

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO - USP
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS - EESC
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA E DE COMPUTAÇÃO - SEL

OSMAR CARLOS PINHEIRO JUNIOR

Análise das Distorções Harmônicas em Compressores Herméticos de uso Doméstico

OSMAR CARLOS PINHEIRO JUNIOR

Análise das Distorções Harmônicas em Compressores Herméticos de uso Doméstico

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Escola de Engenharia de São Carlos, da Universidade de São Paulo.

Curso de Engenharia Elétrica com Ênfase em Sistemas de Energia e Automação.

Orientador: Prof. Dr. Mário Oleskovicz

São Carlos
2013

AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO,
POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS
DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

P654a Pinheiro Junior, Osmar Carlos
Análise das distorções harmônicas em compressores
herméticos de uso doméstico / Osmar Carlos Pinheiro
Junior; orientador Mario Oleskovicz. São Carlos, 2013.

Monografia (Graduação em Engenharia Elétrica com
ênfase em Sistemas de Energia e Automação) -- Escola de
Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo,
2013.

1. Qualidade da Energia Elétrica. 2. Compressor
Hermético. 3. Distorção Harmônica Total. I. Título.

FOLHA DE APROVAÇÃO

Nome: Osmar Carlos Pinheiro Junior

Título: "Análise dos compressores herméticos no contexto da qualidade da energia elétrica"

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado
em 29 / 11 / 2013,

com NOTA 7,0 (sete , zero), pela Comissão Julgadora:

Prof. Dr. Mário Oleskovicz - (Orientador - SEL/EESC/USP)

Mestre Gerson Bessa Gibelli - (Universidade Federal da Grande Dourados)

Prof. Dr. Ricardo Augusto Souza Fernandes - (UFSCar)

Coordenador da CoC-Engenharia Elétrica - EESC/USP:
Prof. Associado Homero Schiabel

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a minha família, que
sempre me apoiou e me motivou a buscar
a realização de meus sonhos.

AGRADECIMENTOS

À Escola de Engenharia de São Carlos e ao Departamento de Engenharia Elétrica e de Computação pela estrutura fornecida e pela oportunidade de aprendizado e formação profissional.

Aos técnicos do departamento pela manutenção dos equipamentos, disponibilidade e disposição em ajudar.

Aos professores pelas lições e cobranças que nos ajudam a amadurecer.

Ao MSc. Jáder Fernando Dias Breda pelo acompanhamento no laboratório, ajuda no manuseio do equipamento e companhia durante os ensaios.

Ao Prof. Dr. Ricardo Augusto Souza Fernandes pelo ensino no uso dos equipamentos do laboratório e atenção dada a este trabalho.

Ao orientador Prof. Dr. Mário Oleskovicz pelo auxílio na elaboração deste trabalho.

Ao amigo Prof. MSc. Gerson Bessa Gibelli pela supervisão e ensinamentos durante o meu período de estágio, e pela motivação e apoio durante a realização deste trabalho.

À TECUMSEH do Brasil Ltda. pela oportunidade de aprendizado e desenvolvimento profissional.

RESUMO

Pinheiro Junior, O. C. (2013). *Análise das Distorções Harmônicas em Compressores Herméticos de Uso Doméstico*. Trabalho de Conclusão de Curso - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos, 2013.

O objetivo principal deste trabalho é analisar e registrar o desempenho dos compressores herméticos em um ambiente laboratorial controlado. Os compressores herméticos foram analisados por meio de um conjunto didático disponibilizado no LAMQEE (Laboratório de Análise e Monitoramento da Qualidade da Energia Elétrica). Pela análise, foram levantados os dados de operação dos compressores frente a uma alimentação puramente senoidal e distorcida, buscando evidenciar o impacto das mesmas sobre os equipamentos e demais grandezas elétricas associadas ao processo. Toda a metodologia, considerando as conexões na bancada experimental, a descrição e a realização de uma sequência de testes, a forma de registro e o tratamento realizado sobre os dados, serão apresentados em detalhes. Os resultados observados mostram que os compressores herméticos apresentaram resultados singulares para cada característica de projeto e condição de ensaio aplicada.

Palavras Chave: Qualidade da Energia Elétrica, Compressor Hermético, Distorção Harmônica Total.

ABSTRACT

Pinheiro Junior, O. C. (2013). *Harmonic Distortions Analysis in Household Hermetic Compressors*. Monograph - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos, 2013.

The main objective of this work is to analyze and record the hermetic compressors performance in a controlled laboratory environment. The hermetic compressors were analyzed by a didactic set available in LAMQEE (Laboratory of Analysis and Monitoring of Power Quality). Through the analysis, data provided by compressors operation in front of a purely sinusoidal and distorted power supply were recorded seeking to prove their impact on the equipment and other electrical quantities associated with the process. The entire methodology, including the connections in the experimental setup, the description and realization of a test sequence, the registration form and the analysis of the data, will be presented in detail. The results observed reveals that the hermetic compressors have unique characteristics submitted for each design feature and the applied test condition.

Keywords: Power Quality, Hermetic Compressor, Total Harmonic Distortion.

SUMÁRIO

RESUMO	i
ABSTRACT	iii
SUMÁRIO	1
LISTA DE FIGURAS	3
LISTA DE TABELAS	7
LISTA DE ABREVIATURAS	9
1 - INTRODUÇÃO	11
1.1 - Objetivos do trabalho	12
1.2 - Estrutura do trabalho	12
2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	13
3 - COMPRESSORES HERMÉTICOS	16
3.1 - Identificação dos compressores	19
3.2 - Elementos dos compressores	19
3.2.1 - Motores	20
3.2.2 - Componentes elétricos	24
3.2.3 - Tipos de ligações dos compressores	27
4 - METODOLOGIA	29
4.1 - Descrição das conexões realizadas	30
4.2 - Procedimentos	30
4.4 - Resultados esperados	32
5 - BANCADA EXPERIMENTAL	34
5.1 - Descrição da bancada	34
5.2 - Ferramentas computacionais	35
6 - RESULTADOS E DISCUSSÃO	40
6.1 - Alimentação com tensão puramente senoidal	41
6.1.1 - Compressor 1	41
6.1.2 - Compressor 2	44
6.1.3 - Compressor 3	46

6.1.4 - Compressor 4.....	49
6.2 - Alimentação com tensão distorcida	51
6.2.1 - Compressor 1.....	54
6.2.2 - Compressor 2.....	56
6.2.3 - Compressor 3.....	59
6.2.4 - Compressor 4.....	61
7 - CONCLUSÕES	65
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	69

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 - Bancada didática com os quatro compressores herméticos analisados.....	17
Figura 3.2 - Compressor e os seus componentes.....	18
Figura 3.3 - Esquema de funcionamento de um compressor alternativo.....	19
Figura 3.4 - Etiqueta de identificação de um compressor.....	19
Figura 3.5 - Rotor gaiola de esquilo.....	20
Figura 3.6 - Estator.....	21
Figura 3.7 - Circuito simplificado para o motor de indução.....	22
Figura 3.8 - Circuito do motor de indução contemplando as componentes harmônicas ímpares.....	23
Figura 3.9 - Protetor térmico.....	25
Figura 3.10 - Relê PTC.....	25
Figura 3.11 - Capacitor de partida.....	26
Figura 3.12 - Capacitor permanente.....	26
Figura 3.13 - Terminal conector.....	27
Figura 3.14 - Esquema e diagrama de ligação PTCSIR.....	28
Figura 3.15 - Esquema e diagrama de ligação PTCCSIR.....	28
Figura 3.16 - Esquema e diagrama de ligação PTCSQR.....	29
Figura 3.17 - Esquema e diagrama de ligação PTCCSR.....	29
Figura 4.1 - Diagrama de blocos ilustrando as conexões entre os elementos que compõe a bancada experimental no LAMQEE.....	30
Figura 4.2 - Fluxograma dos ensaios realizados com os compressores.....	33
Figura 5.1 - O gerador arbitrário de sinais: modelo 5001iX da <i>California Instruments</i>	34
Figura 5.2 - Janela de controle da fonte.....	35
Figura 5.3 - Janela da função <i>Harmonic Analysis</i>	36
Figura 5.4 - Arquivo de texto criado pelo <i>Harmonic Analysis</i>	37
Figura 5.5 - Janela da função <i>Waveform Display</i>	38
Figura 5.6 - Arquivo de texto criado pelo <i>Waveform Display</i>	38
Figura 6.1 - Formas de onda de tensão e corrente do compressor 1, com alimentação senoidal, sem capacitor permanente.....	41

Figura 6.2 - Formas de onda de tensão e corrente do compressor 1, alimentação senoidal, com capacitor permanente.....	42
Figura 6.3 - Diagrama de barras das amplitudes das componentes harmônicas de corrente, compressor 1, alimentação senoidal.....	43
Figura 6.4 - Formas de onda de tensão e corrente do compressor 2, alimentação senoidal, sem capacitor permanente.....	44
Figura 6.5 - Formas de onda de tensão e corrente do compressor 2, alimentação senoidal, com capacitor permanente.....	45
Figura 6.6 - Diagrama de barras das amplitudes das componentes harmônicas de corrente, compressor 2, alimentação senoidal.....	45
Figura 6.7 - Formas de onda de tensão e corrente do compressor 3, alimentação senoidal, sem capacitor permanente.....	47
Figura 6.8 - Formas de onda de tensão e corrente do compressor 3, alimentação senoidal, com capacitor permanente.....	47
Figura 6.9 - Diagrama de barras das amplitudes das componentes harmônicas de corrente, compressor 3, alimentação senoidal.....	48
Figura 6.10 - Formas de onda de tensão e corrente do compressor 4, alimentação senoidal, sem capacitor permanente.....	49
Figura 6.11 - Formas de onda de tensão e corrente do compressor 4, alimentação senoidal, sem capacitor permanente.....	50
Figura 6.12 - Diagrama de barras das amplitudes das componentes harmônicas de corrente, compressor 4, alimentação senoidal.....	50
Figura 6.13 - Janela do <i>Harmonics Generation</i>	53
Figura 6.14 - Formas de onda de tensão distorcida utilizada na segunda etapa dos ensaios.	53
Figura 6.15 - Diagrama de barras das amplitudes das componentes harmônicas de tensão da forma de onda de alimentação distorcida.	54
Figura 6.16 - Formas de onda de tensão e corrente do compressor 1, alimentação distorcida, sem capacitor permanente.....	55
Figura 6.17 - Formas de onda de tensão e corrente do compressor 1, alimentação distorcida, com capacitor permanente.....	55
Figura 6.18 - Diagrama de barras das amplitudes das componentes harmônicas de corrente, compressor 1, alimentação distorcida.....	55

Figura 6.19 - Formas de onda de tensão e corrente do compressor 2, alimentação distorcida, sem capacitor permanente.....	57
Figura 6.20 - Formas de onda de tensão e corrente do compressor 2, alimentação distorcida, com capacitor permanente.....	57
Figura 6.21 - Diagrama de barras das amplitudes das componentes harmônicas de corrente, compressor 2, alimentação distorcida.....	58
Figura 6.22 - Formas de onda de tensão e corrente do compressor 3, alimentação distorcida, sem capacitor permanente.....	59
Figura 6.23 - Formas de onda de tensão e corrente do compressor 3, alimentação distorcida, com capacitor permanente.....	60
Figura 6.24 - Diagrama de barras das amplitudes das componentes harmônicas de corrente, compressor 3, alimentação distorcida.....	60
Figura 6.25 - Formas de onda de tensão e corrente do compressor 4, alimentação distorcida, sem capacitor permanente.....	62
Figura 6.26 - Formas de onda de tensão e corrente do compressor 4, alimentação distorcida, com capacitor permanente.....	62
Figura 6.27 - Diagrama de barras das amplitudes das componentes harmônicas de corrente, compressor 4, alimentação distorcida.....	63

LISTA DE TABELAS

Tabela 6.1 - Resultados dos ensaios com o compressor 1, alimentação senoidal.	43
Tabela 6.2 - Resultados dos ensaios com o compressor 2, alimentação senoidal.	46
Tabela 6.3 - Resultados dos ensaios com o compressor 3, alimentação senoidal.	48
Tabela 6.4 - Resultados dos ensaios com o compressor 4, alimentação senoidal.	51
Tabela 6.5 - Resultados dos ensaios com o compressor 1, alimentação distorcida.....	56
Tabela 6.6 - Resultados dos ensaios com o compressor 2, alimentação distorcida.....	58
Tabela 6.7 - Resultados dos ensaios com o compressor 3, alimentação distorcida.....	61
Tabela 6.8 - Resultados dos ensaios com o compressor 4, alimentação distorcida.....	63

LISTA DE ABREVIATURAS

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
CRS	<i>Capacitor Start and Run</i>
CSIR	<i>Capacitor Start - Inductive Run</i>
DC	<i>Direct Current</i>
DEC	Duração Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora
DHT _i	Distorção Harmônica Total da Corrente
DHT _v	Distorção Harmônica Total da Tensão
FEC	Frequência Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora
FEM	Força Magneto Motriz
FP	Fator de Potência
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IDHM	Índice de Desenvolvimento Humano Municipal
IEC	International Electrotechnical Commission
LAMQEE	Laboratório de Análise e Monitoramento da Energia Elétrica
LRA	<i>Locked Rotor Amps</i>
MIM	Motor de Indução Monofásico
PRODIST	Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional
PTC	<i>Positive Temperature Coefficient</i>
QEE	Qualidade da Energia Elétrica
RMS	<i>Root Mean Square</i>
R	Resistência Elétrica
RSCR	<i>Resistive Start - Capacitor Run</i>
RSIR	<i>Resistive Start - Inductive Run</i>
SPEED	<i>Scottish Power Electronics and Electric Drives</i>
TEMP	Temperatura
THD	<i>Total Harmonic Distortion</i>

1 - INTRODUÇÃO

A energia elétrica é muito presente na vida da população brasileira. Segundo o Atlas da Energia Elétrica do Brasil, no ano de 2008, cerca de 95% da população tinha acesso à rede elétrica, persistindo o objetivo em atingir 100% da população através de programas sociais (ANEEL, 2008). Apesar de proporcionar conforto, a energia elétrica também traz riscos, tanto para o usuário quanto para o equipamento elétrico/eletrônico em operação (energizado).

Sendo assim, para propiciar o melhor uso da energia elétrica, são necessárias e aplicadas normas de segurança nas instalações, bem como normas regulamentadoras para garantir o fornecimento de energia dentro dos níveis suportados pelos equipamentos.

Com a garantia de que a rede elétrica será estável, cabe ao fabricante produzir equipamentos que não causem distúrbios significativos ao sistema elétrico. É evidente que cada equipamento conectado à rede terá um comportamento distinto, pois são produtos diferentes, com tecnologia variada e operam em vários níveis de corrente e potência.

Busca-se então, cada vez mais fazer o uso eficiente da energia elétrica, de forma que o aumento no consumo não cause muito impacto no aumento da oferta de energia (ANEEL, 2008). Um ponto importante é que aliado à eficiência energética deve-se olhar para a qualidade da energia elétrica (QEE), pois um fator pode influenciar em aspectos do outro.

Sendo assim, torna-se necessário estudar cada classe de equipamento separadamente, evidenciando o impacto que os mesmos podem vir a causar no sistema em que estão inseridos e o seu desempenho frente ao fornecimento desejável de energia, bem como frente aos limites em que poderão vir a ser submetidos.

Tem-se que a variedade de equipamentos utilizados pelos consumidores também se deve à busca por um maior conforto residencial. O consumo de energia elétrica está intimamente ligado ao conforto domiciliar, como, por exemplo, na climatização do ambiente e uso de eletrônicos para lazer. Diretamente atrelado ao consumo da energia, sabe-se que de 1991 a 2010 houve um crescimento de R\$ 346,31 na renda média dos brasileiros (ANEEL, 2013), demonstrando crescimento do poder aquisitivo.

Dentre os eletrodomésticos destacam-se os refrigeradores, presentes em mais de 93% das residências brasileiras (IBGE, CENSO 2010). Os refrigeradores utilizam compressores herméticos no seu circuito térmico. Essa tecnologia de refrigeração é antiga, mas é muito presente no mercado, pelo seu custo e eficiência (TECUMSEH do Brasil Ltda.).

Baseado nessa premissa propõe-se a análise de compressores herméticos na qualidade da energia elétrica. Sendo este um equipamento indispensável e aplicado em sistemas de refrigeração comercialmente disponibilizados aos consumidores finais.

Busca-se pela análise registrar o comportamento destes equipamentos operando em regime permanente e em diversas configurações de ligação e de fornecimento da energia.

1.1 - Objetivos do trabalho

O objetivo principal deste trabalho é analisar e registrar o desempenho dos compressores herméticos em um ambiente laboratorial controlado, os quais foram disponibilizados através de um conjunto didático, levantando os dados sobre as distorções harmônicas de corrente causadas pela sua operação e o impacto dessas distorções nas demais grandezas elétricas associadas ao processo.

Também se tem como objetivo por esta pesquisa, compilar e disponibilizar todas as informações do conjunto didático utilizado em laboratório, facilitando assim a sua aplicação em trabalhos futuros.

1.2 - Estrutura do trabalho

Este trabalho está organizado da seguinte forma:

- **Capítulo 2:** Contextualiza a aplicação dos compressores herméticos em sistemas de refrigeração. Apresenta as regulamentações e estudos realizados no contexto da qualidade da energia elétrica.
- **Capítulo 3:** Descreve os compressores herméticos do conjunto didático utilizado. Lista e descreve a função dos componentes elétricos utilizados e as configurações das conexões realizadas.
- **Capítulo 4:** Apresenta um roteiro para a realização dos ensaios laboratoriais em ambiente controlado.
- **Capítulo 5:** Descreve as ferramentas utilizadas nos ensaios e na análise dos resultados.
- **Capítulo 6:** Apresenta os resultados dos ensaios realizados, de forma gráfica e numérica. Contém uma breve análise dos resultados observados no decorrer dos experimentos.
- **Capítulo 7:** Destaca as conclusões obtidas após a análise dos resultados dos ensaios realizados.

2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A qualidade de vida da população está intimamente ligada ao desenvolvimento do país. O Índice de Desenvolvimento Humano Municipal (IDHM) apresenta uma análise da qualidade de vida da população baseado nos dados sobre longevidade, educação e renda per capita. O IDHM brasileiro cresceu 14,2% no período de 1991 a 2010, sendo que o aumento de R\$ 346,31 na renda per capita média foi o maior responsável pela elevação do índice (ANEEL, 2013). Este resultado demonstra que o poder aquisitivo da população brasileira cresceu consideravelmente.

O aumento no poder aquisitivo da população, garante a satisfação das suas necessidades básicas e leva à busca por maior conforto, seja na forma de lazer, ou na compra de bens materiais. Os dados do IBGE apontam que em 2010, 93,7% das residências brasileiras possuíam geladeira (IBGE, CENSO 2010), tornando este equipamento muito participativo no consumo elétrico residencial e um objeto de estudo em pesquisas atreladas à eficiência energética (PROCEL, 2013).

Vale comentar que aliado ao aumento da renda há também um investimento das companhias de distribuição de energia elétrica em programas de doação de lâmpadas de alta eficiência e geladeiras para a população de baixa renda. O montante investido é de 0,25% da receita líquida dessas companhias (ANEEL, 2008).

O aumento no consumo de energia elétrica é inevitável, porém, deseja-se que esse crescimento seja controlado, de forma a não comprometer a qualidade do serviço. Uma alternativa para se controlar essa expansão é o incentivo ao uso eficiente de energia elétrica (ANEEL, 2008).

O selo Procel é uma iniciativa da Eletrobrás de incentivar os consumidores a optar por equipamentos mais econômicos, buscando uma redução no consumo médio de energia, o que impacta diretamente na necessidade de geração do setor elétrico. Segundo a Aneel (2008), o consumo de energia elétrica no Brasil cresceu na média de 5% ao ano entre 2003 e 2007. Esses dados indicam a necessidade de se analisar em conjunto o aumento de equipamentos elétricos instalados, tanto em ambientes residenciais, industriais e comerciais, e o seu consequente impacto no consumo.

Os setores industrial, comercial e residencial juntos, representaram mais de 80% da energia elétrica consumida no Brasil em 2007 (ANEEL, 2008). Os refrigeradores (freezers, geladeiras, frigobares e bebedouros) são bastantes presentes nesses setores e operam de forma ininterrupta, principalmente onde existe a necessidade de conservação de alimentos e medicamentos (TORASSI, 2009; VALERY, 1990).

Existem diversos fatores que influenciam no aumento do consumo de geladeiras, como citam Masjuki et al. (2000):

- Temperatura ambiente: há um aumento de 40 Wh no consumo da geladeira para cada 1°C de elevação na temperatura ambiente.
- Ajuste do termostato: aumento de 10% no consumo para cada 1°C reduzido na temperatura do termostato. Fator que demonstra a importância do usuário ajustar seu equipamento de forma correta, para não pagar mais por isso.
- Número de aberturas da porta: aumento de 10 Wh para cada abertura.
- Quantidade de alimento conservado: consumo de 90 Wh para cada kg de água, na temperatura ambiente de 25°C, adicionada à geladeira.

Esses fatores demonstram que o incentivo à fabricação e compra de equipamentos mais eficientes não são as únicas coisas a serem feitas para reduzir o consumo de energia elétrica. Torna-se necessário também orientar os consumidores sobre o uso consciente de seus equipamentos elétricos (ANEEL, 2008).

Aliado à eficiência energética, a Aneel também busca a garantia da qualidade da energia elétrica (QEE) oferecida aos consumidores, utilizando, por exemplo, indicadores como DEC (Duração Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora) e FEC (Frequência Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora) como forma de fiscalizar e informar à população da garantia do serviço de fornecimento de energia elétrica pelas companhias distribuidoras (ANEEL, 2008).

O PRODIST (Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional) estabelece indicadores para a QEE, definindo os padrões que devem ser mantidos e as responsabilidades das partes envolvidas (consumidores com instalações conectadas em classe de tensão de distribuição, produtores, distribuidoras e transmissoras de energia, por exemplo). Além dos indicadores associados à QEE já apontados (DEC e FEC), dentre os demais, estão também o fator de potência e as distorções harmônicas (ANEEL, 2012).

As distorções harmônicas são fenômenos associados à deformação das formas de onda de tensão e corrente pela presença de componentes harmônicas. As componentes harmônicas são múltiplas inteiras da frequência fundamental do sinal em operação no sistema elétrico, que neste caso é de 60 Hz. (ANEEL, 2012).

O PRODIST estabelece níveis de distorção harmônica de tensão para serem monitorados pelas distribuidoras de energia, bem como a forma de se realizar as medidas e de se calcular esses valores (ANEEL, 2012).

Pompeo (2011) verificou o impacto de distorções harmônicas de corrente em motores de indução monofásicos (MIM), aplicados em compressor herméticos nos refrigeradores

comerciais. O trabalho evidencia que todas as distorções observadas eram provenientes do próprio projeto dos MIM e afetavam o torque de partida dos mesmos.

A presença de componentes harmônicas é indesejada para os motores de indução, pois ocasiona aumento nas perdas elétricas, aumento de ruído e criam torque pulsante (KHOOBROO et al., 2008).

Determinadas componentes harmônicas afetam de maneira distinta o funcionamento de um motor de indução (FEI; LLOYD; DIERKES, 1995), a saber:

- Componentes harmônicas de sequência positiva (1^a , 4^a , 7^a , ..., n): causam aumento no torque de partida do motor;
- Componentes harmônicas de sequência negativa (2^a , 5^a , 8^a , ..., n): causam diminuição no torque de partida do motor; e
- Componentes harmônicas de ordem elevada: tendem a diminuir o torque máximo do motor.

Da prática, tem-se que a presença de componentes harmônicas pelo próprio aspecto construtivo do motor pode ser minimizada (POMPEO, 2011), mas ao ser submetido a um ambiente com outras cargas instaladas o compressor estará em interação com as distorções harmônicas de corrente e de tensão dos demais equipamentos e da própria rede elétrica (PIRES, 2006).

A Distorção Harmônica Total da Corrente (DHT_i) do equipamento depende do seu aspecto construtivo, enquanto a Distorção Harmônica Total da Tensão (DHT_v), dependente do fornecimento da energia de alimentação, possui limites a serem controlados pelas companhias de distribuição de energia, sendo que para sistemas com tensão nominal inferior a 1 kV, o DHT_v máximo tolerado é de 10% em relação à amplitude da tensão fundamental (ANEEL, 2012).

Segundo Fernandes (2009), existem normas e recomendações para os fabricantes quanto aos limites de harmônicas sobre os equipamentos. O autor aponta que a IEC 61000-3-2 estabelece limites de correntes harmônicas para várias classes de equipamentos. Os limites recomendados para equipamentos da Classe A, onde se enquadra os refrigeradores, são:

- 2,3% de corrente harmônica de 3^a ordem;
- 1,14% de corrente harmônica de 5^a ordem; e
- 0,77% de corrente harmônica de 7^a ordem.

O valor porcentual da corrente harmônica é a relação entre os valores RMS da componente harmônica pela componente fundamental. Segundo o PRODIST (ANEEL, 2008) determina-se a DHT_v pela equação 2.1.

Fernandes (2009) aponta que a DTH_I pode ser calculada pelo método convencional pelo IEC (*International Electrotechnical Commission*), apresentado pela equação 2.2.

$$DHT_V = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{h_{máx}} V_h^2}}{V_1} \cdot 100\% \quad (2.1)$$

Onde:

- h: ordem da componente harmônica;
- V_h : componente harmônica de tensão de h-ésima ordem; e
- V_1 : componente fundamental de tensão.

$$DHT_I = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{h_{máx}} I_h^2}}{I_1} \cdot 100\% \quad (2.2)$$

Onde:

- I_h : componente harmônica de corrente de h-ésima ordem; e
- I_1 : componente fundamental de corrente.

Pires (2006) observou que o DHT_I de um refrigerador doméstico é em média de 8%, pela análise de 5 modelos distintos no contexto da QEE.

3 - COMPRESSORES HERMÉTICOS

Os compressores herméticos presentes na bancada do Laboratório de Análise e Monitoramento da Energia Elétrica (LAMQEE) foram doados pela empresa *Tecumseh* do Brasil Ltda. São quatro equipamentos montados para uso didático que possuem motores de indução monofásicos (MIM) projetados para o estudo da influência das componentes harmônicas às suas curvas de torques (POMPEO, 2011).

Neste capítulo serão descritos os componentes elétricos utilizados na montagem desses quatro compressores.

Na Figura 3.1 são apresentados os compressores que compõe a bancada didática, enquanto que na Figura 3.2 observa-se um deles isoladamente. Cada conjunto contém um compressor hermético, um ventilador, componentes elétricos e o sistema de circulação do fluido refrigerante que simula a condição de operação do compressor.

O termo hermético se refere ao fato do compressor ser perfeitamente selado, não havendo troca de gases com o ambiente externo. O gás refrigerante entra no compressor pelo tubo de sucção, com temperatura e pressão baixas. O gás é então comprimido, sendo liberado no tubo de descarga com pressão e temperatura altas, dirigindo-se para o condensador do circuito térmico, onde perde calor para o meio externo. Com temperatura mais baixa o gás passa por um tubo capilar, onde a sua pressão é reduzida, atingindo baixa temperatura. Em seguida o gás passa pelo evaporador, onde retira o calor do ambiente que se deseja resfriar.

A forma como o gás é comprimido classifica o tipo de compressor hermético. Os compressores da bancada são do tipo alternativo, onde o gás é comprimido por um pistão acoplado mecanicamente ao motor por um conjunto biela-manivela (PEIXOTO, 2011), como ilustrado na Figura 3.3.



Figura 3.1 - Bancada didática com os quatro compressores herméticos analisados.
(Fonte: próprio autor).

Na fase de admissão do compressor alternativo, o fluido refrigerante, no estado gasoso, preenche a câmara cilíndrica com o retorno do pistão e a abertura da válvula de sucção. Na sequência ocorre a fase de compressão, onde as válvulas estão fechadas e o pistão avança, causando uma diminuição no volume da câmara cilíndrica e, consequentemente, um aumento na pressão do gás. Atingindo um determinado valor de pressão ocorre a abertura da válvula de descarga, e assim o gás deixa a câmara, liberando-a para o próximo ciclo do motor (PEIXOTO, 2011).



Figura 3.2 - Compressor e os seus componentes.
(Fonte: próprio autor).

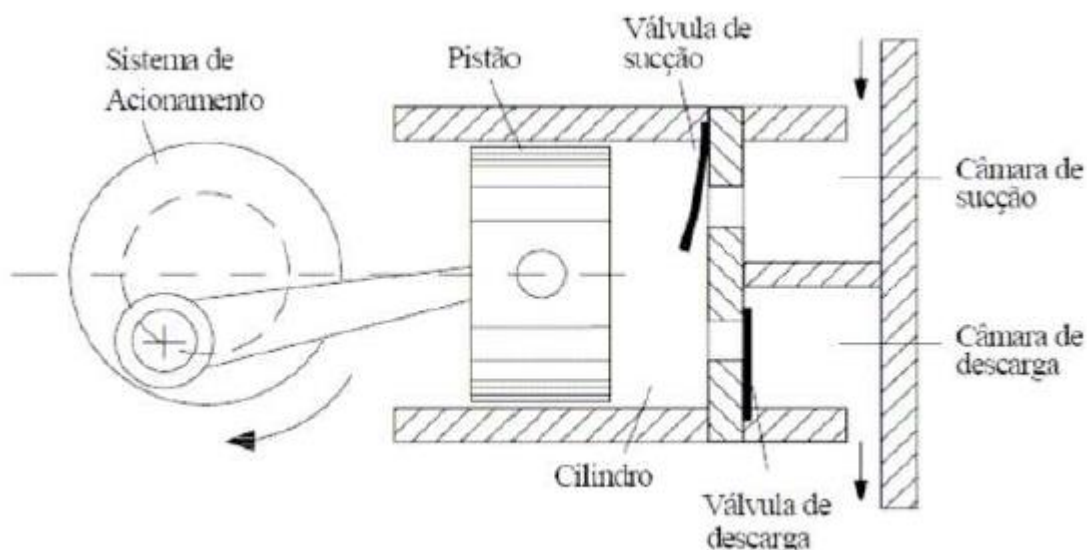


Figura 3.3 - Esquema de funcionamento de um compressor alternativo.
(Fonte: POMPEO (2011) e PEIXOTO (2011)).

3.1 - Identificação dos compressores

Cabe esclarecer que, para fins comerciais, os compressores *Tecumseh* possuem uma etiqueta de identificação apresentando dados técnicos do equipamento. O modelo da etiqueta é apresentado na Figura 3.4.



Figura 3.4 - Etiqueta de identificação de um compressor.
(Fonte: TECUMSEH do Brasil Ltda, b).

A etiqueta apresenta informações importantes para os técnicos que farão a instalação e manutenção do equipamento, incluindo:

- O fluido refrigerante do compressor: no modelo da etiqueta temos um R134A (Tetrafluoretano);
- A tensão de alimentação do equipamento: 220 V;
- A frequência da alimentação: 50 Hz ou 60 Hz;

- A corrente de rotor travado do compressor (LRA): 13,5 (A) nessa etiqueta apresentada. Esse valor representa o máximo de corrente solicitado pelo equipamento em operação.

Afirma-se que os compressores que compõem a bancada didática foram projetados para a tensão de 220 V, garantindo uma corrente mais baixa de operação.

3.2 - Elementos dos compressores

De maneira simplificada podemos dizer que os compressores herméticos são compostos por uma parte mecânica, envolvendo a compressão dos gases e trocas de calor, e uma parte elétrica, composta por um motor e elementos de proteção, acionamento e operação do compressor.

Este trabalho é focado na análise elétrica do compressor.

Os motores empregados na montagem dos compressores são descritos no item 3.2.1, sendo os esquemas de ligação descritos no item 3.2.2.

3.2.1 - Motores

Os compressores analisados utilizam MIM's, sendo compostos por um estator, parte fixa, e um rotor tipo gaiola de esquilo, parte móvel.

O rotor gaiola de esquilo (Figura 3.5) possui barramentos de alumínio curto circuitados e paralelos ao eixo de rotação. Por esses barramentos circula uma corrente elétrica, induzida pelo campo elétrico produzido pelo estator.

O estator (Figura 3.6) possui dois conjuntos de bobinas: principal e auxiliar. As bobinas são conectadas em um ponto comum e defasadas de 90°. A defasagem é necessária para a existência de um campo girante, produzindo torque no motor.

A bobina principal e a auxiliar dos MIM's utilizados nos compressores da bancada são de cobre.

Pompeo (2011) utilizou o programa SPEED no projeto dos quatro MIM's utilizados na bancada experimental desta pesquisa, para o estudo da influência da presença de componentes harmônicas no torque de partida dos motores. O programa SPEED é uma ferramenta comercial, criada pelo Professor Tim Miller na Universidade de Glasgow, e é utilizado pela empresa *Tecumseh* do Brasil para o projeto de seus motores. A empresa paga por licenças desse programa e seu uso é restrito aos seus projetistas de motores.



Figura 3.5 - Rotor gaiola de esquilo.
(Fonte: PEIXOTO, 2011).

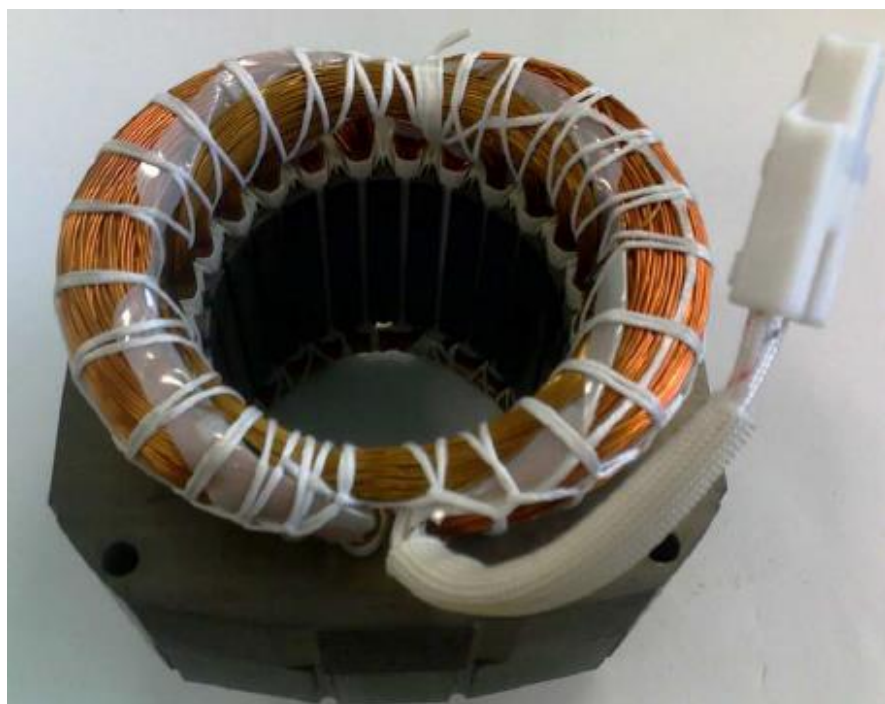


Figura 3.6 - Estator.
(Fonte: PEIXOTO, 2011).

Neste trabalho, os motores serão descritos na sequência pela numeração de 1 a 4, sendo apresentada também, a numeração dos compressores herméticos montados com esses motores:

- **Motor 1: projetado para possuir baixa concentração de componentes harmônicas.** Através de simulação, foram observados valores de componentes harmônicas de corrente abaixo de 2% na bobina principal, e abaixo de 3,5% na

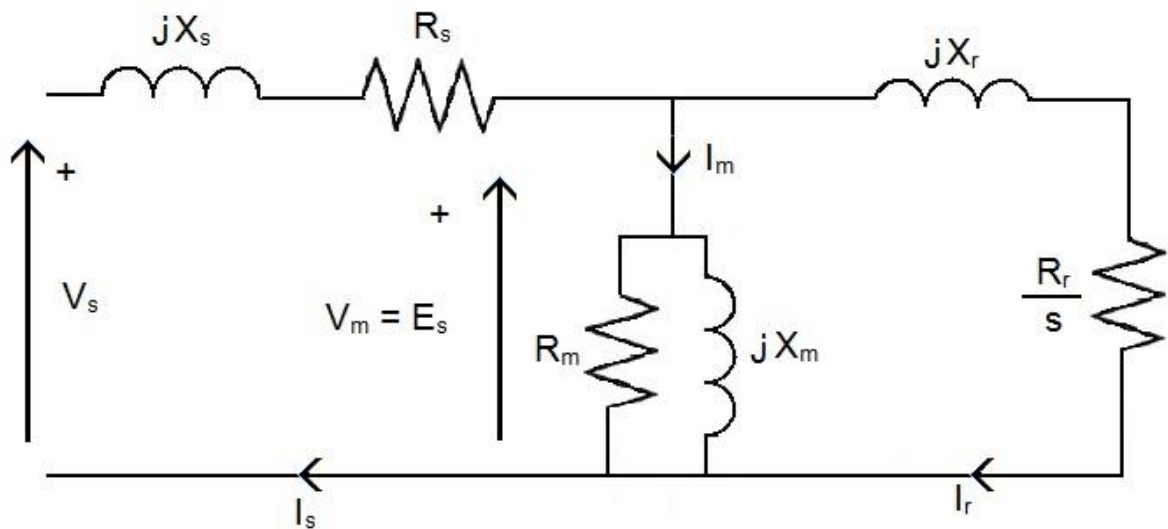
bobina auxiliar, em relação à componente fundamental. Tais situações foram utilizadas na montagem do Compressor 1.

- **Motor 2: motor com alta concentração de componente harmônica de 3ª ordem.** Pela simulação esta configuração apresentou cerca de 10% de componente harmônica de 3ª ordem na bobina principal, e 15% na bobina auxiliar. Tais situações foram utilizadas na montagem do Compressor 2.
- **Motor 3: motor projetado com concentração de componente harmônica de 5ª ordem.** Para esta simulação, o modelo apresentou cerca de 8% de componente harmônica de 5ª ordem na bobina principal e de 10% na bobina auxiliar. Tais condições foram utilizadas na montagem do Compressor 3.
- **Motor 4: projetado para possuir alta concentração de componente harmônica de 7ª ordem.** Pela simulação realizada o motor apresentou cerca de 7% de componente harmônica de 7ª ordem na bobina principal e 9% na auxiliar. Utilizado na montagem do Compressor 4.

Pompeo (2011) observou vários efeitos nas curvas de torque dos quatro motores pela presença de componentes harmônicas. O autor evidenciou a necessidade de se utilizar o capacitor de partida nos compressores 3 e 4. Sem o capacitor, os motores desses compressores não são capazes de gerar o torque de partida necessário para o seu funcionamento.

Pompeo (2011) *apud* Veinott (1959) e Morril (1929) apresenta um circuito equivalente simplificado para motores de indução, representando o rotor refletido no lado do estator, e um circuito contemplando o efeito das componentes harmônicas ímpares no motor.

O circuito simplificado da Figura 3.7 representa os efeitos observados em um motor de indução para uma tensão de alimentação puramente senoidal.



Legenda:

R_s é a resistência do enrolamento do estator;

R_r é a resistência do enrolamento do rotor;

R_m é a resistência de perdas do ferromagnético;

V_s é a tensão de alimentação;

V_m é a tensão de magnetização;

s é o escorregamento;

X_s é a reatância de dispersão do estator;

X_r é a reatância de dispersão do rotor;

X_m é a reatância de magnetização;

I_s é a corrente do estator;

I_r é a corrente do rotor;

I_m é a corrente de magnetização.

Figura 3.7 - Circuito simplificado para o motor de indução.
(Fonte: Pompeo, 2011).

Para representar o efeito das componentes harmônicas, Pompeo (2011) apresenta separadamente o equacionamento para o enrolamento principal e auxiliar, utilizando a série de Fourier para representar a força magneto motriz (FEM) no entreferro do motor como uma soma de senóides. Ressalta-se que a análise e apresentação deste equacionamento não foram foco deste trabalho.

O circuito englobando os efeitos das componentes harmônicas no enrolamento principal e auxiliar de um motor de indução é apresentado na Figura 3.8.

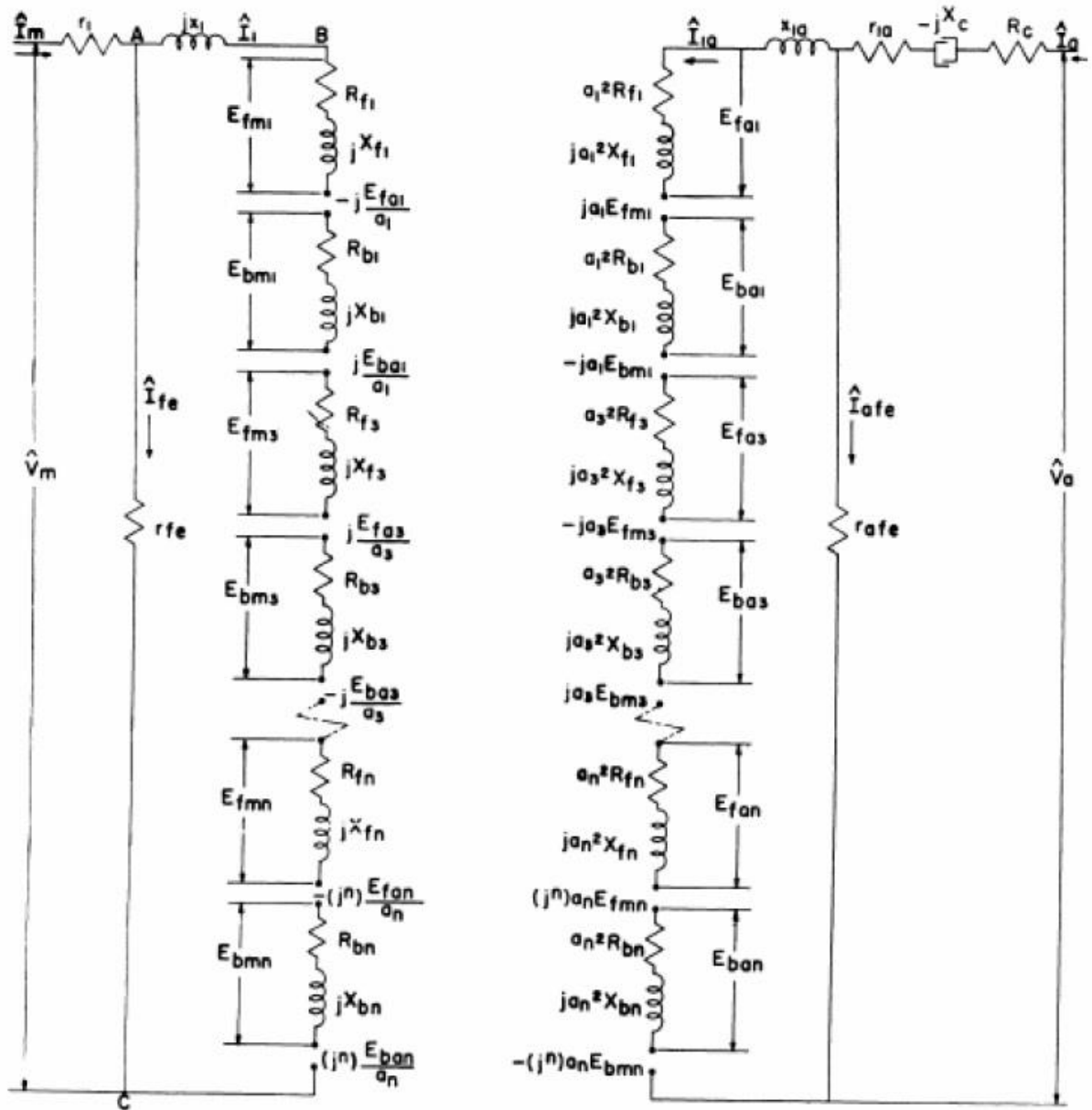


Figura 3.8 - Circuito do motor de indução contemplando as componentes harmônicas ímpares.
(Fonte: Pompeo, 2011).

Na Figura 3.8 têm-se:

- \hat{V}_m é a tensão aplicada nos terminais da bobina principal;
- \hat{I}_m é a corrente na bobina principal;
- r_1 é a resistência da bobina principal;
- jx_1 é a reatância da bobina principal;
- \hat{I}_1 é a componente da corrente da bobina principal geradora de campo;
- \hat{I}_{Fe} é componente de corrente de magnetização que circula pela bobina principal;
- r_{Fe} é resistência do núcleo de ferro do estator observada pela bobina principal;

- $E_{f_{mn}}$ é a n-ésima componente de sequência positiva da tensão, induzida na bobina principal;
- $E_{b_{mn}}$ é a n-ésima componente de sequência negativa da tensão, induzida na bobina principal;
- R_{f_n} é a n-ésima componente de resistência resultante de uma componente harmônica de sequência positiva;
- jX_{f_n} é a n-ésima componente de reatância resultante de uma componente harmônica de sequência positiva;
- R_{b_n} é a n-ésima componente de resistência resultante de uma componente harmônica de sequência negativa;
- jX_{b_n} é a n-ésima componente de reatância resultante de uma componente harmônica de sequência negativa;
- \hat{V}_a é a tensão aplicada nos terminais da bobina auxiliar;
- \hat{I}_a é a corrente na bobina auxiliar;
- R_c é a resistência do elemento de partida do motor de indução;
- jX_c é a reatância do elemento de partida do motor de indução;
- r_{1a} é a resistência da bobina auxiliar;
- jx_{1a} é a reatância da bobina auxiliar;
- \hat{I}_{1a} é a componente da corrente da bobina auxiliar geradora de campo;
- \hat{I}_{aFe} é a componente de corrente de magnetização que circula pela bobina auxiliar;
- r_{aFe} é a resistência do núcleo de ferro do estator observada pela bobina auxiliar;
- a_n é o n-ésimo coeficiente ímpar da série de Fourier;
- $E_{f_{an}}$ é a n-ésima componente de sequência positiva da tensão, induzida na bobina auxiliar; e
- $E_{b_{an}}$ é a n-ésima componente de sequência negativa da tensão, induzida na bobina auxiliar.

3.2.2 - Componentes elétricos

Os componentes elétricos utilizados nos compressores estudados são: protetor térmico, um relé PTC (*Positive Thermal Coefficient*) e capacitores. Esses componentes são conectados ao motor através do terminal conector na carcaça do compressor.

A descrição dos componentes é baseada no Boletim Refrigeração (TECUMSEH do Brasil Ltda., a) e no Catálogo Geral de Compressores (TECUMSEH do Brasil Ltda., b).

- O protetor térmico (Figura 3.9) é composto por um material bi metálico, sensível a corrente, que abre o circuito para proteção do motor elétrico em casos de sobrecarga

de corrente ou alta temperatura. Esse componente deve ser dimensionado para valores acima da máxima corrente de operação do motor, de modo que não opere na ausência de anormalidades.

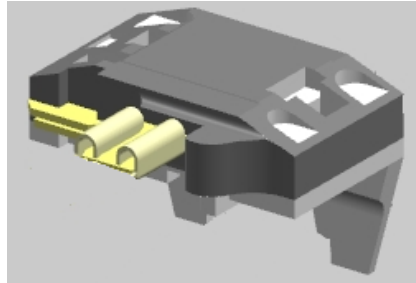


Figura 3.9 - Protetor térmico.
(Fonte: TECUMSEH do Brasil Ltda.).

- O relê PTC (Figura 3.10) é um elemento que atua na partida do compressor. Seu nome é proveniente do termo em inglês para Coeficiente de Temperatura Positivo. Possui uma pastilha de material cerâmico que aumenta sua resistência elétrica com a passagem de corrente. Na partida, enquanto frio, opera como um resistor em série com a bobina auxiliar. Quando sua resistência aumenta, este tende a reduzir a corrente que passa por um determinado elemento (bobina auxiliar ou capacitor de partida) chegando a valores muito baixos, eliminando esse elemento do circuito no regime permanente. Na sua aplicação é necessário um período de espera entre as partidas do compressor, para que possa esfriar.

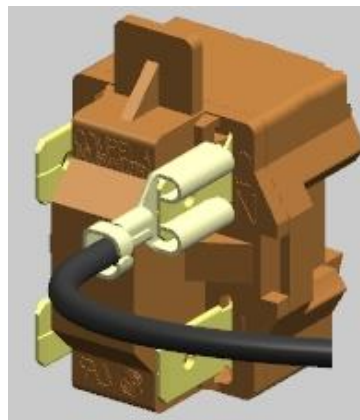


Figura 3.10 - Relê PTC.
(Fonte: TECUMSEH do Brasil Ltda.).

- O capacitor de partida (Figura 3.11) é um elemento utilizado para aumentar o torque de partida do motor. É ligado em série com a bobina auxiliar e é desconectado do circuito pelo relê quando o motor atinge a sua rotação normal de funcionamento.

- O capacitor permanente (Figura 3.12) é utilizado para aumentar a eficiência do compressor, reduzindo a potência consumida. É conectado em série com a bobina auxiliar, de forma que esta permanece energizada durante o funcionamento do compressor.



Figura 3.11 - Capacitor de partida.
(Fonte: TECUMSEH do Brasil Ltda.).

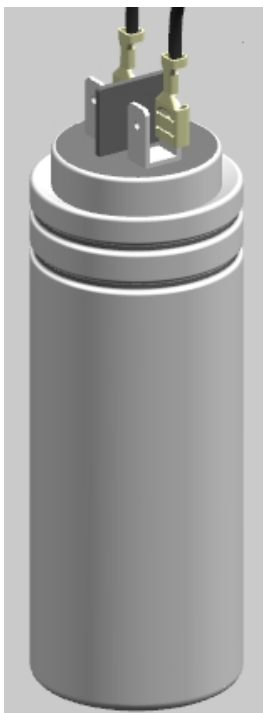


Figura 3.12 - Capacitor permanente.
(Fonte: TECUMSEH do Brasil Ltda.).

Os componentes elétricos citados são conectados aos enrolamentos do motor pelo terminal conector (Figura 3.13). O terminal R dá acesso à bobina principal do motor. O terminal S dá acesso à bobina auxiliar, e o terminal C dá acesso ao ponto de curto-circuito

entre as bobinas. Essa informação é importante para que se possa medir as resistências das bobinas e conseguir aferir a temperatura interna do motor.

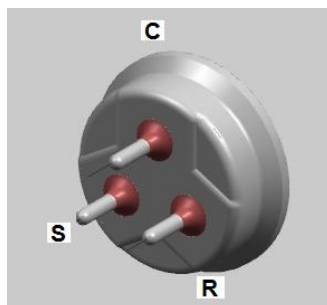


Figura 3.13 - Terminal conector.
(Fonte: TECUMSEH do Brasil Ltda.).

3.2.3 - Tipos de ligações dos compressores

Os tipos de ligações realizadas nos compressores determinarão a forma como será realizada a partida e os componentes que estarão presentes, tanto na partida, quanto na operação em regime permanente do compressor.

As descrições dos tipos de ligação baseiam-se nos catálogos *Tecumseh* (TECUMSEH do Brasil Ltda., a; TECUMSEH do Brasil Ltda., b; TECUMSEH do Brasil Ltda., c).

Os tipos de ligações recebem códigos, que serão apresentados nessa sessão, acompanhados de um esquemático das conexões realizadas e do diagrama elétrico.

No texto que segue a bobina principal também é chamada de bobina de marcha, e a bobina auxiliar de bobina de partida.

- Ligação PTCSIR (PTC + *Resistive Start - Inductive Run*) (Figura 3.14): partida realizada com o relê PTC mantendo inicialmente a bobina principal e a auxiliar, conectadas. Baseado na partida RSIR (*Resistive Start - Inductive Run*), onde há uma resistência em série com a bobina auxiliar, essa resistência é substituída pelo Relê PTC, originando a ligação PTCSIR. O relê é responsável por retirar a bobina auxiliar de operação, mantendo apenas a bobina principal no regime permanente.
- Ligação PTCCSIR (PTC + *Capacitor Start - Inductive Run*) (Figura 3.15): partida com relê PTC e princípio similar a ligação anterior. Porém, com a adição de um capacitor em série com a bobina auxiliar. O capacitor e a bobina auxiliar não atuam no regime permanente do compressor, são retirados pelo relê PTC.

- Ligação PTCSIR (PTC + *Resistive Start - Capacitor Run*) (Figura 3.16): Partida com relê PTC e uso de um capacitor permanente, mantendo a bobina auxiliar energizada durante a operação do motor. Princípio de partida similar à RSCR, com o relê PTC atuando como uma resistência em série com a bobina auxiliar durante a partida.
- Ligação PTCCSR (Figura 3.17): Partida com relê PTC, com a presença de um capacitor de partida, responsável por aumentar o torque inicial do motor e um capacitor permanente, determinando que a bobina auxiliar permaneça energizada durante o regime permanente.

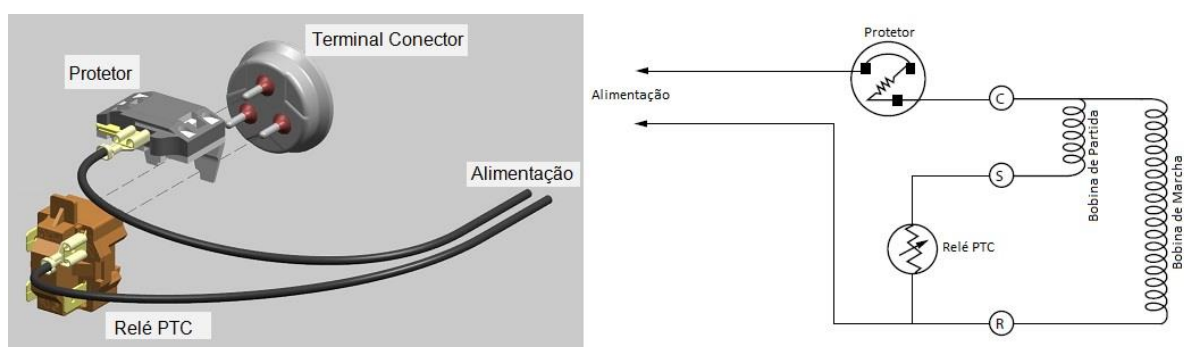


Figura 3.14 - Esquema e diagrama de ligação PTCSIR.
(Fonte: TECUMSEH do Brasil Ltda.).

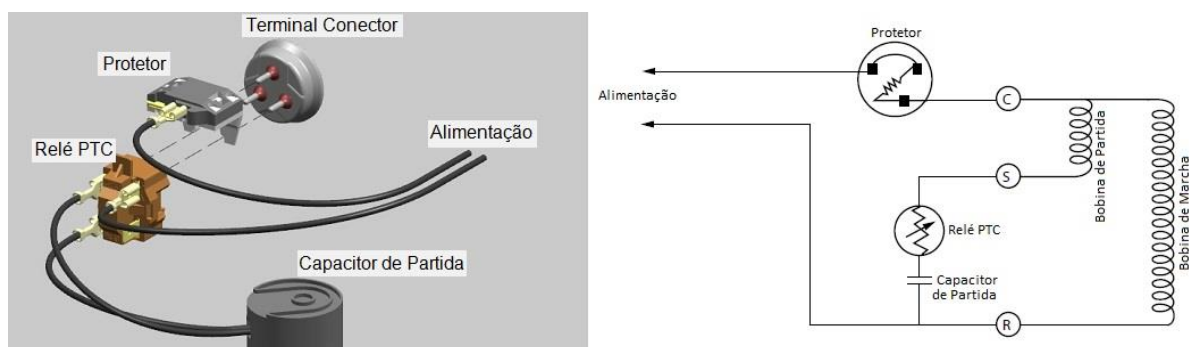


Figura 3.15 - Esquema e diagrama de ligação PTCCSR.
(Fonte: TECUMSEH do Brasil Ltda.).

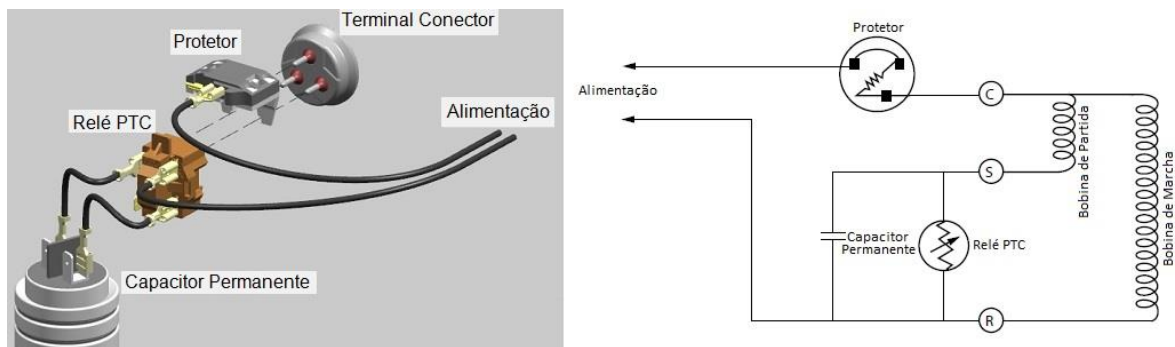


Figura 3.16 - Esquema e diagrama de ligação PTCSR.
(Fonte: TECUMSEH do Brasil Ltda.).

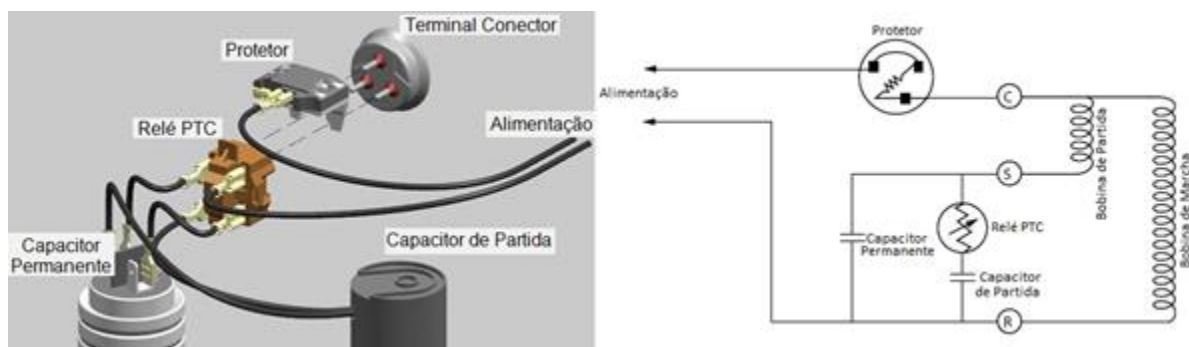


Figura 3.17 - Esquema e diagrama de ligação PTCCSR.
(Fonte: TECUMSEH do Brasil Ltda.).

Cabe afirmar que os componentes elétricos foram dimensionados por ensaios realizados com os motores e compressores, nos laboratórios da empresa *Tecumseh*.

Os compressores 1 e 2 da bancada didática podem ser configurados em PTCSIR e PTCSR e, em resumo não utilizam capacitor de partida; e o capacitor permanente é opcional.

Já os compressores 3 e 4 só podem ser configurados em PTCCSIR e PTCCSR, ou seja, necessitam de capacitor de partida; sendo o capacitor permanente opcional.

Conforme observado nas Figuras 3.1 e 3.2, os compressores foram montados em uma base acompanhados de um ventilador. O ventilador opera na tensão de 220 V, utiliza uma corrente de 250 mArms, e consome uma potência de 25 W. Os quatro compressores possuem um ventilador similar.

O uso dos ventiladores é necessário pelo fato do circuito térmico ser compacto, o que ocasiona num aquecimento rápido e alta temperatura dos compressores. Sem a sua presença, o protetor térmico do compressor atuaria, desligando o equipamento.

Os terminais da alimentação do ventilador são conectados em paralelo à alimentação do compressor.

4 - METODOLOGIA

Este capítulo apresenta as conexões feitas na bancada experimental do LAMQEE para a realização dos ensaios com os compressores herméticos, além de descrever a sequência de testes realizados, a forma de coleta dos dados e o tratamento realizado para a análise dos resultados.

4.1 - Descrição das conexões realizadas

Para o estudo dos compressores herméticos no contexto da QEE, dispôs-se de um gerador arbitrário de sinais, um multímetro para medição da resistência elétrica e um computador contendo o programa de controle do gerador e análise da QEE. O analisador da QEE encontra-se no mesmo chassi do gerador arbitrário de sinais.

Pelo próprio programa de gerenciamento do gerador arbitrário de sinais, fez-se a coleta e o armazenamento dos dados de interesse para o trabalho.

O diagrama de blocos da Figura 4.1 ilustra a disposição dos elementos que compõe a bancada experimental.

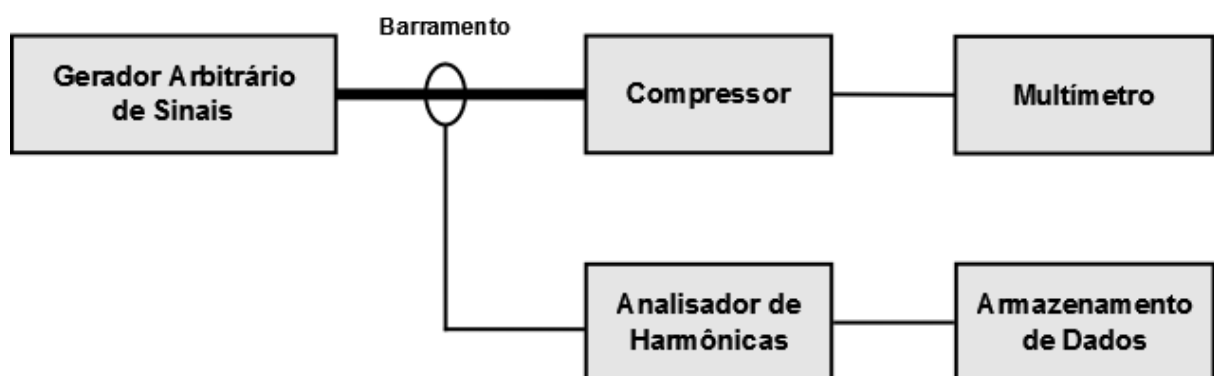


Figura 4.1 - Diagrama de blocos ilustrando as conexões entre os elementos que compõe a bancada experimental no LAMQEE.

Cabe adiantar que todos os compressores foram analisados individualmente. Portanto, o mesmo multímetro é utilizado para medir a resistência elétrica de cada um dos mesmos.

4.2 - Procedimentos

Nessa sessão apresenta-se a sequência de testes realizados com os compressores herméticos.

O fluxograma da Figura 4.2 apresenta os passos realizados durante a análise dos quatro compressores em todas as configurações possíveis para os ensaios propostos.

Os passos que compõe os ensaios são:

Passo 1: Os ensaios começam com a escolha do compressor a ser analisado, onde:

- **Compressor 1:** compressor com MIM projetado para mínima geração de componentes harmônicas.
- **Compressor 2:** compressor com geração de componentes harmônicas, sendo predominante a componente de 3ª ordem.
- **Compressor 3:** compressor com geração de componentes harmônicas, sendo predominante a componente de 5ª ordem.
- **Compressor 4:** compressor com geração de componentes harmônicas, sendo predominante a componente de 7ª ordem.

Passo 2: Sem os componentes elétricos, medem-se as resistências das bobinas principal e auxiliar do motor do compressor escolhido. Armazenam-se as leituras para uso futuro. Utiliza-se o terminal conector para o acesso às bobinas (item 3.2.2)

Passo 3: Fazem-se as conexões elétricas desejadas para a operação do compressor, observando as instruções descritas no item 3.2.3. Cada compressor deve ser testado sem e com o capacitor permanente.

Passo 4: Ajusta-se a fonte de alimentação para a tensão de 220 V, frequência de 60 Hz, e forma de onda desejada. Neste trabalho os compressores serão ensaiados com alimentação puramente senoidal e em seguida com alimentação distorcida.

Passo 5: Com todas as conexões realizadas e a fonte ajustada, alimenta-se o compressor.

Passo 6: Ajusta-se a janela *Waveform Display* (Capítulo 5 a ser apresentado) para atualizar as medidas de tensão e corrente do compressor ao longo do tempo. Observa-se a variação das grandezas medidas.

Passo 7: Aguarda-se o compressor atingir o regime permanente de operação. O critério adotado é o de observar que não há mais variação na potência registrada pelo *Waveform Display*, identificando que as temperaturas de descarga e sucção do compressor estão estáveis.

Passo 8: Armazena-se os dados de leitura do *Waveform Display* e do *Harmonic Analysis* (Capítulo 5). Utiliza-se a opção *SAVE* dos aplicativos, e armazenam-se as leituras em um arquivo de texto, para tratamento futuro.

Passo 9: Com os dados armazenados, desliga-se o compressor. Retiram-se os componentes elétricos, deixando o terminal conector acessível.

Passo 10: Medem-se as resistências da bobina principal e auxiliar do compressor ao final dos ensaios. Armazenam-se os valores medidos para se determinar a temperatura atingida pelo motor durante os ensaios.

O valor da temperatura do motor é dado pela equação (4.1) (TECUMSEH do Brasil Ltda., d):

$$Temp_{final} = \frac{234,5 \cdot Temp_{inicial} \cdot R_{final}}{R_{inicial} - 234,5} \quad (4.1)$$

Onde:

- Temp final: temperatura atingida pela bobina do motor;
- Temp inicial: temperatura ambiente na medição de R inicial;
- R inicial: resistência da bobina do motor antes do ensaio;
- R final: resistência da bobina do motor ao final do ensaio; e
- Temperatura inferida de resistência zero do cobre: -234,5°C.

Adotou-se o critério de se iniciar um ensaio com determinado compressor quando este estivesse frio, utilizando-se os valores das resistências das bobinas como indicativo.

Os ensaios terminam quando todos os quatro compressores forem testados em todas as configurações propostas.

4.4 - Resultados esperados

Pela metodologia proposta, espera-se verificar o impacto da presença de componentes harmônicas de corrente na operação dos compressores. Deseja-se observar os efeitos através da temperatura atingida pelos motores e pela medida das grandezas elétricas através do analisador de QEE.

A possibilidade de realizar as medidas com a aplicação uma forma de onda distorcida na alimentação dos compressores, pode indicar como um equipamento mal projetado, com geração de componentes harmônicos elevados, se comportaria em uma aplicação em conjunto com outros equipamentos também geradores de componentes harmônicas.

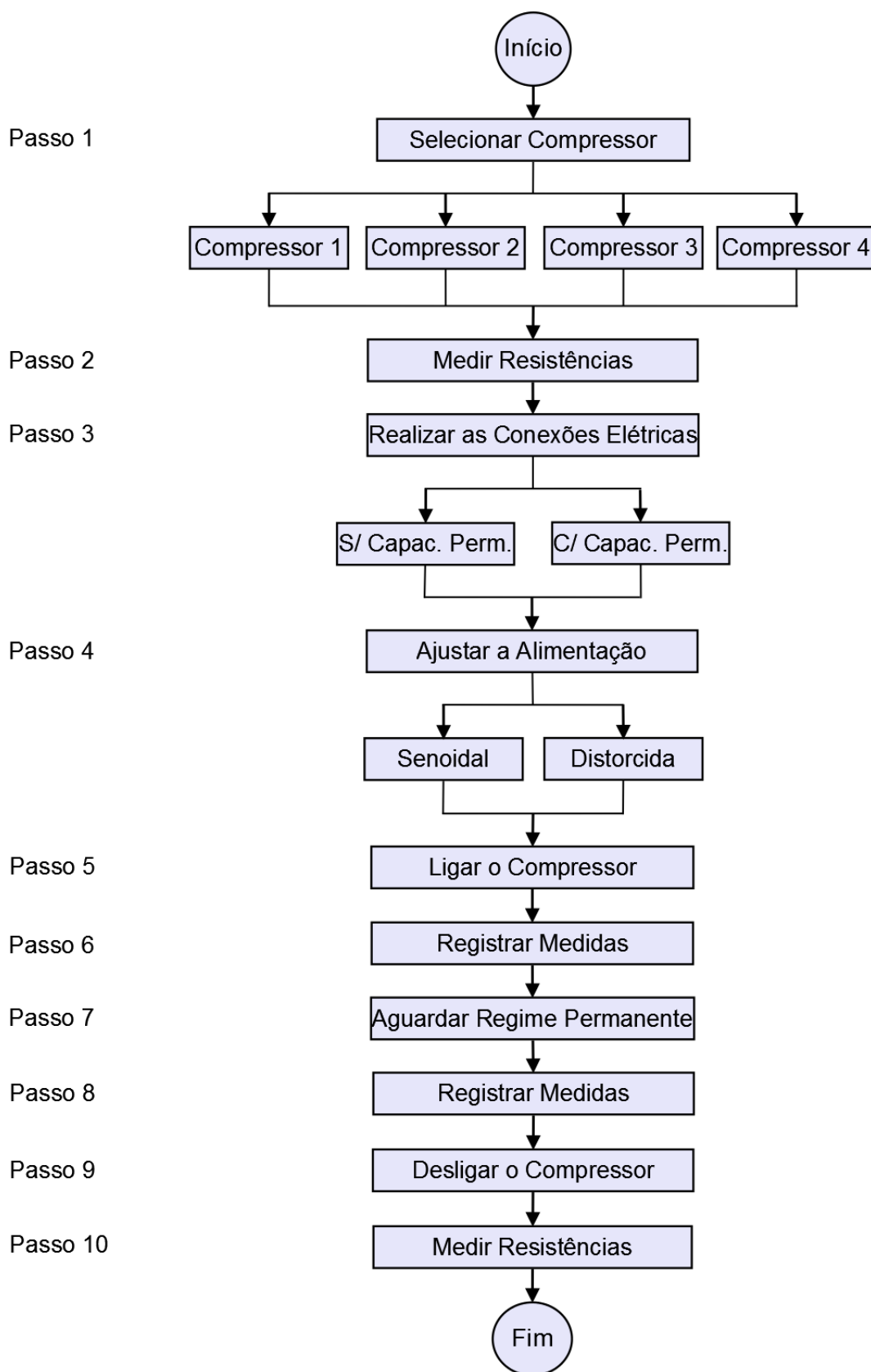


Figura 4.2 - Fluxograma dos ensaios realizados com os compressores.

5 - BANCADA EXPERIMENTAL

Este capítulo apresenta os componentes utilizados na bancada experimental do LAMQEE, envolvendo os equipamentos e as ferramentas computacionais utilizadas durante os ensaios e tratamentos dos dados.

5.1 - Descrição da bancada

A bancada experimental do LAMQEE dispunha para esta pesquisa de um gerador arbitrário de sinais, um analisador de QEE, um computador e um conjunto de cargas para realização dos ensaios (Fernandes, 2009).

O chassi que contém o gerador arbitrário de sinais e o analisador da QEE é ilustrado pela Figura 5.1. O gerador de modelo 5001iX da *California Instruments* é monofásico com potência de 5 kVA. O ajuste do gerador pode ser realizado pelo painel frontal ou pelo programa *CiguiSII iX Series II*, a ser apresentado no item 5.2

Além dos equipamentos descritos anteriormente, a bancada é composta por diversas cargas, como, por um conjunto de lâmpadas de iluminação residencial, comercial e industrial, pequenos motores e inversores, computadores e monitores (Fernandes, 2009). Contudo, o foco desta pesquisa será sobre os compressores herméticos doados pela empresa *Te-cumseh* do Brasil, descritos no Capítulo 3.



Figura 5.1 - O gerador arbitrário de sinais: modelo 5001iX da *California Instruments*.
(Fonte: foto do próprio autor).

5.2 - Ferramentas computacionais

O programa *CiguiSII iX Series II*, instalado no computador da bancada experimental, se comunica com o gerador por meio de uma porta serial RS-232.

O programa é utilizado para controle do gerador e análise da QEE.

A interface do programa *CiguiSII*, como pode ser observada na Figura 5.2, é amigável e facilita a realização dos ajustes, tornando-se um modo de configuração prático, quando comparado ao uso do painel frontal da fonte. É importante salientar que todos os ajustes da fonte devem ser realizados com a marcação “Open” na caixa de seleção “Output Relay”, de forma que as cargas conectadas à fonte não estejam energizadas durante a mudança dos parâmetros de alimentação, evitando danos aos equipamentos.

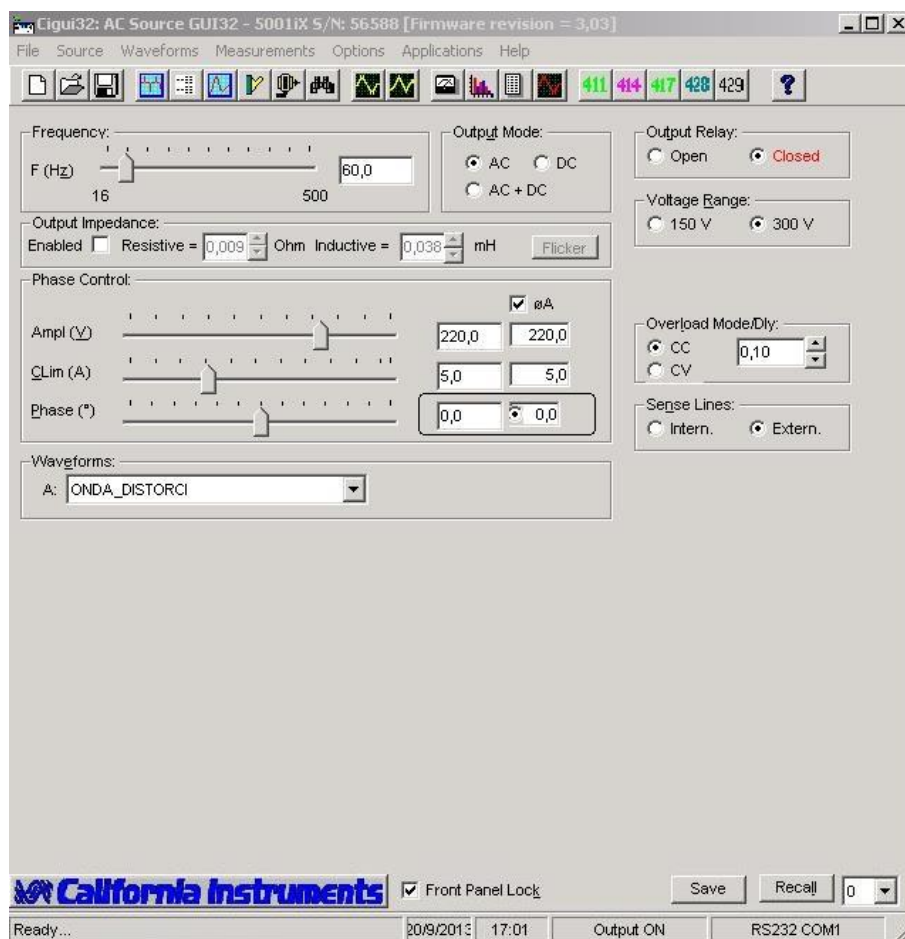


Figura 5.2 - Janela de controle da fonte.
(Fonte: programa CiguiSII).

O analisador da QEE está incorporado no próprio chassi da fonte de alimentação, sendo que o programa *CiguiSII iX Series II* possibilita a observação e análise das formas de onda das cargas na sua própria interface. Vale ressaltar que a disponibilização dos arquivos

textos com os dados registrados provenientes das funções do programa pode servir como recurso para a análise dos mesmos em outros programas que sejam de interesse.

A possibilidade de se exportar os dados de leitura abre um universo de interpretações e formas de se apresentar os resultados, sendo a forma gráfica a escolhida neste trabalho.

A janela *Harmonic Analysis* (Figura 5.3) registra as medidas das DHT de corrente e tensão da alimentação da carga estudada. Essa função possibilita a decomposição do sinal nas suas componentes harmônicas, apresentando os valores lidos de forma numérica e através de um diagrama de barras.

A forma como a função *Harmonic Analysis* dispõe visualmente os dados para o observador é apresentada na Figura 5.4.

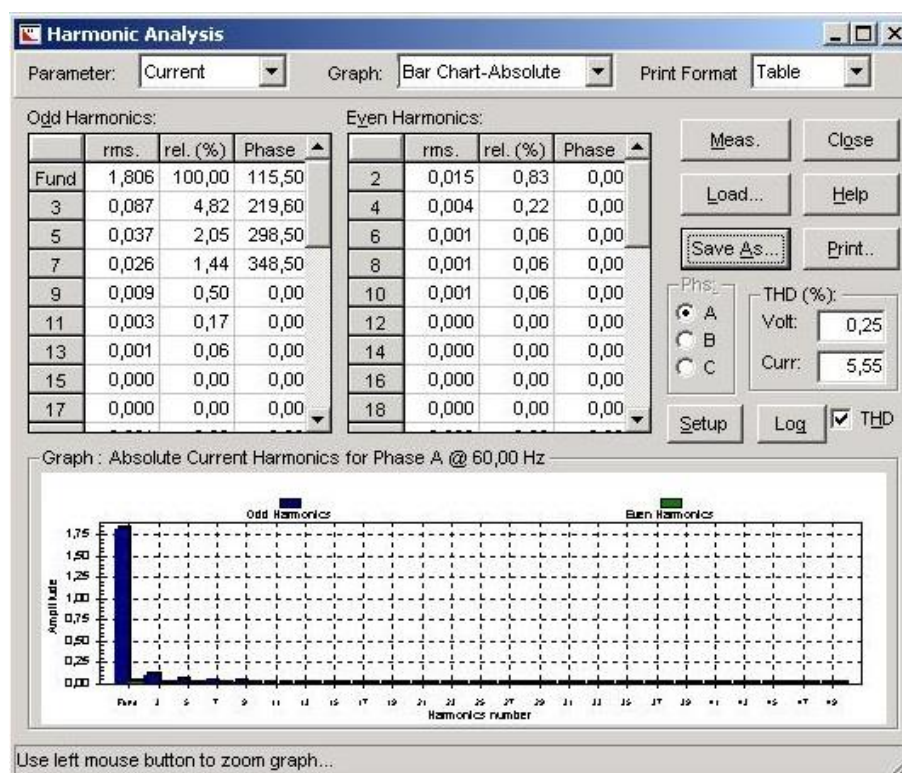


Figura 5.3 - Janela da função *Harmonic Analysis*.
(Fonte: programa CiguiSII).

"09-17-2013 , 17:32:47"	→	Data e hora da aquisição dos dados
"Current phase A"	→	Fase em que está sendo realizada a aquisição de dados
60	→	Frequência da alimentação
.25,14.07	→	DHT(%) de tensão e de corrente, respectivamente
-.057,0	→	Amplitude e ângulo de fase do sinal DC
1.031,131.4]	Amplitude e ângulo de fase das componentes harmônicas de corrente
.012,0		
.117,176.2		
.005,0		
.054,158.2		
.003,0		
.042,136.9		
.003,0		
.034,76.7		
.003,0		
.017,0		
.002,0		
.01,0		
.001,0		
.006,0		
0,0		
.003,0		
0,0		
.002,0		
0,0		
.001,0		
0,0		
0,0		
0,0		
0,0		
0,0		
0,0		
0,0		
0,0		

Figura 5.4 - Arquivo de texto criado pelo *Harmonic Analysis*.
(Fonte: próprio autor).

Outra janela do programa *CiguiSII* é o *Waveform Display*, apresentado na Figura 5.5.

O *Waveform Display* permite a observação numérica das leituras de corrente, tensão, potência, fator de crista, DHT (ou, a sigla proveniente do inglês THD - *Total Harmonic Distortion*) e fator de potência. Permite também observar as formas de onda de corrente e tensão via gráfico.

O tempo de amostragem é ajustado na janela, sendo o número de amostras coletadas durante esse tempo de 256.

Os resultados das leituras da função *Waveform Display* são dispostos em uma coluna de valores, como indicado na Figura 5.6.

Para tratamento dos dados e apresentação dos resultados de forma gráfica, para este trabalho, fez-se uso da ferramenta computacional *Microsoft Excel*, importando os dados em arquivo texto, gerados pelas funções do programa *CiguiSII*, para planilhas do *Microsoft Excel*.

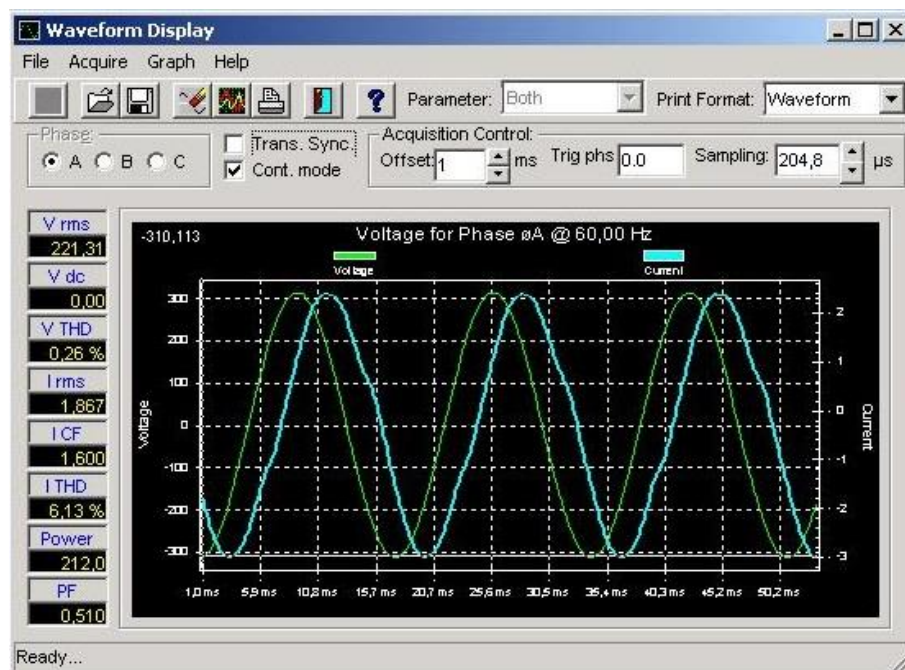


Figura 5.5 - Janela da função *Waveform Display*.
(Fonte: programa CiguiII).

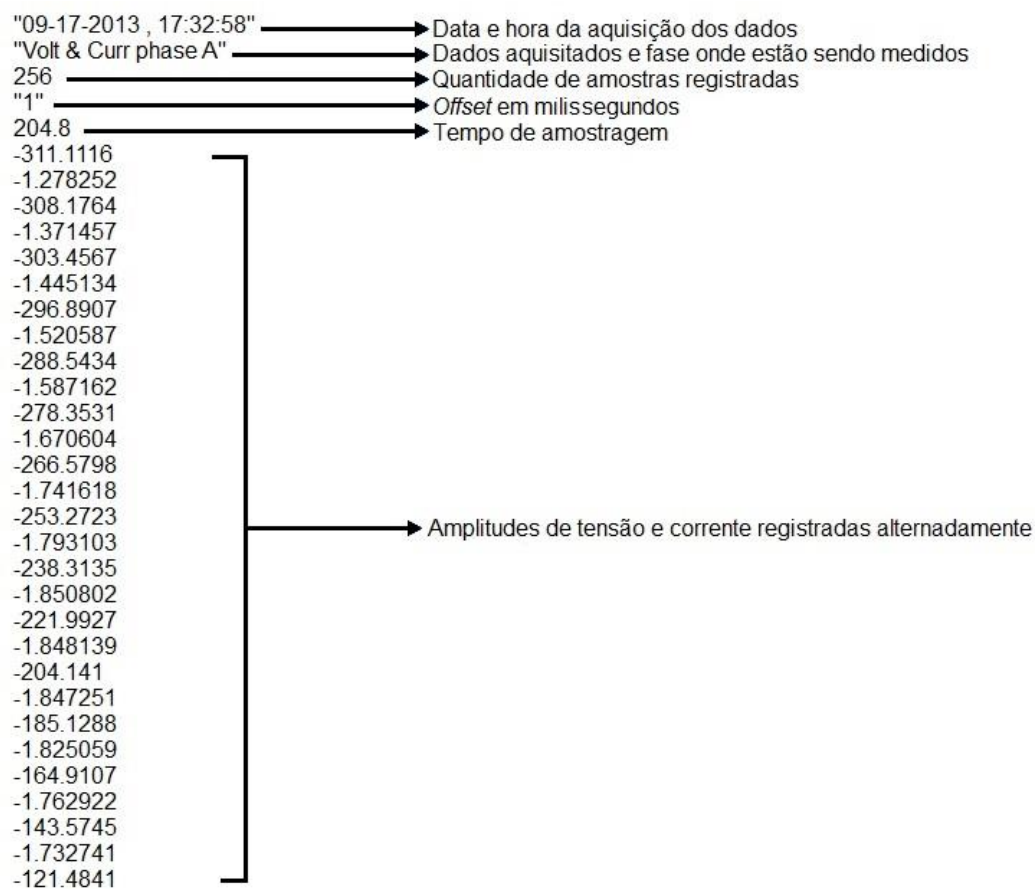


Figura 5.6 - Arquivo de texto criado pelo *Waveform Display*.
(Fonte: próprio autor).

6 - RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo são apresentados os resultados dos ensaios.

No item 6.1 são apresentados os resultados dos ensaios com os compressores alimentados por uma tensão puramente senoidal, enquanto no item 6.2 são apresentados os resultados para uma alimentação distorcida.

Para simplificar a apresentação dos resultados, será informado de forma direta, para cada situação, se o compressor foi configurado sem ou com o capacitor permanente, conforme discutido no Capítulo 3.

A forma escolhida para apresentação dos resultados é a utilização de gráficos contendo as forma de onda de tensão e corrente em p.u., diagrama de barras com as taxas percentuais de componentes harmônicas e uma tabela contendo os dados numéricos registrados nos ensaios.

As tabelas contêm os seguintes dados:

- V_{rms} : tensão eficaz de alimentação, em V;
- I_{rms} : corrente eficaz drenada pelo equipamento, em A;
- P : potência ativa consumida pelo equipamento, em W;
- fp : fator de potência do equipamento;
- I_1 rms: valor eficaz da componente fundamental da corrente drenada pelo equipamento, em A;
- DHT_V : distorção harmônica total de tensão registrada no ensaio, em %;
- DHT_I : distorção harmônica total de corrente registrada no ensaio, em %;
- Temp. final principal: temperatura atingida pela bobina principal ao final do ensaio, em °C; e
- Temp. final auxiliar: temperatura atingida pela bobina auxiliar ao final do ensaio, em °C.

Como referência para os níveis de concentração de componentes harmônicas de corrente, utilizaram-se os valores recomendados pela norma IEC 61000-3-2 para equipamentos Classe A (FERNANDES, 2009):

- 2,3% de corrente harmônica de 3ª ordem;
- 1,14% de corrente harmônica de 5ª ordem; e
- 0,77% de corrente harmônica de 7ª ordem.

6.1 - Alimentação com tensão puramente senoidal

6.1.1 - Compressor 1

A Figura 6.1 apresenta os gráficos das formas de onda de tensão e corrente do compressor 1, alimentado com tensão puramente senoidal e com a ligação PTCSIR, onde não há o capacitor permanente.

A Figura 6.2 apresenta as formas de onda de tensão e corrente do compressor 1, alimentado com tensão puramente senoidal, na ligação PTCSR, onde há a presença do capacitor permanente.

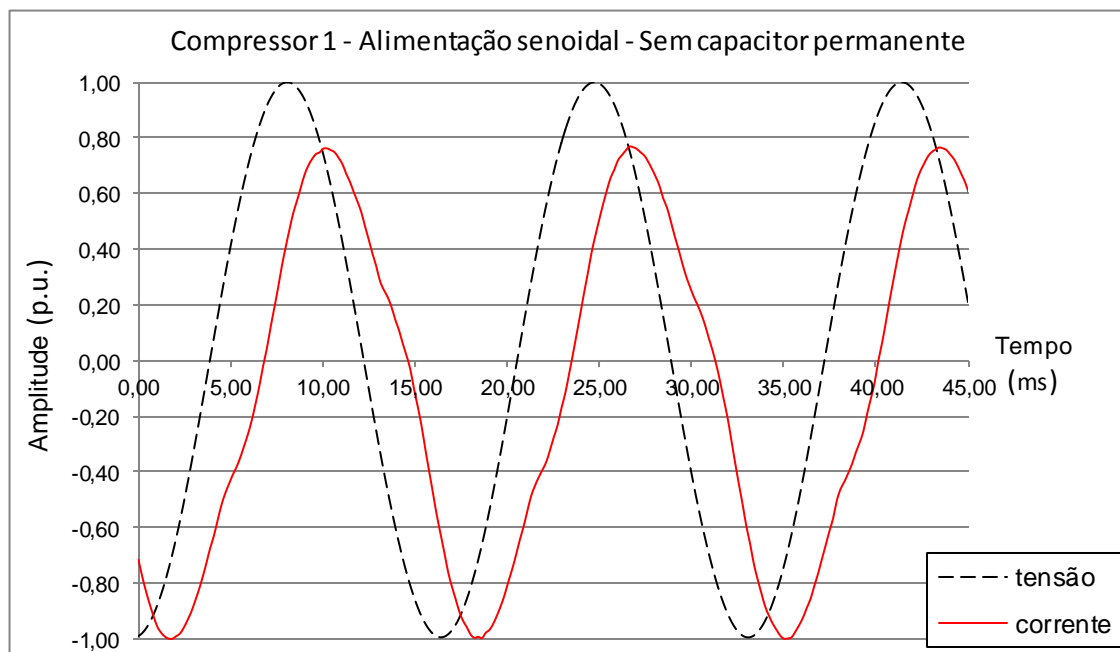


Figura 6.1 - Formas de onda de tensão e corrente do compressor 1, com alimentação senoidal, sem capacitor permanente.

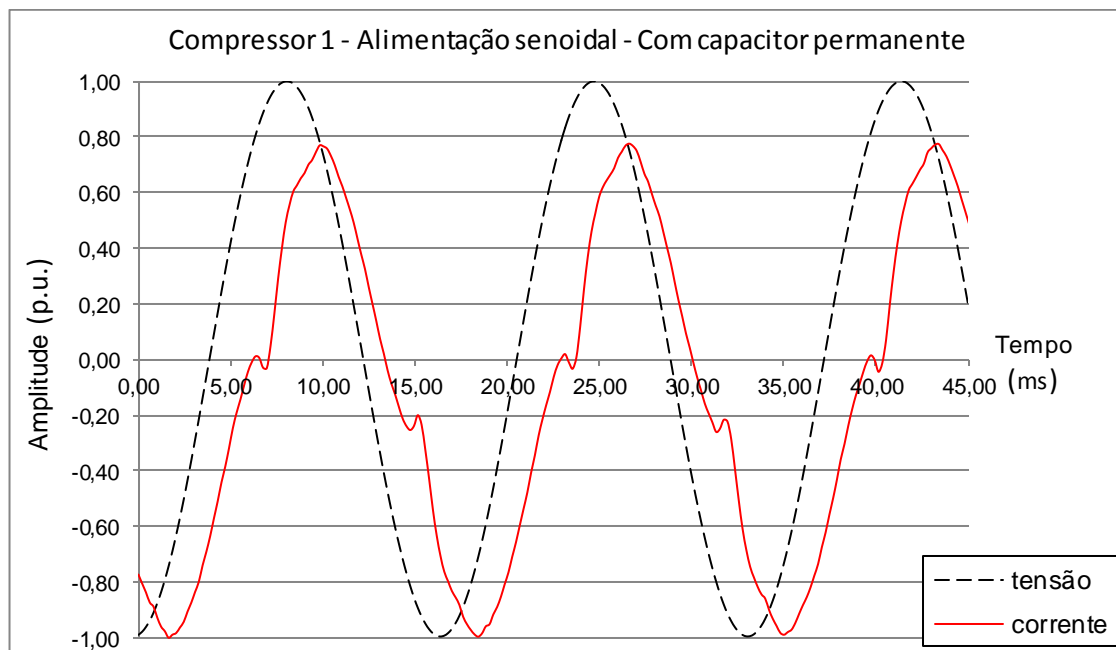


Figura 6.2 - Formas de onda de tensão e corrente do compressor 1, alimentação senoidal, com capacitor permanente.

A Figura 6.3 apresenta o diagrama de barras da concentração de componentes harmônicas de corrente do compressor 1. Observa-se pela figura, que o compressor 1 possui uma alta concentração da componente harmônica de 3ª ordem e a presença da bobina auxiliar no funcionamento acrescenta ainda uma grande concentração de componentes de 3ª e 5ª ordens, contradizendo o resultado da simulação de Pompeo (2011), onde este motor deveria possuir níveis de componentes harmônicas abaixo de 2%.

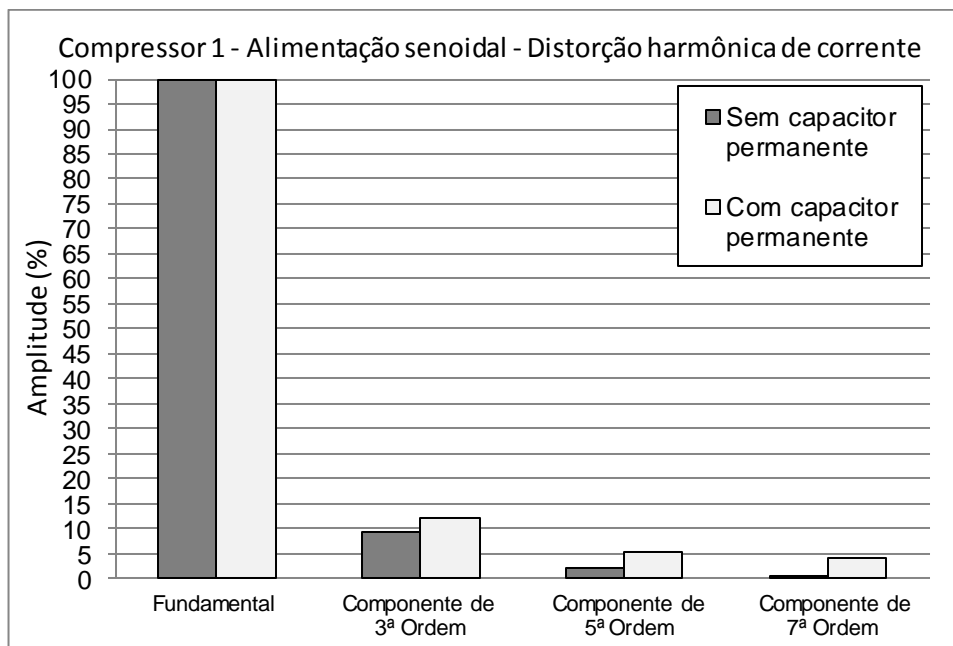


Figura 6.3 - Diagrama de barras das amplitudes das componentes harmônicas de corrente, compressor 1, alimentação senoidal.

A Tabela 6.1 apresenta as grandezas analisadas durante o ensaio para o compressor 1.

Observa-se pela Tabela 6.1, que a utilização do capacitor permanente imprimiu bons resultados na operação do compressor, reduzindo a corrente, aumentando o fator de potência e baixando a temperatura final do motor. Ainda assim teve um aumento da potência consumida, esse aumento pode ser resultado da concentração de componentes harmônicas da bobina auxiliar.

Tabela 6.1 - Resultados dos ensaios com o compressor 1, alimentação senoidal.

Compressor 1 - Alimentação senoidal		
	Sem capacitor permanente	Com capacitor permanente
V rms (V)	223,48	223,45
I rms (A)	1,529	1,181
P (W)	156	166
fp	0,46	0,63
I _l rms (A)	1,491	1,133
DHT _v (%)	0,26	0,25
DHT _i (%)	9,55	14,48
Temp. final principal (°C)	89,47	57,34
Temp. final auxiliar (°C)	84,09	66,60

Embora este projeto devesse possuir a menor concentração de componentes harmônicas, foi observado o contrário. O DHT de corrente sem o capacitor permanente foi de 9,55% e com o capacitor permanente foi de 14,48%.

6.1.2 - Compressor 2

A Figura 6.4 apresenta as formas de onda de tensão e corrente do compressor 2, com alimentação senoidal e na ligação PTCSIR, sem o capacitor permanente.

A Figura 6.5 apresenta as formas de onda de tensão e corrente do compressor 2, com alimentação senoidal e na ligação PTCSR, com a presença do capacitor permanente.

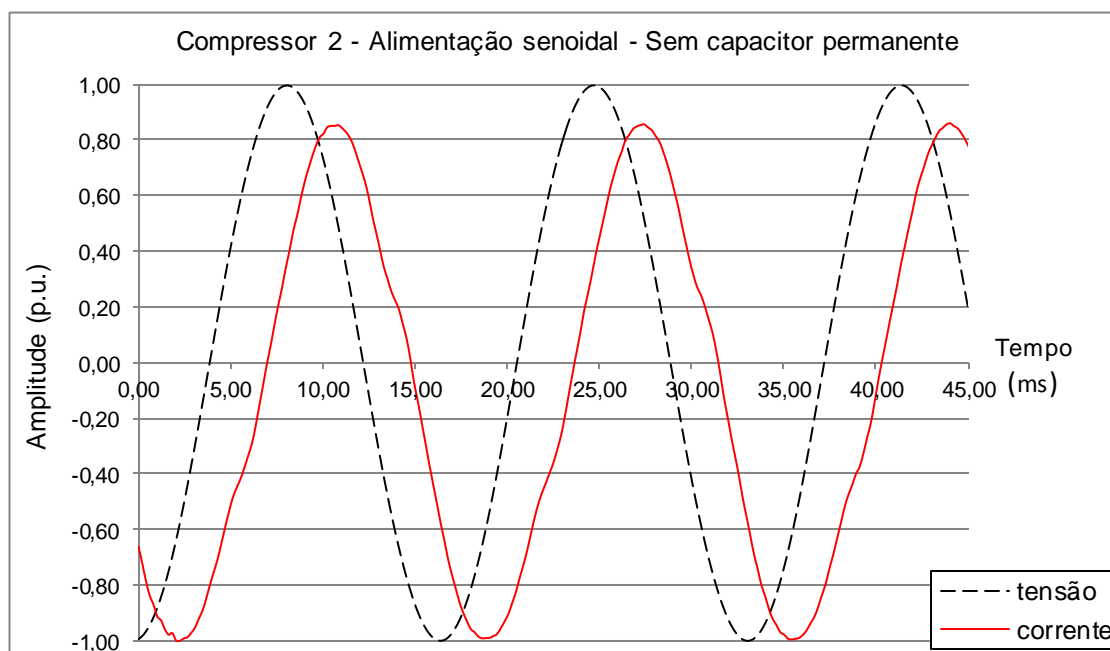


Figura 6.4 - Formas de onda de tensão e corrente do compressor 2, alimentação senoidal, sem capacitor permanente.

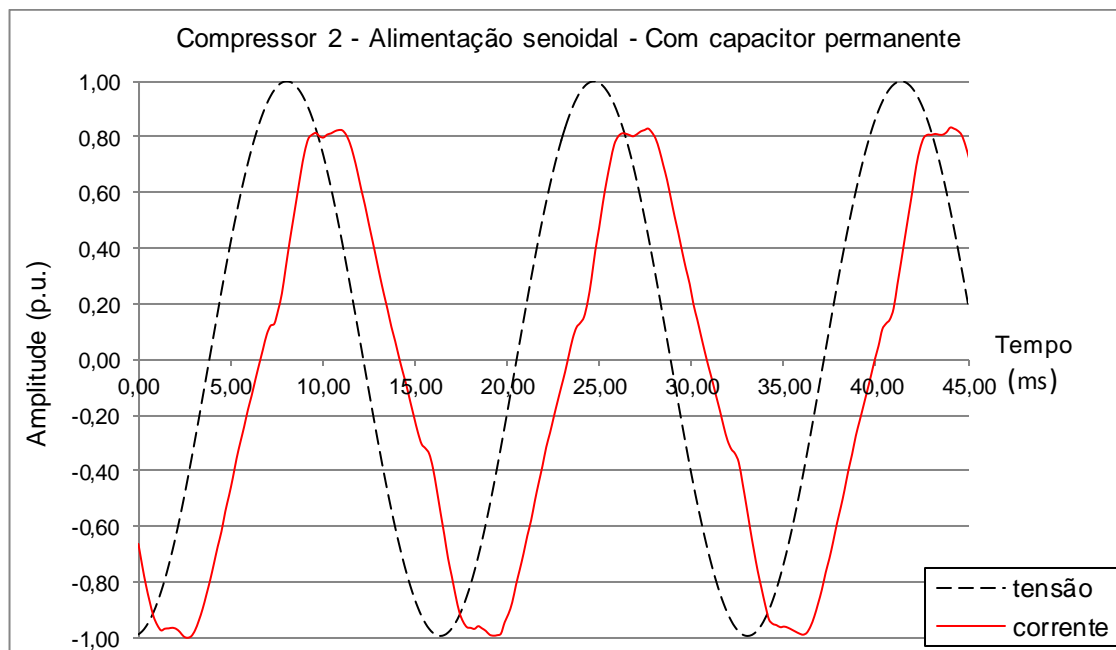


Figura 6.5 - Formas de onda de tensão e corrente do compressor 2, alimentação senoidal, com capacitor permanente.

A Figura 6.6 apresenta o diagrama de barras das amplitudes das componentes harmônicas presentes no compressor 2.

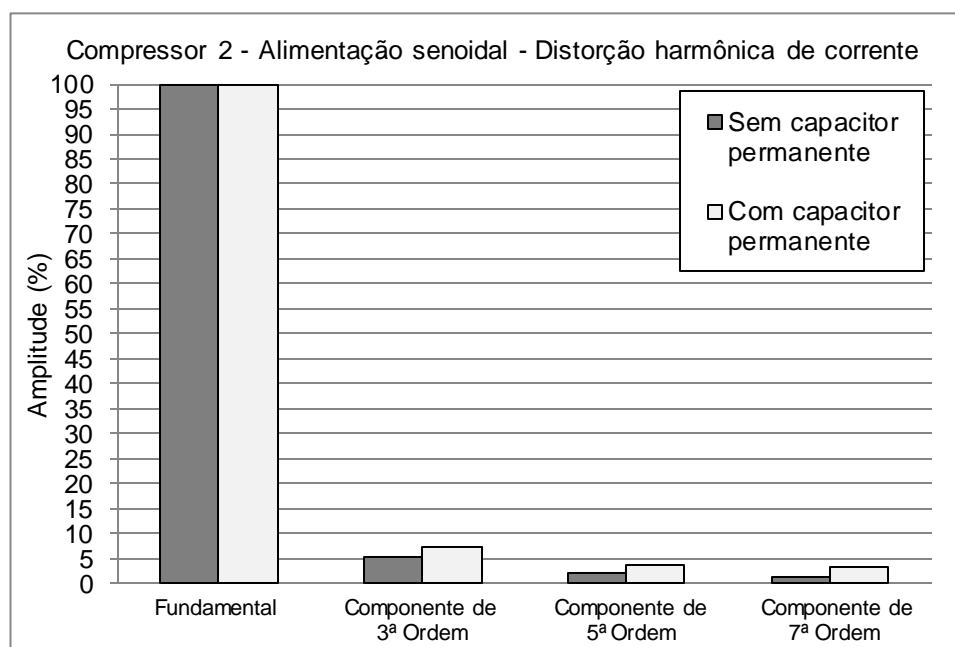


Figura 6.6 - Diagrama de barras das amplitudes das componentes harmônicas de corrente, compressor 2, alimentação senoidal.

A Tabela 6.2 apresenta os valores dos resultados obtidos com os ensaios do compressor 2 com alimentação senoidal.

Tabela 6.2 - Resultados dos ensaios com o compressor 2, alimentação senoidal.

Compressor 2 - Alimentação senoidal		
	Sem capacitor permanente	Com capacitor permanente
V rms (V)	223,45	223,44
I rms (A)	1,884	1,566
P (W)	179	180
fp	0,43	0,52
I _l rms (A)	1,865	1,535
DHT _v (%)	0,26	0,25
DHT _i (%)	6,20	8,68
Temp. final principal (°C)	78,05	80,67
Temp. final auxiliar (°C)	86,6	68,97

Pela Figura 6.6 observa-se que o compressor 2 apresentou níveis significativos de componentes harmônicas de 3ª ordem. Pela Tabela 6.2 observa-se que, novamente, a utilização do capacitor permanente, mantendo a bobina auxiliar energizada, aumentou a concentração de componentes harmônicas.

Apesar do aumento na distorção harmônica de corrente, a utilização do capacitor permanente teve um impacto positivo na operação do compressor, reduzindo a corrente, aumentando o fator de potência, reduzindo a temperatura da bobina auxiliar, e mantendo a potência consumida e a temperatura da bobina principal próximas ao valores da ligação sem o capacitor.

6.1.3 - Compressor 3

A Figura 6.7 apresenta as formas de onda de tensão e corrente do compressor 3, com alimentação senoidal e na ligação PTCCSIR, onde se utiliza o capacitor de partida e não temos o capacitor permanente.

A Figura 6.8 apresenta as formas de onda de tensão e corrente do compressor 3, com alimentação senoidal e na ligação PTCCSR, com a presença dos dois capacitores, de partida e permanente.

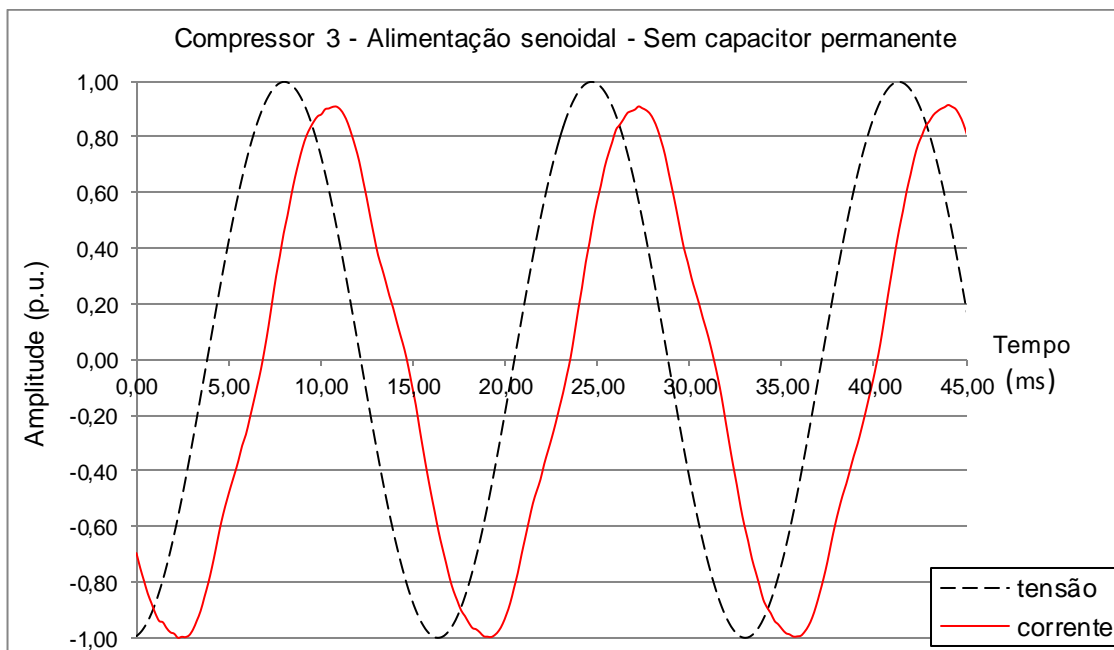


Figura 6.7 - Formas de onda de tensão e corrente do compressor 3, alimentação senoidal, sem capacitor permanente.

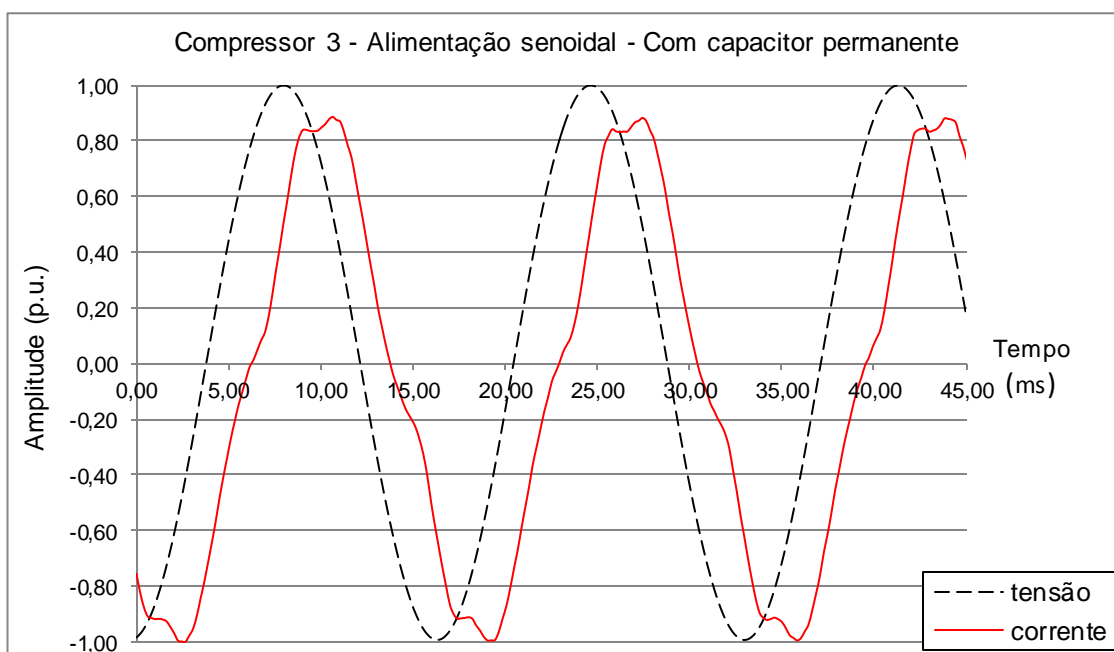


Figura 6.8 - Formas de onda de tensão e corrente do compressor 3, alimentação senoidal, com capacitor permanente.

A Figura 6.9 apresenta o diagrama de barras das amplitudes das componentes harmônicas presentes no compressor 3.

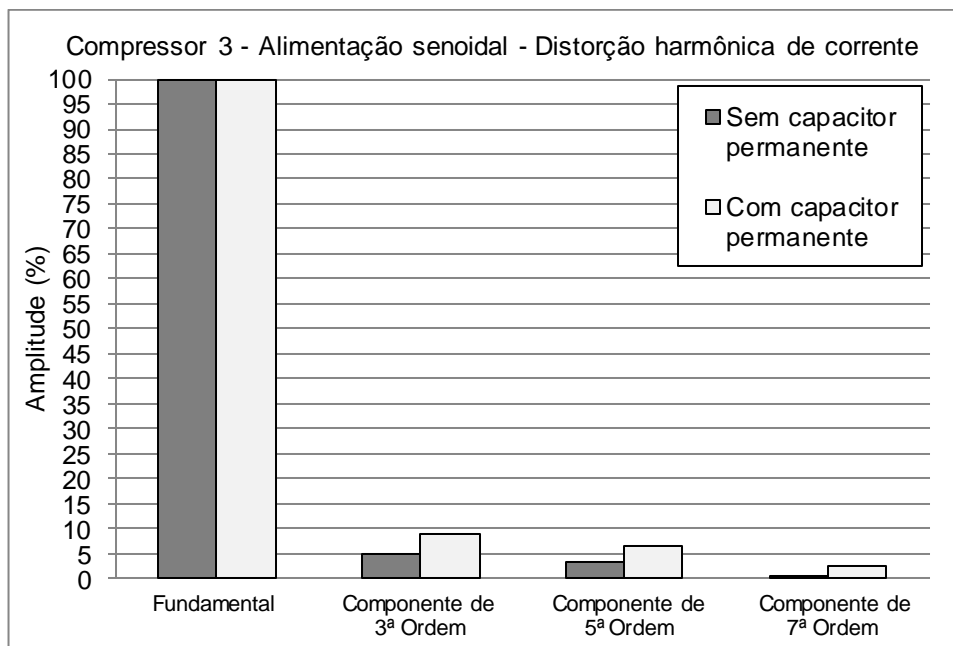


Figura 6.9 - Diagrama de barras das amplitudes das componentes harmônicas de corrente, compressor 3, alimentação senoidal.

A Tabela 6.3 apresenta os valores dos resultados obtidos com os ensaios do compressor 3 com alimentação senoidal.

Tabela 6.3 - Resultados dos ensaios com o compressor 3, alimentação senoidal.

Compressor 3 - Alimentação senoidal		
	Sem capacitor permanente	Com capacitor permanente
V rms (V)	223,45	223,39
I rms (A)	2,537	2,133
P (W)	241	287
fp	0,43	0,60
I _l rms (A)	2,514	2,088
DHT _v (%)	0,26	0,26
DHT _i (%)	6,06	11,44
Temp. final principal (°C)	89,36	102,32
Temp. final auxiliar (°C)	76,33	104,48

Observa-se pela Figura 6.9 que o compressor 3 possui menor concentração de componente harmônica de 3ª do que o compressor 2, e maior concentração de componente de 5ª ordem.

Pela Tabela 6.3 observa-se que o compressor 3 apresentou a maior potência consumida e maior corrente drenada.

A utilização do capacitor permanente, embora tenha reduzido a corrente e aumentado o fator de potência, teve impacto negativo no funcionamento do compressor, aumentando a potência consumida e elevando significativamente as temperaturas das bobinas do motor.

Nota-se que a DHT deste compressor quase duplica quando se faz a ligação com capacitor permanente.

6.1.4 - Compressor 4

A Figura 6.10 apresenta as formas de onda de tensão e corrente do compressor 4, com alimentação senoidal e na ligação PTCCSIR, onde se utiliza o capacitor de partida e não temos o capacitor permanente.

A Figura 6.11 apresenta as formas de onda de tensão e corrente do compressor 4, com alimentação senoidal e na ligação PTCCSR, onde utilizam-se o capacitor de partida e o capacitor permanente.

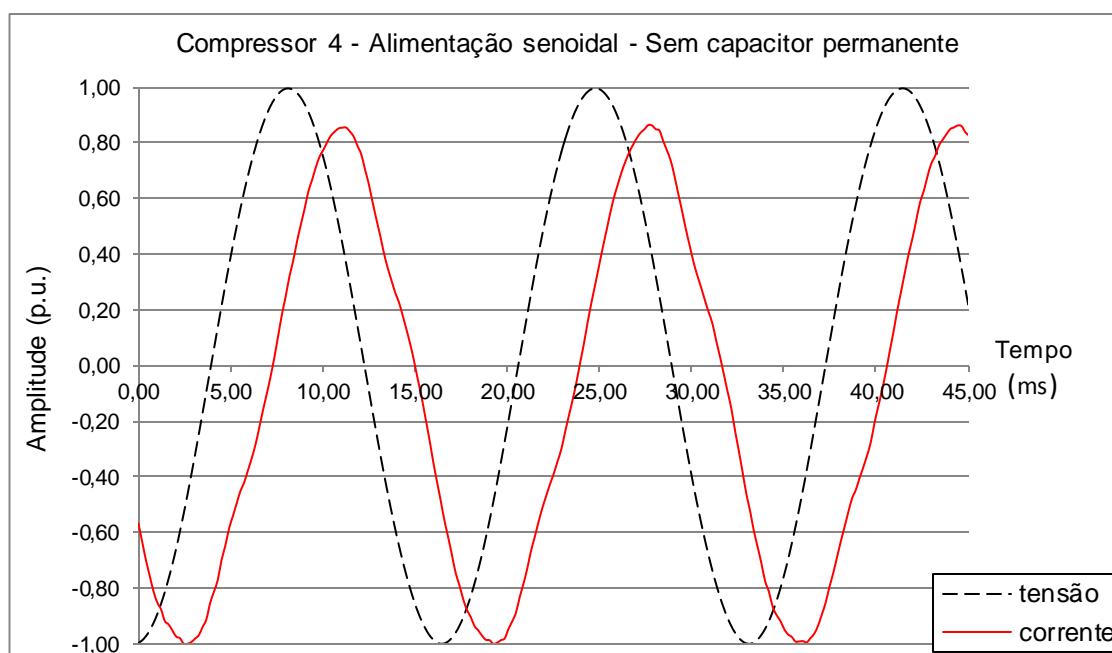


Figura 6.10 - Formas de onda de tensão e corrente do compressor 4, alimentação senoidal, sem capacitor permanente.

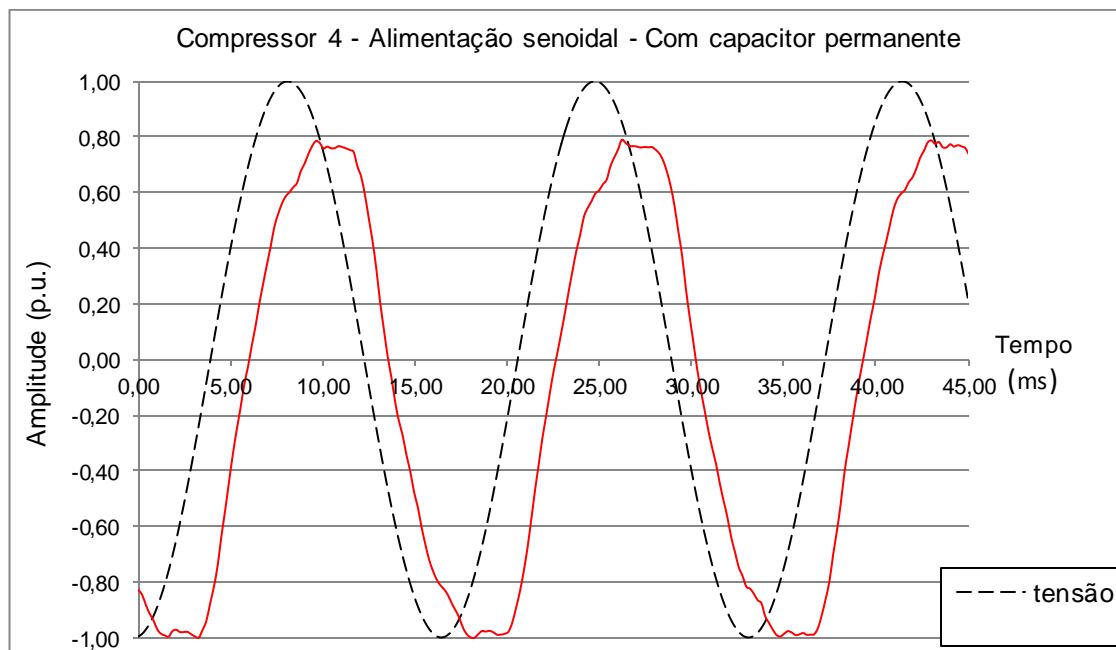


Figura 6.11 - Formas de onda de tensão e corrente do compressor 4, alimentação senoidal, sem capacitor permanente.

A Figura 6.12 apresenta o diagrama de barras das amplitudes das componentes harmônicas presentes no compressor 4.

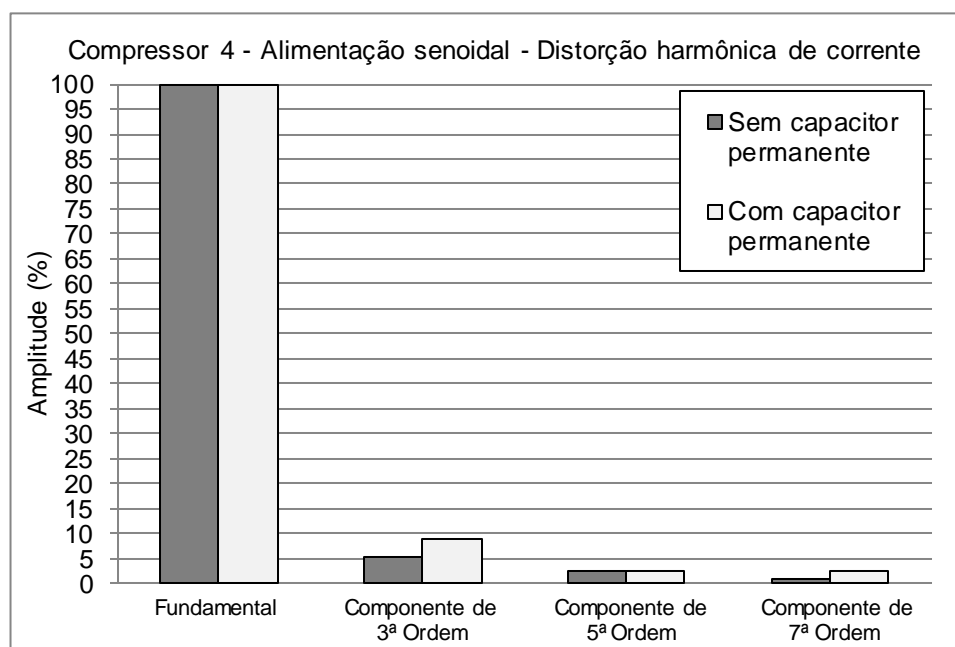


Figura 6.12 - Diagrama de barras das amplitudes das componentes harmônicas de corrente, compressor 4, alimentação senoidal.

A Tabela 6.4 apresenta os resultados dos ensaios com o compressor 4 com alimentação senoidal.

Tabela 6.4 - Resultados dos ensaios com o compressor 4, alimentação senoidal.

Compressor 4 - Alimentação senoidal		
	Sem capacitor permanente	Com capacitor permanente
V rms (V)	223,47	223,52
I rms (A)	2,007	1,270
P (W)	176	199
fp	0,39	0,70
I _l rms (A)	1,986	1,234
DHT _v (%)	0,26	0,26
DHT _i (%)	6,52	9,93
Temp. final principal (°C)	65,56	67,98
Temp. final auxiliar (°C)	73,80	93,07

O compressor 4, embora devesse possuir alta concentração de componente harmônica de 7ª ordem (Figura 6.12), apresentou apenas uma significativa concentração de componente de 3ª ordem.

O uso do capacitor permanente reduziu significativamente a corrente drenada pelo compressor e aumentou o fator de potência de 0,39 para 0,70, melhoria considerável, embora tenha causado um aumento de 26 W na potência consumida (Tabela 6.4).

6.2 - Alimentação com tensão distorcida

Baseado em Pires (2006), buscou-se modelar, via o gerador arbitrário de sinais (fonte de alimentação modelo 5001iX da *California Instruments*) uma alimentação distorcida que fosse característica de um ambiente residencial brasileiro.

O método empregado na modelagem foi de alimentar uma carga puramente resistiva (lâmpada incandescente) e ajustar a forma de onda desejada pelo *Harmonics Generation* (Figura 6.13), uma das funções disponíveis do programa CiguiSII. Alimentado uma lâmpada incandescente não teríamos influência da carga na distorção harmônica da alimentação, obtendo uma forma de onda distorcida apenas pelos ajustes do programa. Além do fato de que a lâmpada tem um baixo custo e é de fácil reposição comparada aos compressores, sendo, portanto, um bom componente para se utilizar durante a modelagem.

Nas medições realizadas por Pires (2006), encontrou-se uma DHT de tensão média de 1,4% para residências de classe média, e um valor de DHT de corrente médio de 17,7%.

Devido a baixa corrente solicitada pela lâmpada incandescente houve uma dificuldade em ajustar a forma de onda distorcida para esses níveis desejados.

A forma de onda da alimentação obtida nessa etapa é apresentada na Figura 6.13. Esta apresentou uma DHT de tensão de 10,91%, predominando as componentes harmônicas de 3ª, 5ª e 7ª ordens. Esta forma de onda de tensão foi modelada para se obter uma distorção harmônica de corrente similar ao encontrado por Pires (2006) para um ambiente residencial de classe média.

Tentou-se simular a operação dos compressores na presença de uma forma de onda de corrente com grande distorção, como observado por Pires (2006), alimentando-os com uma forma de onda de tensão distorcida, acima dos valores encontrados nas residências.

Essa análise colocou os compressores em condições de operação muito severas, mas o aumento na concentração de componentes de corrente não foi o suficiente para o protetor térmico atuar, evidenciando que os compressores não saíram do limite seguro de operação.

O intuito da análise dos compressores herméticos operando em uma condição crítica, como apontada pelo DHT de tensão de 10,91%, é o de verificar o desempenho do mesmo nesta e, inferir se o mesmo poderá apresentar comportamento semelhante e ou, adequado, para índices que caracterizem condições menos severas.

Esse valor de distorção da forma de onda de tensão (Figura 6.14) está um pouco acima do exigido pelo PRODIST para a classe de cliente com alimentação inferior a 1 kV, onde o valor máximo tolerado é de 10%. Os valores das componentes de 3ª, 5ª e 7ª ordens da forma de onda obtida estão dentro dos limites estabelecidos pelo PRODIST (ANEEL, 2012):

- 6,5% de corrente harmônica de 3ª ordem;
- 7,5% de corrente harmônica de 5ª ordem; e
- 6,5% de corrente harmônica de 7ª ordem.

Os valores obtidos para essas componentes na forma de onda simulada são da ordem de 5%, como pode ser observado na Figura 6.15.

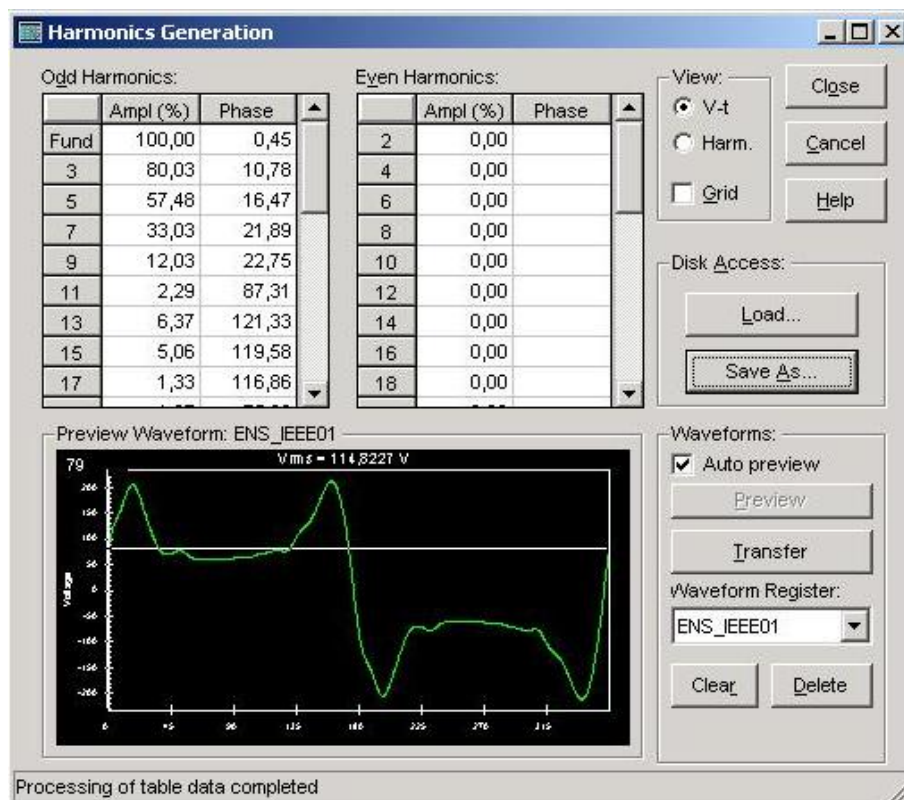


Figura 6.13 - Janela do *Harmonics Generation*.
(Fonte: programa CiguiSII).

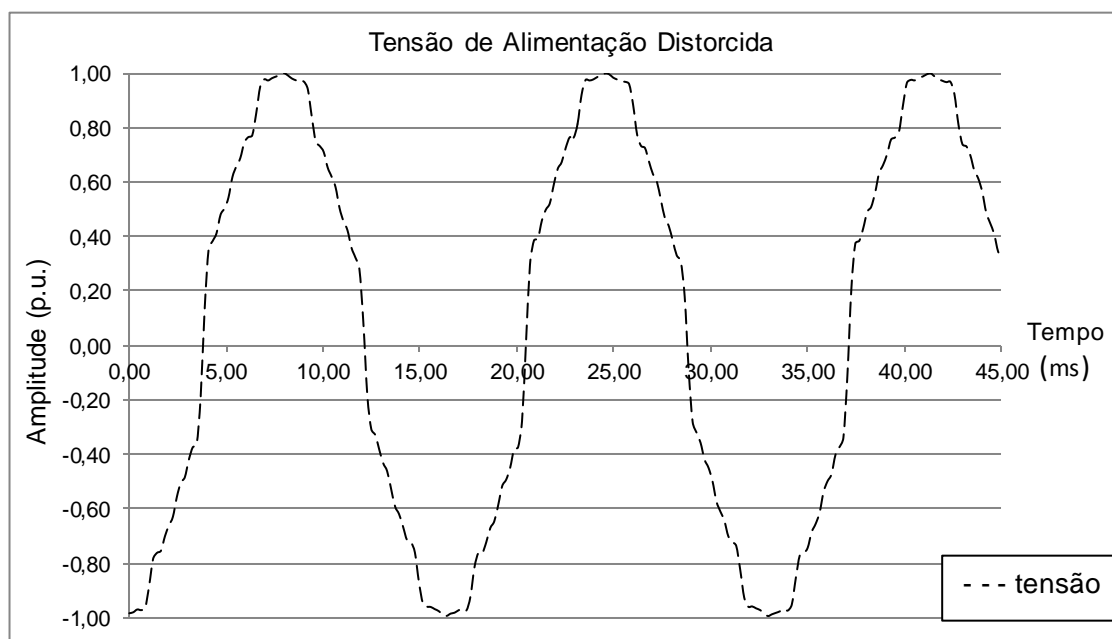


Figura 6.14 - Formas de onda de tensão distorcida utilizada na segunda etapa dos ensaios.

Na Figura 6.15 são apresentadas as amplitudes das componentes harmônicas da tensão de alimentação, com foco nas componentes de 3ª, 5ª e 7ª ordens.

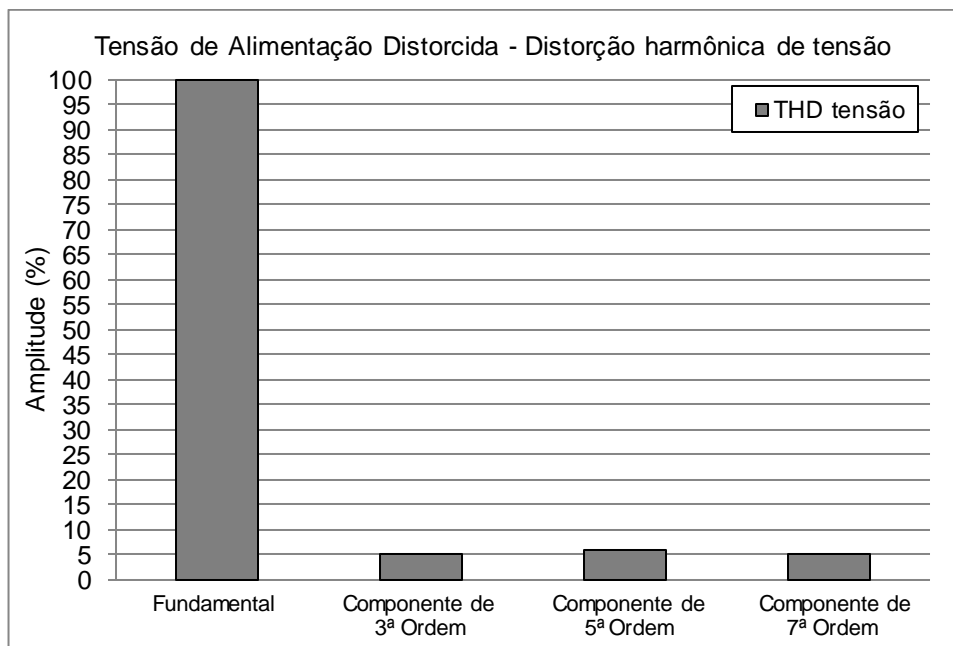


Figura 6.15 - Diagrama de barras das amplitudes das componentes harmônicas de tensão da forma de onda de alimentação distorcida.

6.2.1 - Compressor 1

A Figura 6.16 apresenta as formas de onda de tensão e corrente do compressor 1, alimentado com tensão distorcida e na ligação PTCSIR, onde não há o capacitor permanente.

A Figura 6.17 apresenta as formas de onda de tensão e corrente do compressor 1, alimentado com tensão distorcida, na ligação PTCSQR, onde há a presença do capacitor permanente.

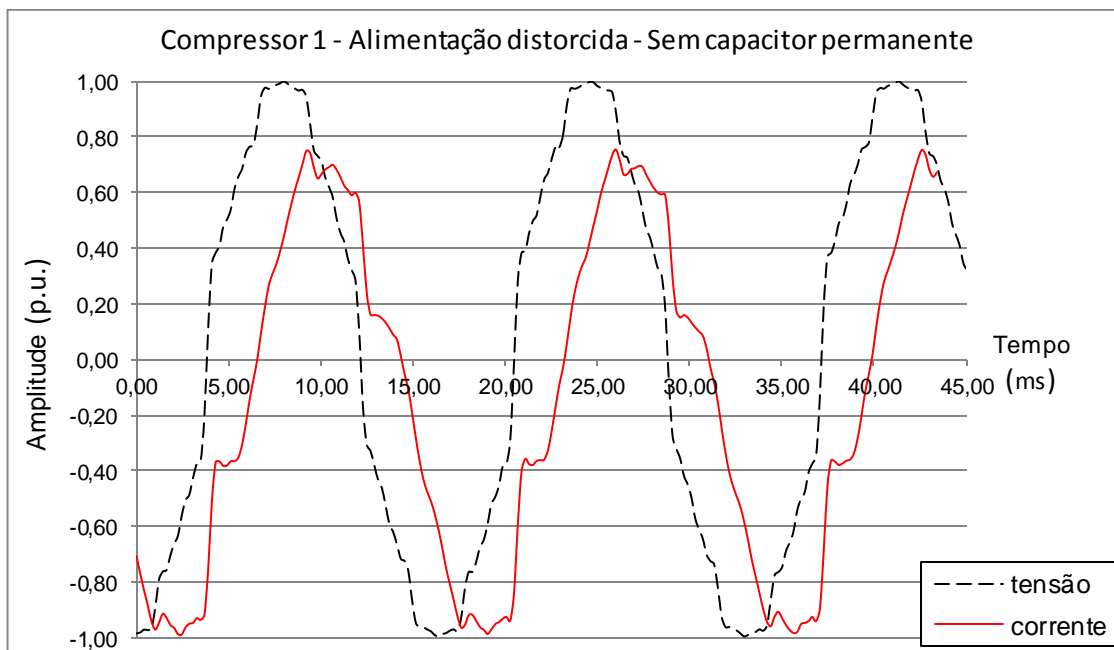


Figura 6.16 - Formas de onda de tensão e corrente do compressor 1, alimentação distorcida, sem capacitor permanente.

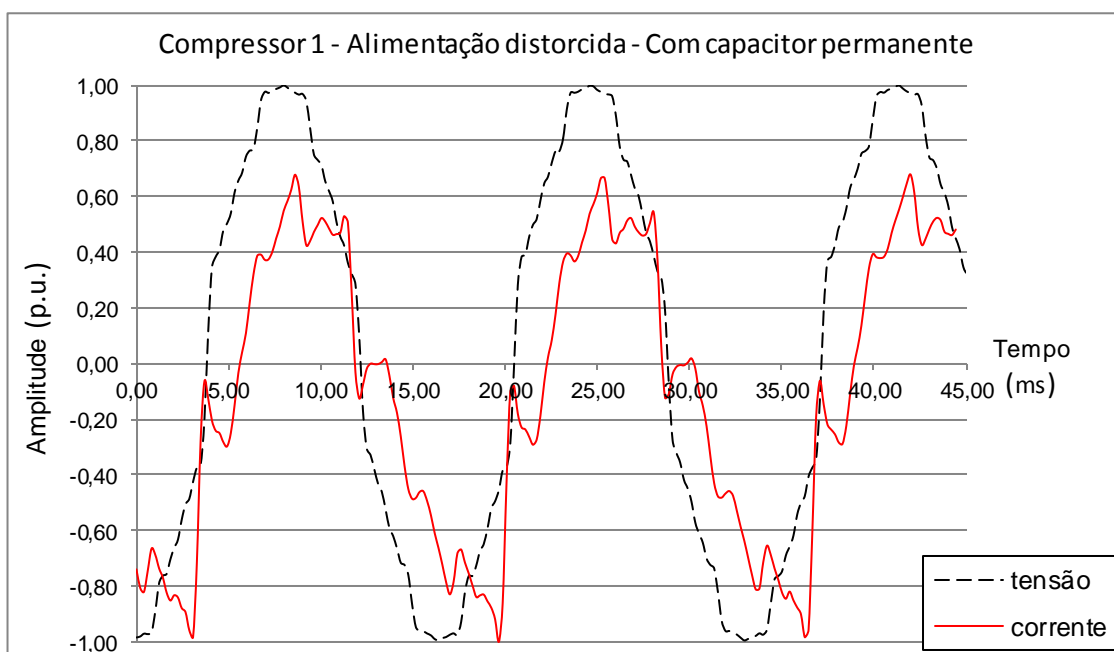


Figura 6.17 - Formas de onda de tensão e corrente do compressor 1, alimentação distorcida, com capacitor permanente.

A Figura 6.18 apresenta o diagrama de barras da concentração de componentes harmônicas de corrente do compressor 1 com alimentação distorcida.

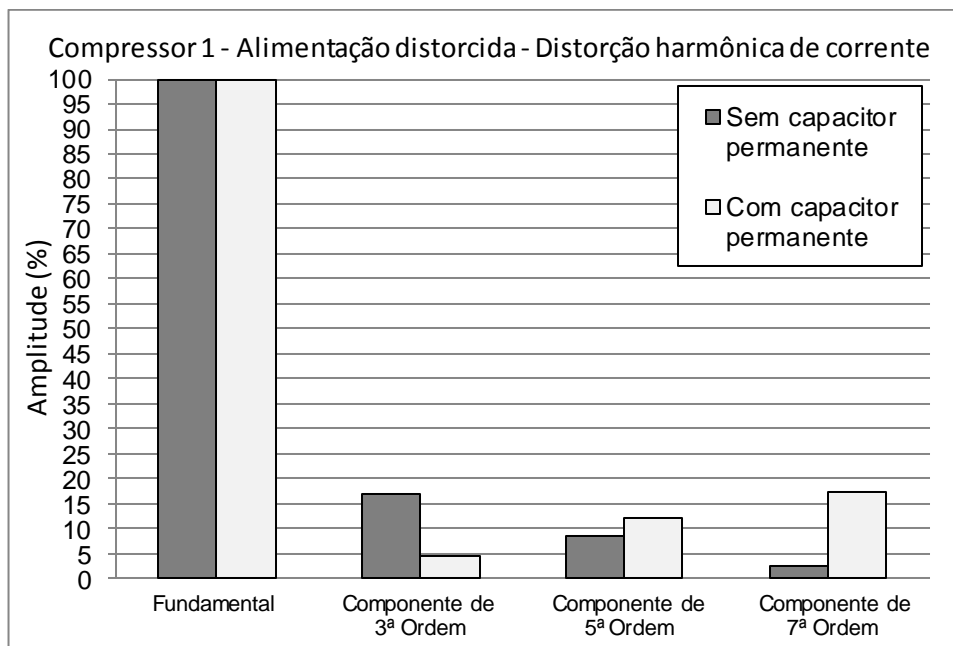


Figura 6.18 - Diagrama de barras das amplitudes das componentes harmônicas de corrente, compressor 1, alimentação distorcida.

A Tabela 6.5 apresenta os resultados dos ensaios para o compressor 1, com alimentação distorcida.

Tabela 6.5 - Resultados dos ensaios com o compressor 1, alimentação distorcida.

Compressor 1 - Alimentação distorcida		
	Sem capacitor permanente	Com capacitor permanente
V rms (V)	223,08	223,18
I rms (A)	1,522	1,270
P (W)	157	171
fp	0,53	0,60
I _l rms (A)	1,494	1,187
DHT _v (%)	10,89	10,89
DHT _i (%)	19,04	28,80
Temp. final principal (°C)	73,41	98,18
Temp. final auxiliar (°C)	70,35	69,10

Submetido a uma alimentação distorcida, o compressor 1 apresentou uma redução na corrente drenada, mas teve um aumento da potência consumida (Tabela 6.5).

Pela Tabela 6.5, observa-se que sem o capacitor permanente, o compressor 1 atingiu temperaturas inferiores a quando estava em alimentação senoidal. Já com o uso do ca-

pacitor permanente, a piora nos resultados foi significativa, principalmente pela alta temperatura atingida na bobina principal.

6.2.2 - Compressor 2

A Figura 6.19 apresenta as formas de onda de tensão e corrente do compressor 2, com alimentação distorcida e na ligação PTCSIR, sem o capacitor permanente.

A Figura 6.20 apresenta as formas de onda de tensão e corrente do compressor 2, com alimentação distorcida e na ligação PTCSIR, com a presença do capacitor permanente.

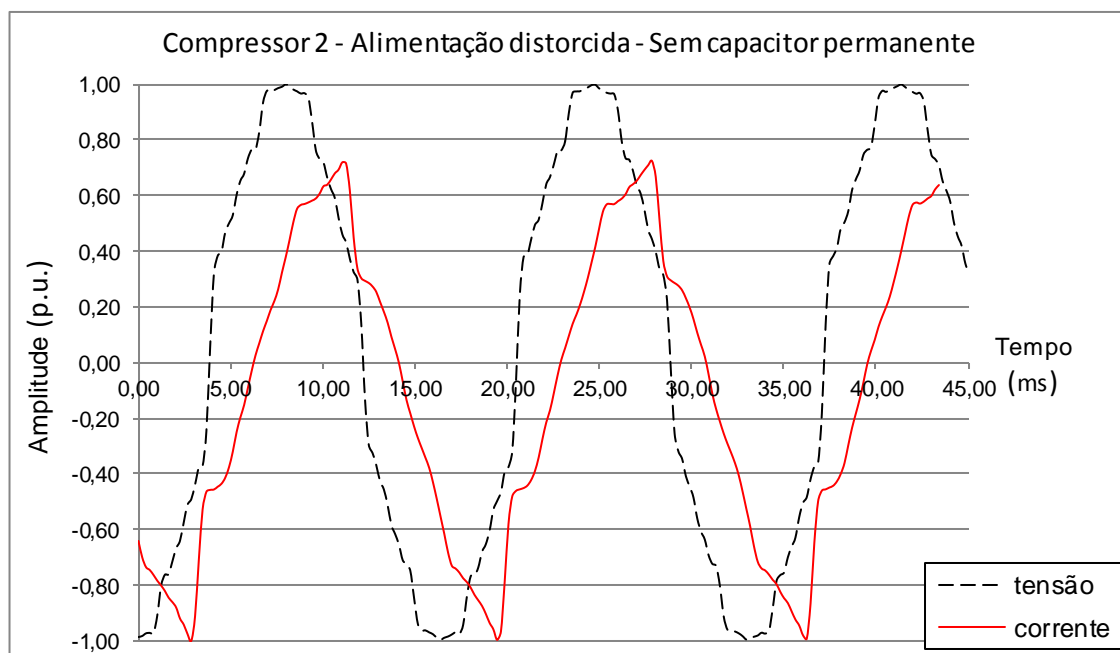


Figura 6.19 - Formas de onda de tensão e corrente do compressor 2, alimentação distorcida, sem capacitor permanente.

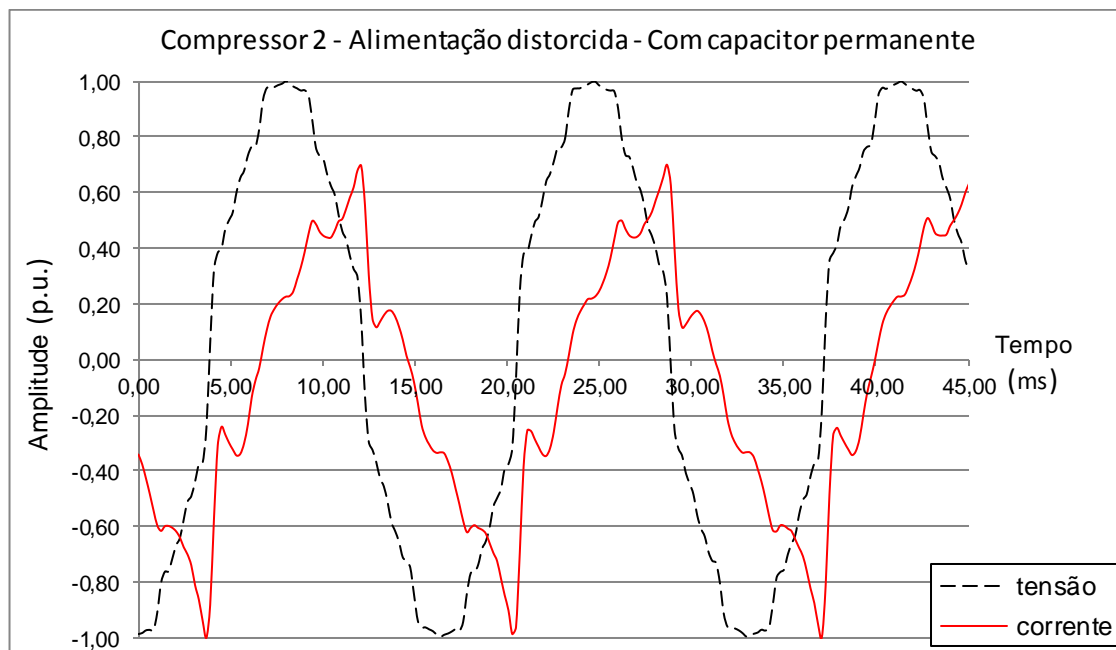


Figura 6.20 - Formas de onda de tensão e corrente do compressor 2, alimentação distorcida, com capacitor permanente.

A Figura 6.21 apresenta o diagrama de barras das amplitudes das componentes harmônicas presentes no compressor 2, no ensaio com alimentação distorcida.

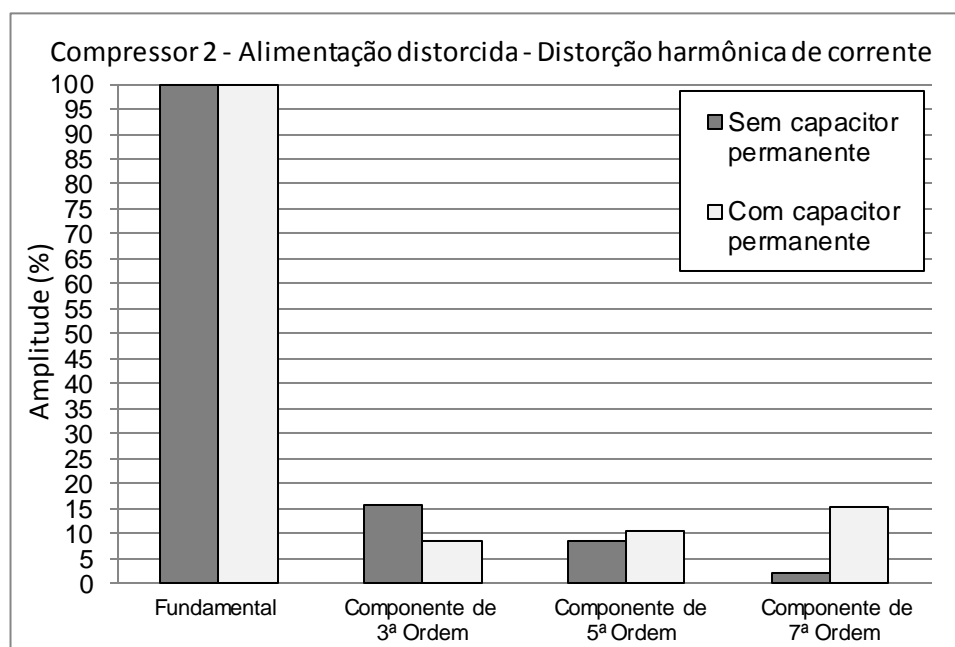


Figura 6.21 - Diagrama de barras das amplitudes das componentes harmônicas de corrente, compressor 2, alimentação distorcida.

A Tabela 6.6 apresenta os valores dos resultados obtidos nos ensaios do compressor 2 com alimentação distorcida.

Tabela 6.6 - Resultados dos ensaios com o compressor 2, alimentação distorcida.

Compressor 2 - Alimentação distorcida		
	Sem capacitor permanente	Com capacitor permanente
V rms (V)	231,63	223,17
I rms (A)	1,878	1,557
P (W)	187	183
fp	0,49	0,53
I _l rms (A)	1,848	1,539
DHT _v (%)	10,87	10,88
DHT _i (%)	18,00	23,00
Temp. final principal (°C)	93,86	83,10
Temp. final auxiliar (°C)	74,01	67,71

Pela Tabela 6.6, nota-se que o compressor 2 apresentou uma piora significativa no seu comportamento com alimentação distorcida. O mesmo teve aumento na corrente, um aumento do consumo e um aumento na temperatura, quando comparado ao caso de alimentação senoidal.

Com a alimentação distorcida o uso do capacitor permanente piorou os resultados, apresentando apenas uma leve redução na temperatura atingida.

6.2.3 - Compressor 3

A Figura 6.22 apresenta as formas de onda de tensão e corrente do compressor 3, com alimentação distorcida e na ligação PTCCSIR, onde utiliza-se apenas o capacitor de partida.

A Figura 6.23 apresenta as formas de onda de tensão e corrente do compressor 3, com alimentação distorcida e na ligação PTCCSR, com a presença dos dois capacitores, de partida e permanente.

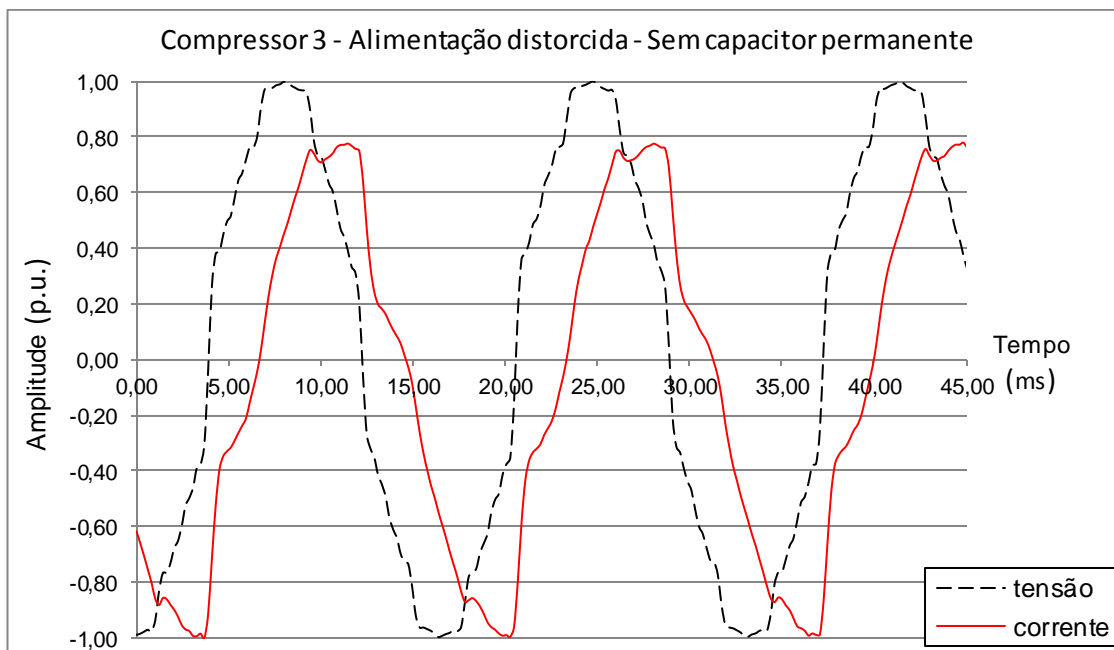


Figura 6.22 - Formas de onda de tensão e corrente do compressor 3, alimentação distorcida, sem capacitor permanente.

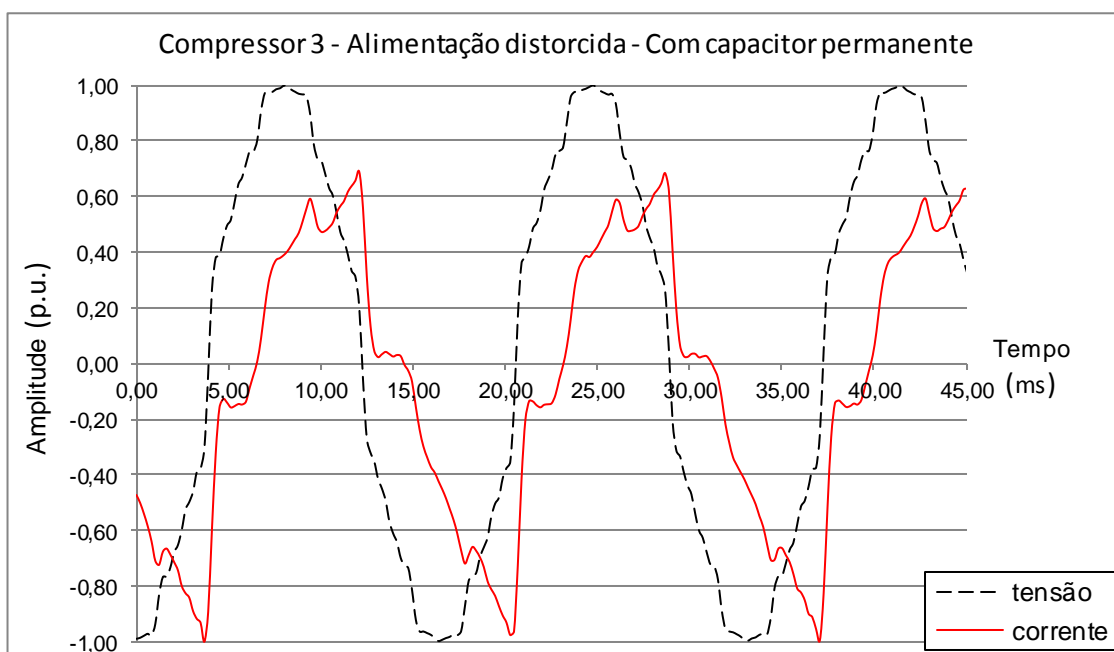


Figura 6.23 - Formas de onda de tensão e corrente do compressor 3, alimentação distorcida, com capacitor permanente.

A Figura 6.24 apresenta o diagrama de barras das amplitudes das componentes harmônicas presentes no compressor 3 com alimentação distorcida.

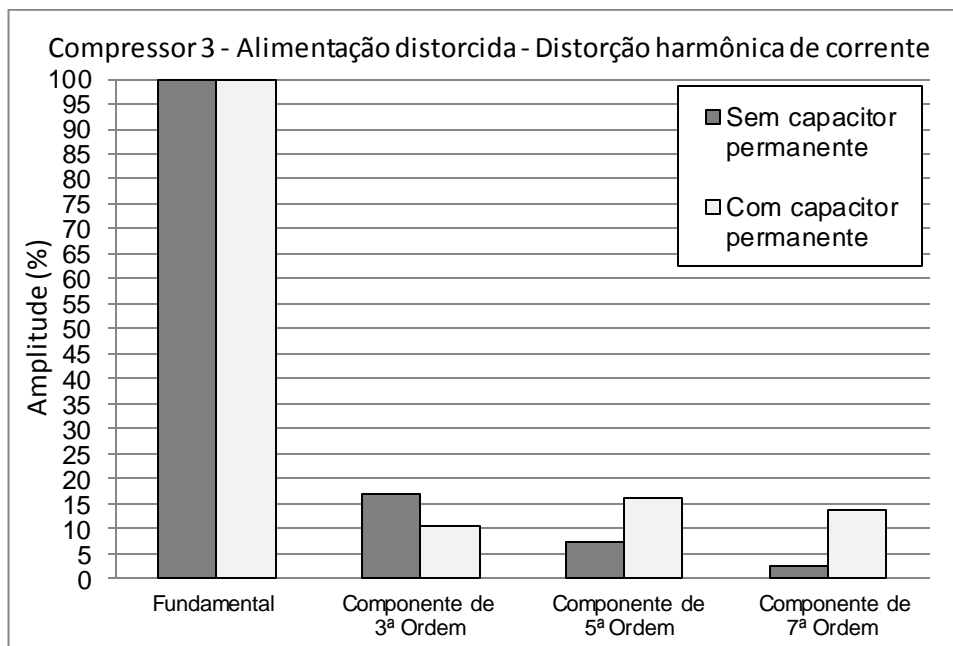


Figura 6.24 - Diagrama de barras das amplitudes das componentes harmônicas de corrente, compressor 3, alimentação distorcida.

A Tabela 6.7 apresenta os valores dos resultados obtidos com os ensaios do compressor 3 em alimentação distorcida.

Tabela 6.7 - Resultados dos ensaios com o compressor 3, alimentação distorcida.

Compressor 3 - Alimentação distorcida		
	Sem capacitor permanente	Com capacitor permanente
V rms (V)	223,16	223,16
I rms (A)	2,535	2,196
P (W)	275	295
fp	0,53	0,60
I _l rms (A)	2,492	2,096
DHT _v (%)	10,87	10,87
DHT _i (%)	18,51	25,63
Temp. final principal (°C)	89,36	89,36
Temp. final auxiliar (°C)	81,23	84,90

Com a alimentação distorcida e sem o capacitor permanente o compressor 3 teve um aumento de 34 W no consumo, um aumento significativo, principalmente por este ser o compressor de maior potência consumida.

Com a adição do capacitor permanente o DHT de corrente superou 25% com uma alta concentração de componente de 7ª ordem, mas a temperatura atingida não foi elevada,

visto que a componente de 7ª ordem aumenta o torque do motor, como afirmado por Fei; Lloyd e Dierkes (1995). Contudo, mesmo assim apresentou aumento da potência consumida.

6.2.4 - Compressor 4

A Figura 6.25 apresenta as formas de onda de tensão e corrente do compressor 4, com alimentação distorcida e na ligação PTCCSIR, onde utiliza-se o capacitor de partida e não temos o capacitor permanente.

A Figura 6.26 apresenta as formas de onda de tensão e corrente do compressor 4, com alimentação distorcida e na ligação PTCCSR, onde utilizam-se o capacitor de partida e o capacitor permanente.

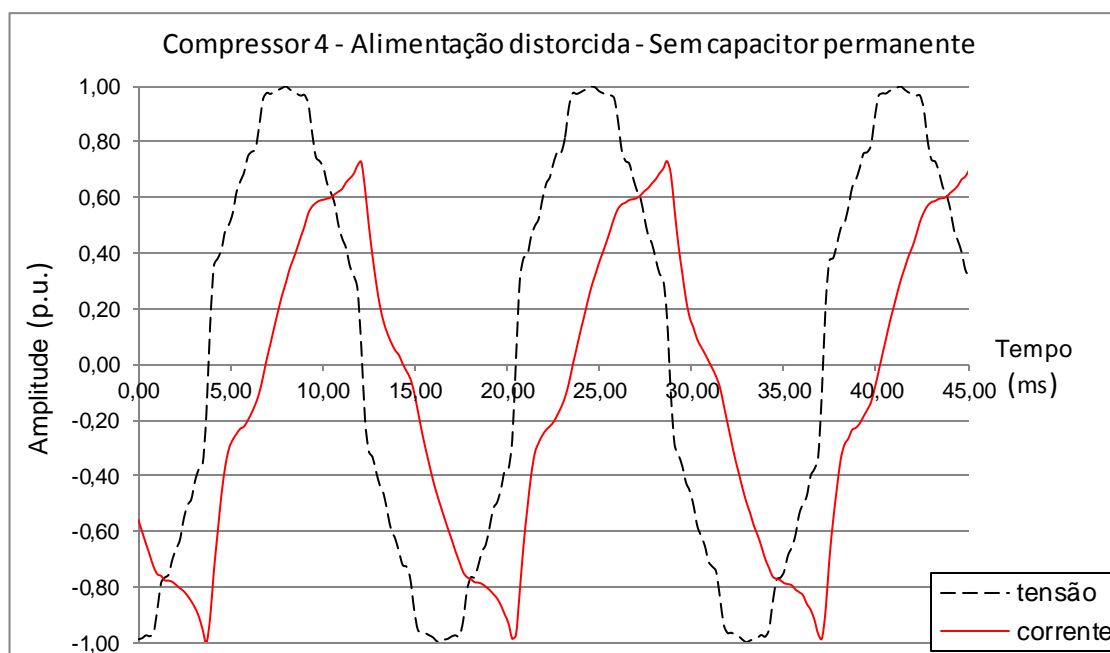


Figura 6.25 - Formas de onda de tensão e corrente do compressor 4, alimentação distorcida, sem capacitor permanente.

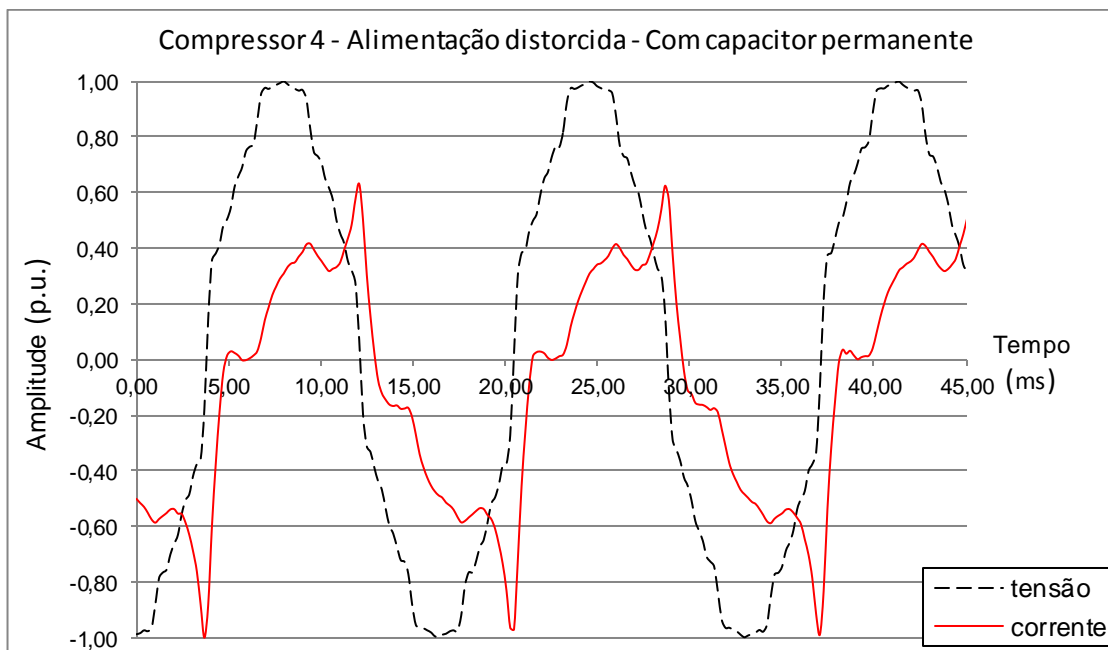


Figura 6.26 - Formas de onda de tensão e corrente do compressor 4, alimentação distorcida, com capacitor permanente.

A Figura 6.27 apresenta o diagrama de barras das amplitudes das componentes harmônicas presentes no compressor 4 com alimentação distorcida.

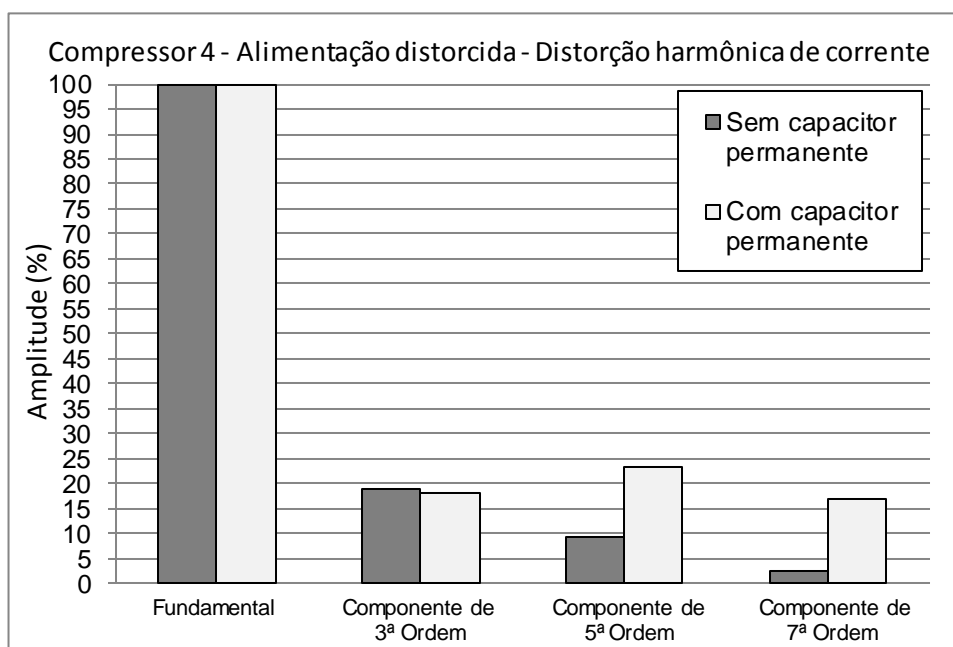


Figura 6.27 - Diagrama de barras das amplitudes das componentes harmônicas de corrente, compressor 4, alimentação distorcida.

A Tabela 6.4 apresenta os resultados dos ensaios com o compressor 4 com alimentação distorcida.

Tabela 6.8 - Resultados dos ensaios com o compressor 4, alimentação distorcida.

Compressor 4 - Alimentação distorcida		
	Sem capacitor permanente	Com capacitor permanente
V rms (V)	223,16	223,16
I rms (A)	2,002	1,311
P (W)	177	206
fp	0,49	0,70
I ₁ rms (A)	1,959	1,193
DHT _V (%)	15,30	10,86
DHT _I (%)	22,83	34,42
Temp. final principal (°C)	79,11	74,01
Temp. final auxiliar (°C)	71,53	62,46

Com a alimentação distorcida o compressor 4 foi o que apresentou maior DHT de corrente, superior a 34%, mas os resultados das medidas nessa condição foram bem próximos dos resultados com alimentação puramente senoidal.

Nessa condição, observa-se pela Tabela 6.8 um pequeno aumento da potência consumida e um aumento na temperatura da bobina principal, o que pode ser explicado pela alta concentração da componente de 5ª ordem.

Já com o uso do capacitor permanente há uma grande concentração da componente de 7ª ordem, evidenciando um aumento no consumo, mas redução na temperatura atingida.

7 - CONCLUSÕES

Os compressores apresentaram resultados singulares para cada característica de projeto e condição de ensaio.

É notório o aumento da potência consumida em condições com alta concentração de componentes harmônicas, principalmente em altas concentrações da componente de 5ª ordem, responsável por causar torque reverso no motor.

Altas concentrações de componentes de 7ª ordem também aumentam o consumo do compressor, mas demonstram um aquecimento menor das bobinas do motor, por ser responsável por causar um aumento do torque no sentido direto do motor.

O uso do capacitor permanente, bem como a consequente adição da bobina auxiliar no regime permanente do compressor apresentou a tendência de diminuição na corrente drenada e aumento do fator de potência, mesmo em condições distorcidas. Porém as distorções harmônicas de corrente causam um aumento no consumo do compressor.

Uma possibilidade para aumento do consumo é a saturação do motor pela presença de componentes harmônicas de corrente de alta frequência. As perdas magnéticas dos aços elétricos são diretamente proporcionais à frequência de alimentação (LANDGRAF, 2002).

Os resultados permitem observar a importância da análise da QEE nos projetos de MIM aplicados a compressores herméticos. Conforme conduzida esta pesquisa, observaram-se valores distintos dos apresentados por simulações computacionais via o software SPEED (Pompeo, 2011), o que justifica então, a necessidade de uma análise mais apurada pelo uso de analisadores de QEE.

Neste sentido, como trabalhos futuros, sugere-se:

- a) A análise da QEE em conjunto com o projeto de motores. Por esta, poderia ser realizado a análise das distorções harmônicas sobre os protótipos, utilizando dos resultados para correção nas simulações dos programas para projetos de MIM, aumentando assim a consistência dos modelos teóricos frente a tais situações.
- b) Ensaio conjunto dos compressores com as cargas disponíveis na bancada do LAMQEE (FERNANDES, 2009). Por estes ensaios, será possível realizar várias configurações com as cargas disponíveis e simular várias condições de ambiente com distorção harmônica, como é observado em ambientes residenciais (PIRES, 2006).
- c) O conjunto de compressores permite o estudo do circuito térmico montado para seu funcionamento e a influência das componentes harmônicas nesse sistema. Desta maneira, vislumbra-se a junção do estudo mecânicos e do elétrico realizado.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANEEL. “Atlas de Energia Elétrica do Brasil”. 3ª Edição. Brasília, DF, Brasil. 2008.

ANEEL. “Atlas do Desenvolvimento Humano no Brasil 2013”. Disponível em <http://www.pnud.org.br/IDH/Atlas2013.aspx?indiceAccordion=1&li=li_Atlas2013>

ANEEL. “Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST. Módulo 8 – Qualidade da Energia Elétrica. Revisão 4”. Brasília, DF, Brasil. 2012.

FEI, R. W.; LLOYD, J. D.; DIERKES. “An Experimental Study of Single-Phase Induction Motor Starting and Its Dependency on Winding Harmonics”. IEEE, 1995.

FERNANDES, R. A. S. “Identificação de Fontes de Correntes Harmônicas por Redes Neurais Artificiais”. Dissertação de Mestrado, EESC-USP. São Carlos, 2009.

IBGE, CENSO 2010. Disponível em <<http://censo2010.ibge.gov.br>>

LANDGRAF, F. J. G. “Propriedades Magnéticas de aços para fins elétricos”. In: Ivani Bott; Paulo Rios; Ronaldo Paranhos. (Org.). Aços: perspectivas para os próximos 10 anos. 1ª ed. Rio de Janeiro, 2002, p. 109-128.

KHOOBRO, A.; KRISHNAMURTHY, M.; FAHIMI, B.; LEE, W. J. “Effects of System Harmonics and Unbalanced Voltages on Electromagnetic Performance of Induction Motors”. Industrial Electronics, 2008. IECON 2008. 34th Annual Conference of IEEE. IEEE, 2008, p. 1173-1178.

MASJUKI, H. H.; SAIDUR, R.; CHOUDHURY, I. A.; MAHLIA, T. M. I. “Factors Effecting Energy Consumption of Households Refrigerator-Freezers”. TENCON 2000. Proceedings, vol. 2. IEEE, 2000, p. 92- 96.

MAZIN, H. E.; NINO, E. E.; XU, W.; YONG, J. “A Study of Harmonic Contributions of Residential Loads”. IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 26, No. 3, July 2011.

PEIXOTO, L. Q. B. “Aspectos de Projetos de Motores de Indução Monofásicos Aplicados em Compressores Herméticos para Refrigeração”. Trabalho de Conclusão de Curso, EESC-USP. São Carlos, 2011.

PIRES, I. A. “Caracterização de Harmônicos Causados por Equipamentos Eletroeletrônicos Residenciais e Comerciais no Sistema de Distribuição de Energia Elétrica”. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica - UFMG. 2006.

POMPEO, G. P. “Efeitos das Harmônicas sobre Curva de Torque de Motores de Indução Monofásicos Aplicados em Compressores Herméticos”. Trabalho de Conclusão de Curso, EESC-USP. São Carlos, 2011.

PROCEL. “Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica, Eletrobrás”. Disponível em <<http://www.eletrobras.com/elb/procel/main.asp>>

TECUMSEH do Brasil Ltda, a. Boletim Refrigeração. Disponível em <<http://www.tecumseh.com/pt/south-america/library/commercial-brochures>>

TECUMSEH do Brasil Ltda, b. Catálogo Geral de Compressores. Disponível em <<http://www.tecumseh.com/pt/south-america/library/commercial-brochures>>

TECUMSEH do Brasil Ltda, c. Hermetic Compressor, Service Handbook. Tecumseh Products Company, 2011. Disponível em <<http://www.tecumseh.com/pt/south-america/library/commercial-brochures>>

TECUMSEH do Brasil Ltda, d. Planilha para cálculo de resistência e temperatura dos enrolamentos de motores.

TORASSI, M. “Avaliação da Temperatura de Armazenamento de Alimentos Refrigerados em Supermercados de Criciúma - SC”. Trabalho de Conclusão de Curso, UNESC. 2009.

VALERY, P. P. T. “Boas Práticas para Estocagem de Medicamentos”. Ministério da Saúde - Central de Medicamentos. Brasília, DF, Brasil. 1990.

