

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



**UMA PROPOSTA DE MODELAGEM DE CONDICIONADORES DE
AR SPLIT VISANDO A ANÁLISE DE PEDIDOS DE
RESSARCIMENTO POR DANOS ELÉTRICOS**

PAULO HENRIQUE OLIVEIRA REZENDE

Uberlândia
Agosto - 2012

PAULO HENRIQUE OLIVEIRA REZENDE

**UMA PROPOSTA DE MODELAGEM DE CONDICIONADORES DE
AR SPLIT VISANDO A ANÁLISE DE PEDIDOS DE
RESSARCIMENTO POR DANOS ELÉTRICOS**

Dissertação apresentada à Universidade
Federal de Uberlândia como requisito parcial
para a obtenção do título de Mestre em
Ciências.

José Carlos de Oliveira, Ph.D. (Orientador) - UFU

Carlos Eduardo Tavares, Dr - UFU

Carlos Alberto Calixto Mattar, MSc - ANEEL

Kleiber David Rodrigues, Dr - UFU

Thiago Clé de Oliveira, Dr - UNIFEI

Uberlândia
Agosto - 2012

PAULO HENRIQUE OLIVEIRA REZENDE

**UMA PROPOSTA DE MODELAGEM DE CONDICIONADORES DE
AR SPLIT VISANDO A ANÁLISE DE PEDIDOS DE
RESSARCIMENTO POR DANOS ELÉTRICOS**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Uberlândia como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Ciências. Aprovada em 10 de Agosto de 2012.

Prof. José Carlos de Oliveira, Ph.D

Orientador - UFU

Prof. Alexandre Cardoso, Dr.

Coordenador do Curso de Pós-Graduação - UFU

Dedico este trabalho aos meus pais Ézio e Izildete, por toda educação, compreensão, carinho e amor, os quais tiveram papel fundamental para concretização desta dissertação e a formação do meu caráter.

AGRADECIMENTOS

Agradeço de forma incessante a **Deus**, pela força concebida nos momentos mais difíceis para conclusão desta dissertação. Ser sublime e maior o qual nós deu o dom da vida e a capacidade de buscar o conhecimento.

De forma especial, com muito respeito e carinho, agradeço ao meu orientador, o Professor **José Carlos de Oliveira** por toda paciência, orientação, amizade, confiança e dedicação, os quais foram fundamentais para realização deste trabalho e uma melhor formação profissional.

Agradeço aos meus pais **Ézio Parreira de Rezende** e **Izildete Carlos de Oliveira Rezende** que sempre me apoiaram e incentivaram nos momentos de indecisões e dificuldades. A minha irmã **Jaqueline Oliveira Rezende** pela confiança e credibilidade depositada a mim. Agradeço também a minha namorada **Laíse Oliveira Resende** pelo carinho, companheirismo e paciência ao longo deste tempo.

Aos amigos do Laboratório de Qualidade da Energia **Arnaldo José Pereira Rosentino Junior**, **Fabricio Parra Santilho**, **Isaque Nogueira Gondim**, **João Areis Ferreira Barbosa Júnior** pelo companheirismo, apoio, amizade e agradável convívio proporcionado nos diversos momentos de trabalho em equipe.

Aos colegas e amigos da Pós Graduação, **Alex Reis**, **Fernanda Hein**, **Loana Nunes Velasco**, **Thiago Vieira da Silva** pelo companheirismo e suporte desde o início deste trabalho.

Aos demais colegas e professores de pós-graduação, **Antônio Carlos Delaiba, Carlos Eduardo Tavares, Ivan Nunes Santos, José Rubens Macedo Júnior, José Wilson Resende, Marcelo Lynce Ribeiro Chaves, Milton Itsuo Samesima** pelo apoio e conhecimento que contribuíram para a conclusão desta dissertação.

A todos os meus familiares e amigos, em especial, aos meus avós **Hélcio e Nilza, Aristonides e Dinamar** que sempre me apoiaram em todas as conquistas de minha vida.

A Pós-Graduação da Engenharia Elétrica, em especial o coordenador **Alexandre Cardoso**, que cedeu gentilmente o aparelho condicionador de ar Split utilizado nos trabalhos práticos desta dissertação.

Agradeço de forma muito especial à empresa “**REA Ar Condicionado**”, pela instalação do condicionador de ar e por todo suporte e conhecimento técnico, os quais foram essenciais para o desenvolvimento desta dissertação.

À CAPES pelo suporte financeiro.

*“O Senhor é meu pastor, nada me faltará...
...Ainda que eu andasse pelo vale da sombra da morte, não temerei mal
algum, porque tu estás comigo; a tua vara e o teu cajado me consolam.”*

Salmo 23, 1 e 4.

RESUMO

O grande número de pedidos de ressarcimento por danos em equipamentos eletro-eletrônicos tem, nos últimos tempos, merecido a atenção das concessionárias de energia, agências de regulação, consumidores e outros órgãos governamentais. Tais preocupações estão associadas não apenas com os volumes financeiros envolvidos, mas, sobretudo, com os impactos sociais atrelados com solicitações, decisões, conflitos e outras questões que envolvem a relação entre as concessionárias de serviços públicos de distribuição e seus consumidores. Contribuindo nesta direção, esforços foram realizados até a obtenção de um aplicativo computacional já bastante difundido no cenário nacional e denominado por APR – Analisador de Pedidos de Ressarcimento. Tal software consiste num processo avaliativo dos pedidos de indenização através da correlação entre os esforços elétricos impactantes sobre os equipamentos e seus limites de tolerância dielétricos e térmicos. Visando complementar tal ferramenta, a presente pesquisa aborda a questão da inserção de condicionadores de ar tipo Split no mencionado aplicativo. Neste contexto, esta dissertação tem por meta: a proposição de uma modelagem matemática para os condicionadores de ar Split, sua implementação na plataforma ATP e APR, a realização de testes de validação, e, por fim, mostrar a potencialidade e aplicabilidade da ferramenta através de estudos típicos de pedidos de indenização.

Palavras-Chave: Qualidade da energia, ressarcimento de danos, modelagem, condicionador de ar Split.

ABSTRACT

The large number of refunding request for electrical and electronic equipment damages has attracted the attention of the electric utilities, consumers, regulatory and other government agencies. Such concerns are not associated only with the financial contents involved, but especially with the social impacts associated to requests, decisions, conflicts and other issues involving the relationship between utilities and their consumers. Therefore, this theme has been encouraging investigations aimed at improving the process of the refunding request analysis throughout the correlation between the disturbances and effects and the equipment withstand capability to typical disturbances in electric system and this has produced the APR software. Within this scenario comes to this dissertation which aims to propose ways to include the well-known air conditioner split type equipment in the referred program. The main subjects focused in this work are directed to: the mathematical model proposition to represent the focused equipment, its implementation in the ATP platform and APR software, the model validation through laboratory experiments and, at the end, the investigation of typical electrical system occurrences and the possibility of equipment damage in accordance with the refunding request procedures.

Keywords: Power quality, refunding request for damages, modeling, air conditioner of split type.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1.1 - NÚMERO DE PEDIDOS DE INDENIZAÇÃO POR DANOS ELÉTRICOS – ANO DE 2010 – 18 EMPRESAS DISTRIBUIDORAS – FORNECIDO PELA ANEEL.	23
FIGURA 1.2 - PRINCIPAIS EQUIPAMENTOS RECLAMADOS PARA UMA EMPRESA DISTRIBUIDORA.	23
FIGURA 1.3 - CUSTOS TOTAIS RESSARCIDOS POR PEDIDOS DE INDENIZAÇÃO POR DANOS PARA UMA EMPRESA DE DISTRIBUIÇÃO.	24
FIGURA 1.4 - PRINCIPAIS FENÔMENOS AOS QUAIS ESTARIAM ASSOCIADOS OS PEDIDOS DE INDENIZAÇÃO PELA MESMA DISTRIBUIDORA ANTERIORMENTE EMPREGADA.	25
FIGURA 2.1 - ELEMENTOS DE UM SISTEMA DE REFRIGERAÇÃO.	38
FIGURA 2.2 - COMPONENTES DE UM REFRIGERADOR: A) EVAPORADORES E	41
FIGURA 2.3 - TUBO CAPILAR.	41
FIGURA 2.4 - FILTRO SECADOR.	42
FIGURA 2.5 - COMPRESSOR HERMÉTICO ALTERNATIVO PARA UTILIZAÇÃO EM: A) APARELHOS CONDICIONADORES DE AR E B) REFRIGERADORES DOMÉSTICOS E COMERCIAIS.	46
FIGURA 2.6 - COMPONENTES DE UM COMPRESSOR HERMÉTICO.	47
FIGURA 2.7 - COMPRESSOR HERMÉTICO ROTATIVO PARA UTILIZAÇÃO EM APARELHOS CONDICIONADORES DE AR DE DIFERENTES CAPACIDADES.	48
FIGURA 2.8 - COMPRESSOR HERMÉTICO SCROLL PARA UTILIZAÇÃO EM APARELHOS CONDICIONADORES DE AR DE DIFERENTES CAPACIDADES.	49
FIGURA 2.9 – SISTEMA DE AR CONDICIONADO CENTRAL NO TOPO DE UM EDÍFÍCIO.	50
FIGURA 2.10 – APARELHO CONDICIONADOR DE AR SPLIT INSTALADO EM UMA RESIDÊNCIA.	51
FIGURA 2.11 – VISTA DA UNIDADE CONDENSADORA.	52
FIGURA 2.12 – VISTA DA UNIDADE EVAPORADORA.	52
FIGURA 2.13 – EVAPORADORA DE UM SISTEMA SPLIT CASSETTE PARA UTILIZAÇÃO EM TETO.	53
FIGURA 2.14 – SISTEMA TRI-SPLIT.	53
FIGURA 2.15 - SISTEMA VRV INSTALADO NA COBERTURA DE UM EDÍFÍCIO.	54
FIGURA 2.16 - CURVAS DE COMPARAÇÃO ENTRE O SISTEMA INVERTER COM APARELHO SPLIT CONVENCIONAL. [MANUAL DA FUJITSU BRASIL]	55
FIGURA 2.17 - APARELHO CONDICIONADOR DE AR DO TIPO SELF.	56
FIGURA 2.18 – VISTA EM CORTE DE UMA APARELHO CONDICIONADOR DE AR TIPO JANELA.	56

FIGURA 3.1 – CONDICIONADOR DE AR UTILIZADO: (A) EVAPORADORA E (B) CONDENSADORA.	59
FIGURA 3.2 - UNIDADES CONSTITUINTES DA EVAPORADORA.	60
FIGURA 3.3 – UNIDADES CONSTITUINTES DA CONDENSADORA.	61
FIGURA 3.4 – PLACA ELETRÔNICA DA EVAPORADORA.	62
FIGURA 3.5 - OSCILOGRAMAS DE TENSÃO (AZUL) E CORRENTE (VERMELHO) NOS TERMINAIS DE ENTRADA DA PLACA ELETRÔNICA DA EVAPORADORA – RESULTADOS DERIVADOS DE ENSAIOS LABORATORIAIS.	63
FIGURA 3.6 – CIRCUITO EQUIVALENTE DA PLACA ELETRÔNICA.	64
FIGURA 3.7 – BLOCO DA EVAPORADORA NO SIMULADOR ATP.	65
FIGURA 3.8 - OSCILOGRAMAS DE TENSÃO E CORRENTE NOS TERMINAIS DE ENTRADA DA PLACA ELETRÔNICA DA EVAPORADORA – RESULTADOS OBTIDOS COMPUTACIONALMENTE.	65
FIGURA 3.9 - DIAGRAMA FÍSICO DA ESTRUTURA DE COMPOSIÇÃO DO MOTOR TIPO PSC.	66
FIGURA 3.10 - ESQUEMA ELÉTRICO SIMPLIFICADO DO APARELHO CONDICIONADOR DE AR.	67
FIGURA 3.11 - REPRESENTAÇÃO DO MOTOR DE INDUÇÃO BIFÁSICO ASSIMÉTRICO.	69
FIGURA 3.12 - REPRESENTAÇÃO DOS CIRCUITOS EQUIVALENTES DOS ENROLAMENTOS MONOFÁSICOS DO MOTOR PSC.	70
FIGURA 3.13 – JANELA DO ATP INDICANDO O LUGAR PARA INSERÇÃO DOS DADOS DO COMPRESSOR-MOTOR.	84
FIGURA 3.14 - CIRCUITO ELÉTRICO DA CONDENSADORA NO ATP.	88
FIGURA 3.15 – BLOCO REPRESENTATIVO DA CONDENSADORA NO ATP.	88
FIGURA 3.16 – REPRESENTAÇÃO DO CONDICIONADOR DE AR SPLIT COMPLETO NO ATP.	90
FIGURA 3.17 – JANELA DO PLOTXY NOS TERMOS DISPONIBILIZADOS PELO ATP.	90
FIGURA 4.1 – MONTAGEM DO CONDICIONADOR DE AR NO LABORATÓRIO DE ENSAIOS.	94
FIGURA 4.2 – ARRANJO FÍSICO EMPREGADO PARA A REALIZAÇÃO DOS ENSAIOS NO CONDICIONADOR DE AR.	95
FIGURA 4.3 - MÓDULOS CONSTITUINTES DA FONTE HP6834A.	96
FIGURA 4.4 – ESTRUTURA LABORATORIAL PARA A REPRODUÇÃO DE FENÔMENOS CARACTERÍSTICOS ATRELADOS COM DISTÚRBIOS NA REDE DE SUPRIMENTO E O CONDICIONADOR DO AR.	97
FIGURA 4.5 - TENSÃO DE ALIMENTAÇÃO (AZUL), CORRENTE TOTAL (VERMELHO), CORRENTE DO ENROLAMENTO PRINCIPAL (ROSA), CORRENTE DO ENROLAMENTO AUXILIAR (VERDE) - SUPRIMENTO IDEAL E NOMINAL – RESULTADOS EXPERIMENTAIS – CASO 1.	99
FIGURA 4.6 - TENSÃO DE ALIMENTAÇÃO (AZUL), CORRENTE TOTAL (VERMELHO), CORRENTE DO ENROLAMENTO PRINCIPAL (ROSA), CORRENTE DO ENROLAMENTO AUXILIAR (VERDE) - SUPRIMENTO IDEAL E NOMINAL – RESULTADOS COMPUTACIONAIS – CASO 1.	99
FIGURA 4.7 – TENSÃO DE ALIMENTAÇÃO (AZUL) E CORRENTE TOTAL (VERMELHO) - SUPRIMENTO IDEAL E NOMINAL – RESULTADOS EXPERIMENTAIS – CASO 1.	101
FIGURA 4.8 – TENSÃO DE ALIMENTAÇÃO (AZUL) E CORRENTE TOTAL (VERMELHO) - SUPRIMENTO IDEAL E NOMINAL – RESULTADOS COMPUTACIONAIS – CASO 1.	101
FIGURA 4.9 – VELOCIDADE DO MOTOR EM RPM – REGIME DE PARTIDA – SUPRIMENTO IDEAL E NOMINAL – RESULTADO COMPUTACIONAL – CASO 1.	102

FIGURA 4.10 – CONJUGADO NO EIXO (N.M) X TEMPO (S) – SUPRIMENTO IDEAL E NOMINAL – RESULTADO COMPUTACIONAL – CASO 1.	103
FIGURA 4.11 – CONJUGADO DE CARGA (N.M) X VELOCIDADE DO MOTOR (RPM) – SUPRIMENTO IDEAL E NOMINAL – RESULTADO COMPUTACIONAL – CASO 1.	103
FIGURA 4.12 - TENSÃO DE ALIMENTAÇÃO (AZUL) E CORRENTE TOTAL (VERMELHO) - SUPRIMENTO COM ELEVAÇÃO MOMENTÂNEA DE 115% EM 16 CICLOS - RESULTADO EXPERIMENTAL – CASO 2.	106
FIGURA 4.13 - TENSÃO DE ALIMENTAÇÃO (AZUL) E CORRENTE TOTAL (VERMELHO) - SUPRIMENTO COM ELEVAÇÃO MOMENTÂNEA DE 115% EM 16 CICLOS - RESULTADO COMPUTACIONAL – CASO 2.	106
FIGURA 4.14 - VELOCIDADE DO MOTOR EM RPM – REGIME DE PARTIDA – ALIMENTAÇÃO CONTENDO ELEVAÇÃO MOMENTÂNEA DE TENSÃO DE 115% EM 16 CICLOS – RESULTADO COMPUTACIONAL – CASO 2.	107
FIGURA 4.15 - TENSÃO DE ALIMENTAÇÃO EFICAZ (AZUL) E CORRENTE TOTAL EFICAZ (VERMELHO) - SUPRIMENTO COM ELEVAÇÃO MOMENTÂNEA DE 115% EM 16 CICLOS - RESULTADO EXPERIMENTAL – CASO 2.	108
FIGURA 4.16 - TENSÃO DE ALIMENTAÇÃO EFICAZ (AZUL) E CORRENTE TOTAL EFICAZ (VERMELHO) - SUPRIMENTO COM ELEVAÇÃO MOMENTÂNEA DE 115% EM 16 CICLOS - RESULTADO COMPUTACIONAL – CASO 2.	108
FIGURA 4.17 - TENSÃO DE ALIMENTAÇÃO (AZUL) E CORRENTE TOTAL (VERMELHO) - SUPRIMENTO CONTENDO UM AFUNDAMENTO DE TENSÃO DE 40% COM DURAÇÃO DE 10 CICLOS - RESULTADO EXPERIMENTAL - CASO 3.	110
FIGURA 4.18 - TENSÃO DE ALIMENTAÇÃO (AZUL) E CORRENTE TOTAL (VERMELHO) - SUPRIMENTO CONTENDO UM AFUNDAMENTO DE TENSÃO DE 40% COM DURAÇÃO DE 10 CICLOS - RESULTADO COMPUTACIONAL - CASO 3.	110
FIGURA 4.19 - VELOCIDADE DO MOTOR EM RPM – REGIME DE PARTIDA – SUPRIMENTO CONTENDO UM AFUNDAMENTO DE TENSÃO DE 40% COM DURAÇÃO DE 10 CICLOS – RESULTADO COMPUTACIONAL - CASO 3.	111
FIGURA 4.20 - TENSÃO DE ALIMENTAÇÃO EFICAZ (AZUL) E CORRENTE TOTAL EFICAZ (VERMELHO) – SUPRIMENTO CONTENDO UM AFUNDAMENTO DE TENSÃO DE 40% COM DURAÇÃO DE 10 CICLOS - RESULTADO EXPERIMENTAL - CASO 3.	112
FIGURA 4.21 - TENSÃO DE ALIMENTAÇÃO EFICAZ (AZUL) E CORRENTE TOTAL EFICAZ (VERMELHO) – SUPRIMENTO CONTENDO UM AFUNDAMENTO DE TENSÃO DE 40% COM DURAÇÃO DE 10 CICLOS - RESULTADO COMPUTACIONAL - CASO 3.	112
FIGURA 4.22 – TENSÃO DE ALIMENTAÇÃO (AZUL) E CORRENTE TOTAL (VERMELHO) – SUPRIMENTO CONTENDO UMA INTERRUPÇÃO DE TENSÃO DE 0% COM DURAÇÃO DE 10 CICLOS - RESULTADO EXPERIMENTAL - CASO 4.	113
FIGURA 4.23 - TENSÃO DE ALIMENTAÇÃO (AZUL) E CORRENTE TOTAL (VERMELHO) – SUPRIMENTO CONTENDO UMA INTERRUPÇÃO DE TENSÃO DE 0% COM DURAÇÃO DE 10 CICLOS - RESULTADO COMPUTACIONAL CASO 4.	114

FIGURA 4.24 - CONJUGADO NO EIXO (N.M) X TEMPO (S)–SUPRIMENTO CONTENDO UMA INTERRUPÇÃO DE TENSÃO DE 0% COM DURAÇÃO DE 10 CICLOS–RESULTADO COMPUTACIONAL- CASO 4.	115
FIGURA 4.25 – TENSÃO (AZUL) E VELOCIDADE NO EIXO (VERMELHO) - SUPRIMENTO CONTENDO UMA INTERRUPÇÃO DE TENSÃO DE 0% COM DURAÇÃO DE 10 CICLOS – RESULTADO COMPUTACIONAL CASO 4.	115
FIGURA 4.26 - TENSÃO DE ALIMENTAÇÃO EFICAZ (AZUL) E CORRENTE TOTAL EFICAZ (VERMELHO) – SUPRIMENTO CONTENDO UMA INTERRUPÇÃO DE TENSÃO DE 0% COM DURAÇÃO DE 10 CICLOS - RESULTADO EXPERIMENTAL - CASO 4.	116
FIGURA 4.27 - TENSÃO DE ALIMENTAÇÃO EFICAZ (AZUL) E CORRENTE TOTAL EFICAZ (VERMELHO) – SUPRIMENTO CONTENDO UMA INTERRUPÇÃO DE TENSÃO DE 0% COM DURAÇÃO DE 10 CICLOS - RESULTADO COMPUTACIONAL - CASO 4.	116
FIGURA 4.28 – TENSÃO DE ALIMENTAÇÃO (AZUL) E CORRENTE TOTAL (VERMELHO) – SUPRIMENTO CONTENDO FLUTUAÇÃO DE TENSÃO: PST=5 E FREQUÊNCIA DA MODULADORA DE 13,5 HZ - RESULTADO EXPERIMENTAL - CASO 5.	118
FIGURA 4.29 - TENSÃO DE ALIMENTAÇÃO (AZUL) E CORRENTE TOTAL (VERMELHO) – SUPRIMENTO CONTENDO FLUTUAÇÃO DE TENSÃO: PST=5 E FREQUÊNCIA DA MODULADORA DE 13,5 HZ - RESULTADO COMPUTACIONAL - CASO 5.	119
FIGURA 4.30 – TENSÃO DE ALIMENTAÇÃO (AZUL) E CORRENTE TOTAL (VERMELHO) – SUPRIMENTO CONTENDO DISTORÇÃO HARMÔNICA TOTAL (DTT) DE 20% - RESULTADO EXPERIMENTAL - CASO 6.	120
FIGURA 4.31 - TENSÃO DE ALIMENTAÇÃO (AZUL) E CORRENTE TOTAL (VERMELHO) – SUPRIMENTO CONTENDO DISTORÇÃO HARMÔNICA TOTAL (DTT) DE 20% - RESULTADO COMPUTACIONAL - CASO 6.	121
FIGURA 4.32 - ESPECTRO HARMÔNICO DA CORRENTE DE ENTRADA DO CONDICIONADOR DE AR - SUPRIMENTO CONTENDO DISTORÇÃO HARMÔNICA TOTAL (DTT) DE 20% - RESULTADO EXPERIMENTAL E COMPUTACIONAL - CASO 6.	121
FIGURA 4.33 - TENSÃO DE ALIMENTAÇÃO (AZUL) E CORRENTE TOTAL (VERMELHO) – SUPRIMENTO DIRETAMENTE DA CONCESSIONÁRIA LOCAL - RESULTADO EXPERIMENTAL - CASO 6.	123
FIGURA 4.34 - TENSÃO DE ALIMENTAÇÃO (AZUL) E CORRENTE TOTAL (VERMELHO) – SUPRIMENTO DIRETAMENTE DA CONCESSIONÁRIA LOCAL - RESULTADO COMPUTACIONAL - CASO 6.	124
FIGURA 4.35 - ESPECTRO HARMÔNICO DA CORRENTE DE ENTRADA DO CONDICIONADOR DE AR - SUPRIMENTO DIRETAMENTE DA CONCESSIONÁRIA LOCAL - RESULTADO EXPERIMENTAL E COMPUTACIONAL - CASO 6.	125
FIGURA 5.1 - ESTRUTURA DO APLICATIVO APR.	130
FIGURA 5.2 - INTERFACE DO APLICATIVO APR DESTACANDO A INSERÇÃO DO NOVO EQUIPAMENTO DISPONÍVEL DENTRE AS OPÇÕES JÁ EXISTENTES.	132
FIGURA 5.3 – REDE DE DISTRIBUIÇÃO UTILIZADA PARA OS ESTUDOS DE DESEMPENHO DO APLICATIVO APR.	133
FIGURA 5.4 - TENSÃO DE ALIMENTAÇÃO – CONDIÇÕES IDEAIS DE OPERAÇÃO - CASO 1	135
FIGURA 5.5 - CORRENTE DE ALIMENTAÇÃO – CONDIÇÕES IDEAIS DE OPERAÇÃO - CASO 1	136

FIGURA 5.6 – COMPARAÇÃO ENTRE A SOLICITAÇÃO DIELÉTRICA IMPOSTA E A CURVA DE SUPORTABILIDADE ADOTADA - CONDIÇÕES IDEAIS DE OPERAÇÃO - CASO 1-----	137
FIGURA 5.7 - COMPARAÇÃO ENTRE A SOLICITAÇÃO TÉRMICA IMPOSTA E A CURVA DE SUPORTABILIDADE ADOTADA - CONDIÇÕES IDEAIS DE OPERAÇÃO - CASO 1-----	137
FIGURA 5.8 – INSERÇÃO DA DESCARGA ATMOSFÉRICA NO APR – CASO 2 -----	138
FIGURA 5.9 - TENSÃO DE ALIMENTAÇÃO – COM INCIDÊNCIA DE DESCARGA - CASO 2 -----	139
FIGURA 5.10 - CORRENTE DE ALIMENTAÇÃO – COM INCIDÊNCIA DE DESCARGA - CASO 2.-----	139
FIGURA 5.11 - COMPARAÇÃO ENTRE A SOLICITAÇÃO DIELÉTRICA IMPOSTA E A CURVA DE SUPORTABILIDADE ADOTADA – DESCARGA ATMOSFÉRICA- CASO 2.-----	140
FIGURA 5.12 - COMPARAÇÃO ENTRE A SOLICITAÇÃO TÉRMICA IMPOSTA E A CURVA DE SUPORTABILIDADE ADOTADA - DESCARGA ATMOSFÉRICA- CASO 2. -----	140
FIGURA 5.13 - INSERÇÃO DO RELIGAMENTO EM 3 ESTÁGIOS NO APR – CASO 3. -----	142
FIGURA 5.14 – TENSÃO DE ALIMENTAÇÃO - COM RELIGAMENTO EM 3 ESTÁGIOS - CASO 3-----	143
FIGURA 5.15 – CORRENTE DE ALIMENTAÇÃO - COM RELIGAMENTO EM 3 ESTÁGIOS - CASO 3 -----	143
FIGURA 5.16 - COMPARAÇÃO ENTRE A SOLICITAÇÃO DIELÉTRICA IMPOSTA E A CURVA DE SUPORTABILIDADE ADOTADA – RELIGAMENTO EM 3 ESTÁGIOS- CASO 3. -----	144
FIGURA 5.17 - COMPARAÇÃO ENTRE A SOLICITAÇÃO TÉRMICA IMPOSTA E A CURVA DE SUPORTABILIDADE ADOTADA – RELIGAMENTO EM 3 ESTÁGIOS- CASO 3-----	144
FIGURA 5.18 – INSERÇÃO DO CURTO-CIRCUITO FASE-TERRA NO APR – CASO 4. -----	146
FIGURA 5.19 – TENSÃO NO PONTO DE OCORRÊNCIA DO CURTO-CIRCUITO FASE TERRA – MÉDIA TENSÃO - CASO 4 -----	147
FIGURA 5.20 - TENSÃO NO PONTO DE CONEXÃO DO CONDICIONADOR DE AR ATRELADA COM O CURTO- CIRCUITO FASE TERRA NA MÉDIA TENSÃO - CASO 4 -----	147
FIGURA 5.21 – TENSÃO DE ALIMENTAÇÃO DO EQUIPAMENTO PARA O CASO 4-----	148
FIGURA 5.22 – CORRENTE DE ALIMENTAÇÃO DO EQUIPAMENTO PARA O CASO 4 -----	148
FIGURA 5.23 - COMPARAÇÃO ENTRE A SOLICITAÇÃO DIELÉTRICA IMPOSTA E A CURVA DE SUPORTABILIDADE ADOTADA – CURTO-CIRCUITO FASE-TERRA NA MÉDIA TENSÃO - CASO 4-----	149
FIGURA 5.24 - COMPARAÇÃO ENTRE A SOLICITAÇÃO TÉRMICA IMPOSTA E A CURVA DE SUPORTABILIDADE ADOTADA – CURTO-CIRCUITO FASE-TERRA NA MÉDIA TENSÃO - CASO 4-----	149

LISTA DE TABELAS

TABELA 1.1 - DISSERTAÇÕES DE MESTRADO E TESES DE DOUTORADO DESENVOLVIDOS PELO NÚCLEO DE QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA - UFU NO ÂMBITO DOS PIDS.-----	28
TABELA 1.2 - PROJETOS DE PESQUISA E DESENVOLVIMENTO REALIZADOS ENTRE EMPRESAS CONCESSIONÁRIAS DE ENERGIA ELÉTRICA E A UFU. -----	30
TABELA 3.1 – CARACTERÍSTICAS DO CONDICIONADOR DE AR UTILIZADO NOS ESTUDOS. -----	61
TABELA 3.2 - PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS DO COMPRESSOR DO CONDICIONADOR DE AR SPLIT. -----	67
TABELA 4.1 – CONDIÇÕES E PARÂMETROS ELÉTRICOS DO CONDICIONADOR DE AR SPLIT.-----	98
TABELA 4.2 – COMPARAÇÃO ENTRE OS RESULTADOS EXPERIMENTAIS E COMPUTACIONAIS PARA AS CORRENTES – CASO 1. -----	100
TABELA 4.3 – QUADRO RESUMO DOS CASOS ESTUDADOS. -----	104
TABELA 4.4 - SÍNTESE DAS PRINCIPAIS OCORRÊNCIAS OBSERVADAS NO CASO 2-ELEVAÇÃO MOMENTÂNEA DE TENSÃO DE 15%, DURAÇÃO DE 16 CICLOS. -----	109
TABELA 4.5 - SÍNTESE DAS PRINCIPAIS OCORRÊNCIAS OBSERVADAS NO CASO 3- AFUNDAMENTO DE TENSÃO DE 40% COM DURAÇÃO DE 10 CICLOS. -----	113
TABELA 4.6 - SÍNTESE DAS PRINCIPAIS OCORRÊNCIAS OBSERVADAS NO CASO 4: INTERRUPTÃO DO FORNECIMENTO DE ENERGIA, TENSÃO DE 0% - 10 CICLOS.-----	117
TABELA 4.7 - DISTORÇÕES HARMÔNICAS TOTAL E INDIVIDUAIS . -----	120
TABELA 4.8 – COMPARAÇÃO DAS HARMÔNICAS DE CORRENTE ENTRE OS RESULTADOS EXPERIMENTAIS E COMPUTACIONAIS QUANTO APLICADO UMA DISTORÇÃO HARMÔNICA DE TENSÃO (DTT) DE 20%. ----	122
TABELA 4.9 - DISTORÇÕES HARMÔNICAS TOTAL E INDIVIDUAIS. -----	123
TABELA 5.1 - DADOS DOS COMPONENTES DA REDE DE DISTRIBUIÇÃO UTILIZADA NOS ESTUDOS.-----	134
TABELA 5.2 – CASO EMPREGADOS PARA A ANÁLISE DO DESEMPENHO DO APR COM O CONDICIONADOR DE AR SPLIT SOB A AÇÃO DE DISTÚRBIOS NO SUPRIMENTO.-----	135

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO GERAL	19
1.1. Considerações iniciais	19
1.2. Contextualização do tema	22
1.2.1. Síntese qualitativa e quantitativa sobre a questão do ressarcimento por danos elétricos	22
1.2.2. Aspectos jurídicos	25
1.2.3. Pesquisas e produtos para a análise do nexso causal	28
1.3. Contribuições desta dissertação	31
1.4. Estrutura desta dissertação	32
2. CONSIDERAÇÕES GERAIS SOBRE APARELHOS CONDICIONADORES DE AR	35
2.1. Considerações iniciais	35
2.2. A origem dos condicionadores de ar	36
2.3. Princípio operacional de um sistema de refrigeração	37
2.4. Componentes de um sistema de refrigeração	40
2.4.1. Componentes mecânicos	40
2.4.2. Componentes elétricos	43
2.5. Tipos de sistemas de compressão	46
2.5.1. Compressores alternativos	46
2.5.2. Compressores rotativos	48
2.5.3. Compressores Scroll	49

2.6.	Tipos de condicionadores de ar	50
2.6.1.	Sistema de ar condicionado central	50
2.6.2.	Sistemas tipo Split	51
2.6.3.	Sistemas Self	55
2.6.4.	Aparelhos individuais ou de janela	56
2.7.	Considerações finais	57

3. MODELAGEM MATEMÁTICA E COMPUTACIONAL DE UM CONDICIONADOR DE AR TIPO SPLIT -----58

3.1.	Considerações iniciais	58
3.2.	Identificação e características físicas do condicionador de ar Split	59
3.3.	Estratégia para modelagem do condicionador de ar tipo Split	61
3.3.1.	Modelagem da evaporadora	62
3.3.2.	Identificação do arranjo físico da condensadora	66
3.4.	Modelagem matemática do motor monofásico PSC	68
3.5.	Implementação computacional da condensadora no simulador ATP	83
3.6.	Implementação do condicionador de ar tipo Split no simulador ATP	89
3.7.	Considerações finais	90

4. VALIDAÇÃO DO MODELO COMPUTACIONAL DO APARELHO CONDICIONADOR DE AR SPLIT -----92

4.1.	Considerações Iniciais	92
4.2.	Estrutura para realização dos ensaios experimentais	93
4.3.	Desempenho com tensão de suprimento ideal – Caso 1	97
4.4.	Desempenho com tensões de suprimento não ideais	104
4.4.1.	Elevação de tensão de curta duração - Caso 2	105
4.4.2.	Afundamento de tensão de curta duração - Caso 3	109
4.4.3.	Interrupção de tensão – Caso 4	113
4.4.4.	Flutuação de tensão – Caso 5	117

4.4.5.	Tensão com distorção harmônica - Caso 6	119
4.5.	Considerações Finais	125
5.	IMPLEMENTAÇÃO DO MODELO COMPUTACIONAL DO CONDICIONADOR DE AR SPLIT NO APR E ESTUDOS DE DESEMPENHO	128
5.1.	Considerações Iniciais	128
5.2.	Aplicativo computacional APR	129
5.3.	Estudo de casos	132
5.3.1.	Identificação do alimentador	133
5.3.2.	Caso 1- Condição ideal de operação	135
5.3.3.	Caso 2 - Descarga Atmosférica	138
5.3.4.	Caso 3 – Religamento tripolar em três estágios	141
5.3.5.	Caso 4 - Curto-circuito	145
5.4.	Considerações finais	150
6.	CONCLUSÕES GERAIS	152
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	155

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO GERAL

1.1. Considerações iniciais

A evolução da sociedade, aliada aos avanços tecnológicos, culminou no aumento considerável da necessidade e do consumo da energia elétrica, tendo em vista que a mesma tornou-se elemento indispensável à vida moderna. Diante deste quadro, surge a figura dos supridores e consumidores, fato este que determina a necessidade de documentos que venham a reger as bases e compromissos na forma de mecanismos legais para esta relação comercial. Neste sentido não é demais lembrar que compete à Agência Nacional de Energia Elétrica-ANEEL, regular os serviços de energia elétrica, sendo que, dentre outros objetivos, constata-se a busca do equilíbrio entre os interesses do consumidor e da concessionária, cabendo a essa agência reguladora, no exercício de sua função, emitir documentos voltados para a definição das diretrizes diversas, dentre elas as questões de ressarcimento.

Nesse contexto e em vista do problema central focado por esta dissertação, qual seja, o tema relacionado com os processos de solicitação de indenização por danos elétricos, surgiu a Resolução normativa nº 414/2010 que

incorporou a antiga resolução nº 61/2004, e estabelece as disposições relativas ao ressarcimento de danos em equipamentos elétricos instalados em unidades consumidoras, causados por perturbações no sistema elétrico [1].

Diante das normas vigentes e acima elencadas e considerando que os consumidores estão cada vez mais conscientes dos seus direitos, torna-se inevitável o surgimento de uma série de contendas instauradas em detrimento das empresas prestadoras de serviço público de energia elétrica, principalmente no que tange às distribuidoras, almejando-se o ressarcimento de eventuais prejuízos sofridos em decorrência de distúrbios manifestados nas redes elétricas e, por conseguinte, na prestação do serviço público correspondente.

Em verdade, constata-se, ao longo dos últimos anos, um aumento gradativo de pedidos de ressarcimento por danos em equipamentos elétricos e eletrônicos (tecnicamente denominados PID – Pedidos de Indenização por Danos – pelas concessionárias de energia elétrica), fato este que tem merecido a atenção das concessionárias de energia elétrica – especialmente do setor de distribuição, agências de regulação, consumidores e outros órgãos governamentais. Tais preocupações não se restringem aos volumes financeiros envolvidos, mas, sobretudo, se relacionam aos impactos sociais ocasionados pelas solicitações, decisões, conflitos e outras questões que envolvem a relação entre as empresas concessionárias e seus consumidores.

Assim sendo, o tema enfatizado vem motivando esforços a fim de que se vislumbre uma melhoria do processo de análise dos pedidos de indenização por danos elétricos, e que venha a oferecer meios confiáveis, seguros e ágeis para que se possa aferir com uma maior precisão a correlação entre os distúrbios existentes no fornecimento da energia elétrica e os eventuais efeitos ocasionados.

No que tange as inevitáveis situações anômalas passíveis de manifestação em uma rede elétrica de distribuição ou transmissão, estas se apresentam associadas com o dia a dia da empresa e da dinâmica de operação de um sistema

elétrico. Como exemplos dessas ocorrências pode-se citar: atuações dos dispositivos de proteção; entrada e saída de cargas de elevadas potências; partida de grandes motores; ocorrência de curtos-circuitos; forte presença de cargas não lineares; descargas atmosféricas; dentre outros. A manifestação desses fenômenos podem provocar distintos tipos de distúrbios no sistema de suprimento, que, em tempos atrás, eram pouco sentidos pelos aparelhos, normalmente eletromecânicos, mas com a evolução dos equipamentos e difusão, cada vez maior, dos dispositivos eletroeletrônicos em todos os segmentos da sociedade, há de se reconhecer que esses distúrbios podem trazer fortes impactos nas características operacionais de muitos dispositivos e, para muitas situações, leva-los a operar de maneira inadequada ou, em casos extremos, sofrer danos físicos irreversíveis [2].

Buscando, pois, subsídios para solucionar as controvérsias existentes, são estabelecidos procedimentos pelas empresas concessionárias de energia elétrica, os quais obedecem a uma lógica extremamente empírica visando atender aos termos estabelecidos pela agência reguladora através de suas normas vigentes e resoluções editadas e, sobretudo, a legislação do ordenamento jurídico [3].

Contudo, o crescente número dos pedidos de indenização, e consequentes montantes financeiros envolvidos nos processos de ressarcimento, têm apontado para a necessidade de métodos de análise mais consistentes, fundamentados na ciência e tecnologia, a exemplo dos procedimentos propostos em [4 - 6]. Uma vez desenvolvida uma metodologia apropriada, confiável e aceita pelas partes (supridor, consumidor, agência reguladora e órgãos de apoio ao consumidor), acredita-se, ter-se-á atingido um estado de maturidade que ofereceria respostas aos processos via laudos técnicos que primam pela isenção de interesses de uma ou outra parte, e deste modo, a justiça seria praticada à luz da lei e da coerência física da correlação entre causa e efeito. É dentro desse cenário que se encontra enquadrado o tema central desta dissertação, como pormenorizado nas seções subsequentes.

1.2. Contextualização do tema

De forma a contextualizar o assunto em pauta, dentro do cenário brasileiro, as sessões seguintes abordam a questão do ressarcimento por danos elétricos de forma qualitativa e quantitativa.

1.2.1. Síntese qualitativa e quantitativa sobre a questão do ressarcimento por danos elétricos

Visando oferecer informações gerais sobre o tema em foco, esta seção encontra-se direcionada para uma caracterização da relevância da matéria dentro do cenário brasileiro. Neste particular ressalta-se que os resultados aqui sintetizados expressam grandezas qualitativas e quantitativas relacionadas com os pedidos de indenização, a nível nacional, durante o ano de 2010, e ainda, oferece alguns dados particulares atrelados com o processo aplicado no âmbito de uma empresa distribuidora de energia.

Iniciando, a figura 1.1, advinda da Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL, expressa aspectos quantitativos sobre o número de solicitações encaminhadas para análise. Os números são considerados parciais e representam a situação vivenciada ao longo do ano de 2010 para apenas 30% das empresas nacionais. A importância do tema quanto a sua relevância para as partes envolvidas, a saber: consumidores; concessionárias e agência reguladora; fica evidente pelos números envolvidos. De fato, os registros de solicitações apontam para cerca de 260.000 reclamações de pedidos de ressarcimento, das quais, aproximadamente 45% foram julgados procedentes e 55% improcedentes. Vale observar que a síntese apresentada compreende 18 empresas distribuidoras, enquanto o Brasil possui 63 concessionárias atreladas com a distribuição da energia elétrica.

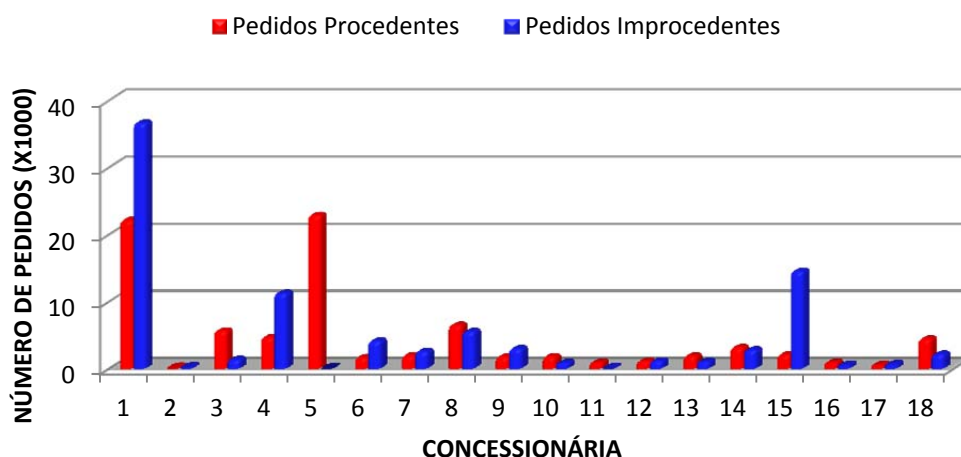


Figura 1.1 - Número de pedidos de indenização por danos elétricos – ano de 2010 – 18 empresas distribuidoras – fornecido pela ANEEL.

De modo particular, a figura 1.2 ilustra os principais equipamentos contemplados nos processos de indenização para uma empresa de grande porte. A diversidade de produtos fica evidenciada e, por conseguinte, contata-se que a grande maioria envolve eletrodomésticos de custo mais elevado, fato este que, em atenção aos números financeiros, conduz a um custo estimado de R\$250,00 por produto indenizado.

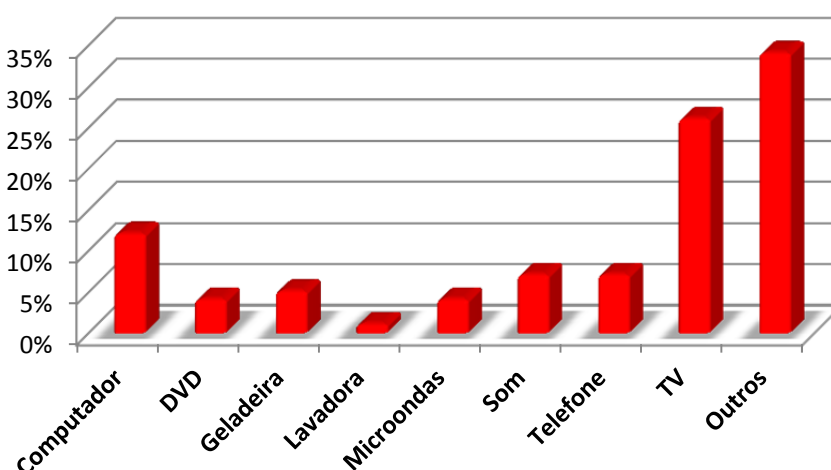


Figura 1.2 - Principais equipamentos reclamados para uma empresa distribuidora.

Diante do número de solicitações e dos custos associados com o reparo ou substituição dos equipamentos cujos pedidos foram julgados procedentes, mais uma vez, objetivando ilustrar os custos associados com o assunto contemplado nesta dissertação, a figura 1.3 apresenta os valores totais dos ressarcimentos feitos pela mesma empresa referenciada, ao longo dos últimos quatro anos. Novamente, fica evidenciado que os valores financeiros são significativos e a taxa de crescimento das solicitações de indenização se apresenta com um crescimento exponencial. Estes argumentos, somados às ponderações anteriores, refletem, de forma clara e inequívoca, a relevância do tema e a importância da busca por mecanismos legais e técnicos para a solução dos problemas de conflitos entre as partes.

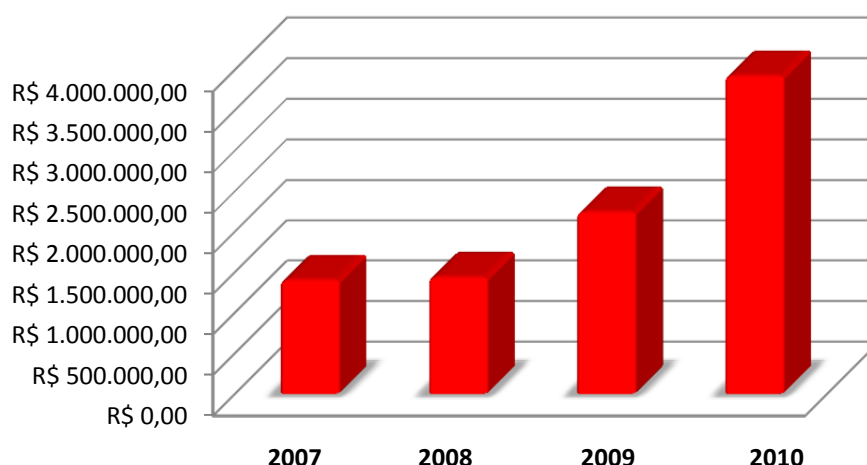


Figura 1.3 - Custos totais ressarcidos por pedidos de indenização por danos para uma empresa de distribuição.

Complementarmente, a figura 1.4 mostra a origem dos supostos fenômenos aos quais estariam vinculados, em sua maioria, os pedidos de indenização. Como pode ser visto, as descargas atmosféricas e os religamentos automáticos constam como as principais causas das reclamações direcionadas às distribuidoras de energia elétrica. Não obstante a isto, a correlação entre tais distúrbios e os danos a eles atribuídos, certamente, constitui-se ainda em

motivos para discussões e avaliações mais criteriosas, não bastando a existência para uma justa correlação entre causas e efeitos. Isso tem provocado um conjunto de ações de ordem regulamentadora, métodos de análise, processos e outros aspectos diretamente afetos ao assunto [7].

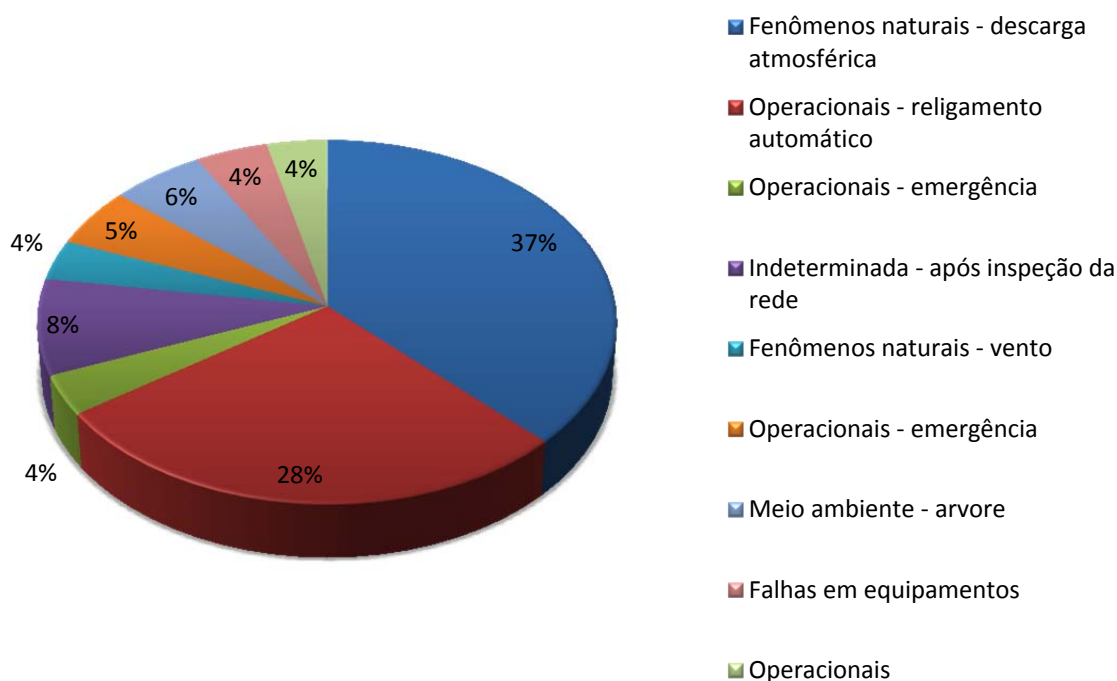


Figura 1.4 - Principais fenômenos aos quais estariam associados os pedidos de indenização pela mesma distribuidora anteriormente empregada.

1.2.2. Aspectos jurídicos

A energia elétrica é considerada um bem ou um produto essencial e, consoante com o disposto em Lei nº 8987/1995, esta deve ser oferecida de maneira adequada e com qualidade. Partindo-se desse pressuposto e, considerando o previsto pela legislação vigente, sobretudo a Constituição Federal, não restam dúvidas que as pessoas jurídicas de direito privado prestadoras de serviços públicos, dentre as quais se encontram inseridas as concessionárias de energia elétrica, responderão pelos danos a outrem

ocasionados. Assim sendo, emerge o fato que as empresas privadas, quando lhes é atribuído o dever de executar os serviços de interesse público, seja através de concessão, permissão ou autorização, respondem pelos danos causados pela falha ou defeito na prestação de seus serviços.

À luz destes argumentos, surge um dos papéis da Agência Reguladora do setor elétrico – ANEEL, direcionado para a mitigação dos problemas existentes entre as concessionárias de energia elétrica e seus usuários. Com efeito, além da missão regulatória e fiscalizatória atribuída por lei a ANEEL, possui este órgão a competência de expedir os atos necessários ao cumprimento das normas estabelecidas pela legislação em vigor. Dessa maneira, na resolução de conflitos existentes entre usuários do serviço público de energia elétrica e as concessionárias de energia elétrica, merece observância o disposto pelas Resoluções normativas editadas pela ANEEL, as quais devem estar em perfeita harmonia com o disposto no Código de Defesa do Consumidor e, sobretudo, em consonância com o que dispõe a Constituição Federal, que se sobrepõe a toda e qualquer legislação, tendo em vista a hierarquia de normas existentes no ordenamento jurídico pátrio.

À luz destas diretrizes, não obstante seja dispensável a comprovação da culpa, para que se concretize o dever das concessionárias de energia elétrica de indenizar os danos elétricos ocasionados aos consumidores, faz-se imprescindível a constatação de alguns pressupostos, quais sejam: o dano efetivamente ocasionado ao consumidor; o ato ilícito, consistente na ação ou omissão por parte do agente causador do dano que violam direitos causando danos a outrem e o nexo causal entre a conduta por parte daquele que ocasiona danos a outrem e o dano experimentado.

Faz-se importante ponderar, dessa maneira, que em algumas situações a Administração Pública e as prestadoras de serviços públicos poderão ter por excluída a obrigação de indenizar, ainda que se constate danos a outrem

ocasionados, nos casos em que se vislumbre alguma excludente de responsabilidade civil.

Assim sendo, apenas naquelas situações em que se comprove, de forma inequívoca a ausência do nexo causal entre o dano ocasionado ao consumidor e a eventual falha ou deficiência na prestação de, não há que se falar em dever de indenizar por parte desta.

Ao final, importa destacar que muito embora a legislação vigente ampare o direito do consumidor em ser ressarcido por eventuais danos elétricos, fazem-se incontestáveis as dificuldades enfrentadas pelos consumidores na obtenção da reparação devida. Por outro lado, o total desconhecimento dos consumidores das situações em que se estaria diante de algum excludente de responsabilidade da concessionária de energia elétrica, não havendo, qualquer obrigação desta em proceder às indenizações pleiteadas, leva a crer que se faz premente a uniformização dos procedimentos adotados na análise dos pedidos de indenização por danos elétricos.

Desta forma, a busca por mecanismos visando uma padronização de métodos de análise, em que pese mecanismos ou softwares alicerçados em critérios técnicos e científicos da engenharia, capazes de aferir com maior precisão se de fato houve correlação entre a perturbação no sistema elétrico e o dano ocasionado ao consumidor, se apresentam como desafios importantes e necessários. É pois neste cenário do desenvolvimento de estratégias isentas de interesses de uma ou outra parte que se situa a presente pesquisa, a qual visa propor um processo avaliativo, com perspectivas mais sólidas que meras inspeções visuais e ocorrências de campo, a fim da constatação do nexo causal entre a falha na prestação do serviço público de energia elétrica e o dano alardeado que se poderia cogitar na indenização correspondente [8].

1.2.3. Pesquisas e produtos para a análise do nexa causal

No âmbito dos trabalhos realizados pela Universidade Federal de Uberlândia, no que diz respeito a mecanismos balizadores para emissão de pareceres envolvendo pedidos de ressarcimento por danos elétricos, a tabela 1.1 resume todas as dissertações de mestrado e teses de doutorado defendidas sobre o assunto em pauta.

Tabela 1.1 - Dissertações de mestrado e teses de doutorado desenvolvidos pelo Núcleo de Qualidade da Energia Elétrica - UFU no âmbito dos PIDs.

AUTOR	TIPO DE TRABALHO	ANO	TÍTULO DO TRABALHO
Isaque Nogueira Gondim	Tese (Em andamento)	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	2011	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 os 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 Vinícius 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.

Como demonstrado, a linha de pesquisas na qual se insere a presente dissertação já se apresenta com um lastro significativo de contribuições, também materializadas na forma de inúmeros artigos em congressos nacionais e internacionais, periódicos e outros meios de divulgação.

Visando ainda consubstanciar a relevância do assunto, relacionam-se, a seguir, projetos de Pesquisa e Desenvolvimento realizados pelo Grupo de

Qualidade da Energia Elétrica em conjunto com empresas distribuidoras que compõem o setor elétrico nacional.

Tabela 1.2 - Projetos de Pesquisa e Desenvolvimento realizados entre empresas concessionárias de energia elétrica e a UFU.

PROJETOS	DESCRIÇÃO
LIGHT-UFU 2002-2004	Possibilitou a geração de modelos computacionais para distintos aparelhos eletro-eletrônicos, os quais permitem a reprodução, via software, do desempenho dielétrico e térmico dos mesmos, sob a ação dos mais distintos tipos de distúrbios passíveis de manifestação numa rede de distribuição. Nesta fase das atividades foi utilizado um simulador que não o ATP.
CEB-UFU 2005-2007	Produziu um software que reproduz efeitos associados com os indicadores de conformidade dos suprimentos e, conjuntamente com outro grupo de equipamentos devidamente simulados, permite correlacionar as intensidades dos fenômenos com as curvas de suportabilidade dielétrica e térmica dos produtos investigados. Neste projeto a rede elétrica até o consumidor é modelada manualmente, são contemplados alguns equipamentos definidos pela empresa e avança no sentido de se utilizar o ATP como plataforma para os cálculos. Este trabalho resultou numa primeira versão do aplicativo, o qual foi designado por APR-1.0, ou seja, Analisador de Pedidos de Ressarcimento - versão 01.
LIGHT-UFU 2006-2009	Este projeto ofereceu expressivos avanços em relação ao produto anterior. Dentre as principais inovações destacam-se: novos equipamentos foram inseridos, foi proposta uma estratégia para a inclusão do tempo de uso dos produtos, foram considerados modelos mais complexos para os cabos elétricos, os equipamentos fundamentados no princípio da força motriz foram aprimorados, e outros aspectos visando situações particulares para as redes de distribuição da empresa contratante. Ao final das atividades foi produzido um software que recebeu a designação: APR-2.0, ou seja, uma segunda versão do produto anteriormente destacado.
CEMIG-UFU 2008-2010	Esta pesquisa visou, sobretudo, a determinação de curvas reais que expressem os níveis de suportabilidade de distintos equipamentos eletro-eletrônicos, possibilitando, assim, melhorias significativas para o processo de análise e parecer emitido pelo APR-2.0.
CELG-UFU 2008-2010	Fundamentalmente, através da definição de uma estrutura de hardware e software, tal projeto contemplou a formação de bancos de dados sobre ocorrências reais nas redes de distribuição, os quais poderão ser utilizados como entrada de informações para o APR-2.0.

Maiores informações e detalhamentos sobre os objetivos alcançados com os trabalhos ressaltados podem ser obtidos diretamente através de uma consulta aos mesmos. Entretanto, é importante destacar que, como resultado deste volume de pesquisas a UFU produziu um software destinado ao processo de análise da consistência entre causas e efeitos, destinado à avaliação dos processos de indenização e a oferecer pareceres conclusivos sobre a existência ou não do pressuposto nexos causal. Este programa foi denominado por APR (analisador de pedidos de ressarcimento) e esta ferramenta constitui-se a base e o objetivo principal da presente dissertação.

1.3. Contribuições desta dissertação

Procurando contribuir para o avanço e consolidação do mecanismo computacional contemplado nas discussões anteriores, a saber, o Aplicativo APR, os trabalhos realizados pela presente pesquisa encontram-se centrados em quatro pontos focais. São eles:

- Modelagem matemática, no domínio do tempo, de um aparelho condicionador de ar tipo Split;
- Implementação computacional no software ATP do equipamento supra referido;
- Validação do modelo e programa através da correlação entre os desempenhos experimentais e computacionais do condicionador de ar tipo Split sob condições de suprimento ideais e não-ideais;
- Implementação do modelo no aplicativo APR e realização de estudos de desempenho.

1.4. Estrutura desta dissertação

O primeiro capítulo, aqui considerado, consistiu na introdução geral ao tema principal desta pesquisa e contextualiza a relevância do estabelecimento de procedimentos sistematizados para os estudos e pareceres sobre a consistência ou não dos nexos causais existentes entre distúrbios manifestados nas redes e respectivos danos reclamados pelos consumidores. Somado a isto, foram tecidos comentários sobre trabalhos realizados pelo Grupo de Pesquisadores da UFU no cenário em pauta e definidos os rumos da presente pesquisa.

Além deste texto introdutório, a presente dissertação encontra-se estruturada na forma de mais cinco capítulos, os quais são identificados a seguir:

CAPÍTULO 2 – CONSIDERAÇÕES GERAIS SOBRE APARELHOS CONDICIONADORES DE AR

Este capítulo é iniciado apresentando breve histórico da refrigeração, seguido da descrição dos aspectos tecnológicos e funcionamento destes dispositivos, mostrando os componentes principais e como se processa um ciclo completo de refrigeração. Na sequência, é feita classificação dos principais tipos de aparelhos condicionadores de ar existentes no mercado com um enfoque especial ao tipo Split, o qual é objeto de estudo principal deste trabalho.

CAPÍTULO 3 – MODELAGEM MATEMÁTICA E COMPUTACIONAL DE UM CONDICIONADOR DE AR TIPO SPLIT

Este capítulo apresenta as características do aparelho condicionador de ar Split utilizado no estudo. Descreve também o funcionamento da evaporadora e condensadora, abordando quais as estratégias utilizadas na modelagem de ambas. Destaque é dado ao tratamento da unidade condensadora, a qual é tratada na forma de uma representação matemática para os acionamentos que fundamentam o seu princípio funcional. Os demais componentes, relacionados com unidades eletrônicas, são tratados na forma de circuitos equivalentes, representados por recursos tradicionalmente disponibilizados na base computacional empregada.

CAPÍTULO 4 – VALIDAÇÃO DO MODELO COMPUTACIONAL DO APARELHO CONDICIONADOR DE AR SPLIT

Esta etapa da dissertação encontra-se direcionada para os trabalhos de validação dos modelos matemáticos e circuitos equivalentes obtidos para a representação do condicionador de ar Split como um todo. Fundamentalmente, a estratégia utilizada se apoia na realização de ensaios experimentais e correspondentes correlações com desempenhos similares obtidos da base computacional ATP junto à qual foi inserido o produto em foco. As investigações aqui contempladas compreendem situações normais e anômalas de funcionamento do produto, no que tange a tensão de suprimento.

CAPÍTULO 5 – IMPLEMENTAÇÃO DO MODELO COMPUTACIONAL DO CONDICIONADOR DE AR SPLIT NO APR E ESTUDOS DE DESEMPENHO

Esta seção destina-se a inserção do modelo computacional do condicionador de ar Split no aplicativo APR e, posteriormente, avaliação do seu desempenho através de estudos de casos. Para tanto são consideradas situações típicas que reflitam a real condição vivenciada pelos agentes envolvidos com a análise de pedidos de ressarcimento. Para cada situação considerada, os fenômenos são propagados até o equipamento em análise e estabelecidos termos comparativos entre os impactos incidentes e os níveis de suportabilidade do produto avaliado determinando-se, assim, a correlação entre esforços e a possibilidade de danos elétricos no aparelho.

CAPÍTULO 6 – CONCLUSÕES GERAIS

Por fim, apresenta-se uma síntese dos principais pontos e conclusões relacionados com o trabalho como um todo. Além disso, serão ressaltadas questões vinculadas às principais contribuições deste trabalho, bem como sugestões para futuros desenvolvimentos.

CAPÍTULO 2

CONSIDERAÇÕES GERAIS SOBRE APARELHOS CONDICIONADORES DE AR

2.1. Considerações iniciais

Tendo em mente que o foco da presente dissertação encontra-se direcionado para estudos de modelagem, implementação computacional, estudos de desempenho, e outros objetivos relacionados com estudos de pedidos de indenização por danos elétricos, com destaque aos aparelhos condicionadores de ar tipo Split, considerou-se relevante, neste estágio, apresentar uma síntese dos principais produtos comerciais atrelados com a aplicação em pauta. Isso foi feito com o objetivo de esclarecer e contextualizar o equipamento selecionado para os desenvolvimentos constantes nesta dissertação.

Em consonância com o exposto, seguem os principais tópicos contemplados encontram-se assim organizados:

- Síntese histórica da evolução da refrigeração e da sua importância para o desenvolvimento da humanidade;
- Apresentação de conceitos e informações a respeito da refrigeração, em seus aspectos tecnológicos e de aplicabilidade;

- Resumo das aplicações mais comuns da refrigeração, sua classificação e dispositivos encontrados comercialmente;
- Identificação de suas partes componentes, mecânicas e elétricas presentes em aparelhos de refrigeração bem como os do tipo em foco neste estudo;
- Descrição e diferenciação dos diversos tipos de sistema de condicionadores de ar utilizados pelo mercado.

2.2. A origem dos condicionadores de ar

Em 1902, o engenheiro Willis Carrier analisando os problemas específicos de uma indústria gráfica de Nova York, a Sackett-Wilhelms Lithography and Publishing Co., inventou um processo mecânico para condicionamento de ar. Carrier teorizou que poderia retirar a umidade da fábrica pelo resfriamento do ar. Desenhou, então, uma máquina que fazia circular o ar por dutos artificialmente resfriados que controlavam a temperatura e a umidade. O invento se tornaria precursor de toda a indústria da climatização e controle do conforto ambiental dando a Carrier o título de “pai do ar condicionado”.

A partir de 1914, o controle da temperatura também passou a ser usado para fins de conforto. Carrier desenvolveu um aparelho para aplicação residencial, usado pela primeira vez numa residência no estado norte-americano de Minnesota e, nesse mesmo ano, foi desenvolvido o primeiro condicionador de ar para hospitais.

A partir da década de 20 o ar condicionado começou a se popularizar nos Estados Unidos. Nessa mesma época, começaram a ser viabilizado para o mercado equipamentos compacto destinado ao condicionamento de ar em comércios e residências, em função do uso de um novo gás refrigerante não inflamável, o freon, mais apropriado para uso em sistemas de menor capacidade,

além de mais seguro e barato. Ainda assim o custo do equipamento doméstico não era muito acessível, ficando quase que limitado ao uso em pequenos estabelecimentos comerciais [9].

A partir de 1950, ano em que Willis Carrier faleceu, a adoção do condicionamento de ar residencial passou a ser disseminada com a produção em série de unidades em formato de caixas de aço para instalações suspensas, os hoje considerados ultrapassados equipamentos do tipo janela. Nessa época começaram também a ser produzidas as centrais de ar condicionado para residências.

A partir da década seguinte, os condicionadores de ar deixaram de ser novidade. Iniciou-se um mercado de amplitude mundial em constante expansão, em que as indústrias do setor passaram a investir em desenvolvimento tecnológico e novidades em produtos. Os aparelhos passaram a se tornar mais compactos e silenciosos, e foi introduzido o controle remoto para aumentar a comodidade dos usuários. Veio a preocupação com o consumo de energia elétrica, tornando os aparelhos mais econômicos e eficientes. Os condicionadores tipo janela evoluíram para o sistema Split, permitindo maior versatilidade nas instalações. Sendo o grande foco da atualidade, a atenção com o meio ambiente fez com que fossem desenvolvidos aparelhos que utilizam gás ecológico, que não agride a camada de ozônio. Estes aparelhos, que utilizam o sistema Inverter, mantém o ambiente com uma variação mínima de temperatura e são mais econômicos em comparação com os convencionais [10].

2.3. Princípio operacional de um sistema de refrigeração

Após vários anos de aperfeiçoamento das técnicas originalmente desenvolvidas e que culminaram nas aplicações supra mencionadas, na atualidade dispõe-se de inúmeros produtos comerciais destinados a melhorar o conforto, segurança e adequação de ambientes às condições impostas pelos seus

usuários ou equipamentos. Não obstante o reconhecimento de uma vasta gama de produtos, há de destacar que os princípios que regem o funcionamento dos mesmos são similares. Diante deste fato, as discussões subsequentes encontram-se dirigidas a uma compreensão dos princípios físicos que norteiam o funcionamento dos condicionadores de ar e, por conseguinte, a identificação das suas partes constituintes, nos termos requeridos para o estabelecimento de modelos equivalentes a serem considerados oportunamente.

Como mencionado, existe uma grande semelhança no ciclo de refrigeração dos diversos sistemas existentes. Basicamente, os equipamentos utilizam os mesmos tipos de componentes elétricos e mecânicos, variando somente quanto à forma e capacidade e respectivos dispositivos de controle e proteção, em função de sua capacidade ou importância [11].

A figura 2.1 mostra os elementos responsáveis pelo fenômeno da refrigeração. Sendo que, um ciclo de refrigeração completo, passa por todos os componentes.

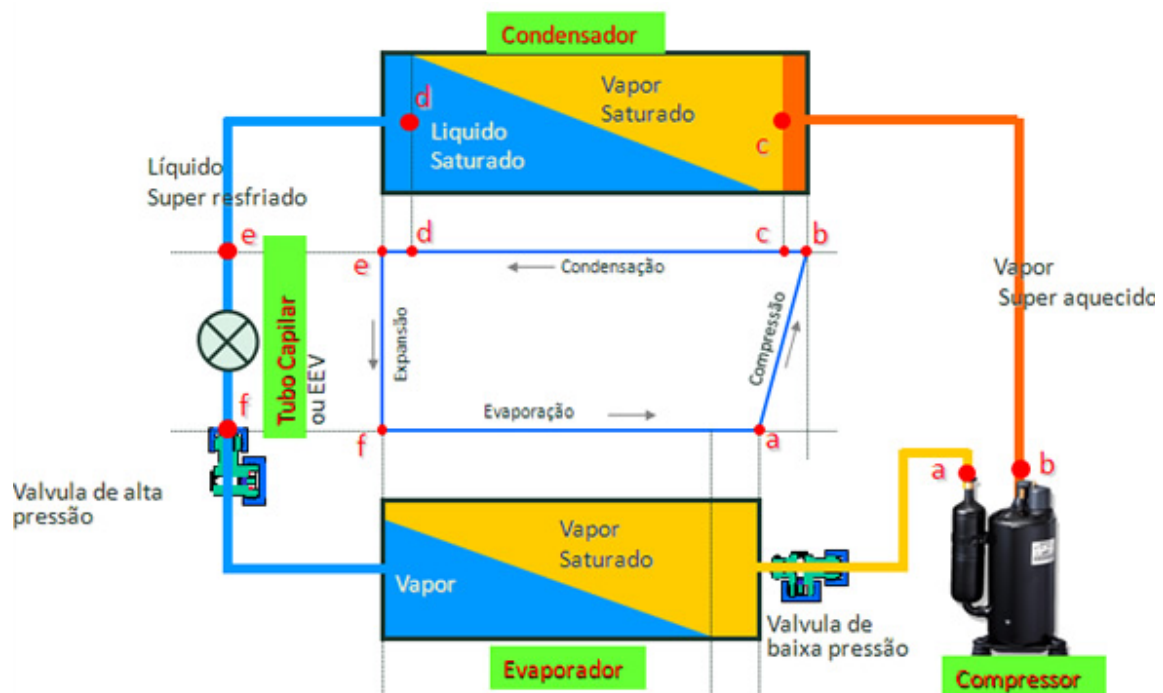


Figura 2.1 - Elementos de um sistema de refrigeração.

O ciclo de refrigeração tem início com o compressor aspirando o vapor refrigerante do evaporador, à baixa pressão, comprimindo-o, aumentando assim a pressão e temperatura do gás, para, em seguida, enviá-lo ao condensador. No condensador, o vapor refrigerante é transformado em líquido refrigerante por convecção (natural ou forçada), cedendo o calor ao meio ambiente. O líquido refrigerante a alta pressão, deixa o condensador e, atravessando o filtro, penetra no tubo capilar (ou válvula de expansão, dependendo do equipamento), que por sua vez, funcionando como um dispositivo regulador de refrigerante, produz a queda de pressão necessária para o evaporador. O gás líquido chega ao evaporador em forma de “chuveiro”, e em virtude do amplo espaço existente, perde pressão, vaporizando-se, e absorvendo o calor latente do espaço refrigerado.

A transferência de calor do espaço refrigerado para o condensador, e deste para o meio ambiente exterior, é conseguido através de um agente refrigerante que pode ser água, álcool, amônia, bióxido de carbono, anidrido sulfuroso, éter metílico, cloreto de metila e outros, muito embora cada um destes frigorigênos apresentem certas desvantagens.

Atualmente, de maneira a atender tratados internacionais quanto a preservação do meio ambiente, as indústrias fabricantes estão produzindo equipamentos para utilização de gases chamados de “ecológicos” por não constituírem risco para a vida no planeta. De maneira a melhor ilustrar a importância da substituição dos gases refrigerantes à base de CFC pelos chamados ecológicos, pesquisas recentes comprovaram que com a redução do uso dos primeiros, em refrigeradores e condicionadores de ar, estabilizou-se o efeito danoso sobre a camada de ozônio da atmosfera. Além disso, com tais atitudes, estima-se que o período de regeneração completa do “buraco” foi reduzido de 50 para 40 anos.

2.4. Componentes de um sistema de refrigeração

Os componentes de um sistema de refrigeração, seja para uso em refrigeradores ou em condicionadores de ar, são basicamente os mesmos. A seguir são descritas as principais unidades mecânicas e elétricas destes sistemas [12, 13].

2.4.1. Componentes mecânicos

Em aparelhos de refrigeração de pequeno porte, as partes mecânicas são três: o condensador, o evaporador e o compressor; este último sendo acoplado ao motor elétrico. Outros dois componentes importantes são: o tubo capilar que, dependendo da aplicação final do equipamento, pode ser substituído por uma válvula de expansão; e o filtro secador. Estas unidades, juntamente com uma série de controles (térmicos, de corrente, etc.), constituem o sistema de refrigeração e possibilitam a construção de equipamentos de grande capacidade térmica e também sistemas residenciais.

A seguir são ilustrados e resumidos os distintos componentes acima referidos.

- **Condensadores e evaporadores como trocadores de calor**

O condensador e o evaporador são superfícies de troca de calor. A função do evaporador é a de absorver o calor latente de vaporização do espaço refrigerado, enviando-o, através do compressor, ao condensador para que seja eliminado, através de troca com o meio ambiente. Na figura 2.2 (a) e (b) são mostradas estas duas partes.



Figura 2.2 - Componentes de um Refrigerador: a) Evaporadores e b) Condensador

Tanto em refrigeradores como em condicionadores de ar, as estruturas de evaporadores e condensadores são semelhantes, diferenciando apenas no material que é utilizado em sua fabricação. Nos evaporadores de refrigeradores utiliza-se o alumínio enquanto que em condicionadores de ar é utilizado o cobre.

- **Tubo capilar**

O capilar é um tubo de cobre de reduzidas dimensões utilizado no lado de alta pressão. Sua função é regular a quantidade de refrigerante que chega ao evaporador através de seu reduzido diâmetro, que por sua vez, em função de seu comprimento, causa a queda de pressão necessária, dividindo o sistema em duas seções de pressão: o lado de alta e o lado de baixa pressão.



Figura 2.3 - Tubo Capilar.

- **Filtro secador**

Este exerce duas funções importantes: a primeira é a de reter partículas sólidas que, em circulação no circuito, podem ocasionar obstrução ou danos à partes mecânicas do compressor; e a segunda, é absorver totalmente a umidade residual do circuito que porventura não tenha sido removida pelo processo de vácuo, evitando danos ao sistema como formação de ácidos, corrosão, aumento das pressões e obstrução do tubo capilar por congelamento da umidade.



Figura 2.4 - Filtro Secador

- **Compressores**

O compressor pode ser considerado como o coração de um sistema de refrigeração. Ele é o responsável pelas transformações físicas que ocorrem no fluido refrigerante, transformações essas que culminam no fenômeno da refrigeração. Sua função é a de succionar e impulsionar o gás refrigerante para que esse possa circular no sistema. Esta unidade é constituída, basicamente, por duas partes distintas: uma elétrica e outra mecânica. Ambas, dependendo principalmente do porte do equipamento, podem encontrar-se numa mesma unidade, formando os chamados “compressores herméticos”. Nos equipamentos de maior capacidade, por motivos de ordem técnica, as partes elétricas e mecânicas são montadas separadamente, embora possuindo acoplamento mecânico. Estes são os compressores conhecidos como semi-herméticos ou abertos. Grande parte das aplicações de pequeno porte, tais como:

refrigeradores, freezers, bebedouros e aparelhos de ar condicionado residencial, utilizam compressores do tipo hermético.

2.4.2. Componentes elétricos

Neste item são descritos os principais componentes elétricos utilizados em equipamentos de refrigeração de pequeno porte, componentes esses que serão posteriormente identificados nos esquemas elétricos utilizados em dispositivos comercialmente disponíveis.

- **Motor elétrico do compressor**

O motor elétrico do compressor é do tipo indução, com rotor em gaiola de esquilo. O rotor e o estator encontram-se fixados diretamente no eixo e no corpo da bomba do compressor. Ele é o responsável pela transformação da energia elétrica de suprimento em energia mecânica no eixo do motor. Construtivamente, o motor do compressor é formado por dois enrolamentos: um principal ou de marcha e outro auxiliar ou de partida. Este último podendo permanecer ou não conectado ao circuito, dependendo da finalidade de uso do compressor. Para uso em refrigeradores, o enrolamento de partida, normalmente, atua somente na partida do motor do compressor, sendo desligado após atingir-se o regime permanente. Já para utilização em condicionadores de ar, por tratar-se de equipamentos de maior porte, normalmente tal enrolamento permanece conectado em série com um capacitor.

- **Relé de partida eletromagnético**

O relé de partida do compressor hermético é um dispositivo utilizado em unidades de pequena capacidade, tais como pequenos refrigeradores domésticos. Este componente se apresenta com os contatos normalmente abertos. A bobina do relé de partida é ligada em série com o enrolamento principal do compressor, que, devido ao valor elevado da corrente na partida, origina um campo

magnético que atrai a armadura, fechando o contato e conectando o enrolamento auxiliar. Quando o motor atinge a rotação de serviço, a corrente diminui gradativamente até o momento em que o campo magnético não tem força para manter a armadura atracada. Dessa forma, a armadura, pela ação da gravidade, desce, abrindo os contatos e conseqüentemente desconectando a bobina de partida do motor.

- **Relé de coeficiente de temperatura positivo - PTC**

O relé PTC é um dispositivo semicondutor formado por uma pastilha de material cerâmico, utilizado na partida de unidades de refrigeração. Esse possui a propriedade de aumentar a resistência elétrica, quando aquecido, devido ao aumento da corrente que passa através dele. Durante a partida do motor, o PTC está frio e com baixa resistência elétrica, conseqüentemente, conduz corrente através da bobina de partida, fazendo o motor girar. Essa corrente irá aquecê-lo, fazendo com que a resistência aumente e a corrente através da bobina de partida diminua, até se tornar praticamente nula. Seu uso é recomendado para freezers e refrigeradores domésticos, onde o tempo entre os ciclos de operação é suficiente para o PTC esfriar e permitir nova partida.

- **Relé voltimétrico**

Usado normalmente em equipamentos de médio porte, em que estão presentes capacitores de partida e capacitores permanentes no esquema de ligação do motor, o relé voltimétrico possui os contatos normalmente fechados. A bobina do relé é ligada em paralelo com a bobina auxiliar do compressor. A tensão na bobina do enrolamento auxiliar aumenta com o aumento da velocidade do motor, até atingir o valor específico de “*pickup*”. Neste ponto, a armadura do relé é atraída, abrindo os contatos do relé e desconectando o capacitor de partida do circuito. Após a abertura, a tensão induzida na bobina de partida é suficiente para continuar atraindo a armadura e manter os contatos do relé abertos.

- **Protetor térmico bimetalico**

Este componente é ligado em série com o circuito que alimenta o motor. É fixo e encostado à cabeça do compressor, atuando, quando requerido, para abrir o circuito e desligando rapidamente o compressor na presença de qualquer aumento anormal de temperatura ou de corrente, ocasionados por problemas mecânicos, elétricos ou por aplicação inadequada. Um disco bimetalico (dentro do protetor), sensível a excesso de temperatura e/ou corrente, flexiona, abrindo os contatos e desenergizando o circuito. Alguns protetores possuem uma resistência em série com o disco que, com o seu aquecimento, auxilia a abertura dos contatos em situações de aumento excessivo da corrente elétrica.

- **Capacitor**

Este dispositivo, conectado em série com o enrolamento auxiliar, tem por objetivo produzir defasagens entre os campos magnéticos principal e auxiliar, de modo a favorecer o processo de partida. Tal componente se faz presente de duas formas. Um capacitor de partida e um permanente. Em caso de necessidade de torque de partida elevado, conforme se faz necessário em sistemas não auto-equalizados, utiliza-se um capacitor em série com a bobina auxiliar ou de partida. Este aumenta a corrente na bobina de partida causando, conseqüentemente, apreciáveis aumentos do torque. O capacitor atua somente na partida, sendo desconectado pelo relé quando o motor atinge rotação normal de funcionamento. O capacitor permanente é projetado para atuar continuamente, em série com a bobina de partida, melhorando o torque de partida, o torque de regime e a eficiência elétrica do motor. Este esquema de ligação é aplicado aos sistemas auto-equalizados.

2.5. Tipos de sistemas de compressão

São três os tipos mais comuns de compressores utilizados em equipamentos de refrigeração de pequeno porte: compressores alternativos, compressores rotativos e compressores centrífugos. A diferença entre eles está no princípio de funcionamento mecânico. A seguir é feita uma breve descrição das características de três tipos de compressores utilizados em aparelhos condicionadores de ar.

2.5.1. Compressores alternativos

Estes são os compressores de maior uso no mercado brasileiro e encontram aplicações desde a refrigeração doméstica até a industrial. Tais componentes são constituídos por um ou dois cilindros, cabeçote, válvula de descarga, válvula de admissão, bloco, fole da vedação, biela, virabrequim, mancais, pistões e sistema de lubrificação. A figura 2.5 mostra dois modelos de compressores herméticos utilizados em equipamentos de refrigeração.

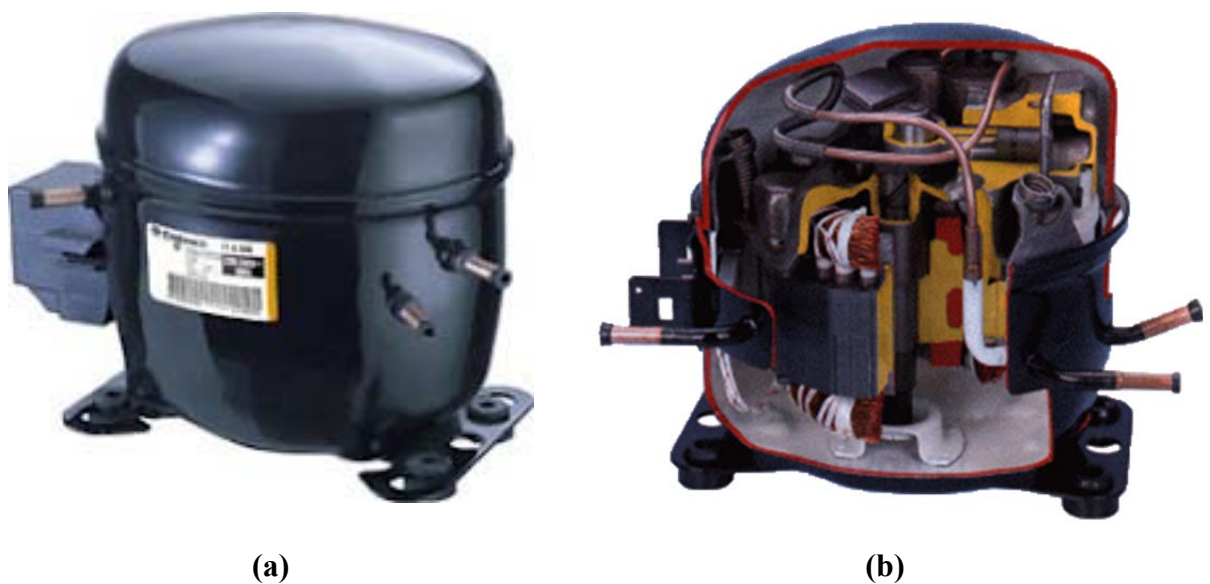


Figura 2.5 - Compressor hermético alternativo para utilização em: a) aparelhos condicionadores de ar e b) refrigeradores domésticos e comerciais

De maneira a propiciar um melhor entendimento sobre as partes componentes dos compressores herméticos do tipo alternativo, a figura 2.6 mostra um corte deste componente, identificando as suas partes internas, elétricas e mecânicas.

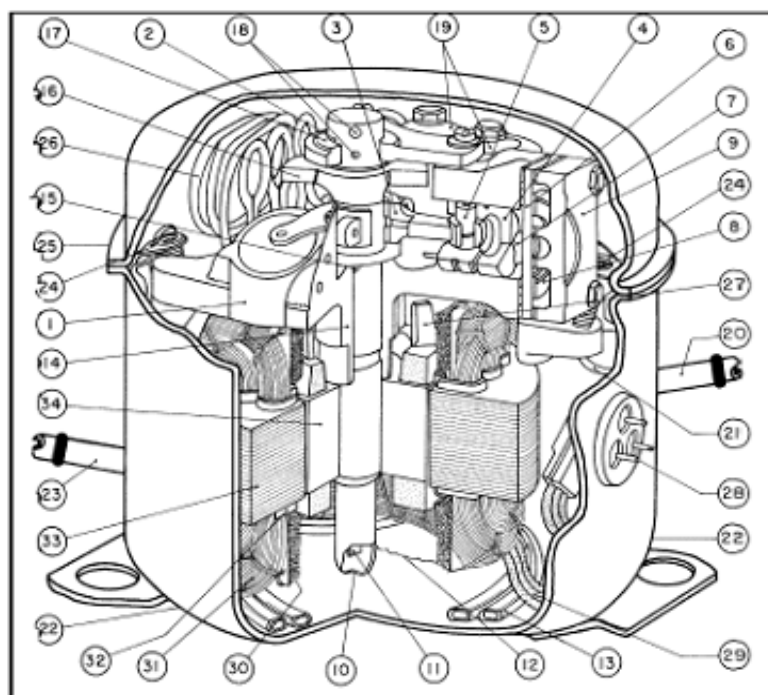


Figura 2.6 - Componentes de um compressor hermético

- | | |
|------------------------|----------------------------|
| 1. Corpo | 18. Furos de Lubrificação |
| 2. Eixo | 19. Muflas de Descarga |
| 3. Biela | 20. Cano de Sucção |
| 4. Pistão | 21. Suporte Interno |
| 5. Pino | 22. Carcaça |
| 6. Placa de Válvulas | 23. Cano de Descarga |
| 7. Válvula de Sucção | 24. Molas de Suspensão |
| 8. Válvula de Descarga | 25. Solda |
| 9. Cabeçote | 26. Serpentina de Descarga |
| 10. Pescador de Óleo | 27. Aletas Rotor |
| 11. Divisor | 28. Terminal Hermético |
| 12. Nível de Óleo | 29. Cabos de Ligação |

- | | |
|-----------------------------|------------------------|
| 13. Resfriador de Óleo | 30. Bobina de Partida |
| 14. Mancal Principal | 31. Bobina de Trabalho |
| 15. Ranhura de Lubrificação | 32. Isolação |
| 16. Contrapeso | 33. Estator |
| 17. Mancal | 34. Rotor |

2.5.2. Compressores rotativos

Na atualidade, como consequência da necessidade de aumentar a eficiência em todos os setores, de promover redução de custos, e uma maior preocupação com a conservação e racionalização da energia elétrica, a tendência mundial é que os compressores rotativos voltem a ser fabricados em substituição aos alternativos, mesmo a um custo inicial maior [13].

Como pode ser observado na figura 2.7, os compressores rotativos são unidades herméticas e compactas, constituídas, fundamentalmente, pelas seguintes unidades: bloco divisor, estator, rotor, eixo e excêntrico, impulsor e cilindros.

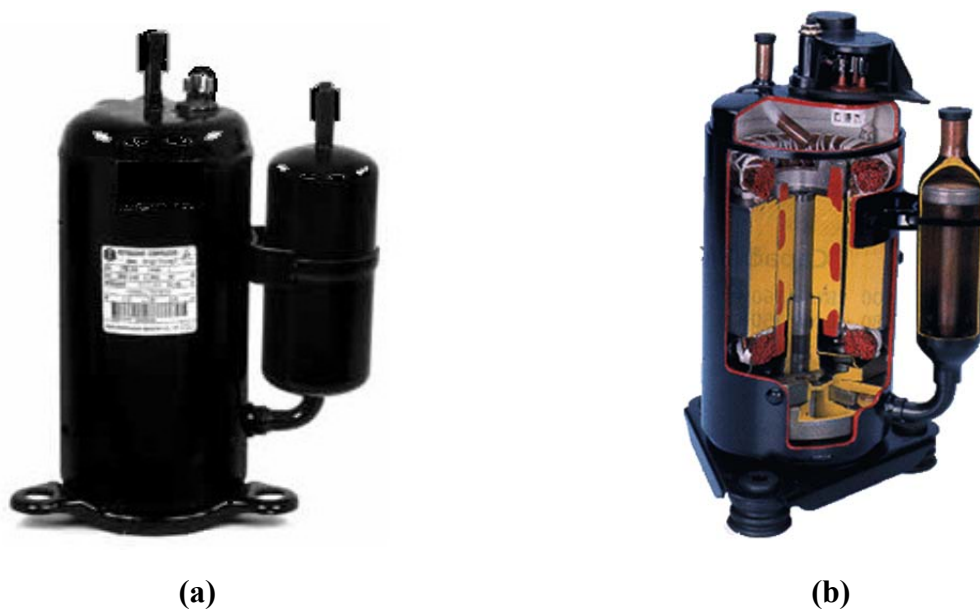


Figura 2.7 - Compressor hermético rotativo para utilização em aparelhos condicionadores de ar de diferentes capacidades.

2.5.3. Compressores Scroll

Os compressores Scroll têm uma vantagem de apresentarem com uma melhoria na eficiência da ordem de 5 a 10% em relação aos rotativos a pistão. Isto ocorre pelo fato que os tipo Scroll se apresentam com uma redução das fugas de gás e das perdas de fluxo. Além disso, para um compressor rotativo, as folgas mecânicas aumentam a medida que seus componentes se desgastam. Os compressores Scroll mantém sua capacidade de vedação durante o funcionamento normal, já que as partes emparelhadas se desgastam juntas em seu encaixe, isto é, há o acoplamento entre elas com o uso. Para os Scroll de ar condicionado, as perdas de fluido também são reduzidas. Ainda, nos compressores rotativos, grandes pulsações do gás ocorrem contra a carcaça, os quais proporcionam ruído adicional. Nos compressores Scroll, a maior contribuição de ruídos é do contato mecânico entre os elementos. De uma maneira geral, um compressor Scroll é, em média, cerca de 3 a 8 dB mais silencioso do que um semi-hermético do mesmo tamanho. A vibração associada a esse compressor é também mais baixa. Esse compressor é ilustrado pela figura 2.8.



Figura 2.8 - Compressor hermético Scroll para utilização em aparelhos condicionadores de ar de diferentes capacidades.

2.6. Tipos de condicionadores de ar

Apresenta-se, na sequência, os principais equipamentos comercialmente disponíveis para as mais distintas aplicações [14].

2.6.1. Sistema de ar condicionado central

O sistema de ar condicionado central utiliza um conjunto de máquinas de grande porte. Devido ao seu alto custo, são usados somente em grandes projetos, sendo que em longo prazo são mais eficientes no uso de energia elétrica. O condensador encontra-se integrado à torre de arrefecimento, recebendo água à temperatura ambiente ao gás refrigerante, reduzindo a temperatura do mesmo antes de passar pelo compressor. A figura 2.9 ilustra esse equipamento instalado no topo de um edifício.



Figura 2.9 – Sistema de Ar Condicionado Central no topo de um edifício.

Existe um sistema de ar condicionado central que adota uma tecnologia conhecida como Termoacumulação. Esta é uma forma de “acumular frio” em

horários em que a eletricidade é mais barata, ou seja, durante a noite, possibilitando reduzir o uso dos compressores durante o dia, gerando economias.

2.6.2. Sistemas tipo Split

Um Split (que literalmente significa “dividido”) não requer grandes aberturas nas paredes ou janelas. As partes da máquina que emitem maior ruído (condensador e compressor) ficam do lado de fora do prédio, reduzindo bastante o barulho no ambiente de trabalho. Por outro lado, a parte do aparelho que gera e circula o ar frio (o evaporador com um ventilador) é instalada dentro do ambiente.

A figura 2.10 ilustra as partes constituintes desses sistemas.



Figura 2.10 – Aparelho condicionador de ar Split instalado em uma residência.

As figuras 2.11 e 2.12 mostram as duas unidades do condicionador de ar Split em detalhes, destacando os principais componentes de cada sistema.

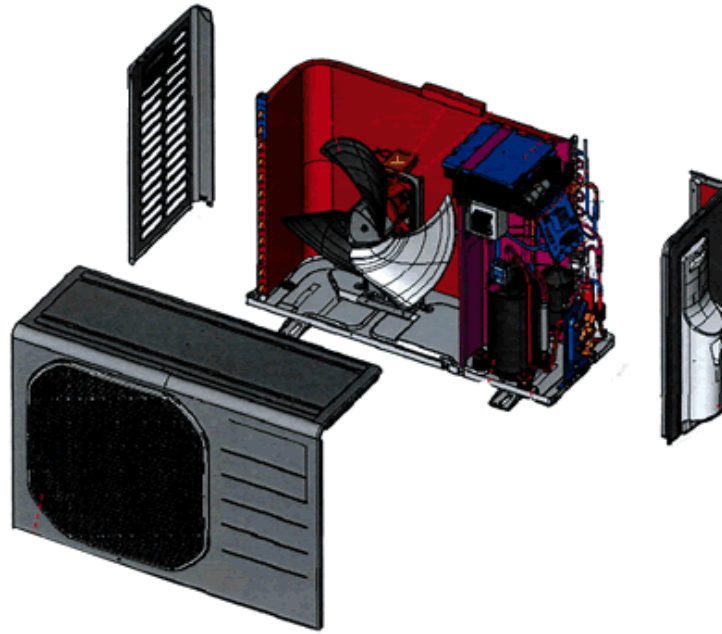


Figura 2.11 – Vista da unidade condensadora.

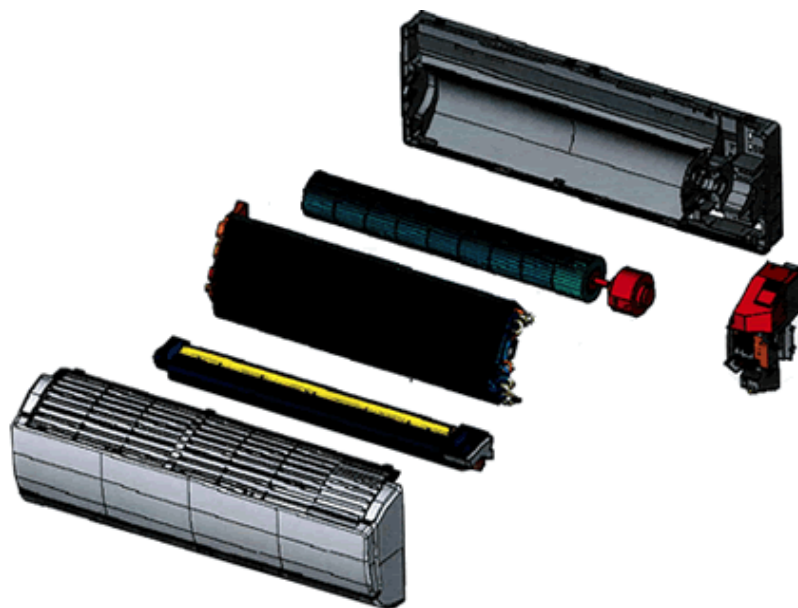


Figura 2.12 – Vista da unidade evaporadora.

Algumas variações permitem adaptar a ideia do Split para criar um sistema parecido ao ar condicionado central. Uma das vantagens é reduzir correntes de ar, pois o ar frio pode ser distribuído de forma menos concentrada. A exemplo disto tem-se o denominado *Split Cassete (Piso/Teto)* que é um Split

indicado para o uso comercial e residencial, de médio a grande porte de capacidade. A figura 2.13 ilustra a evaporadora desse sistema.



Figura 2.13 – Evaporadora de um sistema Split Cassete para utilização em teto.

Uma outra aplicação, denominada por *Multi-split*, consiste em uma máquina externa que atende diversos evaporadores no interior do ambiente. Tradicionalmente, no mercado existem *multi-splits* com dois a quatro evaporadores. A figura 2.14 ilustra um sistema Tri-Split.

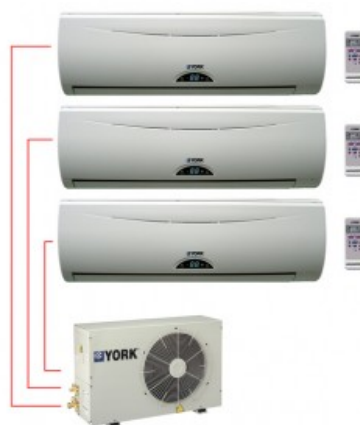


Figura 2.14 – Sistema Tri-Split.

Uma outra variação dos Splits consiste no *sistema VRV (Volume de Refrigerante Variável)*. Esse é um sistema em que o fluxo do gás refrigerante pode ser variado e funciona como um multi-split de maior capacidade. Além de

ser versátil e flexível, é de fácil expansão e com grande facilidade de adaptação em prédios com escritórios de pequeno e médio porte, onde não se tenha um sistema central de refrigeração. A figura 2.15 ilustra esse item instalado na cobertura de um edifício.



Figura 2.15 - Sistema VRV instalado na cobertura de um edifício.

Por fim, comercialmente encontra-se ainda o que se denomina por *Sistema Inverter*. Estes produtos trazem uma inovação para os condicionadores de ar convencionais, pois são capazes de atingir a temperatura desejada rapidamente, além de mantê-la praticamente constante. A economia de energia desses aparelhos é de até 40% maior que o convencional. A operação do compressor varia em função da temperatura desejada sendo que a rotação do compressor aumenta gradativamente evitando correntes de partidas. Já a função de secagem de serpentina evita a formação de mofo e de odor. O nível de ruído do aparelho é menor comparando aos aparelhos tradicionais devido ao sistema de operação interno, que habilita o compressor a operar em baixa rotação quando a temperatura fica estabilizada, reduzindo potencialmente o ruído. O aparelho utiliza o gás ecológico R-410A, que não emite CFC, causador de agressões na camada de Ozônio. A figura 2.16 mostra a comparação entre o

funcionamento do aparelho que usa o sistema Inverter com o aparelho Split convencional nos aspectos de temperatura e velocidade do compressor.

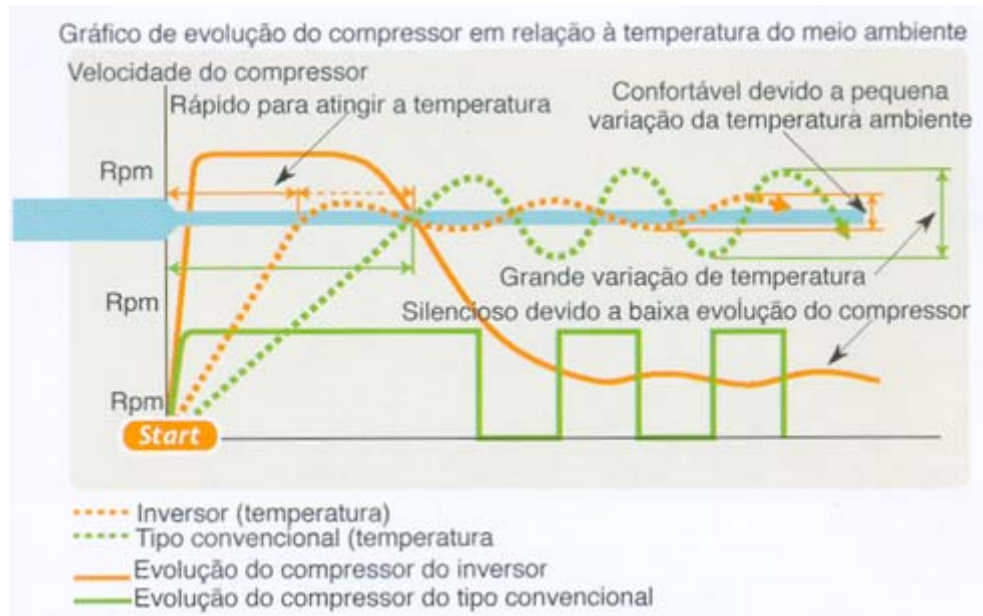


Figura 2.16 - Curvas de comparação entre o sistema inverter com aparelho Split convencional. [Manual da Fujitsu Brasil]

2.6.3. Sistemas Self

Um sistema *Self*, ou *Self-Contained* é um aparelho similar ao aparelho de janela, porém de maior porte, maior capacidade de resfriamento e mais moderno tecnologicamente. Alguns prédios possuem salas dedicadas para a instalação de um *self*, onde, se fosse o caso, poderia ser instalado um *fan-coil*, se o prédio oferecesse ar condicionado central. Existem dois tipos principais de *self*. Os que utilizam água no condensador e os que utilizam ar. A figura 2.17 ilustra uma unidade de um aparelho tipo *Self* utilizado no mercado.



Figura 2.17 - Aparelho condicionador de ar do tipo Self.

2.6.4. Aparelhos individuais ou de janela

São os produtos compactos de menor valor agregado e possuem o evaporador e condensador no mesmo gabinete. Os ventiladores sopram ar sobre os trocadores de calor para melhorar a sua capacidade de dissipar calor (para o ar exterior) e frio (para o ambiente ser resfriado). A figura 2.18 ilustra uma vista e corte de um aparelho condicionador de ar tipo janela, bem como seus elementos.

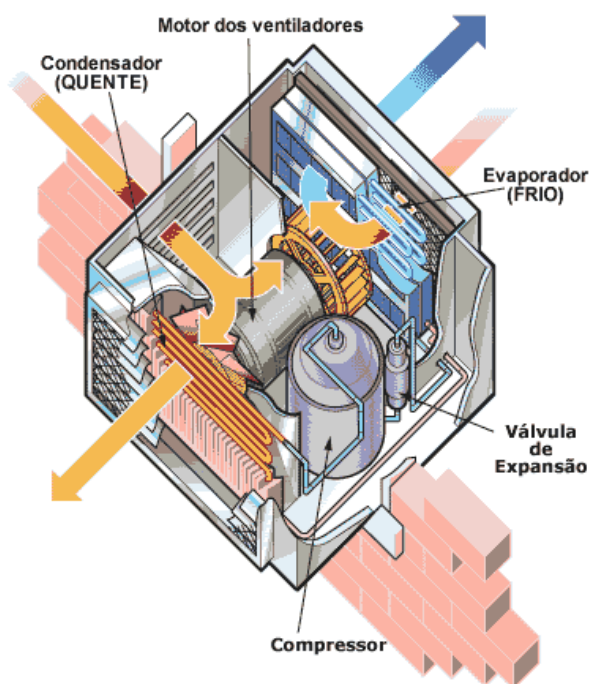


Figura 2.18 – Vista em corte de uma aparelho condicionador de ar tipo janela.

2.7. Considerações finais

Este capítulo, inicialmente, abordou aspectos gerais da refrigeração, caracterizando a sua evolução ao longo do tempo bem como a sua importância crescente na sociedade moderna.

Prosseguindo, fez-se uma descrição do princípio de funcionamento desse tipo de dispositivo de refrigeração, exemplificado através da descrição do ciclo completo de refrigeração de um aparelho condicionador de ar. Na sequência, de maneira a possibilitar o entendimento do funcionamento de dispositivos de refrigeração, foram apresentados os principais componentes elétricos e mecânicos utilizados nestes equipamentos, assim como a função que cada um desempenha dentro de um determinado circuito.

Encerrando o capítulo, foram apresentados os compressores do tipo herméticos atualmente encontrados em aparelhos de refrigeração de pequeno porte, bem como os tipos de sistemas condicionadores de ar mais utilizados em escala residencial, comercial e industrial, destacando as diferenças de funcionamento e também sua aplicação específica.

CAPÍTULO 3

MODELAGEM MATEMÁTICA E COMPUTACIONAL DE UM CONDICIONADOR DE AR TIPO SPLIT

3.1. Considerações iniciais

Este capítulo destina-se a apresentar uma síntese das principais unidades constituintes do equipamento condicionador de ar tipo Split, com destaque às características físicas das partes componentes da evaporadora e condensadora. Uma vez identificadas as suas constituições físicas, baseando em procedimentos clássicos adotados quando da elaboração de modelos elétricos, procede-se aos trabalhos de modelagem matemática visando à representação do produto no simulador básico empregado neste trabalho, a saber, o ATPDraw.

Como ressaltado anteriormente, o principal dispositivo que se faz presente na estrutura física do condicionador de ar Split, no que diz respeito à unidade elétrica, é o compressor hermético. Isto se deve, sobretudo, ao fato que esse componente cabe a função da expansão e compressão do gás refrigerante através de um acionamento proporcionado por um motor de indução monofásico.

A partir das equações dinâmicas que representam o comportamento da máquina referida, estas constituem-se nos fundamentos que norteiam o modelo

computacional, e as ações para implementação do equipamento na plataforma ATP.

3.2. Identificação e características físicas do condicionador de ar Split

Através de consultas em manuais técnicos e visitas a oficinas credenciadas em manutenção de equipamentos de refrigeração, em especial de aparelhos condicionadores de ar, verificou-se uma grande semelhança dos circuitos elétricos utilizados em cada equipamento, independentemente de sua marca. Diferentemente dos aparelhos condicionadores tipo janela, os da categoria Split possuem uma maior diversidade de fabricantes de compressores que atendem esses produtos, muito embora o circuito elétrico principal e equivalente sejam praticamente os mesmos para todas as marcas existentes no mercado.

Na sequência são apresentados detalhes construtivos de um aparelho condicionador do tipo aqui focado e seus principais componentes para posterior modelagem matemática. Vale ressaltar que o produto ora considerado consiste naquele utilizado ao longo de toda a pesquisa. O produto comercial utilizado encontra-se ilustrado na figura 3.1.



(a)



(b)

Figura 3.1 – Condicionador de ar utilizado: (a) Evaporadora e (b) Condensadora.

O equipamento selecionado consiste num condicionador de ar Split com capacidade de refrigeração de 7500 BTU/h.

Analisando as duas partes do equipamento, pode-se reconhecer que os componentes mais importantes e que definem o desempenho operacional do aparelho, como um todo, se apresenta em duas partes: a unidade evaporadora e a condensadora.

No que tange a constituição interna da unidade evaporadora, a figura 3.2 mostra os dispositivos que a compõem. É possível observar que o trocador de calor da evaporadora ocupa uma grande parcela do espaço do equipamento. O sensor de temperatura e a placa eletrônica podem ser também observados.

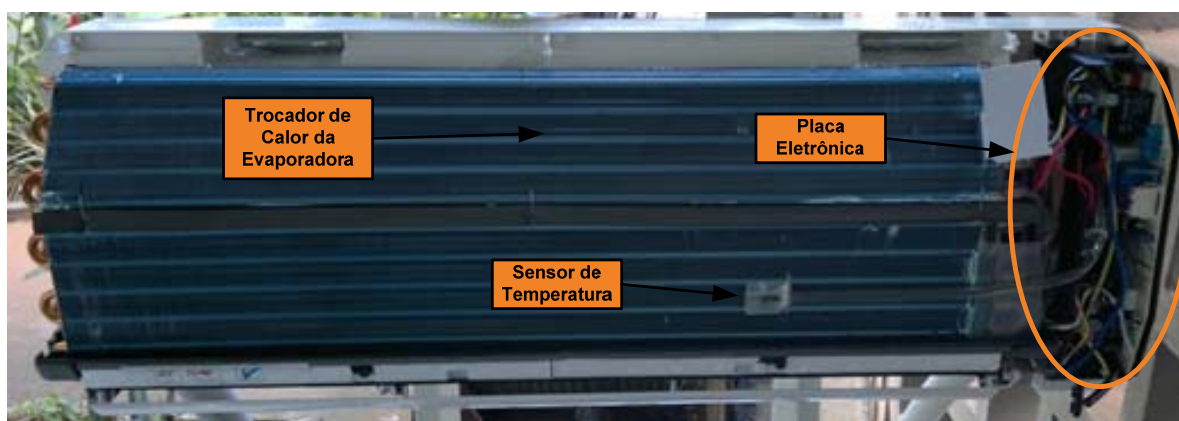


Figura 3.2 - Unidades constituintes da evaporadora.

A figura 3.3 ilustra a condensadora aberta. Fica evidenciada que a estrutura construtiva da mesma compreendem: seu compressor hermético do tipo rotativo, filtro, tubo capilar, capacitor permanente do compressor, motor de indução monofásico do ventilador, capacitor permanente do motor do ventilador, régua de bornes para ligações e o sistema de troca de calor da condensadora.

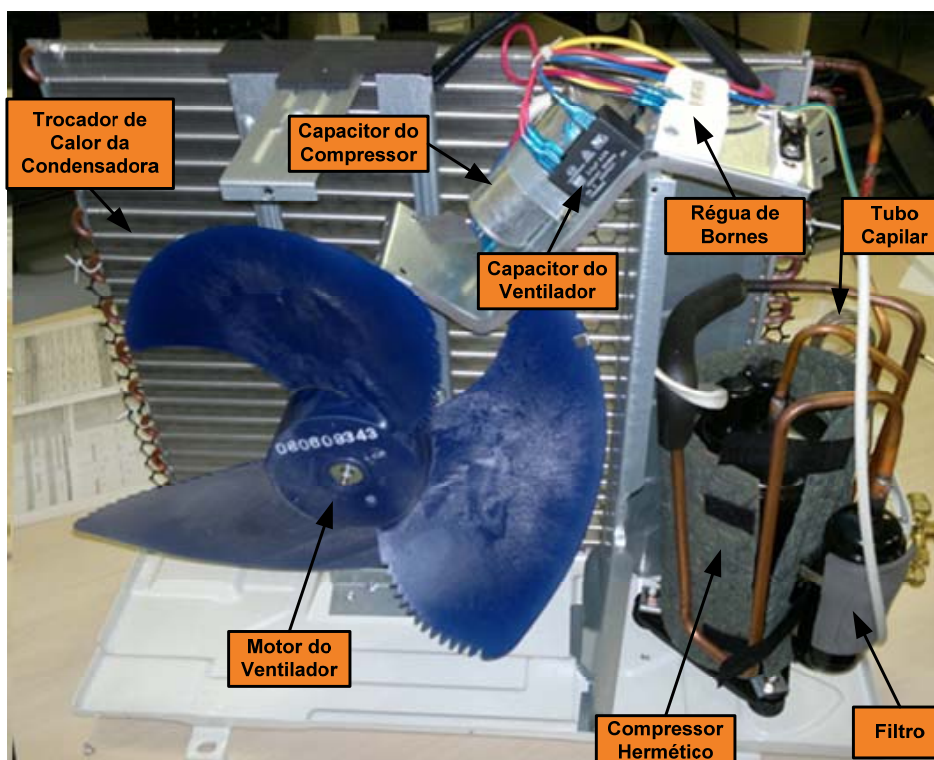


Figura 3.3 – Unidades constituintes da condensadora.

A tabela 3.1 fornece as principais características e dados de placa do condicionador de ar utilizado nos estudos.

Tabela 3.1 – Características do condicionador de ar utilizado nos estudos.

	Evaporadora	Condensadora
Marca	Springer	Springer
Modelo	42RWCA007515LS	38MC007515MS
Potência	26 W	736 W
Tensão	220 V	220 V
Série	Maxiflex	Maxiflex

3.3. Estratégia para modelagem do condicionador de ar tipo Split

As atividades contempladas na sequência encontram-se direcionadas ao processo do estabelecimento dos modelos representativos das duas unidades principais anteriormente identificadas para o produto aqui considerado.

3.3.1. Modelagem da evaporadora

Como já identificado, a evaporadora possui um motor de indução monofásico, que tem o papel de ventilador para o processo de evaporação, o qual permanece ligado todo o tempo que o aparelho se encontra em funcionamento.

Diante dos objetivos principais desta pesquisa, cujo foco está na obtenção da correlação entre os esforços dielétricos e térmicos impactantes sobre o produto e os limites de suportabilidade de suas unidades físicas, fica, pois, esclarecido que, no que se refere a este componente do condicionador de ar, o limite encontra-se atrelado com a placa eletrônica de entrada. De fato, consultas feitas a diversas oficinas credenciadas indicaram que, quando da manifestação de danos elétricos, estes estão vinculada com problemas nesta placa e não no motor da evaporadora, quase que para a totalidade dos casos. Isto orientou para que os trabalhos, nesta fase, viessem a valorizar este componente de entrada para fins da modelagem da unidade em questão. A figura 3.4 ilustra essa placa eletrônica.

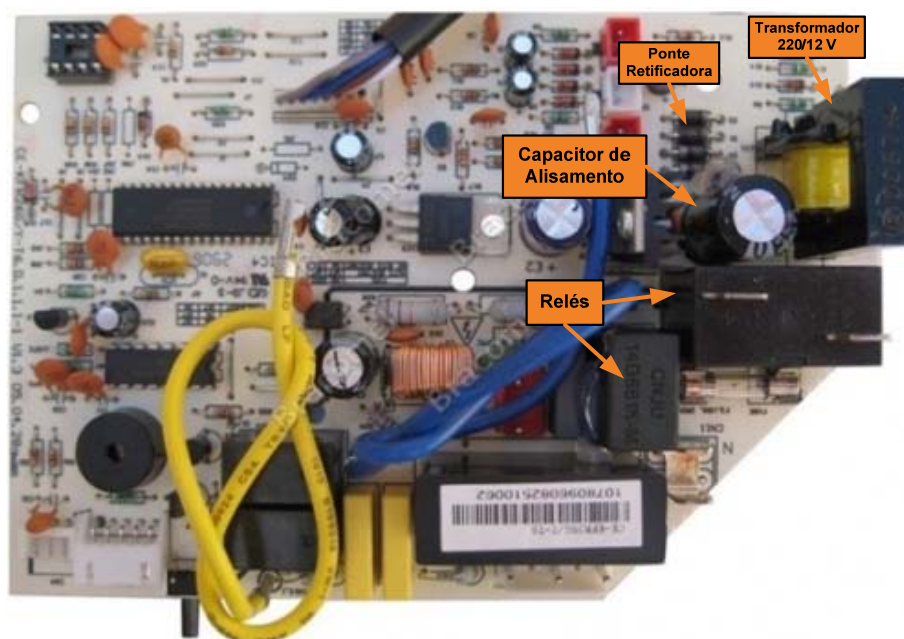


Figura 3.4 – Placa eletrônica da evaporadora.

Um circuito eletrônico permite ligar e desligar o compressor hermético da condensadora via comando para os relés e destina-se ao ajuste da temperatura escolhida pelo usuário. Devido à complexidade do circuito e à falta de maiores informações, adotou-se, para fins desta pesquisa, um circuito equivalente que absorve uma corrente com características semelhantes à corrente medida experimentalmente na entrada da evaporadora.

Para a obtenção de um primeiro conjunto de informações que indicariam a composição estrutural da placa, procedeu-se, inicialmente, a uma simulação experimental do produto sob análise, obtendo-se, na entrada da evaporadora, as formas de onda de tensão e corrente ilustradas na figura 3.5.

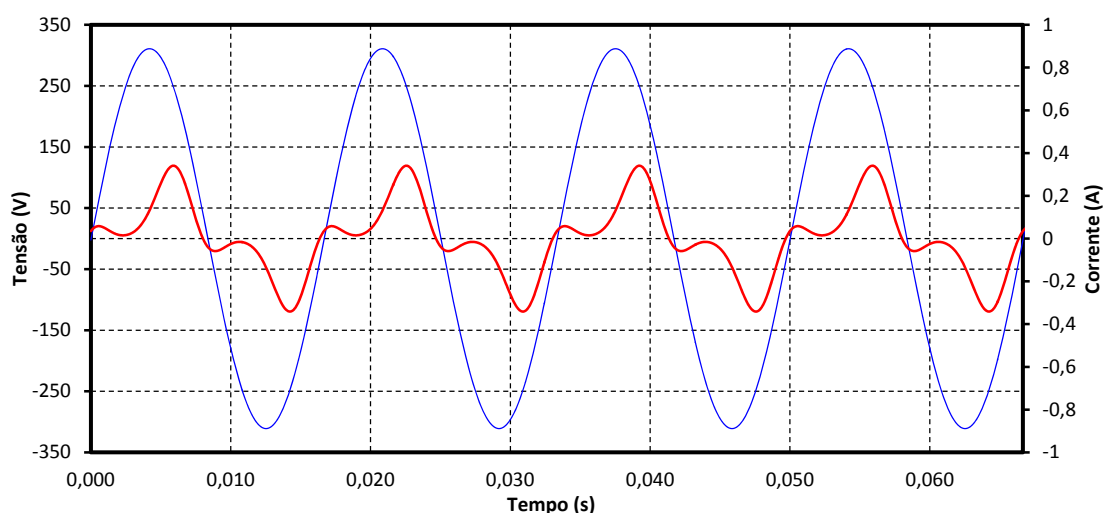


Figura 3.5 - Oscilogramas de tensão (azul) e corrente (vermelho) nos terminais de entrada da placa eletrônica da evaporadora – resultados derivados de ensaios laboratoriais.

A partir de uma inspeção visual da placa eletrônica, e juntamente com os oscilogramas de tensão e corrente medidos, conclui-se que a placa eletrônica pode ser representada por uma ponte retificadora de onda completa a diodos e um capacitor para atenuação do *ripple* de tensão na saída. A carga é representada por uma impedância constante responsável pelo nível da corrente

encontrada na medição. Vale ressaltar que a adoção da impedância constante ocorreu também apoiada no fato que esta parcela de carga é bastante pequena em relação à corrente total requerida pelo equipamento. A título de ilustração, a corrente para a evaporadora atingiu valores de pico da ordem 300 mA, enquanto que a corrente nominal do equipamento é de aproximadamente 3 A (valor eficaz). A corrente apresenta uma característica indutiva pelo fato de o circuito alimentar as bobinas dos relés que comandam a entrada e saída do compressor hermético do sistema de refrigeração. A partir desta identificação fica, pois estabelecida, a estrutura do circuito equivalente, o qual é utilizado para fins da implementação computacional.

A figura 3.6 mostra o circuito adotado e estabelecido no simulador no ATP. A relação de transformação do transformador e o valor da capacitância do capacitor do barramento CC foram idênticos aos valores reais para o equipamento utilizado. O modelo do transformador foi do tipo linear.

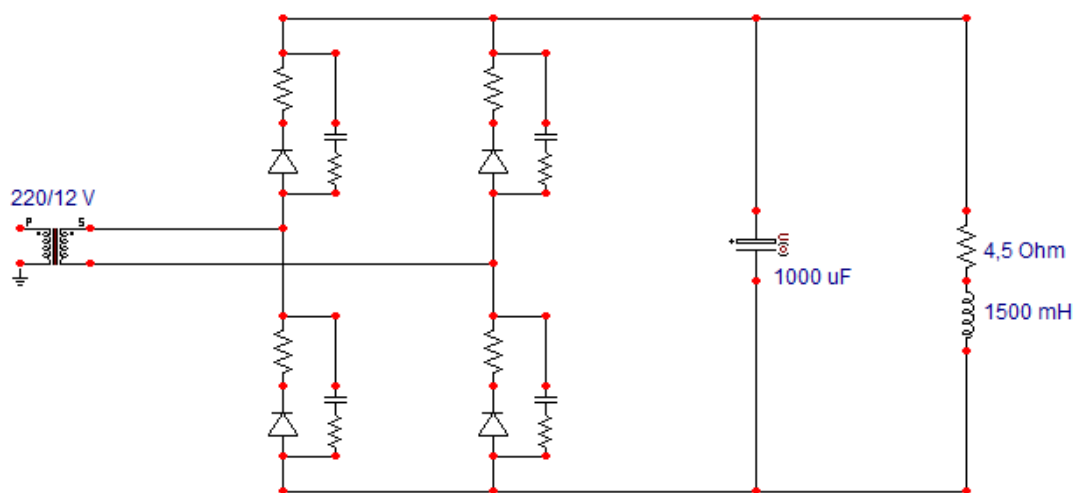


Figura 3.6 – Circuito equivalente da placa eletrônica.

A inserção da representação supra mencionada no ATP gerou o bloco abaixo, o qual passou a representar a presença da unidade evaporadora no citado software. Essa recebeu a designação de EVAPOR., como indicado na figura 3.7.

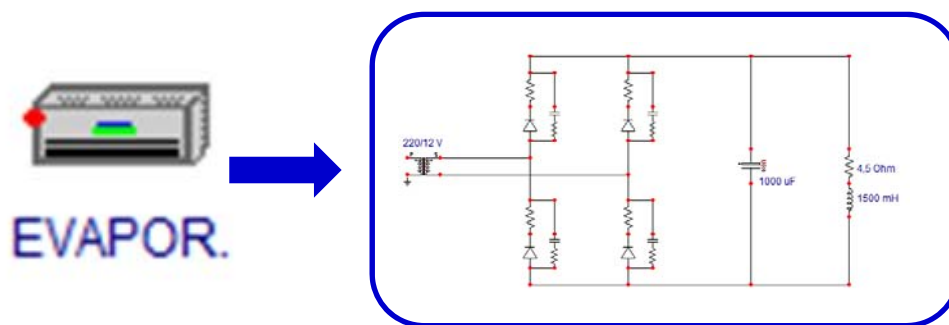


Figura 3.7 – Bloco da evaporadora no simulador ATP.

Reproduzindo, computacionalmente, as mesmas condições operacionais utilizadas para o ensaio laboratorial, nos termos acima referidos, os resultados para o desempenho da modelagem do bloco EVAPOR., advindos dos estudos de simulação no ATP, são apresentados na figura 3.8.

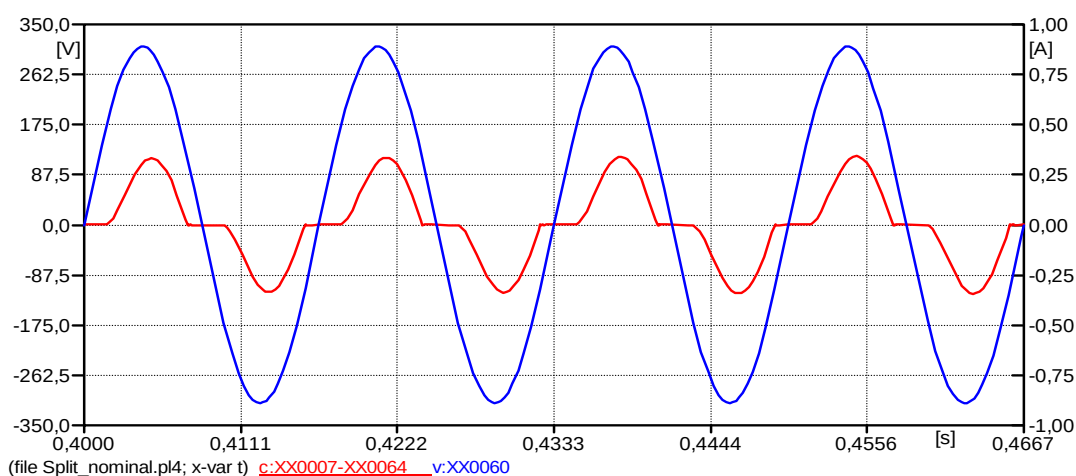


Figura 3.8 - Oscilogramas de tensão e corrente nos terminais de entrada da placa eletrônica da evaporadora – resultados obtidos computacionalmente.

As grandezas relacionadas com as tensões e correntes se mostram bastante consistentes em termos de valores e formas de onda, a não ser pela deformação presente na corrente de alimentação, a qual, certamente, ocorreu pela desconsideração da não-linearidade do transformador.

3.3.2. Identificação do arranjo físico da condensadora

Como reconhecido e destacado anteriormente, no que se refere a importância quanto ao carregamento, o principal componente da condensadora é o seu compressor hermético. Esse é composto por um motor de indução monofásico com rotor em gaiola de esquilo acoplado a uma carga mecânica associada ao processo de expansão e compressão propriamente ditas. Também, em consonância com informações fornecidas por oficinas autorizadas, esse motor, para algumas situações de ocorrências de defeitos, corresponde a unidade normalmente danificada para um condicionador de ar Split. É relevante observar que a condensadora também possui um motor de ventilação, o qual se apresenta com potência muito inferior ao anterior. Por tal motivo este é desconsiderado para fins deste trabalho.

O circuito elétrico utilizado pelo motor em questão é chamado de PSC (*Permanent Split Capacitor*), concepção que utiliza um capacitor permanente em série com o enrolamento auxiliar, energizado durante todo o tempo de atuação deste.

A figura 3.9 ilustra o diagrama físico e os componentes que perfazem o motor utilizado no condicionador de ar em estudo (PSC).

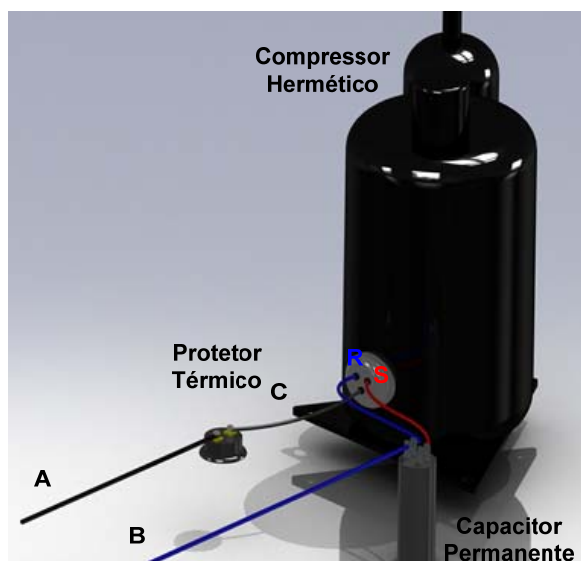


Figura 3.9 - Diagrama físico da estrutura de composição do motor tipo PSC.

Maiores detalhes relativos aos circuitos elétricos e parâmetros equivalentes podem ser encontrados em [15].

A figura 3.10, por outro lado, mostra o arranjo elétrico correspondente ao dispositivo de expansão e compressão, qual seja, do motor de indução e acessórios. Como se vê, além da representação dos enrolamentos do motor, podem ser identificados na ilustração: o capacitor permanente e o protetor térmico (bimetálico), cujas funções foram descritas no Capítulo 2. A nomenclatura dos terminais de conexão do compressor são representadas por:

C (*Common*): conexão de alimentação comum aos dois enrolamentos;

S (*Start*): conexão do capacitor permanente ao enrolamento auxiliar;

R (*Run*): conexão da alimentação ao enrolamento principal.

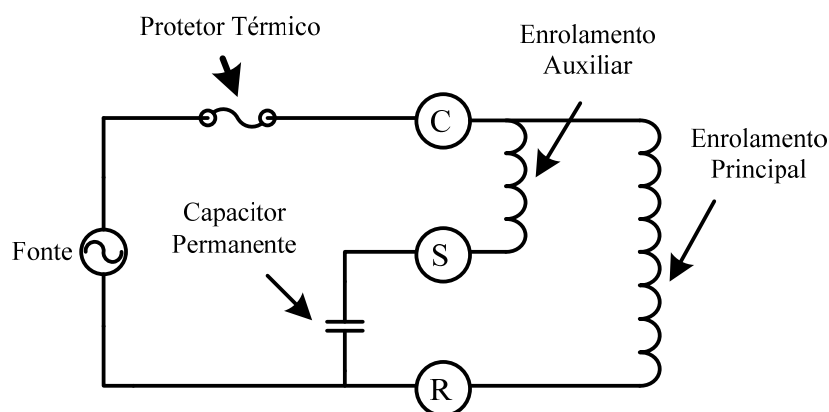


Figura 3.10 - Esquema elétrico simplificado do aparelho condicionador de ar.

A tabela 3.2 fornece as principais características do compressor hermético associado com o equipamento selecionado para os estudos [16].

Tabela 3.2 - Principais características do compressor do condicionador de ar Split.

Dados do Compressor Hermético	
Fabricante	TOSHIBA
Modelo	PH108X1C-3DZDU3
Tipo do Compressor	Rotativo
Tipo do Motor Utilizado	PSC
Capacidade de Refrigeração (Btu/h)	7626
Potência (W)	710
Tensão de Operação (V)	220
Corrente (A)	3,88

Devido à complexidade e importância da modelagem representativa do compressor hermético, este assunto é tratado a seguir, em seção específica.

3.4. Modelagem matemática do motor monofásico PSC

Modelar um motor considerando-se as técnicas no domínio do tempo significa representar o funcionamento da máquina através das equações diferenciais, de forma que os diversos fenômenos eletromagnéticos possam ser reproduzidos matematicamente. Também, a solução deste conjunto de expressões conduz ao comportamento das grandezas eletromecânicas do dispositivo em função do tempo. Assim procedendo, torna-se factível a realização de estudos que conduzam a uma identificação e caracterização dos fenômenos elétricos atrelados com condições normais e sob a ação de um suprimento contendo distúrbios [15].

O modelo matemático é desenvolvido com base nas equações dos enlaces de fluxo e na equação de equilíbrio dos conjugados. As equações são escritas para uma máquina bifásica assimétrica, resultando em um conjunto de equações diferenciais, não lineares, que representam a operação da máquina. Para tal, foi utilizado o modelo elementar de uma máquina de indução ideal, bifásica, assimétrica, 2 pólos, [17 - 20] constituída por dois enrolamentos estatóricos, defasados de 90° no espaço, com características diferentes. O rotor em gaiola é representado por dois enrolamentos idênticos, também defasados de 90° no espaço. Na figura 3.11 encontra-se ilustrada esquematicamente a representação do dispositivo, com seus respectivos enrolamentos e defasagens.

No desenvolvimento da modelagem matemática do motor bifásico são consideradas as simplificações adotadas em [21], quais sejam:

- Os enrolamentos do estator são distribuídos de maneira a produzir uma onda de força magneto motriz (fmm) senoidal no espaço;

- Os enrolamentos do rotor ou barras, são dispostos de maneira que, para qualquer tempo fixado, as ondas de fmm do rotor possam ser consideradas como senoidais no espaço, tendo o mesmo número de pólos que suas correspondentes ondas de fmm no estator;
- O entreferro é uniforme;
- O circuito magnético é linear.

As equações que descrevem o comportamento de uma máquina bifásica assimétrica podem ser estabelecidas considerando-se a máquina elementar de dois pólos mostrada na figura 3.11. Nessa figura, a fase *a* representa o enrolamento principal ou de regime (marcha), e a fase *b* o enrolamento auxiliar ou de partida. O rotor, em gaiola de esquilo, é representado por dois enrolamentos idênticos, conforme mencionado, defasados de 90°, representados pelas letras *A* e *B*, para os enrolamentos *A* e *B*, respectivamente. Os enrolamentos *a* do estator e *A* do rotor estão defasados de θ_e graus elétricos. A posição mecânica do rotor e a sua velocidade são representadas por θ_r e w_r , respectivamente. A direção positiva do ângulo θ_e gira em direção oposta a rotação do rotor. Ainda na figura 3.11, o símbolo (•) representa um enrolamento imaginário saindo do plano da figura, e o símbolo (x) representa um enrolamento imaginário penetrando no plano da figura.

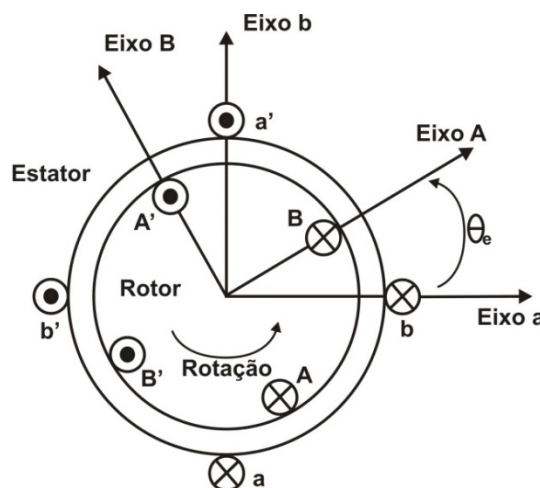


Figura 3.11 - Representação do motor de indução bifásico assimétrico.

Tendo sido assumido que cada enrolamento é distribuído de maneira a produzir uma onda de fmm senoidal, é conveniente representar, para fins do desenvolvimento do modelo, cada enrolamento por um enrolamento monofásico equivalente, conforme mostrado na figura 3.12.

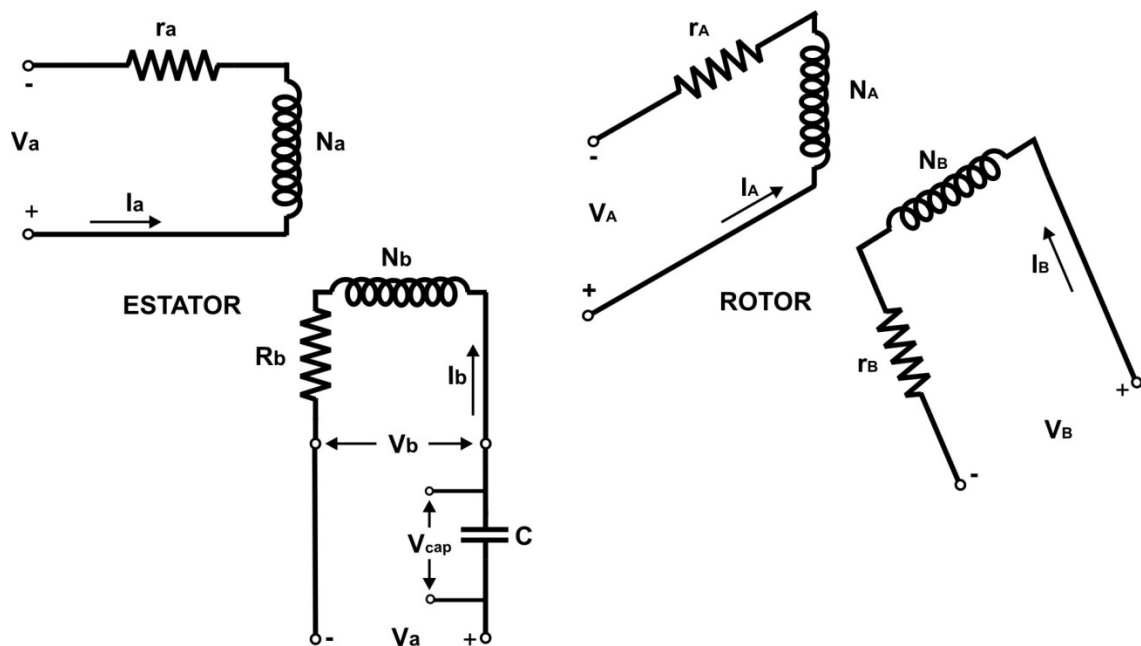


Figura 3.12 - Representação dos circuitos equivalentes dos enrolamentos monofásicos do motor PSC.

A seguir são apresentados os símbolos utilizados no presente trabalho:

r_a - resistência do enrolamento principal do estator, fase a;

r_b - resistência do enrolamento auxiliar do estator, fase b;

r_A - resistência rotórica, fase A;

r_B - resistência rotórica, fase B;

N_a - número de espiras do enrolamento principal;

N_b - número de espiras do enrolamento auxiliar;

p - número de pólos do motor;

l_{aa} - indutância própria do enrolamento principal do estator;

l_{bb} - indutância própria do enrolamento auxiliar do estator;

- l_{AA} - indutância própria do enrolamento do rotor;
- l_{BB} - indutância própria do enrolamento do rotor;
- l_{AB} - indutância mútua dos enrolamentos do rotor;
- l_{BA} - indutância mútua dos enrolamentos do rotor;
- l_{ab} - indutância mútua dos enrolamentos principal e auxiliar do estator;
- l_{ba} - indutância mútua dos enrolamentos principal e auxiliar do estator;
- l_{aA} - indutância mútua dos enrolamentos principal e rotor;
- l_{aB} - indutância mútua dos enrolamentos principal e rotor;
- l_{bA} - indutância mútua dos enrolamentos auxiliar e rotor;
- l_{bB} - indutância mútua dos enrolamentos auxiliar e rotor;
- l_{Aa} - indutância mútua dos enrolamentos do rotor e principal;
- l_{Ab} - indutância mútua dos enrolamentos do rotor e auxiliar;
- l_{Ba} - indutância mútua dos enrolamentos do rotor e principal;
- l_{Bb} - indutância mútua dos enrolamentos do rotor e principal;
- v_a - valor instantâneo de tensão na fase a , do enrolamento principal;
- v_b - valor instantâneo de tensão na fase b , do enrolamento auxiliar;
- v_A - valor instantâneo de tensão na fase A , do rotor;
- v_B - valor instantâneo de tensão na fase B , do rotor;
- i_a - valor instantâneo da corrente na fase a , do enrolamento principal;
- i_b - valor instantâneo da corrente na fase b , do enrolamento auxiliar;
- i_A - valor instantâneo da corrente na fase A , do rotor;
- i_B - valor instantâneo da corrente na fase B , do rotor;
- λ_a - fluxo concatenado na fase a , do enrolamento principal;
- λ_b - fluxo concatenado na fase b , do enrolamento auxiliar;
- λ_A - fluxo concatenado na fase A , do rotor;
- λ_B - fluxo concatenado na fase B , do rotor;

θ - deslocamento elétrico angular;

T - conjugado eletromagnético;

T_c - conjugado da carga;

J - momento de inércia da carga + inércia do motor;

J_c - momento de inércia da carga;

J_m - momento de inércia do motor;

B - Coeficiente de atrito viscoso;

Ω - velocidade angular.

Do ponto de vista magnético, todas as máquinas elétricas têm como princípio de funcionamento a tendência de alinhamento entre dois campos magnéticos, produzidos pelo estator e rotor, o que permite a contínua conversão eletromecânica de energia. Desta forma, a seguir, são apresentados e equacionados os fenômenos que fornecem o conjugado entre esses dois campos magnéticos, mostrando as condições básicas necessárias ao funcionamento do dispositivo.

- **Tensões no Estator**

Do circuito da máquina, ilustrado na figura 3.12, podem ser obtidas as equações de tensão para o estator e rotor utilizadas para determinar as equações que descrevem o comportamento da máquina [20, 21]. Desta forma, para os enrolamentos do estator, obtém-se:

$$v_a = r_a i_a + \frac{d\lambda_a}{dt} \quad (3.1)$$

$$v_b = r_b i_b + \frac{d\lambda_b}{dt} \quad (3.2)$$

Onde:

v_i - valores instantâneos da tensão na fase i .

λ_i - fluxo concatenado na fase i .

i - assume índices a e b .

• Tensões no Rotor

Para o caso dos enrolamentos do rotor, visto que os mesmos se encontram curto-circuitados, as expressões são do tipo:

$$v_A = 0 = r_A i_A + \frac{d\lambda_A}{dt} \quad (3.3)$$

$$v_B = 0 = r_B i_B + \frac{d\lambda_B}{dt} \quad (3.4)$$

Onde o subscritos A e B referem-se aos enrolamentos monofásicos equivalentes do rotor A e B , respectivamente.

• Tensão no Capacitor

Da teoria de circuitos, sabe-se que a corrente através do capacitor permanente é dada pela equação:

$$i_b = C \frac{dv_{cap}}{dt} \quad (3.5)$$

Que pode ser reescrita na forma:

$$\frac{dv_{cap}}{dt} - \frac{1}{C} i_b = 0 \quad (3.6)$$

Desta forma, reportando-se à figura 3.12, a Equação 3.2, do ramo do enrolamento auxiliar, é reescrita considerando-se um capacitor permanente, em série com o enrolamento auxiliar, resultando na seguinte equação:

$$v = v_{cap} + v_b = v_a \quad (3.7)$$

O valor instantâneo do conjugado eletromagnético, T , pode ser obtido de duas maneiras. Uma através da variação da energia no sistema em relação aos deslocamentos angulares do rotor, supondo os fluxos concatenados constantes. A outra, utilizando-se da variação da co-energia magnética em relação aos deslocamentos angulares do rotor, supondo as correntes constantes. A segunda alternativa é mais atrativa, uma vez que o seu desenvolvimento é menos complexo. Desta forma, determinando-se a equação da co-energia do circuito e utilizando a Equação (3.5), obter-se-á a expressão do conjugado eletromagnético, dada pela Equação (3.9):

$$T = \frac{\partial W'_m}{\partial \theta_{mec}} \quad (3.8)$$

$$T = \frac{p}{2} \sum_i \sum_j i_i i_j \frac{dl_{ij}}{d\theta} \quad (3.9)$$

Onde:

p - é o número de pólos da máquina;

i_i e i_j - são as correntes nos enrolamentos i_i e i_j , respectivamente, com i e j assumindo os índices a, b, A, B ;

l_{ij} - é a indutância entre os enrolamentos i e j ;

θ - é o deslocamento angular elétrico.

A seguir procede-se ao equacionamento dos fluxos concatenados do estator e rotor, observando-se que o fluxo total que enlaça cada um deles é obtido através do somatório das parcelas de fluxo magnético produzido pela corrente no próprio enrolamento e pelos acoplamentos mútuos com os outros enrolamentos do rotor e estator.

- **Determinação dos Fluxos**

As equações dos fluxos concatenados podem ser determinadas pelos efeitos na forma de indutâncias mútuas e próprias, cuja expressão genérica assume a forma a seguir:

$$\lambda_i = l_{ii}i_i + \sum l_{ij}i_j \quad (3.10)$$

Assim, para o dispositivo em estudo, fazendo os subscritos i e j assumirem a e b do estator e A e B do rotor, obtêm-se, para as equações dos fluxos, as seguintes relações:

$$\lambda_a = l_{aa}i_a + l_{aA}i_A + l_{aB}i_B \quad (3.11)$$

$$\lambda_b = l_{bb}i_b + l_{bA}i_A + l_{bB}i_B \quad (3.12)$$

$$\lambda_A = l_{AA}i_A + l_{Aa}i_a + l_{Ab}i_b \quad (3.13)$$

$$\lambda_B = l_{BB}i_B + l_{Ba}i_a + l_{Bb}i_b \quad (3.14)$$

Nessas, os termos l_{ii} e l_{ij} referem-se às indutâncias próprias da fase i e mútua da fase j referida a fase i , respectivamente.

- **Determinação das Indutâncias**

As indutâncias próprias e mútuas entre dois enrolamentos i e j , genéricos, são dadas pela expressão:

$$l_{ij} = L_{ij} \cos \theta_e = l_{ji} \quad (3.15)$$

Onde o termo L_{ij} representa o valor de indutância máxima entre os enrolamentos i e j .

- **Indutâncias Próprias:**

Para o dispositivo em estudo, as Equações 3.16 a 3.19 representam as indutâncias próprias dos enrolamentos rotóricos e estatóricos. Como os enrolamentos do rotor foram assumidos idênticos, ambos têm o mesmo valor de indutância própria.

$$l_{aa} = L_{aa} \cos 0^\circ = L_{aa} \quad (3.16)$$

$$l_{bb} = L_{bb} \cos 0^\circ = L_{bb} \quad (3.17)$$

$$l_{AA} = L_{AA} \cos 0^\circ = L_{AA} \quad (3.18)$$

$$l_{BB} = L_{BB} \cos 0^\circ = L_{BB} \quad (3.19)$$

- **Indutâncias Mútuas**

Da forma análoga, as Equações de 3.20 a 3.25 permitem obterem-se as indutâncias mútuas, sendo, portanto, iguais a:

$$l_{aA} = L_{aA} \cos \theta_e = l_{Aa} \quad (3.20)$$

$$l_{aB} = L_{aB} \cos(\theta_e - 90^0) = L_{aB} \sin \theta_e = l_{Ba} \quad (3.21)$$

$$l_{bA} = L_{bA} \cos(\theta_e + 90^0) = -L_{bA} \sin \theta_e = l_{Ab} \quad (3.22)$$

$$l_{bB} = L_{bB} \cos(\theta_e) = l_{Bb} \quad (3.23)$$

$$l_{ab} = L_{ab} \cos 90^0 = l_{ba} = 0 \quad (3.24)$$

$$l_{AB} = L_{AB} \cos 90^0 = l_{BA} = 0 \quad (3.25)$$

Substituindo as expressões das indutâncias, próprias e mútuas, das Equações 3.16 a 3.25, nas Expressões 3.11 a 3.14, obtém-se:

$$\lambda_a = L_{aa} i_a + L_{aA} \cos \theta_e i_A + L_{aB} \sin(\theta_e) i_B \quad (3.26)$$

$$\lambda_b = L_{bb} i_b - L_{bA} \sin \theta_e i_A + L_{bB} \cos \theta_e i_B \quad (3.27)$$

$$\lambda_A = L_{AA} i_A + L_{aA} \cos \theta_e i_a - L_{bA} \sin \theta_e i_b \quad (3.28)$$

$$\lambda_B = L_{BB} i_B + L_{aB} \sin \theta_e i_a + L_{bB} \cos \theta_e i_b \quad (3.29)$$

Devido à natureza funcional do motor, os acoplamentos mútuos entre enrolamentos com defasagem diferente de 90^0 elétricos, são dependentes do ângulo entre os respectivos enrolamentos. Isto implica que, com o rotor em movimento, as indutâncias entre os enrolamentos variam com o tempo, fato este representado nas equações pelo ângulo elétrico (θ_e) . Desta forma, a relação

entre o ângulo elétrico (θ_e) e o ângulo mecânico (θ_{mec}) é dada pela seguinte expressão:

$$\theta_e = \frac{p}{2} \theta_{mec} = \frac{p}{2} \theta \quad (3.30)$$

Onde p é o número de pólos.

Substituindo-se a Expressão 3.30 nas Equações 3.26 a 3.29, obtém-se:

$$\lambda_a = L_{aa} i_a + L_{aA} \cos\left(\frac{p}{2} \theta\right) i_A + L_{aB} \sin\left(\frac{p}{2} \theta\right) i_B \quad (3.31)$$

$$\lambda_b = L_{bb} i_b - L_{bA} \sin\left(\frac{p}{2} \theta\right) i_A + L_{bB} \cos\left(\frac{p}{2} \theta\right) i_B \quad (3.32)$$

$$\lambda_A = L_{AA} i_A + L_{aA} \cos\left(\frac{p}{2} \theta\right) i_a - L_{bA} \sin\left(\frac{p}{2} \theta\right) i_b \quad (3.33)$$

$$\lambda_B = L_{BB} i_B + L_{aB} \sin\left(\frac{p}{2} \theta\right) i_a + L_{bB} \cos\left(\frac{p}{2} \theta\right) i_b \quad (3.34)$$

Partindo das Expressões 3.31 a 3.34, que permitem a determinação dos fluxos existentes no dispositivo, obtêm-se as equações dinâmicas da máquina, conforme a seguir.

$$\begin{bmatrix} \dot{\lambda} \end{bmatrix} = [1] \begin{bmatrix} \dot{i} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \dot{i} \end{bmatrix} [1] \quad (3.35)$$

Para o enlace de fluxo λ_a no enrolamento principal do estator, a partir da Expressão 3.31, obtém-se:

$$\dot{\lambda}_a = L_{aa} \dot{i}_a + L_{aA} \cos\left(\frac{p}{2}\theta\right) \dot{i}_A - L_{aA} \frac{p}{2} \sin\left(\frac{p}{2}\theta\right) \dot{\theta} + L_{aB} \sin\left(\frac{p}{2}\theta\right) \dot{i}_B + L_{aB} \frac{p}{2} \cos\left(\frac{p}{2}\theta\right) \dot{\theta} \quad (3.36)$$

Analogamente obtêm-se para λ_b , λ_A , λ_B , a partir das Expressões 3.32 a 3.34, as Expressões 3.37 a 3.39, respectivamente.

$$\dot{\lambda}_b = L_{bb} \dot{i}_b - L_{bA} \sin\left(\frac{p}{2}\theta\right) \dot{i}_A - L_{bA} \frac{p}{2} \cos\left(\frac{p}{2}\theta\right) \dot{\theta} + L_{bB} \cos\left(\frac{p}{2}\theta\right) \dot{i}_B - L_{bB} \frac{p}{2} \sin\left(\frac{p}{2}\theta\right) \dot{\theta} \quad (3.37)$$

$$\dot{\lambda}_A = L_{AA} \dot{i}_A + L_{aA} \cos\left(\frac{p}{2}\theta\right) \dot{i}_a - L_{aA} \frac{p}{2} \sin\left(\frac{p}{2}\theta\right) \dot{\theta} - L_{bA} \sin\left(\frac{p}{2}\theta\right) \dot{i}_b - L_{bA} \cos\left(\frac{p}{2}\theta\right) \frac{p}{2} \dot{\theta} \quad (3.38)$$

$$\dot{\lambda}_B = L_{BB} \dot{i}_B + L_{aB} \sin\left(\frac{p}{2}\theta\right) \dot{i}_a + L_{aB} \frac{p}{2} \cos\left(\frac{p}{2}\theta\right) \dot{\theta} + L_{bB} \cos\left(\frac{p}{2}\theta\right) \dot{i}_b - L_{bB} \frac{p}{2} \sin\left(\frac{p}{2}\theta\right) \dot{\theta} \quad (3.39)$$

Fazendo uso das expressões que fornecem as derivadas dos fluxos concatenados, Equações 3.36 a 3.39, e reescrevendo-se as expressões para as tensões nos enrolamentos, Equações 3.1 a 3.4 na forma matricial, obtêm-se um conjunto de expressões da forma a seguir. Salienta-se que, doravante, o símbolo “•” existente sobre alguma variável, representa o operador d/dt .

$$[V] = [R][I] + \left[\dot{\lambda} \right] \quad (3.40)$$

Deste modo, as expressões de tensões para os enrolamentos do estator e do rotor da máquina ficam:

$$v_a = r_a i_a + L_{aa} \dot{i}_a + L_{aA} \cos\left(\frac{p}{2}\theta\right) \dot{i}_A - L_{aA} \frac{p}{2} \sin\left(\frac{p}{2}\theta\right) \dot{\theta} + L_{aB} \sin\left(\frac{p}{2}\theta\right) \dot{i}_B + L_{aB} \frac{p}{2} \cos\left(\frac{p}{2}\theta\right) \dot{\theta} \quad (3.41)$$

$$v_b = r_b i_b + L_{bb} \dot{i}_b - L_{bA} \sin\left(\frac{p}{2}\theta\right) \dot{i}_A - L_{bA} \frac{p}{2} \cos\left(\frac{p}{2}\theta\right) \dot{\theta} + L_{bB} \cos\left(\frac{p}{2}\theta\right) \dot{i}_B - L_{bB} \frac{p}{2} \sin\left(\frac{p}{2}\theta\right) \dot{\theta} \quad (3.42)$$

$$v_A = 0 = r_A i_A + L_{AA} \dot{i}_A + L_{aA} \cos\left(\frac{p}{2}\theta\right) \dot{i}_a - L_{aA} \frac{p}{2} \sin\left(\frac{p}{2}\theta\right) \dot{\theta} - L_{bA} \sin\left(\frac{p}{2}\theta\right) \dot{i}_b - L_{bA} \cos\left(\frac{p}{2}\theta\right) \frac{p}{2} \dot{\theta} \quad (3.43)$$

$$v_B = 0 = r_B i_B + L_{BB} \dot{i}_B + L_{aB} \sin\left(\frac{p}{2}\theta\right) \dot{i}_a + L_{aB} \frac{p}{2} \cos\left(\frac{p}{2}\theta\right) \dot{\theta} + L_{bB} \cos\left(\frac{p}{2}\theta\right) \dot{i}_b - L_{bB} \frac{p}{2} \sin\left(\frac{p}{2}\theta\right) \dot{\theta} \quad (3.44)$$

• Equação da Co-energia

Conforme já mencionado, a co-energia magnética do sistema será utilizada na determinação da expressão para o cálculo do conjugado eletromagnético. Assim, a co-energia do sistema é obtida pela somatória das contribuições das co-energias de cada enrolamento, ou seja:

$$W'' = W'_a + W'_b + W'_A + W'_B \quad (3.45)$$

Em que:

$$W'_a = \int_0^{i_a} \lambda_a di_a; \quad W'_b = \int_0^{i_b} \lambda_b di_b; \quad W'_A = \int_0^{i_A} \lambda_A di_A \quad \text{e} \quad W'_B = \int_0^{i_B} \lambda_B di_B \quad (3.46)$$

Ou considerando todas as contribuições:

$$W'' = \int_0^{i_a} \lambda_a di_a + \int_0^{i_b} \lambda_b di_b + \int_0^{i_A} \lambda_A di_A + \int_0^{i_B} \lambda_B di_B \quad (3.47)$$

Substituindo-se os fluxos da relação anterior pelas expressões em função das correntes e resolvendo-se as integrais, a expressão final da co-energia fica na forma seguinte:

$$\begin{aligned} W' = & L_{aa} \frac{i_a^2}{2} + L_{aA} \cos\left(\frac{p}{2}\theta\right) i_A i_a + L_{aB} \sin\left(\frac{p}{2}\theta\right) i_B i_a + \\ & + L_{bb} \frac{i_b^2}{2} - L_{bA} \sin\left(\frac{p}{2}\theta\right) i_A i_b + L_{bB} \cos\left(\frac{p}{2}\theta\right) i_B i_b + L_{AA} \frac{i_A^2}{2} + L_{BB} \frac{i_B^2}{2} \end{aligned} \quad (3.48)$$

- **Determinação do Conjugado Eletromagnético**

O conjugado eletromagnético é dado pela derivada da co-energia em relação ao deslocamento angular. Assim, partindo da Equação 3.48 e encontrando sua derivada em relação ao deslocamento angular, obtém-se a expressão do conjugado eletromagnético, (T) , que assume a seguinte forma:

$$T = -\left(\frac{p}{2}\right)\left[L_{aA} \sin\left(\frac{p}{2}\theta\right)i_A + L_{aB} \cos\left(\frac{p}{2}\theta\right)i_B\right]i_a + \left(\frac{p}{2}\right)\left[L_{bA} \cos\left(\frac{p}{2}\theta\right)i_A - L_{bB} \sin\left(\frac{p}{2}\theta\right)i_B\right]i_b \quad (3.49)$$

- **Determinação do Conjugado da Carga**

Adicionalmente às equações elétricas e de conjugado, é necessário obter as demais expressões matemáticas que definem o comportamento dinâmico do motor.

A partir do conjugado eletromagnético e considerando-se as perdas do modelo real, é obtido o conjugado de carga pela expressão:

$$T = T_C + J \frac{d\omega_r}{dt} + B\omega_r \quad (3.50)$$

Onde: $J = J_m + J_c$

J_m - Momento de inércia do motor – $[\text{kg.m}^2]$;

J_c - Momento de inércia da carga – $[\text{kg.m}^2]$;

ω_r - Velocidade angular do rotor em relação ao estator– $[\text{rad/s}]$;

B - Coeficiente de atrito viscoso da carga.

A velocidade angular e a aceleração angular do rotor da máquina são dadas pela Expressão 3.51 e 3.52, respectivamente:

$$\omega_r = \frac{d\theta}{dt} \quad (3.51)$$

$$\dot{\omega}_r = \frac{d^2\theta}{dt^2} \quad (3.52)$$

Substituindo as Expressão 3.51 e 3.52 na Equação 3.50, obtêm-se:

$$T = T_C + J \frac{d}{dt} \left(\frac{d\theta}{dt} \right) + B \frac{d\theta}{dt} \quad \text{ou} \quad T = T_C + J \frac{d^2\theta}{dt^2} + B \frac{d\theta}{dt} \quad (3.53)$$

Reescrevendo a Expressão 3.53 de maneira a explicitar o conjugado da carga, chega-se a seguinte equação:

$$T_C = T - J \dot{\omega} + B \omega \quad (3.54)$$

O resultado do equacionamento matemático acima é o conjunto de Equações, 3.55 a 3.59, que determinam o comportamento do motor de indução monofásico [22, 23]:

$$v = r_a i_a + L_{aa} \dot{i}_a + L_{aA} \cos\left(\frac{p}{2}\theta\right) \dot{i}_A - L_{aA} \frac{p}{2} \sin\left(\frac{p}{2}\theta\right) i_A \omega + L_{aB} \sin\left(\frac{p}{2}\theta\right) \dot{i}_B + L_{aB} \frac{p}{2} \cos\left(\frac{p}{2}\theta\right) i_B \omega \quad (3.55)$$

$$v = r_b i_b + L_{bb} \dot{i}_b - L_{bA} \sin\left(\frac{p}{2}\theta\right) \dot{i}_A - L_{bA} \frac{p}{2} \cos\left(\frac{p}{2}\theta\right) i_A \omega + L_{bB} \cos\left(\frac{p}{2}\theta\right) \dot{i}_B - L_{bB} \frac{p}{2} \sin\left(\frac{p}{2}\theta\right) i_B \omega \quad (3.56)$$

$$0 = r_A i_A + L_{AA} \dot{i}_A + L_{aA} \cos\left(\frac{p}{2}\theta\right) \dot{i}_a - L_{aA} \frac{p}{2} \sin\left(\frac{p}{2}\theta\right) i_a \omega - L_{bA} \sin\left(\frac{p}{2}\theta\right) \dot{i}_b - L_{bA} \cos\left(\frac{p}{2}\theta\right) \frac{p}{2} i_b \omega \quad (3.57)$$

$$0 = r_B i_B + L_{BB} \dot{i}_B + L_{aB} \sin\left(\frac{p}{2}\theta\right) \dot{i}_a + L_{aB} \frac{p}{2} \cos\left(\frac{p}{2}\theta\right) i_a \omega + L_{bB} \cos\left(\frac{p}{2}\theta\right) \dot{i}_b - L_{bB} \frac{p}{2} \sin\left(\frac{p}{2}\theta\right) i_b \omega \quad (3.58)$$

$$T_C = -\left(\frac{p}{2}\right) \left[L_{aA} \sin\left(\frac{p}{2}\theta\right) \dot{i}_A + L_{aB} \cos\left(\frac{p}{2}\theta\right) \dot{i}_B \right] i_a + \left(\frac{p}{2}\right) \left[L_{bA} \cos\left(\frac{p}{2}\theta\right) \dot{i}_A - L_{bB} \sin\left(\frac{p}{2}\theta\right) \dot{i}_B \right] i_b - J \dot{\omega} - B \omega \quad (3.59)$$

3.5. Implementação computacional da condensadora no simulador ATP

Uma vez obtidos os modelos físicos e matemáticos da unidade condensadora, do mesmo modo como procedido para a evaporadora, nesta etapa dos trabalhos são descritas as atividades relacionadas com a inserção deste componente do condicionador de ar no simulador ATP, com auxílio da rotina *MODELS*. Essa rotina, como conhecido, constituiu-se na ferramenta disponibilizada pelo software em pauta, quando as representações a serem consideradas são realizadas através de modelos matemáticos [24].

Os dados de entrada requeridos para simulação, que dizem respeito às características do compressor hermético em questão, são divididos em duas partes:

- “Parâmetros do motor”: para a definição dos dados elétricos do circuito equivalente do motor de indução monofásico tipo PSC;
- “Parâmetros da carga”: relacionados ao compressor acoplado diretamente e hermeticamente ao eixo do motor acima referido.

Na sequência é mostrada parte do código fonte desenvolvido através da *MODELS* e destinada a caracterizar as variáveis de entrada requeridas como acima posto.

```
-----
----- parâmetros do motor -----
-----
Pnom  {dflt:0.95}      -- potência nominal do motor, [cv];
rsa   {dflt:1.9}      -- resist. enrolamento principal do estator, [Ohm];
xsa   {dflt:8.3}      -- reat. enrolamento principal do estator, [Ohm];
rsb   {dflt:9}        -- resist. enrolamento auxiliar do estator, [Ohm];
xsb   {dflt:2.58}     -- reat. enrolamento auxiliar do estator, [Ohm];
rr    {dflt:3.9}      -- resistência do rotor, por fase, [Ohm];
xr    {dflt:4.3}      -- reatância do rotor, por fase, [Ohm];
xm    {dflt:82}       -- reatância de magnetização, [Ohms];
jmc   {dflt:0.00121}  -- momento de inércia do motor + carga, [kg.m^2];
np    {dflt:2}        -- número de pólos do motor;
k0    {dflt:3}        -- perdas rot., [%];
ccap  {dflt:30}       -- capacitor permanente, [uF];
```

```

----- parâmetros da carga -----
Pc      {dflt:0.95}      -- Potência nominal da carga, [cv];
x0      {dflt:0}         -- conj. carga constante;
x1      {dflt:0}         -- conj. carga varia linearmente com a veloc.;
x2      {dflt: 1.018.E-5} -- conj. carga varia com o quadrado da veloc.;
CONST
freq    {VAL:60}         -- frequência nominal do motor, [Hz];

```

A janela ou interface do ATP para a entrada dos dados do motor e do compressor é ilustrada na figura 3.14.

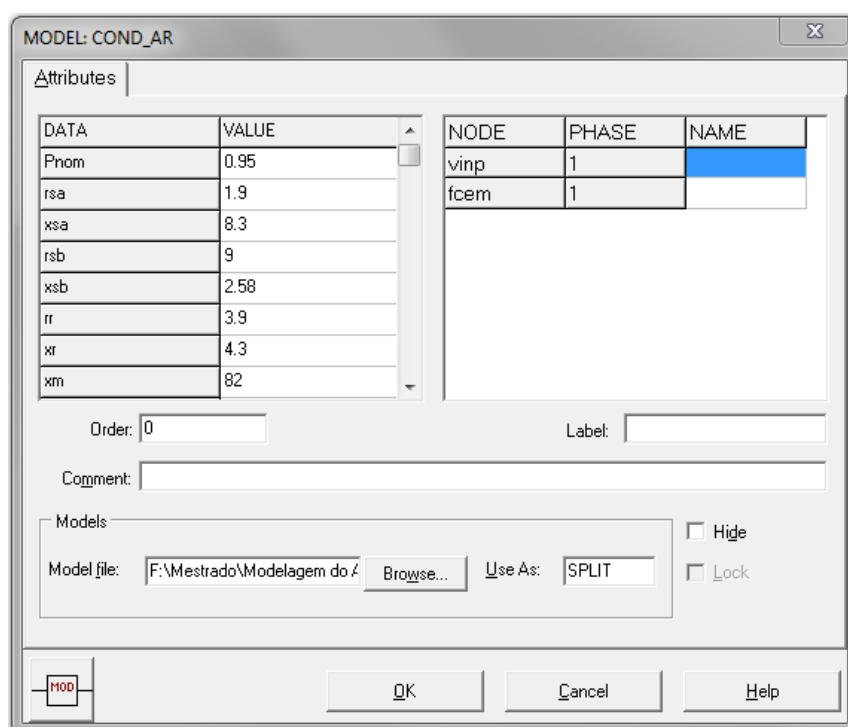


Figura 3.13 – Janela do ATP indicando o lugar para inserção dos dados do compressor-motor.

Seguindo a lógica e a sequência do código da programação do motor fica evidenciada a necessidade da declaração de todas as variáveis utilizadas na sessão anterior, as quais foram subdivididas em 3 conjuntos, a saber: “Variáveis do motor”, “Variáveis da carga” e “Variáveis auxiliares”. Tendo em vista o início do processamento dos casos, tais grandezas, em $t=0$, são sempre adotadas como nulas. Na sequência, o programa calcula alguns parâmetros do motor e

carga, os quais permanecem constantes para qualquer carregamento no eixo do motor. As expressões utilizadas para tanto são:

- Velocidade síncrona do motor em (rad/s) e (rpm):

$$n_s = \frac{120 \cdot f_{req.}}{np} \quad (3.60)$$

$$n_{motor} = \frac{120 \cdot f_{req.}}{np} \times \frac{2\pi}{60} \quad (3.61)$$

- Perdas rotacionais (W):

$$k_{rot.} = \frac{K_0}{100} \times \frac{P_{nom.} \cdot 736}{n_{motor}^2} \quad (3.62)$$

Quanto às demais grandezas, seus cálculos podem ser facilmente identificados no trecho do código fonte a seguir.

```
-----
----- equacionamento do motor - parâmetros constantes -----
-----
ns:=(120*freq)/np
n_motor:=(2*pi*((120*freq)/np))/60
krot:=((k0/100)*Pnom*736)/(n_motor*n_motor)
ws:=2*pi*freq
m:=xm/ws
lsa:=xsa/ws
lsb:=xsb/ws
lr:=xr/ws
lsasa:=m+lsa
lsasb:=0
lsbsa:=0
lsbsb:=m+lsb
lrArA:=m+lr
lrArB:=0
lrBrA:=0
lrBrB:=m+lr
```

Quanto à carga, está também possui alguns parâmetros que devem ser determinados e mantidos constantes ao longo do processamento. O compressor do tipo rotativo, que compõe o equipamento em estudo, possui um torque do tipo quadrático com a velocidade. Dentro deste contexto as seguintes expressões podem ser utilizadas:

- Velocidade nominal da carga:

$$n_n = \frac{2\pi \cdot n_s}{60} \quad (3.63)$$

- Torque ou conjugado da carga em N.m:

$$Conj_{carga} = (x_0 \cdot T_{nom.}) + (x_1 \cdot T_{nom.} \cdot Vel_{motor}) + (x_2 \cdot T_{nom.} \cdot Vel_{motor}^2) \quad (3.64)$$

Onde:

$$T_{nom} = \frac{P_{nom.} \cdot 736}{n_n} \quad (3.65)$$

A parte do código de programação que traduz as equações 3.63 a 3.65 é mostrada na sequência.

```
----- equacionamento da carga -----
nn:=(2*pi*ns)/60
Tnom:=(Pnom*736)/nn
conj_carga:=(x0*Tnom)+(x1*Tnom*vel_motor)+(x2*Tnom*(vel_motor**2))
```

Por fim, as grandezas do conjunto motor-compressor, que interagem as variáveis de operação e levam em conta o carregamento da máquina, são obtidas através de método Newton–Raphson.

A seção do código fonte que evidencia esse método é descrita abaixo:

```

----- Iteração para a obtenção dos parâmetros do motor -----
----- Método de Newton - Raphson -----
-----
COMBINE ITERATE AS case1
-----
----- Ângulo elétrico -----
-----
teta:=integral(dteta)
-----
----- indutâncias mútuas-----
-----
lsarA:=m*cos(teta)
lsarB:=m*sin(teta)
lsbrA:=-m*sin(teta)
lsbrB:=m*cos(teta)
lrAsa:=m*cos(teta)
lrAsb:=-m*sin(teta)
lrBsa:=m*sin(teta)
lrBsb:=m*cos(teta)
-----
----- Conj. eletromagnético -----
-----
c1:=isa*(-m*ira*sin(teta)+m*irb*cos(teta))
c2:=isb*(-m*irb*sin(teta)-m*ira*cos(teta))
conj_elmag:=(np)*(c1+c2)
Crot:=krot*vel_motor
-----
----- velocidade elétrica e mecânica-----
-----
dvel_motor:=((1/(jmc))*(conj_elmag-conj_carga-Crot))
vel_motor:=integral(dvel_motor)
vel_eletr:=(vel_motor*np)/2
conj_eixo:=conj_elmag-Crot
n_rpm:=((vel_motor)*30/pi)
dteta:=vel_eletr
-----
----- tensão no capacitor-----
-----
vcap:=((1/(ccap*1E-6))*(iisb))
icap_p:=isb
iisb:=integral(icap_p)
-----
----- Correntes do estator -----
-----
isa:=(v-(dflux_a))/rsa
isb:=(v-(vcap+dflux_b))/rsb
itotal:=(isa+isb)
-----
----- Correntes do rotor -----
-----
ira:=-dflux_ra/rr
irb:=-dflux_rb/rr
-----
----- derivadas dos fluxos -----
-----
dflux_a:=deriv(flux_a)
dflux_b:=deriv(flux_b)
dflux_ra:=deriv(flux_ra)
dflux_rb:=deriv(flux_rb)
-----
----- fluxos -----
-----
flux_a:=lsasa*isa+lsarA*ira+lsarB*irb
flux_b:=lsbsb*isb+lsbrA*ira+lsbrB*irb
flux_ra:=lrAsa*isa+lrAsb*isb+lrArA*ira
flux_rb:=lrBsa*isa+lrBsb*isb+lrBrB*irb
ENDCOMBINE

```

O modelo estabelecido no ATP, representativo de todo o algorítmico descrito acima, e ainda, que compila o código fonte completo, é mostrado na figura 3.15. Consta-se que o arranjo, até então parcial, compreende o bloco da *MODELS*, um transformador de acoplamento e uma fonte da TACS para inicialização da *MODELS*.

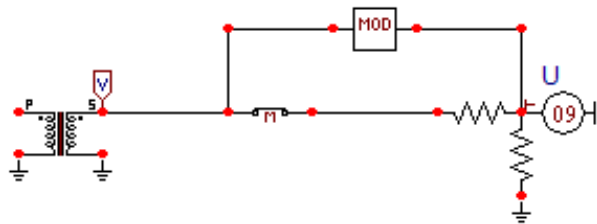


Figura 3.14 - Circuito elétrico da condensadora no ATP.

Por fim, o conjunto foi compactado em um único bloco denominado por “CONDENS.”, que representa a abreviação de Condensadora, como indicado na figura 3.16.

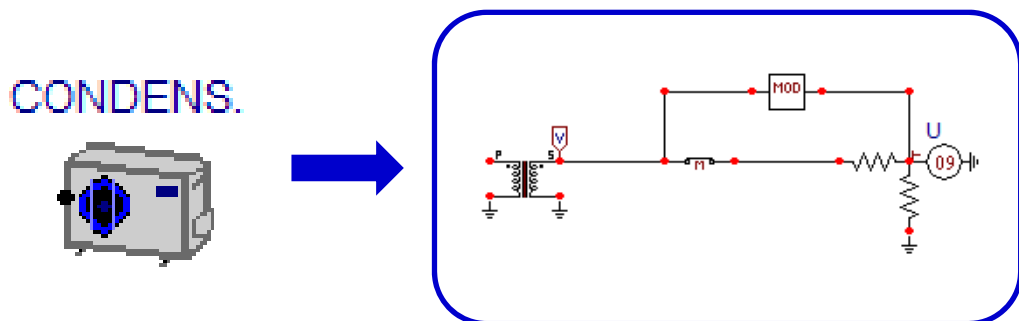


Figura 3.15 – Bloco representativo da Condensadora no ATP.

As variáveis de saída fornecidas pela simulação da condensadora são:

- *isa* - corrente no enrolamento principal do estator;
- *isb* - corrente no enrolamento auxiliar do estator;
- *con_elmag* - Conjugado eletromagnético do motor [N.m];

- *con_eixo* - Conjugado mecânico no eixo do motor [N.m];
- *con_carga* - Conjugado mecânico solicitado pela carga [N.m];
- *vel_motor* - Velocidade angular do rotor do motor [rad/s];
- *vel_eletr* - Velocidade angular do campo girante do motor [rad/s];

3.6. Implementação do condicionador de ar tipo Split no simulador ATP

As sessões anteriores retrataram as modelagens matemáticas e as estratégias de estudos utilizadas para as duas principais partes constituintes do produto focado nesta pesquisa, ou seja, o condicionador de ar Split. Como esclarecido, nesta fase dos trabalhos, tanto a evaporadora como a condensadora já se encontram modeladas, porém de forma isolada, no software ATP. Portanto, esta seção destina-se a descrever o processo da fusão dos recursos obtidos e direcionados à representação do equipamento como um todo.

Um primeiro ponto a ser ressaltado está no fato que as duas partes, no contexto operacional do equipamento, operam em paralelo. Muito embora a placa eletrônica realize o controle de temperatura, ligando ou desarmando o compressor do sistema de refrigeração, para fins da modelagem aqui feita o mesmo se apresenta como permanentemente conectado durante os estudos de desempenho computacional. Isto representaria, naturalmente, a situação mais crítica para o funcionamento do condicionador de ar diante de distúrbios atrelados com a respectiva rede de suprimento.

Dentro desta lógica, a figura 3.16 ilustra os dois blocos, evaporadora e condensadora, totalizando o condicionador de ar Split completo. Além destas duas unidades, constata-se ainda a presença de um bloco denominado por “MEDIDOR”, cujo objetivo é de fornecer os valores eficazes de tensão de entrada e corrente total, além dos valores das potências e o fator de potência.

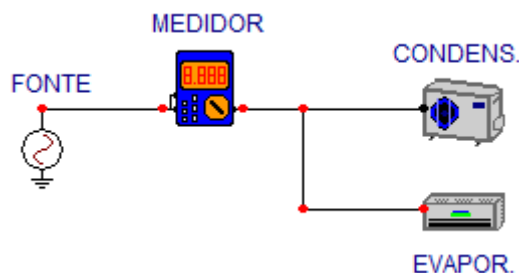


Figura 3.16 – Representação do Condicionador de Ar Split completo no ATP.

A figura 3.17 ilustra a janela que oferece acesso aos resultados associados com as simulações, esta é denominada por PlotXY do ATP e permite uma pronta visualização de todas as grandezas passíveis de obtenção e representativas das condições operativas do equipamento.

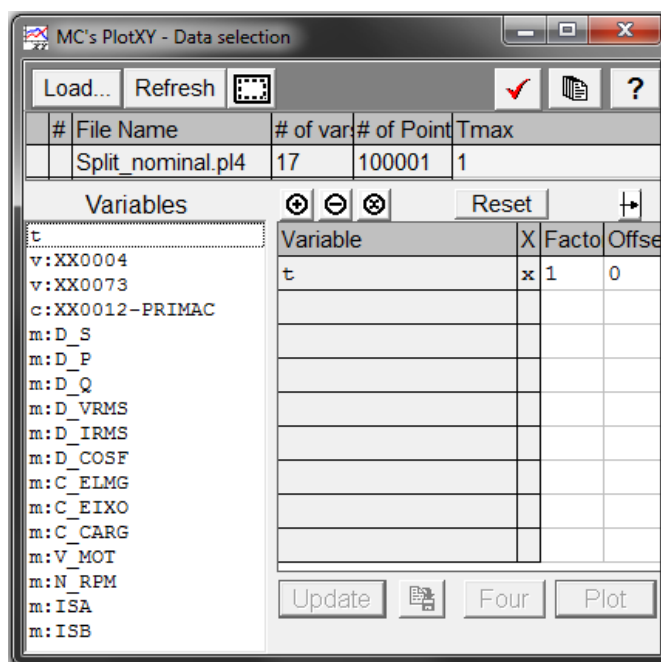


Figura 3.17 – Janela do PlotXY nos termos disponibilizados pelo ATP.

3.7. Considerações finais

Este capítulo apresentou, inicialmente, uma síntese das principais partes constituintes de um aparelho condicionador de ar tipo Split, visando, sobretudo,

o reconhecimento de suas estruturas físicas para posterior direcionamento das estratégias de modelagem empregadas.

Foram então ressaltadas as duas principais partes que formam o equipamento, a saber, aquela denominada por evaporadora e destinada ao processo de controle da temperatura do produto, e outra, designada por condensadora. Esta última foi identificada como a de maior consumo elétrico e responsável pelo funcionamento do dispositivo no que tange aos seus princípios físicos da expansão e compressão do gás refrigerante.

Os estudos mostraram que a evaporadora se apresenta com uma constituição eletrônica, portanto, com as conhecidas limitações de suportabilidade por parte de seus componentes básicos constituintes, a exemplo da ponte retificadora e do capacitor do barramento CC. Por outro, ficou também evidenciado que a potência elétrica deste componente é bastante pequena quando comparada a condensadora. Não obstante, a sua importância no processo da modelagem se faz extremamente relevante por se apresentar como uma das partes mais sensíveis do processo, afirmativa esta em consonância com informações colhidas de oficinas de manutenção autorizadas. Por fim, uma vez caracterizada sua estrutura física, essa foi prontamente representada no simulador ATP através de recursos disponibilizados pela sua biblioteca de componentes.

Por outro lado, quanto à condensadora, componente responsável quase que pela totalidade do consumo elétrico do equipamento, os desenvolvimentos feitos primaram pelo estabelecimento de modelos matemáticos, visto que a mesma compreende um acionamento elétrico e mecânico passíveis de serem traduzidos na forma de expressões matemáticas. Portanto essas expressões foram inseridas no ATP através da rotina MODELS, perfazendo assim o arranjo completo da condensadora.

CAPÍTULO 4

VALIDAÇÃO DO MODELO COMPUTACIONAL DO APARELHO CONDICIONADOR DE AR SPLIT

4.1. Considerações Iniciais

Ao término do capítulo anterior chegou-se, como esclarecido, a uma modelagem do condicionador de ar tipo Split através de uma representação que permite a avaliação de seu desempenho sob condições de regime permanente, dinâmico e ainda sob situações transitórias. Portanto, os trabalhos conduzidos, utilizando por base o domínio do tempo como técnica de modelagem e análise, se apresentam com flexibilidade suficiente para que sejam realizadas avaliações operativas do produto sob condições ideais e também sob a ação de distúrbios adversos passíveis de manifestação nas redes elétricas.

À luz do exposto e em sintonia com os objetivos principais desta dissertação, que visa o estabelecimento de recursos adicionais a um aplicativo computacional destinado a estudos da consistência ou não dos nexos causais vinculados com pedidos de indenização por danos elétricos, torna-se imperativo que sejam conduzidas investigações para o estabelecimento de uma sistemática de validação dos modelos elaborados e respectiva simulação computacional, sob

distintos pontos de vista quanto à tensão de suprimento do condicionador de ar em foco.

Para tanto, a opção feita pela presente dissertação se apoiou em uma correlação direta entre os resultados obtidos para as tensões impostas e respectivas correntes na entrada do equipamento, explorando-se desempenhos experimentais e computacionais que reflitam o funcionamento do condicionador de ar sob condições normais e anômalas para o seu respectivo suprimento elétrico.

Neste particular ressalta-se que as atividades realizadas, além dos estudos associados com tensões senoidais ideais, também contemplaram situações em que a rede de alimentação se apresenta com: elevações súbitas de tensão; afundamentos de tensão de curta duração; interrupções; flutuações e distorções harmônicas. Portanto, os testes destinados à validação do modelo compreenderam uma grande gama de adversidade em relação aos padrões considerados ideais.

4.2. Estrutura para realização dos ensaios experimentais

Os estudos experimentais foram realizados em um dos laboratórios de Qualidade da Energia Elétrica da Universidade Federal de Uberlândia, localizado no Bloco 5K.

Iniciando pela questão da instalação do equipamento, diferentemente do condicionador de ar de janela, o modelo Split necessita de pessoal habilitado para a função. De fato, a composição do equipamento determina a necessidade da interligação do circuito de refrigeração entre a evaporadora e a condensadora por uma tubulação de cobre, que posteriormente deve ser termicamente vedada com um isolante térmico.

Para facilitar a dinâmica dos ensaios, bem como a comodidade do manuseio do equipamento, o Condicionador de Ar foi montado em um cavalete

de testes, cedido por uma empresa de refrigeração da cidade. A figura 4.1 ilustra o cavalete com os equipamentos instalados e também alguns instrumentos de medição do ciclo de refrigeração utilizado para verificar o seu funcionamento após a instalação.

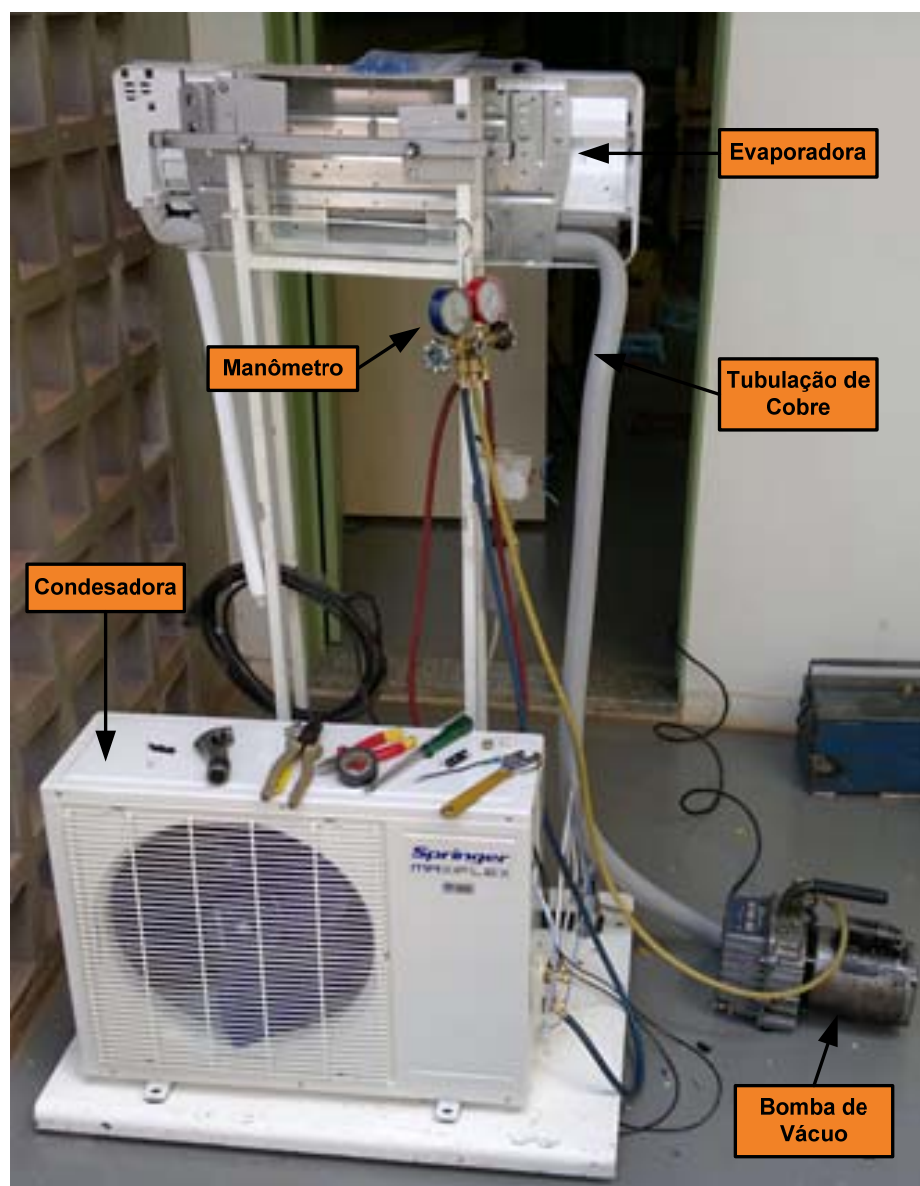


Figura 4.1 – Montagem do condicionador de ar no laboratório de ensaios.

Quanto ao arranjo físico utilizando recursos disponibilizados pelo laboratório, a figura 4.2 mostra, esquematicamente, os diversos dispositivos empregados e a estrutura concebida para a realização dos testes.

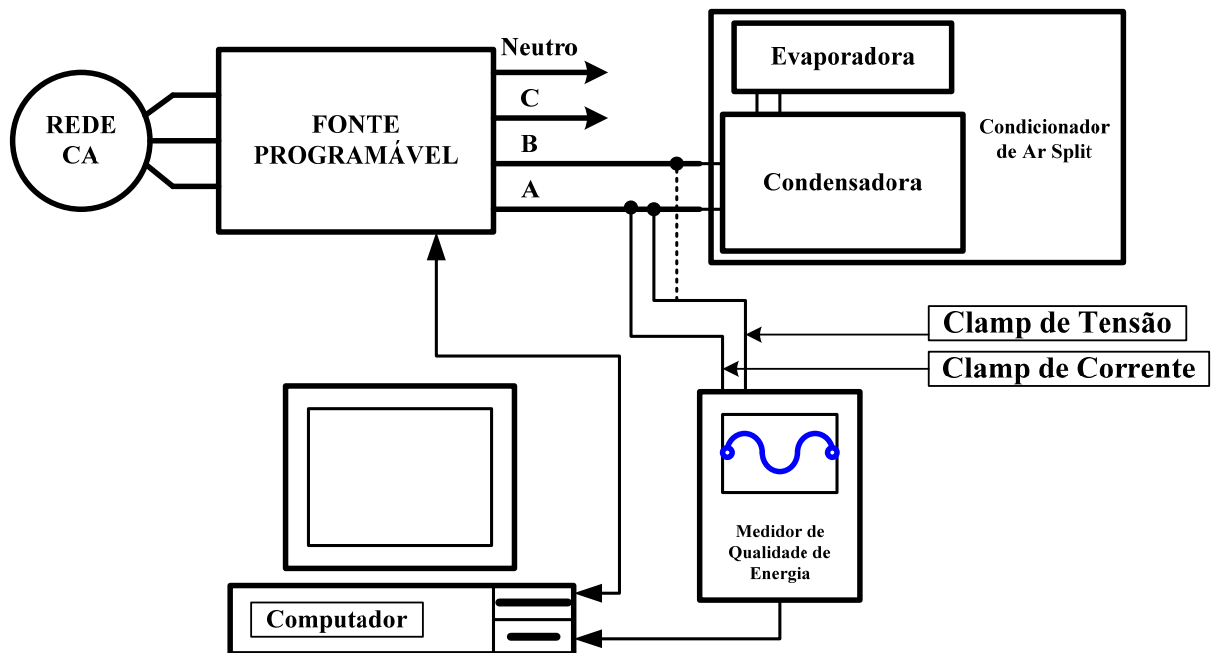


Figura 4.2 – Arranjo físico empregado para a realização dos ensaios no Condicionador de Ar.

A seguir, de forma simplificada, são identificados e descritos os principais dispositivos utilizados nos trabalhos.

- **Fonte programável:** trifásica, marca HP, modelo HP 6834 A, com potência nominal de 4,5 kVA. Essa tem a função de fonte de suprimento para o condicionador de ar, permitindo reproduzir em laboratório sinal de tensão puramente senoidal e quando for o caso, a aplicação dos diversos itens de qualidade, de forma controlada, à tensão de alimentação. Dada sua importância, na figura 4.3, estão mostrados os módulos internos dos componentes da fonte, que possibilitaram a aplicação dos distúrbios;

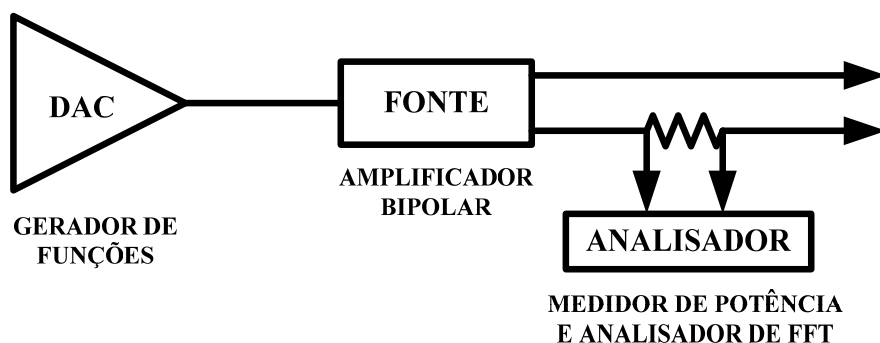


Figura 4.3 - Módulos constituintes da Fonte HP6834A.

- **Medidor de Qualidade de Energia:** modelo G4500 BLACKBOX, da marca ELSPEC, o qual tem por finalidade a aquisição dos sinais de tensão e corrente solicitados pelo aparelho sob teste. O instrumento possui uma taxa de resolução de 1024 pontos por ciclo. Uma vez adquiridos os sinais, são transferidos para um micro-computador. Os arquivos obtidos são tratados pelo programa Elspec Investigator, que faz parte de um pacote de software disponibilizado pelo fabricante do medidor. Esse em específico, é capaz de fornecer, dentre outras informações, as formas de ondas de tensão e corrente e as componentes harmônicas das grandezas registradas;
- **Micro-Computador:** tem a função de controle da fonte programável, objetivando a reprodução de fenômenos relacionados com distúrbios, nos termos definidos pelo usuário. Além disto, nesse são recebidos e processados os sinais adquiridos pelo medidor de Qualidade de Energia.

A figura 4.4 ilustra a montagem laboratorial final obtida. Nessa, é possível observar as partes constituintes do arranjo experimental empregado, como anteriormente ressaltado.

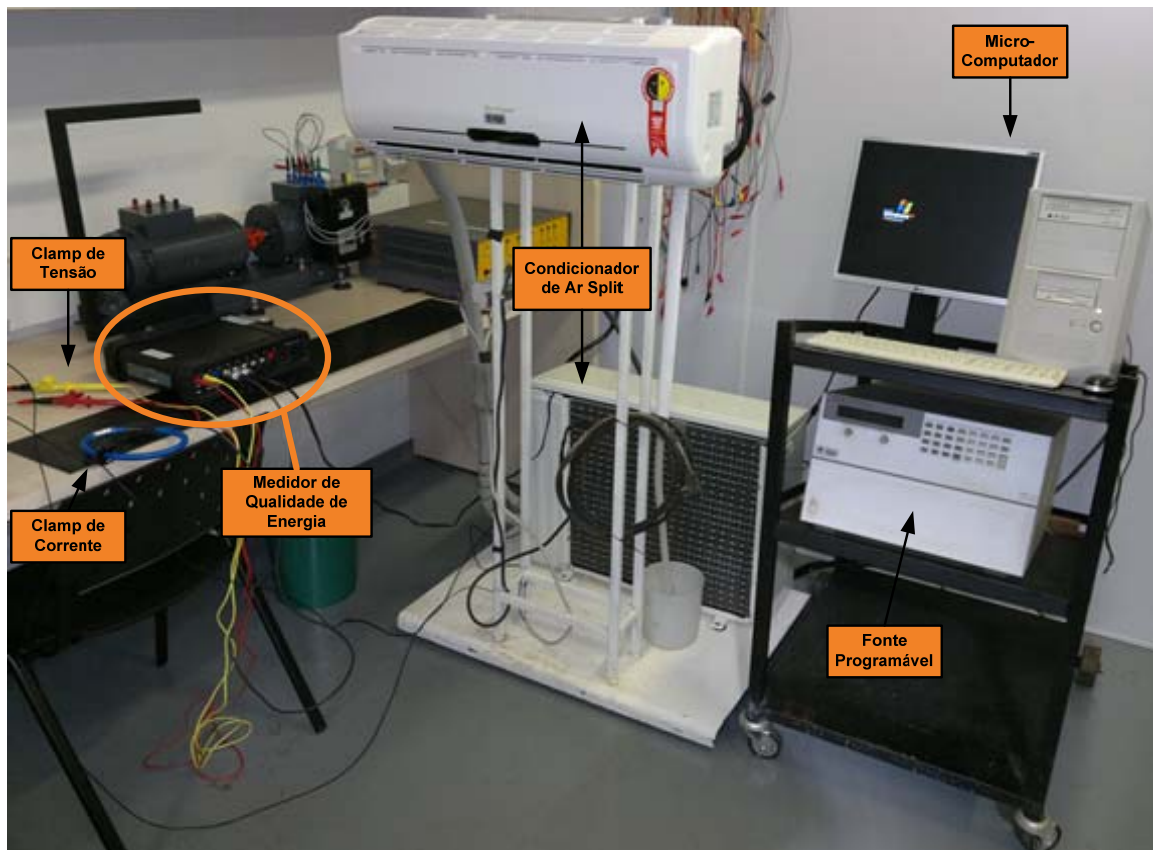


Figura 4.4 – Estrutura laboratorial para a reprodução de fenômenos característicos atrelados com distúrbios na rede de suprimento e o condicionador do ar.

4.3. Desempenho com tensão de suprimento ideal – Caso 1

Esta condição operativa tem por finalidade a validação do modelo computacional proposto e implementado. Neste contexto, os ensaios experimentais e computacionais objetivam, sobretudo, avaliar o funcionamento do condicionador de ar quando o mesmo encontra-se suprido por uma tensão que se apresenta de forma ideal e em consonância com as condições nominais do aparelho. Os resultados obtidos, na forma das tensões e correntes na entrada do equipamento, assim como algumas grandezas mecânicas associadas com o motor, permitem o estabelecimento de uma base de dados para o estabelecimento dos termos comparativos entre o desempenho laboratorial e computacional, permitindo, assim, validar a aderência do modelo computacional

ao funcionamento real do condicionador. A tabela 4.1 apresenta as principais características e parâmetros utilizados para as investigações aqui conduzidas.

Tabela 4.1 – Condições e Parâmetros Elétricos do condicionador de ar Split.

Parâmetros Elétricos do Compressor Hermético Utilizado nos Estudos			
V_{nom} (V)	220	R_{sa} (Ω)	2.1
F_{req.} (Hz)	60	X_{sa} (Ω)	8.3
P_{nom.} (W)	710	R_{sb} (Ω)	8.7
C_{part.} (μF)	30	X_{sb} (Ω)	2.58
J_{M+C} (Kg.m²)	0,001212	R_r (Ω)	3.9
N_{pólos}	2	X_r (Ω)	4.3
X_m (Ω)	82	X₂	1.018 x 10 ⁻⁵

É importante reforçar que as grandezas monitoradas nos ensaios experimentais limitaram-se à corrente e tensão, devido as características herméticas do equipamento, visto que os pontos para a extração das informações mecânicas são inacessíveis.

Aplicando-se uma tensão de suprimento senoidal, de amplitude fixa com valor eficaz de 220V, tem-se os resultados experimentais indicados na figura 4.5, os quais evidenciam as formas de onda da tensão de alimentação e das correntes envolvidas no processo. As correntes, de acordo com a estratégia de modelagem utilizada, correspondem àquelas manifestadas na entrada, no enrolamento principal e no enrolamento auxiliar do motor do compressor hermético presente no condensador. Observa-se que, mesmo com uma alimentação senoidal, as formas de onda das correntes se mostram com relativo nível de distorção, fato que denota uma natureza não linear para a carga suprida, característica não considerado quando do estabelecimento da modelagem matemática do motor. Não obstante, como será oportunamente constatado, tal aproximação não comprometeu o desempenho da representação computacional utilizada.

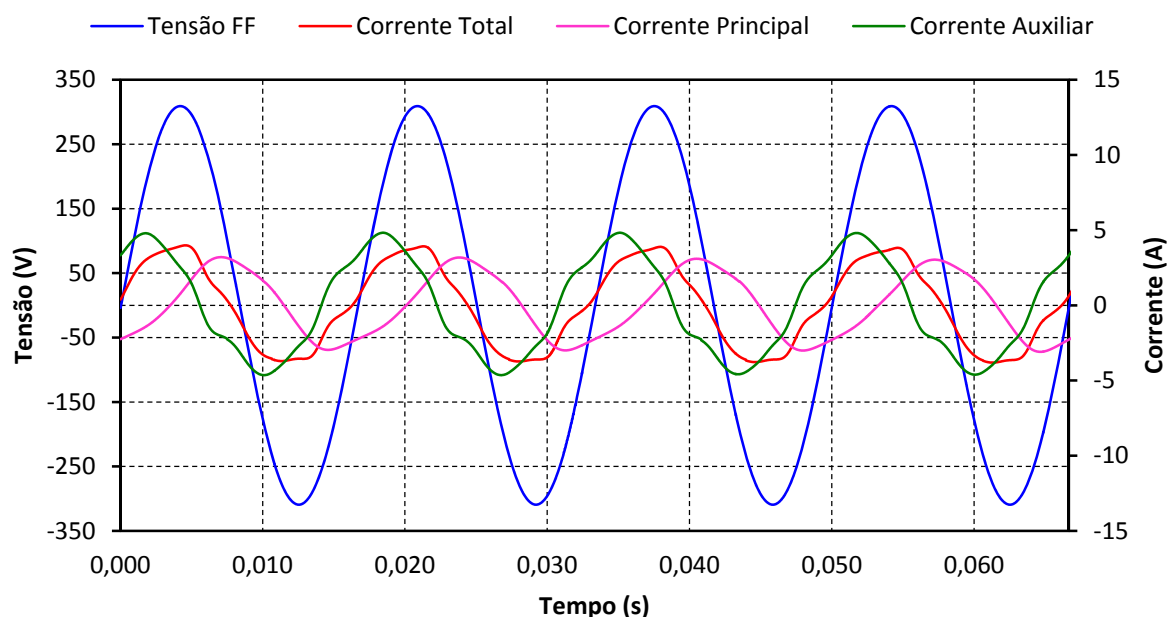


Figura 4.5 - Tensão de alimentação (azul), corrente total (vermelho), corrente do enrolamento principal (rosa), corrente do enrolamento auxiliar (verde) - suprimento ideal e nominal – resultados experimentais – caso 1.

Por outro lado, através do simulador computacional ATP, ao qual foi inserida a representação do equipamento em pauta, uma vez avaliado o funcionamento do condicionador de ar sob as mesmas condições utilizadas no ambiente laboratorial, obteve-se os resultados fornecidos pela figura 4.6.

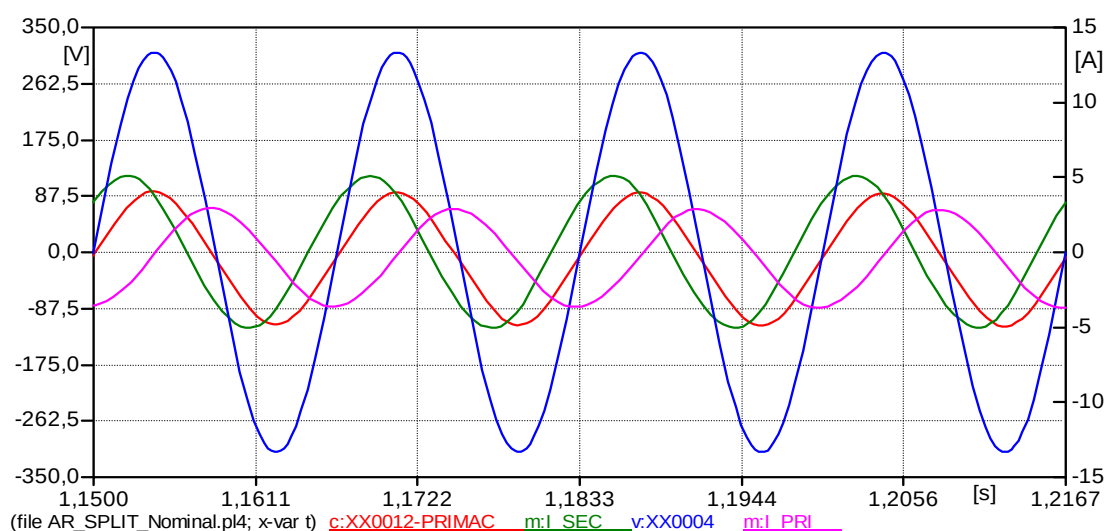


Figura 4.6 - Tensão de alimentação (azul), corrente total (vermelho), corrente do enrolamento principal (rosa), corrente do enrolamento auxiliar (verde) - suprimento ideal e nominal – resultados computacionais – caso 1.

A tabela 4.2 sintetiza os valores de pico e eficaz para as diversas correntes anteriormente identificadas. O significado de cada uma delas encontra-se resumidamente fornecido.

Tabela 4.2 – Comparação entre os resultados experimentais e computacionais para as correntes – caso 1.

		Experimental	Computacional	Erro
Corrente De Pico	Enrolamento Principal	3,07 A	2,94 A	4,23%
	Enrolamento Auxiliar	4,70 A	4,99 A	5,81%
	Total na entrada do equipamento	3,86 A	4,01 A	3,74%
Corrente eficaz	Total na entrada do equipamento	3,15 A	3,12 A	0,95%

Ainda nas figuras citadas, é importante atentar para as defasagens entre as diferentes correntes e a tensão de suprimento. Como pode ser observado, os desempenhos experimentais e computacionais encontram-se, também, bastante coerentes. De fato, a corrente no enrolamento principal encontra-se em atraso em relação à tensão, fato consonante com a predominância indutiva do mesmo. Quanto ao enrolamento auxiliar, devido a presença de um capacitor dominante, verifica-se, como era esperado, que a corrente se apresenta adiantada em relação à tensão de suprimento. A corrente total solicitada pelo equipamento, dada pela soma das duas anteriores, mostra-se praticamente em fase com a tensão de alimentação, apresentando fator de potência em torno de 0.98, conforme pode observar-se nas figuras 4.7 (Experimental) e figura 4.8 (Computacional).

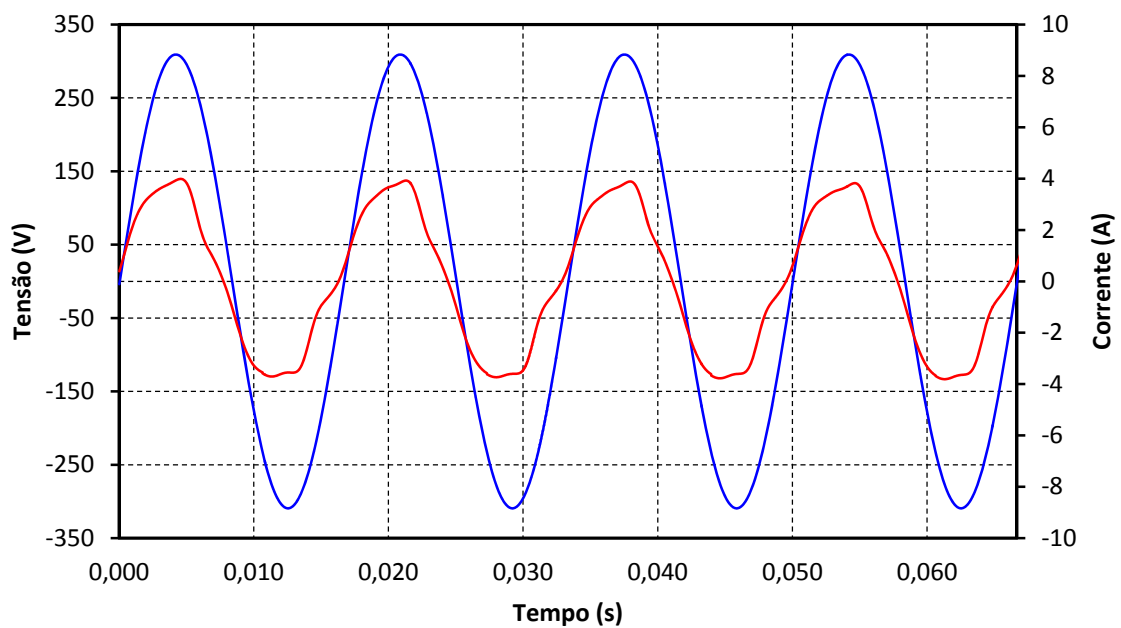


Figura 4.7 – Tensão de alimentação (azul) e corrente total (vermelho) - suprimento ideal e nominal – resultados experimentais – caso 1.

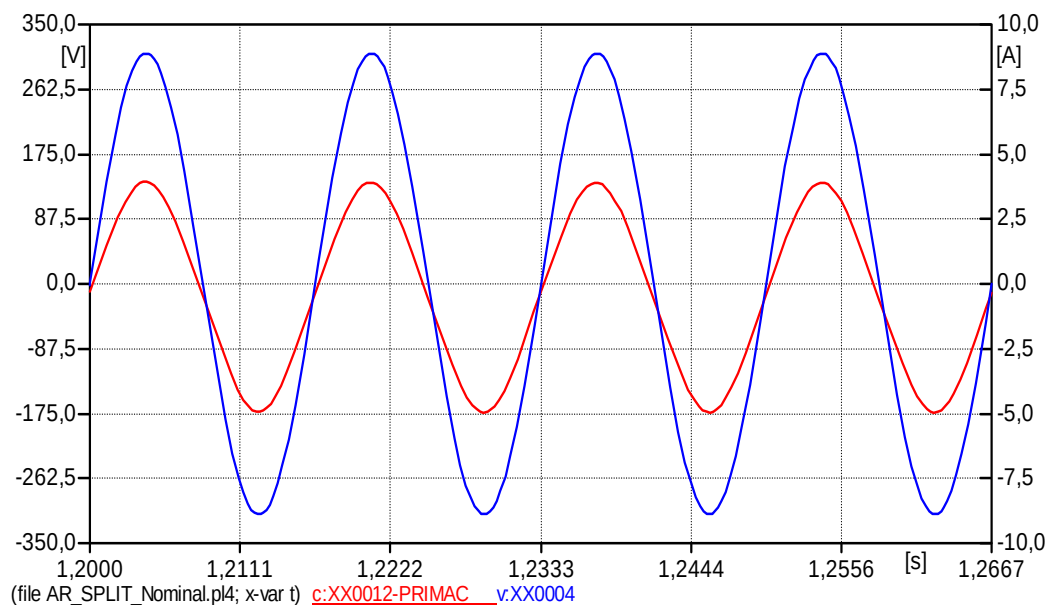


Figura 4.8 – Tensão de alimentação (azul) e corrente total (vermelho) - suprimento ideal e nominal – resultados computacionais – caso 1.

Diante do exposto e da consistência entre os desempenhos obtidos em laboratório e na simulação computacional verifica-se que a modelagem proposta e implementada na plataforma ATP se mostra adequada aos objetivos aqui

delineados. Naturalmente, para a consolidação desta afirmativa, outros testes se fazem necessários, como será apresentado e discutido na sequência das investigações.

Ainda em relação a situação operativa sob suprimento ideal, a figura 4.9 destaca o perfil da velocidade do motor ao longo do tempo, desde a sua partida até o seu regime nominal. Como se vê, em aproximadamente 0,35 s é atingida a velocidade de regime permanente, de 3.520 rpm. No que se refere a esta grandeza, como já relatado, isso foi possível de obtenção apenas computacionalmente.

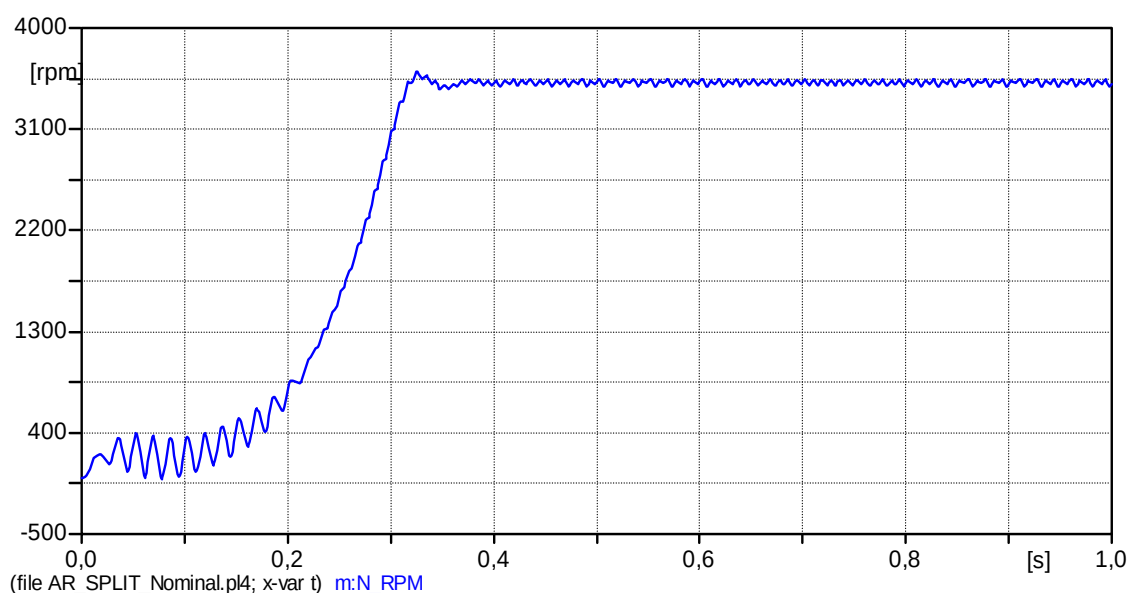


Figura 4.9 – Velocidade do motor em rpm – regime de partida – suprimento ideal e nominal – resultado computacional – caso 1.

A figura 4.10, complementando, fornece o conjugado no eixo. Sua forma se apresenta condizente com as previsões teóricas clássicas.

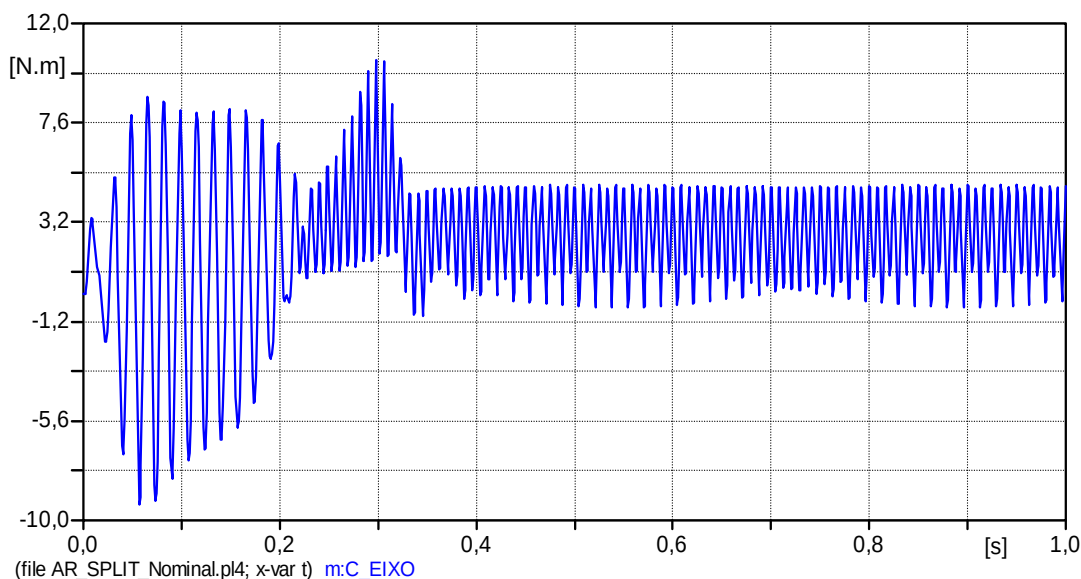


Figura 4.10 – Conjugado no Eixo (N.m) x Tempo (s) – suprimento ideal e nominal – resultado computacional – caso 1.

Por fim, o conjugado de carga em função da velocidade do motor é ilustrado pela figura 4.11. Tal característica, correspondente a uma função quadrática com a velocidade, se apresenta em sintonia com a proposição anteriormente assumida para o presente tipo de carga, a saber: compressor rotativo.

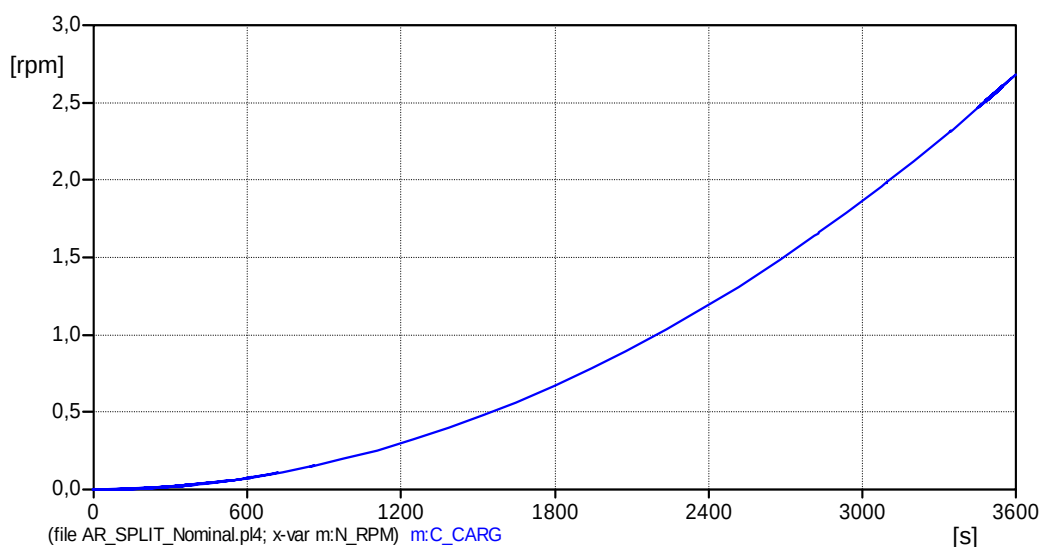


Figura 4.11 – Conjugado de Carga (N.m) x Velocidade do motor (rpm) – suprimento ideal e nominal – resultado computacional – caso 1.

4.4. Desempenho com tensões de suprimento não ideais

Nesta seção são conduzidos os trabalhos investigativos sobre o desempenho do condicionador de ar tipo Split sob distintas situações operacionais, cada qual refletindo a manifestação de um tipo de distúrbio, nos termos previstos pela legislação em vigor e que regulamenta a questão dos indicadores de Qualidade da Energia Elétrica.

Como de praxe, os estudos compreendem, para uma mesma condição imposta para a tensão de suprimento, a obtenção de informações para correlacionar e validar os resultados advindos das simulações com seus correspondentes extraídos de ensaios laboratoriais. Desta forma, as atividades descritas na sequência desta dissertação visam, sobretudo, evidenciar os impactos atrelados com distúrbios na rede de suprimento sobre o equipamento focado, assim como ratificar a eficácia e eficiência do modelo desenvolvido e inserido na base ATP.

De acordo com estes princípios, as análises feitas envolvem situações operativas diversas, nos termos propostos e indicados pela tabela 4.3, junto a qual aparece a identificação do caso considerado anteriormente.

Tabela 4.3 – Quadro resumo dos casos estudados.

Casos analisados para análise de desempenho do condicionador de ar Split proposto		
Caso	Características da Tensão de Suprimento	Estudo Empregado
1	Característica ideal – contemplado no item 4.3	Experimental Computacional
2	Elevação de tensão de curta duração (<i>Voltage swell</i>)	Experimental Computacional
3	Afundamento de tensão de curta duração (<i>Voltage sag</i>)	Experimental Computacional
4	Interrupção no fornecimento de energia	Experimental Computacional
5	Flutuação de tensão	Experimental Computacional
6	Suprimento contendo distorção harmônica	Experimental Computacional

Devido às características herméticas do compressor, como já reportado, apenas as grandezas elétricas são passíveis de registros experimentais para posterior comparação com os correspondentes resultados experimentais. Devido ao fato das informações relativas ao desempenho mecânico somente serem possíveis de extração em estudos computacionais, apenas as grandezas elétricas serão utilizadas para fins da análise comparativa e validação do processo de modelagem.

Muito embora os ensaios realizados no equipamento tenham sido feitos com diferentes graus de severidade e duração, para fins deste trabalho, serão apresentados os resultados do desempenho operacional apenas para uma, ou no máximo, duas situações.

A situação enquadrada como caso 1, como anteriormente esclarecido, corresponde ao suprimento ideal e nominal do condicionador de ar. Por tal motivo seus resultados se apresentam como a base ou referência para fins comparativos com as demais condições estudadas.

4.4.1. Elevação de tensão de curta duração - Caso 2

A estrutura deste item e dos subsequentes, fundamenta-se na análise dos oscilogramas das correntes e outras alterações que possam ser percebidas de forma audível, visual ou outra qualquer. Para o caso dos estudos computacionais, devido às facilidades oferecidas pelo procedimento, podem ser ainda analisados, em função das perturbações aplicadas, os desempenhos de grandezas como: velocidade do motor, torques mecânicos e eletromagnéticos, etc.

A figura 4.12 ilustra as formas de onda da tensão de suprimento, mostrando uma elevação momentânea de tensão de 115% durante 16 ciclos da frequência fundamental, assim como também a corrente total solicitada pelo condicionador de ar.

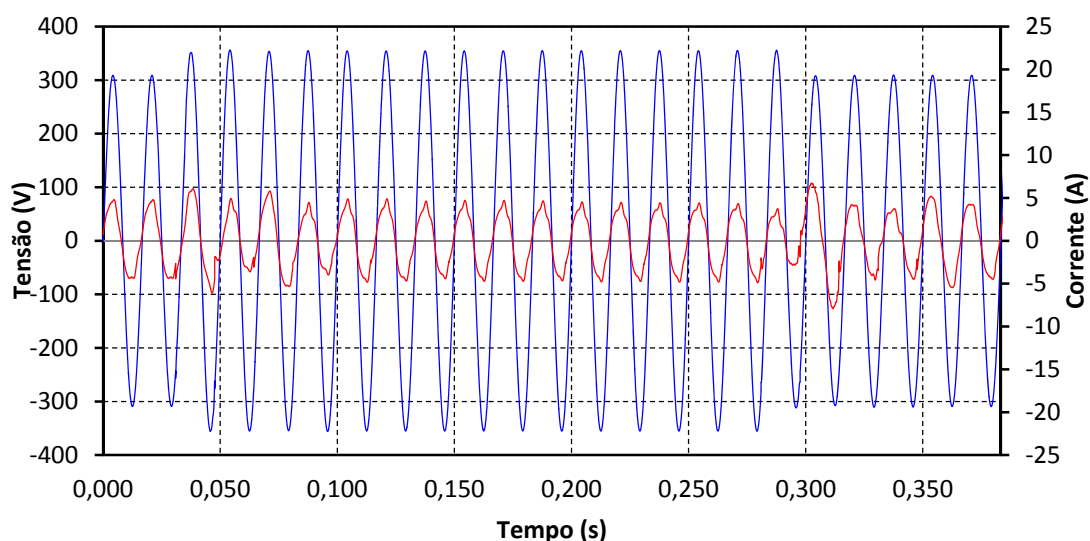


Figura 4.12 - Tensão de alimentação (azul) e corrente total (vermelho) - suprimento com elevação momentânea de 115% em 16 ciclos - resultado experimental – caso 2.

A figura 4.13 fornece os resultados correspondentes obtidos através da simulação do caso no ATP.

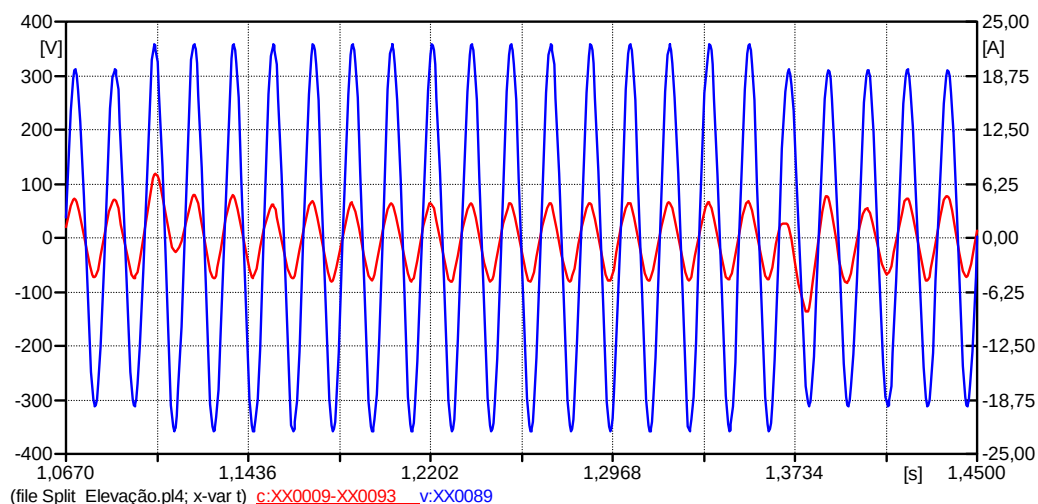


Figura 4.13 - Tensão de alimentação (azul) e corrente total (vermelho) - suprimento com elevação momentânea de 115% em 16 ciclos - resultado computacional – caso 2.

Como pode ser constatado, há uma boa correlação entre os resultados quanto aos aspectos qualitativos e quantitativos, ratificando, mais uma vez, o desempenho do modelo e programa computacional utilizado.

Na figura 4.14, obtida dos estudos computacionais, encontra-se ilustrado o desempenho da velocidade do motor. Este revela pequenas alterações durante a ocorrência do “*Voltage Swell*”. Quando a tensão foi alterada para 115% da nominal a velocidade no eixo do motor saltou de 3520 rpm para 3664 rpm e se estabilizou em 3587 rpm. Após o restabelecimento da tensão ao valor nominal, a velocidade da máquina retorna no primeiro ciclo a 3318 rpm e logo em seguida ao patamar anterior ao da manifestação do fenômeno.

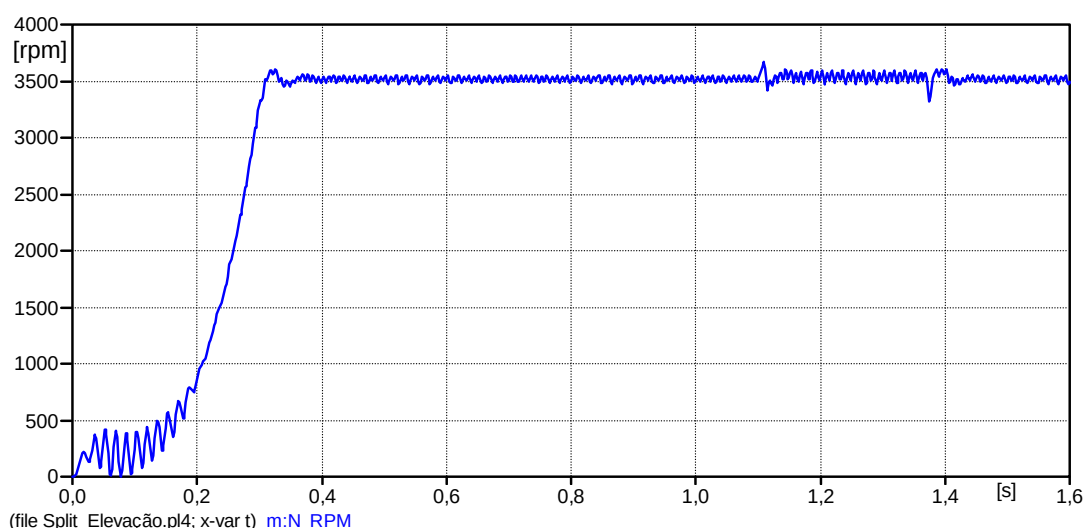


Figura 4.14 - Velocidade do motor em rpm – regime de partida – alimentação contendo elevação momentânea de tensão de 115% em 16 ciclos – resultado computacional – caso 2.

Com relação aos valores eficazes da tensão e corrente no momento da elevação de tensão referido, a figura 4.15 ilustra os resultados experimentais e a figura 4.16 os computacionais.

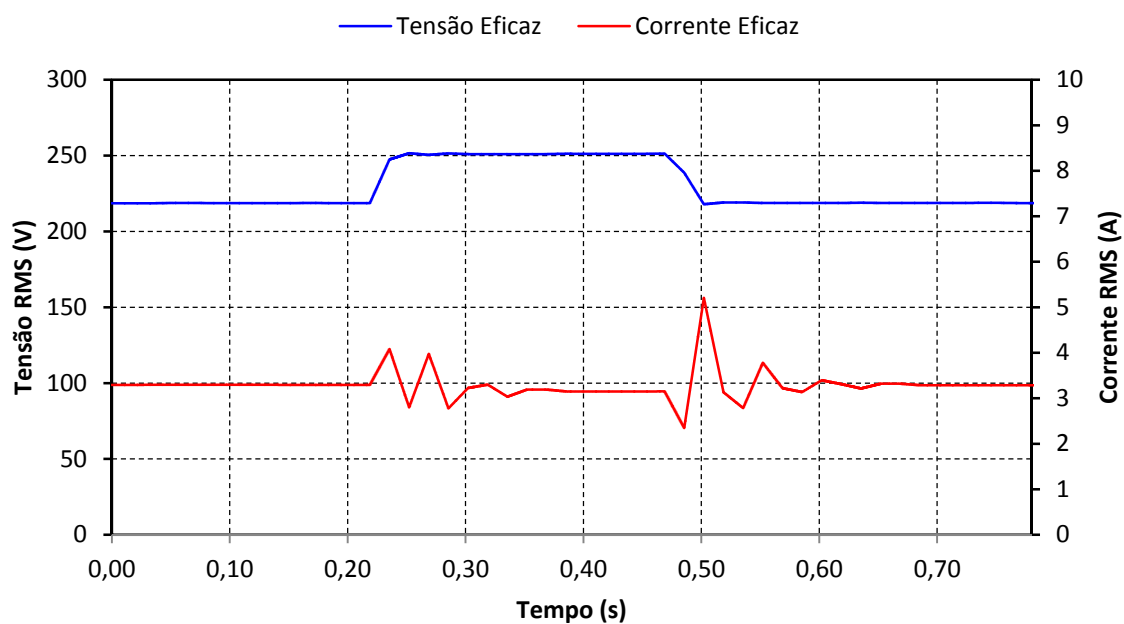


Figura 4.15 - Tensão de alimentação eficaz (azul) e corrente total eficaz (vermelho) - suprimento com elevação momentânea de 115% em 16 ciclos - resultado experimental – caso 2.

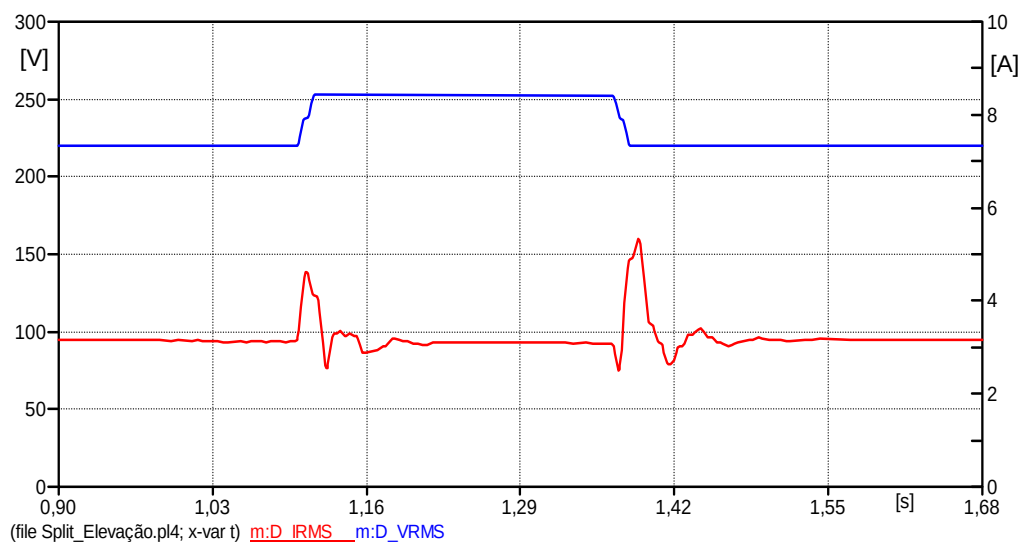


Figura 4.16 - Tensão de alimentação eficaz (azul) e corrente total eficaz (vermelho) - suprimento com elevação momentânea de 115% em 16 ciclos - resultado computacional – caso 2.

Por fim, a tabela 4.4 sintetiza os principais resultados numéricos obtidos nos estudos deste caso. As margens de erro encontradas se apresentam dentro de

faixas que permitem confirmar a adequação do modelo computacional estabelecido.

Tabela 4.4 - Síntese das principais ocorrências observadas no Caso 2-Elevação momentânea de Tensão de 15%, duração de 16 ciclos.

		Tensão (V)			Corrente (A)		
		Exper.	Comput.	Erro	Exper.	Comput.	Erro
Valores de Pico		355,60	357,48	0,52 %	6,59	7,29	9,6%
Valores eficaz	Pré-evento	218,65	220	0,061%	3,29	3,11	5,47%
	Durante	251,01	252,91	0,75%	3,14	3,08	1,91%

4.4.2. Afundamento de tensão de curta duração - Caso 3

Os estudos em questão foram realizados sob distintos níveis de afundamento de tensão de suprimento. Iniciando com a tensão nominal, foram introduzidos afundamentos até se atingir um nível mínimo de 0,35 pu, quando então o equipamento deixou de operar. Não obstante a isto, um único caso foi selecionado para apresentação e discussões, para o caso, um afundamento de 40% durante 10 ciclos, valor este que conduziu a uma tensão final de suprimento de 0,6 pu da nominal.

A figura 4.17 ilustra as formas de onda para a tensão aplicada e respectiva corrente na entrada do condicionador de ar. Como se percebe, durante a redução da tensão ocorrida no experimento há, concomitantemente, um acréscimo da corrente total, evidenciando a característica de potência constante do motor do compressor, fenômeno que perdura durante toda a região do afundamento. Ao ser restaurada a tensão, como seria esperado, ocorre uma súbita elevação da corrente que rapidamente retorna ao valor original pré-afundamento.

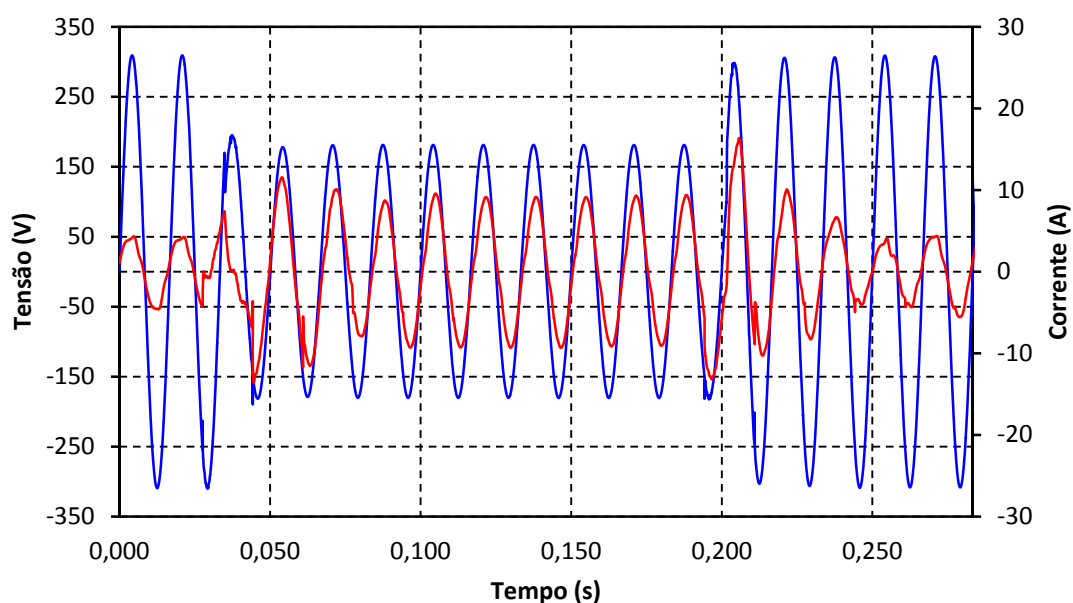


Figura 4.17 - Tensão de alimentação (azul) e corrente total (vermelho) - suprimento contendo um afundamento de tensão de 40% com duração de 10 ciclos - resultado experimental - caso 3.

Como para os demais casos estudados, a figura 4.18 ilustra os desempenhos computacionais para a tensão e corrente, respeitadas as mesmas condições impostas para as investigações laboratoriais.

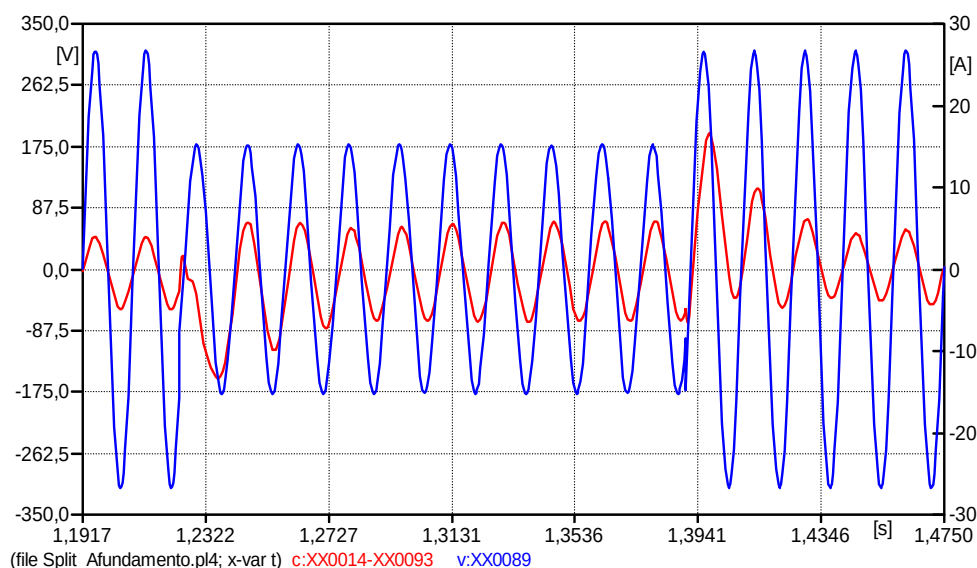


Figura 4.18 - Tensão de alimentação (azul) e corrente total (vermelho) - suprimento contendo um afundamento de tensão de 40% com duração de 10 ciclos - resultado computacional - caso 3.

Novamente, os oscilogramas obtidos, tanto na forma quanto aos seus valores, se mostram bastante compatíveis. A título de ilustração, a corrente de pico após o primeiro ciclo do restabelecimento da tensão foi de 17,5 A para o experimento e de 16,3 A para a simulação computacional.

O comportamento da velocidade do motor frente ao distúrbio em pauta se encontra indicado na figura 4.19. Observa-se que, devido ao fenômeno em pauta, durante a sua ocorrência, há uma ligeira redução de seu valor médio, que chega a um valor mínimo de 3295 rpm, retornando ao nominal, de 3520 rpm, após o restabelecimento da tensão a seu valor nominal.

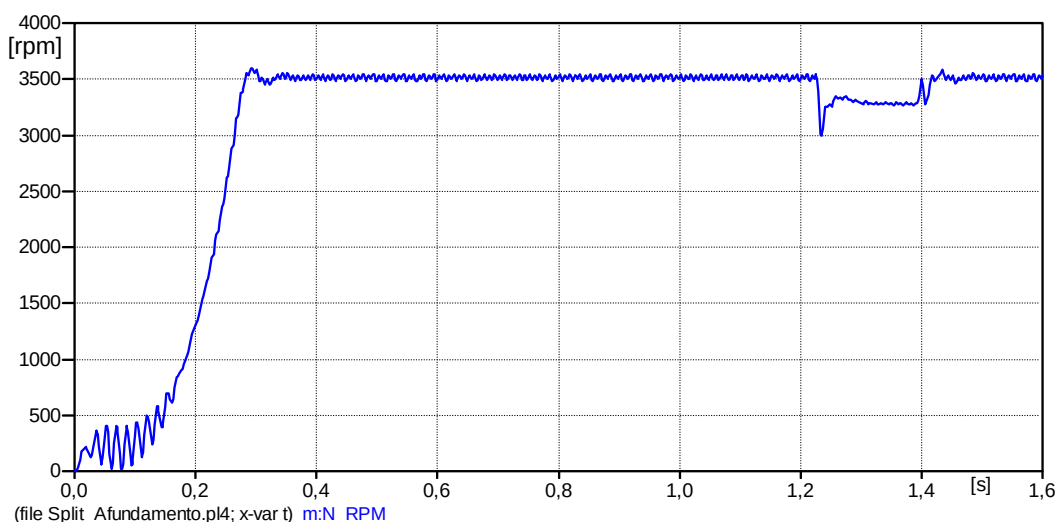


Figura 4.19 - Velocidade do motor em rpm – regime de partida – suprimento contendo um afundamento de tensão de 40% com duração de 10 ciclos – resultado computacional - caso 3.

Com relação aos valores eficazes da tensão e corrente, estes são mostrados, respectivamente, nas figuras 4.20 (experimental) e 4.21 (computacional).

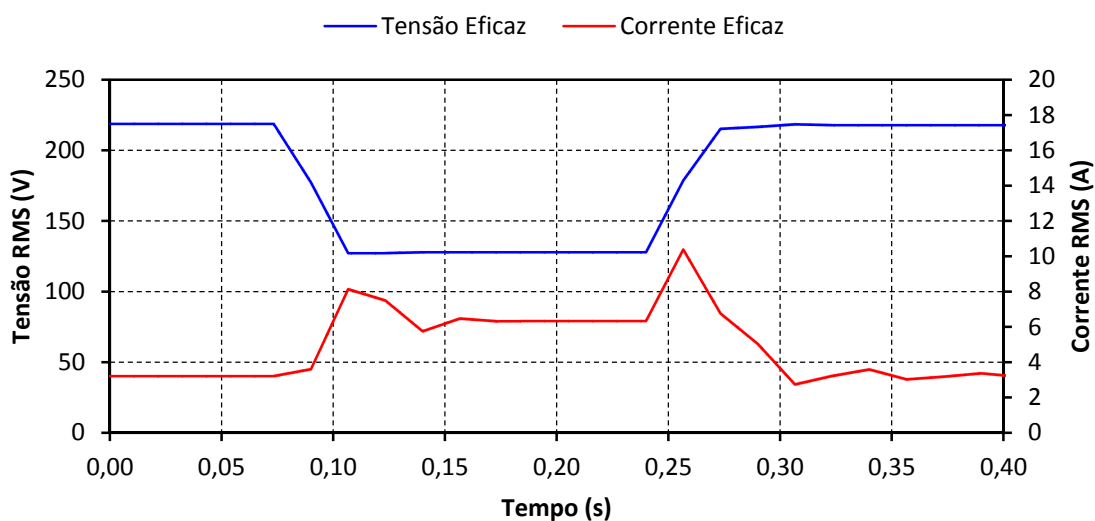


Figura 4.20 - Tensão de alimentação eficaz (azul) e corrente total eficaz (vermelho) – suprimento contendo um afundamento de tensão de 40% com duração de 10 ciclos - resultado experimental - caso 3.

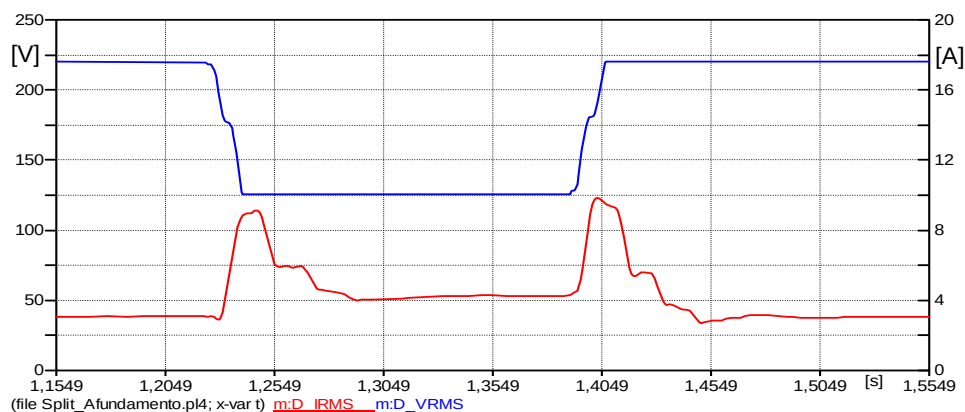


Figura 4.21 - Tensão de alimentação eficaz (azul) e corrente total eficaz (vermelho) – suprimento contendo um afundamento de tensão de 40% com duração de 10 ciclos - resultado computacional - caso 3.

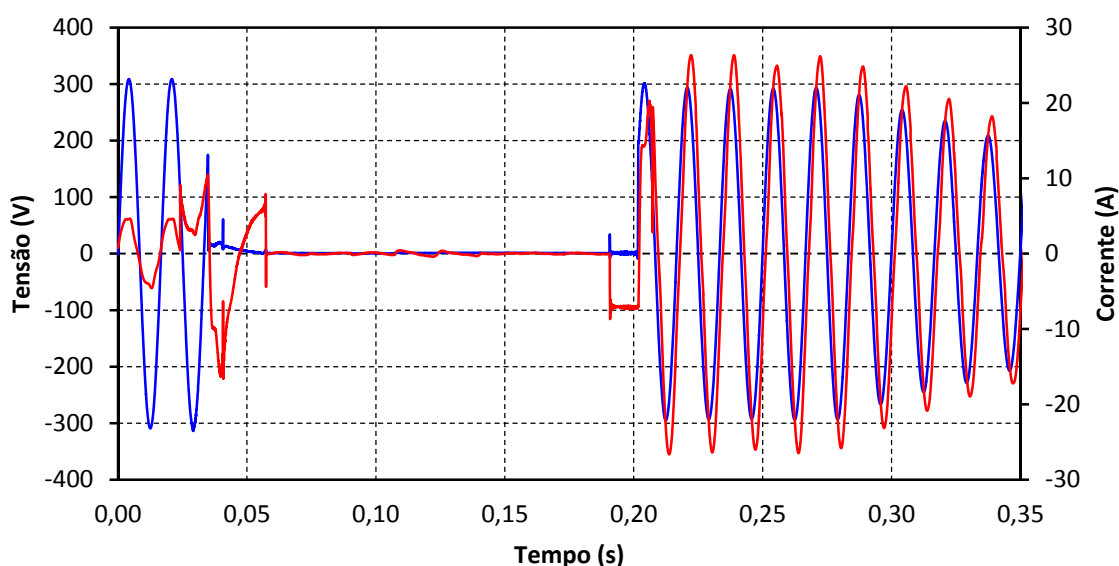
A tabela 4.5 sintetiza as principais grandezas obtidas e compara seus valores. Mais uma vez fica evidenciado que o modelo computacional se apresenta com uma boa aderência em relação ao funcionamento experimental do condicionador de ar.

Tabela 4.5 - Síntese das principais ocorrências observadas no Caso 3- Afundamento de tensão de 40% com duração de 10 ciclos.

		Tensão (V)			Corrente (A)		
		Exper.	Comput.	Erro	Exper.	Comput.	Erro
Valores de Pico		308,87	311,26	0,76%	17,51	16,25	7,19%
Valores eficazes	Pré-evento	218,76	220	0,56%	3,20	3,11	2,81%
	Pós-evento	212,89	220	3,23%	9,84	9,83	0,10%

4.4.3. Interrupção de tensão – Caso 4

De acordo com os padrões estabelecimentos pelos documentos normativos sobre a matéria, a categoria “interrupção” deve compreender reduções de tensões que conduzam a um valor final de 0,1 pu ou abaixo. Diante desta imposição, o caso aqui considerado contempla uma súbita queda da tensão de suprimento de tal forma que a mesma seja reduzida a zero durante 10 ciclos. Na figura 4.22 estão ilustradas as formas de onda da tensão de suprimento e da corrente total absorvida pelo componente durante o referido experimento.

**Figura 4.22 – Tensão de alimentação (azul) e corrente total (vermelha) – suprimento contendo uma interrupção de tensão de 0% com duração de 10 ciclos - resultado experimental - caso 4.**

Observa-se nos oscilogramas que, uma vez aplicada uma interrupção plena (0% de tensão) com duração de 10 ciclos, todas as correntes decrescem para um valor praticamente nulo, fato que implica no consequente desligamento do equipamento. É importante ressaltar que o desligamento se dá pela ausência de conjugado (tensão e correntes nulos), e não pela atuação da proteção. Uma vez restabelecida a tensão de suprimento, as correntes absorvidas aumentam até atingir valores da ordem da corrente de partida direta, na tentativa da retomada do funcionamento. Entretanto, devido ao fato que os lados de alta e baixa pressão do circuito do gás refrigerante não foram equalizados, ocorre um elevado conjugado resistente para o motor e por consequência elevadas correntes que promovem o desligamento do equipamento.

Obedecendo a mesma estratégia empregada para os demais casos, a figura 4.23 evidencia o desempenho do condicionador de ar para as mesmas condições anteriormente impostas, desta vez, empregando-se os recursos disponibilizados pelo ATP.

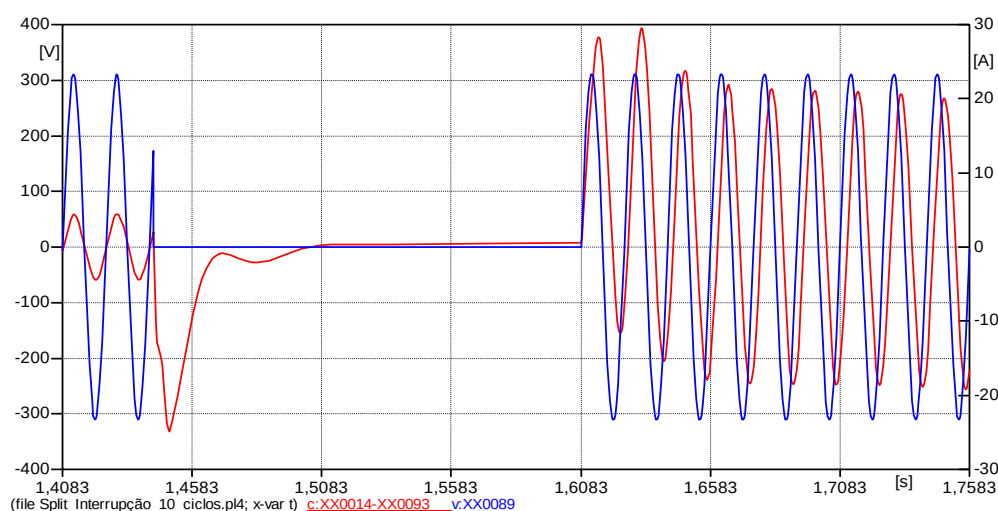


Figura 4.23 - Tensão de alimentação (azul) e corrente total (vermelha) – suprimento contendo uma interrupção de tensão de 0% com duração de 10 ciclos - resultado computacional caso 4.

Comparando-se as duas figuras anteriores ficam reforçadas, mais uma vez, a tese que o modelo matemático desenvolvido e o respectivo software para simulação operacional do equipamento sob a ação de um suprimento, apresentando para o caso 4, corresponderam às expectativas nos resultados.

Visando esclarecer o funcionamento mecânico do conjunto, os estudos computacionais permitiram, ainda, avaliar o comportamento do conjugado no eixo do motor (figura 4.24) e a velocidade do mesmo (figura 4.25).

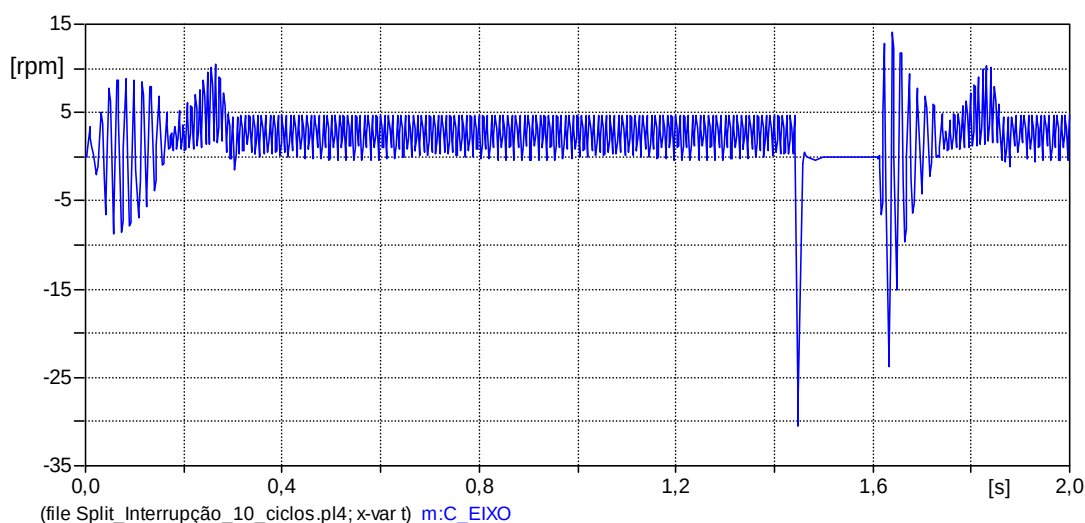


Figura 4.24 - Conjugado no Eixo (N.m) x Tempo (s)–suprimento contendo uma interrupção de tensão de 0% com duração de 10 ciclos–resultado computacional- caso 4.

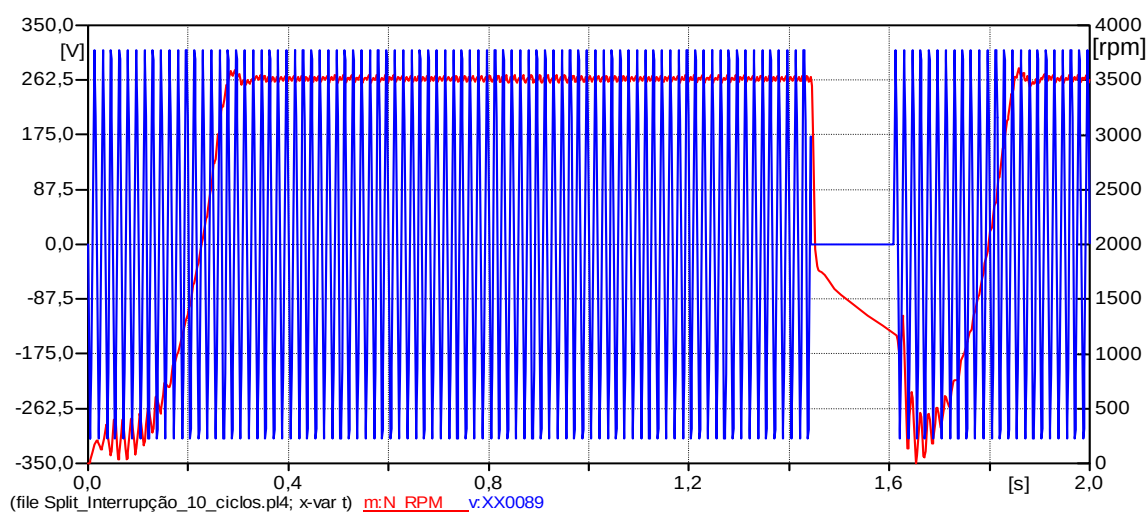


Figura 4.25 – Tensão (azul) e Velocidade no eixo (vermelho) - suprimento contendo uma interrupção de tensão de 0% com duração de 10 ciclos – resultado computacional caso 4.

Os valores eficazes para as tensões e correntes ao longo do processo encontram-se indicados nas figuras 4.26 (experimental) e 4.27 (computacional), as quais esclarecem sobre a boa correlação qualitativa e quantitativa obtidas até a retomada da tensão. De fato, as limitações físicas impostas pela fonte de tensão programável determinam que, sob elevados níveis de correntes, a tensão disponibilizada pela mesma não se mantém por conta da limitação de potência de 4,5 kVA.

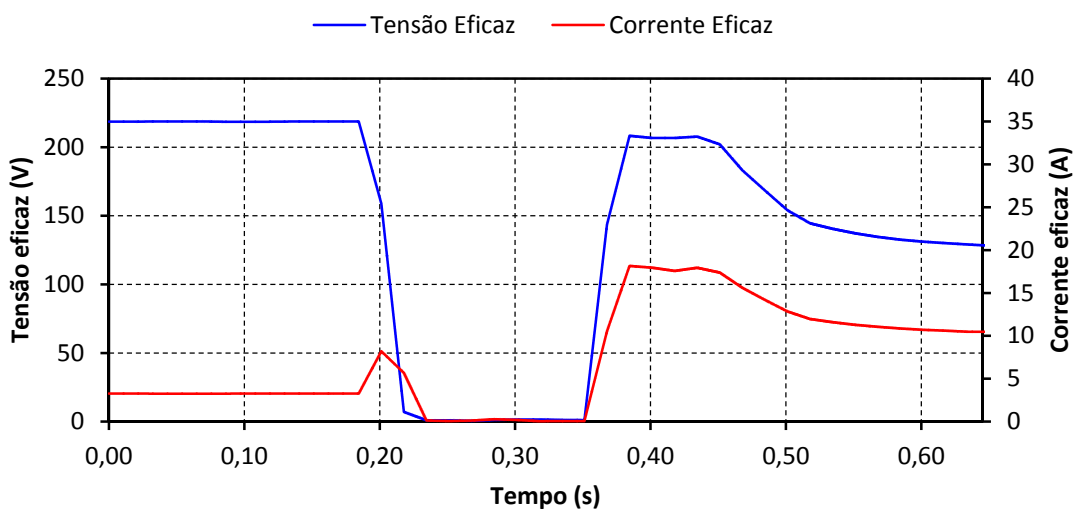


Figura 4.26 - Tensão de alimentação eficaz (azul) e corrente total eficaz (vermelho) – suprimento contendo uma interrupção de tensão de 0% com duração de 10 ciclos - resultado experimental - caso 4.

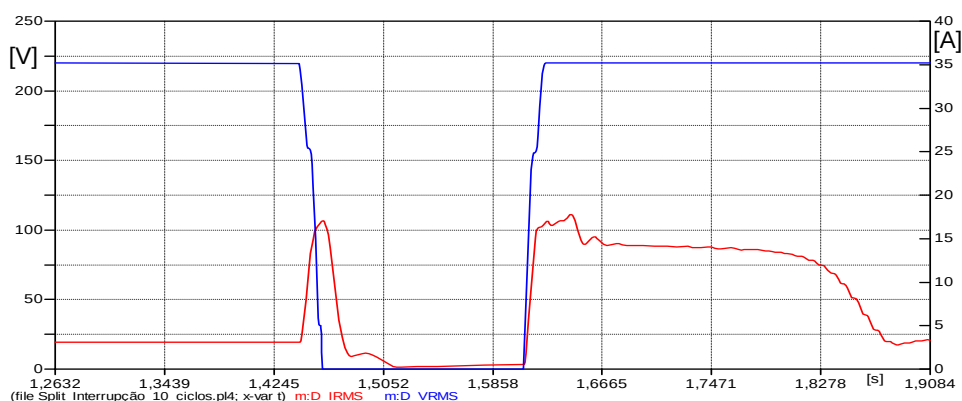


Figura 4.27 - Tensão de alimentação eficaz (azul) e corrente total eficaz (vermelho) – suprimento contendo uma interrupção de tensão de 0% com duração de 10 ciclos - resultado computacional - caso 4.

A Tabela 4.6 sintetiza os principais resultados numéricos obtidos de modo experimental e computacional. Novamente, os valores são indicativos que a proposta de modelagem aqui feita se apresenta condizente com as expectativas.

Tabela 4.6 - Síntese das principais ocorrências observadas no Caso 4: Interrupção do fornecimento de energia, tensão de 0% - 10 ciclos.

		Tensão (V)			Corrente (A)		
		Exper.	Comput.	Erro	Exper.	Comput.	Erro
Valores de Pico		0	0	0 %	25,88	27,03	4,25%
Valores eficaz	Pré-evento	218,7	220	0,55%	3,20	3,09	3,43%
	Durante	0	0	0%	0,31	0,36	13,8%

4.4.4. Flutuação de tensão – Caso 5

Um outro tipo de distúrbio frequentemente encontrado nas redes elétricas está intimamente associado com flutuações dos valores eficazes das tensões de suprimento em frequências perniciosas ao conforto visual humano. Neste sentido, considerou-se relevante a investigação da resposta do modelo desenvolvido diante destas condições operacionais.

Objetivando definir o padrão de flutuação a ser utilizado, os trabalhos experimentais e computacionais primaram pela aplicação dos níveis contemplados em [25], que se apresentam em conformidade com a recomendação da Comissão Eletrotécnica Internacional (IEC), em sua publicação IEC 61000-4-15 intitulada “*Flickermeter – Functional and Design Specifications*”. Ressalta-se que o caso selecionado para apresentação nesta dissertação consiste numa condição mais severa do que aquelas frequentemente encontradas nos sistemas elétricos. Esta escolha, no entanto, tem por finalidade intensificar e melhor ilustrar a resposta do equipamento quando operando com

suprimento contendo oscilações de tensão, visto que, para índices menores a influência seria ainda menos perceptível.

A figura 4.28 ilustra os oscilogramas da tensão e da corrente total, obtidos experimentalmente, para suprimento contendo flutuação de tensão com PST=5 (*Perception of Light Flicker in the Short Term*) e frequência da moduladora de 13,5 Hz.

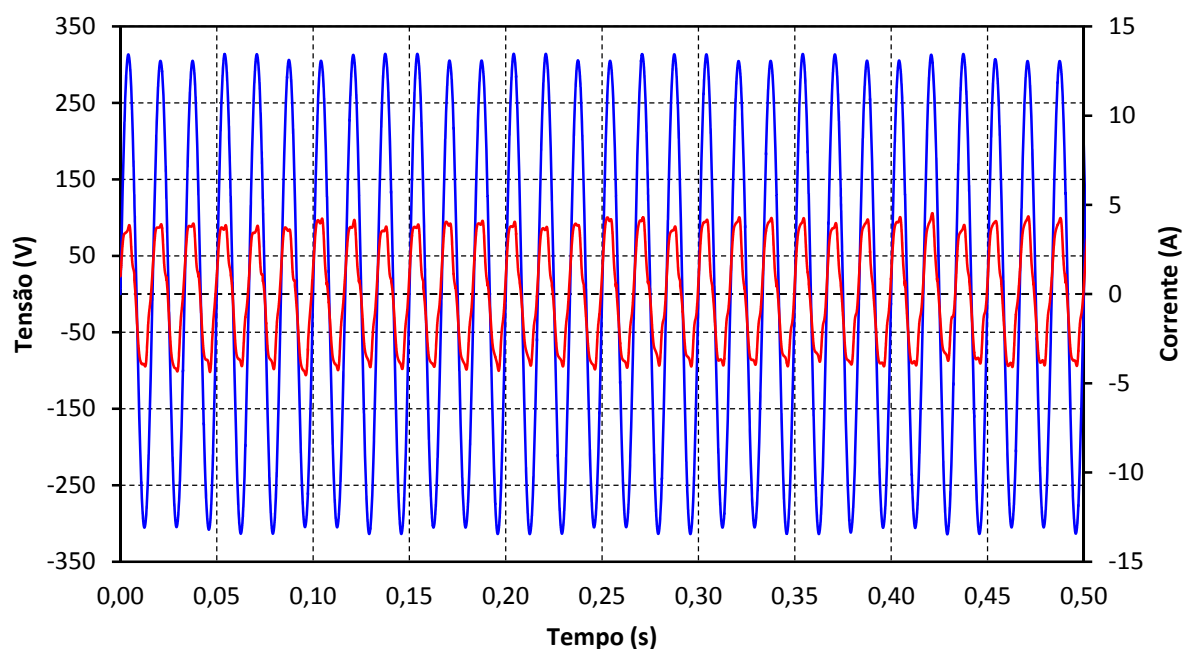


Figura 4.28 – Tensão de alimentação (azul) e corrente total (vermelho) – suprimento contendo flutuação de tensão: PST=5 e Frequência da moduladora de 13,5 Hz - resultado experimental - caso 5.

Os resultados computacionais equivalentes encontram-se indicados na figura 4.29.

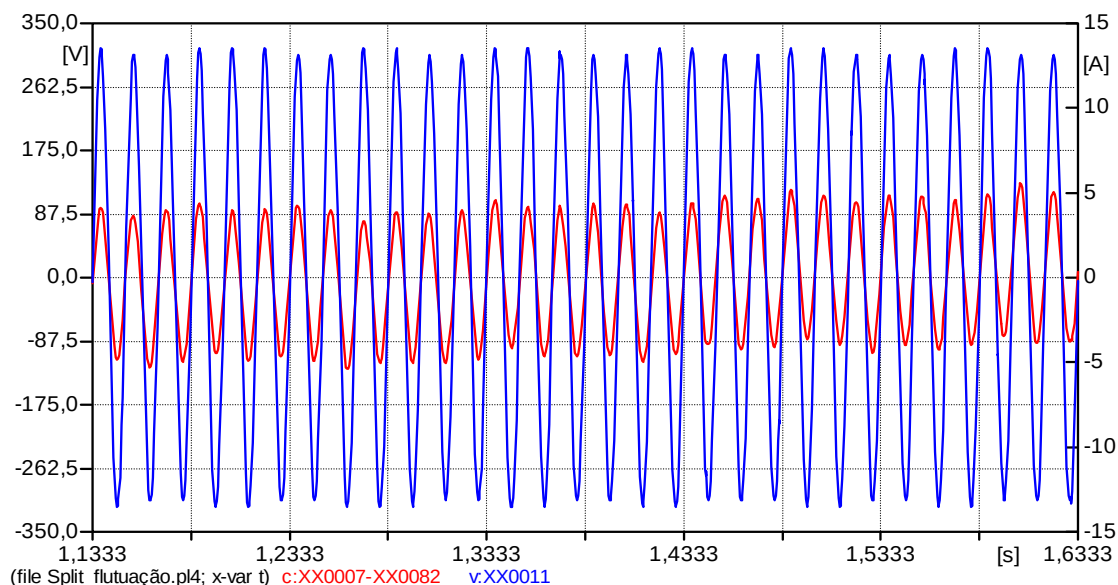


Figura 4.29 - Tensão de alimentação (azul) e corrente total (vermelho) – suprimento contendo flutuação de tensão: PST=5 e Frequência da moduladora de 13,5 Hz - resultado computacional - caso 5.

Analisando comparativamente os desempenhos experimentais com os computacionais constata-se que os picos de correntes foram, respectivamente, de 4,51 A e 5,03 A. No que tange aos demais aspectos, novamente fica ratificada uma boa concordância entre os resultados.

4.4.5. Tensão com distorção harmônica - Caso 6

Por fim, esta última situação encontra-se direcionada ao processo avaliativo da influência de uma tensão de suprimento contendo distorções harmônicas sobre o funcionamento do condicionador de ar Split. Muito embora um conjunto de investigações com distintos níveis de distorções tenham sido explorados, apenas um caso foi selecionado para apresentação e discussões.

A tabela 4.7 resume, para a situação escolhida, os valores percentuais dos harmônicos individuais de tensão, assim como o nível de distorção total (DTT) empregado.

Tabela 4.7 - Distorções Harmônicas Total e Individuais .

Distorção Harmônica					
Total (DTT)	Individual (DTI)				
20%	3º Ordem	5º Ordem	7º Ordem	11º Ordem	13º Ordem
	5%	5%	5%	3%	3%

As figuras 4.30 (experimental) e 4.31 (computacional) mostram os resultados obtidos para a tensão de suprimento e corrente total do equipamento em foco. O resultado direto do funcionamento do condicionador de ar sob a ação de um suprimento distorcido se faz presente, de forma significativa, na corrente total. Não obstante a deformação da forma de onda, não se constatou, no laboratório, qualquer anomalia funcional outra que não um aumento perceptível de ruído (vibração).

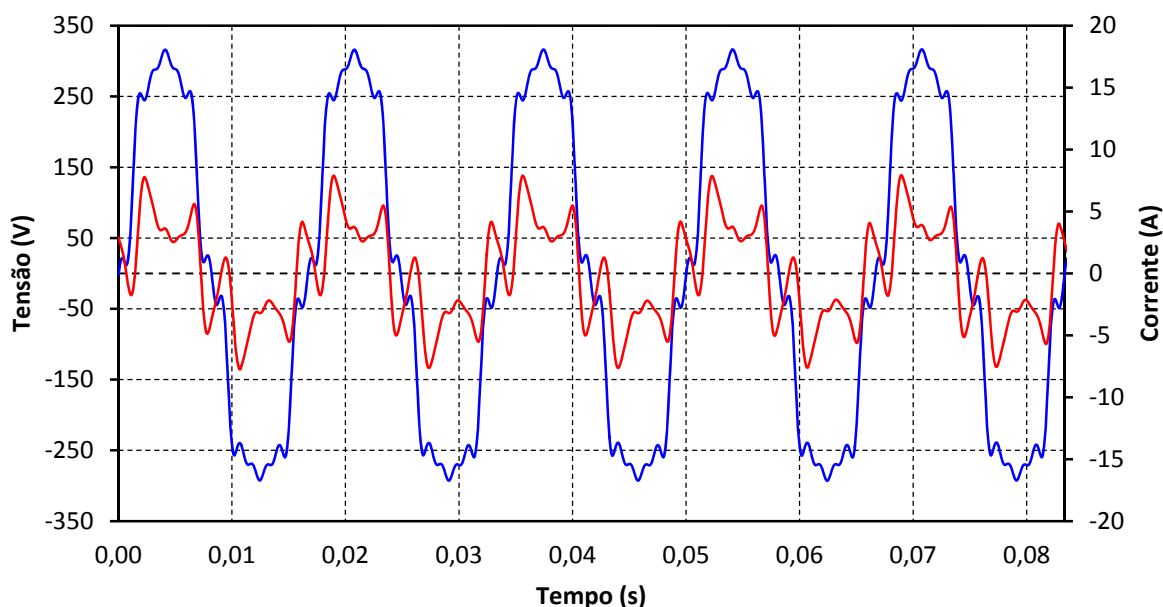


Figura 4.30 – Tensão de alimentação (azul) e corrente total (vermelho) – suprimento contendo distorção harmônica total (DTT) de 20% - resultado experimental - caso 6.

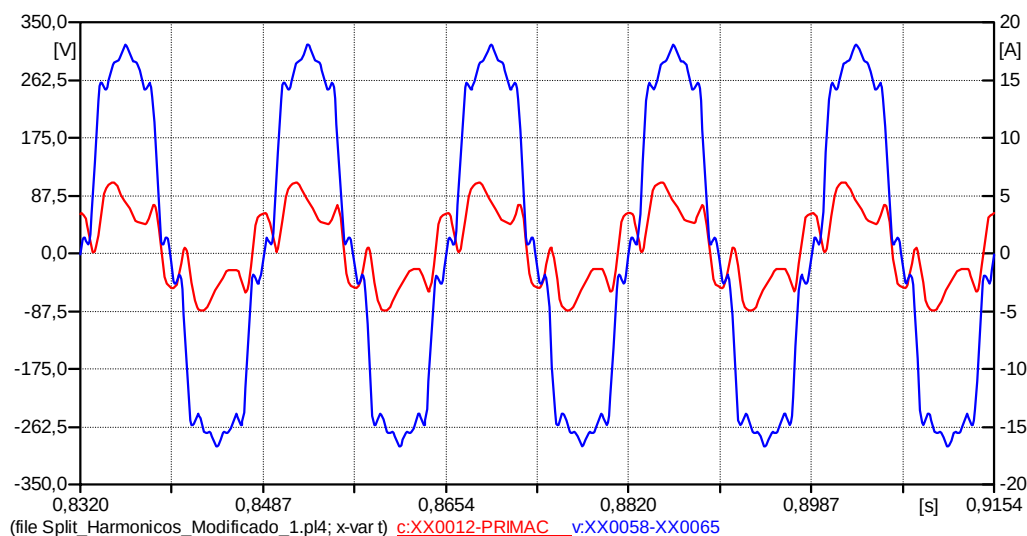


Figura 4.31 - Tensão de alimentação (azul) e corrente total (vermelho) – suprimento contendo distorção harmônica total (DTT) de 20% - resultado computacional - caso 6.

O valor eficaz da corrente, para o ensaio experimental, ficou em torno de 4,0 A enquanto que para o modelo computacional essa grandeza se apresentou em cerca de 3,5 A.

A figura 4.32 representa o espectro harmônico da corrente total para os trabalhos laboratoriais e computacionais.

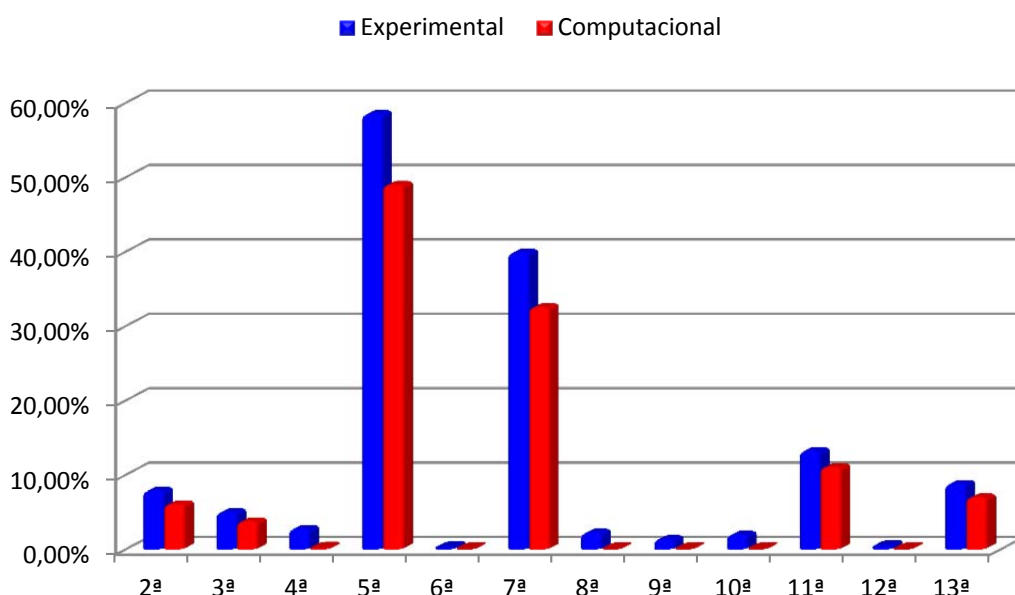


Figura 4.32 - Espectro harmônico da corrente de entrada do condicionador de ar - suprimento contendo contendo distorção harmônica total (DTT) de 20% - resultado experimental e computacional - caso 6.

Muito embora, algumas discrepâncias em relação aos valores percentuais possam ser observadas, no aspecto geral e, para o propósito deste trabalho, as harmônicas de ordem 5ª e 7ª, que se apresentam mais significativas, indicam uma boa concordância em seus valores. As divergências encontradas são aceitáveis e acredita-se serem atribuídas ao fato do modelo computacional não retratar os aspectos não lineares da saturação magnética e demais simplificações adotadas ao se modelar a placa eletrônica da evaporadora.

A tabela 4.8 resume as principais grandezas associadas com o caso em estudo e destaca as distorções harmônicas individuais e total associadas com a investigação em pauta.

Tabela 4.8 – Comparação das harmônicas de corrente entre os resultados experimentais e computacionais quanto aplicado uma distorção harmônica de tensão (DTT) de 20%.

	Experimental	Computacional	Erro
Corrente de Pico	6,67 A	6,17 A	7,49%
DTI	73,10%	60,53%	17,19%
I_h fundamental	3,1 A	2,92 A	5,8 %
I_h 2ª	0,266 A	0,172 A	-
I_h 3ª	0,159 A	0,093A	-
I_h 4ª	0,087 A	0	-
I_h 5ª	1,78 A	1,254 A	29,5%
I_h 7ª	1,12 A	0,702 A	37,2%
I_h 8ª	0,071 A	0	-
I_h 9ª	0,04 A	0	-
I_h 10ª	0,06 A	0	-
I_h 11ª	0,320 A	0,249 A	22,1%
I_h 13ª	0,28 A	0,20 A	28,5%

De forma a complementar o estudo do comportamento do condicionador de ar Split frente à uma alimentação contendo distorções, um outro caso foi estudado. Desta vez, o condicionador de ar, antes alimentado pela fonte programável HP, passou a ser suprido diretamente em 220 V por uma tomada advinda da concessionária CEMIG.

A figura 4.33 ilustra o oscilograma de tensão aplicada ao equipamento e a correspondente corrente total.

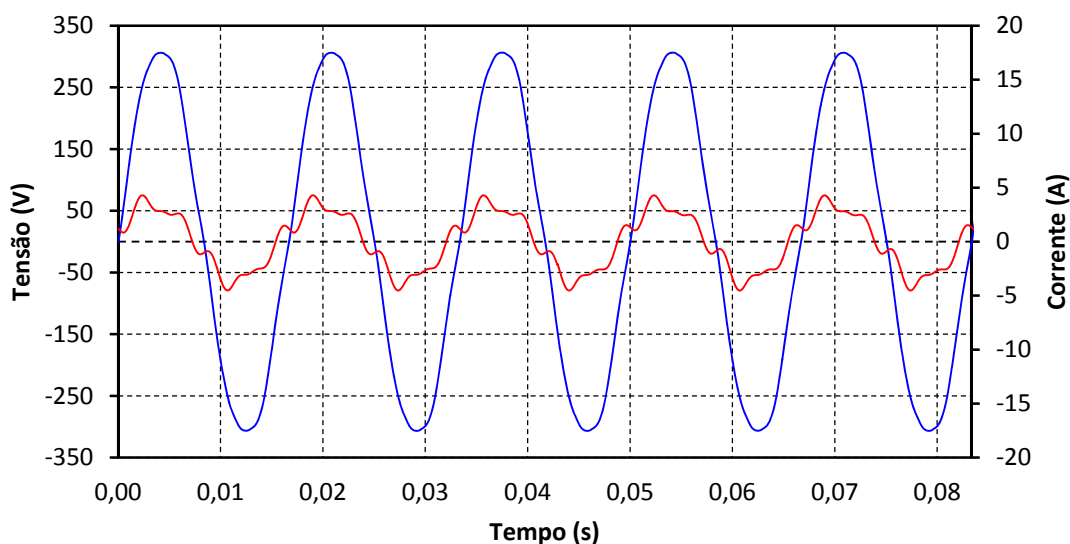


Figura 4.33 - Tensão de alimentação (azul) e corrente total (vermelho) – suprimento diretamente da concessionária local - resultado experimental - caso 6.

A tabela 4.9 apresenta as distorções harmônicas individuais e total presentes na rede de suprimento comercial utilizada.

Tabela 4.9 - Distorções Harmônicas Total e Individuais.

Distorção Harmônica							
Total (DTT)	Individual (DIT _h)						
3,10%	3º O.	5º O.	7º O.	9ª O.	11º O.	13º O.	15º O.
	0,14%	2,92%	1,01%	0,028%	0,23%	0,028%	0,08%

Empregando-se as mesmas distorções supra identificadas para o modelo computacional foram realizadas análises de desempenho correspondentes. Os resultados encontram-se indicados na figura 4.34.

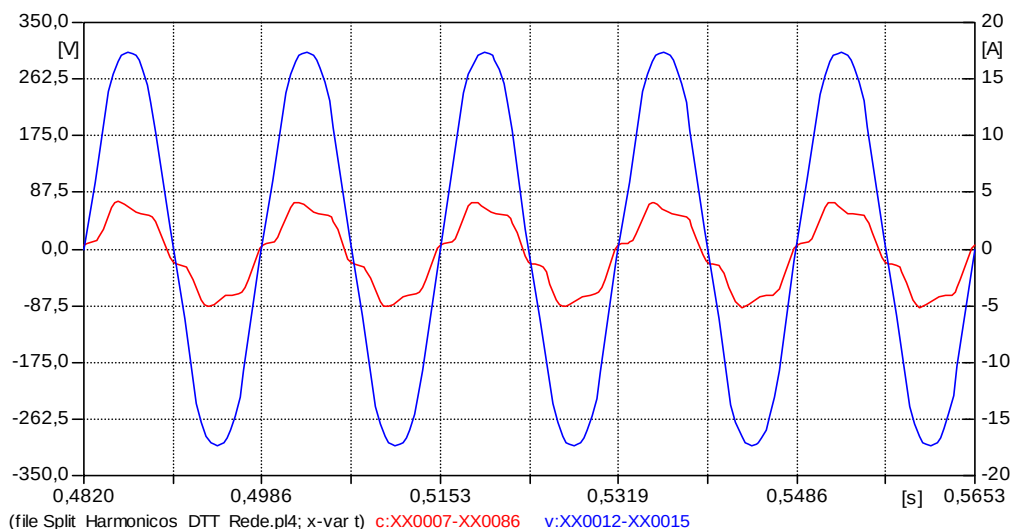


Figura 4.34 - Tensão de alimentação (azul) e corrente total (vermelho) – suprimento diretamente da concessionária local - resultado computacional - caso 6.

Mais uma vez, através de uma inspeção visual, fica evidenciada a grande concordância entre os resultados experimentais e computacionais para as tensões de suprimento e corrente de alimentação do equipamento.

As distorções harmônicas presentes nas correntes encontram-se identificadas na figura 4.35. Mais uma vez, comparando-se os resultados experimentais e computacionais, fica ratificada a consistência do modelo proposto e implementado no simulador ATP, exceto pelas discrepâncias entre algumas componentes não características, a exemplo da 2ª. e outras. Estas, entretanto, não seriam esperadas e devem ser interpretadas como ordens espúrias do processo de medição.

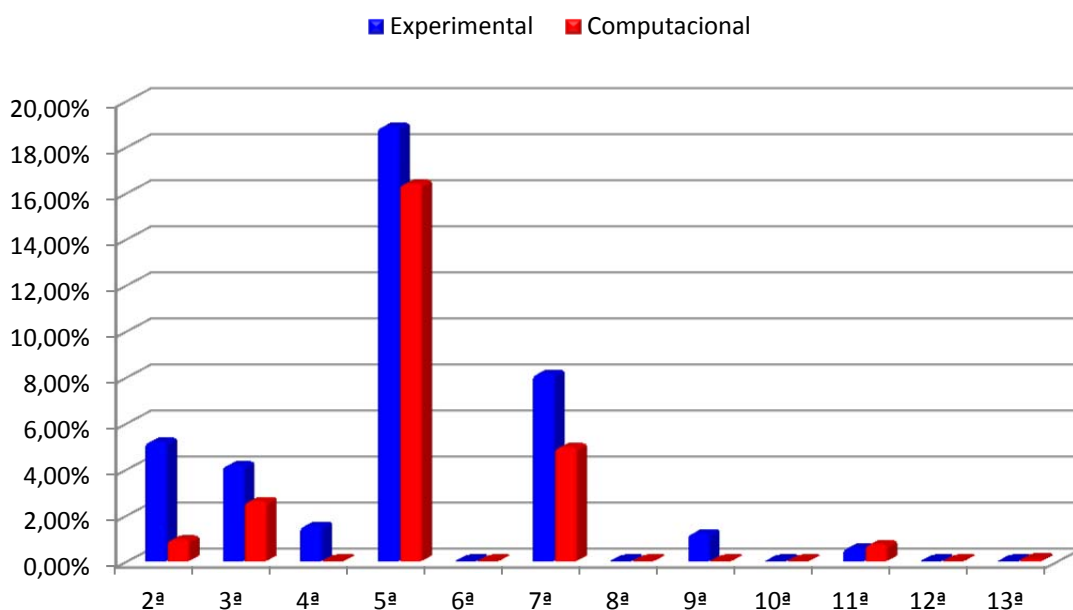


Figura 4.35 - Espectro harmônico da corrente de entrada do condicionador de ar - suprimento diretamente da concessionária local - resultado experimental e computacional - caso 6.

4.5. Considerações Finais

Os trabalhos contemplados neste capítulo focaram, sobretudo, em atividades destinadas ao processo de validação do modelo proposto e simulado para um condicionador de ar tipo Split. Neste contexto foram descritos, em um primeiro momento, a concepção física para a estrutura experimental estabelecida e identificados os componentes básicos que perfazem o arranjo laboratorial o qual, em consonância com o exposto, permitiram a realização de estudos operativos do equipamento sob condições ideais e não ideais para a tensão de suprimento.

Uma vez definidos os recursos ficou esclarecida a potencialidade do laboratório para representar os distúrbios comumente presentes no suprimento, e assim, a viabilidade da realização de ensaios experimentais envolvendo situações típicas de campo, a exemplo de: elevações súbitas de tensão; afundamentos de tensão de curta duração; interrupções; flutuações e distorções

harmônicas. Cada uma das condições impostas produziu um conjunto de resultados classificados na forma de casos, como ressaltado no texto. De fato, estes representam uma amostra de uma grande gama de investigações conduzidas para uma melhor consolidação das constatações aqui feitas.

Os fundamentos que nortearam o processo comparativo entre os desempenhos do equipamento em teste, no que se refere aos seus resultados experimentais e respectivas respostas computacionais, se apoiaram nas principais grandezas passíveis de medição no ambiente laboratorial. Neste particular, para cada caso utilizado, foram consideradas as tensões de alimentação do condicionador de ar e respectiva corrente, ao longo do período de investigação. Para cada uma delas, além dos perfis dos valores eficazes para cada instante, foram também adicionados os oscilogramas e extraídos os valores de pico e outros dados importantes para uma pronta correlação entre o funcionamento real do produto e o processo de simulação computacional proposto.

Também, a título de complementação, algumas grandezas mecânicas foram adicionadas ao texto, muito embora o reconhecimento da ausência de um banco de dados experimental para uma análise comparativa.

Por fim, os estudos aqui realizados evidenciaram uma boa aderência entre o funcionamento do condicionador de ar no ambiente laboratorial com aqueles derivados da simulação do equipamento na plataforma ATP. Maiores evidências sobre esta afirmativa podem ser verificadas através de inspeções visuais e qualitativas entre as tensões e correntes para cada caso considerado, e ainda pela comparação quantitativa entre as respostas obtidas por um e outro meio utilizado nesta pesquisa. Vale destacar que tal similaridade possui, como seria esperado, forte correlação com a qualidade dos parâmetros fornecidos para a modelagem. Disto fica claro que a busca por modelos mais completos, com a inclusão do efeito da saturação para os motores e outras melhorias, certamente, irão

contribuir para uma melhor qualidade da representação computacional do produto em pauta.

CAPÍTULO 5

IMPLEMENTAÇÃO DO MODELO COMPUTACIONAL DO CONDICIONADOR DE AR SPLIT NO APR E ESTUDOS DE DESEMPENHO

5.1. Considerações Iniciais

Os fenômenos responsáveis pelas ocorrências que justificariam os possíveis nexos causais em relação aos PIDs podem se apresentar como advindos de diversas fontes responsáveis por distintos distúrbios típicos de rede. É o caso da incidência de descargas atmosféricas, curtos-circuitos e atuação das proteções, manobras de energização e desenergização, etc.. Tais fenômenos, uma vez manifestados num determinado ponto físico de uma rede elétrica são, na sequência, propagados pelo complexo de transmissão e distribuição até os terminais de suprimento de um dado consumidor. Nestas condições, os impactos dos fenômenos sobre as tensões de entradas poderiam, ou não, ocasionar danos nos equipamentos internos à instalação e assim surge a questão central focada nesta pesquisa.

Visando atender a tais objetivos, como já mencionado na seção introdutória desta dissertação, vários esforços passados conduziram, na atualidade, a um produto computacional denominado por APR, o qual se apresenta como uma ferramenta com grandes potencialidades para dirimir dúvidas sobre a correlação entre esforços dielétricos e térmicos e respectivos limites de suportabilidade dos mais distintos produtos existentes no mercado.

Assim sendo, uma vez desenvolvida, implementada e validada a modelagem de um novo produto, a saber, o condicionador de ar tipo Split, nesta unidade são sintetizadas ações direcionadas para a inserção do mesmo no mencionado aplicativo APR e, complementarmente, a realização de testes de desempenho da ferramenta obtida, visando, sobretudo, evidenciar o uso do novo recurso disponibilizado em sua biblioteca de equipamentos.

5.2. Aplicativo computacional APR

A estrutura do APR prima por ações, configurações e modelos matemáticos que minimizam a necessidade de conhecimentos específicos do usuário e a possibilidade de ocorrência de erros numéricos durante o processamento das simulações dos casos estudados. Vislumbrando um programa computacional de fácil manuseio específico para a análise de consistência de pedidos de ressarcimento, a estrutura do aplicativo APR foi desenvolvida de modo tal a contemplar as seguintes premissas:

- Permitir uma interação amigável entre o usuário e o ATP;
- Viabilizar a caracterização da rede elétrica através da configuração e edição dos parâmetros elétricos da mesma ou por acesso a banco de dados;
- Disponibilizar os modelos dos componentes eletroeletrônicos alvo das avaliações;

- Oferecer as fontes responsáveis por distúrbios típicos em redes de distribuição;
- Realizar a montagem e arquivamento dos dados de entrada para a execução do ATP;
- Executar e, posteriormente, importar os arquivos de saída do ATP;
- Fazer o tratamento dos resultados para fornecer subsídios técnicos que permitam a tomada de decisão e emissão do parecer final sobre o pedido de ressarcimento.

Baseado nestas condições, o diagrama ilustrado na figura 5.1 apresenta a estrutura do sistema desenvolvido e as principais funções a serem desempenhadas pelo APR.

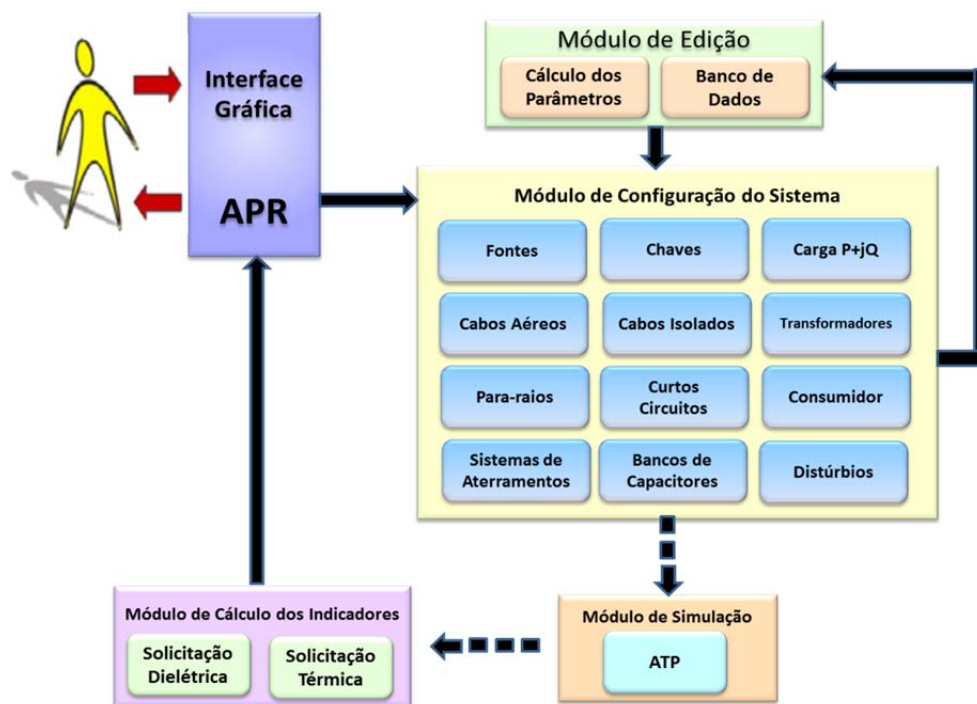


Figura 5.1 - Estrutura do aplicativo APR.

No diagrama de blocos da figura anterior, as setas contínuas representam ações diretas do operador através da interface gráfica. Por outro lado, as setas pontilhadas indicam processos de comunicação interna do *software*, independentes de ações interventoras do usuário. Desta forma, o usuário

somente é responsável pela execução dos módulos para configuração e edição do sistema e pela visualização dos resultados.

Na sua essência, o recurso computacional em questão busca reproduzir, propagar e correlacionar os distúrbios factíveis de manifestação nas redes elétricas e seus impactos sobre os equipamentos alimentados pelos alimentadores de distribuição, ou outros. Neste sentido, ocorrências do tipo: descargas atmosféricas, curtos-circuitos, atuação dos dispositivos de proteção, manobras diversas, etc., podem ser realizados através de uma base computacional sólida e amplamente aceita pelas empresas de energia elétrica do Brasil e do mundo. Por fim, os impactos dos fenômenos são propagados até o ponto de conexão do consumidor reclamante onde os equipamentos danificados são representados através de modelos compatíveis com cada produto considerado. Correlacionando as tensões e correntes incidentes em termos de esforços dielétricos e térmicos, torna-se então possível, através da comparação destas solicitações com os padrões de suportabilidade dos dispositivos, constatar ou não a existência do nexo causal e a emissão de um parecer conclusivo sobre a solicitação feita. Maiores detalhes sobre o mencionado software podem ser encontrados em [26;27].

Por fim, neste software, foram realizados trabalhos direcionados para a inserção do modelo desenvolvido para o condicionador de ar tipo Split, através dos seguintes passos:

- Criação de um cartão que incorpora detalhes da programação realizada pela rotina *MODELS*;
- Criação de um cartão que estabeleça uma interligação do circuito elétrico montado no ATPDraw com o cartão da *MODELS* descrito acima;
- Promover a migração do modelo computacional desenvolvido no ambiente ATP para a base apropriada do aplicativo APR.

Cumpridas tais etapas obteve-se uma nova versão do software APR, o qual passou a contar com um novo produto para realização dos estudos. Assim sendo, o aplicativo, que antes contava com 33 produtos, passou a disponibilizar 34 equipamentos distintos para o processo de análise e emissão de parecer sobre pedidos de indenização por danos elétricos. A figura 5.2 ilustra a janela do aplicativo APR destacando a inserção do condicionador de ar Split dentre as opções já existentes de equipamentos.

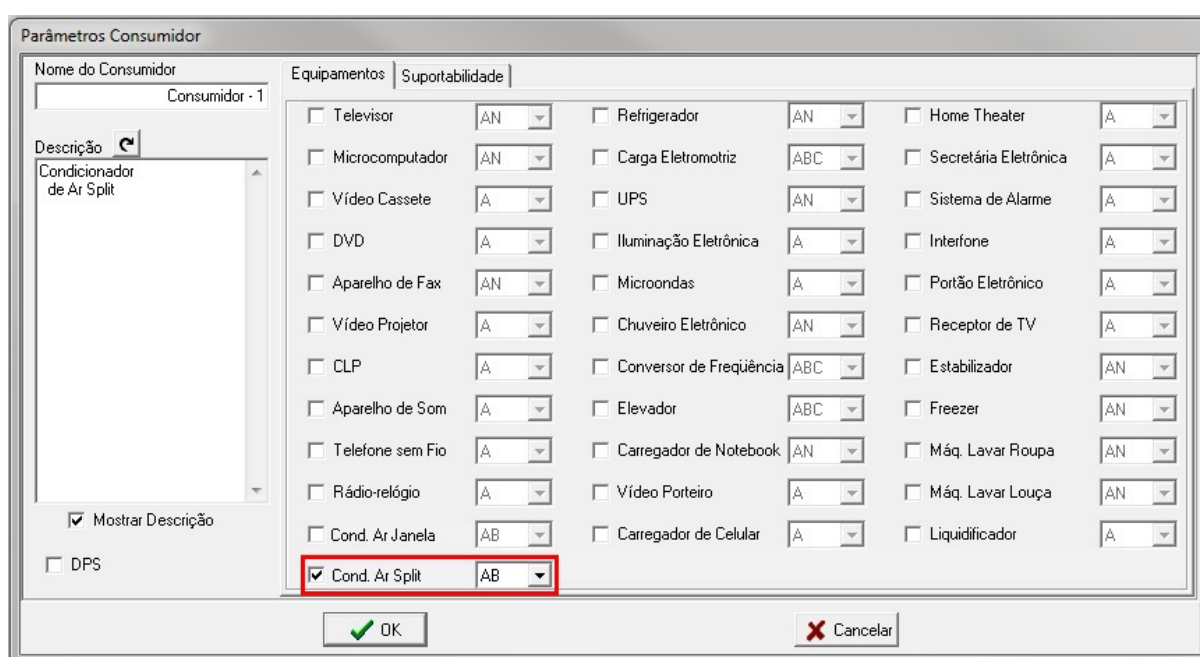


Figura 5.2 - Interface do aplicativo APR destacando a inserção do novo equipamento disponível dentre as opções já existentes.

5.3. Estudo de casos

Objetivando avaliar o desempenho da versão modificada do Aplicativo APR, vários estudos relacionados com o desempenho operacional do novo equipamento inserido foram realizados. Destes, para fins do presente trabalho, optou-se pela descrição e discussão dos casos a seguir identificados, os quais almejam evidenciar a aplicabilidade da ferramenta quanto ao processo de análise de PIDs envolvendo um dado complexo elétrico de distribuição, distintas

situações anômalas manifestadas na rede, e seus respectivos impactos sobre um aparelho condicionador de ar tipo Split.

5.3.1. Identificação do alimentador

A rede de distribuição empregada encontra-se identificada na Figura 5.3 e representa um complexo real de uma distribuidora de energia elétrica. Ao final do diagrama constata-se um ícone representativo da residência do consumidor, onde se faz presente o equipamento contemplado na análise. Para todas os casos investigados, situações estas hipoteticamente adotadas, utilizou-se o equipamento suprido em 220V e ligado entre as fases A e B.

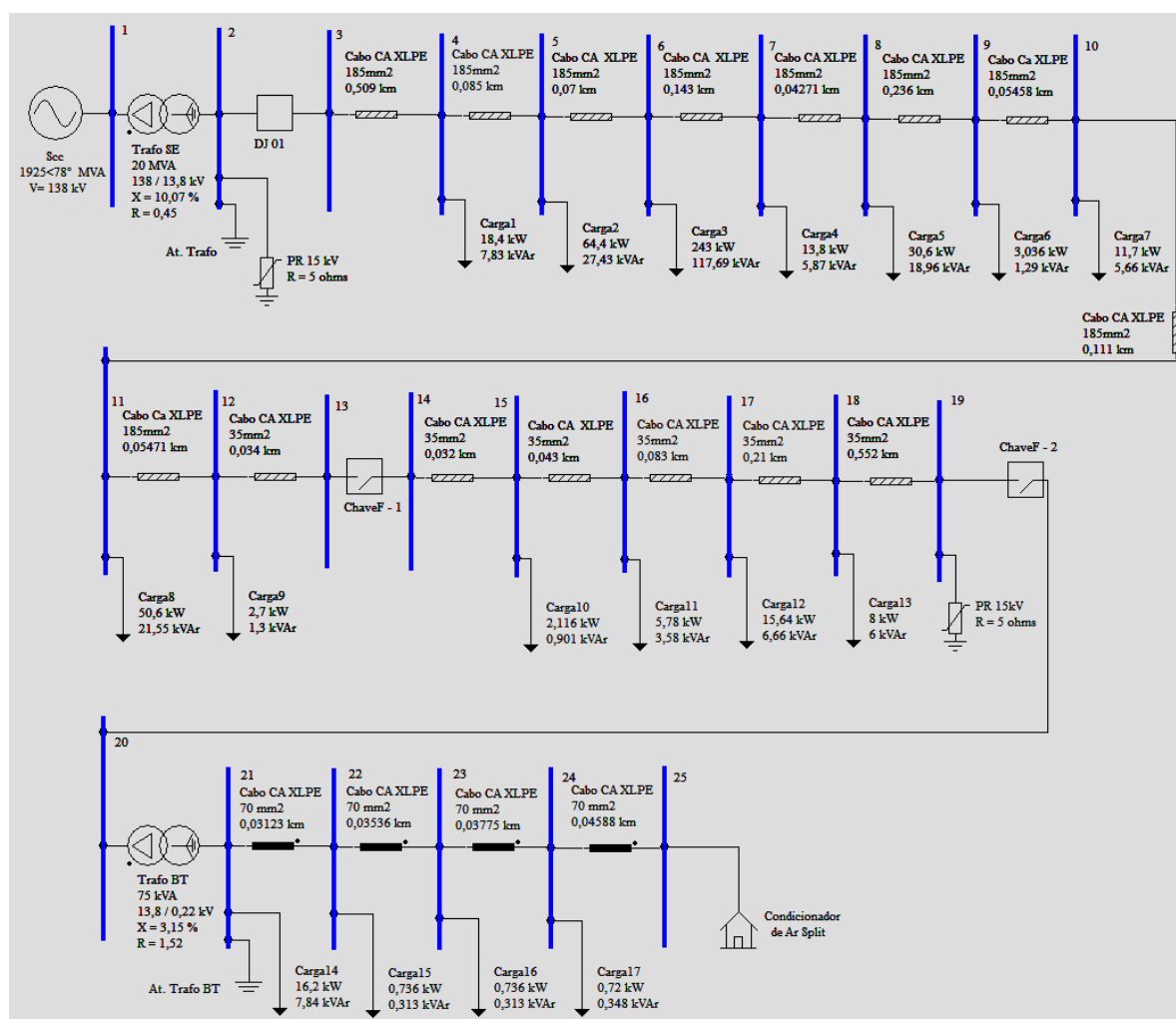


Figura 5.3 – Rede de distribuição utilizada para os estudos de desempenho do aplicativo APR.

A tabela 5.1 fornece os parâmetros representativos da rede elétrica selecionada.

Tabela 5.1 - Dados dos componentes da rede de distribuição utilizada nos estudos.

CONCESSIONÁRIA		
Tensão Nominal	138 kV	
Potência de curto-circuito	1925<78° MVA	
TRANSFORMADOR DA SE		
Potência	20 MVA	
Tensões AT/BT	138 / 13,8 kV	
Tipo de conexão	Delta-Estrela	
Reatância Indutiva	10,07%	
Resistência	0,45%	
TRANSFORMADOR DE DISTRIBUIÇÃO		
Potência	75 kVA	
Tensões AT/BT	13,8 / 0,22 kV	
Tipo de conexão	Delta-Estrela	
Reatância Indutiva	3,15%	
Resistência	1,52%	
CONDUTORES	Rp(Ω/Km)	XLp(Ω/Km)
Cabo CA XLPE 185 mm ²	0,2806	0,2090
Cabo CA XLPE 70 mm ²	1,7471	0,8699
Cabo CA XLPE 35 mm ²	1,4772	0,5195
CONSUMIDOR		
Equipamento	Condicionador de Ar Split	

Quanto aos casos estudados, muito embora tenha sido considerado um número superior de investigações, para fins deste trabalho apenas 4 (quatro) situações foram selecionadas para apresentação e discussão, como destacado na Tabela 5.2.

Tabela 5.2 – Caso empregados para a análise do desempenho do APR com o condicionador de ar Split sob a ação de distúrbios no suprimento.

Casos selecionados para avaliar o desempenho do condicionador de ar Split no APR diante de distúrbios típicos	
Caso	Característica de operação da rede de distribuição
1	Condição ideal de operação
2	Ocorrência de uma descarga atmosférica
3	Ocorrência de religamento tripolar em 3 estágios
4	Ocorrência de um curto-circuito

5.3.2.Caso 1- Condição ideal de operação

Esta primeira situação destina-se a avaliação da operação do equipamento sob condições ideais e nominais de suprimento. Os resultados aqui sintetizados constituem-se numa base de referência para o estabelecimento de termos comparativos, quando necessário, para o processo avaliativo de desempenho do condicionador de ar diante de condições anômalas para a rede de alimentação.

As figuras 5.4 e 5.5 mostram, respectivamente, as formas de onda da tensão e da corrente na entrada do aparelho condicionador de ar alimentado por uma tensão ideal de valor eficaz correspondente a 220 V.

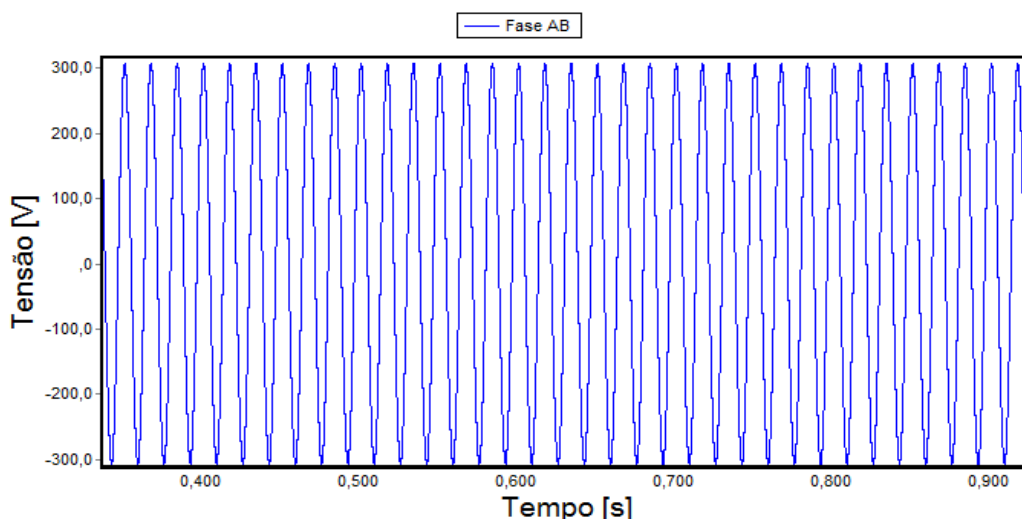


Figura 5.4 - Tensão de alimentação – condições ideais de operação - Caso 1

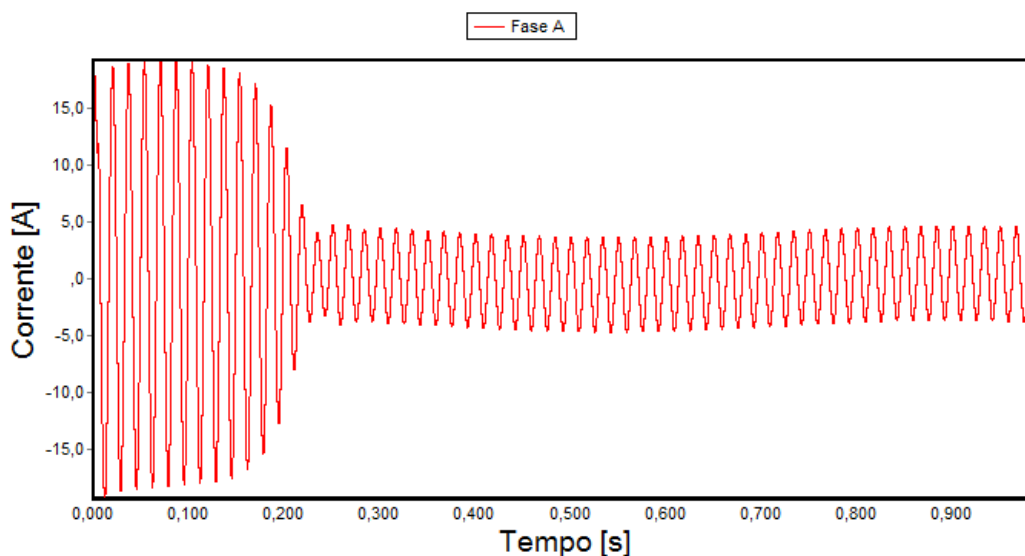


Figura 5.5 - Corrente de alimentação – condições ideais de operação - Caso 1

Os resultados anteriormente obtidos são, na sequência, comparados com os limites de suportabilidade dielétrica e térmica do condicionador de ar. É evidente que, a situação em análise corresponde ao funcionamento normal do produto, portanto, não é de se esperar qualquer violação dos limites de tensão e corrente admissíveis pelo equipamento.

A correlação entre os esforços dielétricos e térmicos e os padrões de tolerância dos equipamentos, como tradicionalmente feito através do aplicativo APR, consiste numa comparação entre os níveis de tensão e corrente na entrada do aparelho em relação a curvas de suportabilidade do mesmo. Neste sentido, em consonância com [28], até o presente momento, não foram encontrados resultados de investigações que estabeleçam propostas para os limites de tolerância para os mais distintos equipamentos que perfazem a linha branca de produtos. À luz deste fato, as curvas utilizadas para fins deste trabalho correspondem aquelas fornecidas em [29], a qual se refere ao desempenho laboratorial obtido para refrigeradores, portanto, fica aqui registrada a fragilidade do processo diante da ausência de um banco de informações diretamente aplicável ao dispositivo em pauta [30].

As comparações das solicitações dielétricas e térmicas impostas pela tensão e corrente de suprimento do equipamento com as respectivas curvas de suportabilidade adotadas encontram-se nas figuras 5.6 e 5.7. Como esperado, não há violações dos limites preconizados.

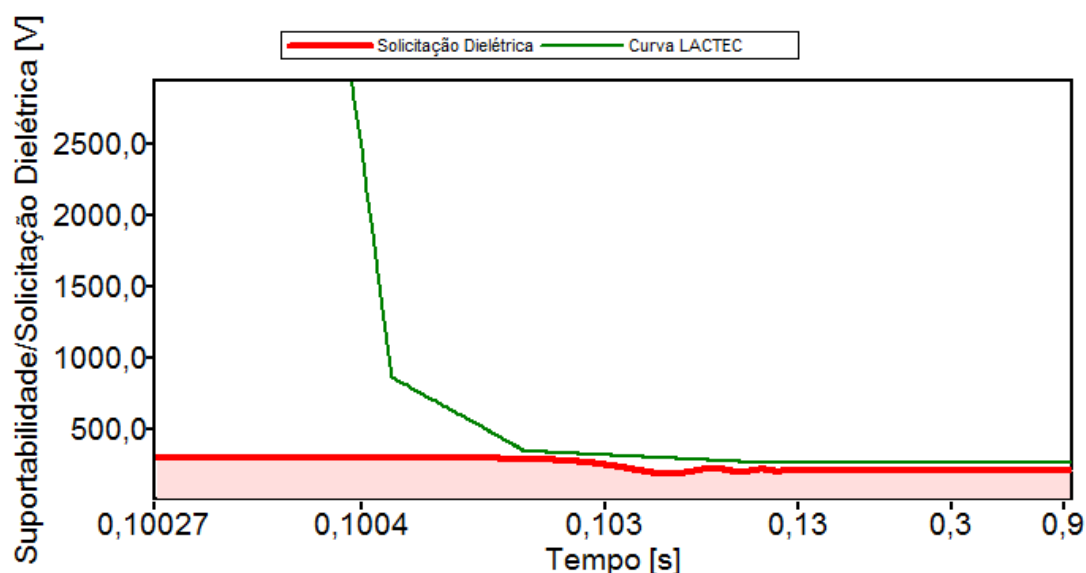


Figura 5.6 – Comparação entre a solicitação dielétrica imposta e a curva de suportabilidade adotada - condições ideais de operação - Caso 1

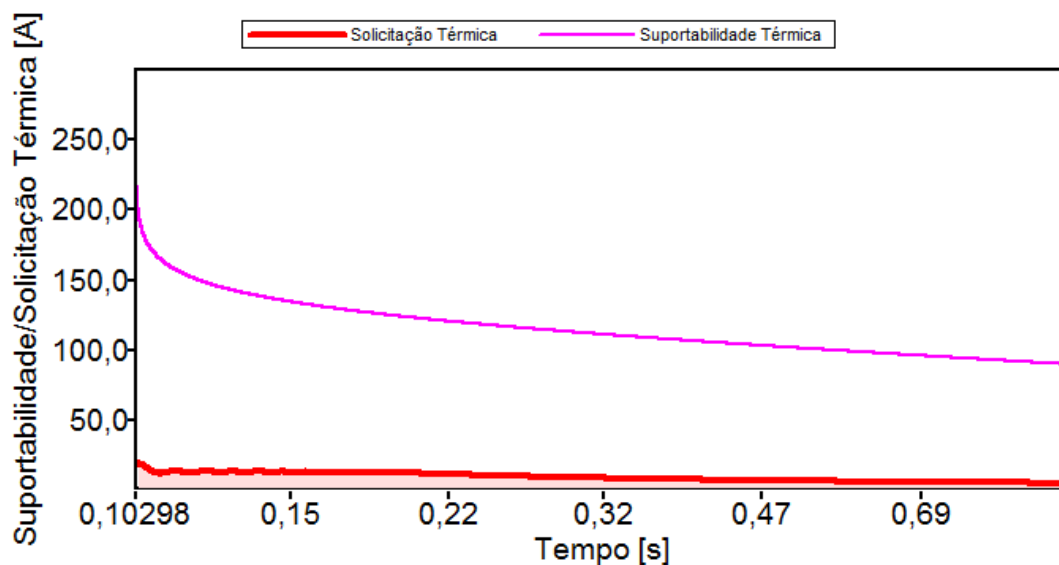


Figura 5.7 - Comparação entre a solicitação térmica imposta e a curva de suportabilidade adotada - condições ideais de operação - Caso 1

5.3.3.Caso 2 - Descarga Atmosférica

A figura 5.8 mostra a configuração utilizada para a inserção da descarga atmosférica no aplicativo computacional em uso.

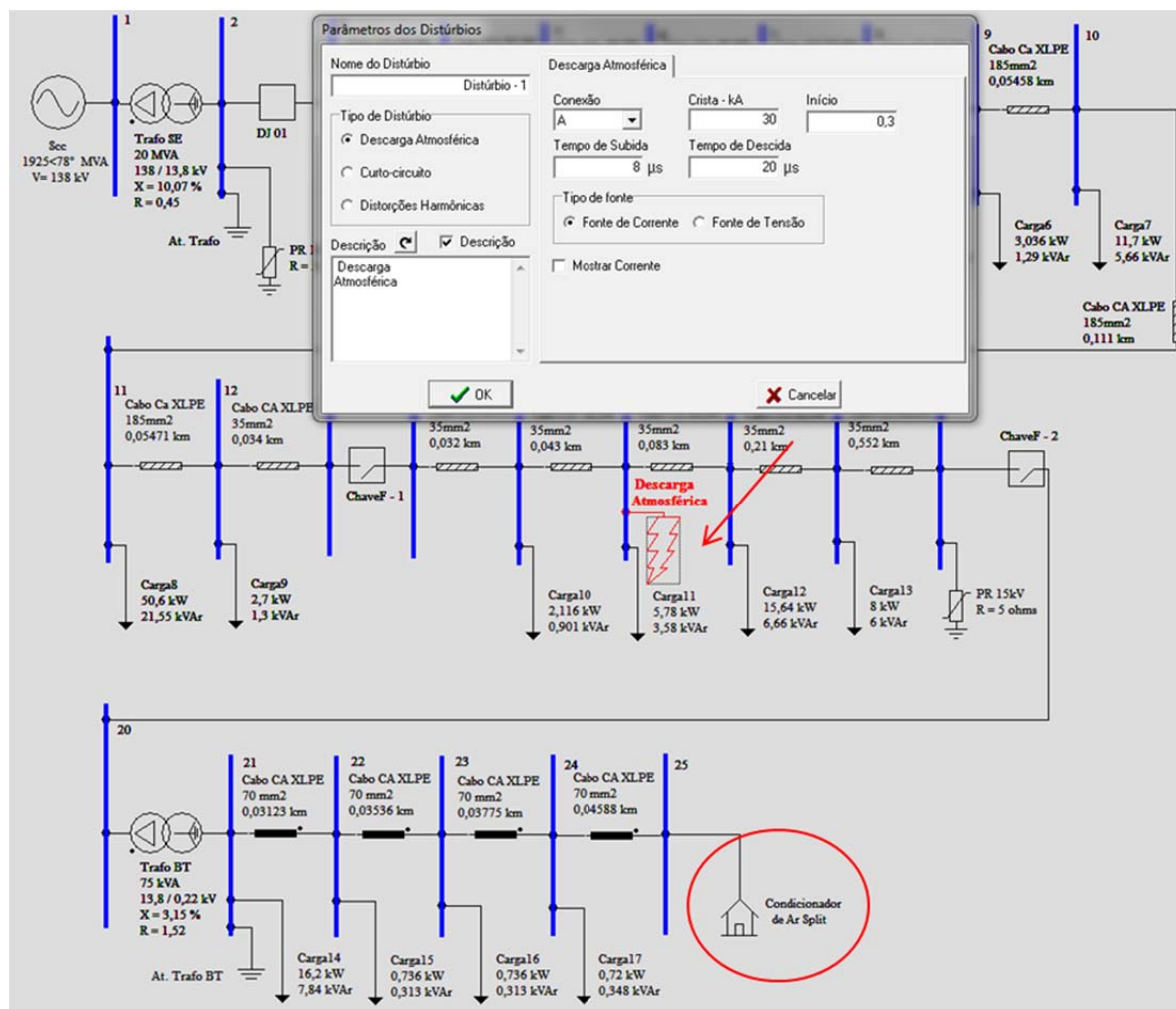


Figura 5.8 – Inserção da descarga atmosférica no APR – Caso 2

Como ilustrado, o fenômeno se apresenta na forma de uma corrente impulso de valor de pico igual a 30 kA, tempos de subida e descida de 8 e 20 µs, respectivamente. A incidência ocorre em 300 ms contados a partir do início da simulação.

As Figuras 5.9 e 5.10 mostram a tensão e corrente na entrada do condicionador de ar.

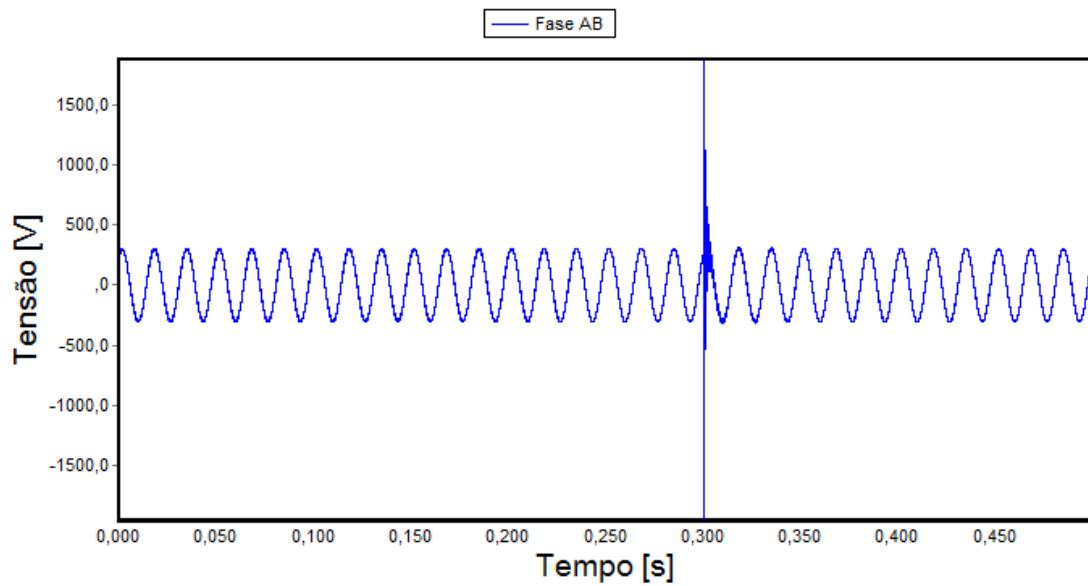


Figura 5.9 - Tensão de alimentação – com incidência de descarga - Caso 2

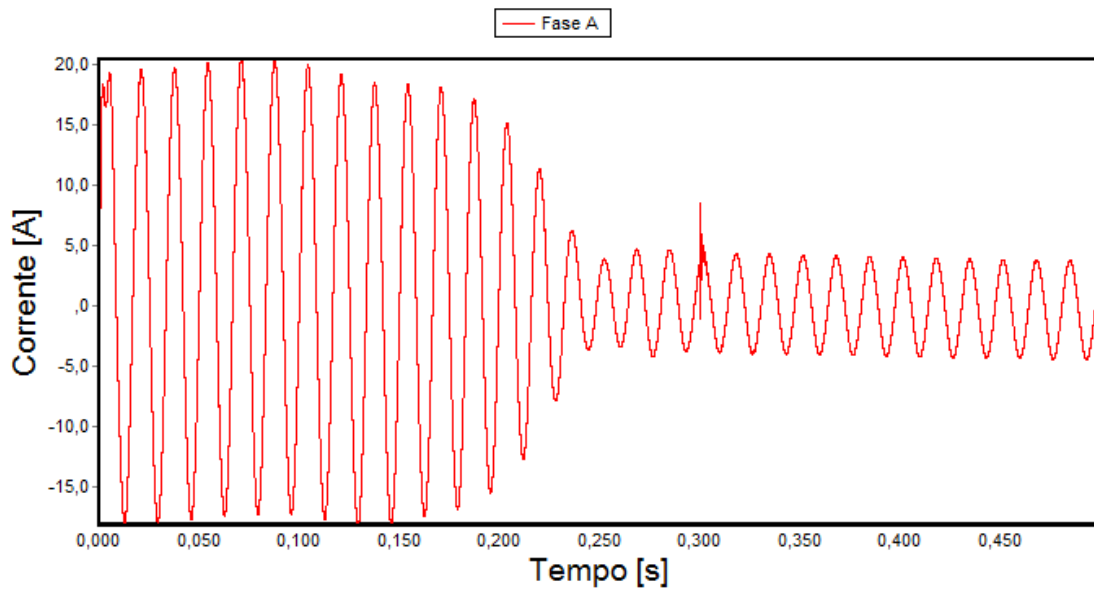


Figura 5.10 - Corrente de alimentação – com incidência de descarga - Caso 2.

As figuras 5.11 e 5.12 fornecem, respectivamente, as solicitações dielétricas e térmicas impostas pelo distúrbio ocorrido e as respectivas curvas de suportabilidade utilizadas.

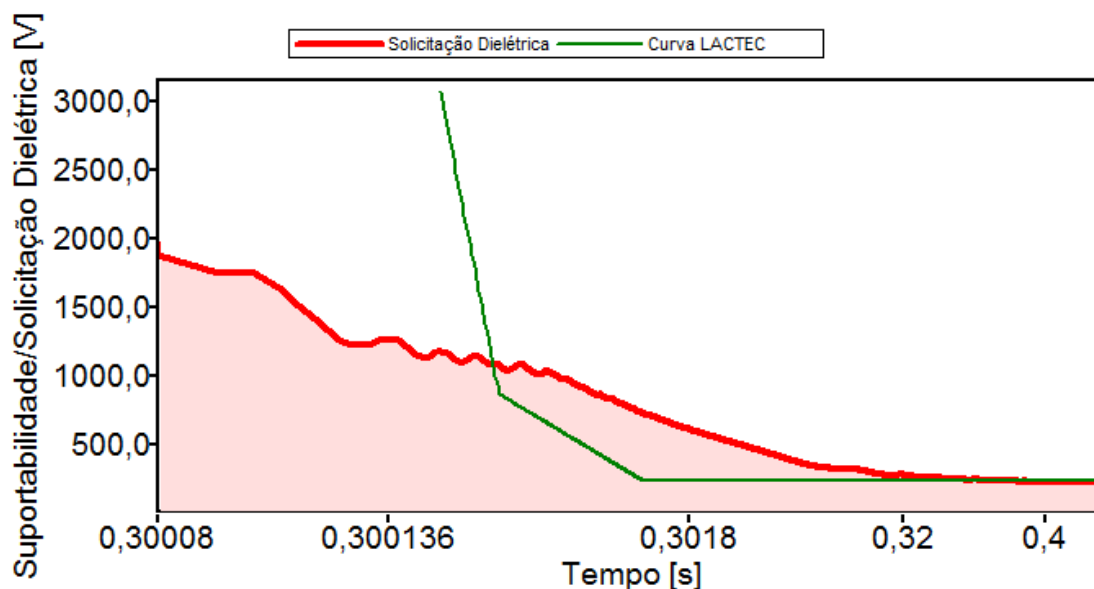


Figura 5.11 - Comparação entre a solicitação dielétrica imposta e a curva de suportabilidade adotada – descarga atmosférica- Caso 2.

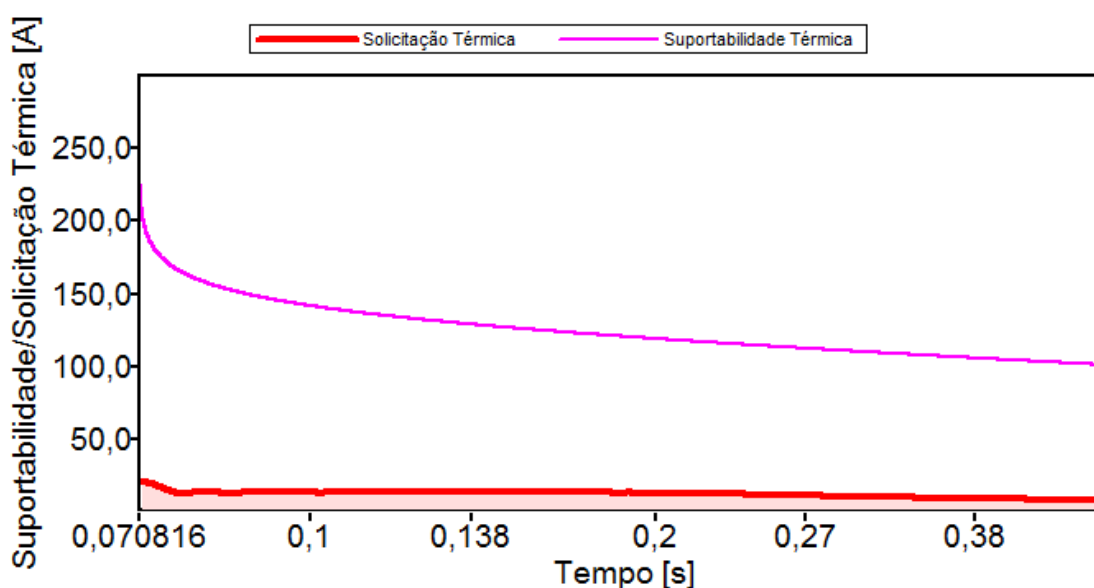


Figura 5.12 - Comparação entre a solicitação térmica imposta e a curva de suportabilidade adotada - descarga atmosférica- Caso 2.

Os resultados mostrados nas figuras acima evidenciam que:

- Nos instantes que se seguem após a incidência da descarga atmosférica (0,3s) ocorre a violação dos níveis de tensão admissíveis pelo aparelho. Portanto, quanto às questões

dielétricas pode-se verificar que há possibilidade de danos físicos na forma de rompimento da isolação do equipamento.

- Com relação à violação dos limites térmicos do equipamento, constatou-se que não indicativos de que isto poderia ter ocorrido.
- Parecer final (*através do APR*): caso a situação analisada estivesse atrelada com um PID, este seria considerado como procedente.

5.3.4.Caso 3 – Religamento tripolar em três estágios

A presente análise compreende um estudo de caso associado com os impactos produzidos num condicionador de ar tipo Split submetido a uma ação de religamentos trifásicos repetitivos e manifestados em três instantes diferentes.

A figura 5.13 mostra a configuração da operação do religador do ramal de 13,8 KV, a qual, como indicado, ocorre pelo fechamento trifásico das fases em três diferentes momentos. Como ilustrado, o alimentador, uma vez interrompido, permanece por 100 ms. Findo este intervalo, ocorre o religamento tripolar e após 200 ms o suprimento é novamente desconectado. Isso se repete por mais duas vezes, em consonância com a configuração feita para o APR.

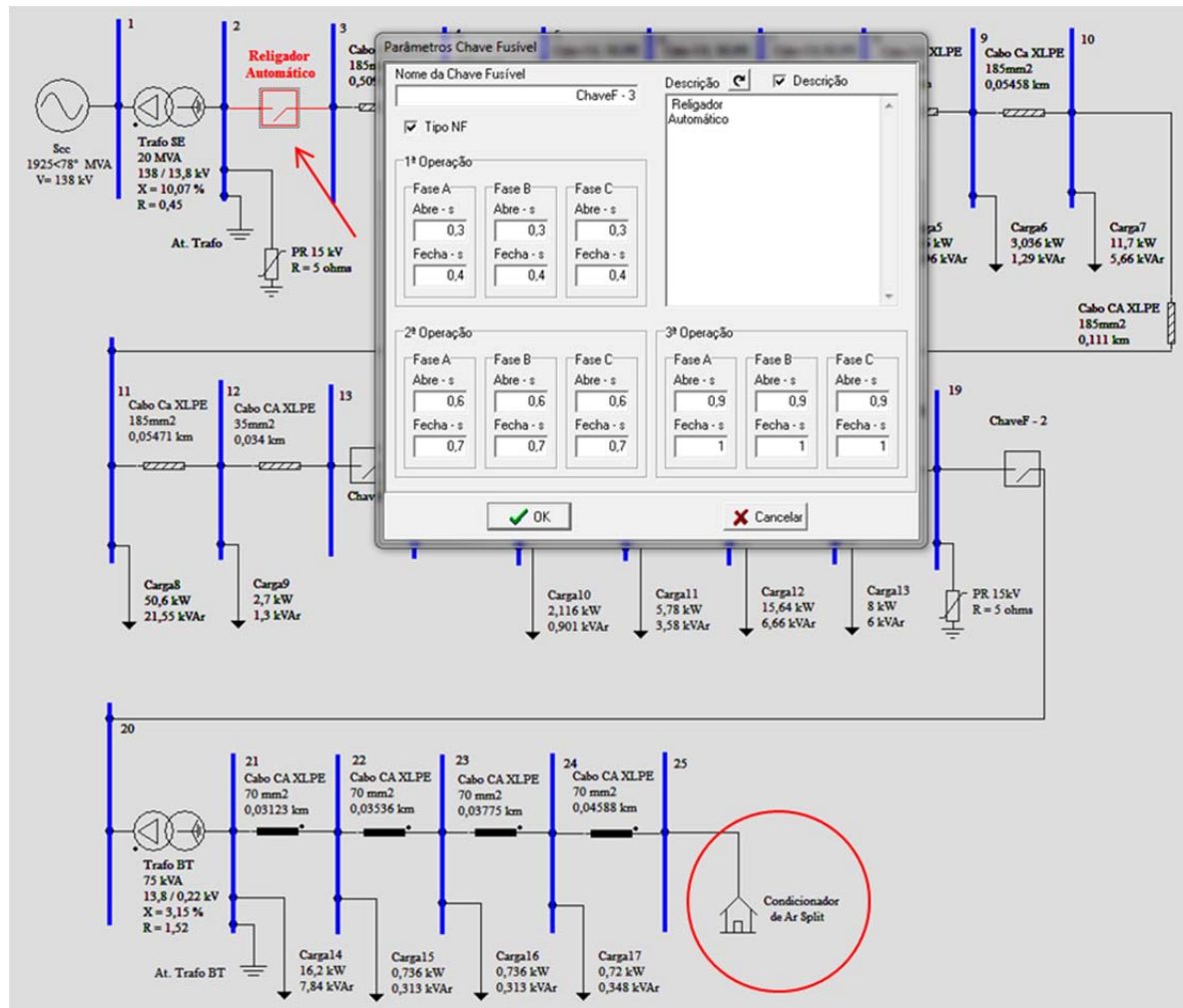


Figura 5.13 - Inserção do religamento em 3 estágios no APR – Caso 3.

A figura 5.14 ilustra a tensão na entrada do equipamento enquanto que a figura 5.15 mostra a correspondente corrente.

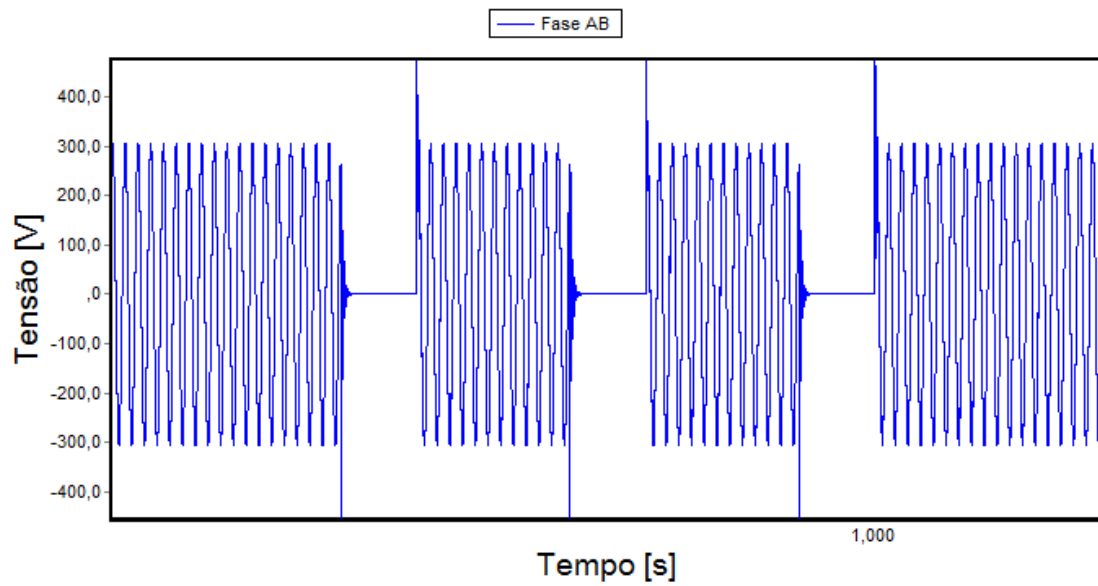


Figura 5.14 – Tensão de alimentação - com religamento em 3 estágios - Caso 3

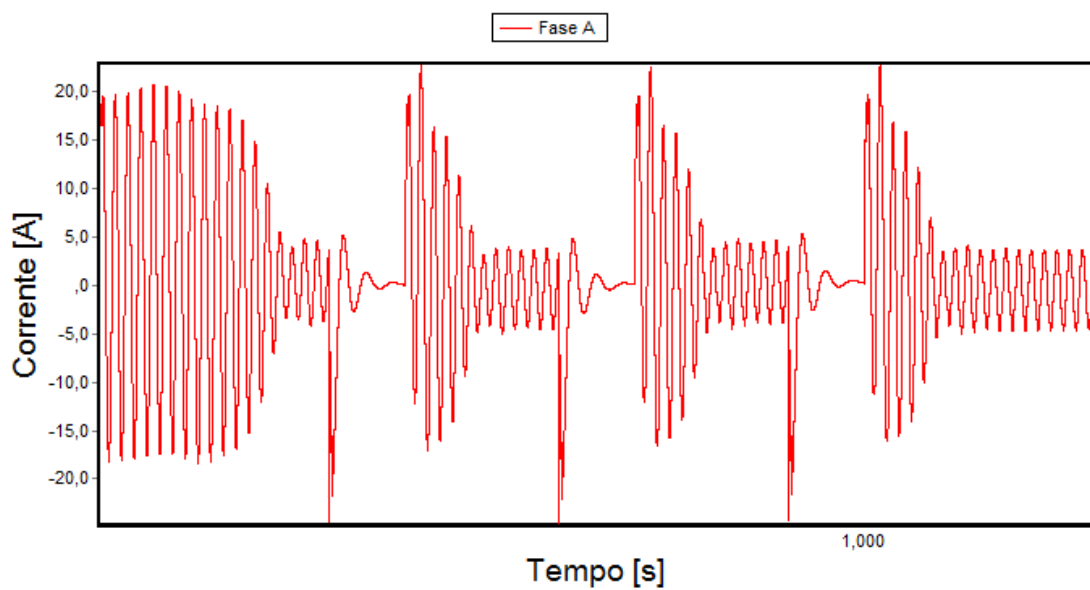


Figura 5.15 – Corrente de alimentação - com religamento em 3 estágios - Caso 3

As figuras 5.16 e 5.17 ilustram, por sua vez, as solicitações dielétricas e térmicas impostas pelo distúrbio com as respectivas curvas de suportabilidade.

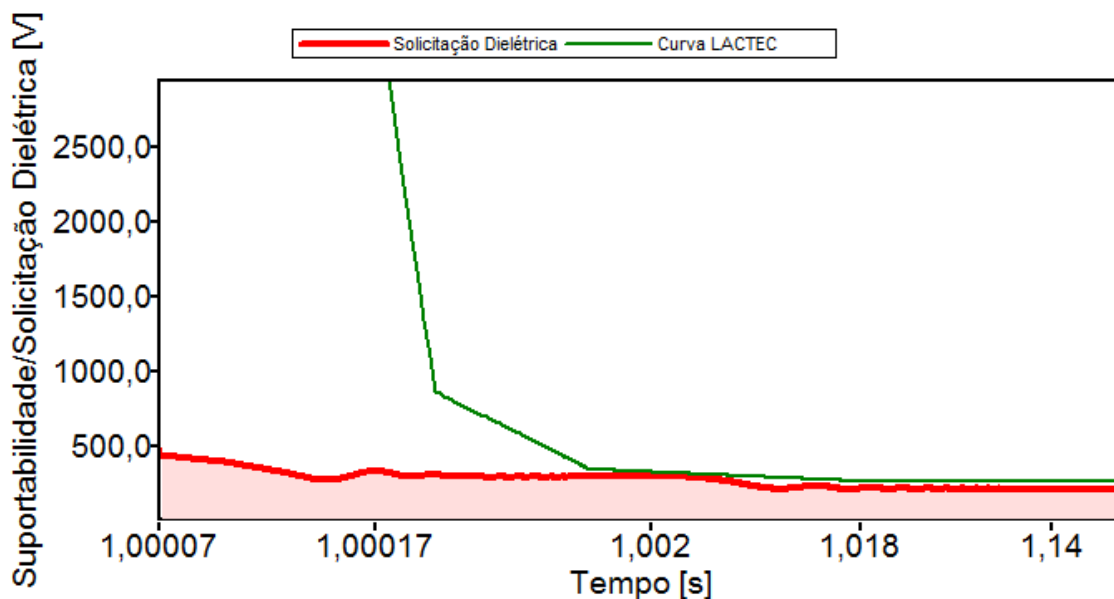


Figura 5.16 - Comparação entre a solicitação dielétrica imposta e a curva de suportabilidade adotada – religamento em 3 estágios- Caso 3.

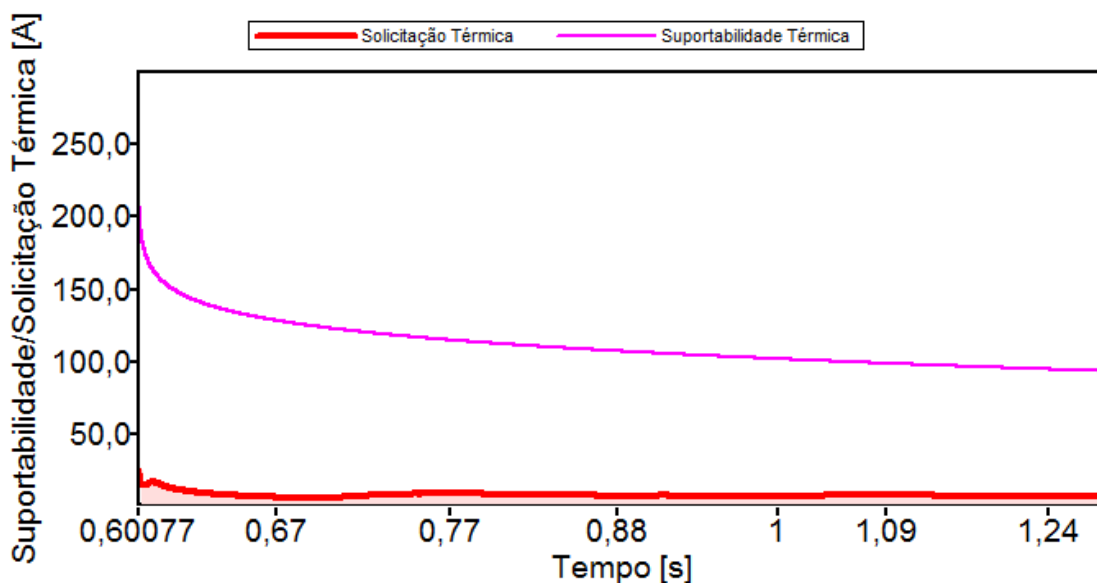


Figura 5.17 - Comparação entre a solicitação térmica imposta e a curva de suportabilidade adotada – religamento em 3 estágios- Caso 3

As figuras anteriores evidenciam que:

- Não ocorreu a violação dos níveis de tensão admissíveis pelo aparelho. Portanto, quanto às questões dielétricas pode-se verificar que não há evidências sobre a probabilidade da

manifestação de danos físicos na forma de rompimento da isolamento do equipamento.

- Com relação à violação dos limites térmicos do equipamento, constatou-se que os limites térmicos não teriam sido atingidos.
- Parecer final (*através do APR*): caso a situação analisada estivesse atrelada com um PID, este seria considerado como improcedente.

5.3.5. Caso 4 - Curto-circuito

Esta última situação refere-se a operação da rede de distribuição sob a ação de um curto-circuito fase-terra, como indicado e parametrizado no aplicativo APR através da figura 5.18. O curto-circuito, como indicado, teria ocorrido entre a fase A e terra no instante correspondente a 300 ms contados do início da simulação e com extinção em 500 ms.

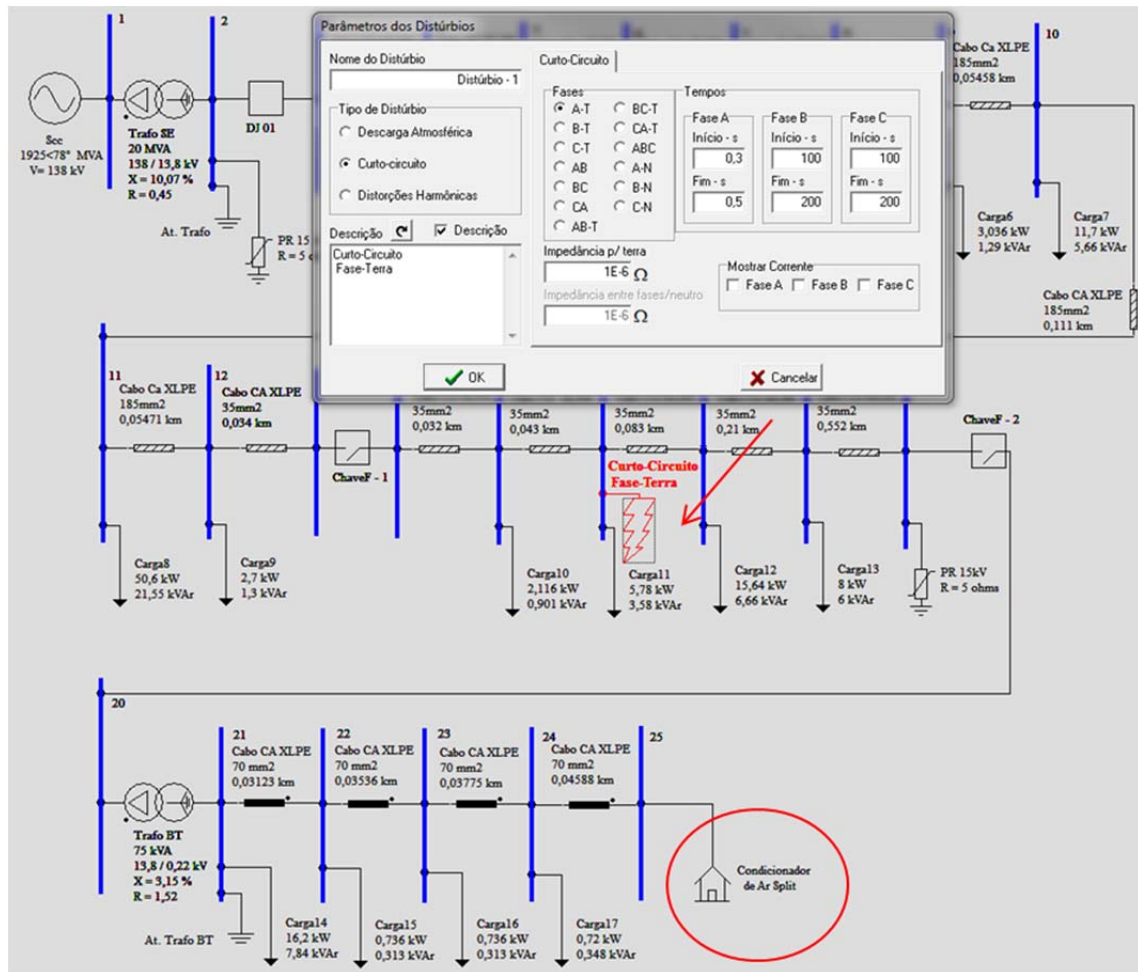


Figura 5.18 – Inserção do curto-circuito fase-terra no APR – Caso 4.

A figura 5.19 é indicativa das tensões trifásicas fase-neutro no ponto onde ocorreu o curto-circuito. O gráfico esclarece que a tensão da fase A foi a zero enquanto as outras duas foram defasadas e incrementadas em amplitude.

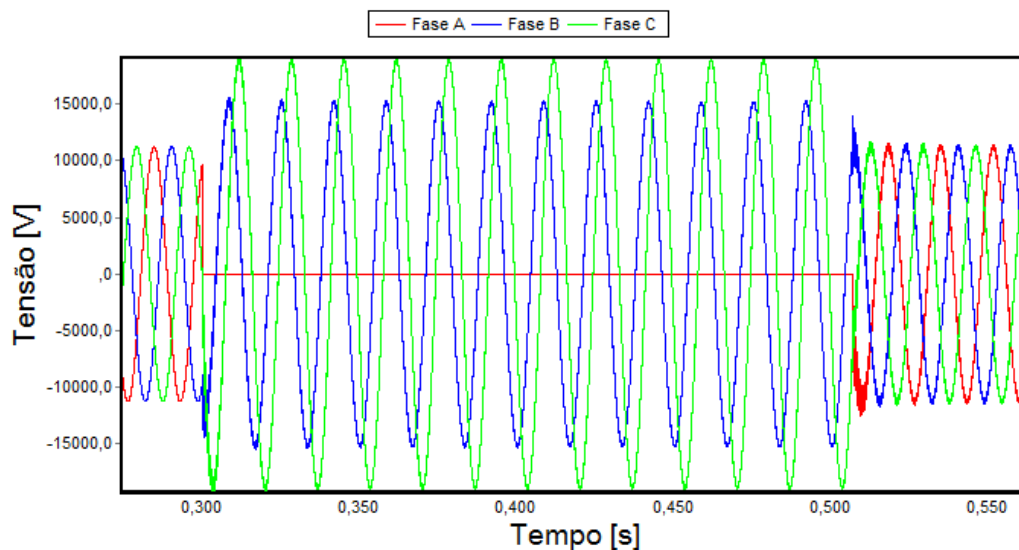


Figura 5.19 – Tensão no ponto de ocorrência do curto-circuito fase terra – média tensão - Caso 4

Devido ao tipo de transformador utilizado (delta-estrela) as alterações das tensões do lado de baixa tensão se apresentaram com a fase B sofrendo uma redução em sua amplitude, enquanto as fases A e C permaneceram quase inalteradas em seus valores enquanto o curto-circuito perdurou. Isso é evidenciado na figura 5.20.

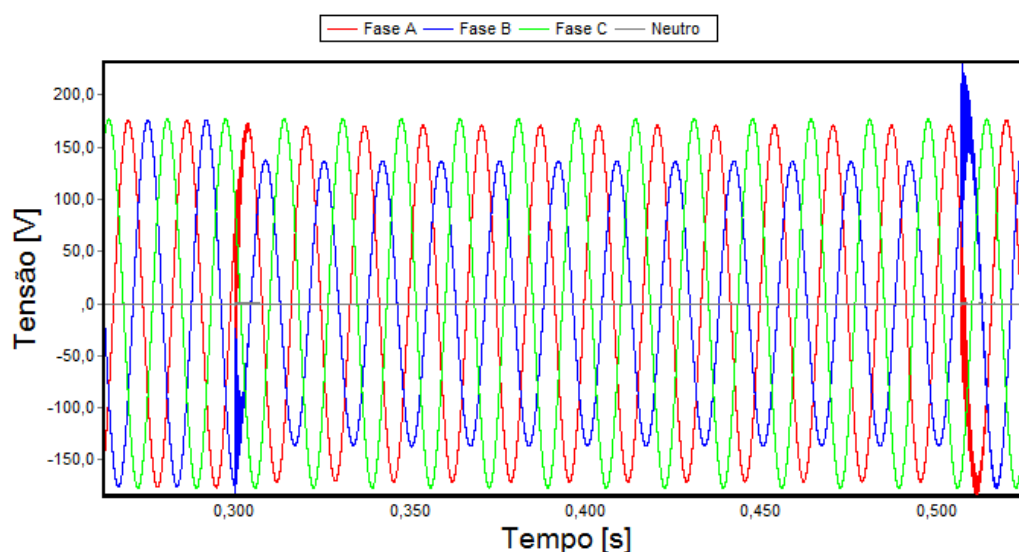


Figura 5.20 - Tensão no ponto de conexão do condicionador de ar atrelada com o curto-circuito fase terra na média tensão - Caso 4

As Figuras 5.21 e 5.22 mostram, respectivamente, as formas de onda da tensão e da corrente na entrada do condicionador de ar submetido ao distúrbio em questão.

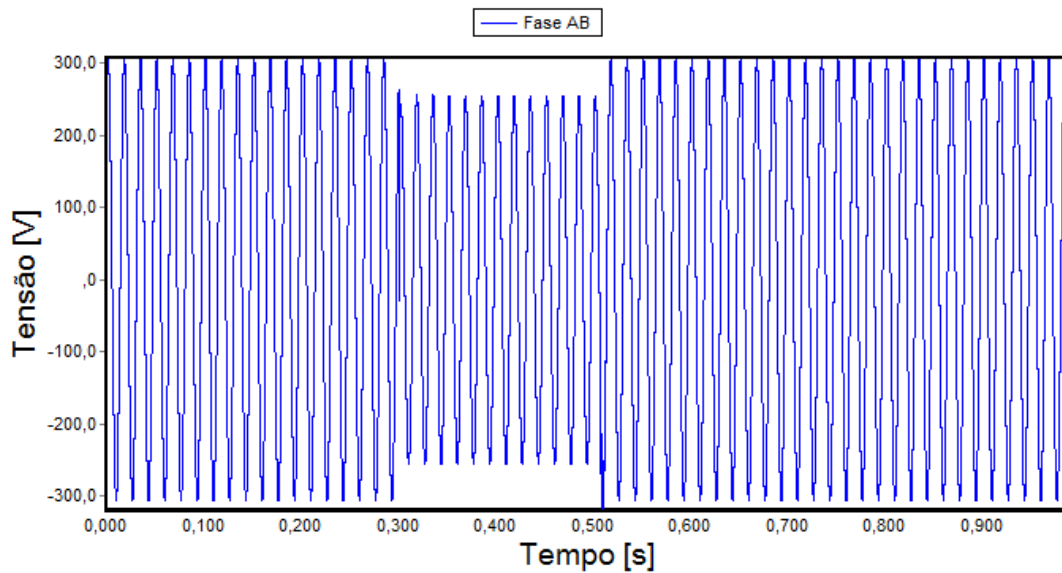


Figura 5.21 – Tensão de alimentação do equipamento para o Caso 4

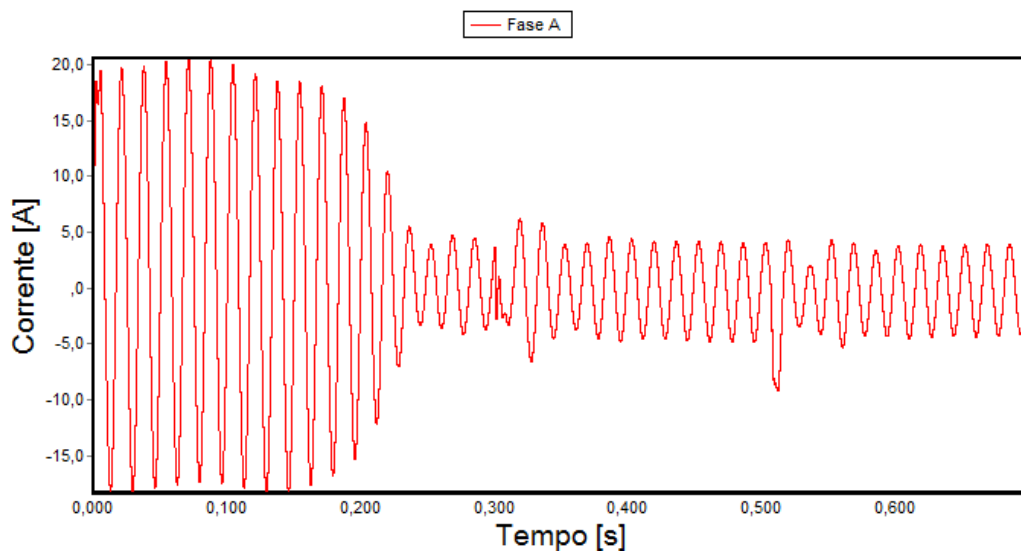


Figura 5.22 – Corrente de alimentação do equipamento para o Caso 4

Por fim, os resultados indicados nas figuras 5.23 e 5.24 mostram os desempenhos dielétricos e térmicos atrelados com o caso em análise.

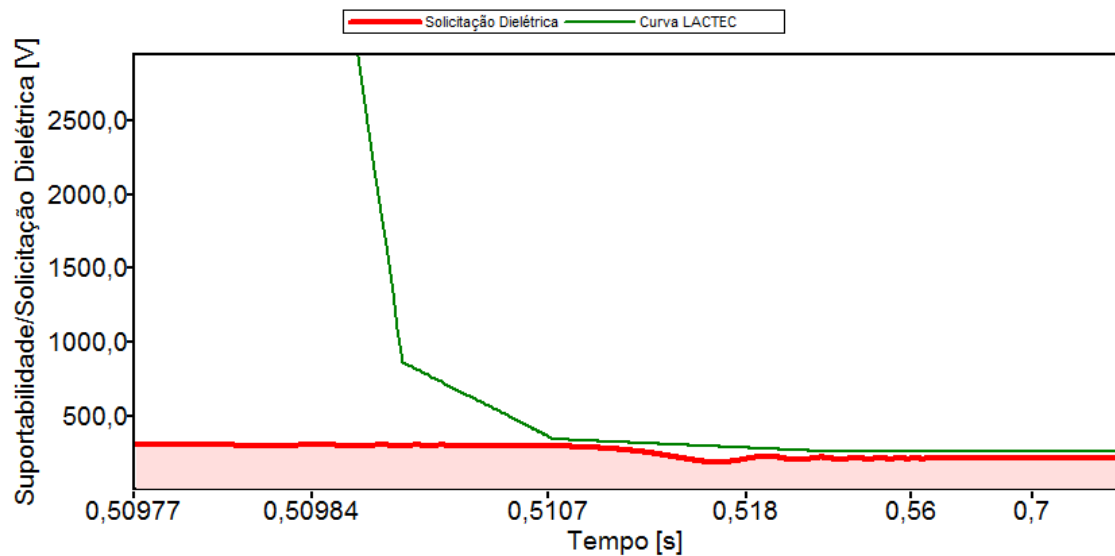


Figura 5.23 - Comparação entre a solicitação dielétrica imposta e a curva de suportabilidade adotada – curto-circuito fase-terra na média tensão - Caso 4

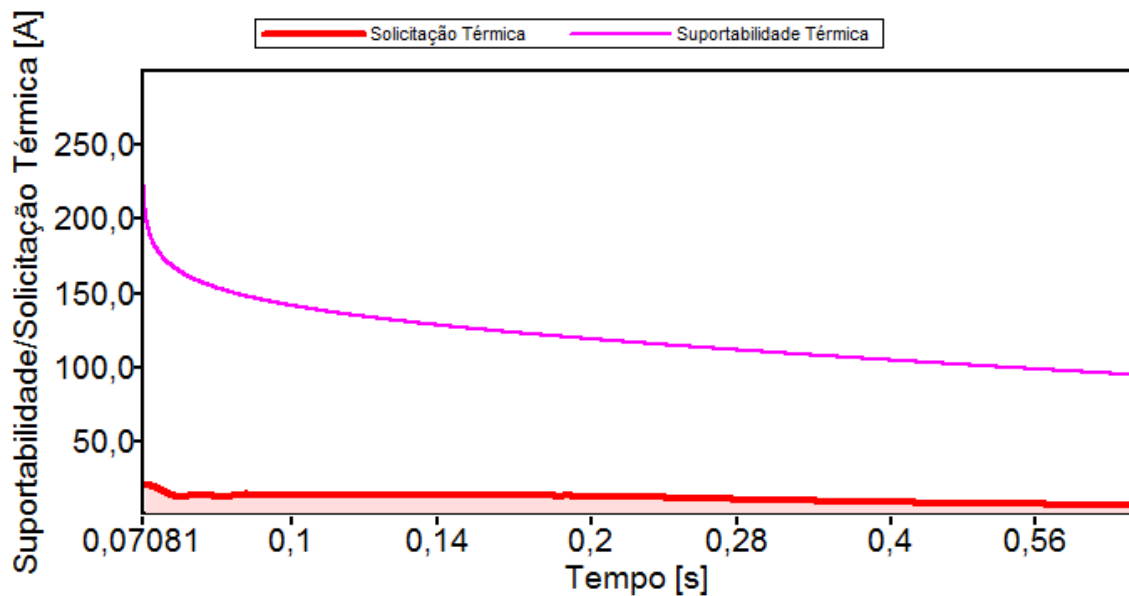


Figura 5.24 - Comparação entre a solicitação térmica imposta e a curva de suportabilidade adotada – curto-circuito fase-terra na média tensão - Caso 4

Os desempenhos obtidos computacionalmente evidenciam que:

- Não ocorreu a violação dos níveis de tensão admissíveis pelo aparelho. Portanto, quanto às questões dielétricas pode-se

constatar que não há evidências de que o fenômeno analisado possa ter resultados em danos físicos na forma de rompimento da isolação do equipamento.

- Com relação à violação dos limites térmicos do equipamento, constatou-se, também, que o curto-circuito avaliado não se mostra com propriedades capazes de provocar a queima por sobreaquecimentos.
- Parecer final (*através do APR*): caso a situação analisada estivesse atrelada com um PID, este seria considerado como improcedente.

5.4. Considerações finais

Este capítulo contemplou, de forma pontual, distintos estudos de caso compreendendo três diferentes distúrbios frequentemente encontrados nas redes de transmissão e distribuição, e seus impactos dielétricos e térmicos manifestados em aparelhos condicionadores de ar tipo split.

Os trabalhos foram conduzidos utilizando-se um arranjo topológico típico de um alimentador de distribuição comercial, o qual foi inserido e parametrizado no aplicativo APR que passou a contar com o equipamento focado nesta pesquisa.

Na sequência, os estudos foram processados de forma a constatar a correlação entre causas e efeitos, designada por nexos causais, e que se apresenta como a base de sustentação para as avaliações dos pedidos de indenização por danos elétricos e emissão de pareceres por parte das empresas concessionárias.

De uma gama de estudos feitos, os casos selecionados para apresentação e discussão nesta dissertação compreenderam situações operativas anômalas

associadas com a incidência de uma descarga atmosférica, a realização de manobras de religamentos tripolares repetitivos e a manifestação de um curto-circuito fase-terra.

Os resultados apresentados, acredita-se, tenham ilustrado a potencialidade e aplicabilidade da ferramenta computacional de análise desenvolvida no passado e aqui aprimorada através da incorporação de um novo eletrodoméstico de relativo valor agregado e em grande difusão no mercado residencial e comercial do país.

As investigações, como esclarecido, tiveram por meta apenas ilustrar situações típicas, porém hipotéticas. Não obstante a isto, as etapas relacionadas com as apresentações de resultados e discussões mostraram a estratégia de uso do aplicativo e os procedimentos empregados para a emissão de pareceres finais sobre a consistência ou não dos requerimentos de indenização encaminhados por consumidores às suas respectivas empresas concessionárias de energia elétrica.

CAPÍTULO 6

CONCLUSÕES GERAIS

Não obstante as considerações e comentários feitos ao término de cada um dos capítulos que compreenderam esta dissertação, com vistas a oferecer uma perspectiva mais ampla sobre as atividades desenvolvidas, apresentam-se, nesta unidade final do trabalho, as principais constatações obtidas dos estudos realizados ao longo desta dissertação.

O capítulo 1 foi direcionado a uma contextualização do tema central deste trabalho, apresentando, em termos gerais, a atualidade e importância do tema “Ressarcimento de Danos Elétricos”. Também foram apresentados alguns dados estatísticos indicando o crescimento dos PIDs no Brasil bem como uma visão jurídica sobre o tema. Encerrando o capítulo, foram definidas as principais diretrizes para o presente trabalho de pesquisa, assim como também uma síntese da estrutura completa da dissertação.

O capítulo 2 prestou-se, inicialmente, ao propósito de esclarecer diferentes aspectos relacionados com conceitos básicos e tipos de equipamentos comercialmente em uso no país e exterior. Uma vez detalhados os principais tipos de condicionadores de ar e suas unidades físicas, ficou evidenciado que os produtos comercializados, muito embora de distintos fabricantes e tipos, se

apresentam com relativa similaridade, resguardadas as capacidades em função do porte do equipamento. Constatou-se que o compressor, componente principal de equipamentos de refrigeração e consequentemente do condicionador de ar Split, possui máquina motriz um motor elétrico de indução, bifásico, com rotor em gaiola de esquilo.

No capítulo 3 foram tecidos trabalhos detalhados sobre a constituição física dos condicionadores de ar, quando então foram identificadas e comentadas as principais partes constituintes do condicionador de ar Split e suas unidades evaporadora, e condensadora, unidades estas que foram alvo de considerações para fins de suas modelagens no simulador ATP. Para a evaporadora foi identificada sua placa eletrônica como sendo o principal dispositivo e também com maior probabilidade de danos em função de seus componentes eletrônicos. A estratégia para sua modelagem foi estabelecida na forma de um circuito equivalente representativo de um retificador monofásico do tipo onda completa, suprindo uma carga do tipo impedância constante. Para a condensadora, esta foi representada através de um compressor hermético, o qual se apresenta como o principal dispositivo elétrico desta unidade. Tendo em vista tratar-se de um motor de indução bifásico, com as características apresentadas, foram estabelecidas as equações que descrevem o seu comportamento através de técnicas de modelagem no domínio do tempo. Na sequência, tanto a evaporadora como a condensadora foram modeladas computacionalmente no software ATP. Para tanto, além de recursos tradicionais deste aplicativo, foi também empregada a rotina MODELS para a inserção das equações do motor de indução modelado.

O capítulo 4 foi centrado nos trabalhos para a validação da modelagem computacional do condicionador de ar proposta nesta pesquisa. A estratégia utilizada, em consonância com procedimentos clássicos, foi fundamentada em estudos de desempenho do equipamento, sob condições ideais e não-ideais de suprimento, empregando-se uma estrutura laboratorial que permite a reprodução

de tensões com a presença ou não de distúrbios, nos termos frequentemente encontrados nas redes de distribuição comerciais. Confrontando-se os resultados experimentais com seus correspondentes desempenhos computacionais, ficou, pois estabelecida a base do processo da avaliação da aderência do modelo estabelecido ao comportamento real do equipamento. Os casos estudados foram: elevação momentâneos de tensão de 15% com duração de 16 ciclos; afundamento momentâneos de tensão de 40% com duração de 10 ciclos; interrupção plena durante 10 ciclos; flutuação de tensão atrelada com um PST igual a 5; e distorções harmônicas de tensão (em 20% e em níveis atrelados com a rede elétrica local). Para todos os casos estudados verificou-se grande semelhança entre os resultados obtidos pelo método experimental e o computacional, fato este que conduz a afirmativa que o modelo e o programa desenvolvido condizem plenamente com o comportamento experimental do condicionador de ar estudado.

Por fim, o capítulo 5 contemplou, de forma pontual, distintos estudos de desempenho do produto em foco, sob a ação de três diferentes distúrbios frequentemente encontrados nas redes de transmissão e distribuição. Os trabalhos foram conduzidos através de um alimentador de distribuição típico, inserido no aplicativo APR. Uma vez cumprida esta tarefa, foram então realizados os estudos objetivando avaliar a correlação entre causas e efeitos, desingnada por nexos causais e que se apresenta como a base de sustentação para as avaliações dos pedidos de indenização por danos elétricos e emissão de pareceres por parte das empresas concessionárias. Os resultados apresentados evidenciaram a potencialidade e aplicabilidade da ferramenta computacional de análise desenvolvida. Os resultados e discussões mostraram a estratégia de uso do aplicativo e os procedimentos empregados para a emissão de pareceres finais sobre a consistência ou não dos requerimentos de indenização encaminhados por consumidores às respectivas empresas concessionárias de energia elétrica.

Não obstante o fato que o software APR passa, a partir desta dissertação, a contar com mais um equipamento comercial que pode ser contemplado nos estudos de indenização, reconhece-se, ainda, a necessidade de trabalhos adicionais destinados à melhoria do processo de modelagem. Dentre alguns pontos meritórios de destaque ressalta-se:

- Inserção da saturação para a representação do motor;
- Aprimorar a modelagem da carga suprida pelo retificador da unidade evaporadora;
- Definição de curvas apropriadas para os limites de suportabilidade para os aparelhos condicionadores de ar tipo split.
- Estudos envolvendo aparelho condicionador de ar Split com a tecnologia Inverter (discutida na seção 2.6.2).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] ANEEL. RESOLUÇÃO NORMATIVA Nº 360. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/cedoc/ren2009360.pdf>. Acesso em: 2012
- [2] JUCÁ, A.S. Avaliação do relacionamento entre consumidores e concessionárias na solução de conflitos por danos elétricos: proposta de adequação. Tese (Doutorado) em Engenharia Elétrica. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, USP, São Paulo, 2003.
- [3] OLIVEIRA H. R. P. M., JESUS N. C., MARTINEZ M. L. B., “Avaliação do Desempenho de Equipamentos Eletrodomésticos Durante Ensaio de Sobretensões”, XVIII SNPTEE, Curitiba/PR, outubro de 2005.
- [4] FERRARI, E. L. ET AL. Metodologia para suporte à análise de pedidos de indenização em queimas de aparelhos na área de concessão da Eletropaulo. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/biblioteca/Citenel2001/trabalhos/16.pdf>
- [5] ONS – OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO, “Submódulo 2.2 – Padrões de Desempenho da Rede Básica”, dezembro de 2002.
- [6] MENDONÇA, M. V. ET AL. Análise computacional de pedidos de indenização por danos em equipamentos elétricos: estudo de caso. In: Conferência Brasileira sobre Qualidade da Energia Elétrica, CBQEE VIII 2009, Blumenau, SC, 2 a 5 de agosto de 2009.

- [7] I. N. GONDIM, P. H. O. REZENDE, J. C. OLIVEIRA, J.R.MACEDO JR. A. C. O.SALOMÃO, N. KAGAN. Reimbursement Procedure due to Electrical Damages: the Subject Relevance, Juridical Fundamentals, Agency Standards, Analysis Procedures and Trends. *Renewable Energy & Power Quality Journal (RE&PQJ)*, N°.10, 25th April 2012, RE&PQJ-10, ISSN 2172-038X.
- [8] A. C. O. SALOMÃO, Uma abordagem jurídica à questão do ressarcimento de danos elétricos pelas distribuidoras de energia, Dissertação de mestrado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, USP, São Paulo, 2012.
- [9] MENDES, L. M. DE OLIVEIRA, “Refrigeração e Ar Condicionado”, Editora Tecnoprint SA, 1984.
- [10] DASSOT, ROY J., “Princípios de Refrigeração”, Hemus Livraria Editora, 1980.
- [11] STOECKER, F. WILBERT E JONES, W. JEROLD, “Refrigeração e Ar Condicionado”, McGraw Hill do Brasil, 1985.
- [12] Manuais da Empresa Tecumseh do Brasil, São Carlos – SP, disponível em www.tecumseh.com.br.
- [13] LAUAND, CARLOS A. E PUGLIESE, M., “Manual Prático de Geladeiras, Refrigeração Industrial e Domiciliar”, Hemus Editora Ltda.
- [14] Apostila Técnica, Especificações técnicas de edifícios comerciais: Ar condicionado. Espaços Corporativos Online.
- [15] REZENDE P. H. O., OLIVEIRA J. C., GONDIM I. N., BACCA I. A., “Modelagem de Aparelhos Condicionadores de Ar no Simulador ATP para Avaliações de Pedidos de Ressarcimento”, IX CBQEE, Cuiabá/MT, Agosto de 2011.
- [16] Planilha de dados Mr. Cool The World, CHINA CJ HOLDING CO.,LIMITED.

- [17] BACCA, I. A., “Modelagem para Análise de Desempenho de Equipamentos da Linha Branca diante de Distúrbios de Qualidade da Energia”, Dissertação de Mestrado, UFU, Uberlândia/MG, setembro de 2008.
- [18] SEN, P. C., “Principles of Electrical Machines and Power Eletronics”, Editora John Wiley & Sons.
- [19] TORO, V. D., “Fundamentos de Máquinas Elétricas”, Editora Prentice Hall do Brasil.
- [20] FITZGERALD, A. E., KINGSLEY, JR, KUSKO, ALEXANDER, “Máquinas Elétricas, Conversão Eletromecânica de Energia”.
- [21] KRAUSE, P. C. “Simulation of Unsymmetrical 2-Phase Induction Machines”, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems,, Vol. Pas-84, No. 11, pp. 1025-1037.
- [22] IEC Std. 6100-4-11, Eletromagnetic Compatibility (EMC), part 4-11: Testing and MeasurementTechnics – Voltage dips, short interruptions and voltage immunity tes, Edition 1.1, 2001-03
- [23] CASTILLO, BISMARCK C., “Desempenho de Aparelho Condicionador de Ar no Contexto da Qualidade da Energia Elétrica”, Dissertação de Mestrado, UFU, Julho de 2002.
- [24] Alternative Transients Program (ATP) Rule Book, julho de 1987.
- [25] INTERNATIONAL STANDARD, IEC 61000-4-15.
- [26] TAVARES, C. E., “Uma Estratégia Computacional para a Análise Técnica de Pedidos de Ressarcimento de Danos a Consumidores”, Tese de Doutorado, UFU, Uberlândia/MG, 2008.
- [27] MENDONÇA, M.V.B, “Contribuições ao Processo Computacional para Análise de Pedidos de Indenização por Danos em Equipamentos Elétricos”, Tese de Doutorado, UFU, Uberlândia/MG, 2010.
- [28] REZENDE P. H. O., OLIVEIRA J. C., GONDIM I. N., DELAIBA A. C., BACCA I. A., “Análise Computacional de Pedidos de Indenização por

- Danos em Equipamentos da Linha Branca: Estudos de Casos”, IX CBQEE, Cuiabá/MT, Agosto de 2011.
- [29] TEIXEIRA, M. D., ARAÚJO, R. L., ARDJOMAND, L. M., AOKI, A. R., QUOIRIN, N.S.R., WUNDERLICH, I., “Acceptable Power Quality Limits to Avoid Damages in Appliances”, WSEAS Transactions on Circuits and Systems, Issue 5, vol. 4, maio de 2005.
- [30] REZENDE P. H. O., OLIVEIRA J. C., GONDIM I. N., BACCA I. A., “Air Conditioner ATP Time Domain Model and Validation Focusing Reimbursement Requests Associated to System Disturbances”, Electrical Power Quality and Utilization – EPQU, Lisboa – Portugal, Outubro de 2011.