador operando com a chave aberta.



Fonte: Adaptado de [66]

As formas de ondas referentes a mudança entre os dois estados descritos anteriormente encontram-se na figura 3.15. Constata-se que quando C_{h1} conduz, no intervalo de tempo $[0, t_{on}]$, a tensão contínua V_{cc} é aplicada a carga gerando, devido a lei de Kirchhoff das tensões, uma corrente I_0 . Após o interruptor abrir, durante o intervalo $[t_{on}, T_s]$, a corrente I_0 se anula.

Figura 3.15 - Perfis de tensão e corrente para o circuito abaixador elementar.



Fonte: Adaptado de [66]

Percebe-se pela imagem anterior que o valor médio da tensão na carga $V_{0(t)}$ é controlado via a variação do tempo em que a chave conduz e o tempo que ela permanece aberta. Por exemplo, se por alguma razão o interruptor permanecer conduzindo ao longo de todo o período (T_s), a tensão média na carga seria igual a tensão de entrada V_{cc} , caso o contrário ocorresse, ou seja, se a chave permanecesse sempre aberta, a tensão média na carga seria zero.

Desse modo, pode-se controlar a potência entregue a carga pela atuação do fechamento e abertura da chave controlada. Essa relação é denominada na área de eletrônica de potência como o ciclo de trabalho ou a razão cíclica (D) aplicada a chave. Sua definição formal é evidenciada na equação (3.1), de acordo com a figura 3.15.

$$D = \frac{t_{on}}{T_s} \quad (3.1)$$

onde,

- D representa o ciclo de trabalho da chave presente no conversor;
- t_{on} representa o tempo que a chave está fechada;
- T_s representa o tempo total de trabalho da chave.

O valor da razão cíclica pode variar entre 0 a 1, pois, essa variável representa uma porcentagem de atuação da chave em relação ao período total de comutação. Desse modo, pode-se desenvolver a equação (3.1) e obter os valores expressos pela razão cíclica de t_{on} e t_{off} , isto é:

$$t_{on} = D * T_s \quad (3.2)$$

$$t_{off} = \frac{(1 - D)}{T_s} \quad (3.3)$$

Utilizando as formas de onda da figura 3.16 calcula-se o valor médio da tensão de saída ($V_{0(méd.)}$), expresso na equação (3.4).

$$V_{0(méd.)} = \frac{1}{T_s} \int_0^{T_s} v_0(t) dt = \frac{1}{T_s} \int_0^{DT_s} V_{cc} dt = DV_{cc} \quad (3.4)$$

Assumindo $V_{0(méd.)} = V_o$, é possível rearranjar a equação (3.4) obtendo a equação (3.5).

$$G = \frac{V_o}{V_{cc}} = D \quad (3.5)$$

Conclui-se que a relação entre a tensão de saída e a tensão de entrada em qualquer tipo de conversor estático é denominada ganho estático G.

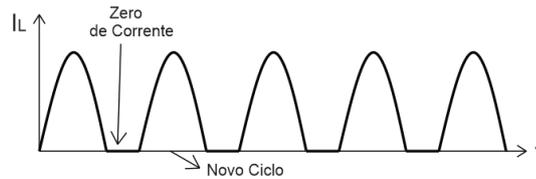
3.4.2 Modos de condução dos conversores CC-CC

A análise do funcionamento dos conversores CC-CC é diferenciada de acordo com o modo de condução da corrente retificada que passa pelo indutor em regime permanente. No geral, existem três modos diferentes de condução que devem ser considerados

- Modo de condução descontínuo

Conforme ilustrado na figura 3.16, quando a corrente que flui pelo indutor opera no modo de condução descontínuo, sua passagem por zero, durante a comutação, é mantida até a ocorrência de um novo ciclo. Essa característica influencia diretamente no número de etapas de condução constatadas na operação de um conversor bem como nas equações que determinam os ganhos e valores de indutâncias e capacitâncias dos circuitos.

Figura 3.16- Modo de condução de corrente descontínuo.

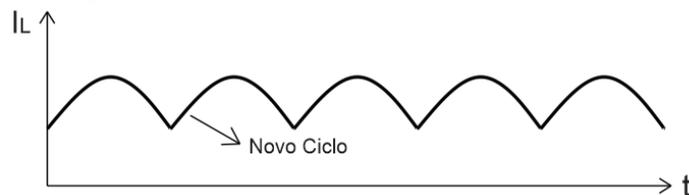


Fonte: Autor Próprio.

- Modo de condução contínuo

No caso da condução contínua, destacada na figura 3.17, a corrente não passará por zero em nenhum momento da comutação da chave. O valor da corrente no indutor abaixará no instante em que a chave do conversor estiver aberta e voltará a aumentar imediatamente quando ela é fechada.

Figura 3.17 - Modo de condução de corrente contínuo.

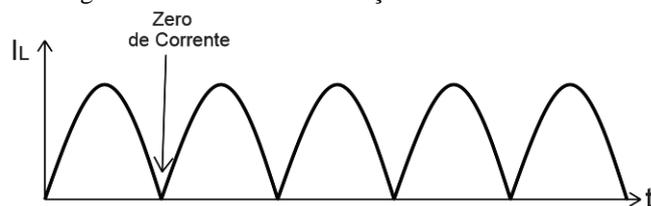


Fonte: Autor Próprio.

- Modo de condução crítico

Já na condução crítica, ilustrada na figura 3.18, quando há passagem da corrente pelo zero como resultado da comutação, ela imediatamente voltará a subir para o próximo ciclo sem a existência de nenhum intervalo de tempo adicional dela por zero.

Figura 3.18 - Modo de condução de corrente crítico



Fonte: Autor Próprio.

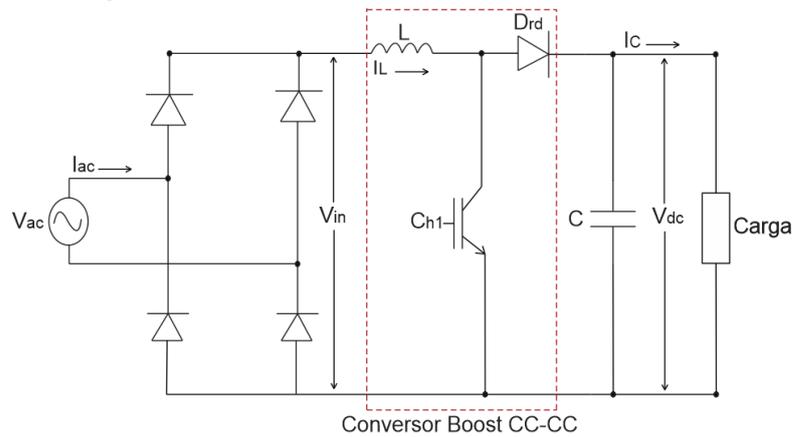
As diferenciações dos modos de condução de corrente são necessárias para aplicação de controles a circuitos eletrônicos controladores de fator de potência. Existem técnicas que só serão viáveis tendo o circuito um modo de condução contínua/crítico e outras criadas especificamente para operação em modo descontínuo.

3.4.3 Análise de Funcionamento do Conversor *Boost* em modo de Condução Contínua

O diagrama elétrico do conversor CC-CC *boost* é dado na figura 3.19. Ele é composto pela associação de um reator (L), uma chave controlada (C_{h1}) e um diodo de roda livre (D_{rd}), inseridos entre o retificador vindo da fonte e o filtro capacitivo do elo CC. Vale ressaltar que o conversor apresenta funcionalidade somente quando a característica da tensão na carga V_{dc} for maior que a tensão na entrada V_{ac} .

Por questões de simplicidade de análise e aplicabilidade na modelagem do condicionador de ar *inverter*, o conversor *boost* abordado neste trabalho, opera em modo de condução contínuo - MCC.

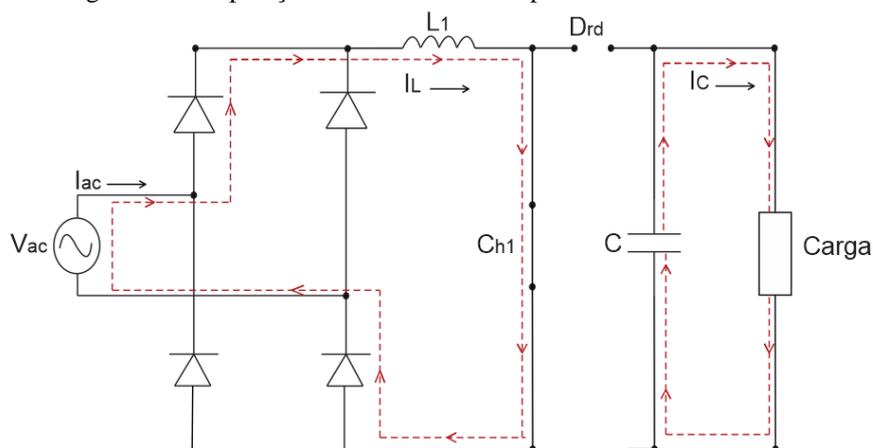
Figura 3.19 - Conversor elevador de tensão (*boost*) CC-CC.



Fonte: Autor Próprio.

A operação do circuito *boost* em MCC ocorre em duas etapas distintas. Segundo a figura 3.20, o primeiro estado acontece quando a chave (C_{h1}) é fechada. Nessa ocasião, o indutor L1 começará a ser energizado pelo lado alternado via retificador, e, por essa razão, a corrente que passa por ele (I_L) crescerá linearmente. Ao mesmo tempo, o diodo (D_{rd}) estará reversamente polarizado, pois, com C_{h1} conduzindo, existirá um caminho de conexão do seu anodo com o terra do circuito. A potência entregue a carga será provida pelo capacitor previamente carregado.

Figura 3.20 - Operação do conversor *boost* para a chave 1 conduzindo.



Fonte: Autor Próprio.

Durante o intervalo de tempo (t_{on}) que a chave C_{h1} está conduzindo, a tensão presente no indutor (V_{L1}) terá o mesmo valor que a tensão retificada na entrada do conversor (V_{in}). Desse modo:

$$V_{L1} = V_{in} \quad (3.6)$$

Sabe-se que a tensão instantânea no indutor, correspondente a equação (3.7), é dada pela taxa de variação da corrente presente nele, representada por (I_L), multiplicada pelo valor de sua indutância.

$$v_L(t) = L_1 \cdot \frac{di_L(t)}{dt} \quad (3.7)$$

Assumindo que o intervalo de condução de C_{h1} é igual a t_{on} (conforme adoção do modo de condução contínuo) e desconsiderando a existência de ondulações na tensão da carga V_{dc} , pode-se definir a ondulação de corrente no indutor por um valor retratado como ΔI_L . Assim, é possível obter as expressões concernentes a primeira etapa de comutação da chave, evidenciadas nas equações (3.8) e (3.9).

$$di_{L1}(t) = \Delta I_L = I_{L(máx.)} - I_{L(mín)} \quad (3.8)$$

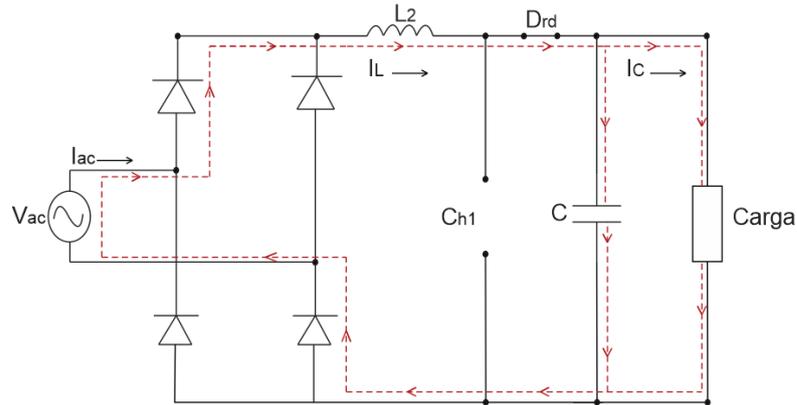
$$dt = t_{on} \quad (3.9)$$

Constata-se que as equações (3.8) e (3.9) podem ser substituídas na (3.7). É possível então encontrar a relação da tensão retificada de entrada em função da variação de corrente no indutor durante o intervalo de tempo t_{on} .

$$V_{in} = L_1 \frac{\Delta I_{L1}}{t_{on}} \quad (3.10)$$

O segundo estado, representado na figura 3.21, ocorre quando a chave (C_{h1}) é aberta. Por consequência, o indutor se descarrega e a energia armazenada nele é transferida para a carga e o capacitor. Desse modo, analogamente ao estado anterior, a corrente no indutor terá decréscimo contínuo na sua magnitude devido à perda de energia do elemento.

Figura 3.21- Operação de um circuito elevador de tensão para a chave aberta.



Fonte: Autor Próprio.

Durante o segundo estado de operação da chave C_{h1} , durante o tempo t_{off} , a tensão no indutor (V_{L2}) é calculada pela lei de Kirchhoff das malhas. Portanto, aplicando a referida lei física, chega-se à equação (3.11).

$$V_{L2} = -(V_{dc} - V_{in}) \quad (3.11)$$

Quando C_{h1} é aberta, o indutor, previamente carregado, descarregará ao transferir a sua energia ao capacitor e carga. Conseqüentemente, a corrente que flui pelo indutor (I_L), nesse caso, diminuirá a uma taxa constante com valor equivalente ao acréscimo apurado na etapa anterior. Assim sendo, afirma-se que a intensidade da taxa de decréscimo da corrente no indutor será $-\Delta I_L$. Logo, substituindo o valor considerado na equação (3.5), são obtidas as equações (3.12) e (3.13).

$$di_{L2}(t) = -\Delta I_L = -(I_{L(máx.)} - I_{L(mín.)}) \quad (3.12)$$

$$dt = t_{off} \quad (3.13)$$

Substituindo os valores referentes ao segundo estado de comutação da chave na equação (3.11), obtém-se a equação (3.14).

$$V_{dc} - V_{in} = L_1 \frac{\Delta I_L}{t_{on}} \quad (3.14)$$

Sabe-se também que é possível exprimir os intervalos de tempo de condução t_{on} e t_{off} em função da razão cíclica do conversor conforme já mostrado nas equações (3.2) e (3.3). Assim,

Rearranjando as equações (3.13) e (3.14) e substituindo os intervalos de condução da chave (t_{on}) e (t_{off}) encontra-se as expressões (3.15) e (3.16).

$$\Delta I_L = \frac{V_i \cdot D \cdot T_s}{L_1} \quad (3.15)$$

$$\Delta I_L = \frac{(V_{dcf} - V_i)(1 - D) \cdot T_s}{L} \quad (3.16)$$

Igualando-se as duas expressões anteriores, obtém-se o ganho estático do conversor *boost*.

$$G = \frac{V_{dcf}}{V_{dci}} = \frac{1}{1 - D} \quad (3.17)$$

onde,

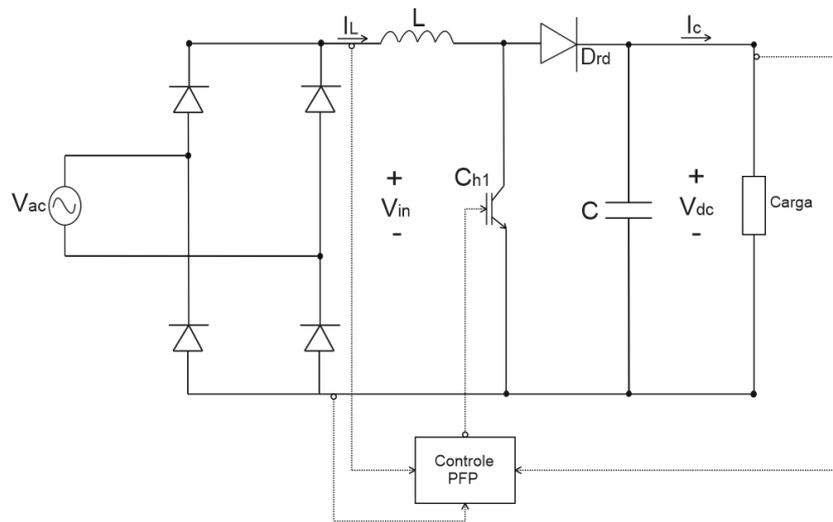
- V_{dcf} representa a tensão contínua na carga no instante final;
- V_{dci} representa a tensão contínua na carga no instante inicial de análise;
- D representa a razão cíclica da chave do conversor *boost*.
- G representa o ganho estático do conversor *boost*.

A equação (3.17) mostra que o ganho de tensão na saída do conversor *boost* é igual ou maior ao seu valor na entrada alternada. O que definirá a tensão desejada na carga é a razão cíclica da chave C_{hl} , quanto maior for o tempo que ela permanecerá conduzindo, maior será a tensão aplicada a carga.

3.4.4 Princípios de Controle Ativo

O diagrama elétrico correspondente a associação do conversor *boost* a um controle para regulação do fator de potência de um equipamento é ilustrado na figura 3.22.

Figura 3.22 - Diagrama elétrico genérico do conversor CC-CC *boost* aplicado como controlador de fator de potência



Fonte: Autor Próprio.

A entrada V_{ac} é considerada como o sinal de referência para a malha de controle da corrente. Após a retificação, a tensão é utilizada para energizar os componentes de potência do circuito e também impõe, ao controle, a forma de onda e corrente que flui pelo indutor. A aquisição do sinal pela malha de controle do PFP é realizada em tempo real e a sua amplitude é proporcional a V_{in} . Normalmente, ao ser enviada para esse circuito, sua magnitude é reduzida após a passagem por um divisor resistivo.

Para fechamento da malha de controle da corrente são necessárias informações acerca das características da corrente que está efetivamente circulando pelo indutor. Desse modo, a segunda variável de entrada consiste em um sinal de realimentação de corrente, representado por I_L . O controle de corrente só será efetivo quando as características da referência (forma de onda), dada por V_{in} , foram semelhantes ao sinal de realimentação I_L , ou seja, quando o erro calculado pelo controlador, responsável pela comparação dos sinais, for próximo de zero. Idealmente, em aplicações onde a corrente tem magnitude elevada, é necessário que o sinal tenha um valor proporcional e menor ao real que circula pelo conversor. Para isso, utiliza-se normalmente transformadores e/ou transdutores de corrente.

Em aplicações onde é necessário manter a potência entregue a carga estável, controla-se também a tensão contínua de saída do *boost*. Assim, da mesma forma que impõe uma referência para a corrente que circulará pelo indutor, define-se uma tensão de referência V_{ref} contínua a ser entregue a carga na saída do conversor.

A variável de retorno de tensão contínua V_{dc} ajustará a amplitude da corrente média a longo prazo de modo a satisfazer os requisitos de potência de saída definida em projeto. A velocidade de

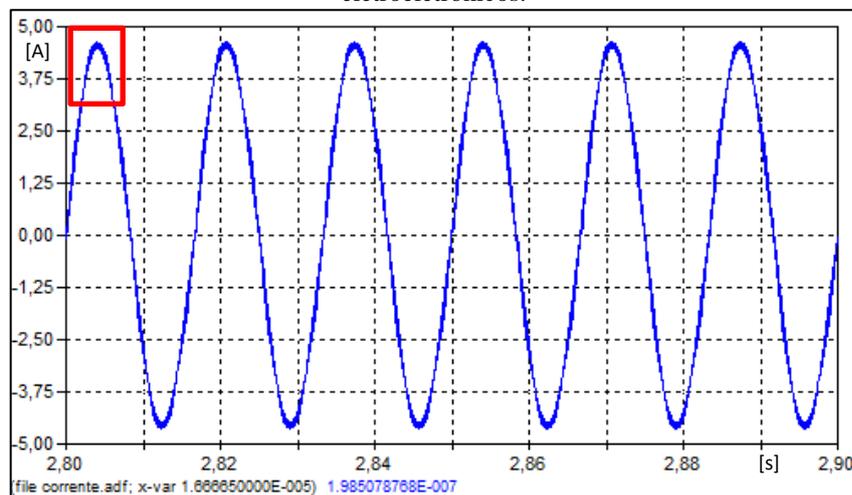
aquisição do sinal deve ser lenta em comparação ao controle de corrente, pois, a malha de tensão calcula a corrente de entrada necessária para manter a tensão V_{dc} no valor de referência V_{ref} .

Para os casos em que o controle de tensão não existe, um sinal de realimentação é integrado a malha da corrente para regulação do ciclo de trabalho da chave C_{h1} . Quando há controle da tensão na saída do conversor, V_{dc} atuará como um sinal de realimentação para um segundo controlador responsável por ajustar a tensão. O erro resultante da comparação de V_{dc} e V_{ref} , será enviado a malha de controle da corrente e, para melhor eficácia, seu valor deve ser próximo de zero.

O ciclo de trabalho do *PFC boost* determinará a quantidade de tempo que a corrente do indutor pode aumentar ou diminuir. Então, a malha de controle, ao variar o ciclo de trabalho da chave C_{h1} , ajustará a corrente média no indutor. Após processamento da situação atual da entrada do circuito de tensão em corrente, um sinal multinível será enviado pelo bloco PWM a chave e determinará se ela conduzirá ou não.

Para um sistema ideal alimentado por uma tensão puramente senoidal, a corrente esperada no indutor é de uma onda senoidal retificada e a corrente de entrada uma onda senoidal completa. Devido à natureza do chaveamento do sistema, as correntes controladas não serão exatamente iguais aos sinais de referências estipulados. Eles apresentarão presença de altas frequências conforme exemplifica a figura 3.23.

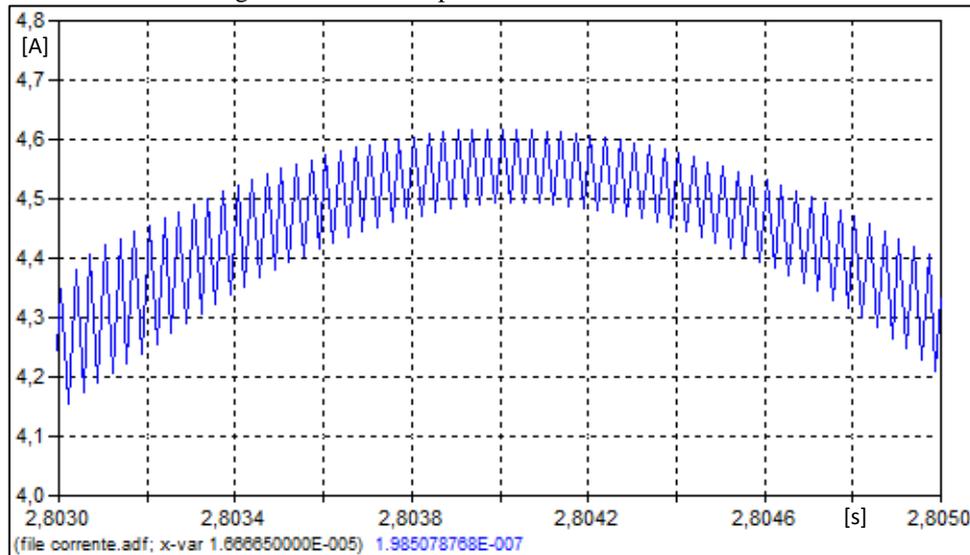
Figura 3.23 - Corrente de entrada típica de um circuito *boost* operando como *PFC* integrado em equipamentos eletroeletrônicos.



Fonte: Autor próprio.

A presença de alta frequência ocorre devido, durante um ciclo, ao acréscimo e decréscimo da corrente à medida que a corrente média é controlada pela chave C_{h1} para atingir a corrente de referência. A figura 3.24 mostra a expansão de uma pequena parte da corrente de alimentação, indicada na figura 3.23, após o controle do fator de potência. Percebe-se na imagem o acréscimo e decréscimo da corrente no indutor quando o sistema alterna entre os estados.

Figura 3.24 Visão expandida da corrente controlada.



Fonte: Autor Próprio.

Existem muitas maneiras de se obter uma forma de meia-onda para a corrente no indutor e existem muitos tipos diferentes de controladores integrados disponíveis que provém funções de controle para este propósito. Entretanto, a ação de comutação direcionada a pré-reguladores de potência é embasada em alguns métodos de chaveamentos, comuns de serem encontrados em circuitos eletrônicos diversos, e que tem suas características descritas a seguir. É importante ressaltar que, para melhor eficiência de operação, a chave C_{h1} somente pode apresentar o estado de totalmente fechada ou totalmente aberta, ou seja, somente a duração dos intervalos de tempo que ela conduz é ajustável pelo controle.

O controle ativo pode ser projetado utilizando cinco principais técnicas:

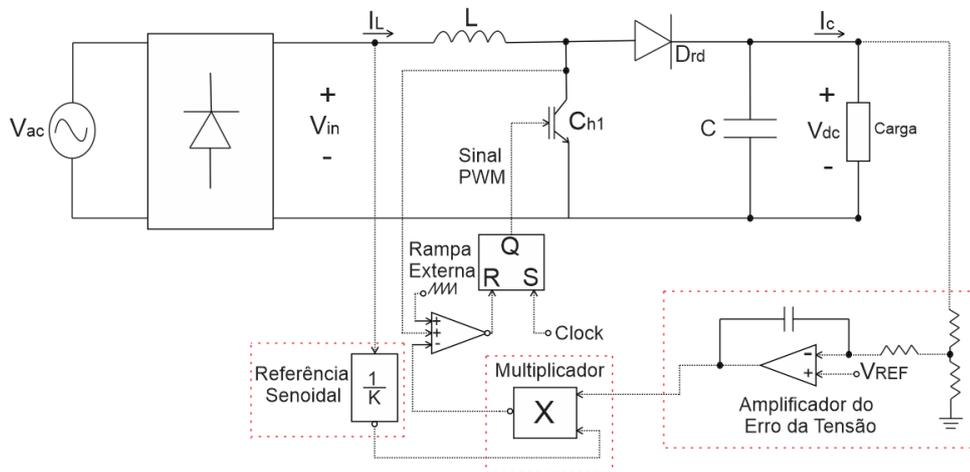
- Corrente de Pico;
- Corrente Média;
- Histerese;
- Fronteira;
- Corrente descontínua por PWM.

3.4.4.1 Controle por Corrente de Pico

Na figura 3.25 tem-se a esquematização de um circuito PFP *boost* que utiliza a técnica da corrente de pico para regulação do fator de potência. Nota-se na imagem que a referência senoidal de corrente é obtida multiplicando a tensão retificada (V_{in}), reduzida por um valor em escala menor que um, pelo erro proveniente da malha de controle de tensão. Nessa malha, ocorre a comparação entre a

tensão de referência (V_{ref}), definida no circuito de controle, com o sinal que efetivamente é constatado na carga (V_{dc}).

Figura 3.25 – Diagrama de controle de um circuito *PFC boost* operando pela técnica de corrente de pico.

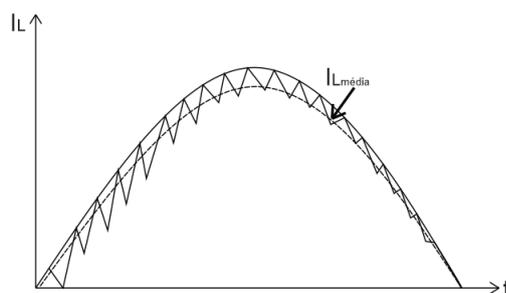


Fonte: Adaptado de [71].

O comutador, representado na imagem pelo bloco QRS, é ligado em uma frequência constante definida por um sinal de *clock* e é desligado quando a soma da rampa positiva da corrente do comutador e uma rampa externa de compensação atingem e/ou ultrapassam a referência de corrente senoidal. Desse modo, o sinal de referência é naturalmente sincronizado e será sempre proporcional à tensão da rede que é a condição necessária para obtenção do fator de potência unitário.

A figura 3.26 mostra a corrente resultante no indutor obtida pela técnica de controle descrita. Constata-se que o conversor opera exclusivamente em modo de corrente contínua no indutor, o que conseqüentemente reduz os valores de indutância requeridos ao projeto do conversor. Além disso, em modo contínuo, os diodos presentes no retificador de entrada podem ser especificados como dispositivos lentos que operam na frequência da tensão de alimentação e, por essa razão, serem mais econômicos. Por outro lado, o desligamento forçado do diodo do PFP exige um dispositivo de resposta mais rápida.

Figura 3.26 - Perfil da corrente para um circuito *PFC boost* operando pela técnica de controle por corrente de pico.



Fonte: [71].

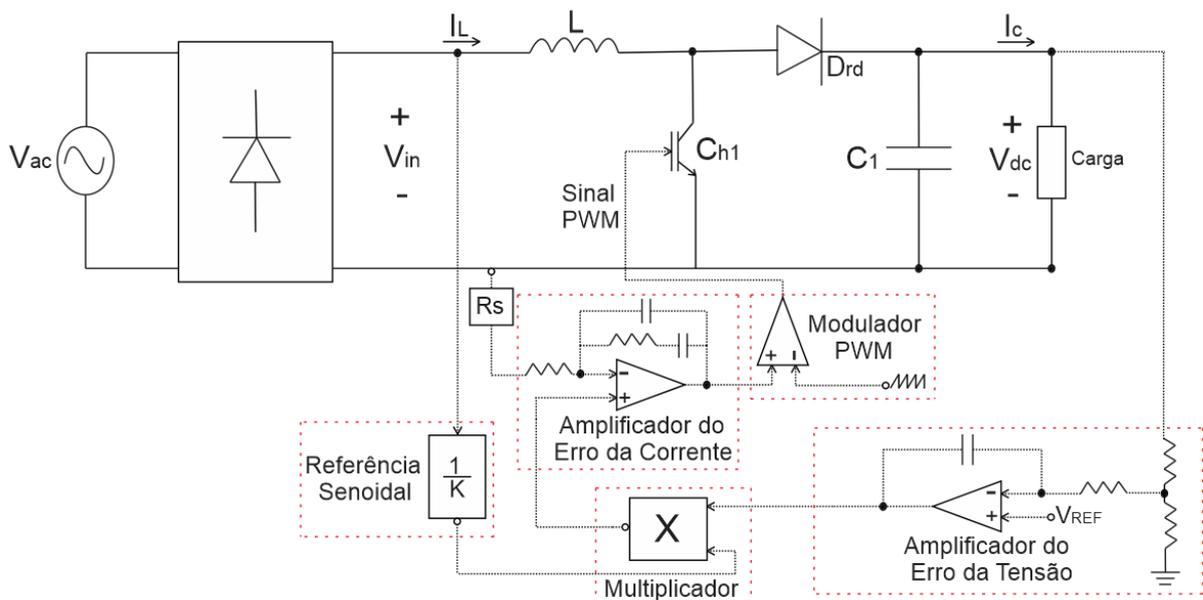
As vantagens do método ainda incluem a frequência de chaveamento constante provida pelo clock, menor perdas por sensoriamento de corrente, pois, não existe detecção na corrente do indutor, a não existência uma malha própria para o controle dessa corrente (não necessitando, portanto, de amplificador de erro e corrente e nem de um sinal de compensação) e a possibilidade da limitação da corrente que passa por C_{h1} , tendo em vista a captura do sinal da mesma para aplicação do controle.

Contudo, a técnica utilizada provoca algumas desvantagens para o conversor *boost*, como por exemplo: oscilações sub-harmônicas em ciclos de trabalho maiores que 50% (implicando assim na necessidade de uma rampa de compensação), aumento da distorção de corrente na sob condições tensões de alimentação muito altas e cargas leves (piorada pela presença da rampa de compensação) e maior sensibilidade a ruídos de comutação da chave.

3.4.4.2 Controle por Corrente Média

O método de controle que permite uma melhor forma de onda da corrente de entrada do *boost*, é o controle por corrente média representado na figura 3.27. Nesse caso, a corrente que flui pelo indutor é captada pelo sensor (R_s), filtrada e enviada a um amplificador de erro de corrente, cuja saída aciona um modulador PWM que, por sua vez, envia um sinal de dois níveis (0 ou 1) a chave (C_{h1}). Agindo dessa maneira, a malha de corrente tende a minimizar o erro entre a corrente média de entrada e sua referência. O sinal modulador PWM aplicado nessa técnica é, geralmente, uma onda dente de serra apresentando uma frequência de 20 a 50kHz[72].

Figura 3.27 – Diagrama de controle para um circuito *PFC boost* operando pela técnica de corrente média.



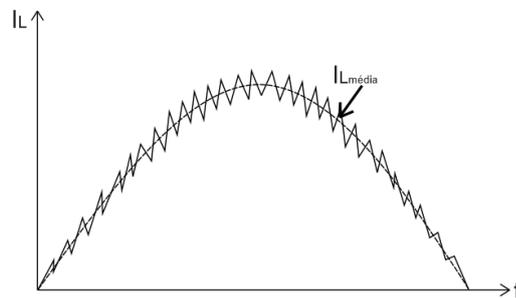
Fonte: [71].

A referência senoidal para a corrente é obtida da mesma forma descrita no controle por corrente de pico. Desse modo, a malha de tensão calculará a corrente de entrada de magnitude (I_{ref})

necessária para manter a tensão contínua no valor de referência V_{ref} . O conversor somente funcionará em modo de condução contínua e, portanto, as mesmas considerações feitas com relação ao controle de corrente de pico são aqui aplicadas.

A corrente resultante do método por corrente média é ilustrada na figura 3.28. Pode-se observar uma melhor simetria no chaveamento em torno da corrente média de referência, o que advém da minimização do erro entre a corrente controlada e a sua referência. Próximo do zero de tensão, o ciclo de trabalho é próximo de um, o que reduz, conseqüentemente, o ângulo morto da corrente.

Figura 3.28 - Perfil de corrente controlada de um circuito PFC *boost* operando pela técnica de controle por corrente média.



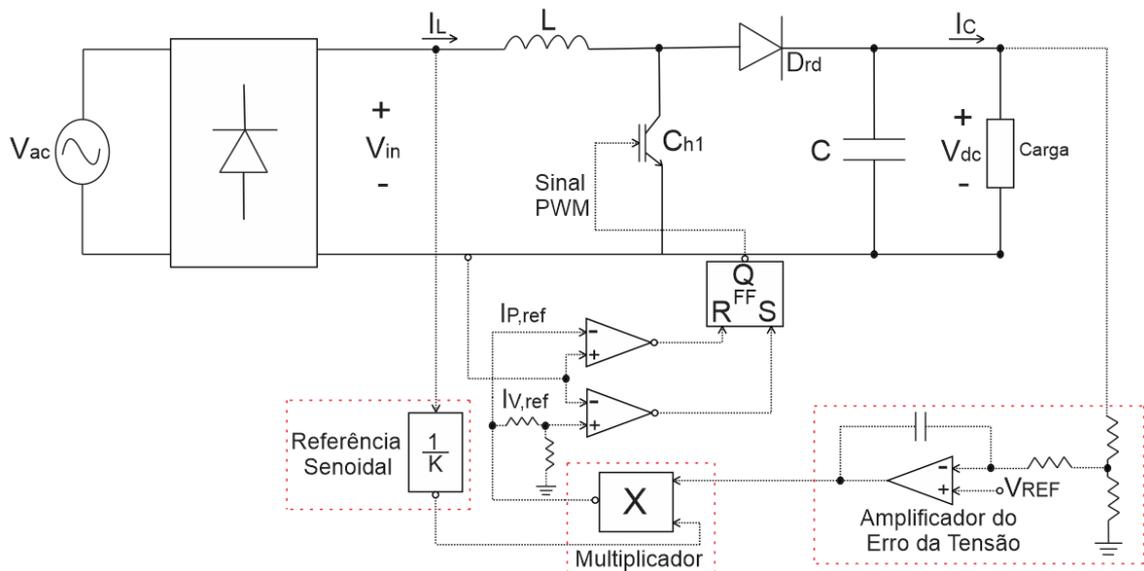
Fonte: [71].

Apesar da técnica de controle por corrente média ser parecida com a de corrente de pico, ela possui algumas vantagens em relação à anterior que incluem um melhor aspecto da corrente controlada de entrada nos equipamentos eletroeletrônicos, a aplicação de uma frequência de chaveamento constante definida pela onda moduladora e sem a necessidade de rampa de compensação o que, conseqüentemente, reduz os custos de sua implementação nos equipamentos e um controle menos sensível a ruídos de comutação devido a existência de um caminho de realimentação da corrente. Além disso, a implementação do controle por corrente média proporciona uma menor susceptibilidade a variações de tensão na entrada do equipamento alvo, característica ideal para equipamentos com elementos rotativos como é o caso dos condicionadores de ar.

3.4.4.3 Controle por Histerese

O controle do PFC *boost* operando pelo controle por histerese é ilustrado na figura 3.29.

Figura 3.29 – Diagrama de controle de um circuito *PFC boost* operando pela técnica histerese.

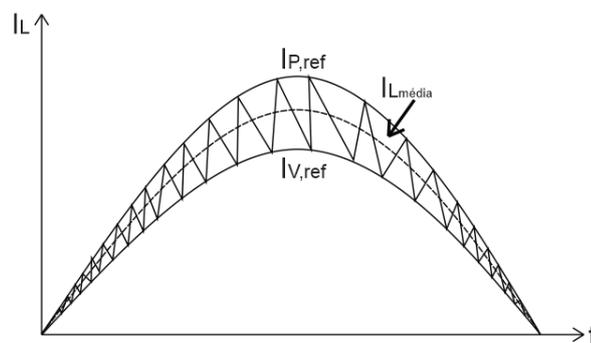


Fonte: [71].

De acordo com esta técnica de controle, dois sinais senoidais referência de corrente, representados na imagem como $I_{p,ref}$ e $I_{v,ref}$, são gerados da mesma forma descrita nos dois métodos anteriores. O sinal $I_{p,ref}$ define o valor de referência superior para a corrente do indutor enquanto que $I_{v,ref}$ impõe o limite inferior, também chamado de vale. A chave Ch_1 conduzirá no instante em que a corrente no indutor tiver valor abaixo da referência $I_{v,ref}$ e abrirá quando a corrente no indutor fica acima da referência $I_{p,ref}$. Como resultado, tem-se nesse caso, um controle com frequência variável de chaveamento que mudará conforme alteração no valor das referências.

O método descrito é aplicável somente quando I_L estiver em MCC. A corrente característica para esta técnica de controle é ilustrada na figura 3.30. Nota-se que a frequência do chaveamento é alterada durante o ciclo conforme a mudança dos limites inferior ($I_{v,ref}$) e superior ($I_{p,ref}$) de corrente.

Figura 3.30 - Perfil da corrente controlada de um circuito *PFC boost* operando pela técnica de controle por histerese.



Fonte: [71].

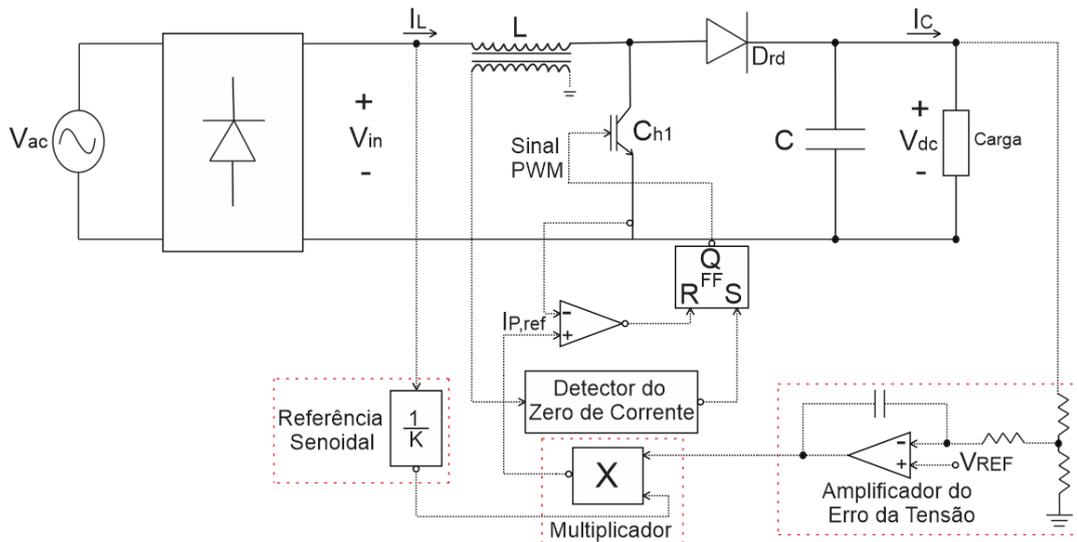
O controle por histerese promove uma corrente de alimentação com um baixo nível de distorção harmônica e não requer uma rampa de compensação para realizar a comutação de Ch_1 . No

entanto, o controle é sensível a ruídos de comutação e necessita de sensoriamento na corrente do indutor para o seu funcionamento.

3.4.4.4 Controle por Fronteira

O esquema do controle por fronteira para o PFP *boost* é representado na figura 3.31. O tempo de ativação da chave é mantido constante durante o ciclo da tensão e a chave é ligada somente quando a corrente no indutor atinge o zero de magnitude. Desse modo, o conversor operará na fronteira entre o modo contínuo e descontínuo de corrente do indutor. Com o diodo de roda livre sendo desligado suavemente e C_{h1} conduzindo no zero de corrente, as perdas de comutação serão reduzidas. Por outro lado, os altos picos de corrente aumentam as tensões para os componentes do dispositivo e as perdas de condução podem exigir filtros de entrada robustos.

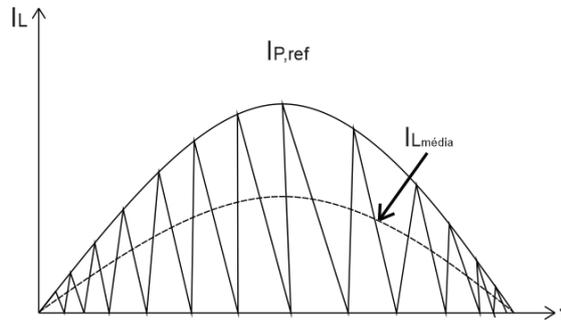
Figura 3.31 – Diagrama de controle de um circuito *PFC boost* operando pela técnica por fronteira.



Fonte: [71].

Este tipo de controle é um caso particular do controle por histerese no qual a referência inferior $I_{V,ref}$ é zero em todos os instantes. A corrente de entrada instantânea é representada na figura 3.32. Ela é constituída por uma sequência de triangulas cujos picos são proporcionais a tensão de entrada. Consequentemente, a corrente média se torna proporcional a tensão de alimentação sem a necessidade da modulação do ciclo de trabalho da chave.

Figura 3.32 - Perfil da corrente controlada de um circuito *PFC boost* operando pela técnica de controle por fronteira.



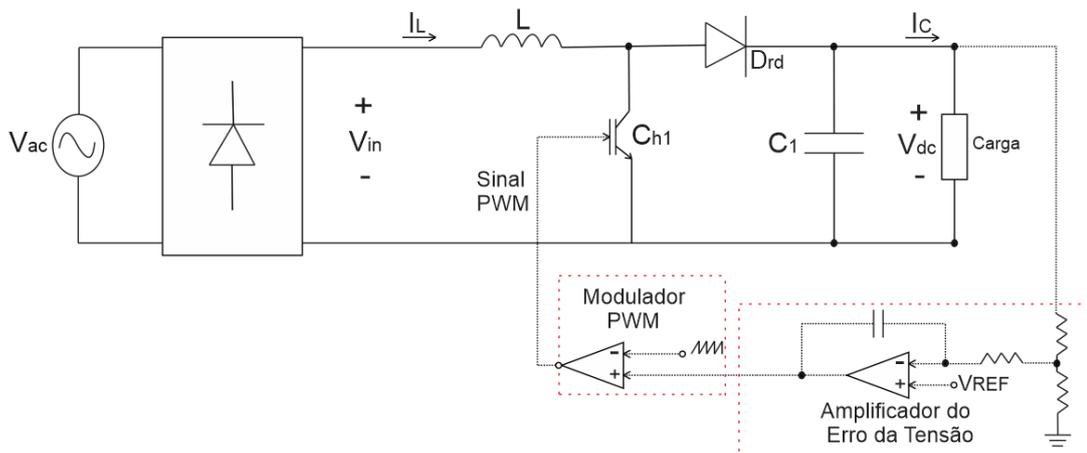
Fonte: [71].

Para detectar o zero de corrente no indutor, o controle por fronteira necessita do sensoriamento da sua tensão. A configuração pode ser sensível a ruídos de comutação e chave opera em frequência variável.

3.4.4.5 Controle de Corrente Descontínua por PWM

O esquema do controle pela técnica descontínua de corrente para o PFP *boost* é representado na figura 3.33.

Figura 3.33 – Diagrama de controle circuito *PFC boost* operando pela técnica PWM descontínuo.



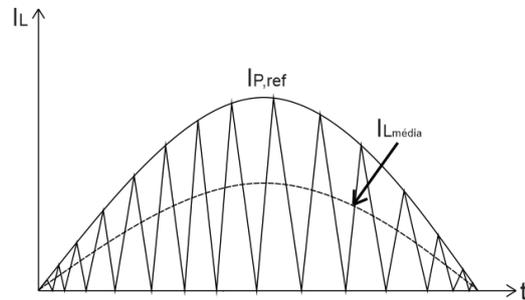
Fonte: [71]

Nessa abordagem, a malha de controle de corrente é completamente eliminada para que a chave opere em frequência e tempo constante. A configuração descontínua é mais adequada em topologias alternativas como o flyback, Cuk e Sepic. Para o conversor *boost*, a técnica pode causar distorções harmônicas na corrente de alimentação dos equipamentos e por isso é muito pouco utilizada.

A figura 3.34 mostra a corrente controlada pela técnica PWM descontínua. Percebe-se que os sinais triangulares originados da comutação possuem a mesma frequência. Pela ausência da malha de

controle da corrente, a principal vantagem oferecida pela técnica é a simplicidade de implementação do controle para conversores o que também reduz os custos da sua implementação em equipamentos.

Figura 3.34 - Perfil da corrente controlada de um circuito *PFC boost* operando com a técnica de controle descontinuo.



Fonte: [71].

3.5 Inspeção Física de um Modelo de Condicionador de Ar *Inverter*

Conhecido as principais características do conversor *boost*, esta etapa tem por objetivo apresentar os detalhes estruturais físicas do condicionador de ar *inverter* utilizado para modelagem computacional. Conforme descrito no tópico 3.2, para realizar a modelagem do aparelho é necessário a análise das unidades evaporadora e condensadora separadamente, onde são ilustradas na figura 3.35.

Figura 3.35 - Unidade evaporadora e condensadora do condicionador de ar *inverter* utilizado na modelagem.



Fonte: Autor próprio.

Na tabela 3.2 é mostrado os principais dados elétricos de placa referentes ao equipamento estudado.

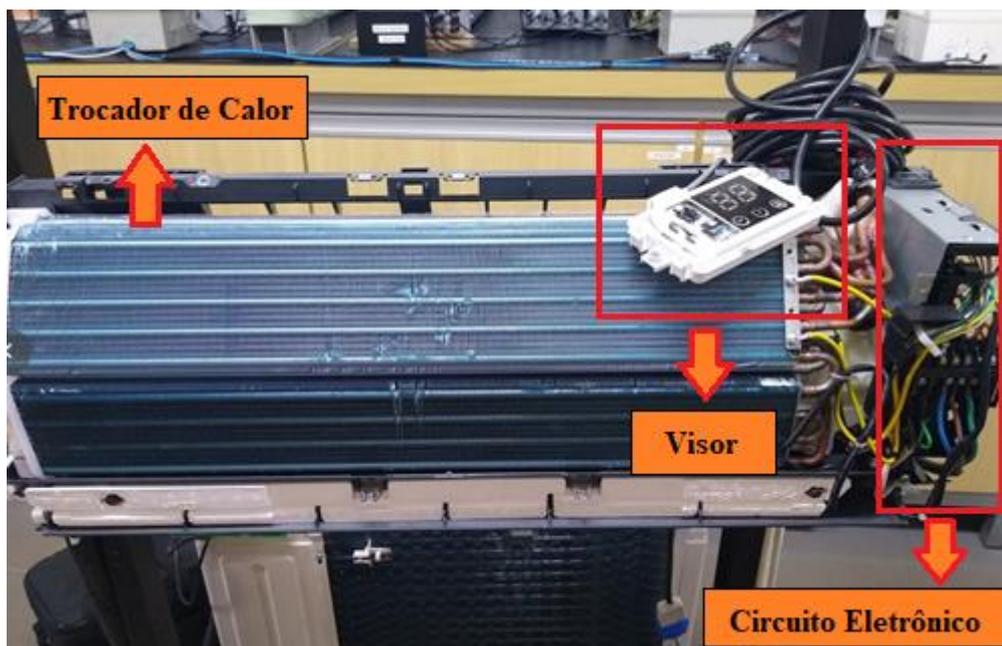
Tabela 3.2 – Dados de placa do condicionador de ar utilizado na modelagem computacional

Unidade	Condensadora	Evaporadora
Capacidade de Refrigeração	9000 BTUs	--
Potência Nominal (W)	1289	51
Corrente Nominal (A)	5,4	0,4
Potência Elétrica de Refrigeração (W)	814	--
Tensão (V)	220	220
Frequência	60	60
Compressor	Rotativo	--

Fonte: [73]

A figura 3.36 destaca a vista interna frontal da unidade evaporadora com os principais componentes mecânicos e elétricos constatados na estrutura. Observa-se que a unidade é composta pelo trocador de calor, o visor e sua placa eletrônica.

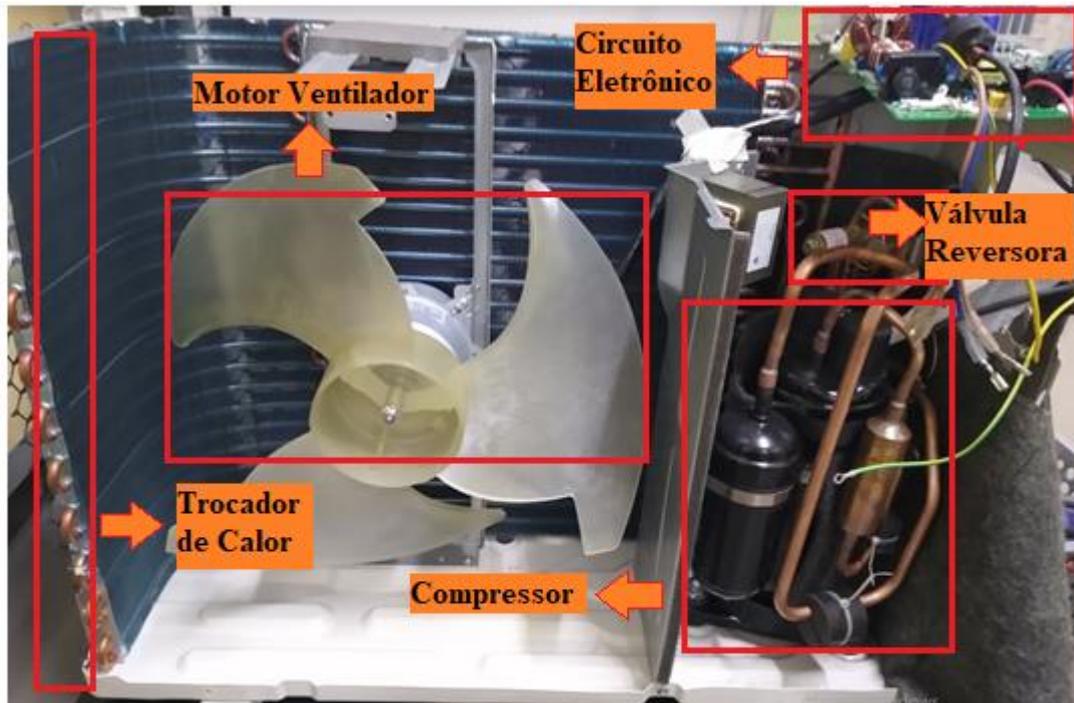
Figura 3.36 - Unidade evaporadora do condicionador de ar *inverter* utilizado para a modelagem.



Fonte: Autor próprio.

Realizando o processo análogo para a condensadora, tem-se figura 3.37 a vista interna frontal aberta da unidade. Os principais componentes verificados são: o trocador de calor da unidade, o motor ventilador, o tubo capilar, o filtro de ar, o compressor e a placa eletrônica.

Figura 3.37 - Vista frontal aberta da unidade condensadora do condicionador de ar *inverter*.



Fonte: Autor próprio.

Observa-se pela tabela 3.2 que a maior contribuição para a corrente de alimentação requerida da rede vem da unidade condensadora. Uma vez realizada a inspeção física da placa eletrônica dessa unidade, será possível correlacionar o circuito eletrônico de potência verificado no equipamento com os retratados na seção 3.3.

3.6 Estratégia para Modelagem do Condicionador de Ar *Inverter*

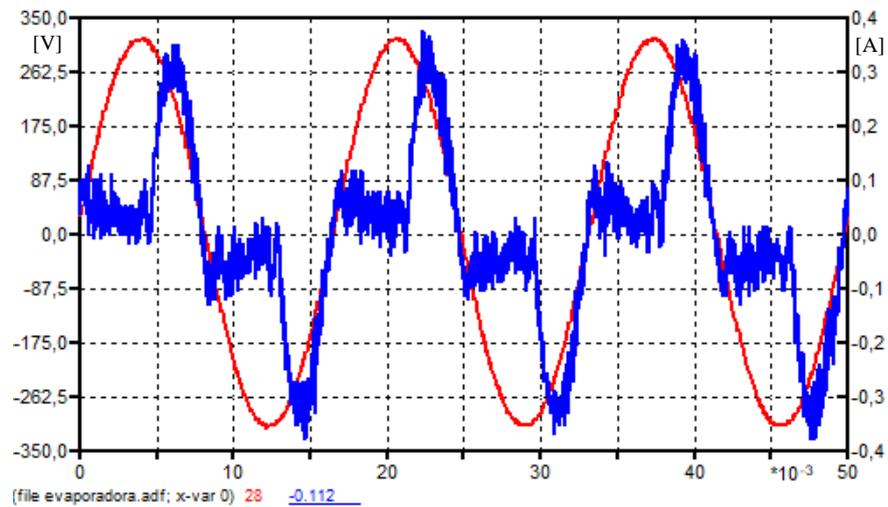
Em sequência têm-se as estratégias adotadas para o desenvolvimento dos modelos computacionais representativos das unidades evaporadora e condensadora anteriormente identificadas.

3.6.1 Modelagem e implementação computacional da evaporadora.

A unidade evaporadora, por ser basicamente composta por um circuito eletrônico, torna ela a mais sensível a distúrbios advindos da rede elétrica. Sabe-se também que a corrente exigida para alimentar a unidade evaporadora é insignificante em relação a condensadora, conforme já abordado na seção 3.2. A unidade em foco é responsável somente pelo envio do comando necessário para ligar ou desligar o compressor em hermético, sinal esse que depende do ajuste de temperatura realizado pelo usuário. Desse modo, observa-se que a magnitude da corrente na entrada do equipamento encontra-se na faixa dos miliamperes. A título de ilustração, tem-se na figura 3.38, o valor da

tensão(em vermelho) e corrente (em azul) da unidade evaporadora após conexão do condicionador de ar a uma fonte controlada em laboratório.

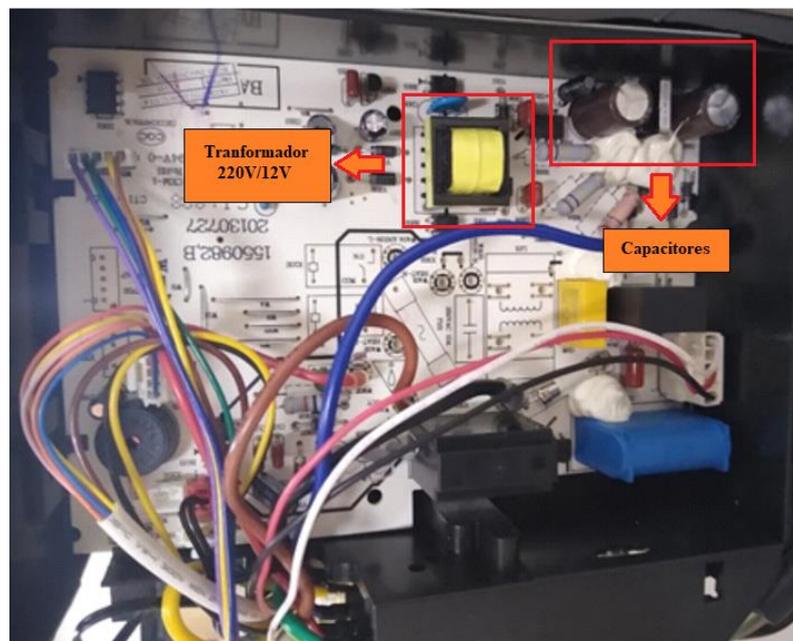
Figura 3.38 – Medição experimental da corrente de alimentação da unidade evaporadora do condicionador de ar.



Fonte: Autor próprio.

Pode-se adotar de acordo com os fatos anteriores que a realização da inspeção da placa eletrônica da unidade é um caminho possível para a construção do modelo computacional da evaporadora. Diante disso, tem-se na figura 3.39, o circuito eletrônico do modelo em questão.

Figura 3.39 - Vista frontal da placa eletrônica da unidade evaporadora do condicionador de ar.

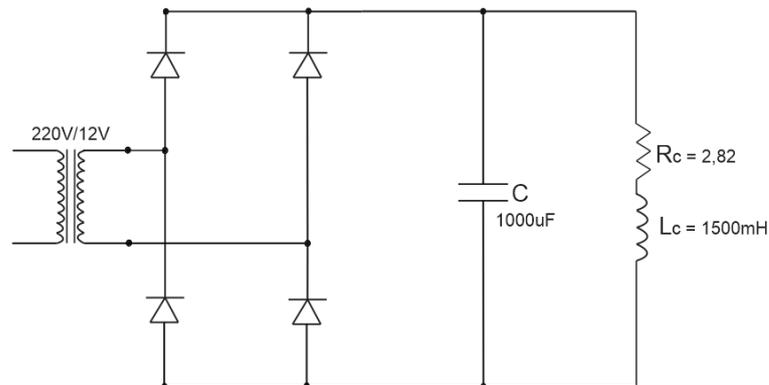


Fonte: Autor próprio.

Por não ser tão influente na composição da corrente de entrada e tendo em consideração as análises para as unidades evaporadoras antes realizadas, objetivou-se simplificar a modelagem da

unidade a sintetizando em um simples circuito retificador com uma carga indutiva no barramento de corrente contínua semelhante ao procedimento realizado no modelo computacional para o *split* convencional. A corrente com perfil indutivo deve-se a alimentação do circuito de controle de temperatura a ser enviado pela unidade condensadora. Assim, representado na figura 3.40, encontra-se o diagrama elétrico da unidade condensadora com os valores adotados para os elementos do circuito. Os elementos foram especificados de forma a atingir a potência de 51W.

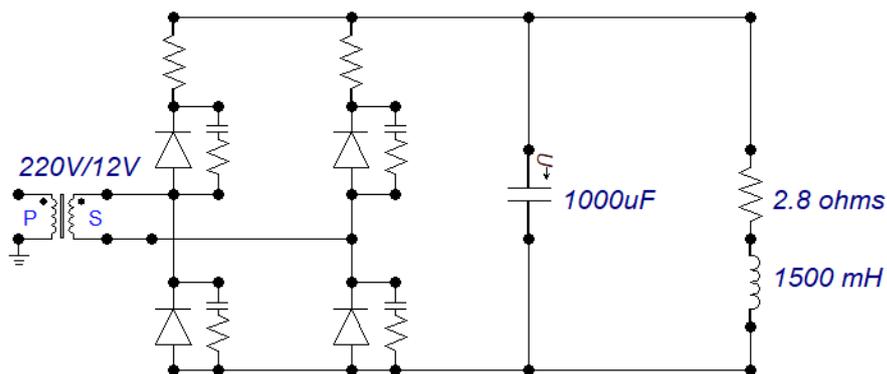
Figura 3.40 - Diagrama elétrico equivalente para a unidade evaporadora do condicionador de ar.



Fonte: Autor próprio.

A partir da identificação acima fica estabelecido a estrutura do circuito equivalente a ser inserido no software de simulação *ATPDraw* conforme a figura 3.41.

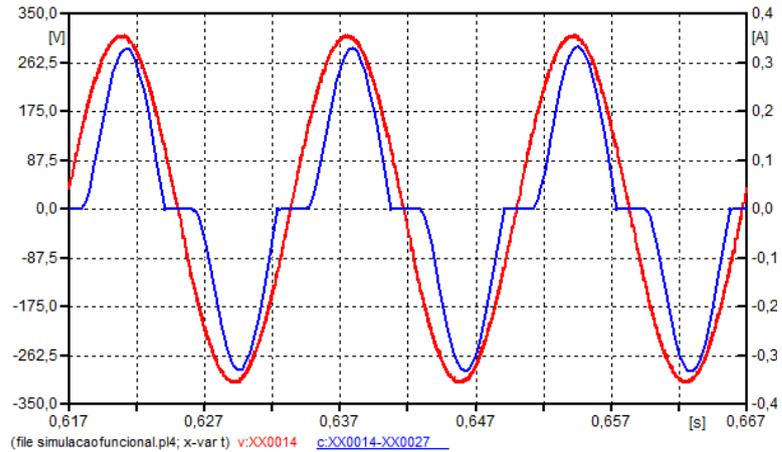
Figura 3.41 - Equivalente computacional da unidade evaporadora implementado ao software *ATPDraw*



Fonte: Autor próprio.

O perfil resultante da corrente referente a simulação do circuito da unidade evaporadora é mostrado na figura 3.42. É observado um valor de pico de aproximadamente 0,34 amperes.

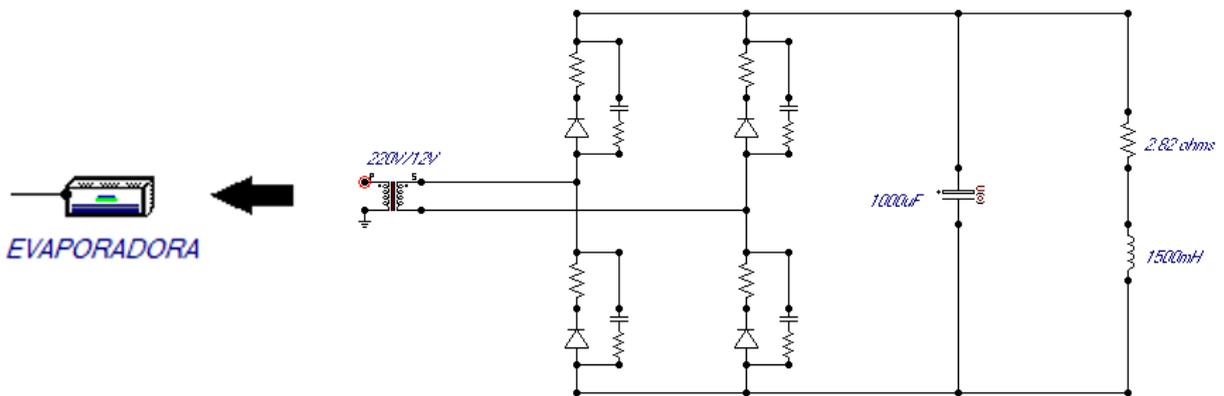
Figura 3.42 - Perfis de tensão e corrente para unidade evaporadora obtidos computacionalmente.



Fonte: Autor próprio.

Elaborado o modelo da evaporadora, o circuito foi agrupado em bloco específico para a unidade. A sua representação é mostrada na figura 3.43.

Figura 3.43 - Modelo computacional implementado para a unidade evaporadora do condicionador de ar.

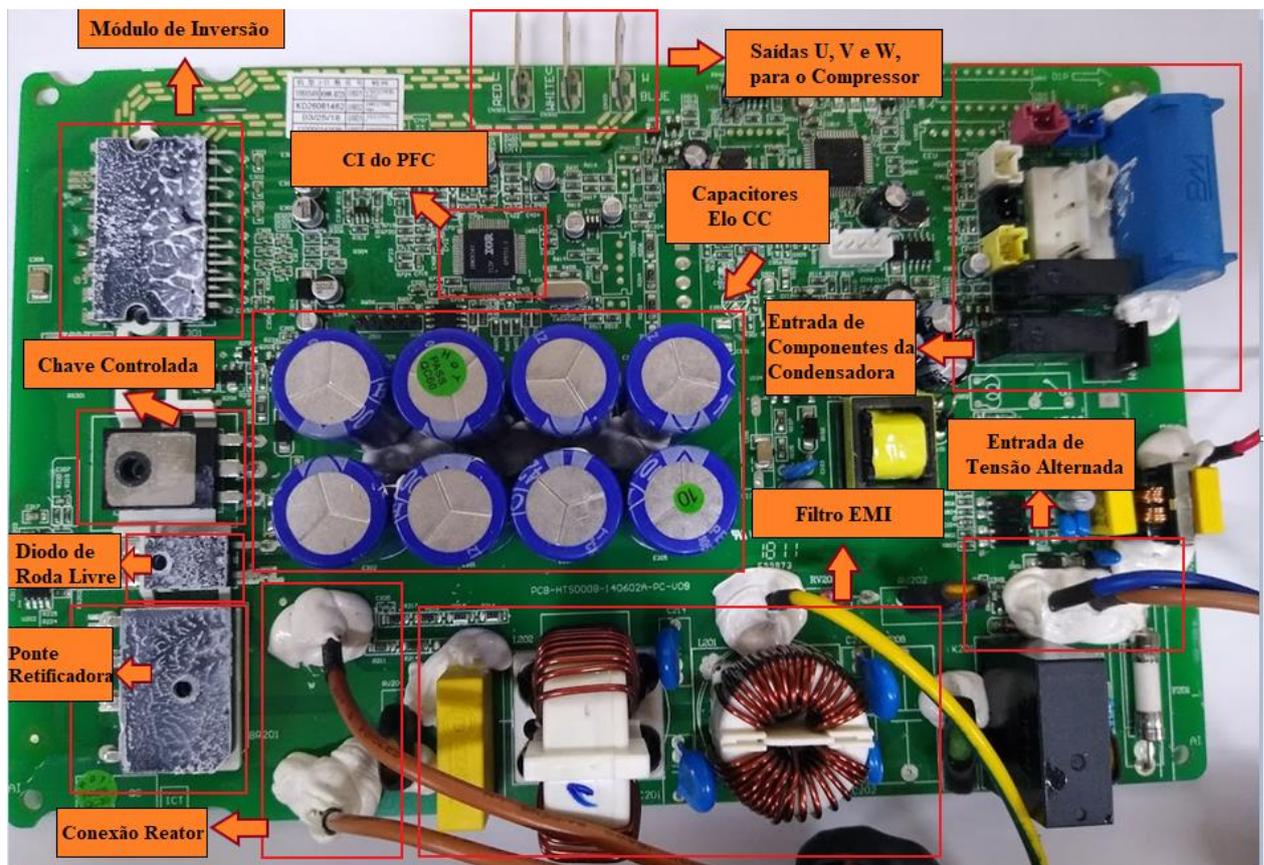


Fonte: Autor próprio.

3.6.2 Modelagem e implementação computacional da condensadora.

Baseado na estrutura típica de uma unidade condensadora *inverter* descrita no item 3.2.2 têm-se a seguir, nas figuras 3.44, a identificação dos principais componentes do circuito eletrônico da placa do equipamento.

Figura 3.44 - Placa eletrônica da unidade condensadora do condicionador de ar com a identificação dos seus principais componentes.



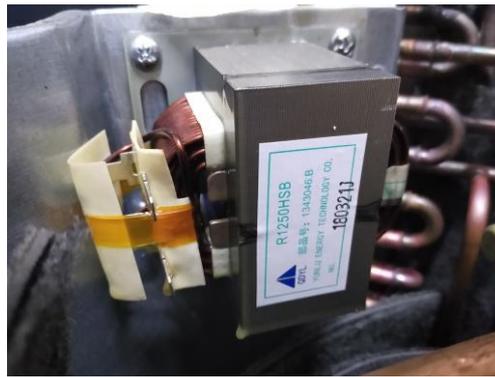
Fonte: Autor próprio.

Logo ao lado da entrada do circuito eletrônico percebe-se a existência de um filtro para evitar interferência eletromagnética ou EMI. Ele é utilizado para conter as interferências de sinal causadas pelo circuito do condicionador de ar que podem afetar televisores, rádios, telefones e outros equipamentos de telecomunicações que compartilham a rede a qual o aparelho está inserido. Os capacitores e indutores projetados para o filtro possuem valores baixos, na ordem de μH e nC e, por essa razão, eles não exercem influência significativa na composição da corrente de alimentação, portanto, sua implementação ao modelo foi desconsiderada.

A ponte retificadora foi localizada logo após o filtro EMI, sendo inserida a placa eletrônica por meio de um circuito integrado. Desse modo, será considerado na modelagem computacional, uma ponte retificadora de onda completa composta por quatro diodos ideais oferecidos pelo programa ATP.

No elo de corrente contínua o primeiro elemento verificado é o reator utilizado para regulação do fator de potência. A figura 3.45 ilustra o aspecto físico do componente.

Figura 3.45 - Reator conectado a unidade condensadora e utilizado no circuito controlador do fator de potência.

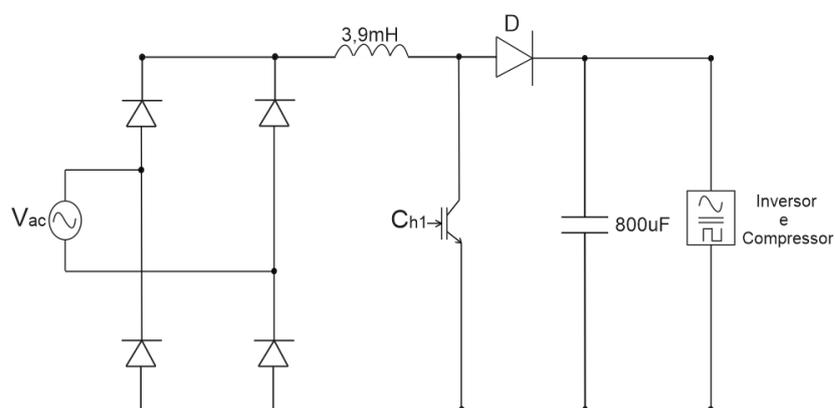


Fonte: Autor próprio.

Conforme consta na figura 3.44, a chave eletrônica empregada para o controle do fator de potência encontra-se ao lado da ponte retificadora. O diodo de roda livre do barramento CC e o módulo de inversão da tensão (que alimenta o compressor) estão localizados ao lado desse dispositivo. Agrupando todas as informações coletadas chega-se à conclusão que o circuito da unidade condensadora do condicionador de ar analisado trata-se de um conversor PFP elevador de tensão convencional.

Dando seguimento, o próximo passo para construção do modelo computacional é medir os valores do reator do *boost* e dos capacitores do elo CC, importantes para a implementação do circuito regulador de fator de potência. O reator analisado tem aproximadamente 3,9mH de indutância e o conjunto de 8 capacitores de filtro do elo CC em paralelo apresentam 100uF cada resultando assim em um valor equivalente de 800uF. Por conseguinte, é obtido o diagrama elétrico da condensadora do condicionador de ar, ilustrado na figura 3.46.

Figura 3.46 - Diagrama elétrico do circuito equivalente da unidade condensadora do condicionador de ar.



Fonte: Autor próprio.

Para as definições finais da estratégia, foram investigadas informações descritas nos circuitos integrados da placa eletrônica. O objetivo da análise era encontrar o método de controle do *PFC* e a

etapa de inversão aplicados ao condicionador de ar. As informações em detalhes dos componentes são mostradas na figura 3.47.

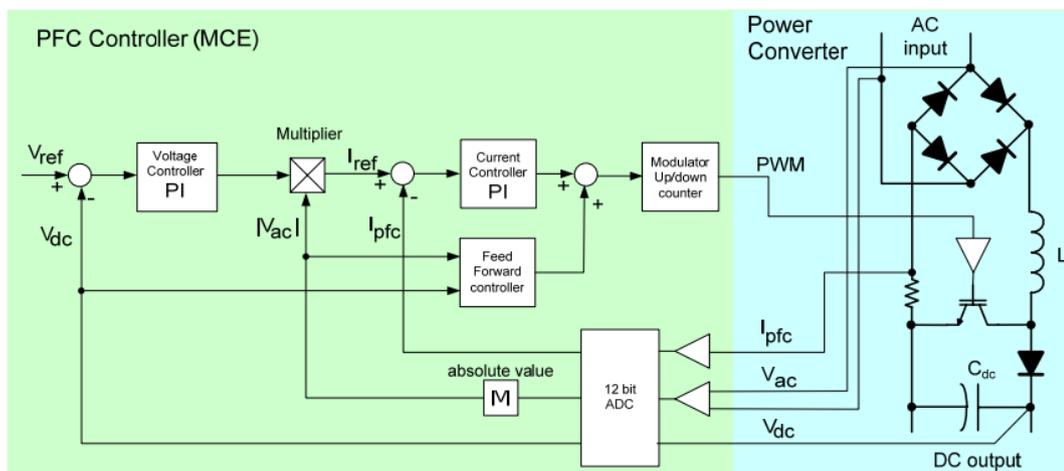
Figura 3.47 - Circuito integrado responsável pelo controle de fator de potência do condicionador de ar.



Fonte: Autor próprio.

O componente destacado trata-se do microcontrolador IRMCK343, dedicado ao controle da tensão e corrente do *PFC* e responsável pelo envio do sinal PWM ao MOSFET. Isso posto, ao investigar o datasheet do componente encontrou-se diagrama completo da técnica de controle utilizada na regulação do fator de potência do equipamento, representado na figura 3.48.

Figura 3.48 - Circuito de controle para o *boost PFC* do condicionador de ar a ser modelado.



Fonte: [74].

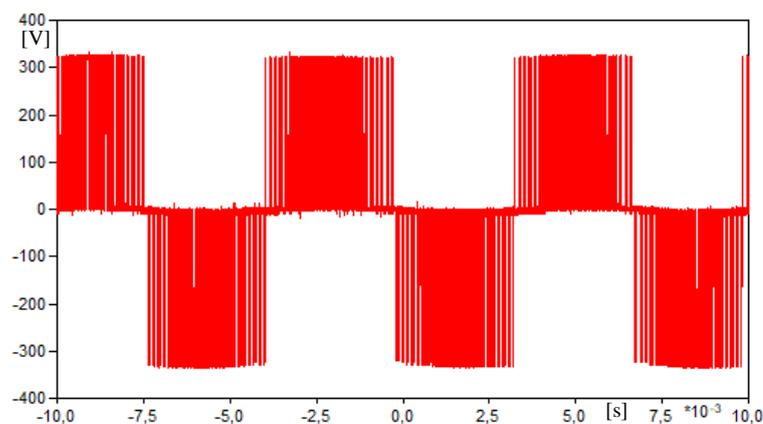
Após análise do diagrama, constatou-se que o controle empregado no *PFC* da unidade condensadora é o controle por corrente média, pois, existem as malhas de tensão e corrente com seus respectivos amplificadores de erro os quais estão representados pelos controladores proporcionais e integrais. A utilização da malha referente ao *feedforward* tem o propósito de compensar as variações de tensão que ocorrem na entrada do equipamento enviando um sinal de ajuste para a tensão contínua resultante da malha de tensão. Contudo, por questões de simplificação, sua função neste trabalho foi integrada na própria malha de controle de tensão através do ajuste dos ganhos no controlador do

modelo. Se a malha de *feedforward* fosse implementada, estes ganhos teriam valores diferentes e seria necessário adequar os ganhos de um terceiro controlador próprio da malha *feedforward*.

O circuito *boost*, possuindo o controle da tensão de saída, fornece ao módulo do inversor a característica de potência constante. Caso haja alguma variação dinâmica da tensão, o módulo de controle do *PFC*, acima destacado, tem a capacidade de regular automaticamente a tensão para as condições normais de funcionamento. Sendo assim, a referida etapa pode ser substituída por uma carga representativa sem afetar a resposta da entrada do condicionador de ar.

Para compreender melhor o microcontrolador referente ao módulo IPM, foi realizada uma medição de tensão que alimenta o compressor. O perfil resultante é ilustrado na figura 3.49.

Figura 3.49 - Tensão invertida na entrada do compressor do condicionador de ar obtida via medição laboratorial.

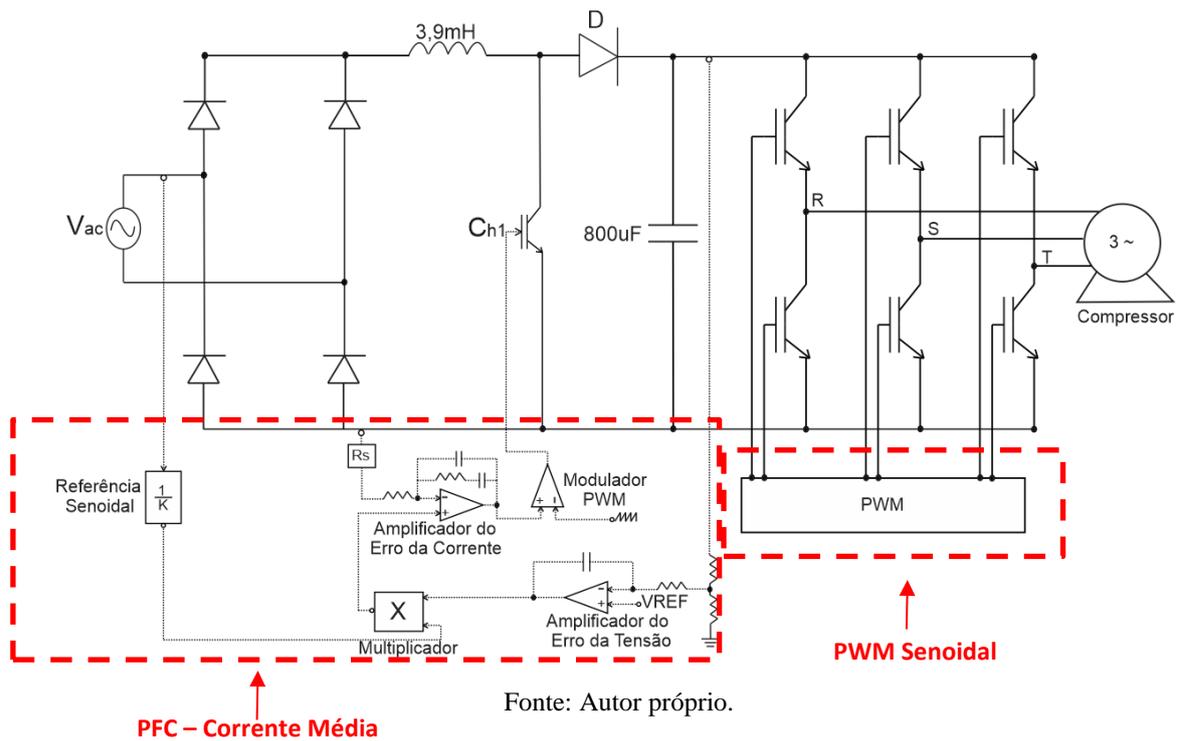


Fonte: Autor próprio.

De acordo com a figura 3.49 foi constatado que a tensão que alimenta o compressor é alternada graças a modulação por largura de pulso (PWM) senoidal, com valor eficaz aproximadamente de 311 volts, mesmo sendo o circuito do elo CC um elevador de tensão. Essa característica confirma a entrega de potência constante ao compressor. Além disso, nota-se que o sinal modulador das chaves possui características de uma forma de onda senoidal, pois, a comutação das chaves é mais intensa no pico do sinal de tensão de um semiciclo, enquanto que nas suas extremidades o intervalo entre as comutações é maior. Assim, conforme as técnicas de inversão abordadas anteriormente na seção 3.2, utilizou-se para a modelagem computacional da condensadora à modulação PWM escalar.

Com todas as informações obtidas é possível chegar ao diagrama elétrico da condensadora a ser inserido no software computacional ATPDraw, representado na figura 3.50.

Figura 3.50 - Circuito equivalente final para a unidade condensadora do condicionador de ar.



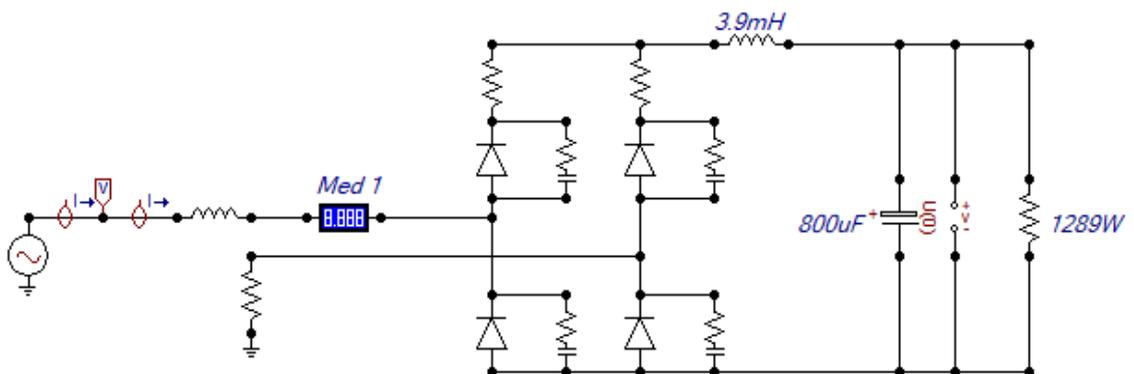
Elaborada a estratégia para modelagem da condensadora do condicionador de ar *inverter*, a implementação no ATPDraw foi dividida em ter etapas distintas:

- Retificação;
- Filtragem;
- Inversão.

3.6.2.1 Etapa de Retificação

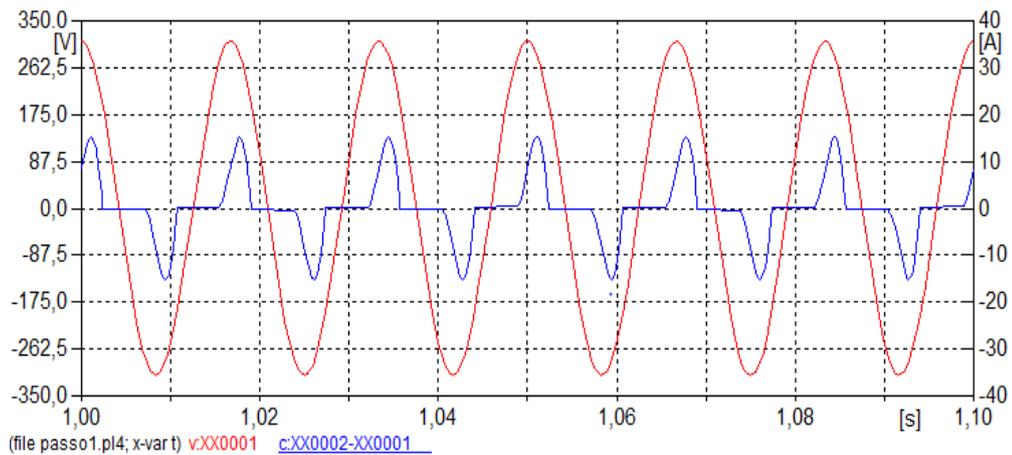
Baseado no diagrama elétrico obtido pela inspeção física, em seguimento, o circuito representado na figura 3.51 foi montado no ATP.

Figura 3.51 - Implementação computacional da etapa de inversão referente a unidade condensadora.



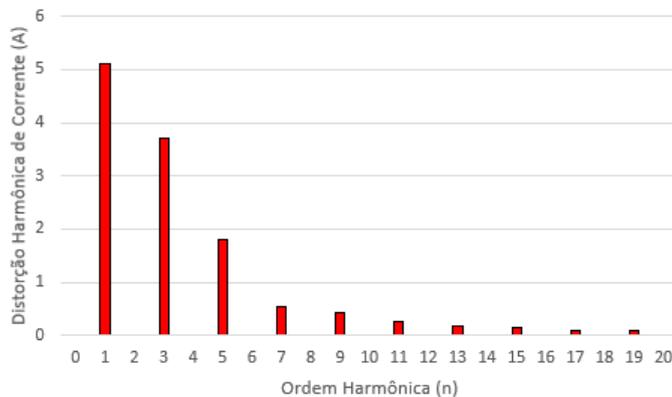
Trata-se de um circuito representativo de uma fonte chaveada comum sem a presença de filtragem e inversão. A carga, representada pela resistência na saída, possui a potência máxima verificada na unidade condensadora de 1289 watts. Como a filtragem não foi implementada nessa etapa, a corrente de alimentação na entrada possui uma grande distorção harmônica, conforme figuras 3.52 e 3.53.

Figura 3.52 - Perfis de tensão e corrente para a etapa de retificação obtidos computacionalmente.



Fonte: Autor próprio

Figura 3.53 - Espectro harmônico da corrente da unidade condensadora apresentando somente a etapa de retificação.

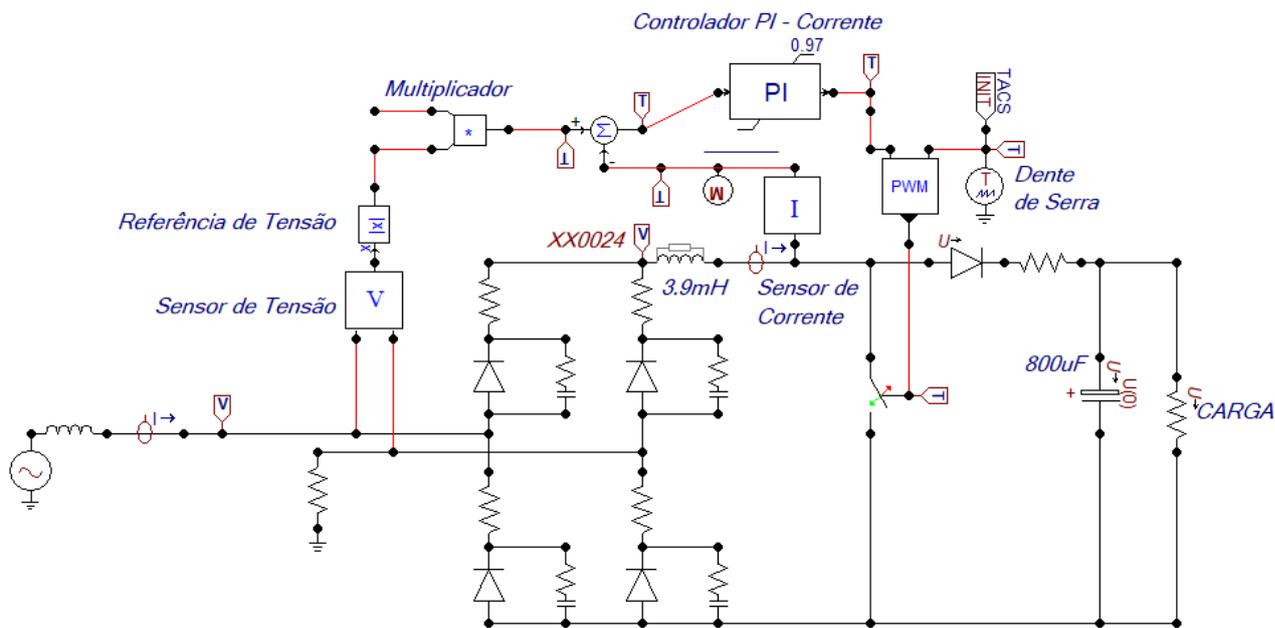


Fonte: Autor próprio.

3.6.2.2 Etapa de Filtragem

Modelado a etapa de retificação, é acrescentado então o conversor CC-CC elevador de tensão. Este controle do *boost*, conforme especificado, possui características de operação por corrente média de acordo com o diagrama obtido no *datasheet* do microcontrolador verificado na figura 3.48. Assim, a figura 3.54, foi implementada a malha de controle de corrente no simulador ATPDraw.

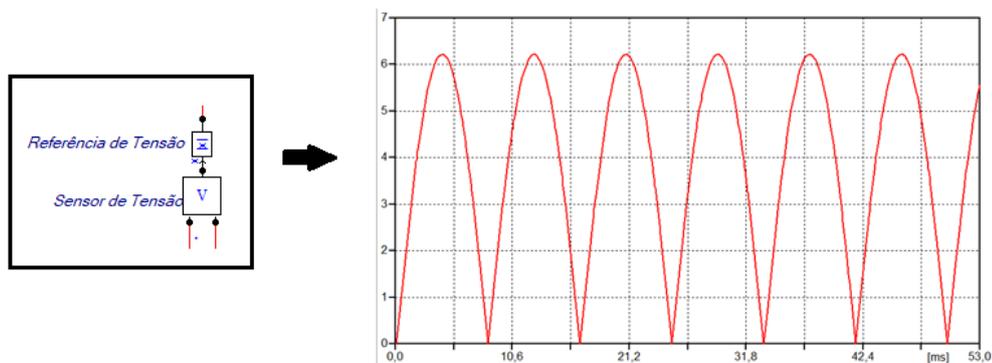
Figura 3.54 - Implementação computacional da malha de controle da corrente do PFC boost.



Fonte: Autor próprio

A tensão de entrada deve ser obtida para ser a referência de ângulo de fase e forma de onda para a corrente de alimentação. Para isso, utilizou-se um sensor de tensão, projetado pela ferramenta TACS, logo antes do retificador e depois calculado o seu módulo com a ferramenta matemática Fortran fornecida pelo ATP que dará o aspecto de meia onda na referência de corrente. O ganho do sensor de tensão é baixo e tem o propósito de reduzir a magnitude do sinal entregue ao controle fazendo-o ficar condizente com um sistema real. A figura 3.55 demonstra a corrente de referência para o indutor, obtida com um ganho de sensor de valor 0,02. O valor de pico do sinal é de aproximadamente 6,2A.

Figura 3.55 - Sinal de referência de tensão para a malha de controle de corrente do circuito.



Fonte: Autor próprio

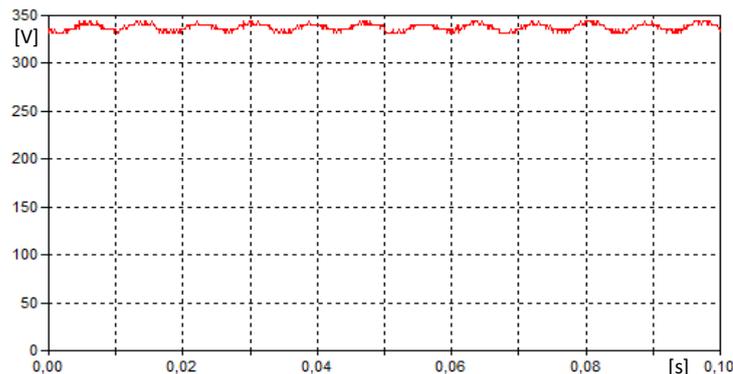
O sinal de realimentação da corrente que efetivamente passa pelo indutor também é medido por um sensor e enviado a um módulo diferenciador responsável por calcular o erro entre ele e a

referência de meia onda. Posteriormente, o erro passa por um controlador proporcional e integral para ser amplificado e entregue ao modulador PWM.

Para implementar corretamente o controle de corrente, a corrente real do indutor deve estar bem próxima em amplitude, fase e forma de onda da referência estipulada. Antes da implementação do controle da tensão, deve-se ajustar os valores dos ganhos proporcional e integral do controlador da corrente em intensidades que provoquem um erro mínimo entre a referência e a realimentação para o bloco multiplicador.

Diante do exposto, para fechar a malha de corrente sem o controle de tensão, deve-se utilizar o princípio básico de qualquer conversor CC-CC o qual afirma que a potência de saída do circuito deve ser igual a de entrada. No caso do circuito elevador de tensão, é necessário conhecer o valor da tensão contínua entregue a carga para determinar o valor da resistência que simula o compressor. Sendo assim, outro ensaio laboratorial para medição da tensão contínua foi realizado. O perfil da tensão obtido é mostrado na figura 3.56.

Figura 3.56 - Medição laboratorial da tensão contínua da unidade condensadora do condicionador de ar.



Fonte: Autor próprio

Após análise da forma de onda foi verificado que a tensão contínua encontra-se próxima ao patamar de 340V. Consequentemente, utilizando o princípio da conservação de potência, foi encontrada a magnitude da corrente nominal de alimentação de pico do condicionador de ar (I_N). Os cálculos são mostrados nas equações (3.18) e (3.19).

$$I_N = \frac{P}{V_n} = \sqrt{2} \frac{1289}{220} = 8,28A \quad (3.18)$$

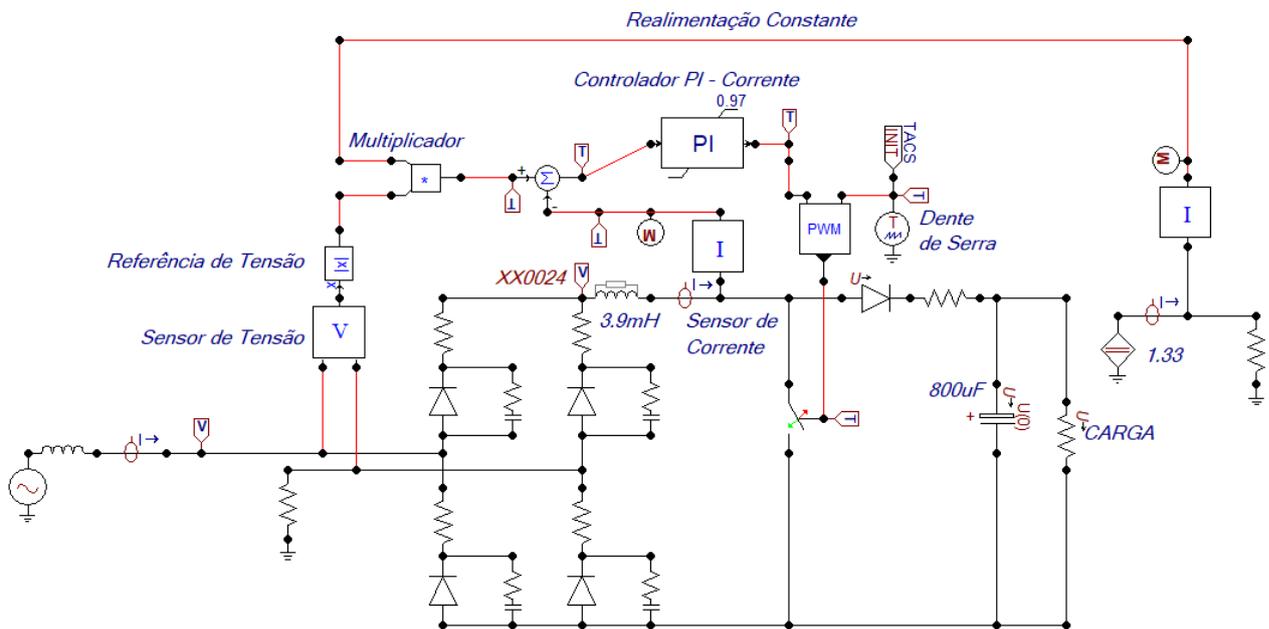
$$R_C = \frac{340^2}{1289} = 86,68\Omega \quad (3.19)$$

O valor de corrente de alimentação para a unidade condensadora deve ser 8.28A de pico e que a referência de corrente impõe um valor de aproximadamente 6.2A ao bloco multiplicador, um sinal constante de realimentação (RT) deve ser emitido no lugar da malha de controle de tensão. O valor desse parâmetro é calculado pela divisão dos dois valores de corrente conforme mostra a equação (3.20).

$$R_T = \frac{I_N}{I_{REF}} = \frac{8,28}{6,2} = 1,33 \quad (3.20)$$

Baseado nos cálculos acima foi inserida uma fonte com valor constante no bloco multiplicador da figura 3.54, obtendo-se assim circuito da figura 3.57. É necessário salientar que esse procedimento é importante para se estabelecer o controle de corrente e ele só funcionara se a carga for redimensionada toda vez que há mudança da potência da condensadora. Entretanto, ao inserir o controle de tensão, a variação de potência do circuito ocorrerá automaticamente.

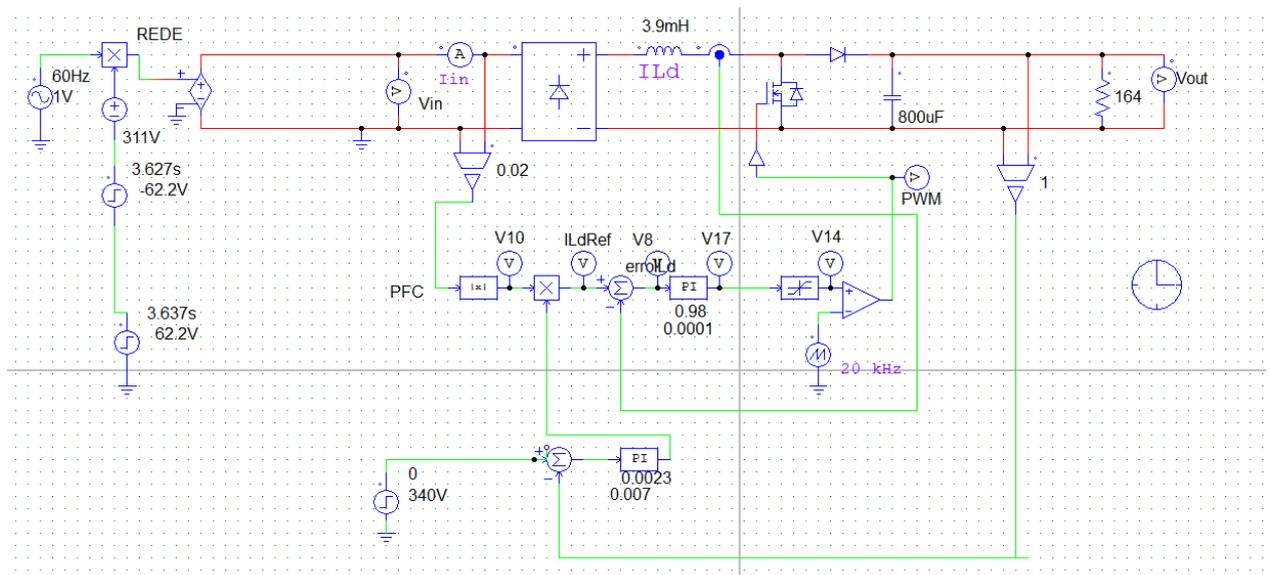
Figura 3.57 - Implementação computacional da malha de corrente da unidade condensadora.



Fonte: Autor próprio

Em seguida, o próximo passo era ajustar os ganhos proporcional e integral do controlador PI de corrente. Para determinação dos ganhos, utilizou-se a ferramenta computacional PSIM específica para simulações de circuitos eletrônicos, pois, ela é capaz de realizar a análise dos ganhos com uma velocidade aproximadamente 100 vezes mais rápida que o ATPDraw agilizando assim a etapa de ajuste. Desse modo, o mesmo circuito foi implementado no software PSIM com as mesmas características anteriormente identificadas e está ilustrado na figura 3.58.

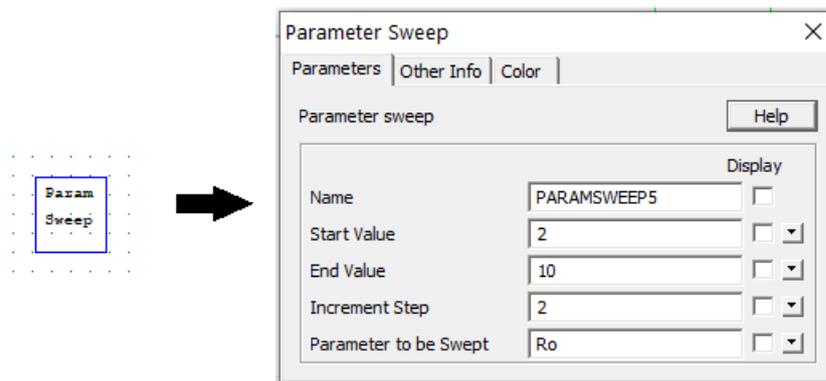
Figura 3.58 - Implementação computacional do circuito da unidade condensadora no software PSIM.



Fonte: Autor próprio

Para determinação rápida dos ganhos a estratégia adotada foi a da utilização da ferramenta “*PARAMETER SWEEP*” do PSIM. Ela consiste em um bloco responsável por simular vários circuitos ao mesmo tempo somente alterando o ganho entre eles. Para isso deve-se adicionar uma faixa aumento ou redução de ganho ao circuito. Na figura 3.59 observa -se a interface da ferramenta.

Figura 3.59 – Ferramenta “Parameter Sweep” do PSIM para determinação dos ganhos para os controladores proporcionais-integrais.

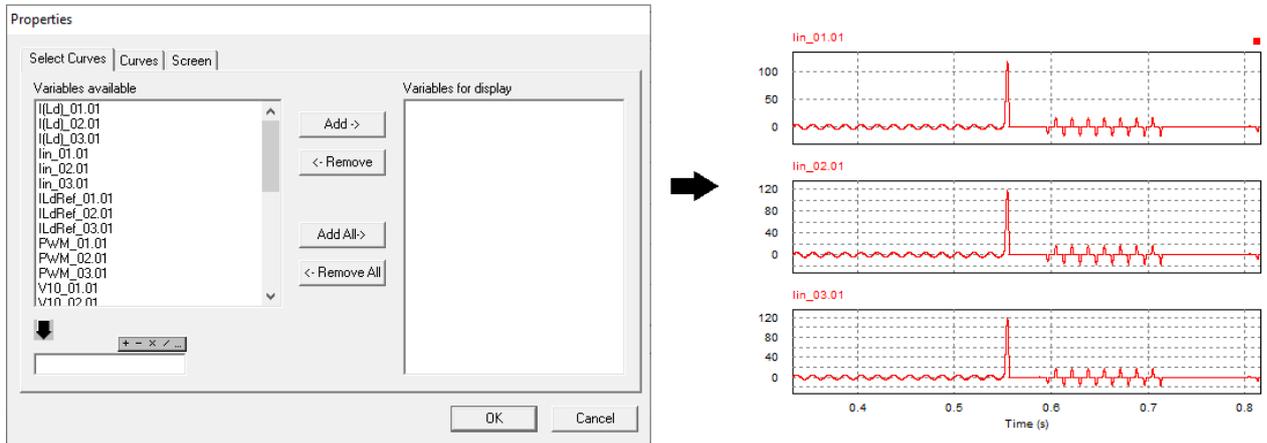


Fonte: Autor próprio

Nesta ferramenta, primeiro é definido o parâmetro a ser incrementado/reduzido pelo programa na guia descrita “*Parameter to be Swept*”. No caso do circuito da condensadora em específico, os parâmetros a serem alterados são os ganhos do PI. Para escolhê-los, basta nomeá-los com uma variável qualquer e repeti-la nesse bloco. Em seguida, estipula-se um valor inicial e um final para o ganho e também o incremento desejado a ele. O número de simulações que o programa fará será o

intervalo fechado resultado da divisão entre a diferença entre os valores final e inicial pelo incremento escolhido. A exemplo da figura 3.59, com um valor final de 10, inicial de 2 e incremento de 2, tem-se um total de 5 simulações simultâneas. À título de ilustração, a figura 3.60 representa a resposta do software apresentando múltiplas simulações.

Figura 3.60 – Exemplo de simulação de múltiplos circuitos com a ferramenta *parameter sweep*.

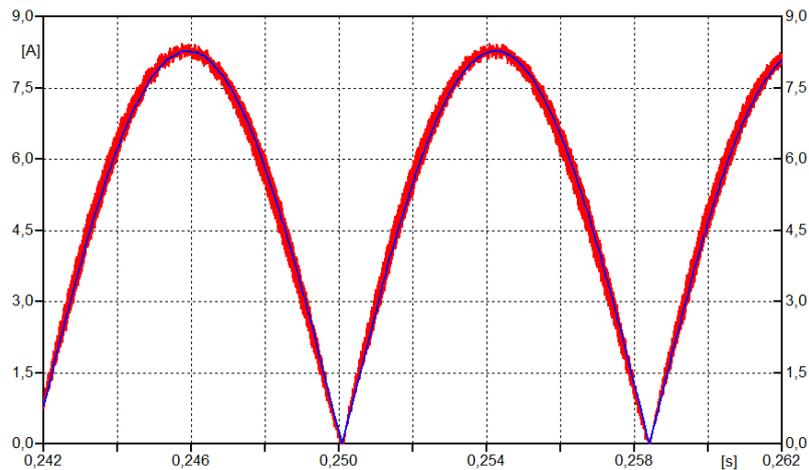


Fonte: Autor próprio

Em seguida, para o termino da modelagem computacional, foi implementado o bloco de modulação PWM para o MOSFET do *boost*. A lógica baseia-se na comparação do sinal enviado do PI de corrente, chamado de moduladora, com a onda dente de serra, denominada portadora. A onda dente de serra determinará a frequência de comutação da chave. Se a magnitude da onda moduladora for maior que a portadora, um sinal para fechar a chave será enviado, caso contrário, a chave permanecerá aberta. O código desenvolvido na ferramenta MODELS para modulação PWM é mostrado em apêndice.

Com o circuito implementado em sua totalidade, foi realizado o ajuste fino dos ganhos do PI no PSIM e os valores foram adicionados ao circuito no ATP. Para que a corrente no indutor ficasse bem próxima da referência, os ganhos proporcional e integral foram respectivamente 0,98 e 0,0001. A figura 3.61 ilustra a corrente que flui pelo indutor em vermelho e a corrente de referência do indutor em azul.

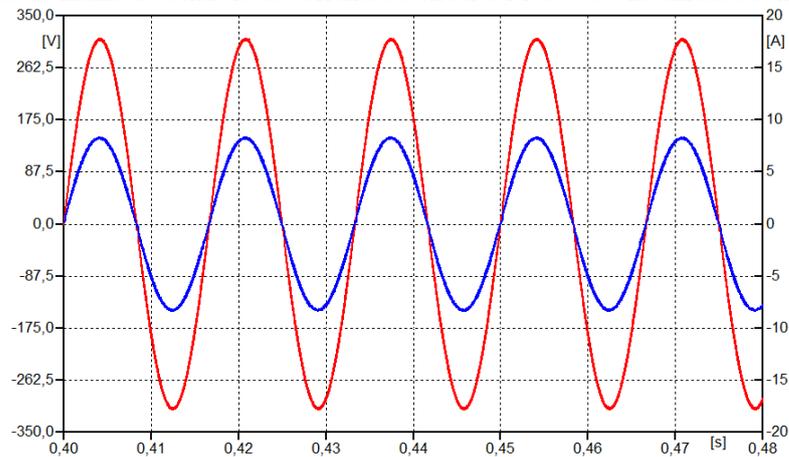
Figura 3.61 – Resultados computacionais da corrente controlada no indutor para a unidade condensadora após implementação da malha de corrente.



Fonte: Autor próprio

A imagem evidencia que a técnica de controle por corrente média foi implementada corretamente, pois, ambos os sinais estão em fase e apresentam aproximadamente a mesma magnitude. Consequentemente, conforme mostra a figura 3.62, a corrente da entrada do condicionador de ar (em azul) não apresentará distorção e também estará em fase com a sua tensão de alimentação (em vermelho).

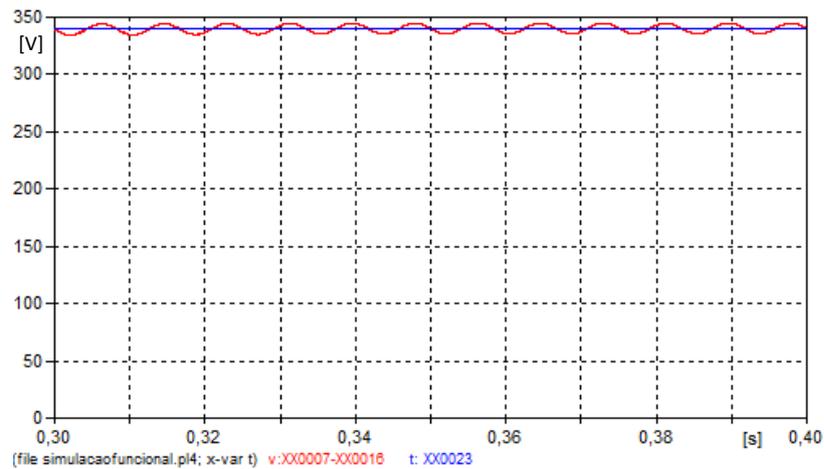
Figura 3.62 – Perfis de tensão e corrente de alimentação do condicionador de ar obtidos computacionalmente após implementação da malha de controle de corrente ao circuito *PFC boost* na unidade condensadora.



Fonte: Autor próprio

Por fim é verificado a tensão contínua na carga, conforme figura 3.63. É constatado que a tensão resultante (em vermelho) está próxima dos 340 volts de referência (em azul) conforme valor obtido por testes laboratoriais.

Figura 3.63 – Tensão controlada no barramento CC da unidade condensadora obtida computacionalmente em função da referência.

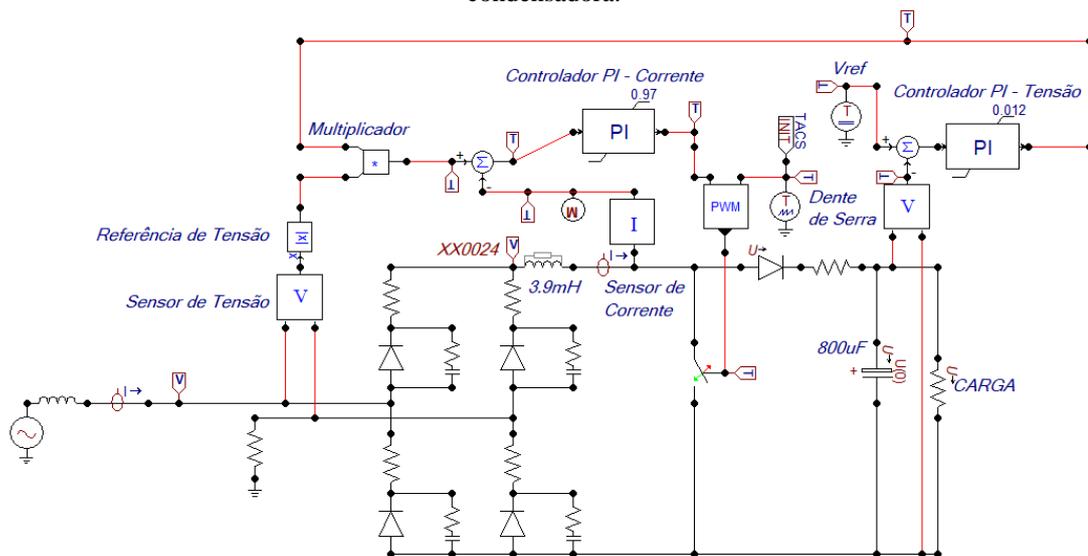


Fonte: Autor próprio

Para completar a modelagem computacional da etapa de filtragem foi implementado o controle de tensão. Embora a resposta da entrada já tenha sido satisfatória apenas com o controle da corrente, a malha de tensão é essencial para manter a potência constante frente oscilações de tensões presenciadas no sistema.

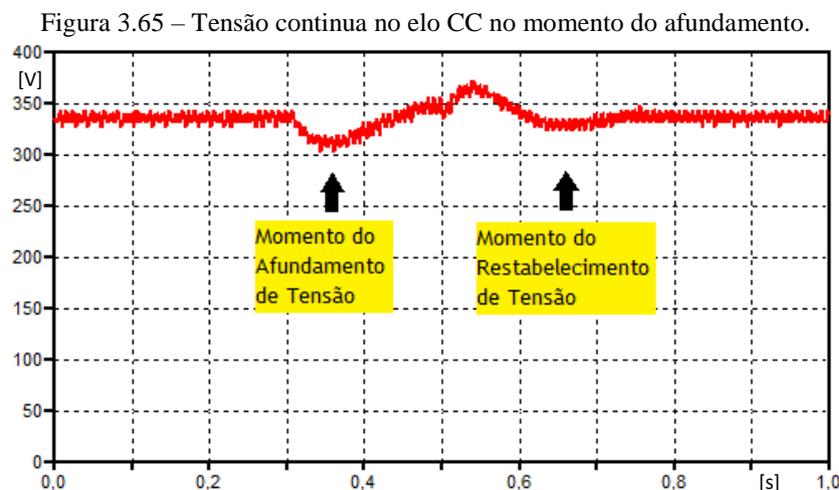
A malha de tensão é composta por uma fonte de corrente contínua representando a tensão de referência desejada ao conversor, um sensor de tensão para detecção da tensão que está efetivamente sendo entregue a carga e um controlador PI responsável pela amplificação do erro entre os dois sinais. O sinal amplificado é então enviado ao bloco multiplicador o que fecha o controle referente a etapa de filtragem. O esquema elétrico completo da unidade condensadora é ilustrado na figura 3.64.

Figura 3.64 - Implementação computacional da malha de controle de tensão do circuito *boost PFC* da unidade condensadora.



Fonte: Autor próprio

A tensão de referência do circuito foi estabelecida em 340V. Para a determinação do ganho para o PI de tensão deve-se conhecer a resposta da tensão em uma situação transitória. Procedendo da mesma forma referente a implementação do controle de corrente, realizou-se um ensaio laboratorial abordando um afundamento de 20% da tensão nominal de entrada para a medição da resposta transitória da tensão contínua de saída. O objetivo era obter o perfil de restabelecimento da tensão para o seu valor nominal de funcionamento. Os resultados obtidos são mostrados na figura 3.65. Ressalta-se que o afundamento poderia ter uma magnitude de qualquer valor que não sensibilizasse o equipamento, pois, ao final, os ganhos atribuídos ao controlador de tensão devem ser capazes de satisfazer quaisquer condições de afundamento impostas ao condicionador de ar.



Fonte: Autor próprio

Aplicando um afundamento de 20% na tensão, no elo CC, o seu valor deveria ser 80% de 340V o que resultaria em uma magnitude de 272V. Entretanto, conforme constatado na figura 3.65, a tensão não ficou abaixo dos 311V, o que remete ao fato de que o controle do *PFC* mantém a potência constante mesmo para variações de tensão.

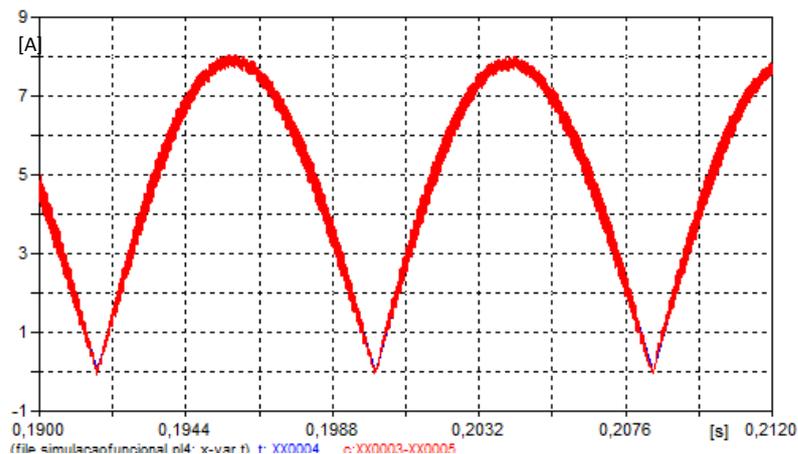
No momento do reestabelecimento da tensão nominal há um pico de tensão resultante da carga reversa dos capacitores do elo CC, mas, ainda assim, a tensão sofre uma pequena queda antes de atingir o valor nominal. Essa queda está relacionada com a velocidade e modo de restauração da resposta nominal do sistema de controle. Após investigações na literatura e análise dos ensaios experimentais realizados, descobriu-se que o perfil de resposta do controle de tensão a variações na alimentação do condicionador de ar é subamortecido[75].

Em posse dessas informações necessárias para implementação do controle de tensão, utilizou-se o circuito do PSIM para ajustar os ganhos proporcional e integral do controlador PI com o objetivo de atingir a resposta subamortecida verificada laboratorialmente em um menor tempo. Procedendo dessa forma, o tempo para obter a resposta que melhor se encaixa analiticamente ao caso estudado é

reduzido de acordo com esta faixa pré-estabelecida. Como resultado, chegou-se a um valor de 0.0023 para o ganho proporcional e 0.007 para o integral. Os valores encontrados foram implementados no programa ATPDraw.

Para validação do controle *PFC* do *boost*, deve-se verificar a semelhança entre corrente do indutor e sua referência, a tensão contínua e sua referência, a tensão e a corrente de alimentação e a resposta transitória da tensão no elo CC. Para primeira situação, os resultados são mostrados na figura 3.66, a referência de corrente (I_{Ldref}) está na cor azul e a resposta do indutor está em vermelho (I_{Ld}).

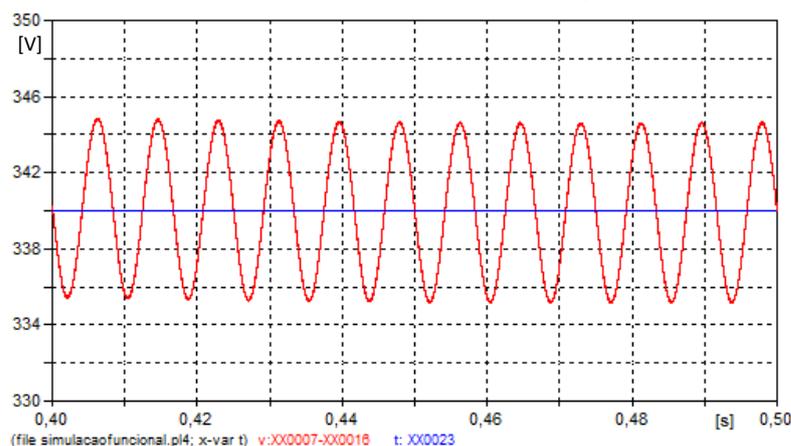
Figura 3.66 - Perfil da corrente no indutor após implementação do controle de corrente e tensão para o *PFC boost* da unidade condensadora



Fonte: Autor próprio

O controle de corrente obtido se apresenta conforme o esperado, pois, tanto a corrente $I_{Ld(ref)}$ quando I_{Ld} estão em fase e possuem aproximadamente a mesma magnitude. Portanto, o próximo passo é conferir o patamar da tensão contínua na carga em relação a sua referência. Desse modo, para uma referência de 340V (em azul) contínuo, obteve-se o resultado indicado na figura 3.67 em vermelho. É verificado uma tensão média próxima de 340V, com uma variação de aproximadamente 4V.

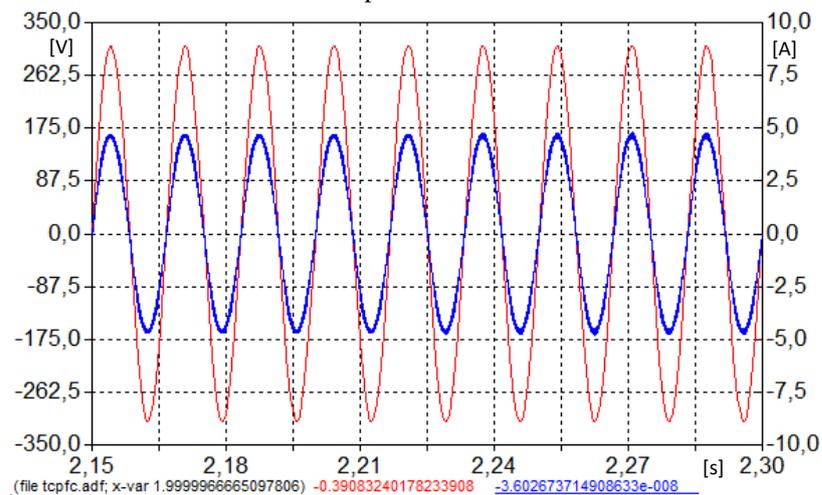
Figura 3.67 - Perfil da tensão contínua da unidade condensadora obtido computacionalmente em função da referência.



Fonte: Autor próprio

Os perfis de tensão (em vermelho) e corrente (em azul) na entrada da unidade condensadora após implementação completa do *PFC* são ilustrados na figura 3.68. Observa-se que a corrente está em fase com a tensão de alimentação. Outro ponto perceptível é a espessura da forma de onda da corrente. Essa característica deve-se a natureza do chaveamento em alta frequência do *PFC* realizado pela chave do conversor *boost*.

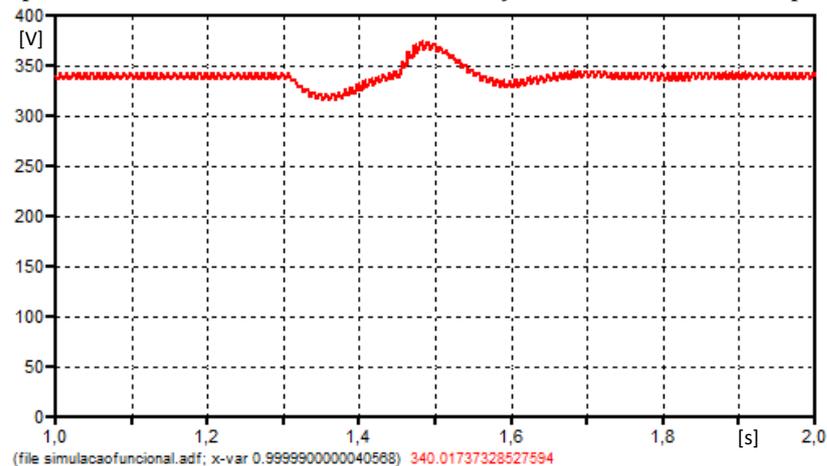
Figura 3.68 - Perfis de tensão e corrente de alimenta da unidade condensadora após implementação completa do controle para o *PFC boost*.



Fonte: Autor próprio

Para validação da resposta subamortecida para o controle de tensão, aplicou-se um afundamento de 20% e duração de 10 ciclos. O perfil da resposta do controle para o fenômeno aplicado é mostrado na figura 3.69.

Figura 3.69 - Comportamento da tensão contínua frente a variações de tensão obtidos computacionalmente.



Fonte: Autor próprio

Durante o afundamento a tensão reduziu para um valor aproximadamente de 311V. Quando a tensão de alimentação voltou ao normal, para ajustar novamente a tensão a uma magnitude de 340V,

conforme a figura 3.70, o controle de tensão realizou uma resposta subamortecida semelhante a observada durante o ensaio laboratorial.

3.6.2.3 Etapa de Inversão

Como último passo para a modelagem, foi realizado a implementação da etapa de inversão. Conforme detalhado na seção 3.2, essa etapa é composta por uma ponte inversora trifásica controlada, um circuito de controle de disparo e o compressor propriamente dito.

O carregamento imposto a unidade condensadora advém do compressor hermético, porém, para uma implementação computacional simples, visto que as variáveis de entrada do equipamento são controladas pelo *PFC*, optou-se por substituir a máquina por um motor de indução trifásico com velocidade variável. A velocidade da compressor varia em função da frequência de chaveamento do inversor, sua faixa de rotação é de 1000 a 6000 RPM.

Em posse das características e informações de funcionamento de um motor trifásico com potência nominal equivalente à da unidade condensadora (em torno de 1,5CV), foi utilizado o modelo provido pelo próprio software ATP. Os dados foram obtidos em catálogos de uma linha padrão de compressores de 1,5CV de potência. A tabela 3.3 detalha estes parâmetros.

Tabela 3.3 – Dados de placa de um motor de indução trifásico simulando um compressor hermético

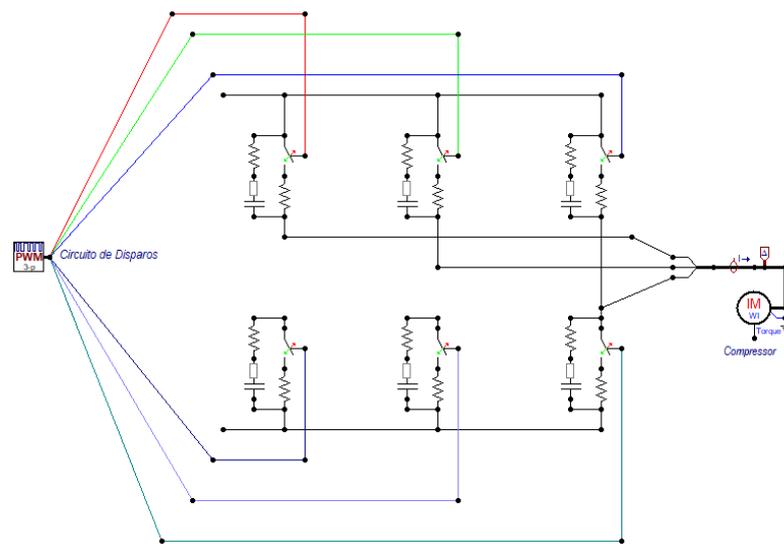
Motor de Indução Trifásico – Dados de Placa

Potência	1,289kW(1,75cv)
Frequência Nominal	60Hz
Velocidade	3600rpm
Corrente Nominal	4,11A
Corrente de Partida	8,4
Conjugado Nominal	0.314kgfm
Rendimento	84.6%
Fator de Potência	0.88
Momento de Inércia	0.0009kgm ²
Conjugado de Partida	390%
Conjugado Máximo	370%
Escorregamento	5%

Fonte: Autor próprio

Após a obtenção dos parâmetros e a implementação do motor, o circuito com as 06 chaves equivalentes e o controle de disparo foram implementados. A figura 3.70 ilustra todo o circuito de inversão desenvolvido no ATPDraw.

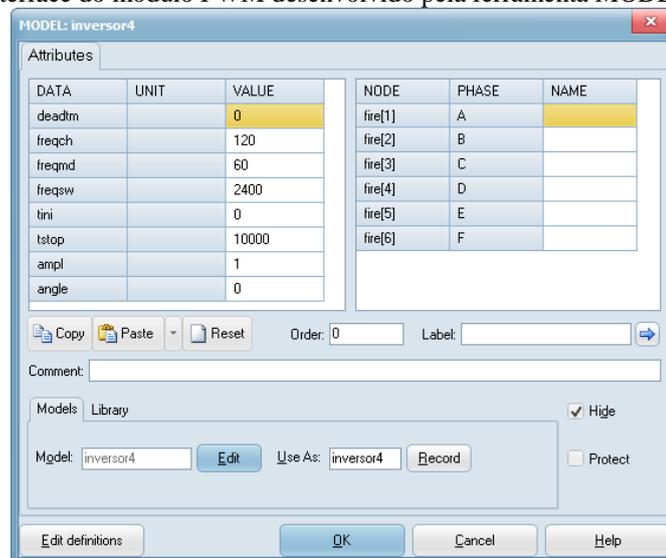
Figura 3.70 – Circuito equivalente para a etapa de inversão do condicionador de ar



Fonte: Autor próprio

O controle dos disparos foi realizado pela ferramenta MODELS e é baseado na técnica de modulação PWM senoidal escalar. Desse modo, definiu-se no controle uma onda portadora triangular com frequência variável e com a possibilidade de escolha pelo usuário e três moduladoras senoidais com frequência selecionável e defasadas cada uma de 120°. O código desenvolvido pode ser conferido no apêndice e a interface do modelo ilustrada na figura 3.71.

Figura 3.71 – Interface do módulo PWM desenvolvido pela ferramenta MODELS do ATPDraw.

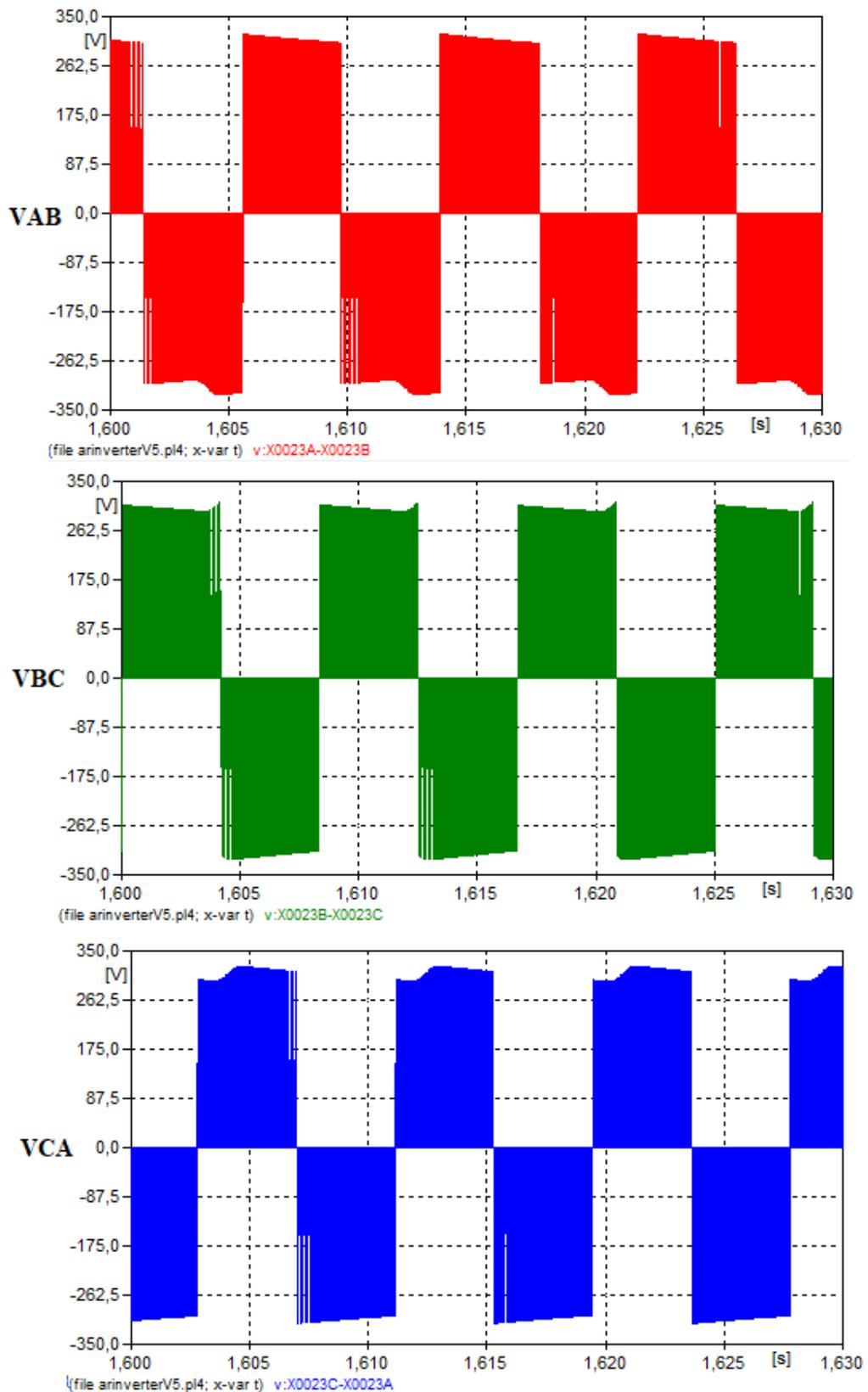


Fonte: Autor próprio

Os perfis de tensão alternada para as três fases são mostrados na figura 3.72. É constatado para as formas de onda resultantes que, embora similares em forma a um retângulo, elas têm características senoidais. Esse fato se justifica o defasamento de 120° entre elas e na natureza do

chaveamento observado durante os ciclos de tensão, pois, eles são mais intensos e com menores intervalos de comutação no meio do ciclo e mais escassos nas extremidades.

Figura 3.72- Perfil das tensões invertidas obtida na etapa de inversão

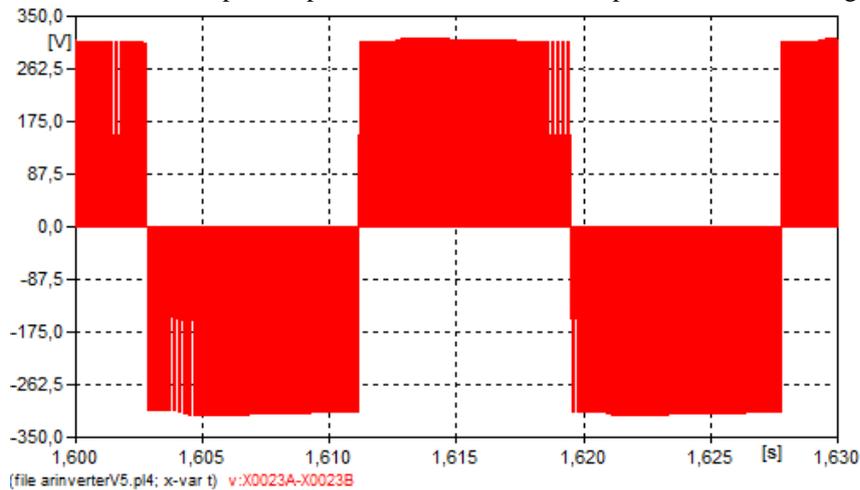


Fonte: Autor próprio

A correlação da potência do compressor com a frequência modulada pelo controle do inversor foi projetada de modo linear e proporcional. Assim sendo, baseado na medição da tensão no compressor mostrada na figura 3.49, foi constatado que para uma operação em 50% de carga a frequência da tensão que alimentava o compressor era de 120Hz. Desse modo, utilizando uma equação linear em função do resultado experimental obtido, a carga máxima de potência 100% (1289W) ocorrerá para uma frequência de 240Hz e 25% (320W) em 60Hz.

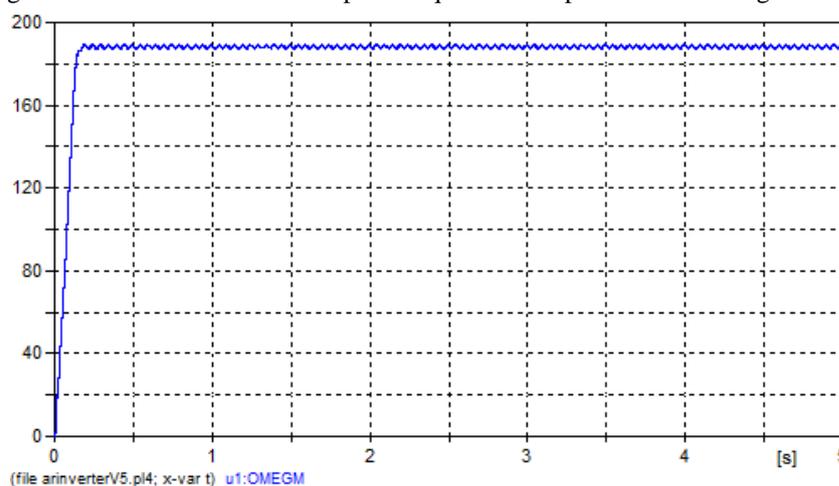
As figuras 3.73 e 3.74 mostram a tensão em uma das fases e a velocidade de rotação do compressor para uma frequência de operação de 60Hz e chaveamento a 5kHz, após a implementação da etapa de inversão. O compressor nesse caso opera com 25% da potência e sua velocidade se estabelece em torno de 1800rpm.

Figura 3.73 – Tensão no compressor para o condicionador de ar operando a 25% de carga térmica.



Fonte: Autor próprio

Figura 3.74 – Velocidade do compressor quando ele opera a 25% de carga térmica.

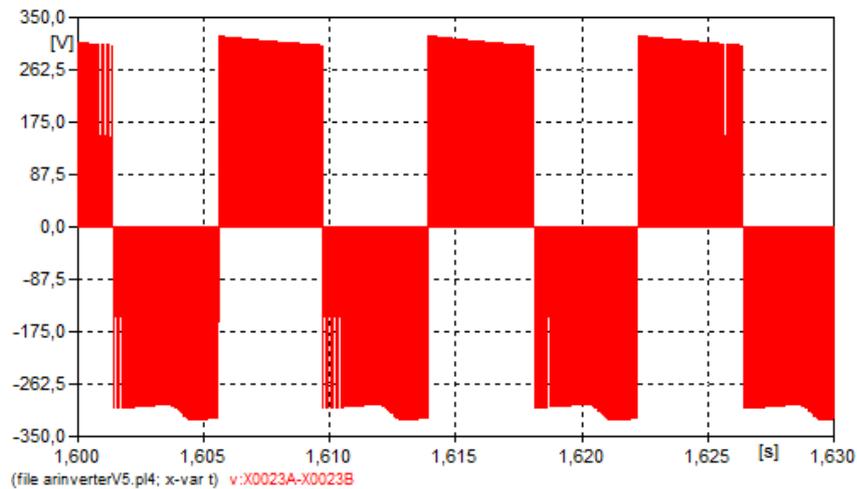


Fonte: Autor próprio

Aplicando uma operação de 50% da potência, o compressor terá uma frequência de operação de 120Hz. A tensão e velocidade da máquina para esse caso são mostradas nas figuras 3.75 e 3.76

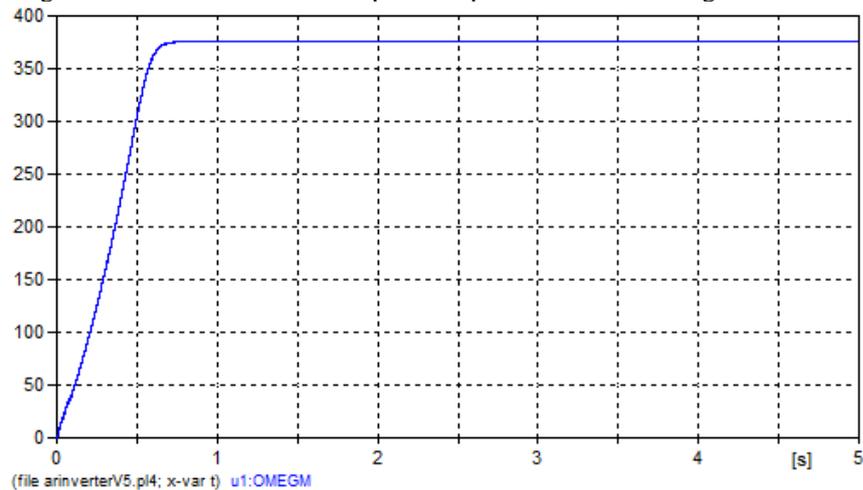
respectivamente. É observado que o compressor necessitou de um tempo maior, para atingir uma velocidade de rotação de 3600rpm.

Figura 3.75 - Tensão no compressor para o condicionador de ar operando a 50% de carga térmica.



Fonte: Autor próprio

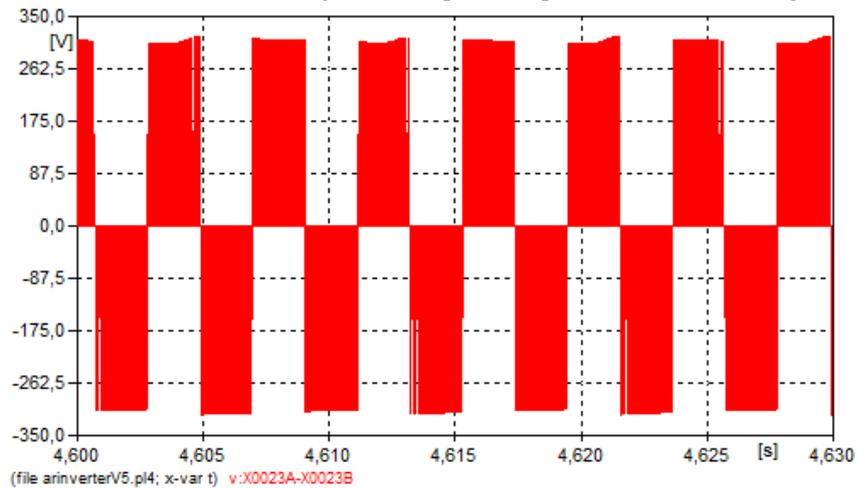
Figura 3.76 - Velocidade do compressor operando a 50% de carga térmica.



Fonte: Autor próprio

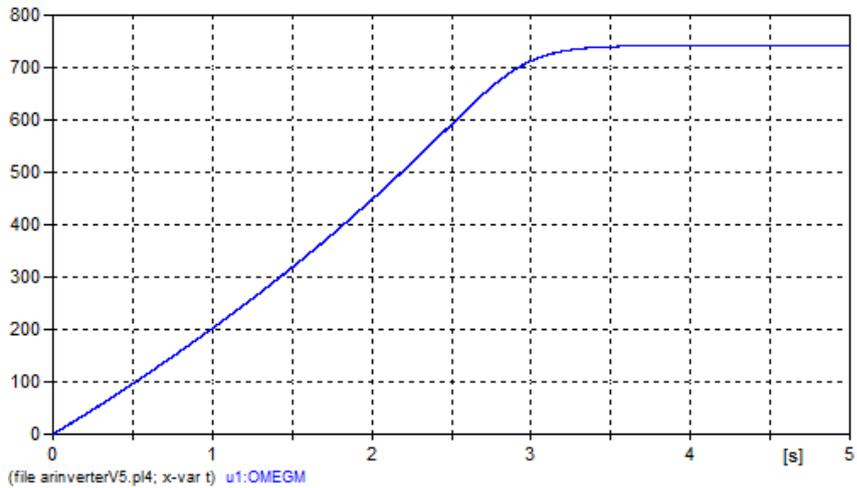
Para 100% da potência o compressor tem uma frequência de operação de 240Hz. A tensão e a velocidade da máquina para esse caso são mostradas nas figuras 3.77 e 3.78 respectivamente. Nessa situação a velocidade do compressor chega a aproximadamente 6000rpm.

Figura 3.77 – Tensão de alimentação do compressor operando a 100% de carga térmica.



Fonte: Autor próprio

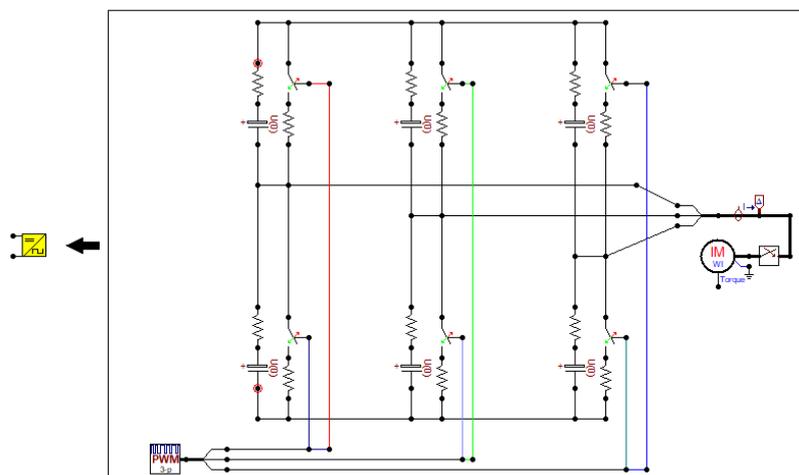
Figura 3.78 - Velocidade do compressor quando ele opera a 100% de carga térmica



Fonte: Autor próprio.

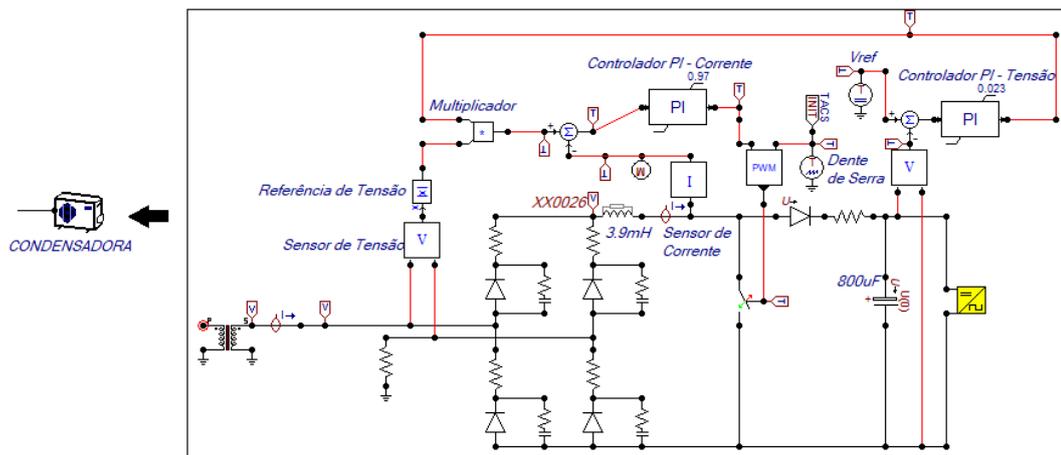
Em conclusão, o bloco referente a etapa de inversão foi adicionado ao restante do circuito da condensadora já elaborado completando assim o modelo. As figuras 3.79 e 3.80 o mostram todo implementado

Figura 3.79 –Etapa de inversão da unidade condensadora.



Fonte: Autor próprio

Figura 3.80 – Circuito completo da unidade condensadora implementado no ATPDraw.



Fonte: Autor próprio

3.7 Implementação computacional final do condicionador de ar *inverter* no simulador ATP

Sabe-se que a unidade evaporadora, conforme mencionado na seção 3.2, é a responsável pelo envio de comandos a condensadora, em função da temperatura do recinto, para que ela possa ligar o compressor hermético e realizar a troca de calor entre os ambientes. Isso posto, ao colocar o equipamento na tomada, constata-se que ambas as partes são energizadas ao mesmo tempo, sendo elas, portanto, conectadas em paralelo.

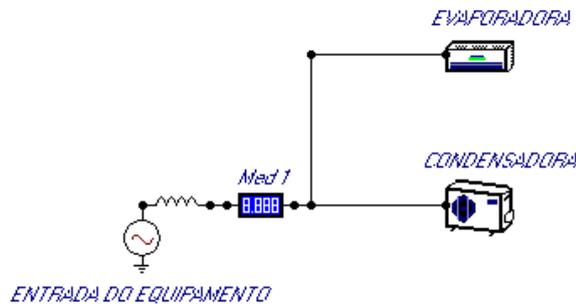
Um segundo fator a ser considerado é a carga térmica detectada pelo equipamento. Para a modelagem realizada foi considerado ao modelo uma operação contínua do condicionador de ar em uma temperatura específica que é refletida ao programa como a potência solicitada pela rede pelo motor de indução trifásico. Contudo, a potência não é alterada durante o funcionamento de uma simulação em específico sendo necessário a troca dos dados do motor para realização de uma nova.

É necessário ainda acentuar que, muito embora a parte referente a etapa de filtragem mostre muito semelhante as condições físicas inspecionadas, conforme é evidenciado no capítulo 4, a etapa de inversão tem o propósito apenas de completar o modelo e ilustrar o funcionamento de um inversor de frequência. Em termos de ressarcimento, o que é de fato constatado na entrada do equipamento é resultado predominante da ação do conversor *boost* operando como pré-regulador de fator de potência.

A partir de todas as considerações feitas tem-se, na figura 3.81 todo o modelo do condicionador de ar *inverter* implementado no ATP. Além das unidades tem-se também o bloco nomeado como “medidor1” responsável por fornecer os valores eficazes de tensão, corrente, potência

e fator de potência do equipamento. A operação e resposta do modelo em questão para condições nominais e anormais de suprimentos são detalhadas no capítulo 4.

Figura 3.81 – Modelo computacional do condicionador de *inverter* implementado no ATPDraw



Fonte: Autor próprio

3.8 Considerações Finais

Inicialmente o presente capítulo apresentou a estrutura elétrica geral das partes constituintes do condicionador de ar. Para ambas as unidades foram definidos os principais componentes que influenciam na solicitação de tensão e corrente de cada uma e também ilustrado o diagrama unifilar representativo para elas.

A unidade evaporadora foi representada por um circuito retificador monofásico com potência máxima por volta dos 50W. Sua função em específico é controlar a temperatura do produto, característica essa que têm grande importância na realidade, por ser um dos componentes que mais ocasionam danos elétricos em condicionares de ar diante aos distúrbios advindos da rede elétrica.

Para a unidade condensadora foram apresentadas as etapas constituintes do seu equivalente elétrico as quais são: retificação, filtragem e inversão. Destaca-se em especial a etapa de filtragem, pois, para garantir ao compressor um funcionamento contínuo e independente das oscilações na tensão de alimentação no produto, integra-se a fontes chaveadas comuns conversores CC-CC com controle de fator de potência. Em suma, eles são os responsáveis por manter a potência entregue a estas máquinas constantes para condições adversas na tensão e também reduzir emissões harmônicas providas pelos equipamentos os quais eles estão inseridos, se tornando, assim, os maiores responsáveis pela composição da corrente de alimentação do condicionador de ar.

Em seguida, foram elucidadas as características do conversor elevador de tensão classificado como o principal circuito utilizado como controlador de fator de potência para os condicionadores de ar. Desse modo, foi detalhado a filosofia de funcionamento do conversor e as técnicas para controle de fator de potência utilizadas nele. O objetivo era de estabelecer uma base sólida deste circuito

eletrônico para possibilitar, ao realizar a inspeção física da unidade condensadora, a correlação do circuito verificado no equipamento com os abordados teoricamente.

Partindo da ideia já estabelecida do conversor *boost*, foi apresentado, por fim, a modelagem computacional da unidade condensadora pela associação do circuito descrito com o verificado fisicamente. A técnica de controle também foi identificada, restando a esta seção, portanto, apresentar os passos de implementação das etapas anteriormente citadas.

Em teoria, para o controle efetivo da temperatura do condicionador de ar são necessários vários parâmetros do compressor hermético os quais são inacessíveis para usuários do equipamento. Contudo, para deixar o modelo computacional completo, foi criado também uma simples representação da inversão de tensão partindo da teoria de modulação PWM escalar abordada no início do capítulo. Destaca-se que para o desenvolvimento de todas as etapas foram utilizadas as ferramentas TACS e MODELS do ATP e os respectivos códigos de implementação podem ser encontrados no apêndice.

CAPÍTULO IV

4 VALIDAÇÃO DO MODELO COMPUTACIONAL DO APARELHO CONDICIONADOR DE AR SPLIT INVERTER

4.1 Considerações iniciais

A avaliação de desempenho para validação do modelo computacional desenvolvido ocorre por meio da comparação entre situações em regime laboratorial, onde os resultados são obtidos via medições, com os adquiridos a partir da reprodução dos casos anteriormente simulados no software ATP. As atividades realizadas, além de considerar condições ideais de fornecimento, cuja tensão tem aspecto puramente senoidal, engloba avaliações operativas em regime dinâmico e/ou transitório e que tem indicadores de qualidade com padrões determinados pela ANEEL e regidos por meio do PRODIST. Assim, conjuntamente com a alimentação em regime permanente, são validados casos em que o condicionador de ar é submetido a afundamentos, elevações, interrupções e flutuações de tensão e também energizado com a tensão apresentando distorção harmônica.

O objetivo final desta etapa compreende na validação do modelo computacional através da comparação perante a todos os casos laboratoriais o qual o equipamento condicionador de ar *inverter* foi submetido, buscando um erro percentual baixo em relação com as medições obtidas experimentalmente.

4.2 Estrutura para realização dos ensaios experimentais

As partes integrantes do condicionador de ar foram instaladas em conjunto a um suporte metálico conforme ilustra a figura 4.1. Em sua base foi colocada a unidade condensadora e nas hastes posteriores a unidade evaporadora. Para melhor locomoção do produto, instalou-se também rodas mecânicas sob a base para melhor locomoção do aparelho.

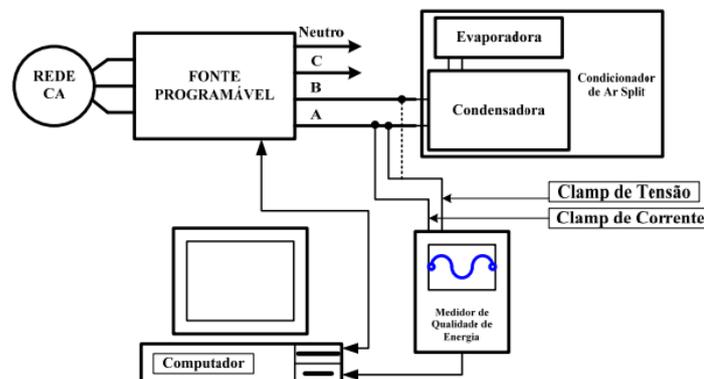
Figura 4.1 – Instalação do laboratorial aparelho condicionador de ar.



Fonte: Autor próprio

Os ensaios ocorreram na Universidade Federal de Uberlândia, especificamente no laboratório pertencente ao Núcleo de Qualidade de Energia Elétrica, localizado no bloco 5K. Como todos os casos ensaiados consistiam da alteração na qualidade da tensão de alimentação do equipamento ou na aplicação de transitórios, foi utilizado uma fonte programável para execução dos ensaios. Conforme ilustrado, a figura 4.2, resume o esquema elétrico utilizado, com um osciloscópio, fonte programável e o equipamento sob análise, conforme realizado em [25].

Figura 4.2 – Estrutura laboratorial para os ensaios de qualidade da energia no condicionador de ar.



Fonte: [25]

A identificação e descrição dos principais componentes utilizados no arranjo laboratorial são os seguintes:

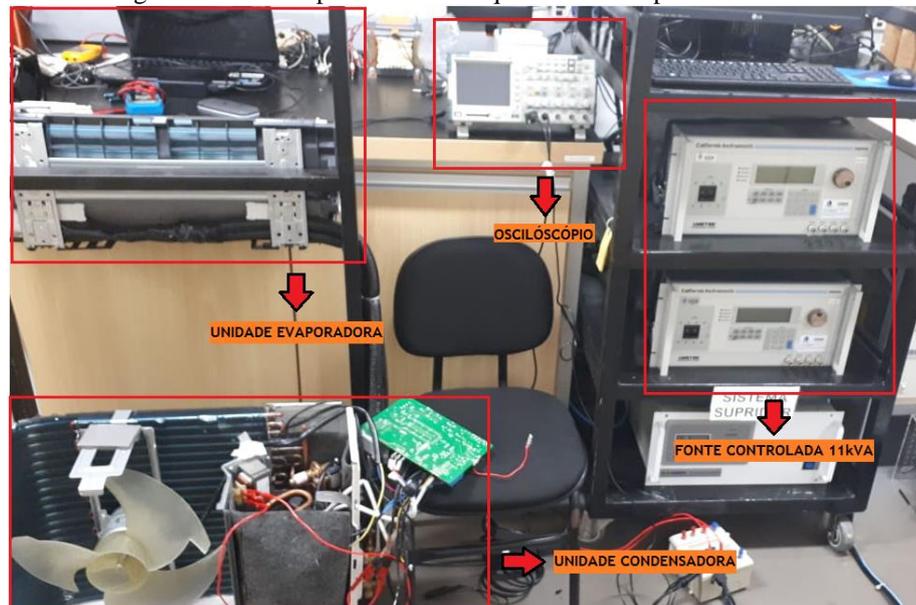
- A fonte programável consiste de duas fontes trifásicas, modelo California Instruments AC Power Source CSW5550 do fabricante AMETEK Programmable Power, com potencial nominal de 5,5kVA. Uma das fontes é utilizada como slave da outra e, portanto, possuem ao todo 11kVA de potência nominal. Essa fonte permite a reprodução de um sinal de

tensão apresentando diversas características, como por exemplo, alimentação senoidal, distorção harmônica e flutuações. Além disso, ela também pode impor a tensão variações na sua amplitude e/ou defasagem angular. Ela consiste em uma ferramenta suficiente para realização de todos os ensaios a serem apresentados.

- O medidor utilizado para medição das magnitudes de tensão e corrente para todos os eventos impostos é o osciloscópio TEKTRONIX TPS 2024. A transferência dos resultados ocorre via cartão de memória para um microcomputador que possui a entrada específica compatível para esse dispositivo.
- O microcomputador é o responsável pelo controle dos parâmetros da fonte California e necessários para alteração da tensão de alimentação do condicionador de ar. Ele utiliza do software “Virtua Panels” para executar as respectivas funções.

Em concordância com o arranjo laboratorial esquematizado, foi reproduzido a mesma montagem no laboratório acima mencionado. A título de ilustração, a figura 5.3 mostra a estrutura real de ensaio.

Figura 4.3 – Montagem laboratorial para ensaios de qualidade de suprimento ao condicionador de ar.



Fonte: Autor próprio

4.3 Avaliação de desempenho do condicionador de ar *inverter* a condições ideais e não ideais de suprimento.

Os resultados a serem apresentados ao longo do capítulo visam equiparar as medições experimentais com os resultados providos pelo modelo computacional. Os casos avaliados

compreendem condições ideais e não ideais de suprimento conforme destacado na Tabela 4.1. Ressalta-se que os testes foram realizados em concordância com as normas e sugestões de procedimentos laboratoriais aplicados a ensaios de qualidade da energia elétrica.

Tabela 4.1 – Tabela resumo dos casos de suprimento de tensão aplicados ao condicionador de ar

CASO	CARACTERÍSTICAS
1 – Condição Ideal	<ul style="list-style-type: none"> • Tensão nominal de 220 V, fase-fase, eficaz.
2 – Elevação de Tensão	<ul style="list-style-type: none"> • Tensão nominal de 220 V, fase-fase, eficaz; • Elevação para 120% da tensão nominal; • Duração do evento de 10 ciclos.
3 – Afundamento de Tensão	<ul style="list-style-type: none"> • Tensão nominal de 220 V, fase-fase, eficaz; • Afundamento para 60% da tensão nominal; • Duração do evento de 06 ciclos.
4 – Interrupção de Tensão	<ul style="list-style-type: none"> • Tensão nominal de 220 V, fase-fase, eficaz; • Interrupção de tensão; • Duração do evento de 03 ciclos.
5 – Flutuação de Tensão	<ul style="list-style-type: none"> • Tensão nominal de 220 V, fase-fase, eficaz; • Pst (Probability short-term) de 5 pu.
6 – Distorção Harmônica	<ul style="list-style-type: none"> • Tensão nominal de 220 V, fase-fase, eficaz; • Distorção harmônica com DHT = 20%.

Fonte: Autor próprio

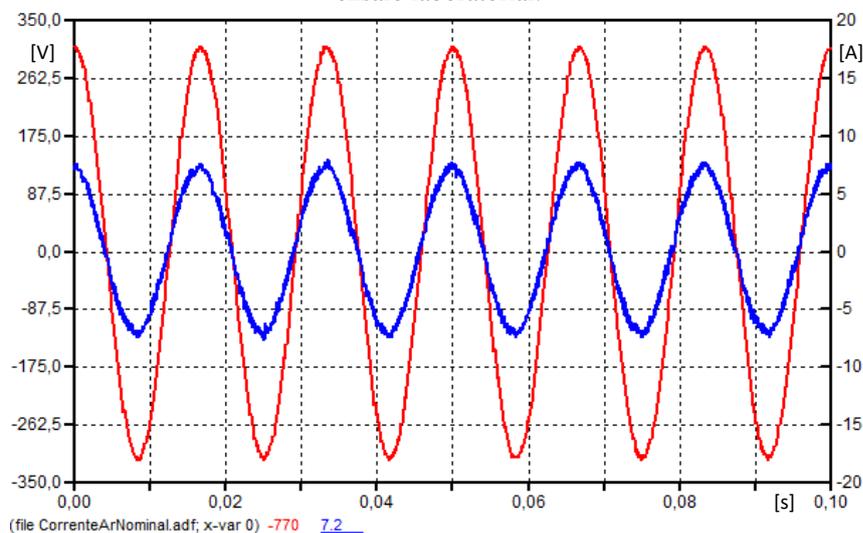
Com base aos dados sintetizados, tem-se a seguir a apresentação dos casos utilizados na validação do modelo assim como as características de operação específicas e que explicam os resultados observados em cada um deles. Os valores para cada um dos fenômenos citados na tabela foram escolhidos dentre outros diversos casos avaliados para o modelo computacional do condicionador de ar e também por questões de limitação de funcionamento do equipamento. Desse modo, caso fosse aplicado, por exemplo, um afundamento ou elevação com magnitudes diferentes às enunciadas, o modelo se comportaria de modo satisfatório e de maneira semelhante aos casos aqui expostos.

Como os ensaios ocorreram em dias diferentes, o condicionador de ar foi submetido a temperaturas ambientes distintas e por consequência sua corrente de alimentação apresentava valores diferentes para cada um dos casos avaliados. Para solucionar o problema, foi medido também a potência demandada pelo condicionador de ar para cada um dos casos e posteriormente esse valor foi também implementado ao modelo computacional. Para simplificação da comparação de resultados, todos os perfis de tensão e corrente experimentais são exibidos via a ferramenta de plotagem do ATPDraw.

4.3.1 Caso 1: Condição Ideal

A função do controle *PFC* do conversor *boost* é garantir que a corrente de entrada do condicionador de ar seja similar tanto na forma, quanto na fase da sua tensão de alimentação. Desse modo, para o caso de condição ideal de tensão, a corrente terá o aspecto senoidal, estará em fase com ela e apresentará, portanto, fator de potência próximo ao valor unitário. Comprovando os fatos acima descritos, tem-se evidenciado na figura 4.4 os perfis de tensão (em vermelho) e corrente (em azul) obtidos via ensaio laboratorial para um valor de tensão igual a 220V eficaz e forma de onda puramente senoidal.

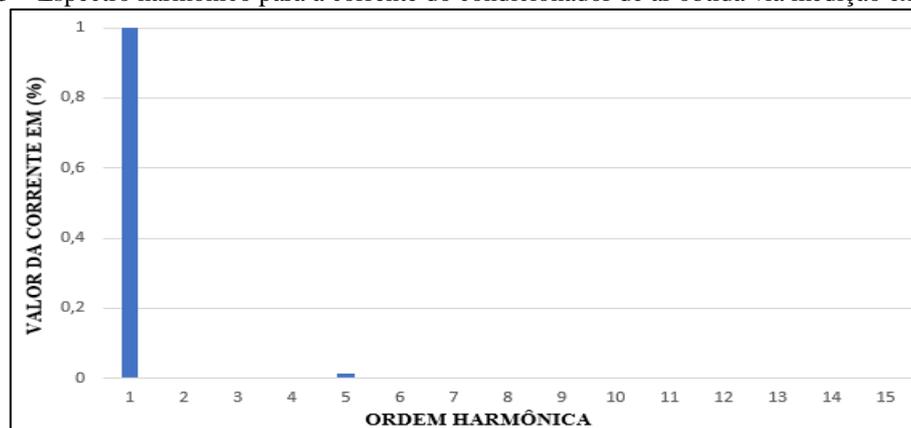
Figura 4.4 – Perfis de tensão e corrente para o condicionador de ar sob condições ideais de suprimento obtidos via ensaio laboratorial.



Fonte: Autor Próprio

O valor eficaz da corrente solicitada pelo equipamento no dia em que foi realizado o ensaio laboratorial é próximo ao valor nominal eficaz de 5 A. A figura 4.5 mostra o espectro harmônico da corrente para a condição de alimentação senoidal. Enfatiza-se a baixa distorção apresentada por ela o que é resultado da forma de onda fornecida pela tensão de alimentação do condicionador de ar.

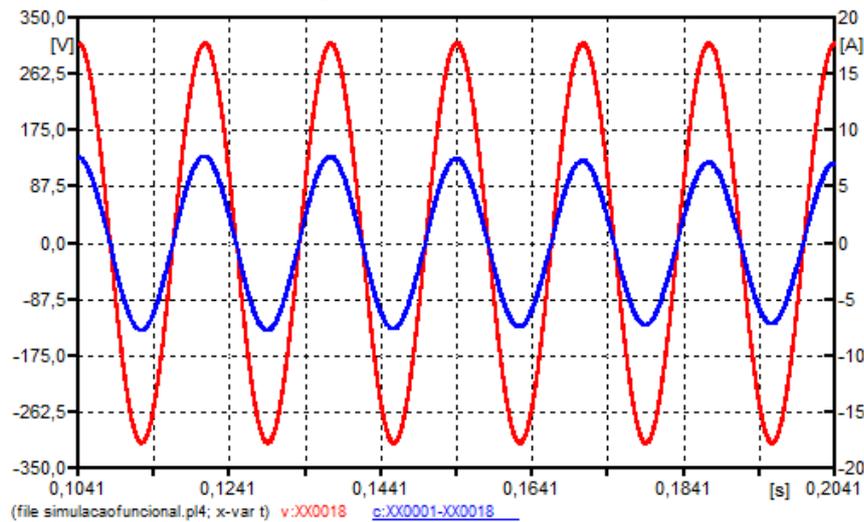
Figura 4.5 – Espectro harmônico para a corrente do condicionador de ar obtida via medição experimental.



Fonte: Autor Próprio

Recorrendo ao modelo computacional do condicionador de ar e sabendo que o mesmo solicita da rede uma potência ativa próxima ao valor multiplicado da tensão pela corrente de 5 A, resultando em aproximadamente 1100W, chega-se aos perfis representados na figura 4.6. Constata-se que para a condição nominal o modelo computacional do condicionador de ar comporta-se conforme o esperado de um circuito *PFC boost*.

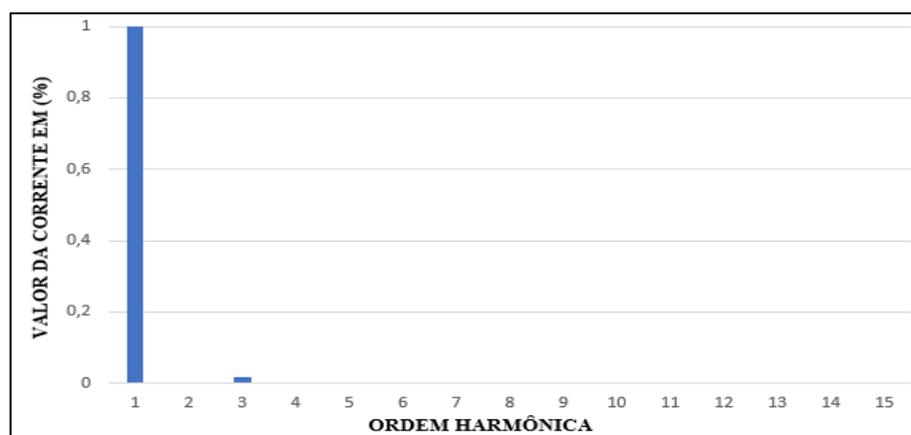
Figura 4.6 – Perfis de tensão e corrente para o condicionador de ar obtidos via modelo computacional.



Fonte: Autor próprio

Analogamente ao procedimento feito para o ensaio laboratorial, tem-se na figura 4.7 o espectro harmônico da corrente fornecida pelo modelo computacional.

Figura 4.7 – Espectro harmônico da corrente de entrada do condicionador de ar obtida via modelagem computacional.



Fonte: Autor próprio

A tabela 4.2 apresenta uma síntese de todas as características anteriormente apresentadas e tem o propósito de comparar os resultados experimentais com os computacionais apontando o percentual de erros constatado entre ambos.

Tabela 4.2 – Erros percentuais entre os resultados experimentais e computacionais para condição ideal de suprimento

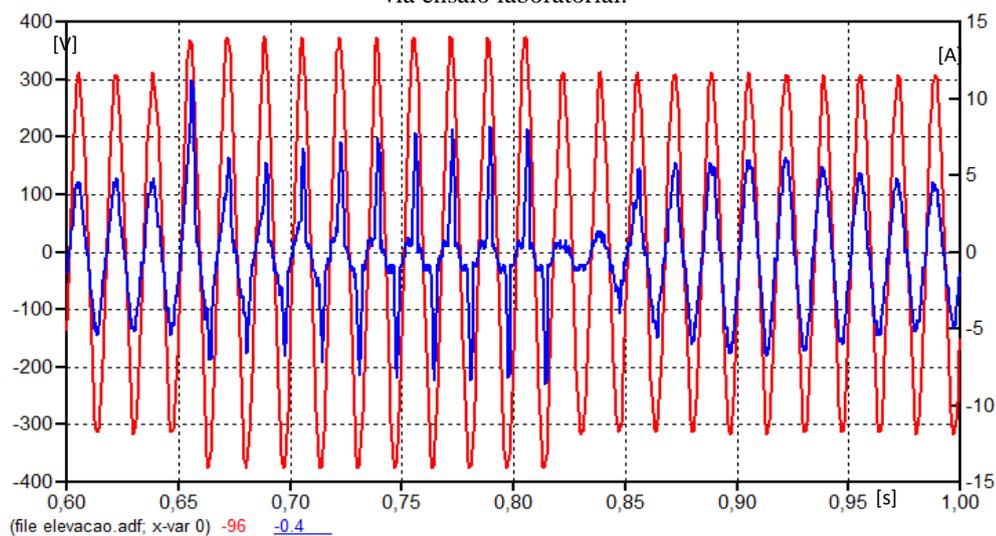
	Experimental	Computacional	Erro(%)
Corrente eficaz (A)	5,05	5,07	0,4%
Fator de potência	0,9976	0,9995	0,19%

Fonte: Autor próprio

4.3.2 Caso 2: Elevação na Tensão de Suprimento

Dando seguimento a validação do modelo, o próximo caso avaliado foi a submissão do equipamento a uma elevação de tensão de curta duração. Conforme enunciado na tabela 4.2, o valor de incremento da tensão foi de 20% da tensão nominal por uma duração de 10 ciclos. A figura 4.8 mostra os perfis de tensão (em vermelho) e corrente (em azul) obtidos experimentalmente para a situação enunciada.

Figura 4.8- Perfis de tensão e corrente para o condicionador de ar para uma elevação na tensão de suprimento obtidos via ensaio laboratorial.



Fonte: Autor próprio

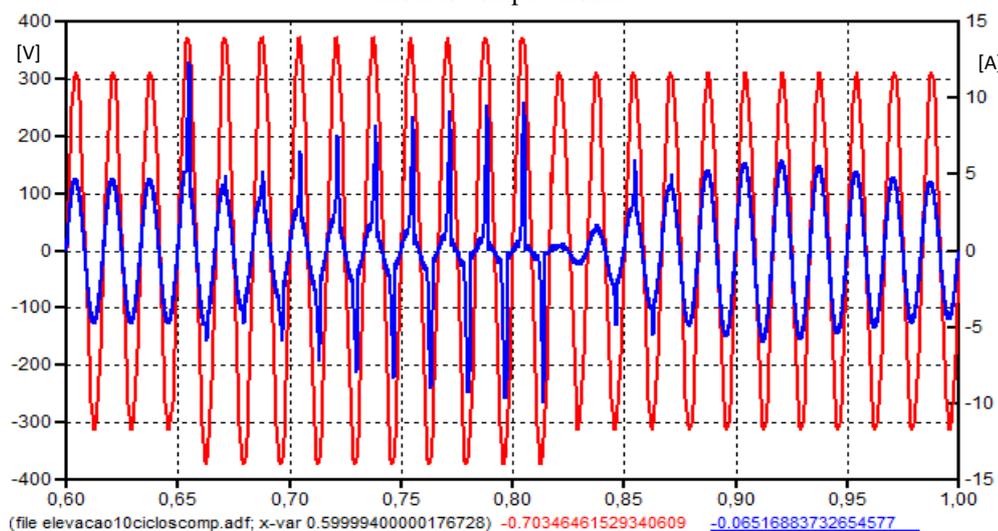
Para entendimento da resposta da corrente observada na figura 4.8 é necessário relembrar o princípio básico de operação do conversor *boost*. Sabe-se que a tensão entregue a carga pelo conversor deve ser maior que a tensão constatada na entrada do retificador. Isso posto, em condições nominais, a tensão presente na entrada do compressor hermético tem valor de 340V. Comparando com a tensão de alimentação do equipamento de 311V de pico, chega-se à conclusão que a razão cíclica deste conversor é próxima de 0 (zero), pois, o ganho estático do compressor é aproximadamente 1,09.

Acrescentando a tensão de entrada um valor de 20%, ela, durante o intervalo do evento de elevação, apresentará uma magnitude maior que a da saída. Essa condição contrapõe o princípio básico do conversor *boost* o qual diz que a tensão de saída deveria ser a maior. Desse modo, a partir do momento que a tensão de entrada ultrapassa a magnitude daquela constatada na carga, a razão

cíclica da chave, que em teoria teria um valor negativo, será nula. Conseqüentemente, o circuito de controle do conversor começará a ser desativado, pois, a chave do *boost* passará cada vez mais tempo aberta. Logo, a tendência para o circuito eletrônico do condicionador de ar a longo prazo é comportar-se como um retificador normal com uma corrente característica de fontes chaveada de equipamentos eletroeletrônicos.

Para a simulação computacional, os ganhos ajustados para os controladores são por si só suficientes para fornecer uma resposta adequada ao modelo. Assim, verificando que experimentalmente que o valor eficaz da corrente era de 3,1A (4,3A de pico), calcula-se a solicitação de potência do equipamento no momento do ensaio para equiparação de resultados. Desse modo, demandando uma potência de 682W e reproduzindo o fenômeno de elevação nos mesmos instantes verificado no laboratório, tem-se na figura 4.9 os perfis de tensão (em vermelho) e corrente(em azul) obtidos para o modelo computacional.

Figura 4.9 - Perfis de tensão e corrente para o condicionador de ar obtidos para a condição de elevação de tensão via modelo computacional.



Fonte: Autor próprio [s]

Constata-se uma boa reprodução do fenômeno em ambiente computacional o que satisfaz as condições do modelo perante elevações na tensão de alimentação do condicionador de ar. A tabela 4.3 mostra a síntese das variáveis avaliadas experimentalmente e computacionalmente com os respectivos erros entre ambas. A diferenciação da corrente de pico ao aplicar a elevação está relacionada à simplificação dos elementos do circuito de controle do equipamento. Como o valor implementado ao modelo é aproximado e simplificado, a diferença de valores entre o modelo computacional e o ensaio experimental naturalmente ocorrerá.

Tabela 4.3 - Erros percentuais entre os resultados experimentais e computacionais o caso de elevação de tensão

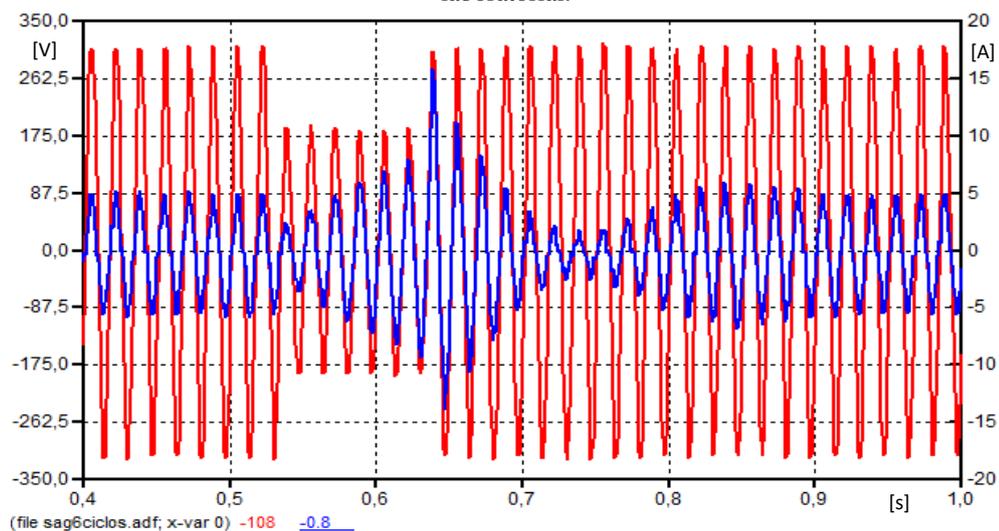
	Experimental	Computacional	Erro(%)
Corrente eficaz (A)	3,096	3,147	1,1%
Pico de corrente ao aplicar a elevação de tensão (A)	11,7	12,411	6%

Fonte: Autor próprio

4.3.3 Caso 3: Afundamento da tensão de suprimento

Analogamente ao caso da elevação de tensão, o condicionador de ar foi submetido a um afundamento de tensão de curta duração. O valor da grandeza durante o fenômeno é de 60% do nominal e sua duração é de 6 ciclos. A figura 4.10 mostra os perfis de tensão (em vermelho) e corrente (em azul) obtidos experimentalmente para o caso.

Figura 4.10 – Perfis de tensão e corrente para o condicionador de ar para um afundamento de tensão obtidos via ensaio laboratorial.



Fonte: Autor próprio

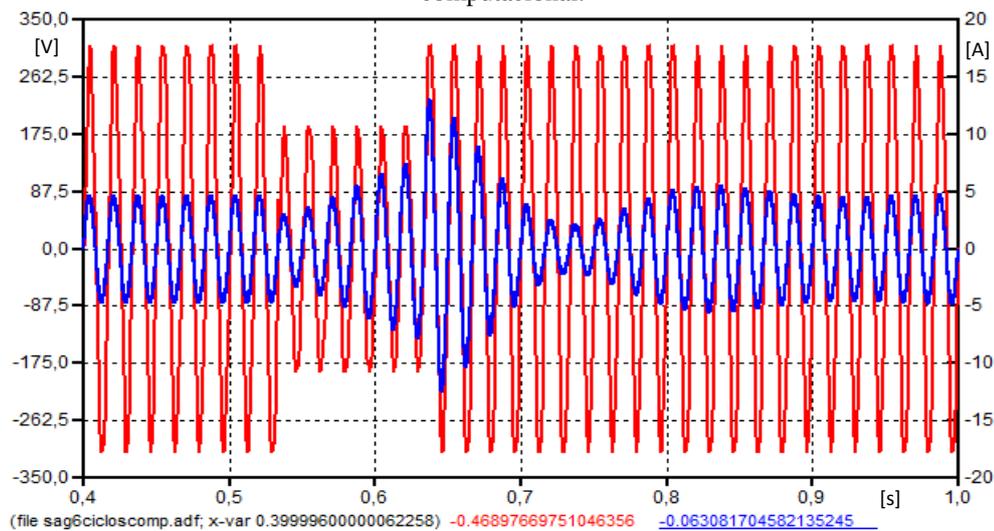
Quando o afundamento é aplicado ao equipamento, a corrente, seguindo o perfil da tensão, abaixa instantaneamente. Entretanto, devido a ação do controle de tensão para manter a potência entregue ao compressor constante, a corrente aumenta continuamente por toda a duração do fenômeno e, por um breve instante, ultrapassa o valor nominal do equipamento. Essa característica é importante para manter o funcionamento contínuo do compressor, mas ao perdurar por muito tempo, pode danificar os componentes do condicionador de ar, principalmente aqueles mais sensíveis a frequentes exposições de correntes elevadas.

Semelhante ao comportamento verificado no caso de elevação de tensão, quando o afundamento cessa, logo após da ocorrência do pico reverso de corrente provocado pelos capacitores

do elo CC, há a ação do controlador para estabilizar o valor da tensão entregue ao compressor. Essa ação influencia a resposta da corrente e que é regulada alguns ciclos após o termino do evento.

Constatando o valor da corrente de pico do ensaio laboratorial e, conseqüentemente, da potência do condicionador de ar solicitada a rede, substituiu-se os valores ao modelo computacional. O perfil da tensão e corrente durante a aplicação do fenômeno de afundamento de tensão é evidenciado na figura 4.11.

Figura 4.11 - Perfis de tensão e corrente para o condicionador de ar para um afundamento de tensão obtidos via modelo computacional.



Fonte: Autor próprio

É necessário salientar que durações maiores ou igual a 10 ciclos sensibilizam o produto, ou seja, o afundamento provoca o desligamento do controle e conseqüentemente do compressor. Desse modo, as situações aqui avaliadas também compreendem as limitações verificadas em laboratório. Em resumo, a tabela 4.4 mostra os valores das grandezas avaliada durante o caso com os seus respectivos erros entre elas.

Tabela 4.4 - Erros percentuais entre os resultados experimentais e computacionais condição de afundamento de tensão

	Experimental	Computacional	Erro(%)
Corrente eficaz (A)	3,2	3,331	4%
Corrente de pico reverso (A)	15	14	6%

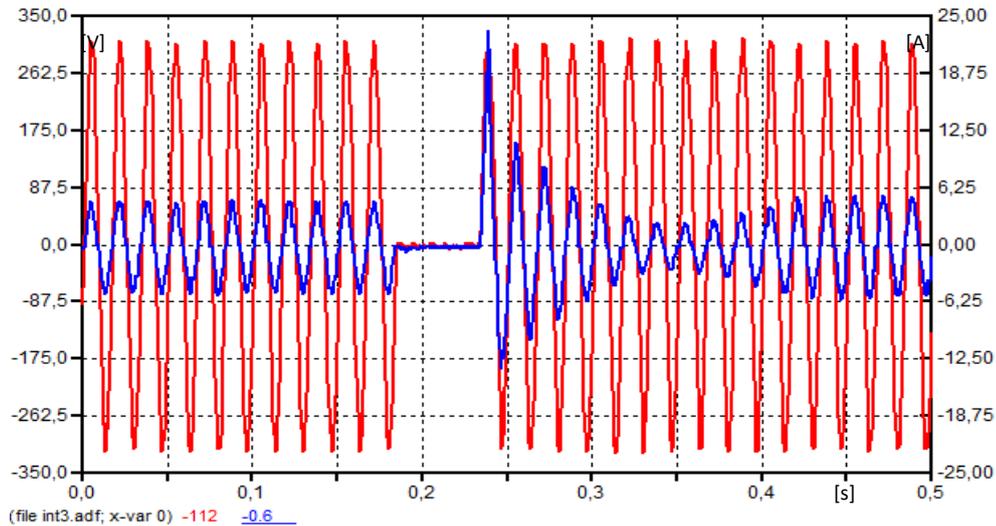
Fonte: Autor próprio

4.3.4 Caso 4: Interrupção da tensão de suprimento

Para o caso de interrupção de tensão, o fornecimento de energia ao condicionador de ar deve ser interrompido por um intervalo de tempo capaz de não provocar o desligamento do aparelho. Assim procedendo, chega-se a aplicação experimental de 0 de tensão por uma duração de 3 ciclos de tempo.

Os perfis de tensão (em vermelho) e corrente (em azul) obtidos em laboratório para o caso são evidenciados na figura 4.12.

Figura 4.12- Perfis de tensão e corrente do condicionador de ar para uma interrupção de tensão obtidos via ensaio laboratorial.

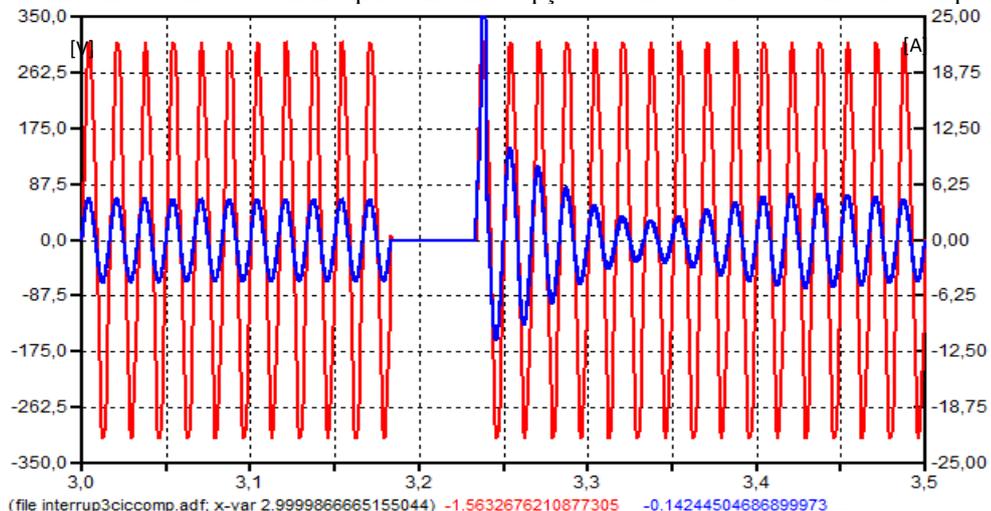


Fonte: Autor próprio

O controlador consegue manter a tensão do condicionador de ar constante durante todo o intervalo o qual é aplicado o fenômeno. Quando a tensão é reestabelecida ocorre também o pico reverso de corrente devido aos capacitores e que induz a ação do controlador de tensão para estabilização da potência do circuito.

Analogamente aos casos anteriores, verifica-se o valor da corrente de pico obtida experimentalmente para estimação da potência térmica solicitada pelo condicionador de ar a rede. Para um valor de 3,18A de pico, calcula-se uma potência de 700W. Utilizando os valores calculados no modelo computacional e reproduzindo o mesmo fenômeno a ele chega-se aos perfis de tensão (em vermelho) e corrente (em azul) mostrados na figura 4.13.

Figura 4.13- Perfis de tensão e corrente para uma interrupção de tensão obtidos via modelo computacional.



Fonte: Autor próprio.

Para interrupção de tensão o modelo também apresentou um resultado esperado. Os erros para a corrente oriundos da comparação entre o modelo experimental e computacional estão representados na tabela 4.5.

Tabela 4.5 - Erros percentuais entre os resultados experimentais e computacionais condição de interrupção de tensão.

	Experimental	Computacional	Erro(%)
Corrente eficaz (A)	3,18	3,23	1,5%
Corrente de pico reverso (A)	24,5	25,2	2,85%

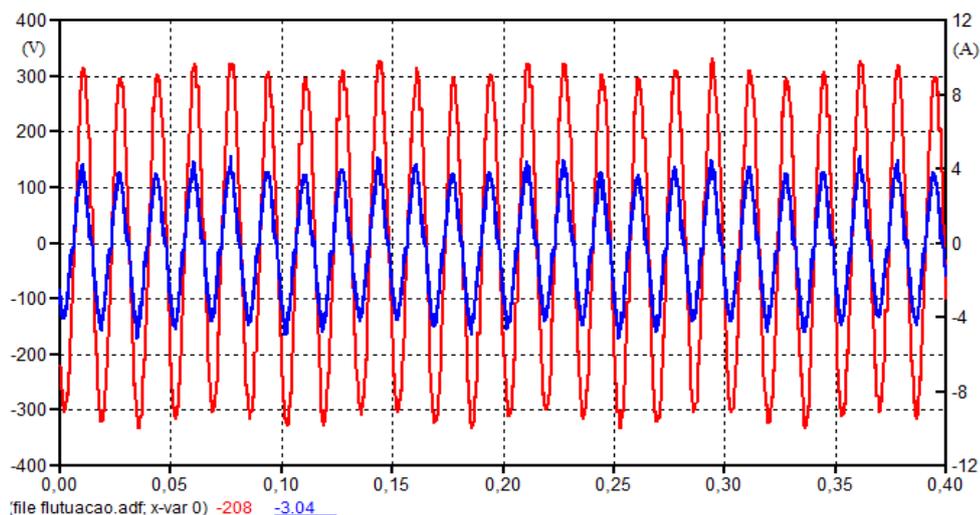
Fonte: Autor próprio

4.3.5 Caso 5: Flutuação na tensão de suprimento

No caso da aplicação de uma flutuação de tensão no condicionador de ar, o controle de tensão não é ativado a tempo suficiente de influenciar a resposta da entrada, pois, a magnitude da tensão é alterada a cada ciclo. Sendo assim, é atribuída a função de ajustar a corrente de alimentação ao controlador da malha de corrente do circuito *boost*. Baseado nisso, o resultado esperado para esta é que ela imite a forma de onda oscilante da tensão.

A luz dos fatos anteriores foi aplicada experimentalmente a fonte controlada de tensão uma flutuação com um valor de modulação de +- 10V e frequência de 15Hz. Os perfis de tensão e corrente obtidos no laboratório são evidenciados na figura 4.14.

Figura 4.14- Perfis de tensão e corrente do condicionador de ar para uma flutuação de tensão obtidos via ensaio laboratorial.



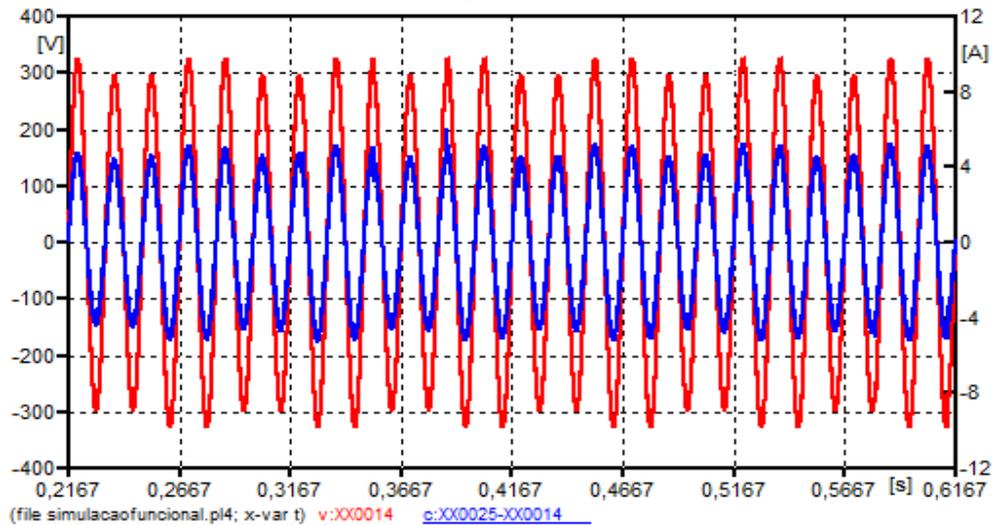
Fonte: Autor próprio.

[s]

É perceptível pela imagem que quando a tensão apresenta uma magnitude maior, a corrente imita essa característica sendo o contrário também válido. Ademais, constata-se que o envelope da corrente do condicionador de ar é igual ao da tensão aplicada para o caso.

Em posse dos parâmetros aplicados em laboratórios, utilizou-se um modelo equivalente de fonte de flicker no ATP e foi reproduzido o mesmo fenômeno. A resposta do modelo pode ser conferida na figura 4.15.

Figura 4.15 - Perfis de tensão e corrente do condicionador de ar para uma interrupção de tensão obtidos via modelo computacional.



Fonte: Autor próprio.

A tabela 4.6 mostra o valor do erro percentual resultante da comparação do maior pico de corrente obtido em ensaio laboratorial com a resposta fornecida pelo modelo experimental. A partir do pequeno erro percentual obtido foi possível inferir a boa representatividade do modelo para o caso e flutuação de tensão.

Tabela 4.6 - Erro percentual entre o resultado experimental e computacional para a condição de flutuação de tensão

	Experimental	Computacional	Erro(%)
Maior pico de corrente (A)	4,72	4,54	3,8%

Fonte: Autor próprio.

4.3.6 Caso 6: Tensão de suprimento com distorção harmônica

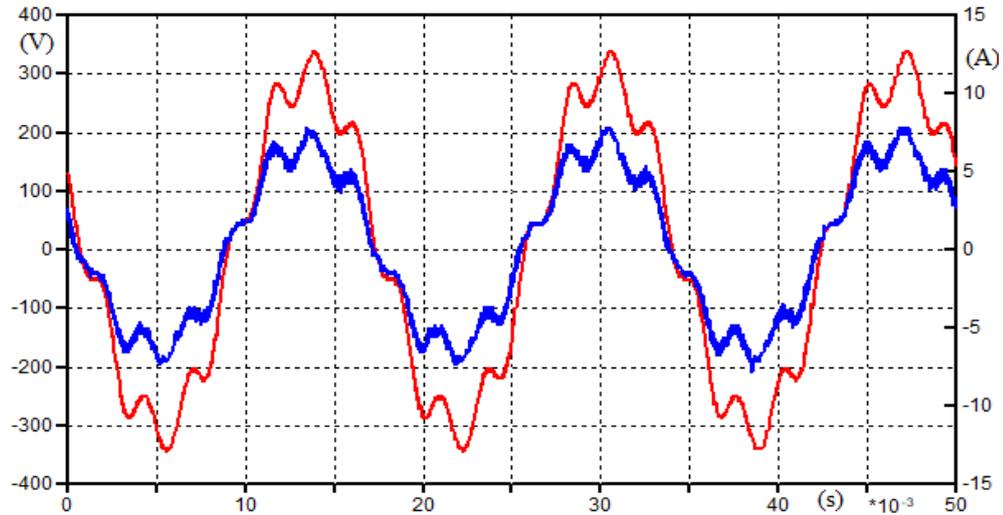
Partindo do pressuposto que a corrente imita a forma de onda da tensão de suprimento, conforme já esclarecido no capítulo 3, ao aplicar uma tensão distorcida no condicionador de ar, a corrente, por conseguinte, apresentará o mesmo grau de distorção e mesma quantidade percentual de componentes harmônicas. Desse modo, para comprovação da afirmação anterior, aplicou-se em laboratório uma forma de onda de tensão contendo as componentes harmônicas expressas na tabela 4.7. O perfil de tensão e corrente resultantes são mostrados na figura 4.16.

Tabela 4.7 - Componentes harmônicas da tensão aplicada ao segundo ensaio laboratorial.

Ordem Harmônica	Valor da Componente (%)
3	0,6
5	1,06
7	14,19
11	1

Fonte: Autor próprio

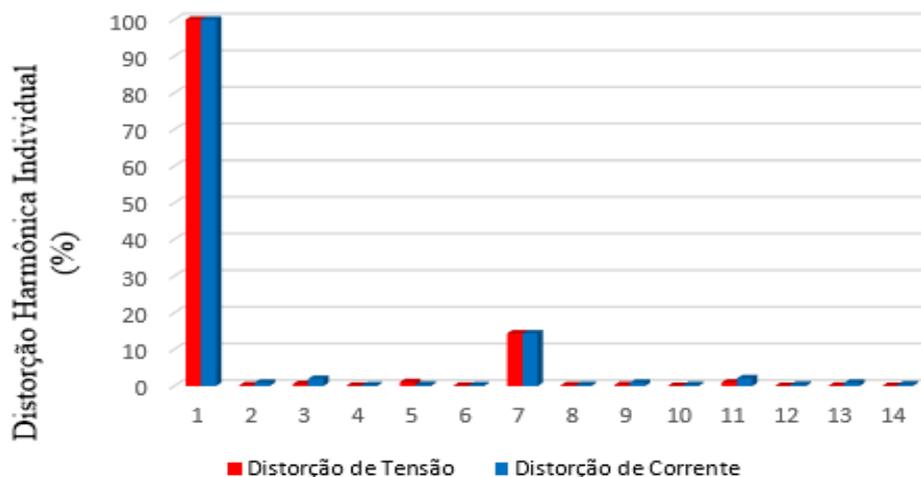
Figura 4.16 - Perfis de tensão e corrente do condicionador de ar durante a aplicação de uma tensão harmônica obtidos via ensaio laboratorial.



Fonte: Autor próprio

O respectivo espectro harmônico é mostrado na figura 4.17. É constatado que a corrente tem os mesmos valores percentuais de distorção harmônica que a tensão aplicada em laboratório, principalmente nas ordens harmônicas de maior magnitude. Esse fato confirma a hipótese apresentada anteriormente.

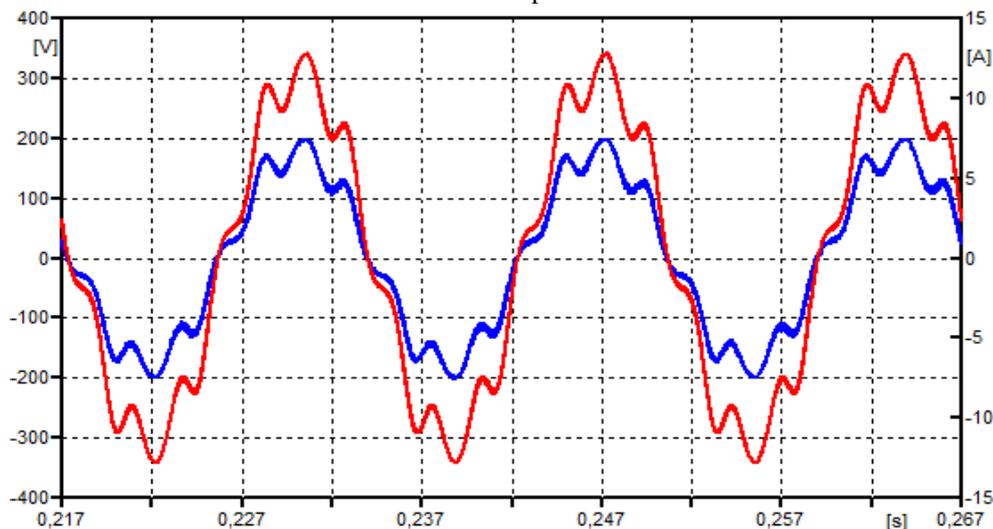
Figura 4.17 – Espectro harmônico de tensão e corrente para a medição experimental.



Fonte: Autor próprio

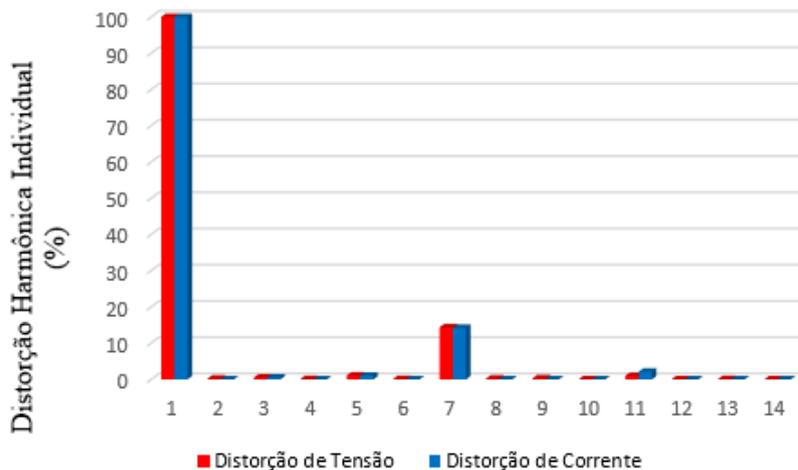
Reproduzindo o fenômeno em ambiente computacional chega-se aos resultados expressos na figura 4.18. Também está evidenciado o espectro harmônico da tensão e corrente do modelo na figura 4.19.

Figura 4.18 - Perfis de tensão e corrente do condicionador de ar durante a aplicação de uma tensão harmônica obtidos via modelo computacional.



Fonte: Autor próprio

Figura 4.19 – Espectro harmônico para a correntes e tensão computacional.



Fonte: Autor próprio

Comparando os resultados obtidos para a corrente alimentação do condicionador de ar, tanto para o ensaio experimental quanto para o modelo computacional, chega-se aos valores expressos na tabela 4.8. As diferenças perceptíveis entre os percentuais de corrente devem-se principalmente ao instrumento de medição utilizado para coletar os dados experimentais. Contudo, tendo em consideração a componente harmônica de sétima ordem apresentando a maior percentagem de distorção, obteve-se praticamente o mesmo percentual inserido na tensão. Esse resultado comprova a característica do circuito *boost* afirmada anteriormente e também a eficácia de reprodução do modelo.

Tabela 4.8 – Comparativo entre as componentes harmônicas experimentais e computacionais

Ordem Harmônica	Valor da Componente Experimental (%)	Valor da Componente Computacional(%)	Erro (%)
3	1,93	1,29	3,3
5	0,36	0,65	8
7	14,346	14,537	1,3
11	2,1197	2,5211	19

Fonte: Autor próprio.

4.4 Considerações Finais

O presente capítulo detalhou o comportamento do condicionador perante situações de suprimento ideais e não-ideais com o propósito de validar o modelo computacional desenvolvido para o equipamento. As situações avaliadas compreenderam problemas de qualidade de energia que ocorrem hoje no sistema elétrico tais como variações distorções harmônicas e flutuações de tensão.

Tanto para a condição ideal de suprimento, como também para as situações de flutuação e distorção harmônica de tensão, o padrão de comportamento constatado compreende do princípio básico de funcionamento do controle de fator de potência para o conversor *boost*. Quando implementado corretamente, esse controle força a corrente do equipamento seguir a forma de onda e fase da tensão a ele aplicada. Assim, para os casos supramencionados, as respostas obtidas, tanto experimentalmente quanto computacionalmente, obedeceram a regra esperada e, ao comparar os resultados de ambas, elas apresentaram erros percentuais mínimos.

Para os casos de afundamento, elevação e interrupção de tensão, a resposta esperada ocorre em função da ação do controle de tensão do conversor. Estabelecendo um patamar de tensão na carga, esse circuito tem por objetivo manter essa potência constante a qualquer custo. Sendo assim, variações que ocorrem na entrada do condicionador de ar refletem diretamente no comportamento da tensão no elo CC característica essa que despertar a atenção imediata do controlador para estabilizá-las. Em todos os casos, o comportamento dinâmico do modelo computacional ficou bem próximo da resposta obtida experimentalmente.

Destaca-se também que para a análise da resposta na entrada do condicionador de ar, as condições fornecidas pelo conversor *boost* foram por si só suficientes para obtenção de uma resposta satisfatória do modelo computacional. Restou ao modulo de inversão, o controle da potência solicitada pelo modelo durante a simulação. Para questões que envolvem o ressarcimento por danos elétricos, o presente modelo, é suficiente e é capaz de produzir resultados confiáveis tanto para situações ideais de fornecimento, quanto para adversidades que possam vir a ocorrer na rede elétrica.

CAPÍTULO V

5 OBTENÇÃO DAS CURVAS DE SUPORTABILIDADE TÉRMICA E DIELÉTRICA PARA O CONDICIONADOR DE AR INVERTER

5.1 Considerações iniciais

Esta etapa dos trabalhos é destinada a investigação dos limites de suportabilidade térmica e dielétrica para o condicionador de ar utilizado na modelagem computacional. O estudo tem por objetivo complementar as informações necessárias para sistematização da verificação de possíveis casos de ressarcimento sob uma perspectiva matemática e física.

Inicialmente é abordado a metodologia a qual o cálculo das curvas é embasado na qual consiste na adequação de teorias físicas a equações matemáticas que regem o comportamento dos limites suportáveis a tensão e corrente de equipamentos eletrônicos. Para instauração e reprodução do método são necessários parâmetros específicos do condicionador de ar provenientes de ensaios laboratoriais destrutivos ao equipamento.

Desse modo, a segunda parte diz respeito ao detalhamento do procedimento experimental empregado para levantamento das propriedades físicas necessárias à obtenção das curvas. Por fim, definida a estratégia, tem-se a descrição dos ensaios destrutivos realizados com a apresentação dos inerentes resultados.

5.2 Fundamentação Teórica para Obtenção das Curvas de Suportabilidade

Em consonância com, [4], [26], [29], tem-se nesta seção, o equacionamento matemático utilizado para obtenção das curvas de suportabilidade do condicionador de ar *inverter*. Para os dois diferentes tipos de danos presenciado no equipamento adota-se uma metodologia de cálculo correspondente.

5.2.1 Suportabilidade térmica

No que diz respeito ao fenômeno térmico, a aplicação de uma corrente de alimentação acima dos valores nominais em um equipamento resulta em elevações de temperaturas prejudiciais para o seu funcionamento. Caso ele opere em condições anormais de aquecimento, seus componentes eletroeletrônicos estarão sujeitos a danos de natureza física que exigem pronta substituição das peças ou de todo o produto. Fundamentado no contexto, para se obter a suportabilidade térmica do condicionador de ar deve-se encontrar a energia necessária para danificá-lo.

O limite térmico suportável de um equipamento apoia-se no conceito físico de energia máxima (I^2t) dissipada e admissível pelos seus componentes. Para cada valor de corrente aplicada no condicionador de ar existirá um tempo de duração correspondente a sua tolerância. A composição de diferentes pares de tempo e corrente resultarão no mesmo valor de energia térmica solicitada. Dessa forma, tem-se:

$$\int_0^{T_D} [i(t)]^2 \cdot dt = I^2 \cdot T_D = J = \text{cte} \quad (5.1)$$

Na equação (5.1), $i(t)$ é o valor instantâneo da corrente, em amperes (A), e representa a dissipação da energia máxima admissível pelo equipamento, T_D equivale ao intervalo de tempo, em segundos, de submissão do equipamento a determinado valor de corrente de ensaio e J corresponde a energia máxima suportada pelo condicionador de ar.

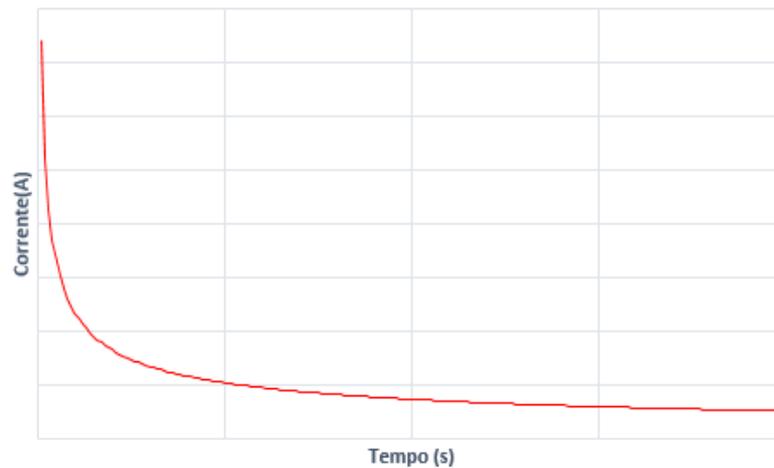
Sendo a solicitação energética do equipamento constante para qualquer situação de operação, reformula-se a equação (5.1) e obtém-se (5.2). A partir de (5.2) é encontrado, em (5.3), a resposta, no domínio do tempo, das solicitações de corrente do produto ensaiado em função do limite térmico suportável.

$$J = I^2 \cdot T_D \quad (5.2)$$

$$i_{sp}(t) = \sqrt{\frac{J}{T_D}} \quad (5.3)$$

Constata-se a partir da equação (5.3) que o perfil da curva de suportabilidade térmica esperada será do formato característico de uma função exponencial. O aspecto da curva é ilustrado na figura 5.1.

Figura 5.1 – Aspecto da curva de suportabilidade térmica para equipamentos elétricos.

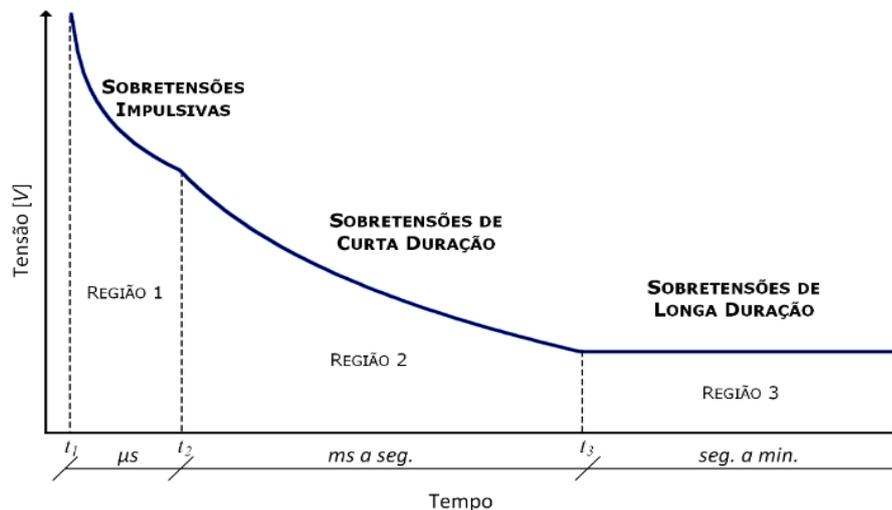


Fonte: Autor próprio.

5.2.2 Suportabilidade dielétrica

Em relação ao efeito dielétrico, os danos ocasionados ao equipamento estão relacionados ao rompimento da isolação de seus componentes. Essa condição deve-se a exposição do condicionador de ar a intensidades de tensões superiores a nominal, cada qual com seu correspondente intervalo de duração. A curva que caracteriza os limites máximos de tensão em função do tempo de exposição é ilustrada na figura 5.2.

Figura 5.2 – Curva de suportabilidade dielétrica típica para equipamentos elétricos.



Fonte: Autor próprio.

Inferese, a partir da figura 5.2, a existência de três regiões distintas, cada uma delas representa a suportabilidade dielétrica do equipamento em relação a fenômenos de sobretensão passíveis de ocorrência. Esses são classificados pelo nível de intensidade e respectivo intervalo de duração, a saber:

- Para a primeira região as tensões registradas são provenientes dos fenômenos de transitórios impulsivos. As magnitudes aplicadas ao equipamento são extremamente altas e ultrapassam os quilovolts. Estes surtos têm duração curta e atingem os microssegundos;
- Na segunda região são contemplados os fenômenos, oriundos de falhas ou manobras na rede, capazes de estabelecer no equipamento elevadas sobretensões ainda que menores em comparação com as impulsivas. A duração características destes fenômenos é em torno dos milissegundos.
- Já a terceira região está associada a fenômenos de sobretensão originários na frequência industrial de operação. Os valores de tensão registrados são próximos ou menores que duas vezes a tensão nominal e sua duração se estende por segundos ou minutos.

Sabendo que a primeira seção da figura 5.2 contempla tempos da ordem de μs , e a última, intervalos de cerca de segundos ou minutos, adota-se funções logarítmicas no tempo para a representação matemática da tolerância do equipamento. Ao assumir um comportamento linear para todas as regiões do gráfico, pode-se utilizar conceitos fundamentais de geometria analítica a respeito do cálculo da equação da reta e chegar à caracterização da curva desejada, descrita na equação (5.4).

$$v_{sp}(t) = \alpha \cdot \log t + \beta \quad (5.4)$$

Da equação 5.4, $V_{sp}(t)$ representa o valor máximo de tensão suportado pelo equipamento para determinado instante de tempo t . As constantes α e β , equivalem respectivamente aos coeficientes angular e linear da referida reta e são encontradas através de (5.5) e (5.6).

$$\alpha = \frac{Y(t_2) - Y(t_1)}{\log t_2 - \log t_1} \quad (5.5)$$

$$\beta = Y(t_1) - \log t_1 \quad (5.6)$$

As equações anteriores apontam para a aplicação de ensaios com diferentes níveis de sobretensão e sobrecorrente no condicionador de ar com a finalidade de obter seu perfil da tolerância dielétrica máxima. Vale ressaltar que ambos os métodos apresentados são de natureza estatística, ou seja, a utilização de uma maior quantidade de equipamentos de mesmo modelo nos ensaios destrutivos proporcionará um resultado de tolerância térmica e dielétrica mais preciso. Além disso, cada equipamento tem características particulares, como o envelhecimento de seus componentes

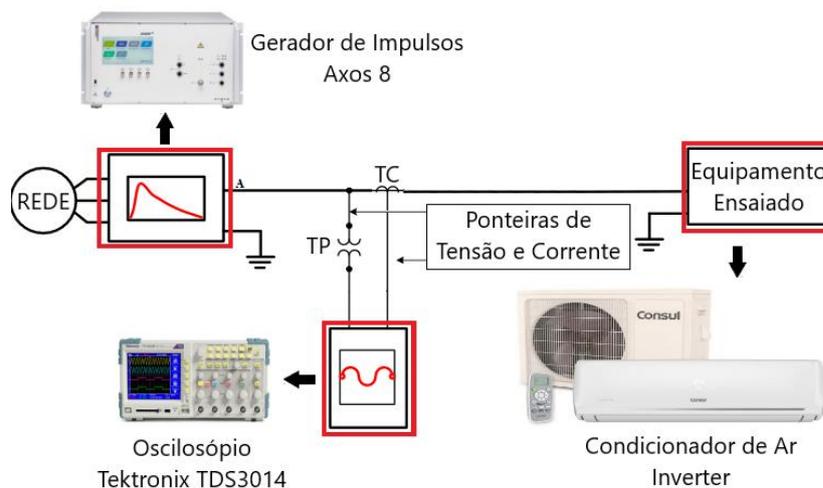
eletrônicos por exemplo, sendo assim, a tolerância não é exata e pode ser levemente maior ou menor do que o resultado aqui expresso.

5.3 Curva de Suportabilidade Térmica Obtida

A estratégia laboratorial adotada para a obtenção da energia máxima admissível pelo condicionador de ar funda-se no ensaio de sobrecorrente. A montagem da estrutura utilizada é representada na figura 5.3. O arranjo é constituído pelos seguintes equipamentos:

- Gerador de sinais com parâmetros programáveis, marca Axos 8;
- Osciloscópio digital para a aquisição das formas de onda da corrente, marca Teknotrix, modelo TDS3014;
- Equipamento condicionador de ar *inverter*.

Figura 5.3 – Estrutura laboratorial para o ensaio de transitórios impulsivos de corrente no condicionador de ar.



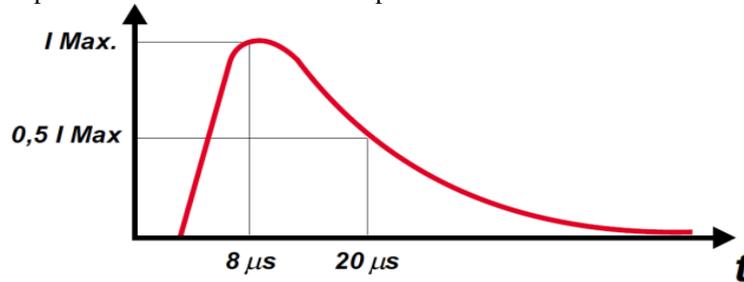
Fonte: Autor próprio.

O procedimento experimental consiste em aplicar uma corrente impulsiva de descarga atmosférica com a amplitude suficiente para danificar o condicionador de ar. A exposição é dada até algum componente do equipamento ter deteriorado devido ao excesso de temperatura. Com o registro da duração do fenômeno e a intensidade do impulso calcula-se, através da equação (5.1), a energia que o condicionador de ar suportará sem apresentar danos físicos.

Atentando-se as recomendações internacionais, IEEE C6241, IEEE C6234, IEEE C6245, IEC 61643-1, IEC 61000-4-5, o gerador de impulsos Axos 8 possui uma faixa de operação de 0,1 até 3,5kA. Ele pode ser programado para injetar no equipamento um pulso com tempo de subida

programado de $8\mu\text{s}$ que decai para 50% do seu valor máximo em um intervalo de $20\mu\text{s}$. A caracterização da onda é dada na figura 5.4.

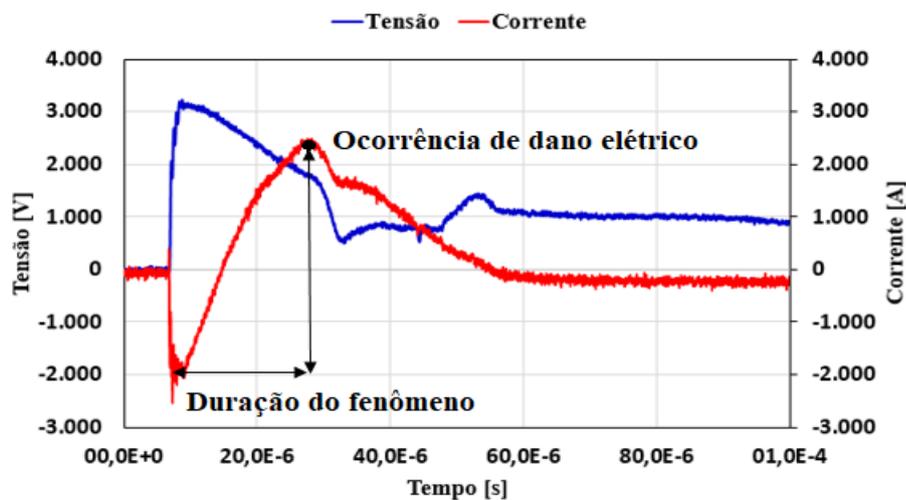
Figura 5.4 – Impulso característico de corrente para ensaios destrutivos no condicionador de ar.



Fonte: [76]

Em concordância com a estrutura física enunciada o condicionador de ar foi alimentado com um impulso de corrente semelhante a uma descarga atmosférica. Os perfis, de tensão e corrente, em azul e vermelho respectivamente, obtidos no ensaio são dados na figura 5.5.

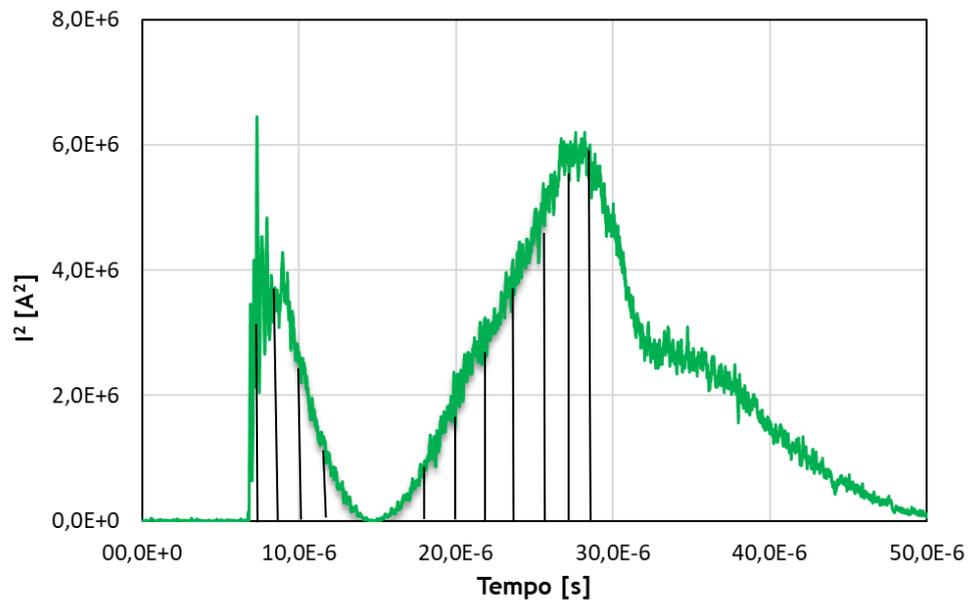
Figura 5.5 – Perfis de tensão e corrente durante o ensaio transitório impulsivo no condicionador de ar.



Fonte: Autor próprio.

Infere-se, a partir da figura 5.5, que o impulso de corrente (em vermelho) atingiu um valor de pico próximo a 2,5kA. O momento de início do fenômeno transitório é em torno de $6,86\mu\text{s}$ e a exposição dura aproximadamente $22,44\mu\text{s}$. No instante correspondente a $29\mu\text{s}$ é identificada a falha de algum componente condicionador de ar, pois, é verificado que a corrente decresce até o valor nulo ao mesmo tempo que a tensão (em azul) mantém o patamar de 1000V. A partir dos valores de corrente medidos durante o ensaio é obtida a curva referente a I^2 em função do tempo. O seu comportamento é detalhado na figura 5.6.

Figura 5.6 – Perfil da corrente quadrática resultante do ensaio de impulso ao condicionador de ar.



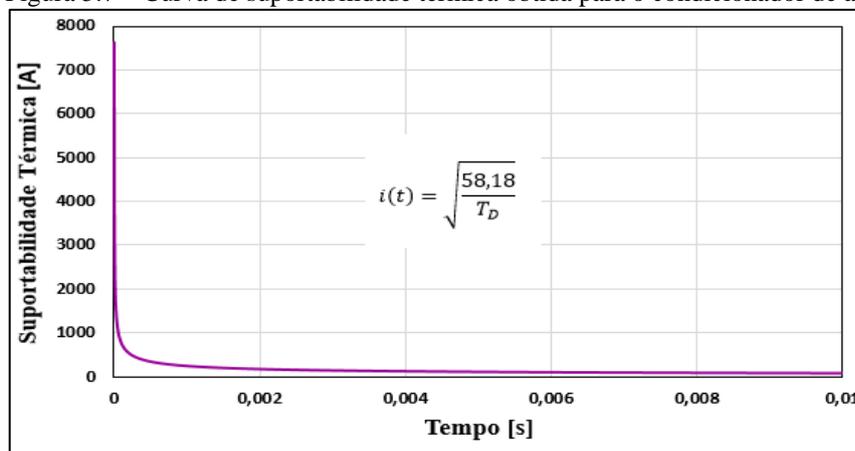
Fonte: Autor próprio.

A área delimitada na figura 5.6 corresponde a energia máxima admitida pelo equipamento, ou seja, a partir da equação (5.1), pode-se somar todos os pontos da curva e obter essa energia. Efetuando a soma obtém-se a equação (5.7).

$$J = \sum_{t=6,86\mu s}^{t=29,30\mu s} I^2(t) \cdot t = 58,18 \text{ A}^2\text{s} \quad (5.7)$$

Com o valor da energia máxima admissível encontrado na equação (5.7) é calculada, mediante equação (5.3), a curva de suportabilidade térmica do condicionador de ar. O resultado é evidente na figura 5.7.

Figura 5.7 – Curva de suportabilidade térmica obtida para o condicionador de ar.



Fonte: Autor próprio.

5.4 Curva de Suportabilidade Dielétrica Obtida

A curva dielétrica do condicionador foi obtida através da realização de dois ensaios, a saber:

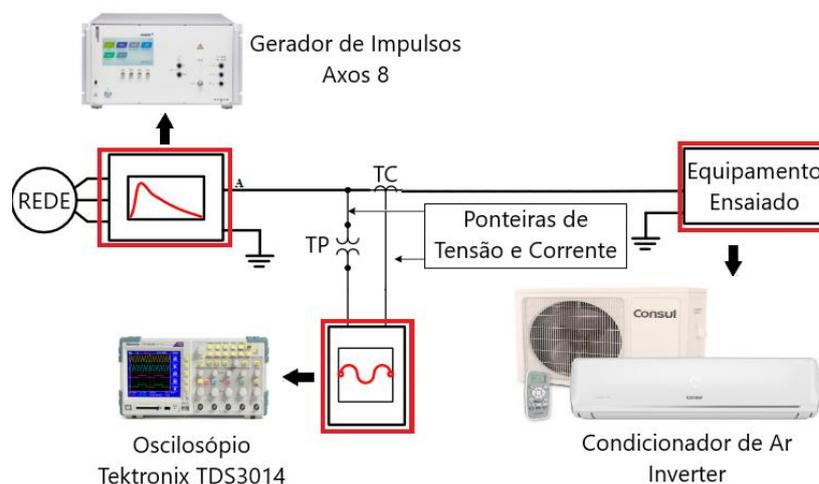
- Para a região 1, efetuou-se um ensaio de sobretensão transitória impulsiva simulando a incidência de descargas atmosféricas na rede com propagação para o condicionador de ar;
- Para a região 3, efetuou-se um ensaio na baixa tensão a fim de simular distúrbios típicos de sobretensão com ocorrência na frequência industrial.

A estrutura laboratorial não foi capaz de danificar o equipamento nas condições referentes a região 02. O resultado esperado é de então apenas dois pares de pontos da curva de suportabilidade dielétrica. O cálculo da tolerância é então realizado agregando a região 1 diretamente com a 3.

5.4.1 Ensaio de transitórios impulsivos

O arranjo laboratorial referente a região 1, transitórios impulsivos de tensão, é esquematizado na figura 5.8. Semelhante a metodologia empregada nas solicitações térmicas, os equipamentos utilizados no ensaio já foram anteriormente citados.

Figura 5.8 -Impulso característico para ensaios destrutivos no condicionador de ar.



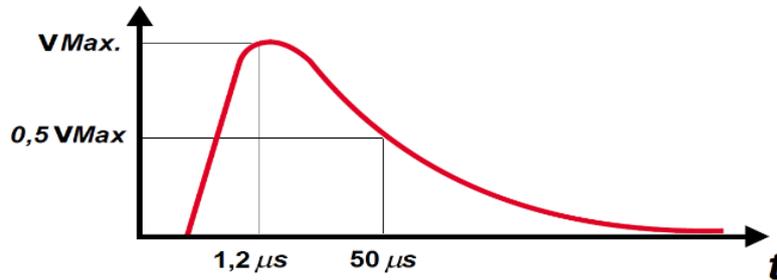
Fonte: Autor próprio.

O ensaio é realizado através da aplicação de um impulso de tensão no condicionador de ar de modo a simular uma descarga atmosférica de tensão. A exposição do equipamento se estende até a ocorrência de falhas físicas nos seus componentes. Após a constatação do feito é registrado os intervalos de início e término do evento.

Em relação a intensidade da tensão, o gerador Axos 8 possui uma faixa de operação de 0,2 até 15kV. Ele desenvolve um pulso com tempo de subida programado de $1,2\mu\text{s}$ que decai para 50% do

seu valor máximo em um intervalo de $50\mu\text{s}$. A caracterização do impulso de tensão é ilustrada na figura 5.9.

Figura 5.9 - Impulso característico de tensão para ensaios destrutivos no condicionador de ar



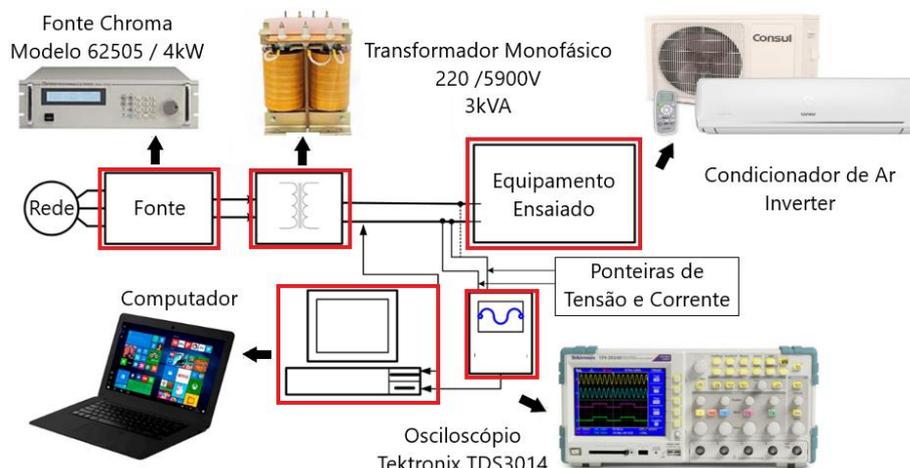
Fonte: [76]

5.4.2 Ensaio de sobretensão em BT

Para a região 3 foi utilizado o arranjo físico detalhado na figura 5.10. A fonte programável foi ajustada de modo a reproduzir um fenômeno típico de BT e causar danos físicos na isolação dos componentes eletroeletrônicos do condicionador de ar. O sistema da figura é constituído pelos seguintes equipamentos:

- Fonte de tensão e corrente, com características programáveis, marca Chroma, modelo 61505;
- Osciloscópio digital para a aquisição das formas de onda da corrente, marca Teknatrix, modelo TDS3014;
- Condicionador de ar *inverter*.
- Transformador monofásico 3kVA e relação de transformação de 220V/5900V;
- Computador necessário para resgatar os dados medidos pelo osciloscópio.

Figura 5.10 – Estrutura laboratorial para realização do ensaio de sobretensão em BT



Fonte: Autor próprio.

Ao inserir uma tensão no primário do transformador, no secundário, devido a relação de transformação, existirá uma sobretensão correspondente à fenômenos associados a elevação de tensão na rede. É registrado o tempo de duração do fenômeno até a ocorrência de danos físicos aos componentes do condicionador de ar.

Após obtidos os dados referentes as regiões 01 e 03, calcula-se, através das equações (5.5) e (5.6), os coeficientes da curva. Após o cálculo encontra-se, por meio de (5.4), o perfil de suportabilidade dielétrica do condicionador de ar. Os ensaios de sobretensão seguiram os mesmos padrões adotados para os de sobrecorrente no que se refere a normas e recomendações internacionais.

Em conformidade com a estrutura física adotada foram realizados dois ensaios para obtenção da curva de suportabilidade dielétrica do condicionador de ar. Os resultados para ambos estão indicados na tabela 5.1. Conforme declarado no início da seção, encontrou-se apenas os pares de pontos relacionados as regiões 1 e 3.

Tabela 5.1 – Resultado dos ensaios destrutivos de tensão ao condicionador de ar

Ensaio de Impulso		Ensaio F. Industrial	
Tensão [V]	Duração [μ s]	Tensão [V]	Duração [s]
3230	22,4	510	2,59

Fonte: Autor próprio

O gerador de sinais, alusivo ao ensaio de transitórios impulsivos de tensão, aplica um pulso no valor máximo de 3,23kV. O condicionador de ar suportou esse nível de tensão durante 22,4 μ s. Para a frequência industrial a fonte Chroma aplicou um valor de tensão de 510V para 2,59 segundos de exposição. Registrados os tempos t_1 e t_2 , é calculado, através das equações (5.5) e (5.6), os coeficientes da curva. O resultado é dado na tabela 5.2 juntamente com a expressão da especifica curva na equação (5.8).

Tabela 5.2 – Coeficientes da curva de suportabilidade dielétrica do condicionador de ar.

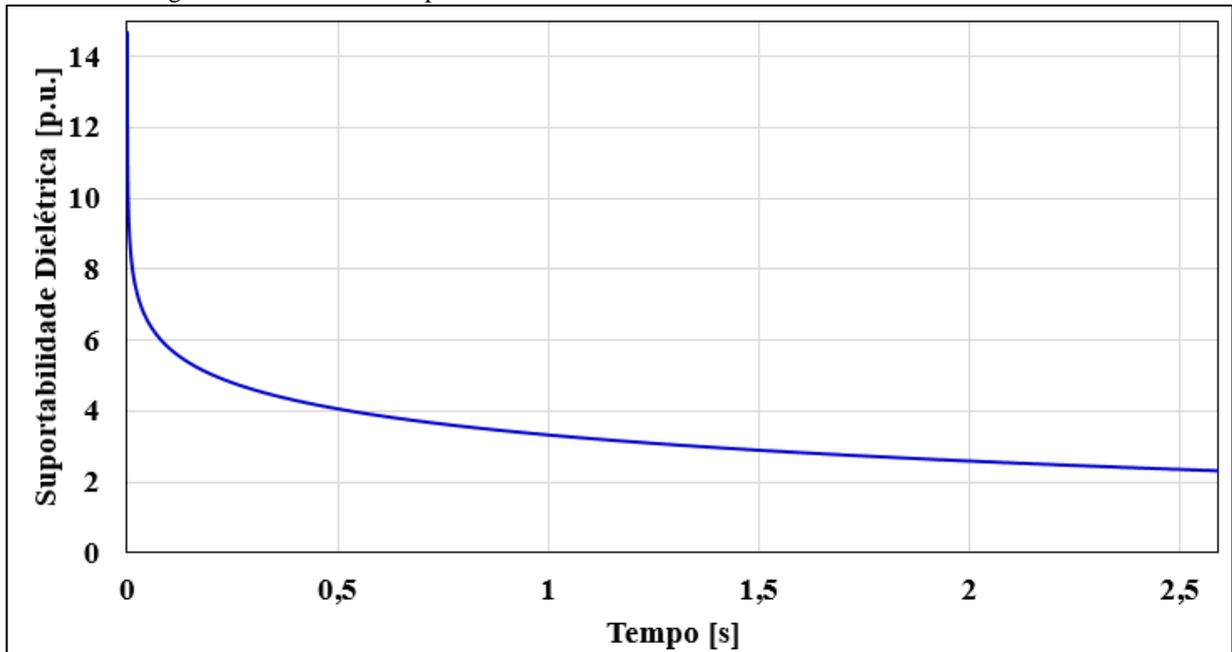
Trecho das Curvas	Curva 01	
Coeficientes das Equações de retas com tempo em logaritmo	a1	b1
	-537,307628	732,609116
Intervalo de tempo da curva	22,4 μ S < t < 2,59 s	

Fonte: Autor próprio

$$V_{sp} = (-537,3076) * \log(t) + 732,0691 \quad (5.8)$$

É então traçado, a partir da equação (5.8), o perfil de suportabilidade dielétrica do condicionador de ar ensaiado. A curva resultante é apresentada na figura 5.11. Os valores de tensão, indicados na imagem, estão representados em unidade relativa à tensão nominal do equipamento com um valor de 220V.

Figura 5.11 – Curva de suportabilidade dielétrica do condicionador de ar *inverter* obtida



Fonte: Autor próprio.

Baseado nos ensaios supramencionados foi possível então encontrar as equações que descrevam a suportabilidade a tensão e corrente para o condicionador de ar. A tabela 5.3 resume ambos os resultados de suportabilidade obtidos nesta etapa dos trabalhos.

Tabela 5.3 – Resultados finais de suportabilidade térmica e dielétrica para o condicionador de ar

Suportabilidade Térmica

$$I_{sp} = \sqrt{\frac{58,18}{T_d}}$$

Suportabilidade Dielétrica	$V_{sp} = (-537,3076) * \log(t) + 732,0691$
-----------------------------------	---------------------------------------------

Fonte: Autor próprio.

5.5 Considerações Finais

O presente estudo descreve todo o procedimento referente a obtenção das curvas de suportabilidade térmica e dielétrica do condicionador de ar *inverter*. Sustentada em desenvolvimentos

anteriores, a metodologia combina a utilização de equações matemáticas para descrição teórica do tema com validação experimental dos aspectos levantados.

As principais curvas já existentes na literatura não fornecem uma possibilidade de comparação com as alcançadas no estudo, pois, o condicionador de ar ensaiado não possui muitas semelhanças estruturais com os equipamentos alvo de pesquisas anteriores. Dessa forma, novos estudos podem utilizar como precursores os resultados alusivos ao presente trabalho.

Embora a execução do experimento resuma-se a somente um tipo de equipamento, toda a lógica do procedimento pode ser empregada em outras marcas e produtos ainda não investigados. Uma maior variedade de curvas levantadas propicia uma base sólida para expandir a visão da concessionária durante a verificação de pedidos de indenização e direciona-la para a decisão correta.

Em relação a estrutura laboratorial, obteve-se uma grande similaridade das anomalias de tensão e corrente impulsivas. O gerador de impulsos Axos 8, em concordância com as normas e recomendações nacionais e internacionais citadas, possuía uma grande faixa de variação de parâmetros. Da mesma forma, no caso de ensaio na frequência industrial, a fonte Chroma representou bem o fenômeno de sobretensão assegurando resultados satisfatórios.

A partir dos perfis de suportabilidade é possível o estudo aprofundado do comportamento do eletrodoméstico não somente aos casos considerados, mas também a diversos outros tipos de situações que podem ser representadas em softwares computacionais em virtude da sua modelagem. Portanto, casos relacionados a fenômenos não previstos neste estudo podem ser avaliados com influência das informações alcançadas. Conclui-se que elas são de grande relevância na contribuição na verificação de pedidos de indenização por danos.

CAPÍTULO VI

6 ESTUDOS DE CASOS COMPUTACIONAIS DO CONDICIONADOR DE AR INVERTER SUBMETIDO A DISTÚRBIOS DE TENSÃO E CORRENTE

6.1 Considerações iniciais

Tendo o modelo computacional do condicionador de ar *inverter* e seus respectivos limites de suportabilidade, a última fase dos trabalhos consiste em utilizar dos resultados alcançados para imprimir uma possível análise computacional de casos de ressarcimento. Para tal, deve-se calcular a solicitação imposta ao condicionador de ar para cada caso avaliado.

Sabe-se que o limite de suportabilidade do equipamento é traduzido na forma de uma curva em função do tempo. Desse modo, para a efetiva comparação entre os valores de tensão e corrente impostos ao condicionador de ar, é necessário transformar a resposta dada pelo modelo computacional também em uma curva que obedece às mesmas características constatadas nos estudos de suportabilidade.

Então, utilizando da metodologia já proposta e integrada no programa desenvolvido pela UFU o Analisador de pedidos de Ressarcimento, tem-se, primeiramente uma breve apresentação dos passos de cálculo dessas solicitações necessários para atingir os objetivos aqui almejados. Posteriormente, é imposto ao modelo computacional dois casos típicos de distúrbios de qualidade possíveis de ocorrerem na entrada do equipamento.

Em posse dos perfis de tensão e corrente para ambos os casos, é realizado cálculo da solicitação dielétrica e térmica do condicionador de ar e os resultados observados serão comparados com os seus respectivos limites de suportabilidade, obedecendo, claramente, as condições de tensão para suportabilidade dielétrica e corrente para térmica. Por fim, será validado a existência ou não do nexos causal para cada situação através da utilização de ferramentas computacionais Excel e ATP.

6.2 Cálculo para as solicitações térmica e dielétrica do condicionador de ar.

A referência [11] detalha todo o procedimento necessário para a transformação da resposta de tensão e corrente do modelo computacional em uma curva de solicitação dielétrica e térmica. Para a tensão, a metodologia consiste em discretizar um distúrbio, que ocorre dentre um intervalo t_1 e t_2 , através da equação matemática dada em (6.1), para representar o efeito cumulativo da tensão no equipamento.

$$V_k = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n V_i^2}{n}} \quad (6.1)$$

Onde:

- V_k – valor da solicitação dielétrica para um instante de tempo qualquer;
- V_i – valor instantâneo da tensão para um instante de tempo qualquer;
- n – número de amostras

Desse modo, aplicado qualquer distúrbio de tensão na entrada do condicionador de ar, ele poderá ser discretizado em uma curva representativa de solicitação. O cálculo depende do intervalo de tempo da anomalia e deve estar em harmonia com o passo de integração adotado no ATPDraw para o modelo computacional. No presente trabalho, os cálculos dos valores de solicitação foram realizados para cada ciclo de instituição do evento de tensão no equipamento. Se o evento, por exemplo, possuir 10 ciclos de duração, serão realizados 10 cálculos (utilizando todos os valores de amostragem do ciclo), conforme rege a equação supramencionada, e a respectiva curva de solicitação dielétrica terá 10 pontos.

Para os casos de análise da solicitação térmica, o procedimento é análogo ao da tensão. Por conseguinte, o cálculo da respectiva solicitação é dado pela equação (6.2).

$$I_k = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n I_i^2}{n}} \quad (6.2)$$

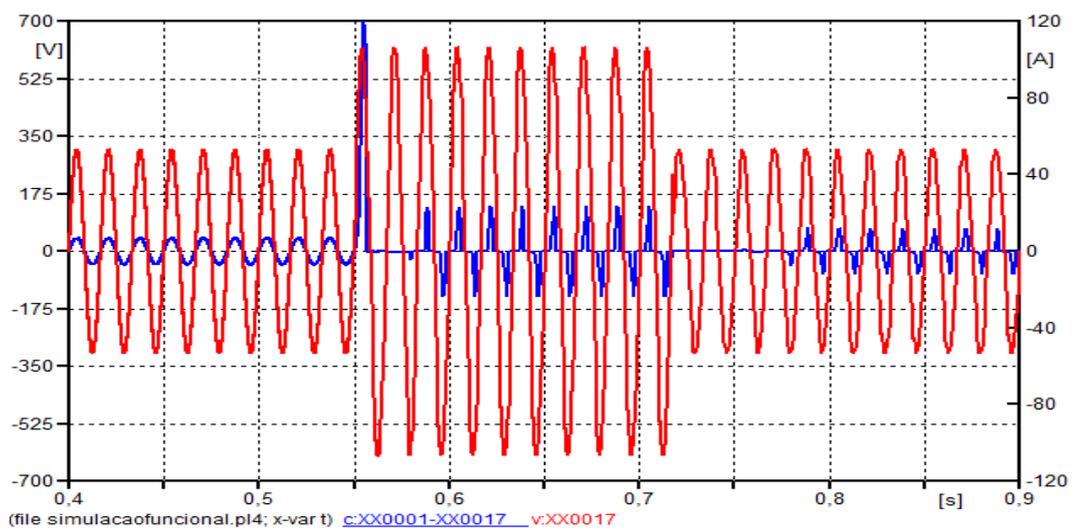
- I_k – valor da solicitação térmica para um instante de tempo qualquer;
- I_i – valor instantâneo da corrente para um instante de tempo qualquer;
- n – número de amostras

Assim, utilizando as equações (6.1) e (6.2) para efetuação dos cálculos obtém-se curvas de solicitação do mesmo formato das de suportabilidade. Conseqüentemente, análises conclusivas da correlação entre distúrbio e efeito ao equipamento poderão ser realizadas. À luz destes fatos e utilizando a metodologia proposta, em seqüência, tem-se o estudo de dois casos contendo a aplicação de um distúrbio na entrada do condicionador de ar para verificação da consistência do nexos causal.

6.3 Estudo de caso 1: Elevação de Tensão de 2pu por 10 ciclos

Para o primeiro caso de análise foi imposto na entrada do modelo do condicionador de ar uma elevação de tensão de duas vezes o valor nominal por uma duração de 10 ciclos. Os perfis de tensão e corrente resultantes do modelo são mostrados na figura 6.1.

Figura 6.1 – Perfis de tensão e corrente para o condicionador de ar submetido a uma elevação de tensão de valor 2pu em uma duração de 10 ciclos.



Fonte: Autor próprio.

Em seqüência, tem-se o processo de discretização da tensão e corrente para obtenção das curvas de solicitação dielétrica e térmica com o objetivo de comparação e análise com suas respectivas curvas de suportabilidade.

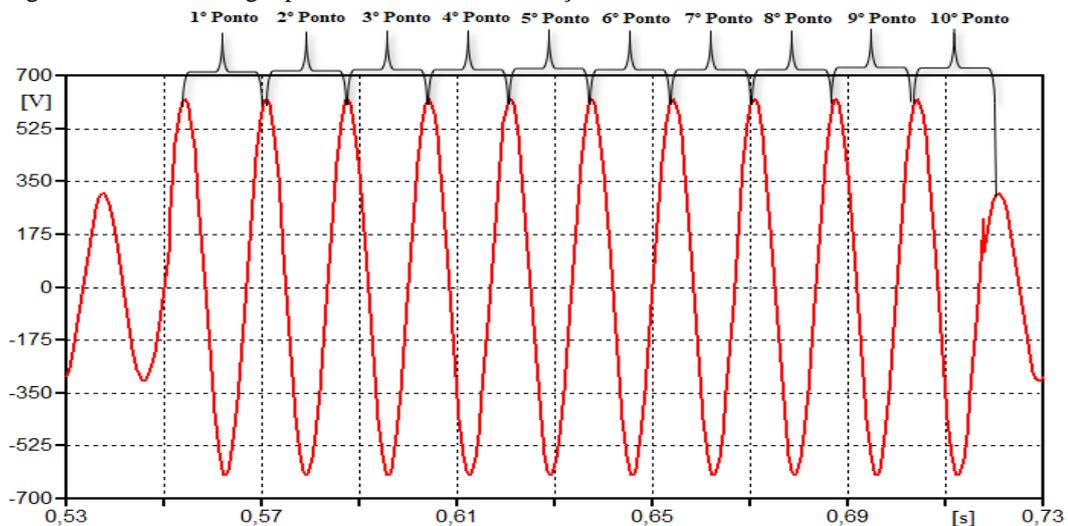
6.3.1 Suportabilidade dielétrica

A partir do perfil de tensão observado na figura 6.1, foi estabelecido um processo para obtenção da curva de solicitação dielétrica do condicionador de ar para o fenômeno de elevação de tensão. O primeiro passo consiste em obter através de medição o distúrbio que supostamente danificou o equipamento. Em seguida, analisando a forma de onda, deve-se considerar o primeiro instante de tempo em que o valor de pico de tensão esteja fora dos padrões considerados para o equipamento. A partir da avaliação da forma de onda no programa Excel, constatou-se que a o

primeiro pico de elevação de tensão ocorreu no instante de 0,5541 segundos e sua magnitude atingiu cerca de 621,99V de pico.

Posteriormente, conforme mostra a figura 6.2, foi utilizado a equação (6.1) para calcular a solitação dielétrica de pico a pico por toda a duração do fenômeno. A soma quadrática em cada ciclo compreendia de 1000 pontos de amostragem. Desse modo, realizando os cálculos necessários em cada um dos intervalos obteve-se 12 pontos de ligação. O valor e instante de tempo para cada um deles é indicado na tabela 6.1.

Figura 6.2 – Metodologia para o cálculo das solitações térmica e dielétrica do condicionador de ar.



Fonte: Autor próprio.

Tabela 6.1 – Solitação dielétrica do condicionador de ar durante o fenômeno de elevação de tensão.

Tempo (s)	Solitação Dielétrica (V)
0,554611	440,2578
0,5708276	440,2578
0,5874941	440,2578
0,6041606	440,2578
0,6208271	440,2578
0,6374936	440,2578
0,6541601	440,2578
0,6708266	440,2578
0,6874931	440,2578
0,7041596	397,9208
0,7208261	220,1289
0,7374926	220,1289

Fonte: Autor próprio.

Para efetiva comparação entre solitação e os limites máximos de tensão admissíveis, a curva de suportabilidade dielétrica deve iniciar no mesmo instante de tempo em que ocorre o primeiro pico

anormal de tensão. Como o distúrbio iniciou em 0,55416 segundos, essa curva deve ser deslocada para mesmo intervalo de tempo. Desse modo, baseado nos resultados evidenciados no capítulo 5, a nova lei que rege a curva de suportabilidade para o condicionador de ar para o caso atual é dada na equação (6.3).

$$V_{sp} = (-537,3076) * \log(t - 0,5541) + 732,0691 \quad (6.3)$$

Substituindo todos os pontos dados na tabela 6.1 na equação (6.3) chega-se aos valores indicados na tabela 6.2.

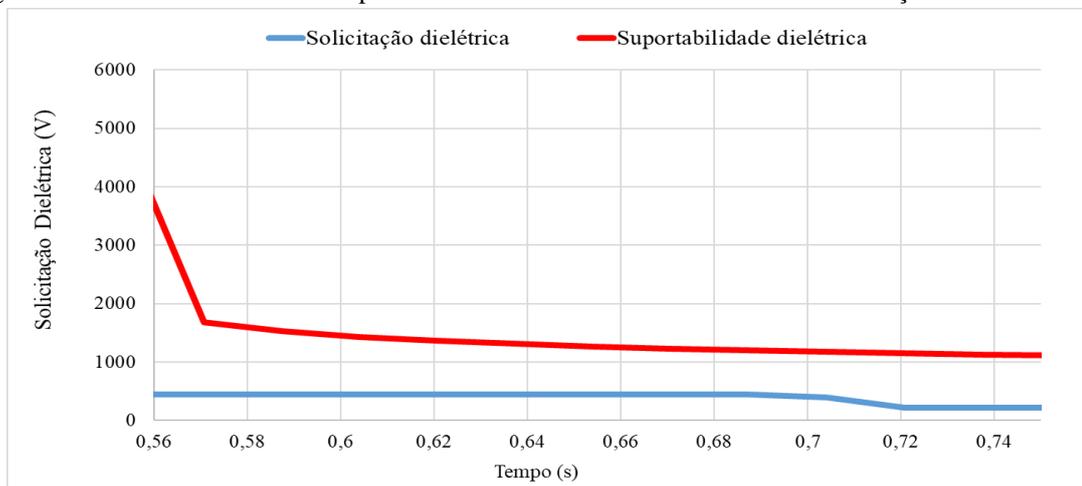
Tabela 6.2 – Solicitação e suportabilidade dielétrica do condicionador de ar durante o fenômeno de elevação de tensão.

Tempo (s)	Solicitação Dielétrica (V)	Suportabilidade Dielétrica (V)
0,5541611	440,2578	4816,699686
0,5708276	440,2578	1687,48528
0,5874941	440,2578	1525,739751
0,6041606	440,2578	1431,124637
0,6208271	440,2578	1363,994134
0,6374936	440,2578	1311,923665
0,6541601	440,2578	1269,378991
0,6708266	440,2578	1233,407981
0,6874931	440,2578	1202,248473
0,7041596	397,9208	1174,763839
0,7208261	220,1289	1150,177995
0,7374926	220,1289	1127,937394

Fonte: Autor próprio.

Tendo os valores de solicitação e suportabilidade para o mesmo instante de tempo é possível então analisar o possível caso de ressarcimento aqui retratado pela visualização das respectivas curvas. O resultado avaliado é mostrado na figura 6.3.

Figura 6.3 – Análise de nexo causal para o condicionador de ar submetido a uma elevação de tensão de 2pu.



Fonte: Autor próprio

Conforme é evidenciado na figura 6.3, no que se refere ao efeito dielétrico causado pela elevação de tensão aplicada ao condicionador de ar, o fenômeno não seria capaz de danificar o equipamento. O resultado aqui exposto eximiria a concessionária de energia a ressarcir o cliente reclamante.

6.3.2 Suportabilidade térmica

O procedimento para obtenção da curva de solicitação térmica e, posteriormente, a comparação deste resultado com a existente curva de suportabilidade, é análogo ao realizado para a tensão do equipamento. Por conseguinte, em posse do perfil de corrente, ilustrado na figura 6.1 e realizando os mesmos passos descritos na seção anterior, tem-se na tabela 6.3 os valores de suportabilidade térmica para a elevação de tensão imposta ao condicionador de ar.

Tabela 6.3 - Solicitação dielétrica do condicionador de ar durante o fenômeno de elevação de tensão.

Tempo (s)	Solicitação Térmica (A)
0,5549778	30,070714
0,5716443	0,139016523
0,5883108	4,817892109
0,6049773	6,923951331
0,6216438	6,886177024
0,6383103	6,885228537
0,6549768	6,885209674
0,6716433	6,885208671
0,6883098	6,885208214
0,7049763	6,008764241
0,7216428	4,4326E-05
0,7383093	4,90443E-05

Fonte: Autor próprio

A comparação entre a solicitação e a suportabilidade térmica deve também iniciar no instante da constatação do primeiro pico anormal de corrente. Isto posto, para um valor inicial de 0,5549 segundos e conhecendo a lei matemática da curva de suportabilidade, tem-se a equação (6.4).

$$I_{sp} = \sqrt{\frac{58,18}{t - 0,5541}} \quad (6.4)$$

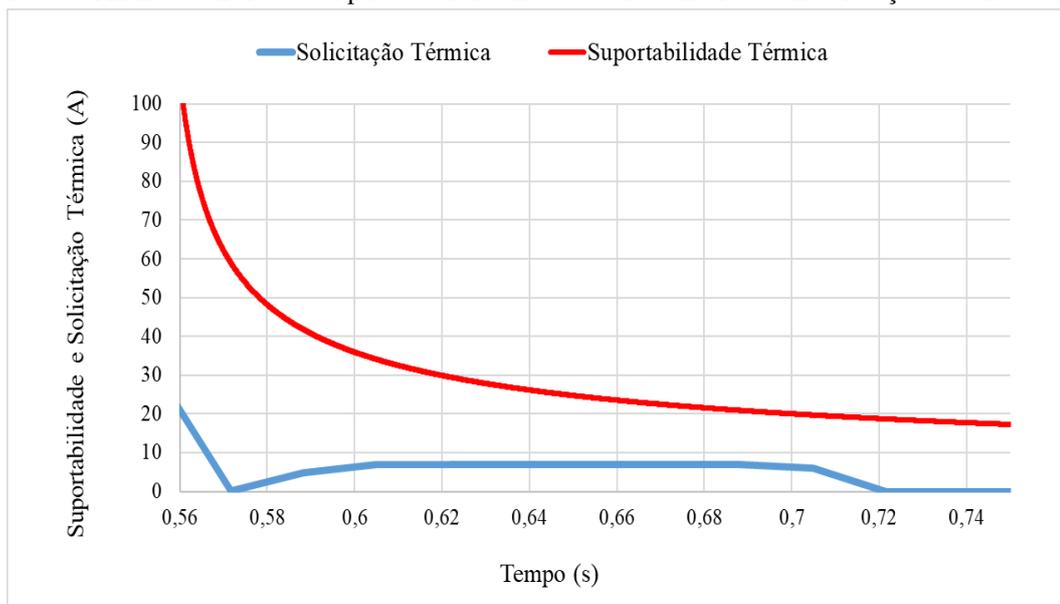
Foram obtidos todos os pontos de solicitação e suportabilidade térmica a partir das constatações acima descritas. Os valores obtidos são mostrados na tabela 6.4 e, por conseguinte, as curvas são ilustradas na figura 6.4.

Tabela 6.4 - Solicitação e suportabilidade dielétrica do condicionador de ar durante o fenômeno de elevação de tensão.

Tempo (s)	Solicitação Térmica (A)	Suportabilidade Térmica
0,5549778	30,070714	26396,09585
0,5716443	0,139016523	59,08313989
0,5883108	4,817892109	41,7781412
0,6049773	6,923951331	34,11172369
0,6216438	6,886177024	29,54162545
0,6383103	6,885228537	26,42283637
0,6549768	6,885209674	24,12064121
0,6716433	6,885208671	22,33137578
0,6883098	6,885208214	20,88909022
0,7049763	6,008764241	19,69442382
0,7216428	4,4326E-05	18,68377146
0,7383093	4,90443E-05	17,81427752

Fonte: Autor próprio

Figura 6.4 - Análise de nexos causal para o condicionador de ar submetido a uma elevação de tensão de 2pu.



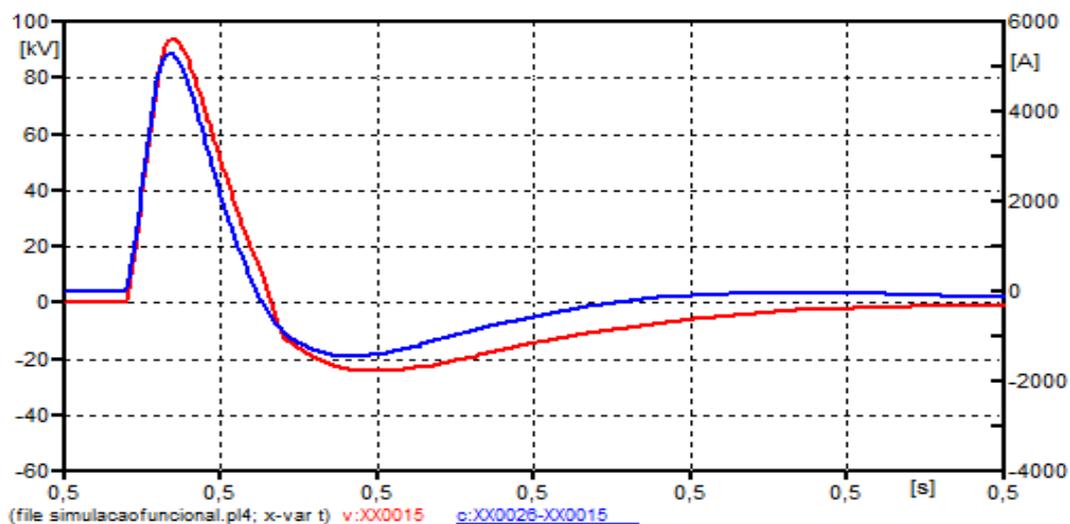
Fonte: Autor próprio.

Com base nas curvas apresentadas, o fenômeno de elevação de tensão durante 10 ciclos também não foi capaz de danificar o equipamento por efeitos térmicos. Portanto, para o caso aqui apresentado, conclui-se a inexistência de nexos causal entre o distúrbio aplicado e os efeitos danosos no condicionador de ar.

6.4 Estudo de caso 2: Incidência de um surto de corrente de magnitude 5kA no condicionador de ar

Para o segundo caso de análise foi imposto na entrada do modelo do condicionador de ar um surto de corrente com magnitude 5kA. O tempo de subida e decaimento do distúrbio estão em conformidade com as recomendações estipuladas pela norma IEC a qual afirma que os respectivos valores são 8 μ s e 20 μ s. Os perfis de tensão e corrente de entrada obtidos são mostrados na figura 6.5.

Figura 6.5 – Perfil de tensão e corrente resultantes do modelo computacional do condicionador de ar submetido a um surto de corrente de 5kA.



Fonte: Autor próprio.

Idêntico ao procedimento feito para o caso 1, em sequência, tem-se a descrição do método de discretização da tensão e corrente para obtenção das curvas de solitação dielétrica e térmica condizentes com o caso atual.

6.4.1 Suportabilidade dielétrica

Em posse dos valores de tensão durante a ocorrência do fenômeno e com o auxílio da ferramenta Excel constatou-se que o primeiro pico de tensão anormal ao condicionador de ar teve magnitude aproximada de 93kV no instante de tempo de 0,50001 segundos. Sendo assim, foi calculado os valores para a curva de solitação conforme expressa a tabela 6.4.

Tabela 6.5 - Solicitação dielétrica do condicionador de ar durante o fenômeno de surto de corrente.

Tempo (s)	Solicitação Dielétrica (V)
0,50001	32727,34
0,5001	112,6624
0,50032	218,6443
0,5169	220,12
0,5336	220,12

Fonte: Autor próprio

A lei matemática rege a curva de suportabilidade deve iniciar no primeiro instante de ocorrência do fenômeno. Desse modo, a nova expressão foi definida conforme mostra a equação (6.5).

$$V_{sp} = (-537,3076) * \log(t - 0,5) + 732,0691 \quad (6.5)$$

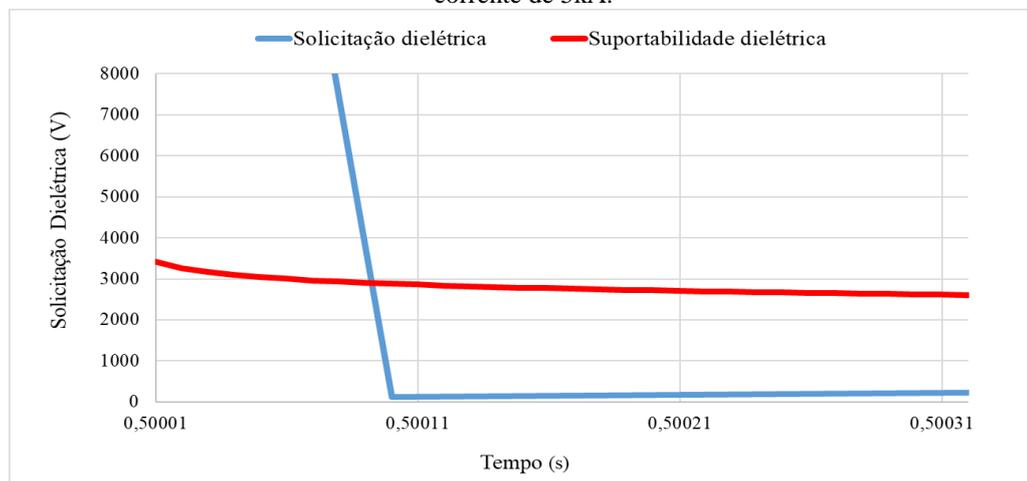
A partir da equação (6.5) foram obtidos os pontos referentes a suportabilidade e solicitação dielétrica para o condicionador de ar submetido ao surto de corrente. Os valores referência para as curvas são identificados na tabela 6.6 e o resultado da análise é mostrado na figura 6.6.

Tabela 6.6 - Solicitação e suportabilidade dielétrica do condicionador de ar durante o fenômeno de surto de corrente.

Tempo (s)	Solicitação Dielétrica (V)	Suportabilidade Dielétrica (V)
0,50001	32727,34	3418,607116
0,5001	112,6624	2881,299516
0,50032	218,6443	2609,878594
0,5169	220,12	1684,239058
0,5336	220,12	1523,878222

Fonte: Autor próprio

Figura 6.6 - Análise da solicitação x suportabilidade dielétrica para o condicionador de ar submetido a um surto de corrente de 5kA.



Fonte: Autor próprio

Ao efetuar uma análise comparativa das curvas de suportabilidade e solicitação conclui-se que, no que tange o fenômeno dielétrico, o surto de corrente aplicado ao condicionador de ar provocaria efeitos danosos (irreversíveis ou não) ao equipamento.

6.4.2 Suportabilidade térmica

A magnitude de surto constatada para a corrente na entrada do condicionador de ar foi de 5270A no instante de 0,50001 segundos. Desse modo, ao realizar a discretização da forma de onda para o restante dos pontos do circuito chegou-se aos valores expressos na tabela 6.7.

Tabela 6.7 - Solicitação térmica do condicionador de ar durante o fenômeno de surto de corrente.

Tempo (s)	Solicitação Térmica (A)
0,50001	2214,72
0,50007	190,2347
0,50032	241,8677
0,50273	0,2963

Fonte: Autor próprio.

Substituindo o valor inicial na expressão matemática da curva de suportabilidade térmica do ar condicionado, foi obtida a equação (6.6).

$$I_{sp} = \sqrt{\frac{58,18}{t - 0,5000}} \quad (6.6)$$

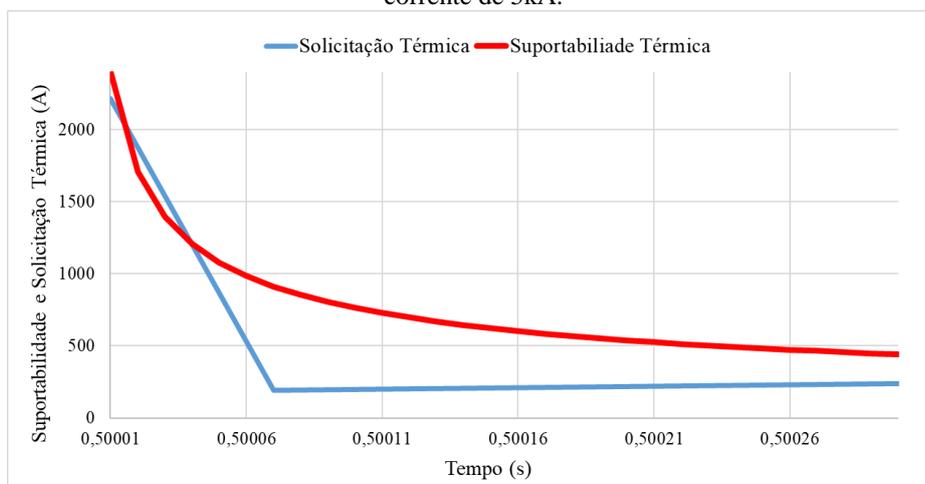
Por conseguinte, utilizando a equação acima, chegou-se aos valores de tolerância para o condicionador de ar correspondentes a solicitação imposta ao equipamento. A tabela 6.8 e figura 6.7 mostram os resultados obtidos para o caso em específico.

Tabela 6.8 - Solicitação e suportabilidade térmica do condicionador de ar durante o fenômeno de surto de corrente

Tempo (s)	Solicitação Térmica (A)	Suportabilidade Térmica
0,50001	2214,72	2412,053067
0,50007	190,2347	911,6703665
0,50032	241,8677	426,3947701
0,50273	0,2963	145,9840927

Fonte: Autor próprio.

Figura 6.7- Análise da solicitação x suportabilidade térmica para o condicionador de ar submetido a um surto de corrente de 5kA.



Fonte: Autor próprio

Pela análise comparativa entre as curvas conclui-se que o condicionador de ar nesta situação apresentou um nexo causal procedente caso fosse submetido a um surto apresentando as mesmas características adotadas ao modelo computacional. Dessa forma, de acordo com o diagnóstico fornecido pelas curvas do caso 2, a concessionária de energia responsável pela verificação do pedido de indenização seria favorável pelo ressarcimento do produto.

6.5 Considerações Finais

Este capítulo teve por objetivo unificar os resultados obtidos pelo desenvolvimento do modelo computacional, que provem as informações de solicitação de tensão e/ou corrente do condicionador de ar, com as curvas levantadas através da realização de ensaios destrutivos laboratoriais para o equipamento, esses, responsáveis por fornecer as características de suportabilidade do mesmo.

Alicerçado a metodologias já propostas para avaliação da existência consistência de nexo causal em solicitações de ressarcimento, foram aqui impostas alterações na tensão de entrada do condicionador de ar simulando, respectivamente, a ocorrência de um curto circuito e uma descarga atmosférica. O objetivo da análise era certificar se tais ocorrências seriam capazes de danificar o equipamento supramencionado. A processo de análise ocorreu por meio da comparação das curvas de solicitação térmica e dielétrica com as respectivas curvas de suportabilidade.

Para completar o processo de análise era necessário a tradução das informações fornecidas pelo modelo computacional elétrico desenvolvido em curvas das mesmas características constatadas nas de suportabilidade. Embasado no cálculo teórico de solicitações térmica e dielétrica, desenvolveu-se então, pela ferramenta Excel, uma metodologia para a transformações destes dados no formato requerido.

Assim, tendo todos os parâmetros alinhados, foi possível estabelecer uma comparação, embasada em cálculos matemáticos, ensaios laboratoriais e teorias físicas, das curvas supramencionadas e assim avaliar a consistência ou não do nexos causal entre o distúrbio aplicado e os efeitos no equipamento. Com base nos resultados evidenciados pelas curvas instigaram a emissão de um parecer para cada um dos casos verificados.

CAPÍTULO VII

7 CONCLUSÕES

Neste último capítulo são apontados os objetivos referentes a cada capítulo em específico e também são discutidas as principais conclusões acerca dos resultados alcançados por este trabalho. Por fim é sugerido algumas melhorias e continuidade das pesquisas relacionadas ao tema e que tem como ponto de partida as constatações aqui feitas.

O primeiro capítulo teve por objetivo contextualizar a área denominada como PID's. Assim, ao longo do texto foram apresentados dados relacionados a imensa quantidade de pedidos de ressarcimento e as principais causas e consequências para tal adversidade. Além disso, expôs-se as principais problemáticas que a metodologia utilizada hoje e proposta pela ANEEL vem causando as empresas concessionárias de energia. A partir dos argumentos levantados, chegou-se à conclusão que é necessário o desenvolvimento da sistematização do processo em foco sob a perspectiva de fundamentos científicos. Com base nos estudos relacionados a comprovação científica do nexo causal, a presente pesquisa foi direcionada para a investigação das características de suportabilidade para o condicionador de ar *split inverter*.

O segundo capítulo unificou informações acerca de aparelhos condicionadores de ar. Foram tratados as suas principais características, origem, princípio de funcionamento, classificação, e quantificação dos principais tipos existentes atualmente. A partir da análise feita, ficou, pois, esclarecido, que tendo os modelos de condicionadores de ar *split* predominantemente presente no ambiente residencial. Este torna-se, portanto, um foco de estudo e análise, pois, pode vir a se tornar um problema futuro no que se trata de ressarcimento por danos elétricos. Por conseguinte, havendo já estudos e modelos computacionais para o condicionador de ar convencional, restou ao presente trabalho investigações acerca da tecnologia *inverter* presente nos novos aparelhos comerciais.

O capítulo três abordou a modelagem computacional do condicionador de ar *inverter* direcionada a investigações de casos de PID's. Assim, semelhante a estratégia utilizada para o condicionador de ar convencional, dividiu-se o modelo *split inverter* em questão, em duas partes: evaporadora e condensadora. Por ter influência insignificante na composição da corrente de entrada do equipamento, visto que ela é uma parte que baixa potência ao ser comparada com a condensadora,

a modelagem da evaporadora foi simplificada a um circuito retificador representando uma fonte chaveada.

Já o estudo da unidade condensadora foi detalhado, pois, o conversor eletrônico integrado na unidade era o fator determinístico para a corrente de alimentação do equipamento. Assim, reservou-se um tópico em especial para tratamento do funcionamento do conversor *boost* bem como suas características particulares ao ser empregado em equipamentos eletrônicos de menor porte (modelos com 16A ou menos de corrente nominal) e nesse caso em específico, o condicionador de ar. A partir das informações levantadas, ficou evidente, ao inspecionar a placa eletrônica real do equipamento, que o circuito em questão se tratava do mesmo abordado teoricamente.

A modelagem computacional foi realizada simultaneamente por duas ferramentas computacionais: o ATP e o PowerSIM. O uso dessa segunda foi necessário, pois, a simulação de elementos semicondutores chaveados no ATP demanda um grande tempo de simulação. Desse modo, comprovando a harmonia dos resultados entre os dois softwares, foi possível estabelecer um modelo computacional equivalente para o condicionador de ar apresentando bons resultados de saída. Salienta-se novamente que o conversor integrado a placa eletrônica imprime ao conversor uma potência constante e, portanto, a influência da etapa de inversão na corrente de entrada ocorre pela imposição da potência desejada ao equipamento. Não obstante a isso, optou-se pela realização de um circuito simplificado para elucidar e demonstrar o comportamento de um inversor de frequência no programa computacional.

No quarto capítulo foi apresentada a validação da modelagem computacional do condicionador de ar *inverter*. Essa etapa é importante, pois, ao comprovar uma reprodução semelhante do comportamento real do equipamento, para condições normais e anormais de tensão de suprimento, em ambiente computacional, é possível realizar estudos de casos do modelo submetido a distúrbios de tensão e/ou corrente sem a necessidade de sua versão física. Tendo os seus atributos em conformidade com as respostas obtidas em laboratório conclui-se, portanto, que o modelo fornece dados de solicitações de tensão e/ou corrente necessários e confiáveis perante quaisquer condições que possam vir a ocorrer na rede.

Para completar a metodologia de análise proposta neste trabalho, era necessário também apurar os limites de suportabilidade do condicionador de ar. Assim, foi executada a mesma metodologia proposta em trabalhos anteriores da área de ressarcimento para encontrar a tolerância do equipamento. Baseado em fundamentos matemáticos e físicos, foram realizados ensaios destrutivos que queimaram cerca de 3 aparelhos condicionadores de ar de mesmo modelo, um para a curva térmica e dois para a curva dielétrica. Os principais componentes danificados durante os ensaios

consistiam nos eletrônicos integrados a placa elétrica do equipamento. Em posse dos intervalos e magnitude dos eventos aplicados foram calculados os seus limites térmicos e dielétricos.

O objetivo do capítulo final era reunir os resultados obtidos pelo modelo computacional do ar condicionado, o qual fornece dados de tolerância térmica e dielétrica do equipamento, com as respectivas curvas levantadas experimentalmente. O último desafio consistia na transformação das informações fornecidas pelo ATPDraw em um formato que tornaria possível a comparação entre a solicitação e a suportabilidade. Desse modo, utilizando a teoria matemática da lógica inserida no programa APR, o cálculo da solicitação para dois casos de distúrbios na entrada do equipamento foi analisado. Por fim, foi possível verificar a consistência da veracidade dos respectivos casos fornecendo assim um parecer coeso e justo para as situações.

Todo o procedimento foi realizado com o auxílio de uma ferramenta acessível de cálculos matemáticos sem a real necessidade de reproduzir o comportamento do equipamento no conhecido programa APR. Assim, além de ser possível reproduzir essa metodologia em novos programas computacionais, torna-se factível a sistematização e implementação deste processo em equipamentos de medição reais e que podem ser conectados em alimentadores considerados problemáticos para a questão de PID's. Utilizando os já conhecidos limites de suportabilidade para equipamentos eletroeletrônicos alvo de solicitações de ressarcimento, todo o processo tem o potencial de fornecer a confiabilidade requisitada pela ANEEL.

Conclui-se que os resultados computacionais obtidos para o condicionador de ar estão condizentes com as respostas fornecidas pela realização dos ensaios laboratoriais. Além disso, a aplicação de um método novo de comparação, sem a necessidade de utilização do programa APR, abre um leque de possibilidades de estudos futuros os quais compreendem:

- Investigação dos limites de suportabilidade e modelagem computacional para novos equipamentos eletrônicos residenciais e comerciais, como, por exemplo, a geladeira *inverter*;
- Maiores investigações acerca dos possíveis circuitos eletrônicos controlados existentes e sua influência na composição da corrente de entrada em equipamentos de menor porte;
- Aprimoramento da metodologia de análise da consistência donexo causal de forma a fornecer maior confiabilidade no parecer de PID's.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] R. C. Dugan, M. F. Granaghan, S. Santoso, and H. W. Beaty, *Electrical Power Systems Quality*, 2^a. New York: McGraw-Hill, 2002.
- [2] S. V. F, *Descargas atmosféricas: uma abordagem de engenharia*. Artliber, 2005.
- [3] C. E. Tavares, “Modelagem e Análise de Desempenho de Equipamentos Eletroeletrônicos diante de Distúrbios da Qualidade da Energia – Enfoque: Televisores, VCR’s e Som,” Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2004.
- [4] P. H. de O. Rezende, “Contribuições para os Estudos Computacionais de Ressarcimento por Danos Elétricos: Limites de Suportabilidade e Induções Eletromagnéticas,” Universidade Federal de Uberlândia (UFU), 2016.
- [5] H. R. P. M. Oliveira, N. C. Jesus, and G. B. Viecili, “Sensibilidade de Equipamentos Eletrodomésticos Submetidos a Afundamentos de Tensão,” in *XVIII SNPTEE - Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica*, 2005.
- [6] K. Scheibe, J. Schimanski, M. Wetter, and H. Altmaier, “Danos a Equipamentos Eletroeletrônicos Causados por Raios a Longas Distâncias,” *Rev. Eletr. Mod.*, 2007.
- [7] ANEEL, “Resolução Normativa N° 61,” Agência Nacional de Energia Elétrica, Brasília, 2004.
- [8] Agência Nacional de Energia Elétrica, “Resolução N° 414.” 2010.
- [9] Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL, *PRODIST - Módulo 9 - Ressarcimento de Danos Elétricos*. Brazil, 2012, p. 22.
- [10] A. C. O. Salomão, “Uma abordagem jurídica à questão do ressarcimento de danos elétricos pelas distribuidoras de energia,” Universidade de São Paulo, São Paulo, 2012.
- [11] C. E. Tavares, “Uma Estratégia Computacional para a Análise Técnica de Pedidos de Ressarcimento de Danos a Consumidores,” Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2008.
- [12] I. N. Gondim, “Contribuições para o Aplicativo APR: Novos Limites de Suportabilidade, Perturbações via Medições e Sistematização no Processo da Configuração da Rede Elétrica,” Universidade Federal de Uberlândia, 2012.
- [13] Q. Zhang, Q. Guo, and Y. Yu, “Research on the load characteristics of inverter and constant speed air conditioner and the influence on distribution network,” in *2016 China International Conference on Electricity Distribution (CICED)*, 2016, pp. 1–4, doi: 10.1109/CICED.2016.7575908.

- [14] Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL, “Ouvidoria Setorial em Números - 2019,” 2019. [Online]. Available: https://www.aneel.gov.br/documents/656835/14876457/2019_Ouvidoria+setorial+em+números/80492b12-8c9a-e986-e3e6-4047f801601d.
- [15] “Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST, Módulo 9 – Ressarcimento de Danos Elétricos.” Agência Nacional de Energia Elétrica, ANEEL.
- [16] ANEEL, “Índices de Continuidade,” 2018.
- [17] EPE, “Uso de Ar Condicionado no Setor Residencial Brasileiro: Perspectivas e contribuições para o avanço em eficiência energética,” Brasília/DF, 2018.
- [18] M. Slade, *The Future of Cooling. Opportunities for energy efficient air conditioning*. 2018.
- [19] Eliardo Soares Moraes, “A responsabilidade civil no direito pátrio,” 2016. [Online]. Available: <http://www.conteudojuridico.com.br/consulta/Artigos/46298/a-responsabilidade-civil-do-estado-no-direito-patrio>.
- [20] “Constituição da República Federativa do Brasil,” 1988. [Online]. Available: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/constituicao/constituicao.htm.
- [21] S. W. Meyer and T. Liu, *Alternative Transients Program (ATP) - Rule Book*. 1992.
- [22] R. A. Peniche, “Modelagem e Análise de Desempenho de Equipamentos Eletroeletrônicos diante de Distúrbios da Qualidade da Energia – Enfoque: Aparelhos de DVD, Fax e Telefone sem fio,” Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2004.
- [23] I. A. Bacca, “Modelagem para Análise de Desempenho de Equipamentos da Linha Branca diante de Distúrbios de Qualidade da Energia,” Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2008.
- [24] H. R. P. M. Oliveira, N. C. JESUS, and M. L. B. MARTINEZ, “Avaliação do Desempenho de Equipamentos Eletrodomésticos Durante Ensaios de Sobretensões,” in *XVIII SNPTEE - Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica*, 2005.
- [25] P. H. O. Rezende, “Uma proposta de modelagem de condicionadores de ar split visando a análise de pedidos de ressarcimento por danos elétricos.” Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2012.
- [26] I. N. Gondim, J. A. F. B. Júnior, J. C. de Oliveira, C. E. Tavares, and A. C. Delaiba, “UMA ESTRATÉGIA PARA OBTENÇÃO DOS LIMITES DE SUPORTABILIDADE DIELÉTRICA E TÉRMICA DE EQUIPAMENTOS COM FOCO AOS PEDIDOS DE INDENIZAÇÃO POR DANOS,” *Revista Eletrônica de Potência – SOBRAEP*, Campo Grande, pp. 651–559, 2012.
- [27] M. D. Teixeira *et al.*, “Acceptable power quality limits to avoid damages in appliances,” *WSEAS Trans. Circuits Syst.*, vol. 4, pp. 479–485, 2005.
- [28] C. J. Ávila, “Curvas de Suportabilidade Dielétrica e Térmica para Televisores Integradas ao APR e ao Banco de Dados da CEMIG Distribuição S. A.,” Universidade Federal de Uberlândia, 2011.

- [29] E. A. Martins, “Elaboração de Curvas de Suportabilidade para Microcomputadores e Estudos de Desempenhos de Dispositivos Mitigadores para Subsidiar PIDs,” Universidade Federal de Uberlândia, 2012.
- [30] IEEE, “IEEE Guide for Service to Equipment Sensitive to Momentary Voltage Disturbances,” *IEEE Std 1250-1995*, vol. 1995, pp. 1–64, 2002, doi: 10.1109/IEEESTD.2013.6471845.
- [31] “IEEE Recommended Practice on Surge Testing for Equipment Connected to Low-Voltage (1000 V and Less) AC Power Circuits,” pp. 0_1-85, 2003, doi: 10.1109/IEEESTD.2003.94255.
- [32] “IEEE Standard for Performance of Low-Voltage Surge-Protective Devices (Secondary Arresters),” *IEEE Std C62.34-1996*. pp. i–15, 1997, doi: 10.1109/IEEESTD.1997.82387.
- [33] “International Standard IEC 60831-1 Shunt power capacitors of the self healing type for ac systems having a rated voltage up to and including 1000 V.” .
- [34] Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL, “Processo 48500.006342/2014-32.” p. 2, 2015.
- [35] U. S. Navy, *Refrigeração e Condicionamento de ar*, 1º Edição. Editora Hemus, 1980.
- [36] J. Graciliado da Silva, *Introdução à Tecnologia da Climatização e da Refrigeração*. Artliber.
- [37] S. Colt, *Inventors and Inventions*, 1ª Edição. Malasya: Marshall Cavendish, 2008.
- [38] S. Neves, “A História do Ar-Condicionado,” 2018. [Online]. Available: <http://www.cemeq.ufg.br/n/103153-a-historia-do-ar-condicionado>.
- [39] M. A. FIGUEREIDO, “Circuito de Refrigeração e Aquecimento (Ciclo Reverso) Válvula Reversora na posição Refrigeração,” 2019. [Online]. Available: <http://frioclimatizado.blogspot.com/2019/04/circuito-de-refrigeracao-e-aquecimento.html>.
- [40] L. Lima, D. Cortiço, L. Blaskovski, C. Junior, and D. Miranda, *Novo Mini-Refrigerador Portátil III: Sistema Expansivo do Ciclo de Refrigeração*. 2019.
- [41] M. A. FIGUEREIDO, “Circuito de Refrigeração e Aquecimento (Ciclo Reverso) Válvula Reversora na posição Aquecimento,” 2019. [Online]. Available: <http://frioclimatizado.blogspot.com/2019/04/circuito-de-refrigeracao-e-aquecimento.html>.
- [42] M. J. Pirani, “Refrigeração e ar condicionado - Parte I.” 2013.
- [43] C. e T.-I. Instituto Federal de Educação, “Apostila de Refrigeração.” 2009.
- [44] P. S. em Engenharia, “AR CONDICIONADO INDUSTRIAL.” [Online]. Available: http://powerautomacao.com/detalhes/27_Chiller_39.
- [45] W. F. Stoecker and J. M. Saiz Jabardo, *Refrigeração Industrial*, 2 edição. Editora Edgard BLUCHER LTDA., 2002.
- [46] “Portal da Refrigeração.” [Online]. Available: <https://www.refrigeracao.net/>.

- [47] EMBRAR, “Válvula de Expansão Termostática Equalização Interna 3/8" e 1/2" R22/R407C (TX2),” 2020. [Online]. Available: <https://www.embrar.com.br/valvula-de-expansao-termostatica-equalizacao-interna-3-8-e-1-2-r22-r407c-tx2/p>.
- [48] CERE, “Centro Especializado em Refrigeração e Enrolamentos.” [Online]. Available: www.cere.com.br.
- [49] Unicamp, “Compressores Alternativos,” 2013. [Online]. Available: [http://www.fem.unicamp.br/~em672/Aulas 15-16 -2003 - compressores alternativos.pdf](http://www.fem.unicamp.br/~em672/Aulas%2015-16-2003-compressores%20alternativos.pdf).
- [50] G. Ribeiro, “Análise de Sistemas de Condicionamento de Ar com Capacidade Variável considerando o Efeito da Mistura Óleo-Refrigerante / Analysis of Air-Conditioning Systems with Variable Capacity considering the Oil-Refrigerant Mixture Effect,” 2015.
- [51] F. Ferraz, “Compressores,” 2010. [Online]. Available: <https://fagnerferraz.files.wordpress.com/2010/10/compressores.pdf>.
- [52] “Como Funcionam os Compressores,” 2010. [Online]. Available: <http://www.achecompressores.com.br/como-funciona-os-compressores.html>.
- [53] P. S. B. Rodrigues, *Compressores Industriais*. Editora Didática e Científica.
- [54] ELETROFRIGOR, “RELE E PROTETOR PTC 1/4 1/5 1/6 1/8 1/10 1/12 127V EMBRACO TECUMSEH SICOM,” 2020. [Online]. Available: <https://www.eletrofrigor.com.br/rele-e-protetor-ptc-13-14-15-16-18-110-112-110-220-embraco-tecumseh-sicom.html>.
- [55] SSR PARTS, “REATOR PARA AR CONDICIONADO,” 2020. [Online]. Available: <https://www.ssrparts.com.br/reator-ar-condicionado>.
- [56] S. F. Salleh, M. E. M. Roslan, A. M. Isa, and T. A. R. T. Abdullah, “Electricity and Cost Savings from Utilization of Highly Energy Efficient Air Conditioners in Malaysia,” in *2018 IEEE Student Conference on Research and Development (SCOReD)*, 2018, pp. 1–4, doi: 10.1109/SCORED.2018.8711353.
- [57] F. Marangoni, T. Tellini, R. P. R. Moreno, S. O. Ferreira, and E. A. Konopatzki, “Comparativo Econômico Entre Condicionadores de Ar com Tecnologias Convencional e Inverter,” *XXXV ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO*, 2015.
- [58] P. H. O. Rezende, C. E. Tavares, J. C. Oliveira, and J. G. P. Alegrias, “Uma Análise Comparativa de Condicionadores de Ar no contexto da Qualidade e da Racionalização da Energia Elétrica,” *CBQEE*, Araxá -MG, p. 6, 2013.
- [59] R. Zhou, Z. Zhang, X. Liu, P. Ju, C. Qin, and Q. Chen, “Simulation and modeling of blended constant-frequency and variable-frequency air-conditioner,” in *2015 5th International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies (DRPT)*, 2015, pp. 269–273, doi: 10.1109/DRPT.2015.7432239.
- [60] S. P. Gimenez and D. A. Arrabaça, “Eletrônica de potência: Conversores de energia CA/CC: Teoria, prática e simulação,” 2nd ed., E. Érica, Ed. 2014, p. 336.
- [61] D. W. HART, *Eletrônica de Potência: Análise e Projetos de Circuitos*. Porto Alegre, 2012.

- [62] IEC, “Eletromagnetic compability (EMC) : Part 3-2: Limits - Limites for harmonic current emissions (equipment input current $\leq 16A$ per phase),” *IEC Std 61000-3-2*, vol. 5^o Edition, 2018.
- [63] S. B. Dewan, “Optimum Input and Output Filters for a Single-Phase Rectifier Power Supply,” *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. IA-17, no. 3, pp. 282–288, 1981, doi: 10.1109/TIA.1981.4503942.
- [64] A. R. Prasad, P. D. Ziogas, and S. Manias, “A novel passive waveshaping method for single-phase diode rectifiers,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 37, no. 6, pp. 521–530, 1990, doi: 10.1109/41.103457.
- [65] S. A. RAHMAN, F. STUCKLER, and K. SIU, “PFC Boost Converter design guide.” INFENION., Singapore, 2016.
- [66] I. Barbi and D. M. Cruz, *Eletrônica de Potência Conversores CC-CC Básicos Não Isolados*. Florianópolis, 2000.
- [67] I. Barbi, “Retificadores Monofásicos com Correção Ativa de Potência Empregando o Conversor Boost.” UFSC, 2015.
- [68] A. Ahmed, *Eletrônica de Potência*. Makron Books, 2000.
- [69] C. Silva, “Inversores de Frequência.” p. 12, 2009.
- [70] D. Williams, “How the Boost PFC Converter Circuit Improves Power Quality.” .
- [71] L. Rossetto, G. Spiazzi, and P. Tenti, “CONTROL TECHNIQUES FOR POWER FACTOR CORRECTION CONVERTERS,” Padova, p. 9.
- [72] N. C. Braga, *Semicondutores de Potência*, 2nd ed. Newton C. Braga, 2016.
- [73] Consul, *Manual Específico de Serviços para Ar Condicionados*. 2012.
- [74] infineon, “Controlador de motor PMSM / BLDC com microcontrolador adicional de 8 bits.” [Online]. Available: <https://www.infineon.com/>.
- [75] N. S. Nise, *Engenharia de Sistemas de Controle*, 6^o Edição. Rio de Janeiro: LTC — Livros Técnicos e Científicos Editora Ltda, 2013.
- [76] C. E. Tavares, “Uma estratégia computacional para a análise técnica de pedidos de ressarcimento de danos a consumidores.” Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2008.

Apêndice I – Modelagem no ATPDraw– Modulador PWM Para o PFC *Boost*

```
MODEL pwmpfc

INPUT    sinal
INPUT    portadora

OUTPUT   fire[1]

VAR      tpmorto
VAR      fire[1]
VAR      plprec[1]
VAR      tm[1]

--HISTORY plprec[1..6]
HISTORY  tm[1], plprec[1]

INIT

    tpmorto:=0

    tm[1]:=0

    plprec[1]:=-1 -- a chave começa aberta

ENDINIT

EXEC

    -- Sinal do Inversor

    -- Comparação entre os valores de tensão triangular e moduladora
    senoidal

    IF sinal > portadora THEN

        IF plprec[1]==-1 THEN

            tm[1]:=T

            plprec[1]:=0
```

```

    ENDIF

    ELSE

    fire[1]:=-1

    plprec[1]:=-1

    ENDIF

-- Comando de chaveamento

IF plprec[1]=0 AND T>=(tm[1]+tpmorto) THEN plprec[1]:=1 ENDIF

IF plprec[1]=1 THEN fire[1]:=1 ELSE fire[1]:=-1 ENDIF

ENDEXEC

ENDMODEL

```

Apêndice II – Modelagem no ATPDraw– Modulador PWM para o Inversor da Unidade Condensadora

```

MODEL inversor4

DATA    deadtM {DFLT:0.}

DATA    freqch {DFLT:60}

DATA    freqmd {DFLT:60}

DATA    freqsw {DFLT:600}

DATA    tini {dflt:0}

DATA    tstop  {dflt:1000}

DATA    ampl   {dflt:1.0}

DATA    angle  {dflt:0}

OUTPUT  fire[1], fire[2], fire[3], fire[4], fire[5], fire[6]

VAR     t_cr, t_rise, t_done, cr, freqcr, ma, mf, fire[1], fire[2],
fire[3], fire[4], fire[5], fire[6], sn[1], sn[2], sn[3], t_donesn, t_risesn,
t_sn

VAR     plprec[1], plprec[2], plprec[3], plprec[4], plprec[5], plprec[6]

VAR     tm[1], tm[2], tm[3], tm[4], tm[5], tm[6], omega

HISTORY tm[1..6], plprec[1..6]

INIT

```

```

mf := TRUNC(freqsw/freqmd)

IF (mf MOD 2)=0 THEN mf := mf-1 ENDIF

freqcr := mf*freqmd

FOR i:=1 TO 6 DO
    tm[i]:=0 plprec[i]:=-1
ENDFOR

omega:=2*pi*freqch

ENDINIT

EXEC

-- Ondas moduladoras senoidais.

sn[1]:= ampl*(sin(omega*(t-tini) + (angle)*pi/180))*AND((t - tini), (tstop-
t))

--onda B

sn[2]:= ampl*(sin(omega*(t-tini) + (angle-120)*pi/180))*AND((t -
tini), (tstop-t))

sn[3]:= ampl*(sin(omega*(t-tini) + (angle+120)*pi/180))*AND((t -
tini), (tstop-t))

-- Onda Triangular

t_cr:= 1/freqcr

t_rise := 1/(4*freqcr)

t_done:=(T MOD t_cr)

-- parte da zero, fase inicial nula

IF t_done<=t_rise THEN

    cr := t_done/t_rise

ELSIF t_done>t_rise AND t_done<=3*t_rise THEN

    cr := (2*t_rise-t_done)/t_rise

ELSE

    cr := (t_done-4*t_rise)/t_rise

ENDIF

-- Sinais para o inversor

-- Determinação dos instantes de abertura e fechamento das chaves

```

```
FOR i:=1 TO 3 DO
  IF sn[i]>cr THEN
    IF plprec[i]==-1 THEN
      tm[i]:=T
      plprec[i]:=0
    ENDIF
  ELSE
    fire[i]==-1
    plprec[i]==-1
  ENDIF
  IF sn[i]<=cr THEN
    IF plprec[i+3]==-1 THEN
      tm[i+3]:=T
      plprec[i+3]:=0
    ENDIF
  ELSE
    fire[i+3]==-1
    plprec[i+3]==-1
  ENDIF
ENDFOR

-- Comando de chaveamento
FOR i:=1 TO 6 DO
  IF plprec[i]=0 AND T>=(tm[i]+deadtm) THEN plprec[i]:=1 ENDIF
  IF plprec[i]=1 THEN fire[i]:=1 ELSE fire[i]==-1 ENDIF
ENDFOR

ENDEXEC

ENDMODEL
```