

**DAS** Departamento de Automação e Sistemas  
**CTC** **Centro Tecnológico**  
**UFSC** Universidade Federal de Santa Catarina

**Concepção de Instrumentação para  
Validação da Medição de Frequência  
Rotacional de Compressores Alternativos em  
Sistemas de Refrigeração**

*Relatório submetido à Universidade Federal de Santa Catarina como  
como requisito para a aprovação da disciplina:  
**DAS 5511: Projeto de Fim de Curso***

***André Vinícius Rocha Silva***

*Florianópolis, fevereiro de 2016*



# **Concepção de Instrumentação para Validação da Medição de Frequência Rotacional de Compressores Alternativos em Sistemas de Refrigeração**

*André Vinícius Rocha Silva*

## **Orientadores**

*Miguel Burg Demay, Dr. Eng.*

---

Assinatura do Orientador

*Prof. Rodolfo César Costa Flesch, Dr. Eng.*

---

Assinatura do Orientador

Este relatório foi julgado no contexto da disciplina  
**DAS 5511: Projeto de Fim de Curso**  
e aprovada na sua forma final pelo  
**Curso de Engenharia de Controle e Automação**

Banca Examinadora:

Miguel Burg Demay / LABMETRO  
Orientador na Empresa

Prof. Rodolfo César Costa Flesch  
Orientador no Curso

Prof. Júlio Elias Normey-Rico  
Responsável pela disciplina

Prof. Daniel Coutinho Prof. Avaliador

Henrique Salvaro Furtado  
Debatedor

Matheus Dias  
Debatedor



# Agradecimentos

Ao longo deste projeto, tive ajuda de diversas pessoas. Seria no mínimo injusto não agradecê-las.

Agradeço, primeiramente, ao Miguel, pela orientação desde o início do projeto. Sempre me ajudando nas minhas dificuldades práticas. Ensinando a aplicar a teoria. Orientando para manter o foco e fazer um bom trabalho. Procurando a excelência até nas pequenas coisas.

Agradeço ao Professor Rodolfo, por toda a orientação que ele vem me dando. Por esclarecer minhas dúvidas dentro e fora do projeto. Pela preocupação com o projeto e comigo. Sempre muito disponível e acessível.

Agradeço à toda equipe LIAE, pela consultoria e apoio. Sempre tinha alguém para sanar a minha dúvida, não importando qual fosse. Em especial ao Júlio e ao Carlos que participaram mais ativamente do meu projeto.

Agradeço à Universidade Federal de Santa Catarina e à Embraco por acreditarem na minha competência e investirem no meu trabalho.

Agradeço à Fernanda pelo apoio com o português e todo o suporte que ela e sua família têm me dado.

Por último, e não menos importante, agradeço a minha família e amigos, que durante toda a graduação me deram o suporte necessário para enfrentar os momentos difíceis e a alegria necessária para comemorar as conquistas.



# Resumo

Medir a frequência rotacional em compressores é importante para a indústria de sistemas de refrigeração. Esses dados são utilizados para avaliar o desempenho dos compressores em sistemas de refrigeração e verificar avanços no desenvolvimento de novos modelos. Em compressores herméticos, entretanto, é inviável realizar a medição direta da frequência rotacional sem que o ensaio seja destrutivo, uma vez que é necessário abrir o invólucro hermético do compressor para que seja possível instalar o sistema de medição. Trabalhos anteriores comprovaram ser possível medir a frequência rotacional através de grandezas externamente mensuráveis, como: vibração, corrente elétrica de alimentação e pressão de descarga. De acordo com os resultados da literatura, esses métodos foram testados e validados em condição de bancada, porém não foram avaliados frente a padrões em sistemas de refrigeração. Este trabalho apresenta a confecção de um sistema de medição, utilizando refrigeradores comercializados para uso doméstico, a fim de fornecer ferramentas suficientes para uma futura validação dos métodos em sistemas de refrigeração. Neste trabalho, apresentam-se os transdutores, o sistema de aquisição e os refrigeradores utilizados. Também são realizados ensaios no sistema desenvolvido e os resultados obtidos indicam ser possível a validação dos métodos indiretos de medição da frequência rotacional de compressores herméticos em condições reais de uso.

**Palavras-chave:** frequência rotacional, compressores, instrumentação



# Abstract

The measurement of the rotational frequency is important on the refrigeration industry. This kind of data is applied to evaluate the performance of compressors working in refrigeration systems and to verify improvements on R&D. Although, it is impracticable to directly measure the rotational frequency in hermetic compressors without destructive tests, once the hermetic shell must be opened in order to place the transducer.

Previous works have shown that it is possible to estimate the rotational frequency from externally measurable quantities, such as supply current, shell vibration and discharge pressure. According to literature, those methods were tested and validated on a test rig, but not in refrigeration systems compared with a standard measurement. This work presents the creation of a measurement system using residential refrigerators with the purpose of provide resources for a future validation of measurement methods in commercial refrigeration systems. This work presents the transducers, the acquisition system and utilized refrigerators. The system is tested and the results indicate that it is possible to validate the rotational frequency measurement methods in refrigeration systems.

**Keywords:** rotational frequency, compressor, measurement



# Lista de ilustrações

2.1	Ciclo de refrigeração por compressão. Adaptado de Stoecker(2002) . . . . .	26
2.2	As fases no diagrama pressão entalpia. Adaptado de FLESCHE, R. C. C. (2008) .	27
2.3	Compressor hermético alternativo (HENKLEIN, P., 2006) . . . . .	28
2.4	Ciclo de compressão em um compressor hermético alternativo. Adaptado de U.S. DEPARTMENT OF ENERGY (1993) . . . . .	29
2.5	Transdutor de sincronismo instalado em um compressor alternativo (DEMAY, M. B., 2008) . . . . .	30
2.6	Transdutor de sincronismo instalado em um compressor alternativo (DEMAY, M. B., 2008) . . . . .	31
2.7	LVIT (REDLICH, R. W., 1987) . . . . .	32
2.8	Sinal de saída de um transmissor usado para medir a pressão de descarga do compressor (DEMAY, M. B., 2008) . . . . .	33
2.9	Análise em frequência do sinal de pressão de descarga alimentado a 60 Hz (a). Em visão ampliada (b) (DEMAY, M. B., 2008) . . . . .	33
2.10	Análise em frequência do sinal de vibração da carcaça . . . . .	34
2.11	Análise em frequência do sinal de corrente . . . . .	36
2.12	Acelerômetro piezoelétrico (PICCOLI, H. C., 2000) . . . . .	37
2.13	Fenômeno da piezoelectricidade quando submetido a tensão mecânica (a) e a carga elétrica (b) (RIELLA, H. L., 2010) . . . . .	37
2.14	Diagrama típico do diafragma de um transdutor de pressão (EATON, W. P.; SMITH, J. H., 1997) . . . . .	38
2.15	Diagrama de um transdutor de pressão com diafragma (FIGLIOLA, R. S.; BEASLEY, D. E., 2000) . . . . .	38
2.16	Ponte de Wheatstone. Adaptado de BENTLEY, J. P. (2005) . . . . .	39
3.1	Esquema geral de instrumentação . . . . .	42
3.2	Circuito amplificador do sinal de saída do transdutor . . . . .	43
3.3	Medição a 4 fios utilizando o NI 9219 (NI, 2009b) . . . . .	46
4.1	Pressões no desligamento do Refrigerador A . . . . .	47
4.2	Sinal de corrente na partida do Refrigerador A . . . . .	49
4.3	Sinal da pressão de descarga na partida do Refrigerador A . . . . .	49
4.4	Sinal de vibração na partida do Refrigerador A . . . . .	50
4.5	Sinal do LVIT na partida do Refrigerador A . . . . .	50
4.6	Sinais de pressão de descarga, corrente e LVIT na partida do Refrigerador A . .	51
4.7	FFT do sinal da corrente de alimentação do compressor no Refrigerador A . . .	51
4.8	Sinal da pressão de descarga no Refrigerador A . . . . .	52

4.9	FFT do sinal da pressão de descarga do compressor no Refrigerador A . . . . .	52
4.10	FFT do sinal da vibração na carcaçado compressor no Refrigerador A . . . . .	53
4.11	FFT do sinal do LVIT no Refrigerador A . . . . .	53
4.12	Sinal de corrente na partida do Refrigerador B . . . . .	54
4.13	Sinal da pressão de descarga na partida do Refrigerador B . . . . .	54
4.14	Sinal de vibração na partida do Refrigerador B . . . . .	55
4.15	Sinal do LVIT na partida do Refrigerador B . . . . .	55
4.16	Sinais de pressão de descarga, corrente e LVIT na partida do Refrigerador B . .	56
4.17	FFT do sinal da corrente de alimentação do compressor no Refrigerador B . . .	56
4.18	Sinal da pressão de descarga no Refrigerador B . . . . .	57
4.19	FFT do sinal da pressão de descarga do compressor no Refrigerador B . . . . .	57
4.20	FFT do sinal de vibração na carcaça do compressor no Refrigerador B . . . . .	58
4.21	FFT do sinal do LVIT no Refrigerador B . . . . .	58
4.22	Sinal da pressão de descarga na partida do Refrigerador C . . . . .	59
4.23	Sinal de vibração na partida do Refrigerador C . . . . .	59
4.24	Sinal do LVIT na partida do Refrigerador C . . . . .	60
4.25	Sinal do LVIT na partida do Refrigerador C . . . . .	60
4.26	Sinais do acelerômetro, do LVIT e da pressão de descarga na partida do Refrigerador C . . . . .	61
4.27	Sinal da pressão de descarga no Refrigerador C . . . . .	61
4.28	FFT do sinal da pressão de descarga do compressor no Refrigerador C . . . . .	62
4.29	FFT do sinal de vibração na carcaça do compressor no Refrigerador C . . . . .	62
4.30	FFT do sinal do LVIT no Refrigerador C . . . . .	63

\*

# Lista de tabelas

3.1	Relação dos refrigeradores utilizados . . . . .	41
-----	---	----

\*



# Lista de abreviaturas e siglas

- FFT : Transformada Rápida de Fourier
- FLDT : Transdutor rápido de deslocamento linear
- IBGE : Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
- LVIT : Transdutor linear de indutância variável
- VCC : Compressor de capacidade variável



# Sumário

<b>1</b>	<b>Introdução</b>	<b>21</b>
1.1	Contextualização . . . . .	21
1.2	Objetivos . . . . .	22
1.2.1	Objetivo Geral . . . . .	22
1.2.2	Objetivos Específicos . . . . .	22
1.2.3	Resultados Esperados . . . . .	23
1.3	Estrutura do Documento . . . . .	23
<b>2</b>	<b>Revisão da Literatura</b>	<b>25</b>
2.1	Sistemas de Refrigeração . . . . .	25
2.2	Compressores Alternativos Herméticos . . . . .	28
2.3	Medição da Frequência Rotacional de compressores herméticos . . . . .	30
2.3.1	Medição Direta . . . . .	30
2.3.1.1	Sincronismo . . . . .	30
2.3.1.2	LVIT . . . . .	31
2.3.2	Medição Indireta . . . . .	32
2.3.2.1	Sinais de pressão . . . . .	33
2.3.2.2	Sinal da vibração da carcaça do compressor . . . . .	34
2.3.2.3	Sinal da Corrente de alimentação . . . . .	35
2.4	Acelerômetros piezoelétricos . . . . .	35
2.5	Transdutores de pressão extensométricos . . . . .	37
2.6	Considerações sobre o capítulo . . . . .	40
<b>3</b>	<b>Arquitetura de Aquisição de Sinais</b>	<b>41</b>
3.1	Visão Geral do Sistema . . . . .	41
3.2	Grandezas a medir . . . . .	42
3.2.1	Pressão de Descarga . . . . .	43
3.2.2	Vibração . . . . .	43
3.2.3	Corrente . . . . .	44
3.2.4	Pressão de Sucção . . . . .	44
3.2.5	Temperatura . . . . .	45
3.2.6	Frequência Rotacional . . . . .	45
3.3	Placas de Aquisição . . . . .	45
3.3.1	NI 9215 . . . . .	46
3.3.2	NI 9201 . . . . .	46
3.3.3	NI 9219 . . . . .	46

<b>4</b>	<b>Análise Experimental</b>	<b>47</b>
4.1	Descrição dos Ensaios Realizados . . . . .	47
4.2	Resultados dos Ensaios e Análise . . . . .	48
4.2.1	Refrigerador A . . . . .	48
4.2.1.1	Partida . . . . .	48
4.2.1.2	Regime Permanente . . . . .	51
4.2.2	Refrigerador B . . . . .	54
4.2.2.1	Partida . . . . .	54
4.2.2.2	Regime Permanente . . . . .	56
4.2.3	Refrigerador C . . . . .	59
4.2.3.1	Partida . . . . .	59
4.2.3.2	Regime Permanente . . . . .	61
4.3	Conclusões . . . . .	63
<b>5</b>	<b>Considerações Finais</b>	<b>65</b>
5.1	Conclusões . . . . .	65
5.2	Sugestões para Trabalhos Futuros . . . . .	66
	<b>Referências</b>	<b>67</b>



# Capítulo 1

## Introdução

### 1.1 Contextualização

A sociedade se utiliza de sistemas de refrigeração para conforto térmico, conservação de alimentos e em processos produtivos, entre outras aplicações. No Brasil, a grande maioria das residências possui ao menos um refrigerador, em 2011 95,75% dos domicílios brasileiros possuíam pelo menos uma geladeira (IBGE, 2011). A maioria desses sistemas possuem um ou mais compressores (MORAN, M. J.; SHAPIRO, H. N., 2010).

Por conta da sua relevância, a indústria de compressores é extremamente competitiva. As empresas buscam produtos melhores, mais eficientes e econômicos. Por isso, existe um forte investimento em pesquisa e desenvolvimento de novos compressores (A NOTÍCIA, 2015).

Para validar os avanços tecnológicos e verificar a qualidade dos produtos, é necessário realizar ensaios que permitam quantificar as características dos compressores. As informações coletadas também auxiliam nas decisões da empresa e fornecem dados para o desenvolvimento de novas pesquisas.

Existem diversos tipos de ensaios a que são submetidos os compressores de refrigeração. Neles são avaliados diferentes critérios, podendo envolver características como mínima tensão de partida, atrito de mancais, confiabilidade do sistema elétrico, desempenho e consumo energético (THOMAZINI JR, J. C. , 2013).

Dentre as diversas grandezas medidas, a frequência rotacional merece destaque, principalmente em ensaios de desempenho e de tombamento. A frequência rotacional nos ensaios é usada como um indicativo de regime permanente, além de ser um parâmetro importante no monitoramento das condições de ensaio. Através dela também é possível identificar o instante de tombamento (ASHRAE, 2005; FITZGERALD, A. E.; KINGSLEY, C.; UMANS, S. D., 2003).

Medir a frequência rotacional em compressores é tarefa complexa, devido ao fato de que em sistemas de refrigeração de baixa potência, como os utilizados em residências, geralmente se utilizam compressores herméticos. Nesse tipo de equipamento, o motor e o compressor propriamente dito estão acoplados e inseridos numa carcaça metálica vedada por meio de solda. Portanto, para que fosse possível a medição direta da frequência rotacional, seria necessário desfazer a solda da carcaça, inserir corretamente o transdutor de frequência rotacional no interior do compressor e refazer a solda da carcaça. Esse processo é lento, caro e exige mão de obra especializada. Adicionalmente, um compressor instrumentado por esse método não pode mais ser comercializado, o que torna o ensaio destrutivo, inviável de ser realizado em larga escala (EMBRACO, 2002).

Demay (2008) estudou formas para a medição indireta da frequência rotacional de maneira não invasiva, com baixa incerteza e elevada confiabilidade metrológica, adquirindo os sinais de vibração, corrente e pressão e tratando-os através de diversas ferramentas de processamento digital de sinais. Os métodos desenvolvidos foram validados em bancada de ensaios de refrigeração, em condições de regime permanente e transitório (DEMAY, M. B., 2015).

Até o momento, não foi feita a validação desses métodos em sistemas de refrigeração. Portanto, ensaios precisam ser feitos em sistemas de refrigeração, com diferentes cargas térmicas e em diferentes condições de regime permanente e transitório.

## **1.2 Objetivos**

### **1.2.1 Objetivo Geral**

Este trabalho tem como objetivo geral projetar e construir um sistema de medição que viabilize a validação de métodos de medição indireta da frequência rotacional de compressores herméticos em sistemas de refrigeração.

### **1.2.2 Objetivos Específicos**

Este projeto possui os seguintes objetivos específicos:

- definir as grandezas a serem mensuradas, para a medição indireta da frequência rotacional e para o monitoramento das condições de ensaio;
- projetar sistemas de medição para as grandezas definidas;
- realizar o tratamento e o processamento dos sinais adquiridos;

### **1.2.3 Resultados Esperados**

Ao final deste projeto, espera-se obter uma bancada própria para uma futura validação dos métodos de medição indireta da frequência rotacional. A bancada deve ser composta por refrigeradores instrumentados, uma vez que os métodos de medição de frequência rotacional já foram validados em compressores em condições de bancada.

## **1.3 Estrutura do Documento**

Esta monografia está dividida em cinco capítulos.

No capítulo dois, apresenta-se uma revisão da literatura já existente sobre temas pertinentes ao trabalho.

No capítulo três, apresenta-se o sistema concebido para o trabalho, os métodos de aquisição e tratamento dos sinais utilizados no trabalho.

No capítulo quatro, apresentam-se os resultados obtidos com os ensaios realizados.

No capítulo cinco, apresentam-se as conclusões obtidas com o desenvolvimento do trabalho.



# Capítulo 2

## Revisão da Literatura

Este capítulo visa esclarecer alguns conceitos a fim de tornar o documento mais acessível ao entendimento do leitor. Na seção 2.1, são abordados conceitos de sistemas de refrigeração. Na seção 2.2, apresenta-se um estudo sobre compressores. Nas seções 2.3.1 e 2.3.2, apresentam-se métodos de medição de frequência rotacional em sistemas de refrigeração, diretos e indiretos respectivamente. O funcionamento de um acelerômetro é apresentado na seção 2.4. Apresentam-se transdutores de pressão extensométricos. Por fim, na seção 2.6, faz-se uma conclusão sobre o que foi apresentado no capítulo.

### 2.1 Sistemas de Refrigeração

O processo natural da transferência de calor ocorre de um ambiente mais quente para um mais frio. Sistemas de refrigeração têm por objetivo realizar o processo inverso, ou seja, transferir calor de um ambiente mais frio para um mais quente. Para isso acontecer é necessário realizar trabalho sobre o sistema e o componente responsável por realizar esse trabalho, na maioria dos casos, é o compressor. Em sua maioria, os compressores de refrigeração empregam motores assíncronos monofásicos para realizar esse trabalho (STOECKER, W. F.; SAIZ JABARDO, J. M., 2002; SONNTAG, R. E.; BORGANAKKE, C.; VAN WYLEN, G. J., 2003).

A figura 2.1 apresenta um circuito de refrigeração por compressão de vapor, o tipo mais empregado tanto em refrigeração doméstica quanto comercial. Esses sistemas são compostos por cinco elementos: o compressor, o condensador (trocador de calor a alta pressão), o dispositivo de expansão (tubo capilar ou válvula), o evaporador (trocador de calor a baixa pressão) e a tubulação (STOECKER, W. F.; SAIZ JABARDO, J. M., 2002).

A compressão tem como base a mudança de fase de um fluido refrigerante, que será analisada tomando como base a figura 2.1. No ciclo de refrigeração, primeiramente o fluido está a baixa pressão na entrada do compressor (4), que o comprime, elevando sua pressão e temperatura (1). Após a compressão, o fluido refrigerante passa por um trocador de calor, externo ao ambiente que se deseja refrigerar, atingindo o ponto (2). Como a temperatura do fluido na descarga do compressor é bastante alta, nessa etapa o fluido refrigerante rejeita calor para o meio, baixando a sua temperatura e passando para o estado líquido subresfriado. No dispositivo de expansão ocorre uma brusca queda de pressão e parte do fluido refrigerante evapora, passando a um estado bifásico, de coexistência de líquido e vapor, indicado por (3). No evaporador, o fluido refrigerante absorve calor do ambiente a ser refrigerado e passa para um estado de vapor a baixa pressão, como no início do ciclo, no ponto (4). Apesar de a

explicação do ciclo realizada neste parágrafo ter considerado o caminho percorrido por uma molécula do fluido refrigerante, vale ressaltar que o processo ocorre cíclica e continuamente, ou seja, enquanto parte do fluido refrigerante está na expansão, outra parte está sendo comprimida (STOECKER, W. F.; SAIZ JABARDO, J. M., 2002).

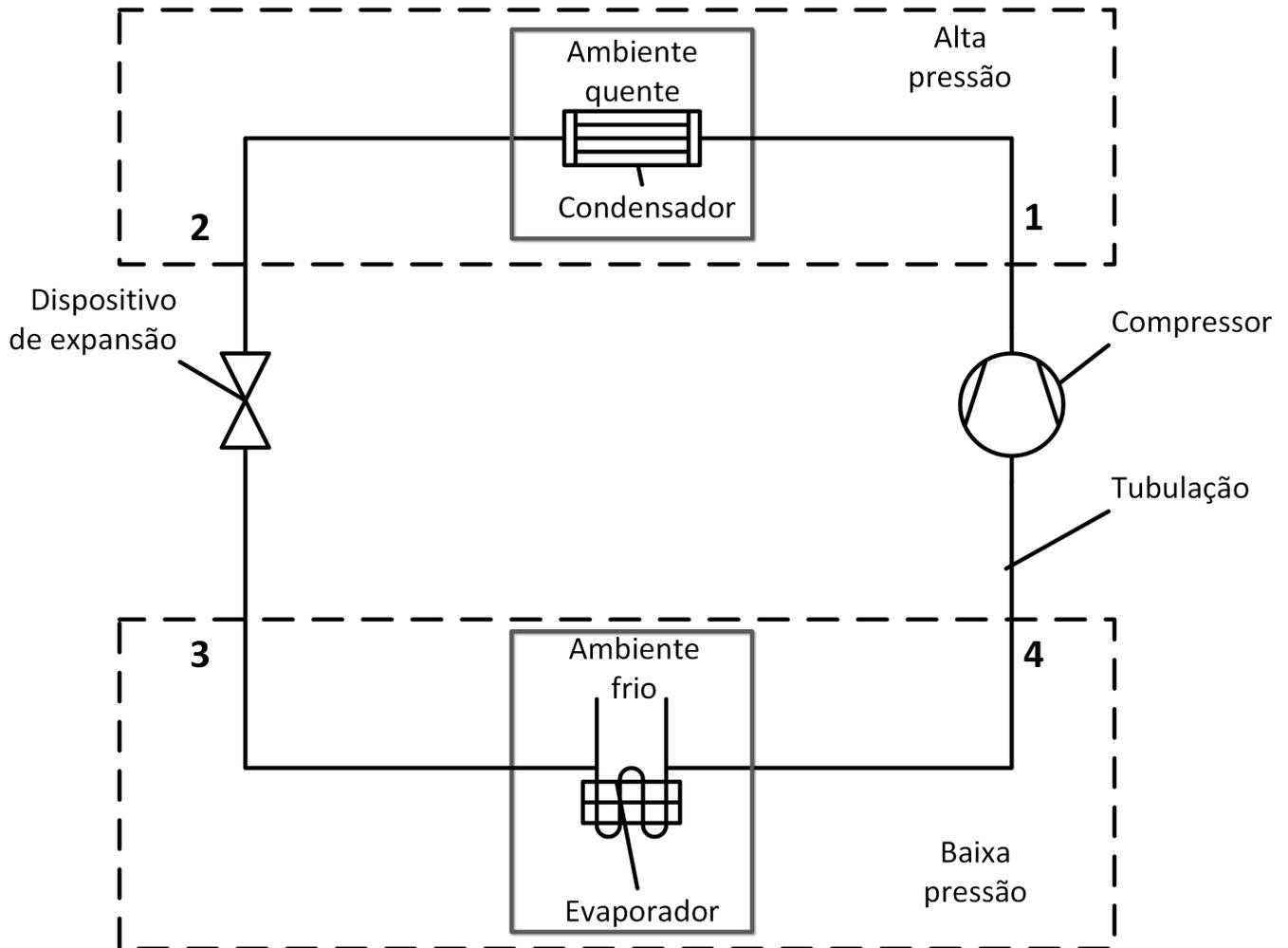


Figura 2.1: Ciclo de refrigeração por compressão. Adaptado de Stoecker(2002)

O diagrama pressão-entalpia é o mais utilizado na correlação das propriedades termodinâmicas dos refrigerantes. Esse diagrama também explica o que ocorre durante um ciclo de compressão. As distintas fases do refrigerante no diagrama são caracterizadas por estados situados em regiões separadas pelas linhas de saturação, como apresentado na figura 2.2 (STOECKER, W. F.; SAIZ JABARDO, J. M., 2002).

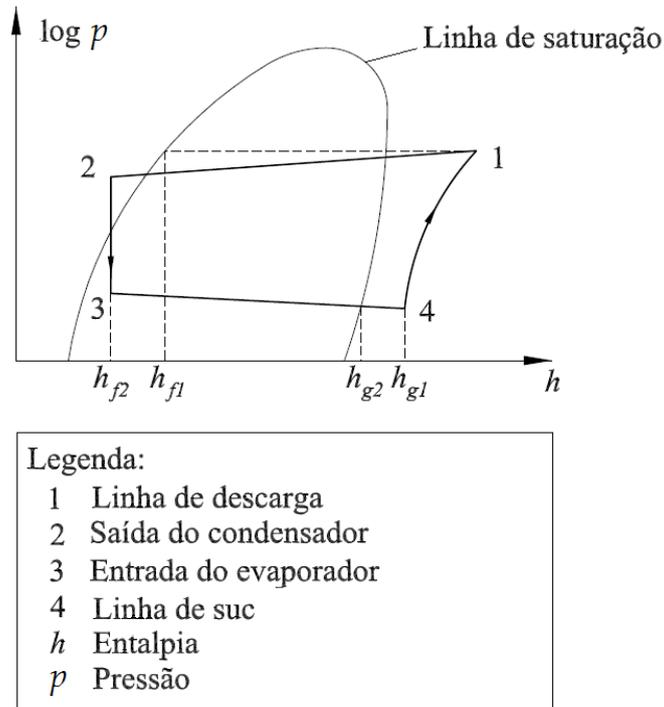


Figura 2.2: As fases no diagrama pressão entalpia. Adaptado de FLESCH, R. C. C. (2008)

Na área à esquerda da linha de saturação, o fluido refrigerante encontra-se totalmente na fase líquida. Na área à direita, o fluido refrigerante encontra-se totalmente na fase vapor. A área que se encontra dentro das linhas de saturação representa a mudança de fase do fluido refrigerante (STOECKER, W. F.; SAIZ JABARDO, J. M., 2002).

## 2.2 Compressores Alternativos Herméticos

Entre os diversos tipos de compressores existentes os mais utilizados em domicílios, e foco deste trabalho, são os alternativos herméticos (STOECKER, W. F.; SAIZ JABARDO, J. M., 2002). A Figura 2.3 apresenta os principais componentes de um compressor hermético alternativo.

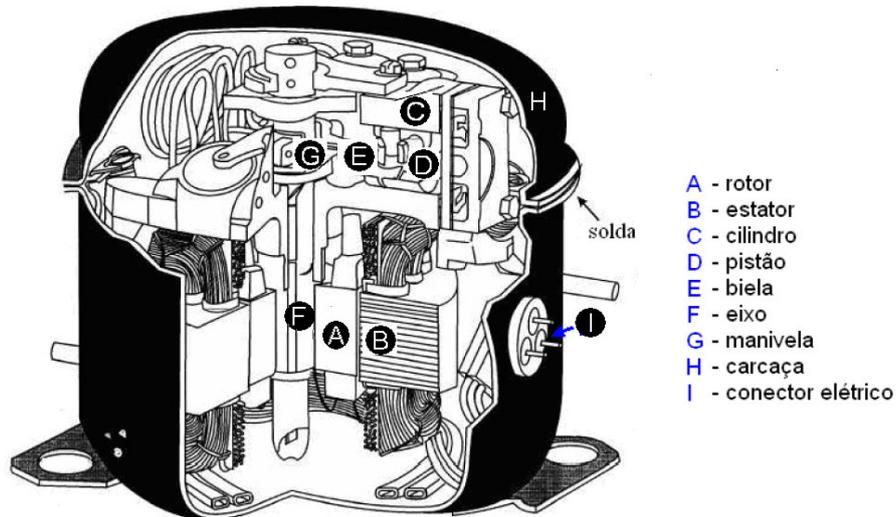


Figura 2.3: Compressor hermético alternativo (HENKLEIN, P., 2006)

Nos compressores herméticos, o kit mecânico (cilindro, pistão, biela e manivela, na figura 2.3) e o motor (rotor, estator e eixo, na figura 2.3) ficam dentro da carcaça, que é fechada através de solda. Neles, somente se possui acesso aos terminais elétricos do motor e às conexões de descarga, sucção e processo. A conexão de descarga está ligada diretamente com a válvula de descarga do cilindro. Ambas as conexões de sucção e de processo têm ligação com a válvula de sucção, porém a de processo encontra-se mais afastada da válvula, na carcaça do compressor. Como não se tem acesso ao seu interior, a principal desvantagem dos compressores herméticos é a dificuldade de sua manutenção. Por outro lado, por ele ser vedado, encontram-se menos problemas relacionados ao vazamento de fluido refrigerante e sua contaminação pelo ar e umidade ambientes (EMBRACO, 2002).

Compressores alternativos possuem um sistema biela manivela que conecta o eixo do motor a um pistão, que se desloca dentro do cilindro de compressão. A energia elétrica fornecida ao motor do compressor faz com que esse entre em funcionamento, gerando movimento circular sobre seu eixo. O movimento circular é transformado, através do conjunto biela-manivela, em movimento retilíneo do pistão no interior do cilindro (ÇENGEL, Y. A.; BOLES, M. A., 2006).

Dentro do cilindro existem duas válvulas que permitem a passagem de fluido em apenas em uma direção, na válvula de sucção só acontece a entrada de fluido, enquanto na de descarga ocorre somente a saída. A válvula de sucção permite a passagem de fluido para o interior do cilindro quando a pressão no seu interior se encontra menor do que a pressão externa, no

interior da carcaça do compressor. A válvula de descarga permite a passagem de fluido do interior do cilindro para a descarga quando a pressão do mesmo for maior do que a da linha de descarga do circuito de refrigeração (ÇENGEL, Y. A.; BOLES, M. A., 2006).

A figura 2.4 apresenta o interior do cilindro de compressão durante um ciclo de compressão. Na etapa A, o pistão se encontra em seu curso máximo. Com o retorno do pistão, começa a expansão do fluido refrigerante com ambas as válvulas fechadas, caracterizada na imagem pela etapa B. Quando a pressão no interior do cilindro é menor que a pressão externa, a válvula de sucção é aberta e começa o fluxo de fluido para dentro do cilindro, na figura representada pela etapa C. O fluido é aspirado, preenchendo a câmara até que o pistão chegue no seu curso mínimo. Ao avançar novamente, a pressão no cilindro aumenta e as válvulas se fecham. O pistão passa então a comprimir o fluido, etapa D. Quando a pressão no interior do cilindro se torna maior do que a pressão de descarga, a válvula de descarga se abre e ocorre a saída do fluido, etapa E, até que o pistão atinja o curso máximo, retornando à etapa A (ÇENGEL, Y. A.; BOLES, M. A., 2006).

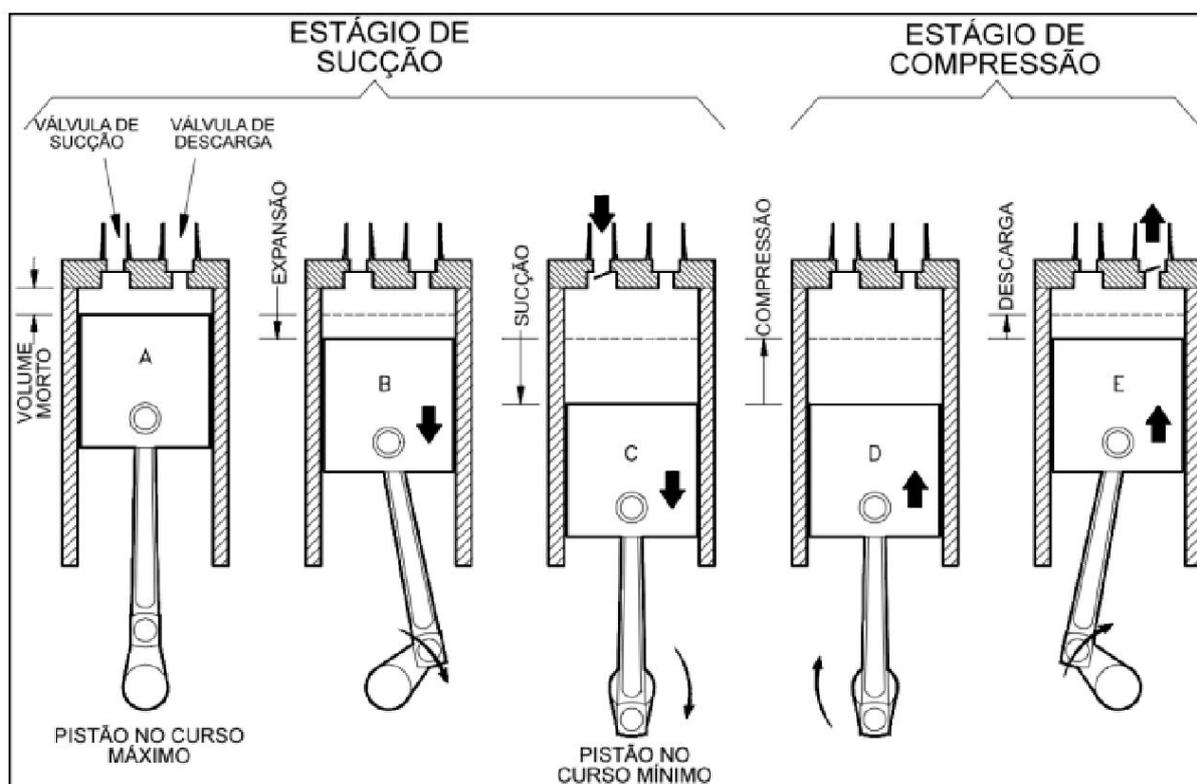


Figura 2.4: Ciclo de compressão em um compressor hermético alternativo. Adaptado de U.S. DEPARTMENT OF ENERGY (1993)

## 2.3 Medição da Frequência Rotacional de compressores herméticos

Medir a frequência rotacional de motores é um problema bastante conhecido e de resolução consideravelmente simples. Entretanto, nos sistemas de refrigeração essa tarefa encontra alguns problemas. Nesta seção serão abordados métodos diretos e indiretos de medição da frequência rotacional aplicáveis a compressores herméticos de refrigeração.

### 2.3.1 Medição Direta

Existem diversos métodos de medição direta da frequência rotacional. Porém, para se aplicar em compressores para sistemas de refrigeração é necessário que seja possível o seu funcionamento imerso em óleo, o que dificulta ou mesmo impossibilita o uso de alguns transdutores mais comuns, como *encoders* óticos e tacogeradores (PHIPPS, W., AL-BAHADLY, I., 2002).

Para utilizar sensores de medição direta da frequência rotacional em compressores herméticos, é necessário abrir a carcaça para instrumentá-lo. Uma vez que o compressor é aberto, sua condição do compressor se altera e ele se torna mais suscetível a vazamentos, o que torna sua aplicação viável somente para ensaios específicos (DEMAY, M. B., 2008).

Nesta seção, apresentam-se alguns desses métodos utilizados.

#### 2.3.1.1 Sincronismo

O transdutor de sincronismo, apresentado esquematicamente na figura 2.5, é composto por uma bobina e um ímã. A bobina é presa no corpo do compressor enquanto o ímã é fixado no pistão de forma que passe muito próximo à bobina uma vez por ciclo (EMBRACO, 2002).

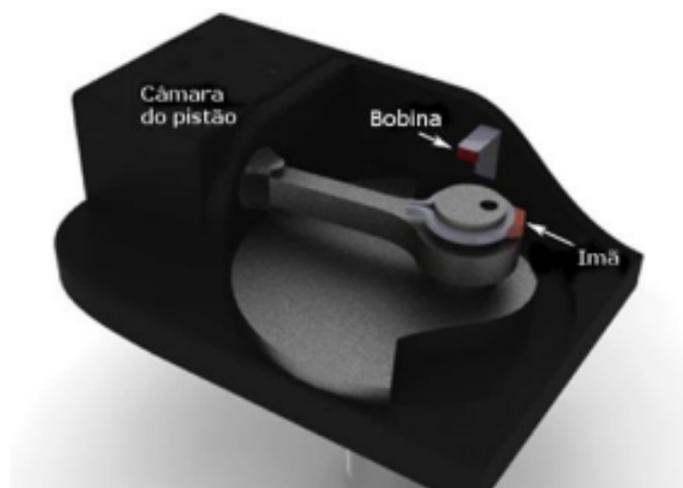


Figura 2.5: Transdutor de sincronismo instalado em um compressor alternativo (DEMAY, M. B., 2008)

Durante o funcionamento do motor, o ímã passará pela bobina a cada ciclo. Na passagem do ímã, existe uma variação do fluxo magnético no interior da bobina. Segundo a lei de Faraday, quando o fluxo magnético interno a uma espira varia, uma força eletromotriz é induzida nessa espira. Essa força eletromotriz aparece na forma de uma diferença de potencial entre os terminais da bobina (HALLIDAY, D.; RESNICK, R.; WALKER, J., 2007).

A figura 2.6 apresenta o sinal gerado, após passar por uma unidade de tratamento de sinais.

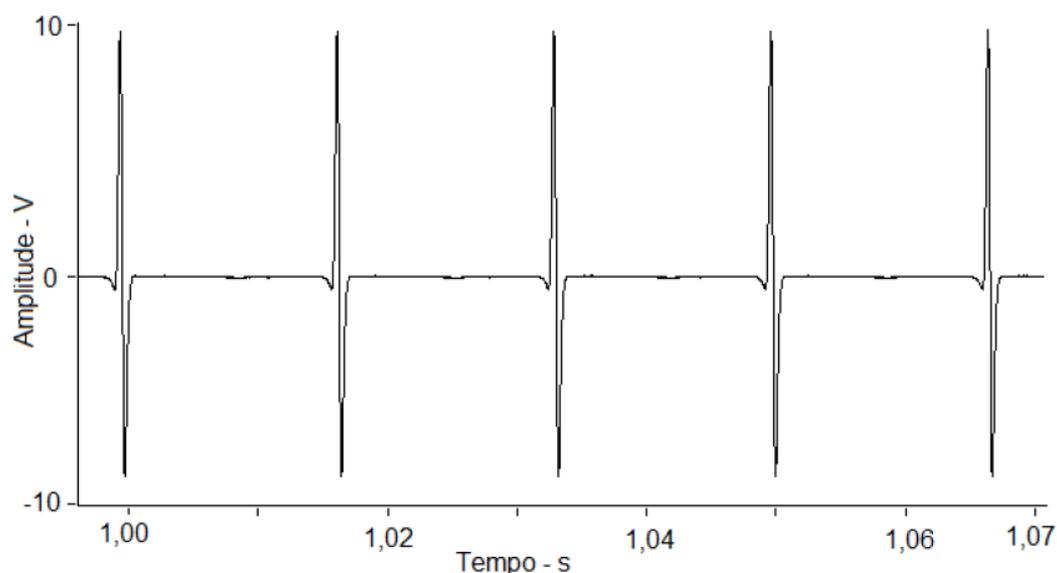


Figura 2.6: Transdutor de sincronismo instalado em um compressor alternativo (DEMAY, M. B., 2008)

Através desse método, somente se mede o instante em que o pistão encontra-se no ponto onde foi fixado o ímã e, a partir dessa informação, é possível estimar a frequência rotacional. Portanto, através desse método não é possível medir a frequência rotacional instantânea. Outra desvantagem desse método é a necessidade de trocar o eixo para instalar esse transdutor, uma vez que é preciso compensar a massa do ímã.

### 2.3.1.2 LVIT

O LVIT (*Linear Variable Inductance Transducer*, transdutor linear de indutância variável), apresentado na figura 2.7, é um dos transdutores utilizados para estimar a frequência rotacional de compressores herméticos em ensaios específicos realizados na indústria dos sistemas de refrigeração. Sendo um transdutor de deslocamento linear, é possível medir a frequência rotacional a partir do deslocamento. Esse transdutor é mais conhecido por seus nomes comerciais: FASTAR, do fabricante Sentech (SENTECH) ou FLDT (*Fast Linear Displacement Transducer* - transdutor rápido de deslocamento linear) do fabricante Omega Sunpower (OMEGA; SUNPOWER, 1990; REDLICH, R. W., 1987).

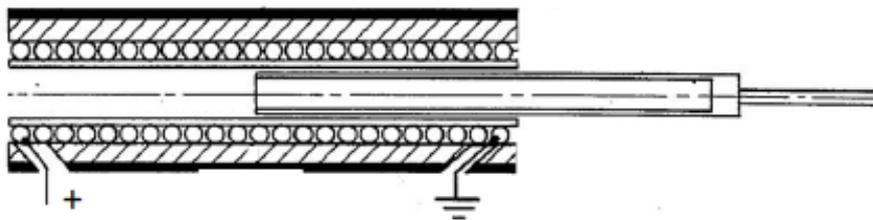


Figura 2.7: LVIT (REDLICH, R. W., 1987)

Transdutores do tipo LVIT são compostos por uma bobina e uma haste de material condutor, geralmente alumínio. O funcionamento desse tipo de transdutor é baseado no efeito pelicular, que faz com que o fluxo magnético fique confinado em uma fina camada na superfície externa do alumínio, em virtude da reduzida profundidade da penetração do campo magnético. O efeito é mais intenso em função da elevada frequência de alimentação da bobina, da baixa permeabilidade magnética e da elevada condutibilidade elétrica da haste de alumínio (REDLICH, R. W., 1987; DEMAY, M. B., 2015).

A haste é presa ao pistão do motor de modo que se desloque conforme a posição do pistão, entrando ou saindo da bobina. A inserção da haste faz com que o fluxo magnético diminua consideravelmente na região por ela influenciada. Desse modo, o fluxo magnético da bobina como um todo varia conforme a posição da haste, o que faz com que a indutância da bobina também sofra alteração (OMEGA; SHEVGAONKAR, R. K. , 2005).

A bobina é alimentada por altas frequências, geralmente entre (50 e 250) KHz. Dessa forma, a variação da indutância fica mais perceptível. Além de serem utilizados para a alimentação, os terminais da bobina também são utilizados para a medição (REDLICH, R. W., 1987; SUNPOWER, 1990).

O LVIT apresenta excelente linearidade e sensibilidade. Por aspectos construtivos é pouco sensível a variações da temperatura ambiente; atinge elevadas frequências de operação; e pode ser empregado em ambientes impregnados de óleo (REDLICH, R. W., 1987; SUNPOWER, 1990). Essas características apresentadas tornam o LVIT próprio para a utilização em compressores herméticos alternativos. Apesar disso, vale ressaltar que o LVIT continua não sendo ideal para aplicações de controle de qualidade, uma vez que a instalação torna o ensaio destrutivo (DEMAY, M. B., 2015).

### 2.3.2 Medição Indireta

Na seção 2.3.1, foram apresentados transdutores para a medição direta da frequência rotacional. Entretanto, para utilizar esses transdutores seria necessário a abrir a carcaça do compressor, que pelo fato de ser fechado através de solda torna a tarefa de complexidade considerável. Além disso, empregar transdutores acoplados ao eixo do motor exigiria na abertura do compressor, o que contraria os objetivos deste trabalho (DEMAY, M. B., 2008).

Existem métodos de medição indireta da frequência rotacional para compressores herméticos alternativos. Alguns desses métodos, pertinentes ao problema, são apresentados nesta seção.

### 2.3.2.1 Sinais de pressão

Como visto na seção 2.2, a pressão no interior do cilindro tem um comportamento cíclico, ou pulsado, variando entre as etapas de compressão e sucção. Deste modo, é esperada variação na pressão do interior do cilindro com um comportamento semelhante à movimentação do pistão. Essa variação na pressão interna reflete-se diretamente em variações nas pressões de sucção e de descarga.

A figura 2.8 apresenta, como exemplo, o sinal obtido através de um transmissor de pressão instalado na descarga do compressor. Percebe-se que os pontos de máximo e mínimo estão relacionados ao curso máximo e mínimo do pistão no ciclo de compressão, o que está relacionado com a frequência rotacional (HUBACHER, B., GROLL, E. A., 2002).

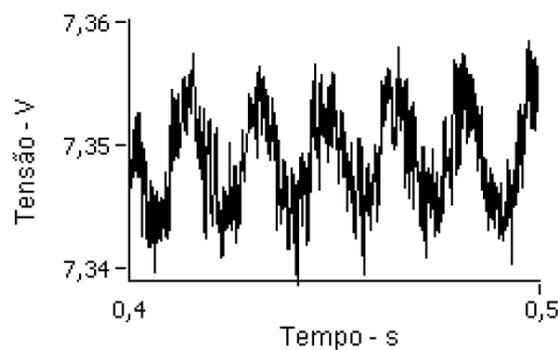


Figura 2.8: Sinal de saída de um transmissor usado para medir a pressão de descarga do compressor (DEMAY, M. B., 2008)

A figura 2.9 apresenta a relação direta entre a frequência do sinal de pressão de descarga e o de frequência rotacional. Percebe-se que, no exemplo, a frequência é de aproximadamente 59 Hz, ligeiramente inferior à frequência de excitação do motor, que nesse caso foi de 60 Hz. A frequência rotacional será sempre menor que a frequência de alimentação devido ao escorregamento.

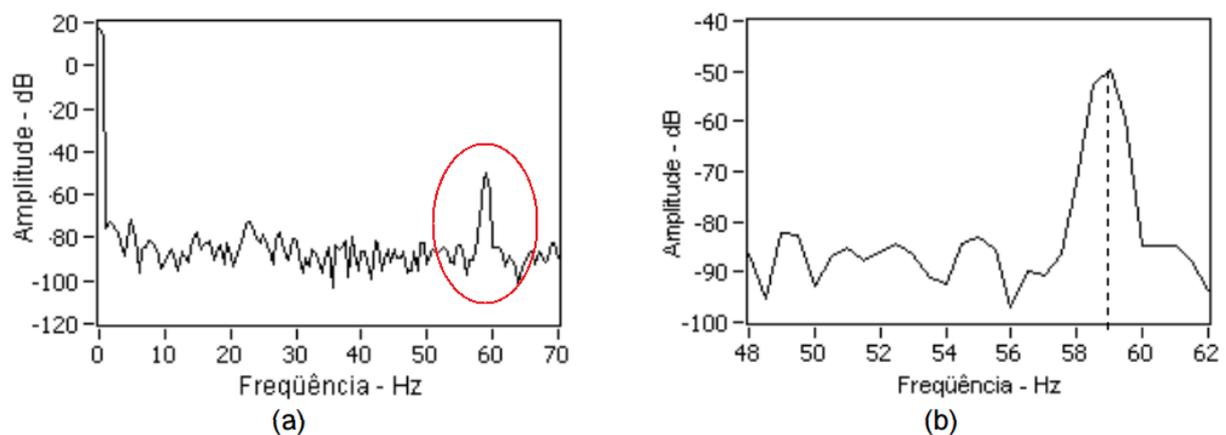


Figura 2.9: Análise em frequência do sinal de pressão de descarga alimentado a 60 Hz (a). Em visão ampliada (b) (DEMAY, M. B., 2008)

Assim, pode-se concluir que é possível medir a frequência rotacional a partir dos sinais de pressão de descarga e de sucção. É um método bastante simples e de fácil aplicação, uma vez que a medição é de fácil acesso e largamente utilizada pela indústria de refrigeração (DEMAY, M. B., 2008).

Vale ressaltar que para o método ser aplicado é necessário um período de aquisição longo, para que se tenha uma boa resolução em frequência. O transdutor utilizado deve ter boa resolução, pois a variação é pequena em termos absolutos. Além disso, o comportamento dinâmico do transdutor deve ser capaz de perceber variações dentro da faixa esperada para a frequência rotacional. Em muitos casos, a frequência rotacional pode estar próxima à frequência da rede. Deve-se portanto, ter cuidado para que as interferências da rede elétrica sejam mínimas, caso contrário pode-se confundir com a frequência rotacional.

### 2.3.2.2 Sinal da vibração da carcaça do compressor

Outro sinal passível de medição é a vibração da carcaça do compressor. A variação de pressão no interior do cilindro e o fluxo de gás do sistema de descarga de compressores geram vibrações, principalmente no bloco do compressor. Esses fenômenos se transmitem mecanicamente à carcaça através das molas e do tubo de descarga, e acusticamente através das pulsações do sistema de sucção (RODRIGUES, R. S., 2003).

Para a medição da vibração, existe a necessidade de acoplar um acelerômetro à carcaça do compressor, o que o torna altamente sujeito a perturbações do meio externo. Outro problema encontrado é que o sistema mecânico que suporta o compressor é produzido de forma a atenuar vibrações, portanto espera-se uma amplitude pequena do sinal na faixa de interesse. Portanto, a medição da frequência rotacional através do sinal de vibração apresenta dificuldades à implementação (DEMAY, M. B., 2008).

A figura 2.10 apresenta, como exemplo, a análise em frequência de um sinal de vibração na carcaça. Em destaque, o componente relativo à frequência rotacional, em aproximadamente 59 Hz.

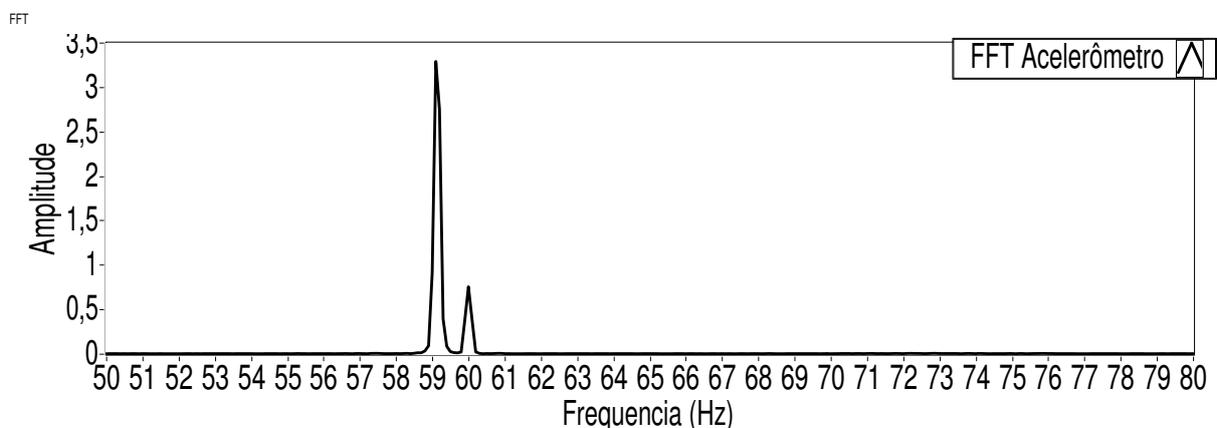


Figura 2.10: Análise em frequência do sinal de vibração da carcaça

### 2.3.2.3 Sinal da Corrente de alimentação

Para o sinal da corrente de alimentação, a maior componente na frequência seria em 60 Hz, uma vez que se utiliza a rede elétrica para isso. Porém, no sinal da corrente consumida pelo compressor existem outras componentes associadas a ranhuras do motor e à excentricidade do rotor em relação ao estator (HURST, K. D.; HABLETER, T. G.; GRIVA, G.; PROFUMO, F., 1994).

A localização das componentes de excentricidade no espectro de frequências é função da frequência rotacional e localiza-se simetricamente à componente associada à frequência de alimentação do compressor, como apresentado na equação (2.1) (HURST, K. D.; HABLETER, T. G.; GRIVA, G.; PROFUMO, F., 1994).

$$f_{exc} = f_s \left( 1 \pm m \left[ \frac{1-s}{p} \right] \right) \quad (2.1)$$

Onde,

- $f_{exc}$  : frequência associada à excentricidade;
- $f_s$  : frequência de alimentação;
- $m$  : número natural não nulo;
- $p$  : número de pares de polos;
- $s$  : escorregamento.

Assim, é possível encontrar o valor da frequência rotacional a partir da frequência de excentricidade. Sabendo que o valor fica próximo da maior componente, 60 Hz referente à frequência de alimentação, é impossível identificá-la na primeira harmônica. Entretanto, como a alimentação do compressor apresenta simetria de meia onda, não possui harmônicas pares, tornando possível a identificação da frequência de excentricidade em torno dos 120 Hz.

A figura 2.11 apresenta, como exemplo, a análise na frequência de um sinal de corrente para uma frequência rotacional de aproximadamente 59,75 Hz. Percebe-se que a componente em 60 Hz encobre a de excentricidade, porém ela é visível no detalhe na segunda harmônica.

Com isso, é possível dizer que determinar a frequência rotacional através do sinal de corrente também é possível. Vale ressaltar que tal método apresenta maiores complicações quando utilizados em compressores acionados por inversores de frequência, uma vez que os terminais de alimentação não são tão facilmente acessíveis. O método de medição indireta da frequência rotacional através da corrente de alimentação não será utilizado para compressores de capacidade variável neste trabalho (SCHWARZ, N.G., 2001).

## 2.4 Acelerômetros piezoelétricos

Existem diversos modelos de acelerômetros que se baseiam na medição do deslocamento de uma massa dentro do acelerômetro como forma de medir a aceleração. Para isso, utilizam-se os mais variados princípios de medição, como potenciômetros resistivos, variação da indutância, efeito Hall, piezorresistivo, capacitivo e fibra óptica (BENTLEY, J. P., 2005).

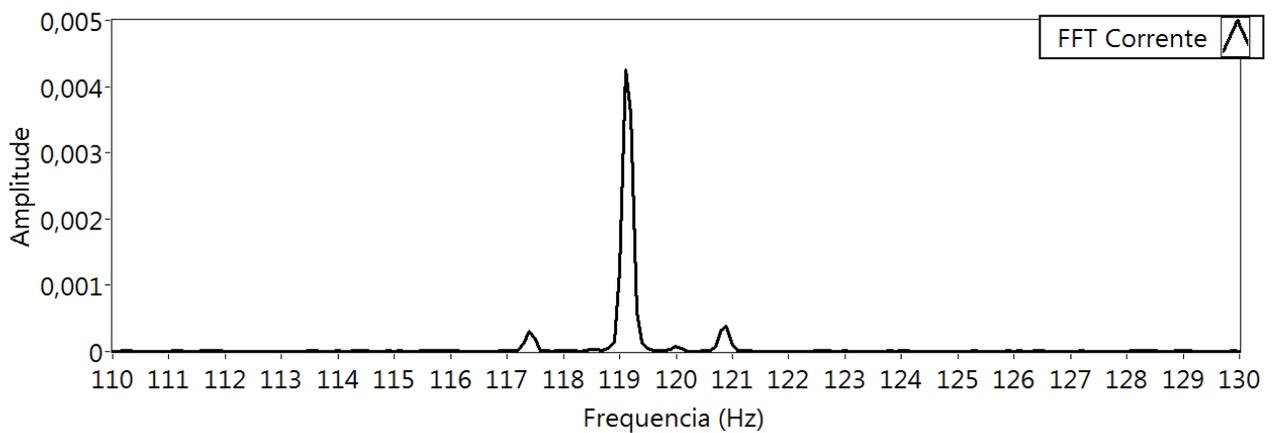
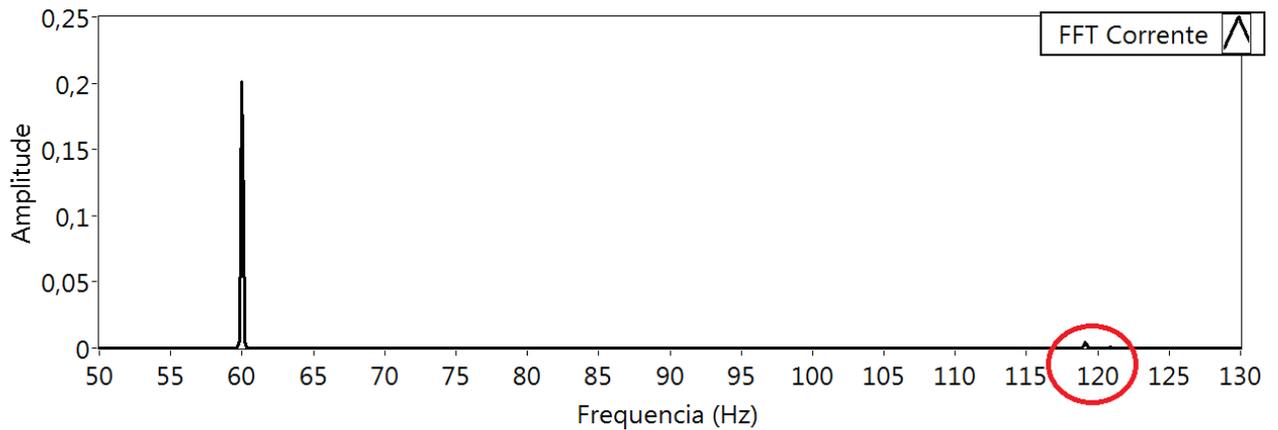


Figura 2.11: Análise em frequência do sinal de corrente

O modelo mais utilizado de acelerômetro é o de cristal piezoelétrico, apresentado na figura 2.12. Os cristais piezoelétricos são capazes de gerar uma saída elétrica proporcional à força aplicada. O próprio cristal funciona como um sistema massa-mola, o que possibilita a confecção de transdutores com massa e dimensões reduzidas (PICCOLI, H. C., 2000).

O princípio de funcionamento desse tipo de transdutor baseia-se no fenômeno da piezoelectricidade, que é a capacidade de alguns materiais de gerarem uma carga elétrica quando submetidos a tensão mecânica. Dessa forma, quando o acelerômetro é submetido a uma aceleração, uma força é gerada e, através do fenômeno da piezoelectricidade, ocorre uma variação da carga, como descrito na equação (2.2). A figura 2.13 apresenta o fenômeno piezoelétrico (PIEZO INSTITUTE, 2013).

$$q = \alpha F \quad (2.2)$$

Onde,

- $q$  : carga induzida ;
- $\alpha$  : constante piezoelétrica;
- $F$  : força aplicada.

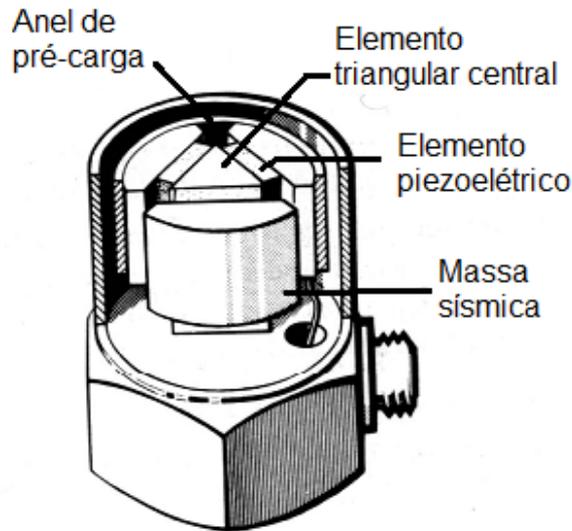


Figura 2.12: Acelerômetro piezoelétrico (PICCOLI, H. C., 2000)

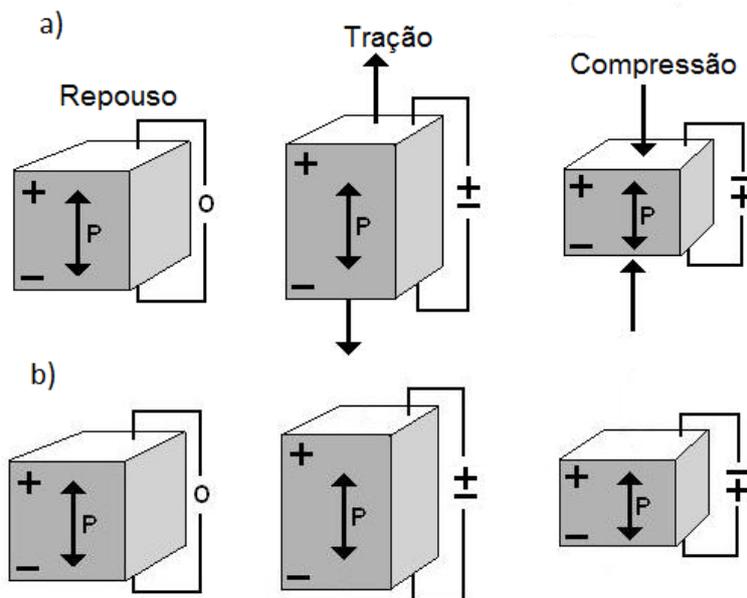


Figura 2.13: Fenômeno da piezoelectricidade quando submetido a tensão mecânica (a) e a carga elétrica (b) (RIELLA, H. L., 2010)

## 2.5 Transdutores de pressão extensométricos

O princípio físico mais utilizado para converter pressão em um sinal elétrico é a alteração de resistência elétrica. Para tanto, o elemento bastante empregado é o extensômetro. O extensômetro é colado a um elemento elástico, normalmente um diafragma, sobre o qual a pressão é aplicada. O diafragma funciona como uma interface entre a pressão aplicada e a pressão de referência e se deforma conforme a diferença entre elas, como mostra a figura 2.14 (EATON, W. P.; SMITH, J. H., 1997).



Figura 2.14: Diagrama típico do diafragma de um transdutor de pressão (EATON, W. P.; SMITH, J. H., 1997)

A deformação do diafragma, transmitida ao extensômetro, leva a uma variação da resistência desse, que é proporcional à deformação, como ilustrado na figura 2.15 (DOEBELIN, E. O., 1990; FIGLIOLA, R. S.; BEASLEY, D. E., 2000).

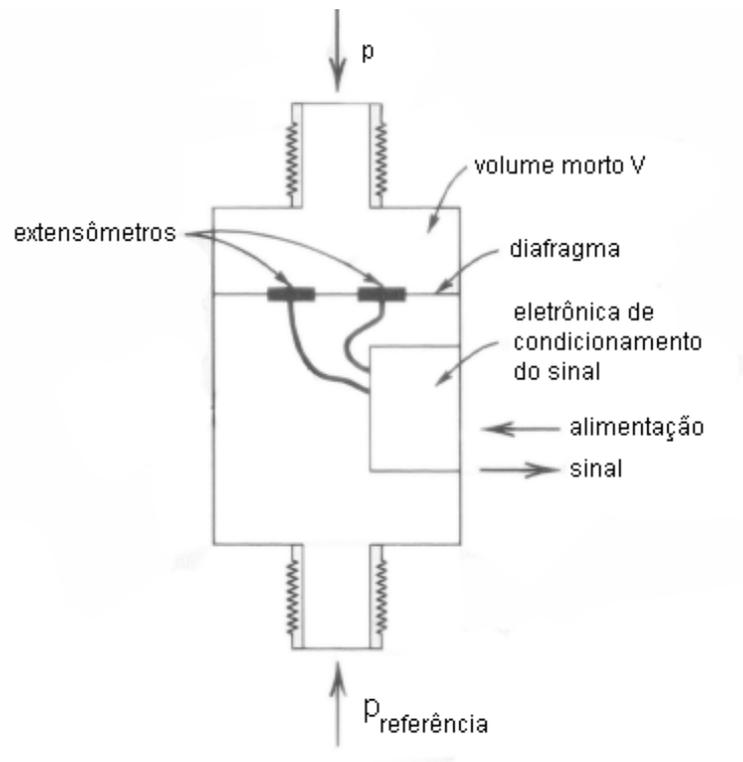


Figura 2.15: Diagrama de um transdutor de pressão com diafragma (FIGLIOLA, R. S.; BEASLEY, D. E., 2000)

A variação da resistência elétrica é relativamente linear para uma larga faixa de valores de deformação. A variação de resistência do extensômetro, por sua vez, tipicamente é convertida em uma variação de tensão, através de circuitos de ponte de Wheatstone, estrutura amplamente conhecida para a medição de resistência, como mostra a figura 2.16 (BENTLEY, J. P., 2005).

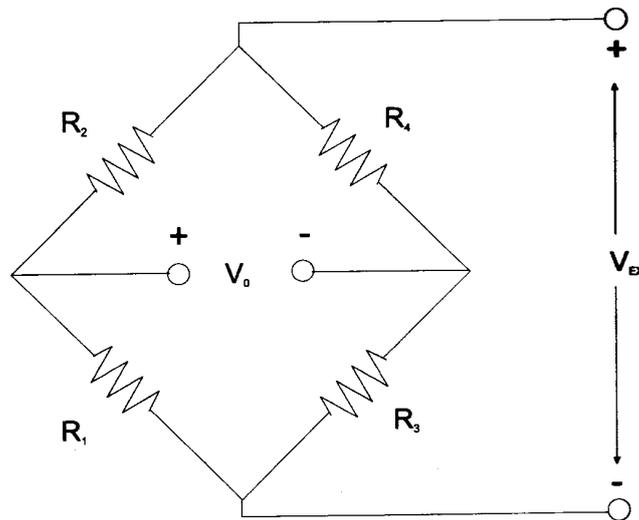


Figura 2.16: Ponte de Wheatstone. Adaptado de BENTLEY, J. P. (2005)

O circuito de ponte deve ser alimentado em duas extremidades opostas. Essa alimentação, em muitos casos, é realizada com tensão alternada, de maneira a minimizar efeitos termoelétricos dos cabos de conexão. Essa funcionalidade, porém, não pode ser utilizada em medições de alta frequência. Nesses casos é inevitável a alimentação com tensão contínua (HOFFMANN, K., 1989).

A tecnologia de semicondutores também vem sendo utilizada no desenvolvimento de transdutores de pressão, chamados de transdutores piezorresistivos. O efeito piezorresistivo consiste na mudança da resistência elétrica de um material quando aplicada uma deformação, efeito similar ao apresentado pelos extensômetros convencionais. Devido a sua facilidade de fabricação, esse tipo de transdutor vêm substituindo os extensômetros. Além disso, os piezorresistivos necessitam de um menor espaço para as mesmas especificações metrológicas. Nesses transdutores utiliza-se, tipicamente, uma membrana flexível de silício, cumprindo a função dos diafragmas convencionais. Os piezorresistores, normalmente também de silício, são integrados à membrana, distribuídos nas áreas de maior flexão da mesma. A pressão aplicada à membrana gera uma deflexão da mesma. Por estarem acoplados à membrana, esta deflexão gera uma alteração da resistência dos piezorresistores, proporcional à da pressão aplicada, assim como ocorre nos transdutores que utilizam os extensômetros metálicos (GAO, R.; ZHANG, L., 1989).

## **2.6 Considerações sobre o capítulo**

A partir do estudo desenvolvido nesse capítulo, foi possível concluir que a literatura apresenta e explora experimentalmente alguns métodos para medição de frequência rotacional em compressores herméticos alternativos, o foco deste trabalho. Em todos os materiais encontrados, esses métodos são avaliados em bancadas específicas, não tendo sido localizado material que avalie o desempenho dos métodos em circuitos de refrigeração reais. Em relação aos métodos estudados, observa-se a necessidade de um condicionamento bastante refinado dos sinais medidos e de medição de ao menos uma das seguintes grandezas: pressão de descarga, pressão de sucção, vibração na carcaça e corrente. Como forma de entender os princípios de medição para essas grandezas, foram também estudados neste capítulo os principais métodos empregados na atualidade para medição de pressão e vibração.

# Capítulo 3

## Arquitetura de Aquisição de Sinais

Este capítulo tem por objetivo apresentar o sistema concebido para este trabalho.

Primeiramente, na seção 3.1, será exibido uma visão geral do sistema. Posteriormente, na seção 3.2, serão apresentados as grandezas a medir, os transdutores utilizados e a justificativa para a escolha desses transdutores. Por fim, na seção 3.3 será descrito o sistema de aquisição utilizado.

### 3.1 Visão Geral do Sistema

Para validar os métodos de medição de frequência rotacional em sistemas de refrigeração, é necessário que seu desempenho seja avaliado em condições reais. É importante que se repitam os ensaios em diferentes sistemas, nas mesmas condições. Para isso, utilizaram-se três refrigeradores diferentes, apresentados no quadro 3.1.

Quadro 3.1: Relação dos refrigeradores utilizados

Refrigerador	Fluido Refrigerante	Tipo de Compressor
A	R134a	Convencional
B	R600a	Convencional
C	R600a	VCC

A principal diferença entre o Refrigerador A e o Refrigerador B é o fluido refrigerante utilizado. Nos refrigeradores que operam com fluido refrigerante R600a, as pressões de sucção e descarga são mais baixas em relação aos que operam com R134a. O que diferencia o Refrigerador C dos anteriores é que ele opera com compressor de capacidade variável (VCC). Esse tipo de compressor opera com um inversor de frequência, que é capaz de variar sua frequência rotacional. Na partida ele acelera suavemente, e opera a frequências rotacionais mais baixas se o sistema não exigir uma potência maior (SCHWARZ, N.G., 2001).

A figura 3.1 apresenta o esquema geral de instrumentação. As variáveis do sistema são medidas através de transdutores, que traduzem as grandezas medidas em sinais elétricos. Existe a necessidade de um sistema de aquisição para transformar esses sinais em dados que são enviados e armazenados pelo computador. O mesmo sistema de aquisição e computador são utilizados para os diversos refrigeradores.

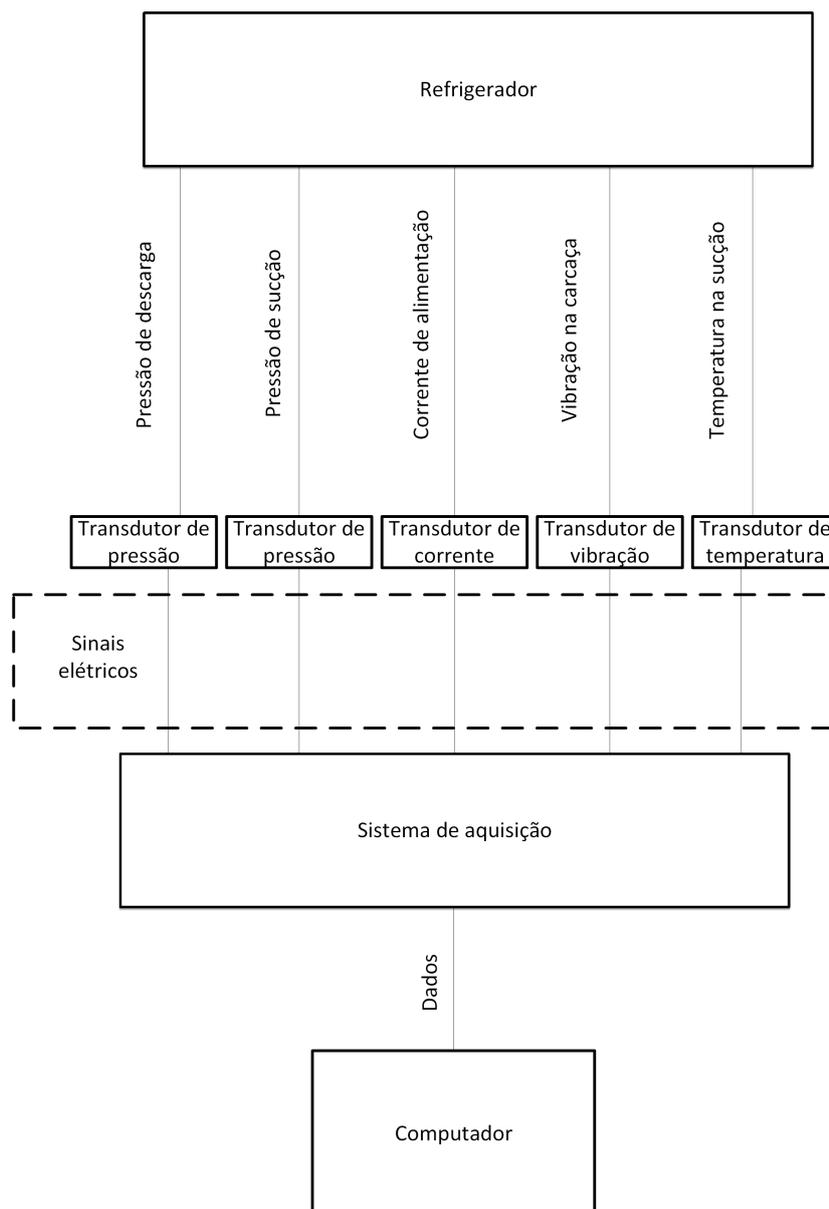


Figura 3.1: Esquema geral de instrumentação

## 3.2 Grandezas a medir

Como visto no capítulo 2, a fim de medir indiretamente a frequência rotacional, é preciso medir diretamente outras variáveis. Por isso, para a concepção do sistema, é necessária a medição da pressão de descarga, da vibração na carcaça do compressor ou da corrente de alimentação. Como forma de permitir a comparação entre os diferentes métodos, neste trabalho optou-se por medir todas as grandezas simultaneamente.

Para monitorar o sistema, é preciso medir outras variáveis relacionadas ao processo de refrigeração. Assim, faz-se necessário medir também a pressão de sucção e a temperatura do fluido refrigerante na entrada do compressor.

Por fim, ainda é necessário medir a frequência rotacional de maneira direta, interferindo o

mínimo possível no funcionamento do compressor.

### 3.2.1 Pressão de Descarga

Como visto no capítulo 2, existe uma componente relacionada à frequência rotacional no sinal da pressão de descarga. Sabendo que essa componente possui baixa amplitude se comparada às demais componentes, faz-se necessário um transdutor que seja capaz de perceber essas variações.

Para a sua medição, escolheu-se o PDCR4070, da fabricante GE. Seu intervalo de medição, (0 a 20) bar, está dentro do intervalo para a pressão de descarga durante os ensaios. Seu erro é de  $\pm 0,04\%$  do valor de escala máxima, ou seja, no máximo 8 mbar. o que é o suficiente para se perceber a pulsação de pressão relacionada à frequência rotacional, uma vez que se espera variações na faixa de 50 mbar (GE, 2008).

A saída desse transdutor é em tensão, entre (0 e 100) mV . Apesar de adequado para o sistema, a tensão de saída é baixa. Para o sinal ser menos suscetível a ruídos e para aproveitar melhor a resolução da placa de aquisição, fez-se necessário um tratamento analógico desse sinal.

A fim de realizar este tratamento, utilizou-se um amplificador de instrumentação, o INA110. Esse componente foi escolhido, pois possui uma frequência de corte de 100 kHz, alta o suficiente para a aplicação (TEXAS INSTRUMENTS, 2005).

A figura 3.2 apresenta o circuito utilizado para a amplificação do sinal de saída do transdutor. O circuito é simples, o sinal de saída do transdutor é aplicado na entrada do INA110. Na saída do INA110 têm-se o sinal amplificado. Ambos os componentes são alimentados por fontes externas.

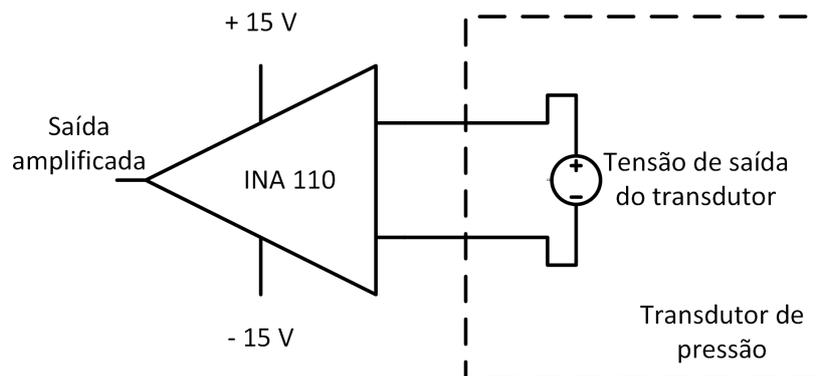


Figura 3.2: Circuito amplificador do sinal de saída do transdutor

### 3.2.2 Vibração

Para a medição da vibração da carcaça do compressor, foi instalado um acelerômetro acoplado por uma base magnética. O intervalo de medição do transdutor deveria compreender a frequência esperada para a frequência rotacional.

Escolheu-se o Brüel & Kjær modelo 8301. Esse transdutor possui uma sensibilidade de  $(10 \pm 0,2)\text{mV/g}$ , ou  $(1,04 \pm 0,21) \text{ mVs}^2/\text{m}$  no SI. Utilizado em conjunto com o amplificador de carga Brüel & Kjær modelo 2635 é capaz de atender aos requisitos do projeto (BRÜEL & KJÆR, 1971).

Este amplificador de carga possui um filtro passa alta ajustável, para reduzir efeitos de temperatura. Outro filtro disponível é um passa baixa, com frequência de corte também ajustável. Com um ganho ajustável, o Brüel & Kjær modelo 2635 atinge as necessidades do tratamento analógico para o sinal de vibração (BRÜEL & KJÆR).

### **3.2.3 Corrente**

Para a medição da frequência rotacional através da corrente de alimentação do compressor são utilizados dois transdutores. A medição ocorre em duas etapas, na primeira se induz uma corrente em uma outra bobina. Na corrente induzida, existe um resistor que deixa uma queda de tensão que pode ser lida pelo sistema de aquisição.

O primeiro transdutor é o LA 25-NP, da LEM, que funciona a partir do princípio de Lenz, com uma corrente induzida. Esse transdutor suporta na sua entrada correntes eficazes de até 25 A e opera com frequências de até 150 kHz. Na saída, os valores de corrente são de no máximo 25 mA eficaz (LEM, 2011).

O segundo transdutor é o USF 240, da Caddock. Ele é um resistor de  $(100 \pm 0,1) \Omega$  com baixa deriva térmica, 2 ppm/ $^{\circ}\text{C}$ . Esse transdutor trabalha em até 900 W, valor acima do necessário para este trabalho (CADDOCK, 2004).

Para o sinal de saída do shunt também é preciso haver uma amplificação. Utilizou-se, portanto, a mesma solução do transdutor de pressão, apresentada na seção 3.2.1.

### **3.2.4 Pressão de Sucção**

Para a medição de pressão de sucção não é necessário que ele perceba rápidas variações de pressão, uma vez que o objetivo dessa medição é o valor médio da pressão para determinar as condições de ensaio.

Por isso, o transdutor pôde ser instalado diretamente no passador de processo, pequeno duto de saída do compressor que se situa afastado da válvula de sucção. Desse modo, o transdutor fica menos suscetível à influência do ciclo de compressão. Dessa forma, o transdutor perceberia somente a pressão média, suficiente para a determinação da condição de ensaio, que é o objetivo da medição de sua instalação no circuito.

Escolheu-se o Wika S-10, que tem sua faixa de medição entre (0 e 10) bar, dentro da faixa esperada para a pressão de sucção de um sistema de refrigeração. Diferentemente dos transdutores anteriormente apresentados, este transdutor apresenta saída em corrente, no padrão (4 a 20) mA (WIKA, 2012).

### 3.2.5 Temperatura

Para medir a temperatura na entrada do compressor, escolheu-se um termorresistor do tipo Pt100. A fim de não interferir no sistema, o Pt100 foi preso à tubulação do sistema de refrigeração, próximo à entrada do compressor. Dessa forma, a tubulação funciona como um filtro para altas frequências. Se bem isolado do meio, em regime permanente equaliza com a temperatura do fluido no interior da tubulação. Ainda que dessa forma não seja possível obter uma boa medição em regime transitório, em regime permanente é possível atingir uma estimativa satisfatória do valor da temperatura na entrada do compressor, uma vez que sua instalação é somente para determinar a condição de ensaio.

### 3.2.6 Frequência Rotacional

A fim de obter um comparativo em relação aos métodos de medição indireta, é necessário um método de medição direta. O transdutor escolhido foi o LVIT, devido aos aspectos citados no capítulo 2.

O LVIT necessita de alimentação e tratamento do sinal. Para isso, se utilizou o condicionador de sinal SCDR150, da fabricante FASTAR. O condicionador de sinal é responsável pela alimentação do LVIT e o condicionamento de sinal obtido do LVIT. O SCDR150 obtém a medição do LVIT através da medição de A saída do condicionador de sinal pode ser fornecida em tensão, (0 a 10) V, ou em corrente, (4 a 20) mA. No interior do SCDR150 existem pinos que ajustam o ganho e o zero do sinal de saída. Esse ajuste foi feito para cada LVIT (SENTECH, 2009).

## 3.3 Placas de Aquisição

Com a intenção de adquirir os sinais dos transdutores, é necessário um sistema que converta o sinal analógico para digital, permitindo assim o armazenamento dos dados no computador para uma análise posterior. Para isso, era necessário haver um sistema de aquisição capaz de realizar a conversão analógico-digital dos sinais dos transdutores. Para a realização do trabalho, algumas placas de aquisição de sinais foram disponibilizadas. Todas as placas foram fabricadas pela National Instruments, fabricante que é referência em sistemas de aquisição. Esta seção apresenta cada placa utilizada e sua função no sistema.

Para a aquisição dos sinais descritos na seção anterior, foram empregadas placas de aquisição do fabricante National Instruments, referência em sistemas de aquisição de sinais. Tais placas foram conectadas a um modelo de *Compact DAQ*, que realiza a comunicação com o computador via USB. O modelo escolhido foi o NI cDAQ- 9174 (NI, 2013).

Todas as placas de aquisição utilizadas são capazes de adquirir dados a 100 KHz, que foi a frequência de amostragem escolhida. A janela de tempo escolhida para cada aquisição foi de 10 segundos, pois é possível utilizar para qualquer método utilizado por Demay(2015).

### 3.3.1 NI 9215

Com o propósito de comparar os diversos métodos de medição apresentados, é preciso adquirir os sinais simultaneamente. Por isso, para os sinais relacionados diretamente com a medição da frequência rotacional (pressão de descarga, vibração, corrente e do LVIT) foram adquiridos com a placa NI 9215. Essa placa foi escolhida, pois possui 4 entradas analógicas simultâneas. A NI 9215 é capaz de medir tensões entre (-10 e + 10) V com 16 bits de resolução e utiliza o método de aproximações sucessivas para realizar a conversão (NI, 2011).

### 3.3.2 NI 9201

Após adquirir os sinais diretamente relacionados à medição da frequência rotacional, ainda se fazia necessário adquirir o sinal de pressão de sucção. Para esse fim, foi escolhido a placa NI 9201. Essa placa possui 8 canais analógicos e 12 bits de resolução. Assim como a NI 9215, a NI 9201 também utiliza o método de aproximações sucessivas para realizar suas conversões. Seu intervalo de medição também fica entre (-10 e +10) V. Como o sinal que essa placa adquire tem requisitos menos restritos, a NI 9201 foi suficiente (NI, 2009a).

Uma vez que o transdutor de pressão de sucção tem sua saída em corrente e a placa escolhida sua entrada em tensão, foi necessário fazer uma conversão. Para isso, foi escolhido um resistor que convertesse a saída do transdutor aproveitando da melhor maneira possível o intervalo de medição da placa.

### 3.3.3 NI 9219

A National Instruments comercializa placas para a medição de temperatura utilizando o Pt100. A placa escolhida para este trabalho foi o NI 9219. Esse modelo possui 4 entradas analógicas, com resolução de 24 bits cada, através do método Delta-Sigma (NI, 2009b).

Foi utilizada a configuração a 4 fios. Essa configuração que a resistência dos fios não interfira na medição. A alimentação ocorre através de um par de fios e a medição através de outro. Nessa configuração, tem-se uma melhor medição do Pt100. A conexão entre o transdutor e a placa é apresentada na figura 3.3 (BENTLEY, J. P., 2005).

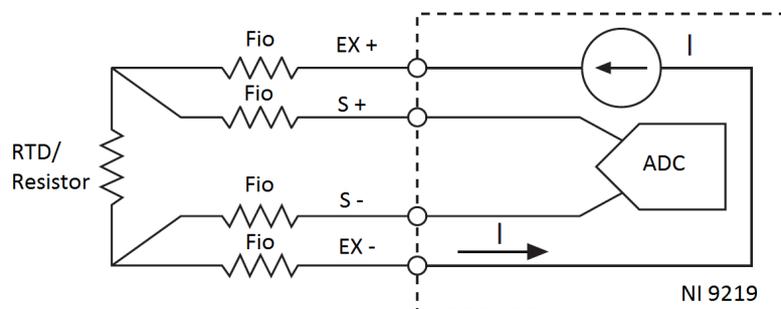


Figura 3.3: Medição a 4 fios utilizando o NI 9219 (NI, 2009b)

# Capítulo 4

## Análise Experimental

A fim de testar a concepção de instrumentação desenvolvida, foi necessário realizar alguns ensaios. A descrição, metodologia e resultados dos ensaios realizados serão apresentados neste capítulo.

### 4.1 Descrição dos Ensaios Realizados

Para testar as soluções apresentadas no capítulo anterior, foram realizados alguns ensaios. Os ensaios têm por objetivo medir as grandezas, na partida e em regime permanente, de cada um dos refrigeradores. Os ensaios foram repetidos algumas vezes a fim de fornecer mais credibilidade aos resultados.

Para garantir condições iniciais similares em cada ensaio, foi necessário esperar as pressões equalizarem. Por isso, entre cada ensaio havia um intervalo de 2 horas com o refrigerador desligado. Testes preliminares apontaram que este tempo é suficiente. A figura 4.1 apresenta um desses testes realizados no Refrigerador A.

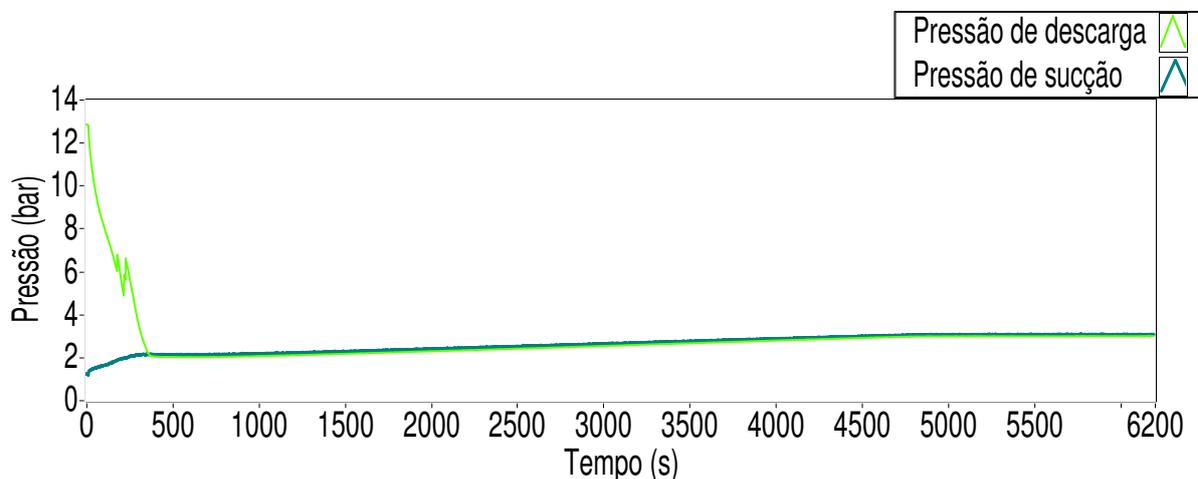


Figura 4.1: Pressões no desligamento do Refrigerador A

Percebe-se que as pressões se igualam em menos de 500 segundos. Após esse tempo, as pressões ainda variam por causa da temperatura do compressor e da tubulação do sistema.

A fim de padronizar os ensaios, utilizou-se um condicionador de ar convencional e estabeleceu-se a temperatura da sala em 26 °C. Antes de cada teste, o ar condicionado permanecia no mínimo 24 horas ligado. Apesar da temperatura com o ar condicionado variar em torno de 4 °C, essa variação não compromete o ensaio.

Alguns ensaios de partida foram realizados nos Refrigeradores A e B anteriormente, em câmara de aplicação. Eles foram realizados pela empresa parceira, porém não tinham o objetivo de estimar a frequência rotacional. A fim de tornar os ensaios deste trabalho mais próximos aos já realizados, estabeleceram-se os valores de pressão de descarga e sucção equalizados próximos aos valores nos ensaios realizados na câmara de aplicação.

Em cada ensaio, o refrigerador era ligado por 3 horas. Nos instantes iniciais são feitas três aquisições consecutivas. Cada intervalo de aquisição é de 10 segundos. O primeiro intervalo começa antes da partida do refrigerador, pois o instante da partida é de grande interesse, manteve-se uma margem de segurança de aproximadamente 2 segundos. Após as 3 primeiras aquisições, as outras seguintes são feitas a cada 30 minutos. Ao todo, em cada ensaio são realizadas 8 aquisições. Foram realizados 6 ensaios em cada refrigerador, a fim de obter uma boa reprodutibilidade.

## **4.2 Resultados dos Ensaios e Análise**

Todos os 18 ensaios foram realizados nas condições descritas na seção anterior. Nesta seção, será apresentado um ensaio para cada refrigerador. Os outros ensaios de cada refrigerador tiveram resultados parecidos com os apresentados.

Vale ressaltar que os ensaios apresentados para diferentes refrigeradores foram feitos em dias diferentes.

### **4.2.1 Refrigerador A**

#### **4.2.1.1 Partida**

A primeira aquisição feita no ensaio visava avaliar o comportamento do sistema no momento da partida do compressor, instante onde o compressor começa o seu funcionamento. Esse momento é importante, pois faz-se a avaliação do sistema em regime transitório.

O sinal obtido através da medição da corrente de alimentação do compressor na sua partida é apresentado na figura 4.2.

É possível perceber que o compressor parte no instante 2,4, quando começa a sua alimentação. A corrente em regime transitório é alta na partida do compressor. Aciona-se uma bobina auxiliar junto da principal, que fornece mais torque na partida do motor porém solicita mais corrente. Entre os instantes (2,4 e 2,6) s é possível perceber uma queda gradativa na corrente de alimentação, conforme vai estabilizando o sistema. A corrente se mantém constante entre os instantes (2,6 e 3,4) s. Em torno do instante 3,4 s ocorre uma queda brusca na corrente de alimentação. Essa queda brusca ocorre em virtude do desligamento da bobina auxiliar.

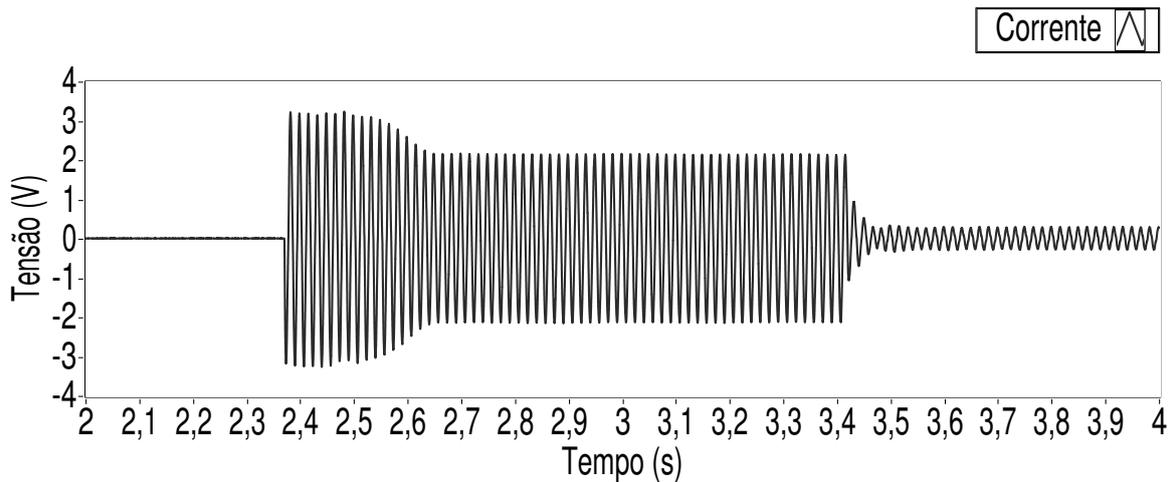


Figura 4.2: Sinal de corrente na partida do Refrigerador A

Observou-se uma subida brusca na pressão de descarga, como mostra a figura 4.3. Essa subida é esperada em qualquer sistema de refrigeração e é um indicativo de que o compressor está em funcionamento. É possível perceber que a pressão se comporta como um sistema de segunda ordem superamortecido, com dois pólos reais diferentes. A subida mais rápida nos primeiros 2 segundos e mais lenta posteriormente.

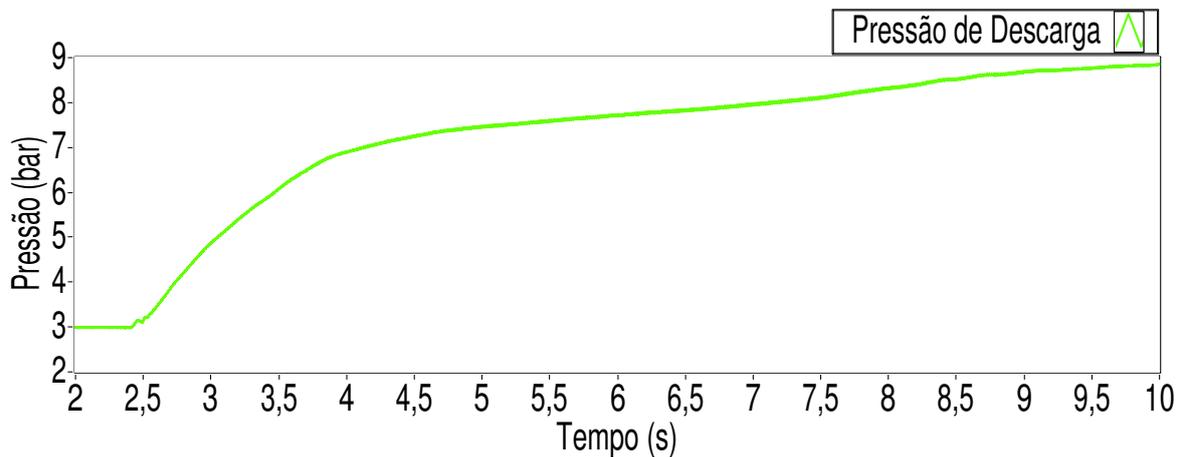


Figura 4.3: Sinal da pressão de descarga na partida do Refrigerador A

A figura 4.4 apresenta o sinal de vibração obtido na carcaça do compressor durante o ensaio apresentado. É possível observar que o sinal começa em aproximadamente 2,4 s, próximo ao instante que começa a corrente de alimentação.

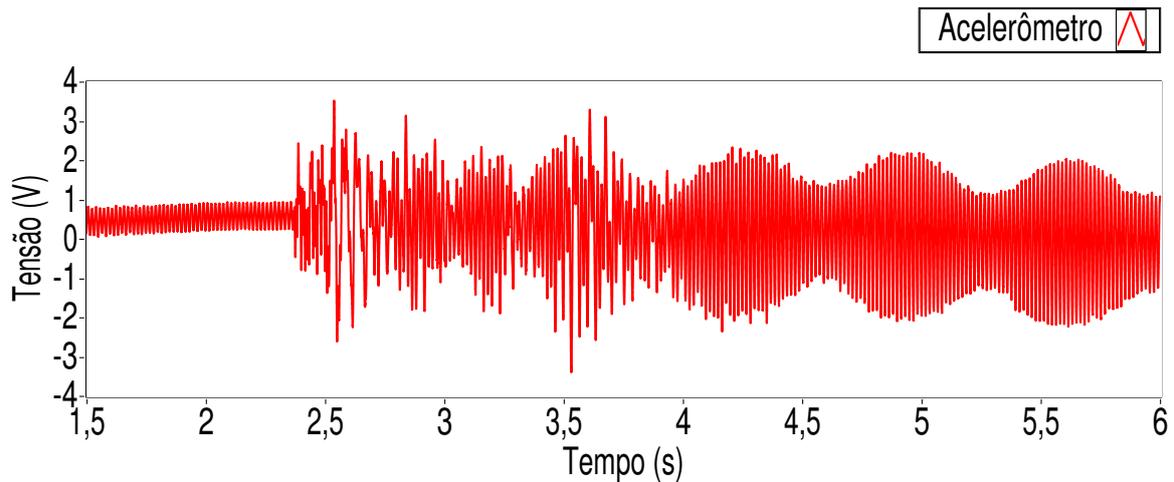


Figura 4.4: Sinal de vibração na partida do Refrigerador A

A figura 4.5 apresenta o sinal obtido através do LVIT na partida do compressor. Observa-se que o pistão se move mais lentamente no começo e acelera até chegar em uma velocidade constante.

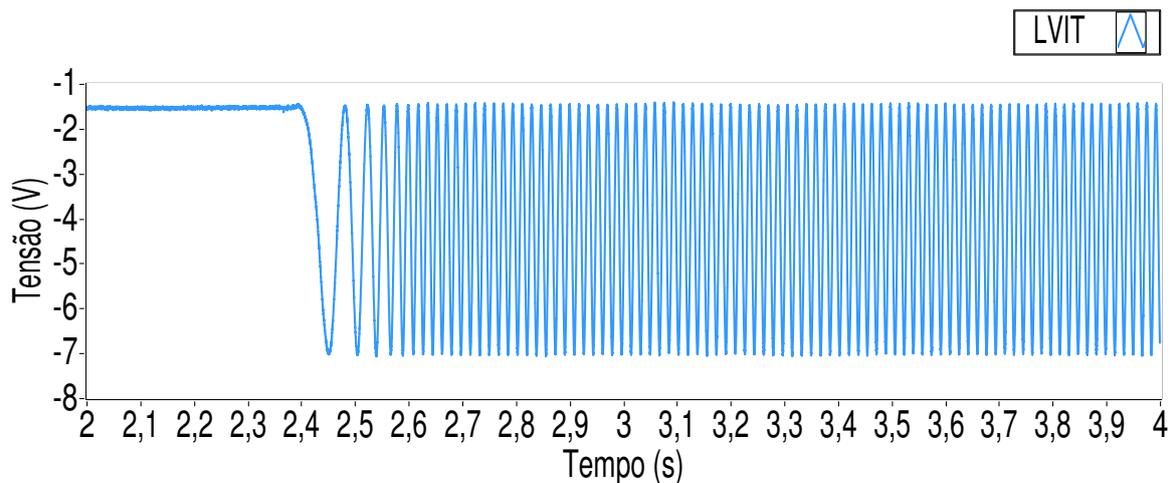


Figura 4.5: Sinal do LVIT na partida do Refrigerador A

Na figura 4.6 apresentam-se os sinais de pressão de descarga, corrente e LVIT na partida do Refrigerador A.

Observa-se que no primeiro momento o compressor parte, em torno do instante 2,4 s. Quando o motor parte o pistão começa a se movimentar lentamente. Com o pistão em movimento, após alguns ciclos, é possível perceber o aumento da pressão de descarga. Essa defasagem nos sinais é esperada, uma vez que primeiro o motor precisa ser energizado para começar o movimento e o pistão precisa estar em movimento para a pressão aumentar.

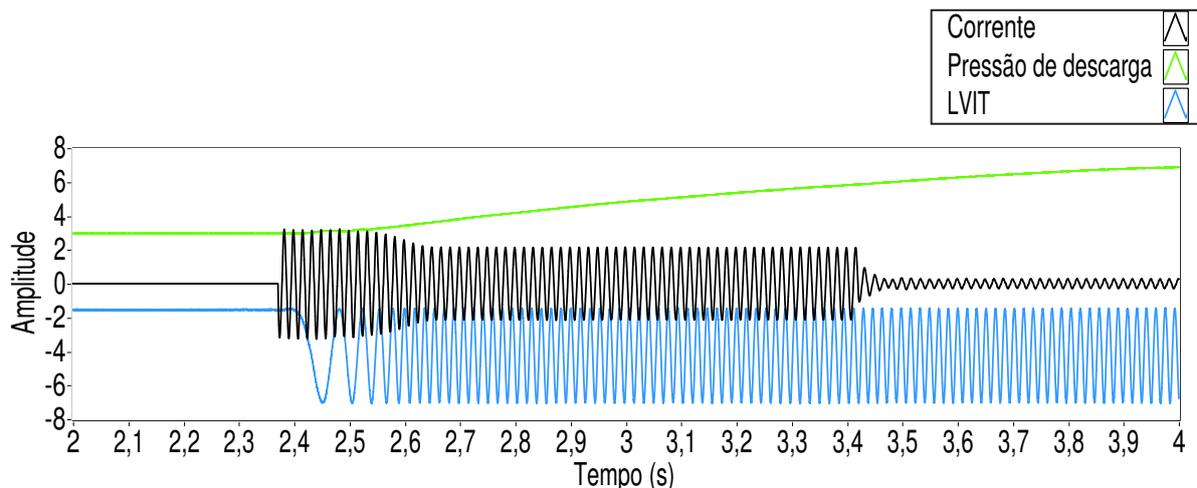


Figura 4.6: Sinais de pressão de descarga, corrente e LVIT na partida do Refrigerador A

#### 4.2.1.2 Regime Permanente

Para uma análise em frequência dos sinais obtidos no ensaio utilizando a transformada de Fourier é necessário que o sistema se encontre em regime permanente.

Análises de curvas características de outros sistemas de refrigeração apontam que em 30 minutos o sistema se encontra em regime permanente. Testes preliminares realizados pela empresa parceira confirmam que o tempo escolhido é suficiente para se considerar em regime permanente. Por isso, foi escolhida a aquisição feita 30 minutos após a partida do compressor, após as 3 primeiras aquisições.

A figura 4.7 apresenta a FFT do sinal da corrente de alimentação do compressor no Refrigerador A. A maior componente é de 60 Hz, pois é a frequência de alimentação do compressor. É possível observar também uma componente menor em torno de 120 Hz. Como explicado no Capítulo 2, através dessa componente é possível estimar a frequência rotacional. Através da equação 2.1, temos uma frequência rotacional de aproximadamente 59,5 Hz.

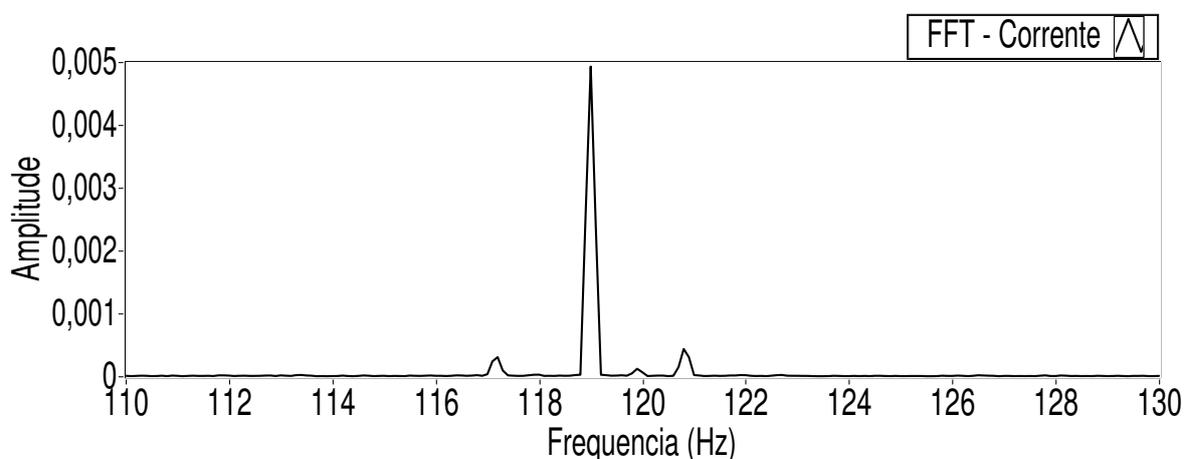


Figura 4.7: FFT do sinal da corrente de alimentação do compressor no Refrigerador A

Na figura 4.8 é apresentado o sinal da pressão de descarga 30 minutos após a partida do compressor. É possível perceber a periodicidade do sinal, devido à componente relacionada à frequência rotacional.

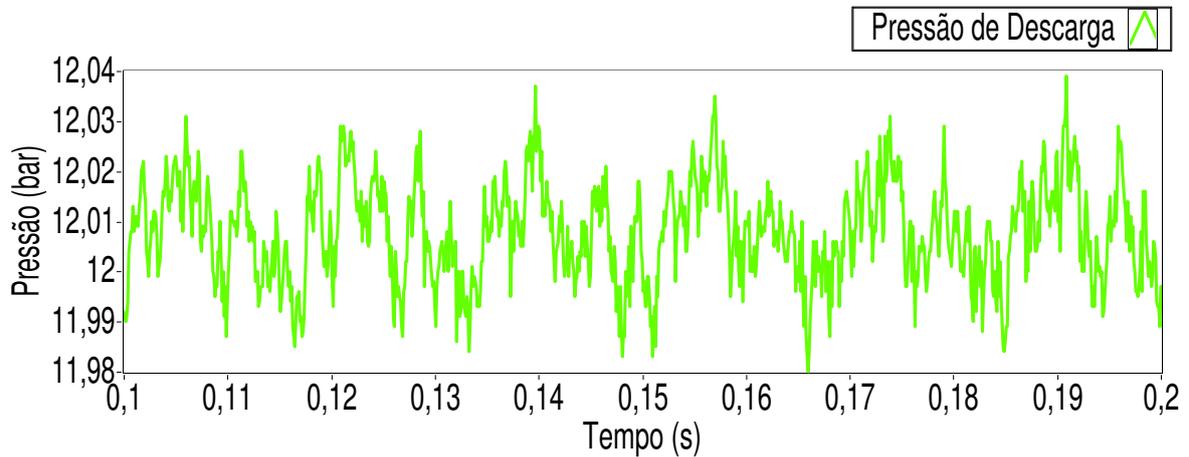


Figura 4.8: Sinal da pressão de descarga no Refrigerador A

A figura 4.9 apresenta a FFT do sinal da pressão de descarga do Refrigerador A na aquisição mencionada. A maior componente desse sinal é contínua; porém, na figura é apresentada apenas a componente referente à frequência rotacional, próxima aos 59 Hz.

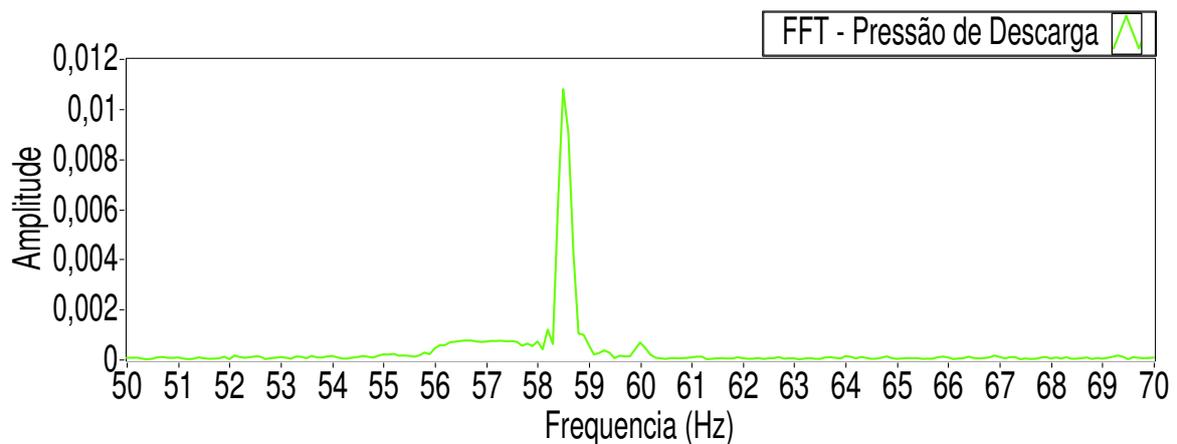


Figura 4.9: FFT do sinal da pressão de descarga do compressor no Refrigerador A

A figura 4.10 apresenta a FFT do sinal da vibração na carcaça do compressor do Refrigerador A. Em torno dos 60 Hz, percebe-se a componente relacionada à frequência rotacional. É possível observar que a componente também encontra-se próxima aos 59 Hz.

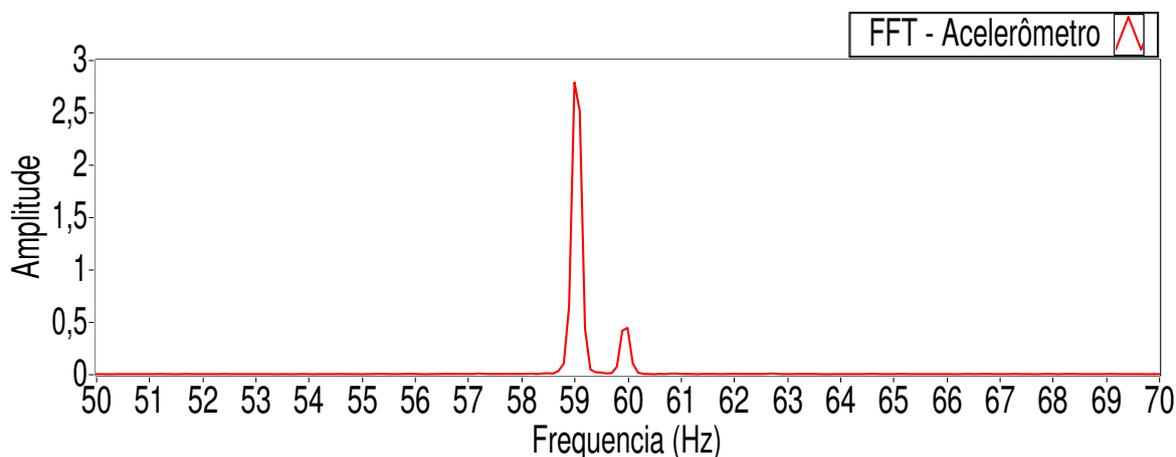


Figura 4.10: FFT do sinal da vibração na carcaçado compressor no Refrigerador A

A figura 4.11 apresenta a FFT do sinal do LVIT no refrigerador A.

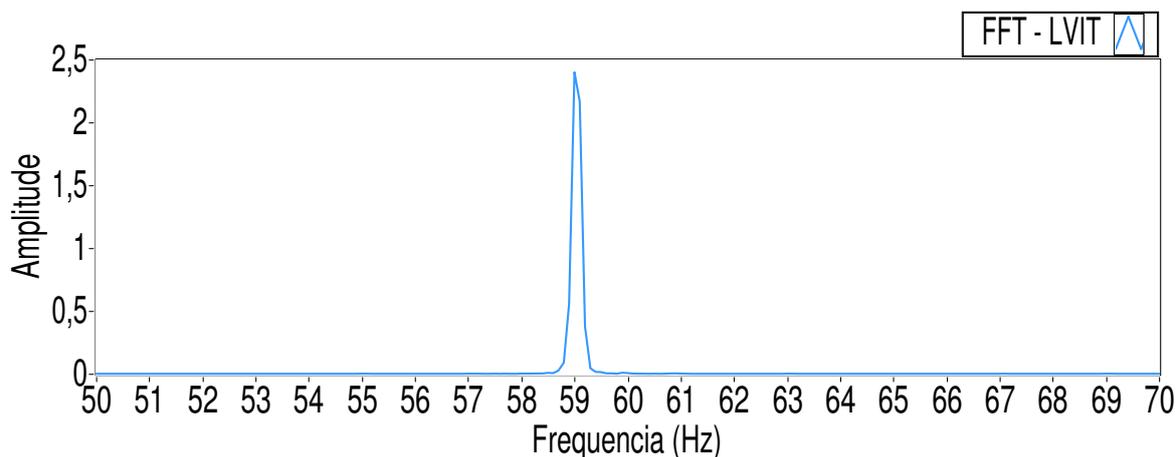


Figura 4.11: FFT do sinal do LVIT no Refrigerador A

Percebe-se que existe uma componente que também encontra-se em aproximadamente 59 Hz, próximo ao obtido através dos outros sinais.

## 4.2.2 Refrigerador B

### 4.2.2.1 Partida

Como feito com o Refrigerador A, a primeira aquisição buscava analisar o momento da partida do compressor. Nesta seção serão apresentados os sinais durante esse momento.

O sinal da corrente de alimentação do compressor do Refrigerador B pode ser visto na figura 4.12.

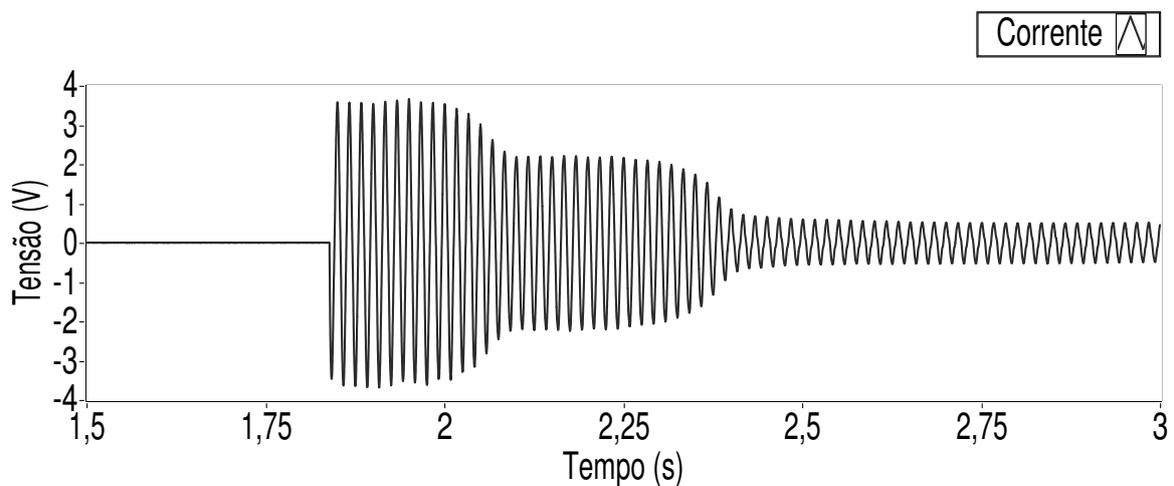


Figura 4.12: Sinal de corrente na partida do Refrigerador B

A figura 4.13 apresenta o sinal da pressão de descarga na partida do refrigerador B.

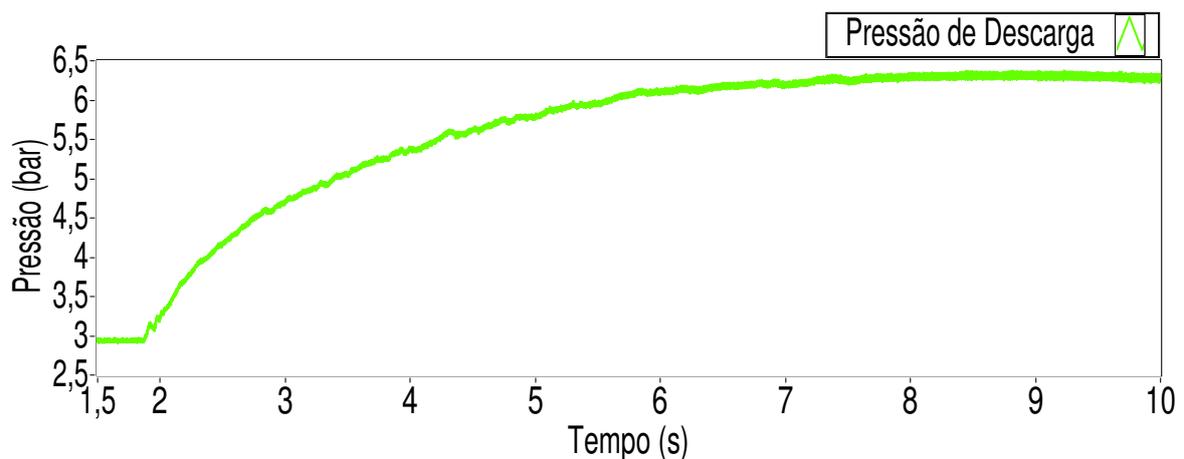


Figura 4.13: Sinal da pressão de descarga na partida do Refrigerador B

A figura 4.14 apresenta o sinal de vibração na carcaça do compressor do Refrigerador B.

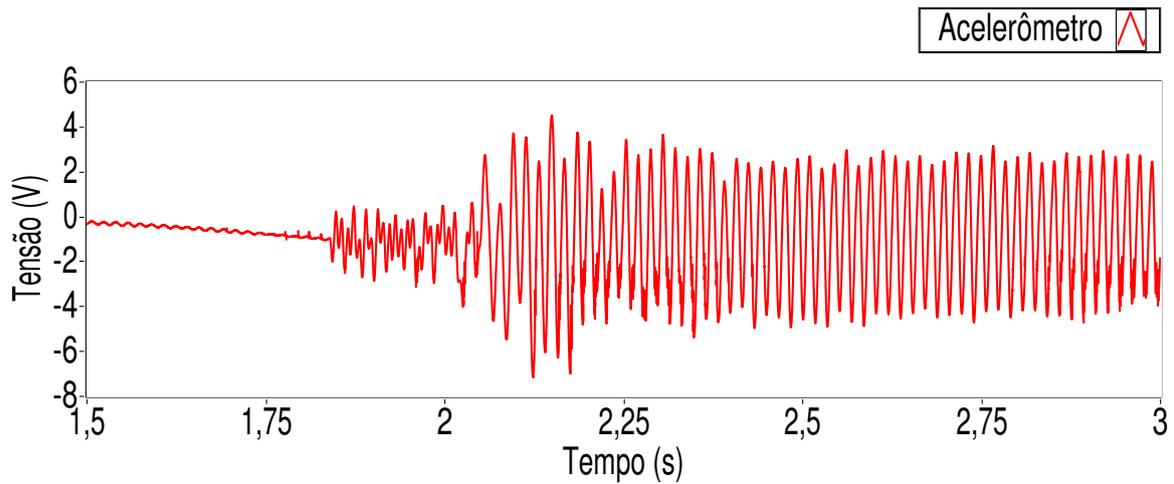


Figura 4.14: Sinal de vibração na partida do Refrigerador B

A figura 4.15 apresenta o sinal do LVIT na partida do refrigerador B.

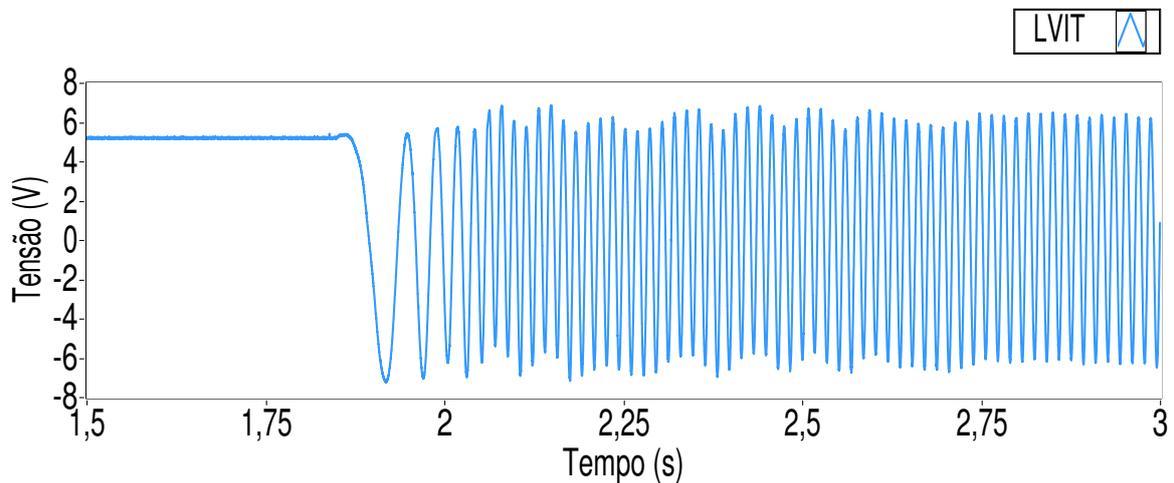


Figura 4.15: Sinal do LVIT na partida do Refrigerador B

Assim como no Refrigerador A, é possível observar que o movimento do pistão se inicia lento e acelera até atingir uma velocidade constante.

Na figura 4.16 são apresentados os sinais de pressão de descarga, corrente e do LVIT na partida do Refrigerador B.

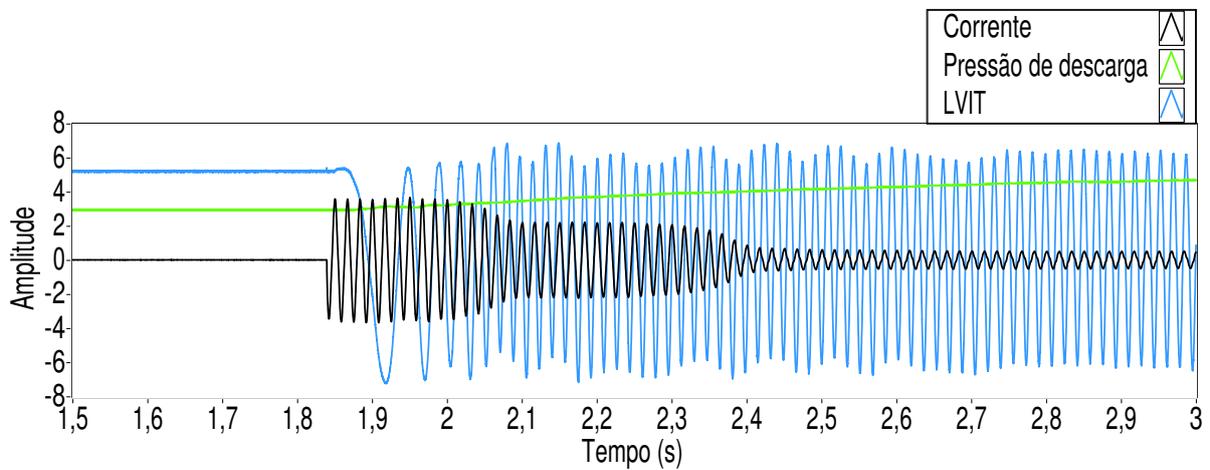


Figura 4.16: Sinais de pressão de descarga, corrente e LVIT na partida do Refrigerador B

#### 4.2.2.2 Regime Permanente

Paralelo ao apresentado para o Refrigerador A, foi realizada a FFT dos sinais na aquisição feita 30 minutos após a partida do compressor.

Assim como no Refrigerador A, a maior componente do sinal se encontra na frequência de alimentação do compressor, 60 Hz. A figura 4.17 apresenta o detalhe da FFT do sinal de corrente em torno do ponto de interesse. A partir da equação 2.1, é possível estimar a frequência rotacional em torno de 59,5 Hz.

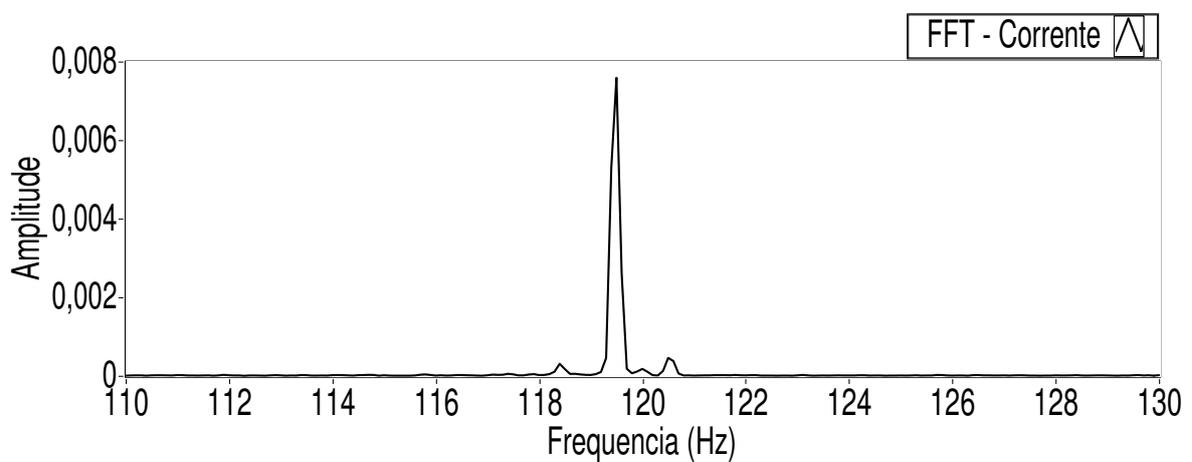


Figura 4.17: FFT do sinal da corrente de alimentação do compressor no Refrigerador B

Na figura 4.18 é apresentado o sinal da pressão de descarga, no tempo. Observa-se a periodicidade do sinal, em virtude da componente relacionada a frequência rotacional.

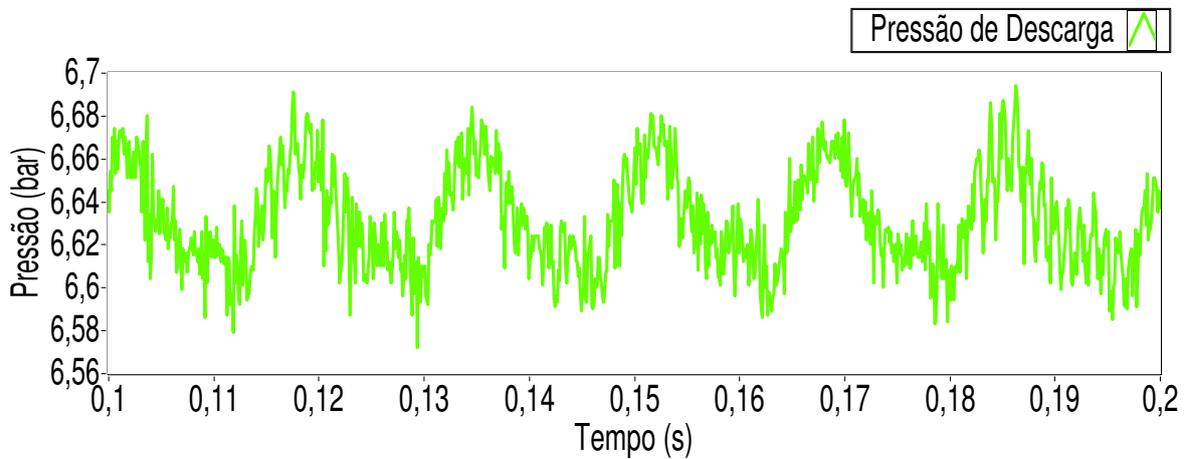


Figura 4.18: Sinal da pressão de descarga no Refrigerador B

A figura 4.19 apresenta a FFT do sinal da pressão de descarga. Como no Refrigerador A, a maior componente do sinal é contínua, porém a figura mostra a área de interesse, em torno de 60 Hz. É possível perceber que a frequência rotacional a partir desse método é de aproximadamente 59,5 Hz.

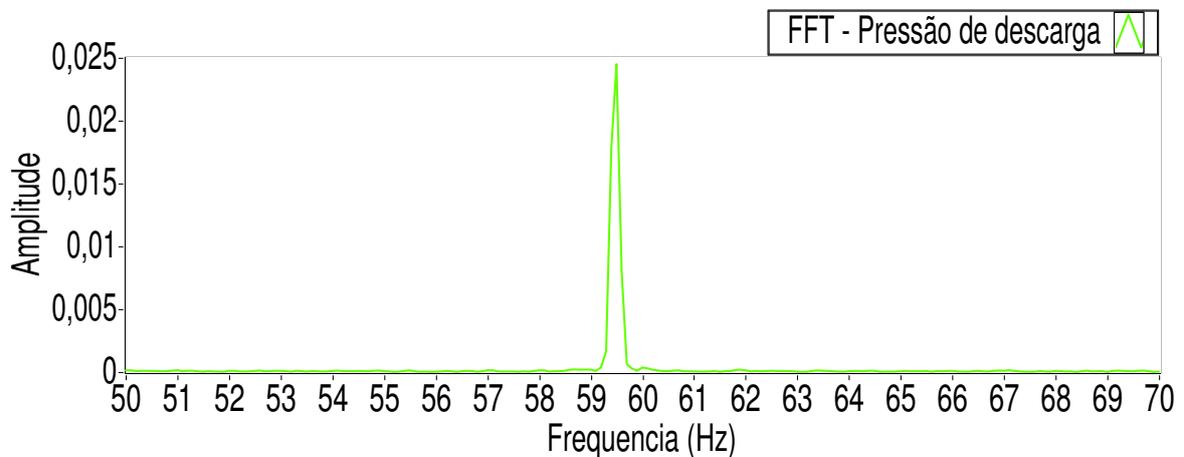


Figura 4.19: FFT do sinal da pressão de descarga do compressor no Refrigerador B

Para uma melhor visualização da componente relacionada à frequência rotacional, a figura 4.20 apresenta a FFT do sinal de vibração na carcaça do compressor do Refrigerador B em torno do ponto de interesse. É possível perceber que a relacionada à frequência rotacional encontra-se em aproximadamente 59,5 Hz.

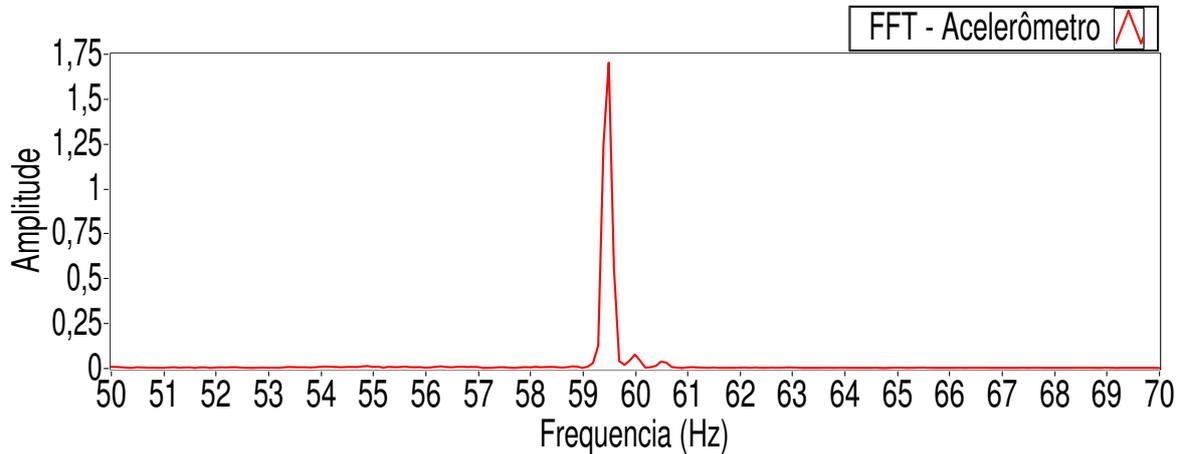


Figura 4.20: FFT do sinal de vibração na carcaça do compressor no Refrigerador B

A FFT do sinal do LVIT do refrigerador B é apresentado na figura 4.21.

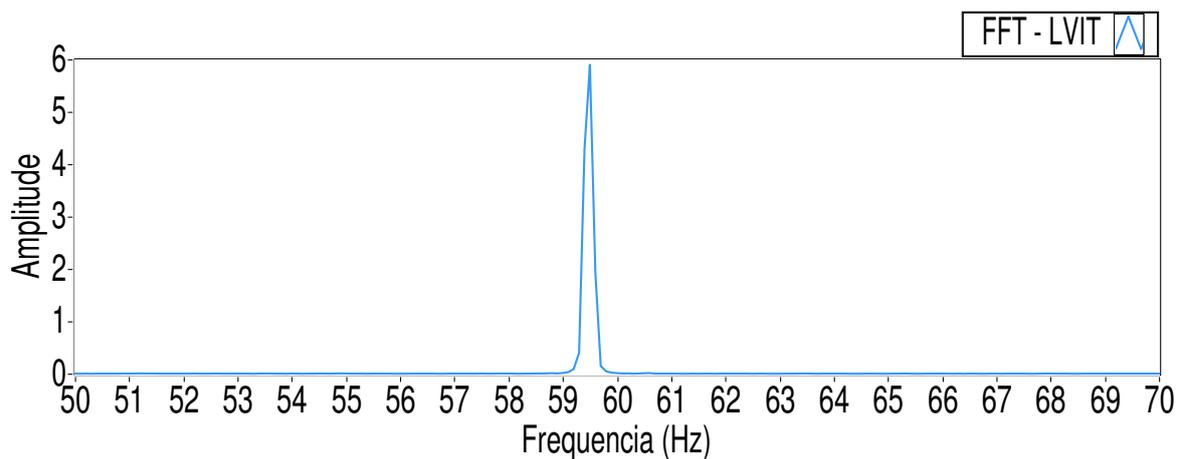


Figura 4.21: FFT do sinal do LVIT no Refrigerador B

Assim como nos outros métodos, o sinal do LVIT apresenta a frequência rotacional em aproximadamente 59,5 Hz.

## 4.2.3 Refrigerador C

### 4.2.3.1 Partida

Como feito com os outros dois refrigeradores, a primeira aquisição buscava analisar o momento da partida do compressor. Nesta seção serão apresentados os sinais durante esse momento.

Na figura 4.22 tem-se o sinal da pressão de descarga na partida do Refrigerador C.

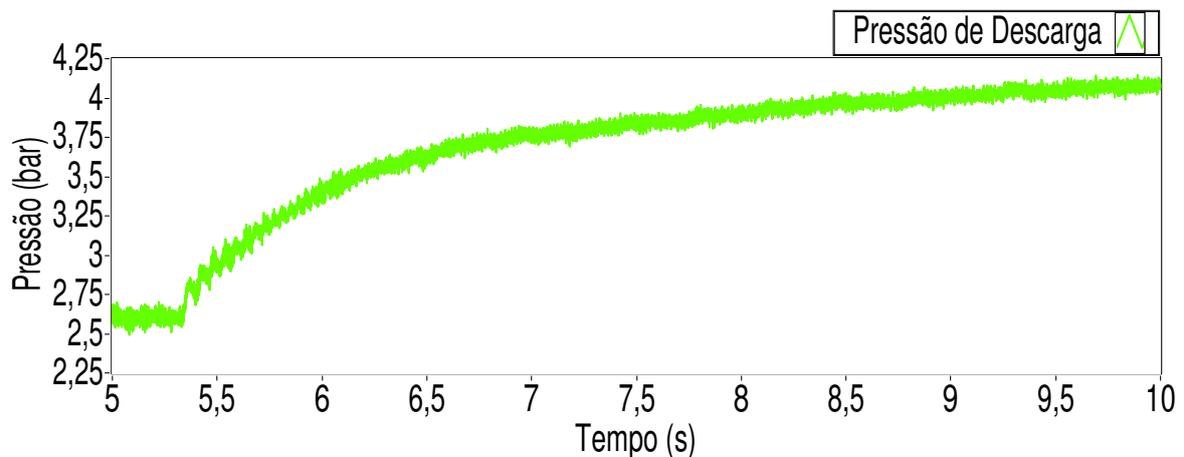


Figura 4.22: Sinal da pressão de descarga na partida do Refrigerador C

A figura 4.23 apresenta o sinal de vibração da carcaça na partida do Refrigerador C. Observa-se uma pequena vibração no instante 4,4, devido a uma movimentação do pistão antes do começo da operação, essa movimentação também é percebida pelo LVIT.

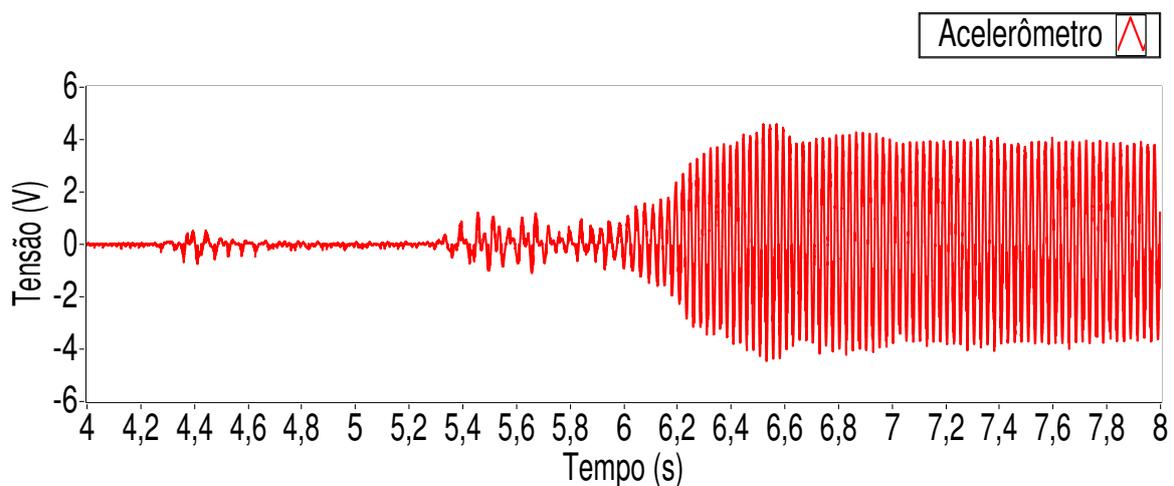


Figura 4.23: Sinal de vibração na partida do Refrigerador C

A figura 4.24 apresenta o sinal do LVIT no instante da inicialização do Refrigerador C. É possível perceber uma movimentação do pistão antes do começo da operação. Em todos os outros ensaios ocorreu uma movimentação inicial.

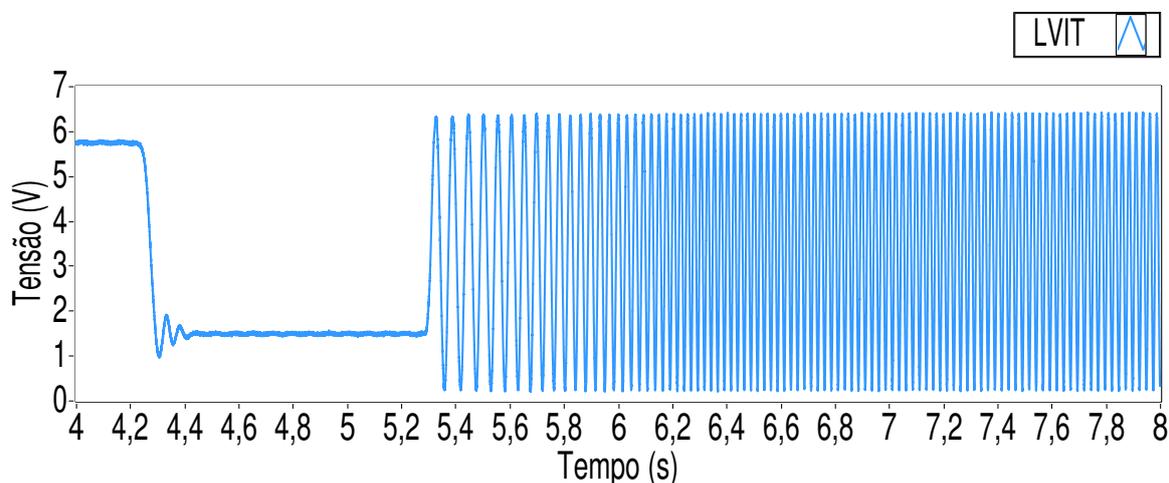


Figura 4.24: Sinal do LVIT na partida do Refrigerador C

Na figura 4.25 é possível observar a aceleração suave do pistão, diferente dos compressores convencionais.

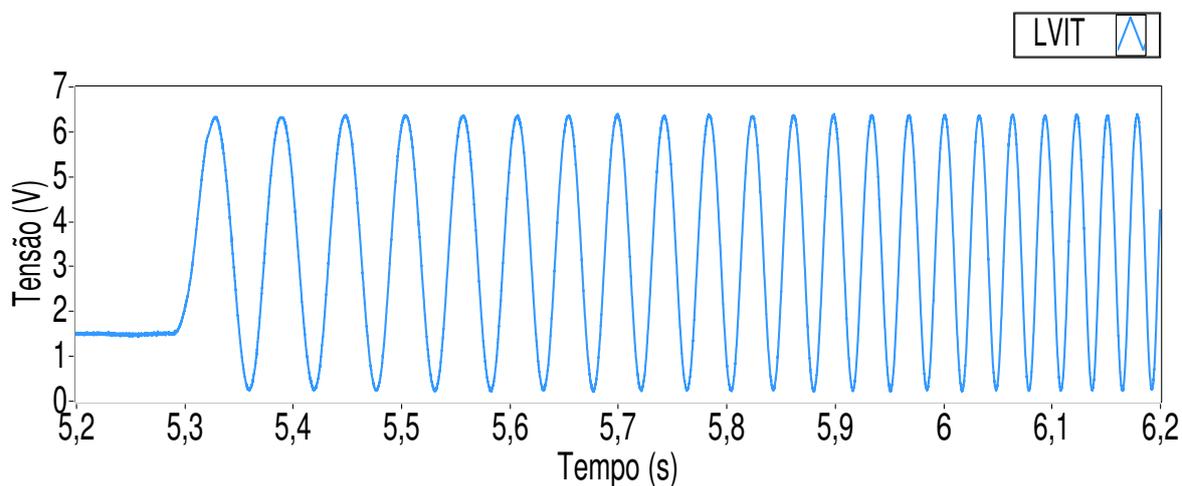


Figura 4.25: Sinal do LVIT na partida do Refrigerador C

A figura 4.26 sinais do acelerômetro, do LVIT e da pressão de descarga na partida do Refrigerador C. É possível perceber que conforme a velocidade do pistão aumenta a vibração também aumenta.

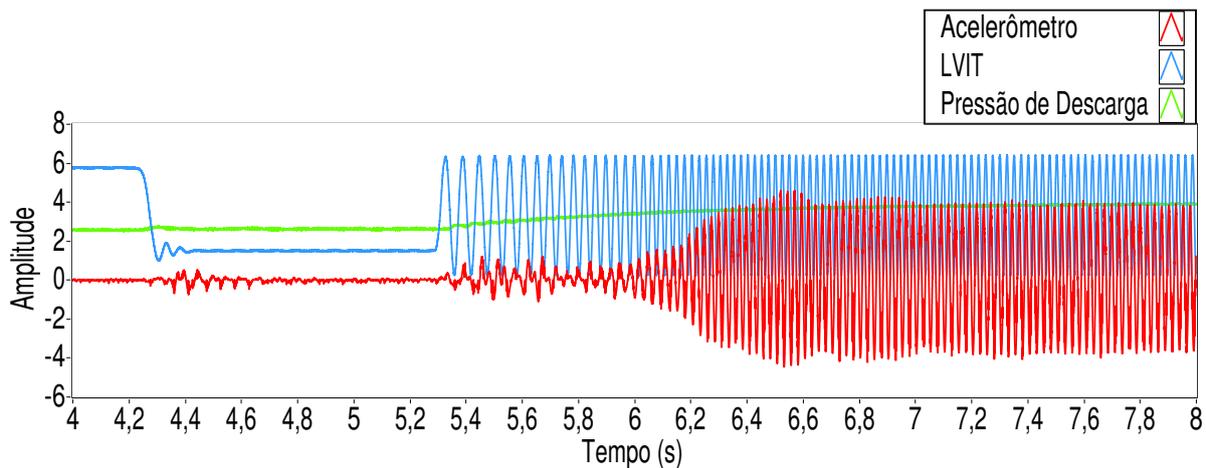


Figura 4.26: Sinais do acelerômetro, do LVIT e da pressão de descarga na partida do Refrigerador C

#### 4.2.3.2 Regime Permanente

Paralelo ao apresentado para os outros dois refrigeradores, foi realizada a FFT dos sinais na aquisição feita 30 minutos após a partida do compressor.

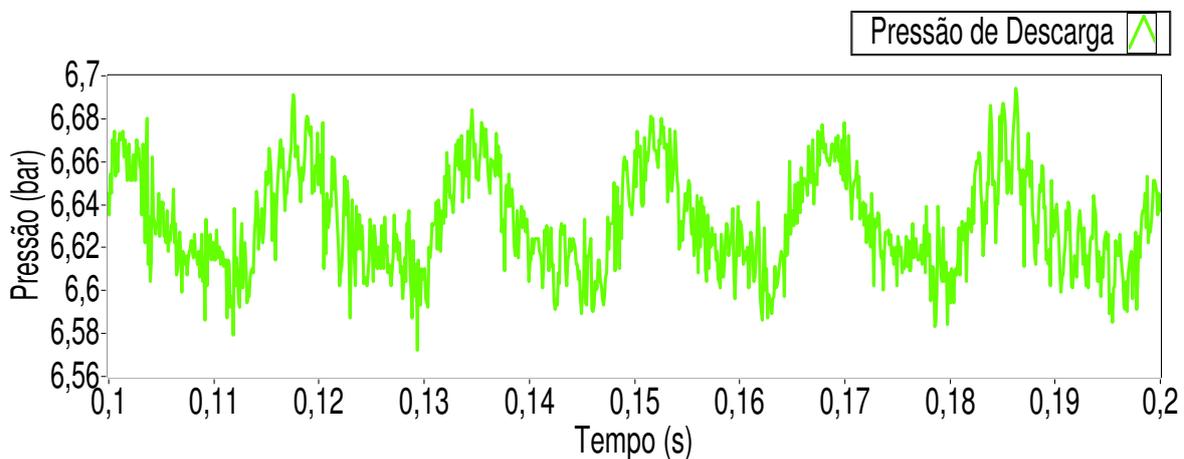


Figura 4.27: Sinal da pressão de descarga no Refrigerador C

A figura 4.28 apresenta a FFT do sinal da pressão de descarga. Como nos outros refrigeradores, a maior componente do sinal é contínua. Diferentemente dos outros refrigeradores, o Refrigerador C opera com VCC, portanto a componente relacionada à frequência rotacional pode estar em outra faixa de frequência. Neste ensaio, a componente se encontrava em torno de 71 Hz.

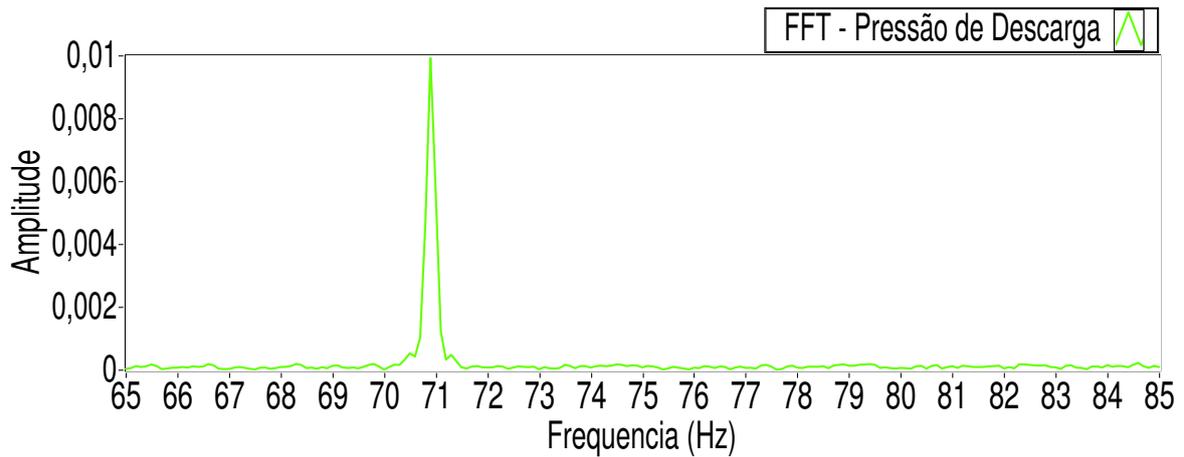


Figura 4.28: FFT do sinal da pressão de descarga do compressor no Refrigerador C

A figura 4.29 apresenta a FFT do sinal de vibração na carcaça do compressor. É possível observar que a componente relacionada à frequência rotacional se encontra em torno de 71 Hz.

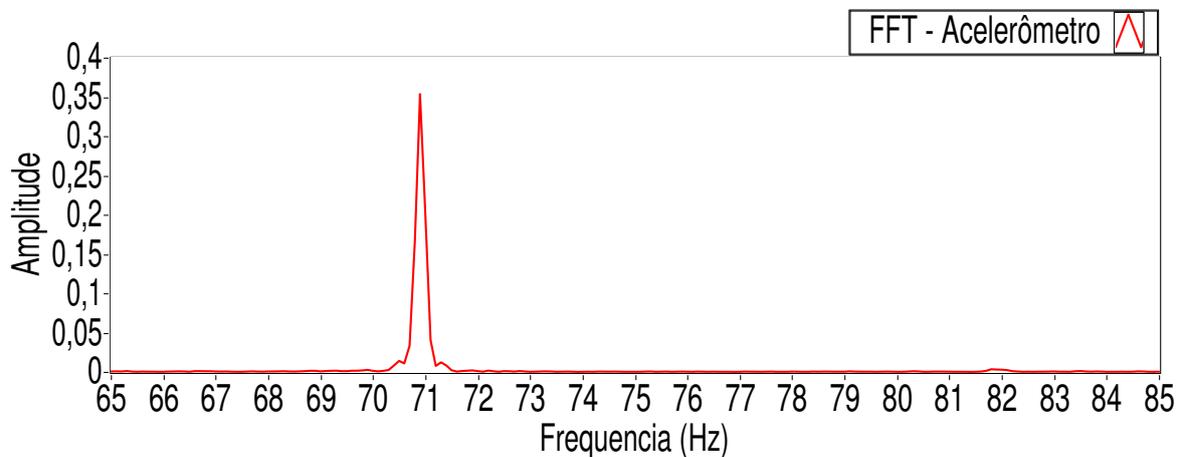


Figura 4.29: FFT do sinal de vibração na carcaça do compressor no Refrigerador C

A FFT do sinal do LVIT do refrigerador C é apresentado na figura 4.30. Assim como nos outros sinais, também se observa uma forte componente em 71 Hz.

Assim como nos outros sinais, a componente relacionada à frequência rotacional se encontra em 71 Hz.

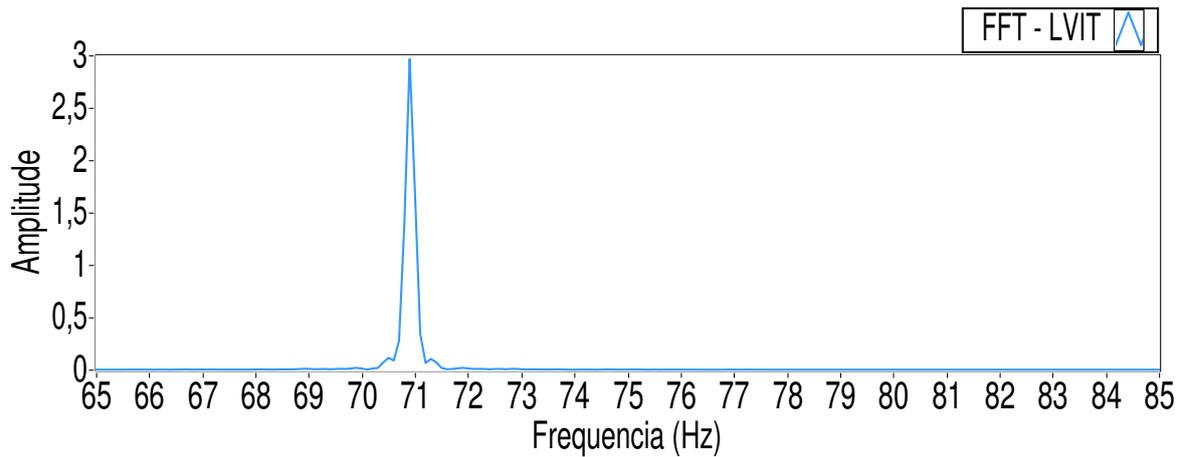


Figura 4.30: FFT do sinal do LVIT no Refrigerador C

### 4.3 Conclusões

A partir dos ensaios realizados, na partida do compressor, foi possível estudar o comportamento das variáveis em regime transitório. Observou-se a corrente de alimentação exigida na partida do compressor e como ela caía conforme o pistão acelerava; a subida da pressão de descarga; a vibração na carcaça do compressor e a posição do pistão a partir do LVIT.

Em regime permanente, observou-se as componentes em frequência relacionadas à frequência rotacional. Comparou-se as estimativas obtidas através dos diferentes métodos. Foi possível perceber que todos os métodos forneceram estimativas próximas, e todas elas compatíveis com os resultados obtidos através do LVIT.

Apesar da análise em frequência apresentar resultados promissores, para a devida validação desses métodos se exige uma análise metrológica aprofundada, diferentes intervalos de medição, avaliação do comportamento em regime transitório, entre outras análises.



# Capítulo 5

## Considerações Finais

### 5.1 Conclusões

O presente trabalho teve por objetivo geral projetar e construir um sistema de medição capaz de viabilizar a validação de métodos de medição indireta da frequência rotacional para compressores herméticos em sistemas de refrigeração. Para atingir esse objetivo, inicialmente foram definidas as grandezas necessárias para a medição indireta e para o monitoramento das condições de ensaio. Posteriormente, projetou-se um sistema de medição para as grandezas definidas. Por fim, realizou-se um tratamento analógico dos sinais obtidos através dos transdutores e um processamento dos sinais adquiridos.

Como resultado final do trabalho, obteve-se uma bancada composta por três refrigeradores instrumentados, ou seja, sistemas de refrigeração reais, porém com a capacidade de aquisição de dados durante a operação. Com a observação dos resultados, foi possível realizar uma análise do que ocorre no instante da partida do compressor. Essa análise foi feita através da observação do espectro de frequência dos sinais adquiridos, estimou-se as componentes relacionadas à frequência rotacional em cada um dos sinais. Além disso, para o mesmo compressor operando na mesma condição de ensaio, os resultados apresentados pelos diferentes métodos de medição foram bastante próximos, estando compreendidos na região de incerteza aceitável para as medições. Como o sistema de medição foi devidamente projetado, construído e os resultados dos ensaios mostram-se promissores, pode-se concluir que o objetivo foi alcançado.

Durante todo o período de realização de desenvolvimento utilizou-se conhecimentos obtidos na graduação. Além do conhecimento já existente, obteve-se contato com sistemas de refrigeração e aprofundou-se na área de instrumentação. Levando-se em consideração esses aspectos, conclui-se que a disciplina Projeto de Fim de Curso atingiu plenamente seu objetivo.

## 5.2 Sugestões para Trabalhos Futuros

A partir do resultado do presente trabalho, obteve-se uma bancada própria para a validação dos métodos de medição indireta da frequência rotacional em sistemas de refrigeração. Essa bancada possibilita a realização de estudos como os feitos por Demay(2008) com um compressor padrão instrumentado. A realização desse estudo, validaria os métodos tornando-se possível utilizá-los na indústria.

Além da bancada, também é possível utilizar os dados obtidos a partir dos ensaios realizados. Dispensando assim, a necessidade de realizar outros ensaios. Nos ensaios foram feitas aquisições de 10 s, possibilitando a redução da quantidade de dados a fim de testar os métodos. Os resultados podem ser comparados com a aquisição completa e com o sinal obtido através do LVIT.

Para adaptações futuras no sistema, é possível implementar a medição de tensão e corrente no Refrigerador C, que opera com o compressor de capacidade variável. Pode-se, também, implementar filtros analógicos e/ou digitais para que nos sinais medidos se isole a componente relacionada à frequência rotacional de forma automática.

Após a validação dos métodos de medição indireta da frequência rotacional em sistemas de refrigeração, outro caminho que se abre é a medição da vazão mássica, outra variável de interesse da indústria de sistemas de refrigeração, por sua direta relação com a capacidade de refrigeração. Para tal tarefa, seria necessário acrescentar um medidor padrão ao sistema concebido.

A partir desse trabalho, o uso desses métodos na indústria se torna mais próximo. Uma vez validada a medição indireta de frequência rotacional a medição torna-se não invasiva, sendo possível a utilização em compressores que serão vendidos. Com um ensaio não destrutivo, é possível a utilização desses métodos até no controle de qualidade dos produtos.

Esse tipo de trabalho reforça o papel da universidade no desenvolvimento de novas tecnologias a serviço da indústria e principalmente da sociedade.

# Referências

EMBRACO. **Dispositivos de Sincronismo**. Padrão operacional PO GTTP 00054. 2002. revisão 01., 2002.

A NOTÍCIA. **Termotécnica e Embraco apostam em inovação e sustentabilidade para conquistar mercados**. Disponível em: <<http://anoticia.clicrbs.com.br/sc/economia/negocios/noticia/2015/12/termotecnica-e-embraco-apostam-em-inovacao-e-sustentabilidade-para-conquistar-mercados-493.html>>. Acesso em: 14 de janeiro de 2016., 2015.

ASHRAE. AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS. **ANSI/ASHRAE 23** methods of testing for rating positive displacement refrigerant compressors and conditioning units. atlanta, usa, 2005.

BENTLEY, J. P. **Principles of Measurement Systems**. 4. ed. Pearson Prentice Hall, 2005.

BRÜEL & KJÆR. **Charge Amplifier - Type 2635**. Disponível em: <<http://www.bksv.com/Products/transducers/conditioning/charge/2635?tab=overview>>. Acesso em: 15 de dezembro de 2015.

BRÜEL & KJÆR. **Technical Review to advance techniques in Acoustical, Electrical and mechanical measurement. No 2.**, 1971.

CADDOCK. **Type USF Ultra-Stable Low TC Film Resistors 200 Series and 300 Series**, 2004.

DEMAY, M. B. **Desenvolvimento de Sistemas para Medição de Frequência Rotacional em Compressores Herméticos**. Mestrado em metrologia científica e industrial, UFSC, Florianópolis, 2008.

DEMAY, M. B. **Estudo e Avaliação de Alternativas para Medição de Frequência Rotacional de Compressores Herméticos em Condições de Regime Permanente e Transitório Através de Grandezas Externamente Mensuráveis**. Doutorado em engenharia mecânica, UFSC, Florianópolis, 2015.

DOEBELIN, E. O. **Measurement systems: application and design**. McGraw-Hill, 1990.

EATON, W. P.; SMITH, J. H. Micromachined pressure sensors: review and recent developments. **Smart Materials and Structures**, iop, v. 6, n. 5, p. 530–539, out, 1997.

FIGLIOLA, R. S.; BEASLEY, D. E. **Theory and Design for Mechanical Measurements**. john wiley & sons, inc., 2000.

- FITZGERALD, A. E.; KINGSLEY, C.; UMANS, S. D. **Electric Machinery**. 6. ed. New York: McGraw-Hill, 2003.
- FLESCH, R. C. C. **Estudo e Projeto de Estratégias de Controle para Aplicação em uma Bancada de Ensaio que Apresenta Atraso de Transporte**. Mestrado em metrologia científica e industrial, UFSC, 2008.
- GAO, R.; ZHANG, L. Micromachined microsensors for manufacturing. **IEEE Instrumentation & Measurement Magazine**. v. 7. p. 20-26. june, 1989.
- GE. **PDCR 4000 series**. High performance millivolt output pressure transducers, 2008.
- HALLIDAY, D.; RESNICK, R.; WALKER, J. **Fundamentos de Física, v.3 : Eletromagnetismo**. 8. ed. LTC, 2007.
- HENKLEIN, P. **Análise de Ensaios de Compressores Herméticos Durante o Transitório**. Mestrado em metrologia científica e industrial, UFSC, 2006.
- HOFFMANN, K. **An Introduction to Measurements using Strain Gages**. Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH, Darmstadt, 1989.
- HUBACHER, B., GROLL, E. A. **Measurement of Performance of Carbon Dioxide Compressors – Final Report**. Air-Conditioning And Refrigeration Technology Institute – ARTI 21-CR. n. 611-10070, 2002.
- HURST, K. D.; HABLETER, T. G.; GRIVA, G.; PROFUMO, F. Speed sensorless field-orientated control of induction machines using current harmonic spectral estimation. **Conference Record of the 1994 IEEE Industry Applications Society**. v. 1. p. 601-607. oct, 1994.
- IBGE. Instituto brasileiro de geografia e estatística. Disponível em: <<http://seriesestatisticas.ibge.gov.br/series.aspx?vcodigo=PD279>>. Acesso em: 9 de setembro de 2015., 2011.
- LEM. **Current Transducer LA 25-NP**, 2011.
- MORAN, M. J.; SHAPIRO, H. N. **Fundamentals of Engineering Thermodynamics**. Wiley 7. ed., 2010.
- NI. **National Instruments. OPERATING INSTRUCTIONS AND SPECIFICATIONS NI 9201/9221**, 2009a.
- NI. **National Instruments. OPERATING INSTRUCTIONS AND SPECIFICATIONS NI 9219**, 2009b.
- NI. **National Instruments. OPERATING INSTRUCTIONS AND SPECIFICATIONS NI 9215**, 2011.
- NI. **NI cDAQ™-9174 NI CompactDAQ Four-Slot USB Chassis**, 2013.

- OMEGA. **The LD100, a Fast Linear Displacement Transducer.** Disponível em: <<http://www.tuner.tw/OMEGA%20CD/zsection/7685USA.PDF>>. Acesso em: 9 de dezembro de 2015.
- PHIPPS, W., AL-BAHADLY, I. **Sensorless Speed Control in Induction Motor Drives.** Proceedings of the First IEEE International Workshop in Electronic Desing, Test and Aplications. p. 480-482. Jan, 2002.
- PICCOLI, H. C. **Mecânica das vibrações: Medição de Vibrações.** Apostila. Departamento de Engenharia Mecânica, Fundação Universidade Federal do Rio Grande, 2000.
- PIEZO INSTITUTE. **What is Piezo** Washington D.C Disponível em: <<http://www.piezoinstitute.com/resources/what-is-piezo/>>. Acesso em: 21 de janeiro de 2016., 2013.
- REDLICH, R. W. **Linear Transducer and signal processor, U.S. 4.667.158.**, 1987.
- RIELLA, H. L. **Desenvolvimento de Bancada de Ensaio para Caracterização do Comportamento dinâmico de Sistemas de Medição de Deslocamento.** Mestrado em engenharia mecânica, UFSC, 2010.
- RODRIGUES, R. S. **Análise dos Esforços Dinâmicos Transmitidos pelo Eixo e Pistão ao Bloco de Compressores Herméticos.** Mestrado em engenharia mecânica, UFSC, 2003.
- SCHWARZ, N.G. **Variable Capacity Compressors, a New Dimension for Refrigeration Engineers to Explore.** International appliance manufacturing, 2001.
- SENTECH. **The SP200A,SP300A** Disponível em: <<http://www.sentechlvdtd.com/pdf/SP200A300A.pdf>>. Acesso em: 9 de dezembro de 2015.
- SENTECH. **FASTAR/HYDRASTAR Signal Conditioner SCDR150 User Instructions,** 2009.
- SHEVGAONKAR, R. K. . **Electromagnetic waves** McGraw-Hill, 2005.
- SONNTAG, R. E.; BORGANAKKE, C.; VAN WYLEN, G. J. **Fundamentos da Termodinâmica.** Edgard Blücher LTDA, 2003.
- STOECKER, W. F.; SAIZ JABARDO, J. M. **Refrigeração Industrial.** 2. ed. Edgard Blücher LTDA, 2002.
- SUNPOWER. **Robert W. Redlich precision variable pitch compensation winding for displacement transducer,** 1990.
- TEXAS INSTRUMENTS. **INA110.Fast-Settling FET-Input INSTRUMENTATION AMPLIFIER,** 2005.
- THOMAZINI JR, J. C. . **Desenvolvimento de Recursos para Aumentar a Produtividade de uma Bancada de Ensaio de Partida e Tombamento de Compressores de Refrigeração.** Mestrado em engenharia mecânica, UFSC, Florianópolis, 2013.

U.S. DEPARTMENT OF ENERGY. **DOE Fundamentals Handbook, Mechanical Science, Volume 2 of 2** Washington D.C Disponível em: <<http://energy.gov/sites/prod/files/2013/06/f2/h1018v2.pdf>>. Acesso em: 21 de janeiro de 2016., 1993.

WIKA. **High-quality pressure transmitter for general industrial applications Model S-10**, 2012.

ÇENGEL, Y. A.; BOLES, M. A. **Termodinâmica**. 5. ed. Graw-Hill, 2006.