

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA  
MECÂNICA**

Júlio Conrado Thomazini Júnior

**DESENVOLVIMENTO DE RECURSOS PARA AUMENTAR A  
PRODUTIVIDADE DE UMA BANCADA DE ENSAIOS DE  
PARTIDA E TOMBAMENTO DE COMPRESSORES DE  
REFRIGERAÇÃO**

Florianópolis

2013



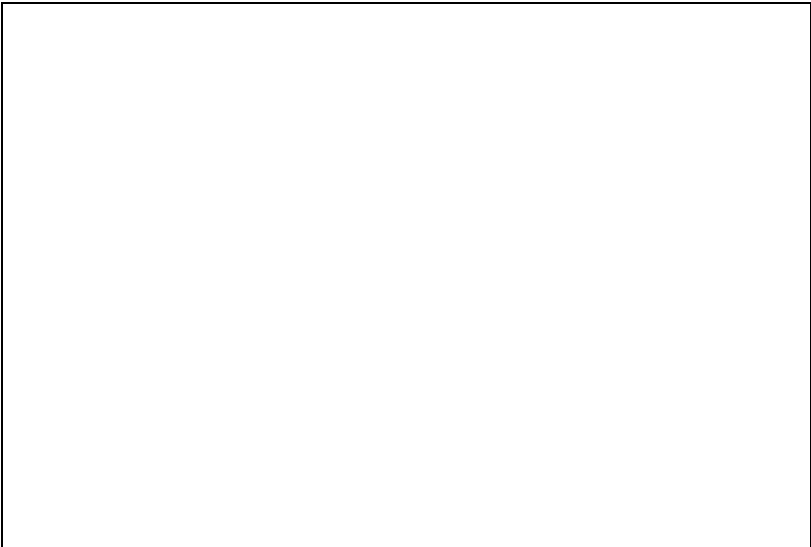
Júlio Conrado Thomazini Júnior

**DESENVOLVIMENTO DE RECURSOS PARA AUMENTAR A  
PRODUTIVIDADE DE UMA BANCADA DE ENSAIOS DE  
PARTIDA E TOMBAMENTO DE COMPRESSORES DE  
REFRIGERAÇÃO**

Dissertação submetida ao  
Programa de Pós-Graduação em  
Engenharia Mecânica da  
Universidade Federal de Santa  
Catarina para a obtenção do Grau  
de Mestre em Engenharia  
Mecânica  
Orientador: Prof. Carlos Alberto  
Flesch, Dr. Eng.

Florianópolis

2013



Júlio Conrado Thomazini Júnior

**DESENVOLVIMENTO DE RECURSOS PARA AUMENTAR A  
PRODUTIVIDADE DE UMA BANCADA DE ENSAIOS DE  
PARTIDA E TOMBAMENTO DE COMPRESSORES DE  
REFRIGERAÇÃO**

Esta Dissertação foi julgada adequada para obtenção do Título de “Mestre em Engenharia Mecânica”, e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.

Florianópolis, 20 de maio de 2013.

---

Prof. Júlio César Passos, Dr.  
Coordenador do Curso

---

Prof. Carlos Alberto Flesch, Dr. Eng.  
Orientador

**Banca Examinadora:**

---

Prof. Armando Albertazzi Gonçalves Jr., Dr.Eng. (Presidente)

---

Prof. Saulo Güths, Dr. (UFSC)

---

Prof. Tiago L. F. Costa Pinto, Dr. Eng. (UFSC)

---

Marco Aurélio de Oliveira, Dr. Eng. (Whirlpool S/A)



Dedico este trabalho aos que  
contribuíram para sua realização.





## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço aos que contribuíram, de qualquer maneira, para realização deste trabalho.







## RESUMO

Ensaio de partida e tombamento de compressores são importantes para determinar as curvas de comportamento dos mesmos frente a uma aplicação específica. Contribuições de dissertações de mestrado anteriores permitiram automatizar uma bancada manual de ensaios de partida e tombamento e aprimoraram métodos de avaliação de incertezas, tanto as associadas à expressão da curva de tombamento quanto as relativas à medição de temperatura do enrolamento do compressor sob ensaio. Neste trabalho, foi realizada a integração do novo sistema de medição de temperatura, que é feita através da inserção de componente de corrente contínua junto à alternada, na alimentação do motor do compressor. Esse método permite, além da medição da temperatura interna do compressor sem necessidade de instrumentá-lo, o aquecimento acelerado do compressor e conseqüente diminuição do tempo de transiente da bancada. Para implementação das mudanças, foram realizadas alterações na rotina de ensaios, no *software* e *hardware* da bancada. Realizaram-se ensaios de partida e tombamento para validar a bancada aprimorada, bem como sua nova configuração, e os dados foram confrontados com os obtidos na bancada manual instalada na empresa parceira deste projeto. Os resultados alcançados apresentam baixas incertezas. Além disso, pela aquisição contínua dos dados ao longo do ensaio, é possível caracterizar e quantificar, em todos os instantes, a curva do compressor até seu tombamento. Apresenta-se também uma avaliação da influência nos resultados dos ensaios de tombamento proporcionada pela variação da curva de pressão à qual o compressor em teste é submetido durante os ensaios. Também é feita proposta, com base na comparação das opções disponíveis no mercado, de nova arquitetura de aquisição de sinais para a bancada, que proporcione melhores características metrológicas e maiores robustez e estabilidade. Por fim, mostra-se que a bancada aprimorada é capaz de realizar ensaios de partida e tombamento dentro das tolerâncias exigidas, e permite que os mesmos sejam realizados sem a necessidade de instrumentar o compressor em teste com sensores de temperatura, o que aumenta a produtividade da bancada, além de prover método de aquecimento acelerado mais eficiente. Desse modo, o ensaio passa a ser executado em menos tempo e com confiabilidade metrológica garantida.

**Palavras-chave:** ensaios de compressores, medição de temperatura de enrolamentos energizados, arquiteturas para aquisição de sinais.



## ABSTRACT

Start and stalling tests of refrigeration compressors are important to determine their curves behavior in a specific application. Contributions of previous dissertations allowed automate a manual test panel and improved methods for evaluating uncertainties, like those associated to stalling curve expression and winding temperature measurement of the compressor under test. In this work, was performed the integration of a new temperature measuring system, done by direct current component insertion into the alternating current feeding of compressor motor. This method allows, in addition to winding internal temperature measurement without instrumentation, rapid heating of the compressor resulting in transient time reduction for the panel test. For implementation of changes, alterations were made in testing routines, software and hardware of the panel. Start and stalling tests were performed to validate the improved panel as well as its new configuration. The data was compared to those obtained from the manual panel installed on the plant of the company partner in this project. The results achieved have low uncertainties. Also, with continuous data acquisition during the test, it is possible to characterize and quantify the compressor stalling curve at any instant. Moreover, it also presents an evaluation of the influence on the stalling test results provided by variation of the pressure curve at which the compressor under test is subjected during tests. A new architecture for signal acquisition for panel is proposed, based on the comparison of the market available options looking for best metrological characteristics and improved hardness and stability. Finally, it is shown that the improved panel is able to perform start and stalling tests into the required tolerances and enables it, without need to instrument the compressor under test with thermo sensors, which increases the productivity of the panel, besides providing a more efficient accelerated heating method. In this way, the test is performed in less time and with metrological reliability guaranteed.

**Keywords:** compressors tests, energized winding temperature measurement, architectures for signal acquisition.





## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Circuito de refrigeração por compressão de vapor .....	34
Figura 2: Diagrama P-h do ciclo de refrigeração ideal por compressão de vapor.....	36
Figura 3: Compressor alternativo hermético .....	38
Figura 4: Ciclo de compressão em um compressor alternativo.....	39
Figura 5: Curva característica do conjugado (torque) vs. frequência rotacional síncrona de um motor de indução.....	40
Figura 6: Curvas característica e de tombamento genéricas.....	45
Figura 7: Curva de tombamento e característica de um sistema de refrigeração com utilização de diferentes fluidos refrigerantes: R-12 e R-134a.....	46
Figura 8: Potência de compressão e trabalho de compressão em função da temperatura de evaporação para um compressor genérico com temperatura de condensação de 35 °C.....	47
Figura 9: Potência de compressão e trabalho de compressão em função da temperatura de condensação para um compressor genérico com temperatura de evaporação de -40 °C.....	49
Figura 10: Curva da resistividade do cobre em função da variação da temperatura.....	52
Figura 11: Comparação entre interfaces de comunicação: Velocidade máxima de transmissão de dados [MB/s] x Latência aproximada [ $\mu$ s].	55
Figura 12: Características dos transmissores (WIKAA, 2012; WIKAB, 2012) instalados na bancada automatizada.....	63
Figura 13: Circuito da BPT em desenvolvimento no LIAE .....	65
Figura 14: Etapas do ensaio de partida equalizada automatizado aplicado na BPT automatizada .....	67
Figura 15: Etapas do ensaio de partida diferencial automatizado aplicado na BPT automatizada .....	69
Figura 16: Etapas do ensaio de tombamento automatizado aplicado na BPT automatizada .....	71
Figura 17: Etapas do ensaio de partida equalizada automatizado aplicado na BPT aprimorada com inserção do SICC.....	79
Figura 18: Etapas do ensaio de partida diferencial automatizado aplicado na BPT aprimorada com inserção do SICC.....	80
Figura 19: Etapas do ensaio de tombamento automatizado aplicado na BPT aprimorada com inserção do SICC .....	81
Figura 20: Características dos compressores utilizados .....	83

Figura 21: Tensões máximas e mínimas proporcionadas em cada modelo de compressor .....	85
Figura 22: Ensaio de partida equalizada na BPT aprimorada – Modelo A .....	86
Figura 23: Ensaio de partida equalizada na BPT aprimorada – Modelo B .....	87
Figura 24: Ensaio de partida equalizada na BPT aprimorada – Modelo C .....	87
Figura 25: Ensaio de partida diferencial na BPT aprimorada – Modelo C .....	88
Figura 26: Ensaio de tombamento na BPT manual – Modelo A .....	88
Figura 27: Ensaio de tombamento na BPT aprimorada – Modelo A – <i>Setpoint</i> 20 °C (média no compressor em teste de 19,7 °C) .....	89
Figura 28: Ensaio de tombamento na BPT aprimorada – Modelo A – <i>Setpoint</i> 25 °C (média no compressor em teste de 24,8 °C) .....	90
Figura 29: Ensaio de tombamento na BPT aprimorada – Modelo A – <i>Setpoint</i> 30 °C (média no compressor em teste de 30,0 °C) .....	90
Figura 30: Ensaio de tombamento na BPT manual – Modelo B .....	91
Figura 31: Ensaio de tombamento na BPT aprimorada – Modelo B – <i>Setpoint</i> 20 °C (média no compressor em teste de 20,2 °C) .....	91
Figura 32: Ensaio de tombamento na BPT aprimorada – Modelo B – <i>Setpoint</i> 25 °C (média no compressor em teste de 25,0 °C) .....	92
Figura 33: Ensaio de tombamento na BPT aprimorada – Modelo B – <i>Setpoint</i> 30 °C (média no compressor em teste de 30,1 °C) .....	93
Figura 34: Ensaio de tombamento na BPT manual – Modelo C .....	93
Figura 35: Ensaio de tombamento na BPT aprimorada – Modelo C – <i>Setpoint</i> 15 °C (média no compressor em teste de 15,0 °C) .....	94
Figura 36: Ensaio de tombamento na BPT aprimorada – Modelo C – <i>Setpoint</i> 20 °C (média no compressor em teste de 20,1 °C) .....	94
Figura 37: Ensaio de tombamento na BPT aprimorada – Modelo C – <i>Setpoint</i> 25 °C (média no compressor em teste de 25,2 °C) .....	95
Figura 38: Ciclos de aquecimento – Modelo A .....	96
Figura 39: Ciclos de aquecimento – Modelo B .....	97
Figura 40: Ciclos de aquecimento – Modelo C .....	98
Figura 41: Curva de aquecimento – Modelo A .....	99
Figura 42: Curva de aquecimento – Modelo B .....	99
Figura 43: Curva de aquecimento – Modelo C .....	100
Figura 44: Ensaio de tombamento na BPT aprimorada – Modelo A – <i>Setpoint</i> 20 °C (média no compressor em teste de 19,8 °C) – 4 bar ....	104
Figura 45: Ensaio de tombamento na BPT aprimorada – Modelo A – <i>Setpoint</i> 25 °C (média no compressor em teste de 24,7 °C) – 4 bar ....	104

Figura 46: Ensaio de tombamento na BPT aprimorada – Modelo A – <i>Setpoint</i> 30 °C (média no compressor em teste de 30,1 °C) – 4 bar ....	105
Figura 47: Ensaio de tombamento na BPT aprimorada – Modelo A – <i>Setpoint</i> 20 °C (média no compressor em teste de 20,1 °C) – 2 bar ....	106
Figura 48: Ensaio de tombamento na BPT aprimorada – Modelo A – <i>Setpoint</i> 25 °C (média no compressor em teste de 24,9 °C) – 2 bar ....	106
Figura 49: Ensaio de tombamento na BPT aprimorada – Modelo A – <i>Setpoint</i> 30 °C (média no compressor em teste de 30,2 °C) – 2 bar ....	107
Figura 50: Ensaio de tombamento na BPT aprimorada – Modelo B – <i>Setpoint</i> 20 °C (média no compressor em teste de 20,2 °C) – 4 bar ...	108
Figura 51: Ensaio de tombamento na BPT aprimorada – Modelo B – <i>Setpoint</i> 25 °C (média no compressor em teste de 25,1 °C) – 4 bar ..	109
Figura 52: Ensaio de tombamento na BPT aprimorada – Modelo B – <i>Setpoint</i> 30 °C (média no compressor em teste de 30,1 °C) – 4 bar ...	109
Figura 53: Ensaio de tombamento na BPT aprimorada – Modelo B – <i>Setpoint</i> 20 °C (média no compressor em teste de 20,0 °C) – 2 bar ...	110
Figura 54: Ensaio de tombamento na BPT aprimorada – Modelo B – <i>Setpoint</i> 25 °C (média no compressor em teste de 25,0 °C) – 2 bar ...	111
Figura 55: Ensaio de tombamento na BPT aprimorada – Modelo B – <i>Setpoint</i> 30 °C (média no compressor em teste de 30,1 °C) – 2 bar ...	111
Figura 56: Ensaio de tombamento na BPT aprimorada – Modelo C – <i>Setpoint</i> 15 °C (média no compressor em teste de 15,0 °C) – 4 bar ...	112
Figura 57: Ensaio de tombamento na BPT aprimorada – Modelo C – <i>Setpoint</i> 20 °C (média no compressor em teste de 20,0 °C) – 4 bar ...	113
Figura 58: Ensaio de tombamento na BPT aprimorada – Modelo C – <i>Setpoint</i> 25 °C (média no compressor em teste de 25,4 °C) – 4 bar ...	113
Figura 59: Ensaio de tombamento na BPT aprimorada – Modelo C – <i>Setpoint</i> 15 °C (média no compressor em teste de 15,2 °C) – 2 bar ...	114
Figura 60: Ensaio de tombamento na BPT aprimorada – Modelo C – <i>Setpoint</i> 20 °C (média no compressor em teste de 20,0 °C) – 2 bar ...	115
Figura 61: Ensaio de tombamento na BPT aprimorada – Modelo C – <i>Setpoint</i> 25 °C (média no compressor em teste de 25,3 °C) – 2 bar ...	116
Figura 62: Temperatura de condensação [°C] x <i>Setpoint</i> de ensaio [°C]. Com diferentes pressões impostas na sucção do compressor auxiliar – Modelo A .....	118
Figura 63: Tempo de ensaio [s] x <i>Setpoint</i> de ensaio [°C]. Com diferentes pressões impostas na sucção do compressor auxiliar – Modelo A.....	118
Figura 64: Temperatura de condensação [°C] x <i>Setpoint</i> de ensaio [°C]. Com diferentes pressões impostas na sucção do compressor auxiliar – Modelo B.....	119

Figura 65: Tempo de ensaio [s] x <i>Setpoint</i> de ensaio [°C]. Com diferentes pressões impostas na sucção do compressor auxiliar – Modelo B.....	119
Figura 66: Temperatura de condensação [°C] x <i>Setpoint</i> de ensaio [°C]. Com diferentes pressões impostas na sucção do compressor auxiliar – Modelo C .....	120
Figura 67: Tempo de ensaio [s] x <i>Setpoint</i> de ensaio [°C]. Com diferentes pressões impostas na sucção do compressor auxiliar – Modelo C.....	120
Figura 68: Placas de aquisição utilizadas atualmente na BPT aprimorada e suas funções utilizadas.....	123
Figura 69: Comparação entre os principais itens de um sistema CompactRIO e um PXI, voltados para aplicação na BPT aprimorada	125

## LISTA DE ABREVIATURAS

ABNT	<i>Associação Brasileira de Normas Técnicas</i>
AI	<i>Analog Input</i>
ANSI	<i>American National Standards Institute</i>
AO	<i>Analog Output</i>
BPT	Bancada de Ensaios de Partida e Tombamento
CAN	<i>Controller Area Network</i>
CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
CLP	Controlador Lógico Programável
CPU	<i>Central Processing Unit</i>
DAQ	<i>Data Acquisition</i>
DIO	<i>Digital Input/Output</i>
EIA	<i>Electronics Industry Association</i>
FPGA	<i>Field Programmable Gate Array</i>
GPIB	<i>General Purpose Interface Bus</i>
GUM	<i>Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement</i>
HP-IB	<i>Hewlett Packard Interface Bus</i>
HST	<i>High Starting Torque</i>
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
JCGM	<i>Joint Committee for Guides in Metrology</i>
LABMETRO	Laboratório de Metrologia e Automação
LAN	<i>Local Area Network</i>
LIAE	Laboratório de Instrumentação e Automação de

	Ensaaios
LSB	<i>Least Significant Bit</i>
LXI	<i>LAN Extension for Instrumentation</i>
MXI	<i>Multisystem Extension Interface</i>
PAC	<i>Programmable Automation Controller</i>
PC	<i>Personal Computer</i>
PCI	<i>Peripheral Component Interconnect</i>
PID	Proporcional-Integral-Derivativo
POSMEC	Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica
PXI	<i>PCI Extension for Instrumentation</i>
RAM	<i>Random Access Memory</i>
RMS	<i>Root Mean Square</i>
RS232	<i>Recommended Standard 232</i>
SICC	Sistema de Injeção de Corrente Contínua
UFSC	Universidade Federal de Santa Catarina
USB	<i>Universal Serial Bus</i>
VCC	<i>Variable Capacity Compressor</i>
VME	<i>Versa Module Eurocard</i>
VXI	<i>VME Extensions for Instrumentations</i>

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO.....</b>	<b>27</b>
1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO.....	27
1.2 OBJETIVOS DO TRABALHO.....	30
1.3 ESTRATÉGIA DE SOLUÇÃO.....	31
1.4 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO.....	32
<b>2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....</b>	<b>33</b>
2.1 CIRCUITOS DE REFRIGERAÇÃO.....	33
2.2 COMPRESSORES PARA REFRIGERAÇÃO.....	36
2.3 ENSAIOS DE PARTIDA E TOMBAMENTO.....	41
2.3.1 <i>Ensaio de partida</i> .....	42
2.3.2 <i>Ensaio de Tombamento</i> .....	43
2.4 EFEITO DA VARIAÇÃO DAS PRESSÕES DE SUÇÃO E DESCARGA EM COMPRESSORES ALTERNATIVOS HERMÉTICOS.....	46
2.5 INJEÇÃO DE CC EM MOTORES CA.....	49
2.5.1 <i>Medição de temperatura de enrolamento em operação</i> ..	50
2.5.2 <i>Aquecimento acelerado</i> .....	53
2.6 ESTABELECIMENTO DA ARQUITETURA DE UMA BPT COM ALTO GRAU DE AUTOMAÇÃO.....	54
2.6.1 <i>Principais características de sistemas de medição e automação</i> .....	55
2.6.2 <i>Grandezas envolvidas</i> .....	55
2.6.3 <i>Análise dos sistemas disponíveis no mercado</i> .....	56
2.7 CONCLUSÕES.....	59
<b>3. BANCADA DE ENSAIOS DE PARTIDA E TOMBAMENTO</b>	<b>61</b>
3.1 BANCADA MANUAL VS. BANCADA AUTOMATIZADA.....	61
3.1.1 <i>Bancada manual</i> .....	61
3.1.2 <i>Bancada automatizada</i> .....	62
3.2 PROCEDIMENTOS DOS ENSAIOS.....	64
3.2.1 <i>Ensaio de partida equalizada</i> .....	65

3.2.2	<i>Ensaio de partida diferencial</i> .....	67
3.2.3	<i>Ensaio de tombamento</i> .....	70
3.3	CONCLUSÕES .....	71
<b>4.</b>	<b>INTEGRAÇÃO DO SISTEMA DE INJEÇÃO DE CC A BANCADA DE ENSAIOS DE PARTIDA E TOMBAMENTO AUTOMATIZADA</b> .....	<b>73</b>
4.1	INTEGRAÇÃO DO SISTEMA DE INJEÇÃO CC A BANCADA DE ENSAIOS DE PARTIDA E TOMBAMENTO AUTOMATIZADA .....	73
4.1.1	<i>Determinação da tensão máxima proporcionada pela inserção de CC</i> .....	75
4.1.2	<i>Determinação da tensão mínima proporcionada pela inserção de CC</i> .....	76
4.1.3	<i>Ensaio de partida equalizada com inserção do SICC</i> .....	78
4.1.4	<i>Ensaio de partida diferencial com inserção do SICC</i> .....	79
4.1.5	<i>Ensaio de tombamento com inserção do SICC</i> .....	81
4.2	CONCLUSÕES .....	81
<b>5.</b>	<b>AVALIAÇÃO DA BANCADA DE ENSAIOS DE PARTIDA E TOMBAMENTO APRIMORADA</b> .....	<b>83</b>
5.1	COMPARAÇÃO DE RESULTADOS .....	83
5.1.1	<i>Ensaio de partida equalizada</i> .....	86
5.1.2	<i>Ensaio de partida diferencial</i> .....	88
5.1.3	<i>Ensaio de tombamento</i> .....	88
5.1.4	<i>Aquecimento acelerado</i> .....	96
5.2	ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	98
5.2.1	<i>Aquecimento acelerado</i> .....	98
5.2.2	<i>Ensaio de partida e tombamento</i> .....	100
<b>6.</b>	<b>AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DA VARIAÇÃO DA CURVA DE PRESSÃO NOS RESULTADOS DOS ENSAIOS DE TOMBAMENTO</b> .....	<b>103</b>
6.1	ESTRATÉGIA ADOTADA .....	103



6.2	ENSAIOS REALIZADOS E RESULTADOS.....	104
6.3	ANÁLISE DE RESULTADOS .....	116
<b>7.</b>	<b>DEFINIÇÃO DE ARQUITETURA PARA A BANCADA DE ENSAIOS DE PARTIDA E TOMBAMENTO .....</b>	<b>123</b>
7.1	ARQUITETURA ATUAL E ESPECIFICAÇÃO DE SINAIS .....	123
7.2	COMPARAÇÃO DOS SISTEMAS DISPONÍVEIS NO MERCADO .....	124
7.3	ARQUITETURA PROPOSTA.....	126
7.4	CONCLUSÕES.....	127
<b>8.</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>129</b>
8.1	CONCLUSÕES.....	129
8.1.1	<i>Integração do SICC .....</i>	<i>129</i>
8.1.2	<i>Avaliação da BPT aprimorada.....</i>	<i>129</i>
8.1.3	<i>Avaliação da influência da variação da curva de pressão nos resultados dos ensaios de tombamento.....</i>	<i>130</i>
8.1.4	<i>Definição de arquitetura para BPT aprimorada.....</i>	<i>130</i>
8.2	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	130
	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>133</b>
	<b>APÊNDICE - PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS DE SISTEMAS DE MEDIÇÃO E AUTOMAÇÃO.....</b>	<b>141</b>



# 1. INTRODUÇÃO

## 1.1 Contextualização

Dentre os diversos setores e produtos da indústria que influenciam o cotidiano de uma sociedade, se destacam as de refrigeração e suas aplicações.

Circuitos de refrigeração estão presentes na grande maioria das residências e estabelecimentos comerciais que possuem acesso à rede elétrica, constituindo sistemas para armazenamento de alimentos (refrigeradores), condicionamento de ar e outros. Todos<sup>1</sup> esses circuitos possuem pelo menos um compressor de refrigeração (DOSSAT, 2004).

Dessa maneira, pode-se ter ideia do enorme mercado relacionado ao comércio de compressores de refrigeração. Esse mercado é disputado por grandes grupos empresariais que buscam atender às necessidades dos clientes da melhor forma. Como o mercado é cada vez mais competitivo e os clientes mais exigentes, é necessário forte investimento em pesquisa e desenvolvimento para se obter um produto que represente o estado-da-arte e ganhe destaque no mercado.

Nesse contexto, ensaios de compressores de refrigeração são muito importantes para o projeto de novos produtos, aperfeiçoamento ou adequação de um produto para determinada aplicação. Portanto, mostra-se necessário ensaiá-los, para quantificar suas características, estudá-las e compará-las com os objetivos estabelecidos.

À medida que produtos tornam-se mais eficientes, aumenta-se também a dificuldade de melhoria desses, pois quanto mais se aproxima de uma condição limite, maior será o esforço despendido para se obter uma nova melhoria. No caso dos compressores de refrigeração não é diferente, ou seja, para melhorar suas características e adequação a determinada aplicação, melhores deverão ser os sistemas utilizados nos ensaios e medição das grandezas envolvidas.

---

<sup>1</sup>Salvo raras exceções, onde são utilizados circuitos de refrigeração por absorção. Neles são utilizados dois fluidos de trabalho e há necessidade de uma fonte externa de calor. São indicados para situações onde não há disponibilidade de energia elétrica ou onde o ruído proporcionado pelo compressor é crítico (MORAN, M. J; SHAPIRO, H, N, 2010).

O Laboratório de Instrumentação e Automação de Ensaios – LIAE<sup>2</sup> – possui uma parceria com a empresa líder mundial na fabricação de compressores herméticos de refrigeração. O LIAE atua em diversas linhas de pesquisa que têm como objetivo a geração e o aprimoramento de recursos avançados de medição e automatização, no apoio à garantia da qualidade e desenvolvimento de produtos inovadores em refrigeração.

Um dos projetos em andamento, no qual esta dissertação se insere, contempla os ensaios de partida e tombamento de compressores alternativos herméticos. Nesses ensaios, o compressor é posto em operação em condições extremas, como, elevadas pressões de sucção e descarga com tensões de alimentação diferentes da nominal. Dessa maneira, avalia-se a partir de quais condições o compressor deixa de operar através dos ensaios de tombamento, ou seja, determinam-se as condições máximas que o motor elétrico do compressor é capaz de operar<sup>3</sup> (SCHLICKMANN, 2012; COSTA, 2010; DEMAY, 2008).

Essas condições representam os limites de operação do compressor e são de fundamental importância para desenvolvimento e aprimoramento de novos compressores, bem como para sua adequação a determinado sistema. As curvas geradas pelos ensaios de partida e tombamento indicam o quão próximos estão os limites de operação do compressor com os do sistema em que ele será utilizado. O conhecimento dessa proximidade é que garante o funcionamento correto e seguro do sistema, mesmo em condições extremas. Por exemplo, se um compressor está superdimensionado para um sistema, as curvas limite operam distantes uma da outra, no entanto isso encarece o produto, pois é utilizado um compressor mais caro e que não tem sua capacidade totalmente utilizada. Caso o compressor tenha uma curva limite de operação próxima da curva que o sistema exige, ocorrerá o risco de, em uma situação extrema, o mesmo não entregar a solicitação demandada pelo sistema. Dessa maneira, percebe-se a necessidade de se

---

<sup>2</sup>Setor do Laboratório de Metrologia e Automatização – LABMETRO do Departamento de Engenharia Mecânica da UFSC.

<sup>3</sup>Em especial, a curva de tombamento indica a máxima solicitação mecânica que um determinado motor elétrico é capaz de prover e mostra suas regiões estáveis e instáveis de funcionamento (TOLIYAT; KLIMAN, 2004; FITZGERALD; KINGSLEY; UMANS, 2003; PADUANO; GREITZER; EPSTEIN, 2001). É imprescindível sua análise para correta especificação de um equipamento que se utiliza de motor elétrico, frente às solicitações de sua aplicação (TOLIYAT; KLIMAN, 2004).

otimizar a escolha do componente para um determinado produto, no caso, o compressor que melhor atende às necessidades (sem estar superdimensionado) de determinado sistema de refrigeração.

Diante da importância desses ensaios, há uma bancada manual de ensaios de compressores de refrigeração operando sob condições extremas na empresa fabricante de compressores de refrigeração e parceira deste projeto. Visto que ela é manual e carrega todas as limitações inerentes dessa condição, vislumbrou-se automatizá-la.

Essa linha de pesquisa teve início com COSTA (2010), que realizou um trabalho sobre a automação de ensaios de compressores de refrigeração operando sob condições extremas.

Depois, SCHLICKMANN (2012) propôs uma forma para determinação da incerteza da curva de tombamento e aprimorou (em termos de robustez, tempo de resposta e incerteza de medição) o método de medição da temperatura de enrolamento do compressor, de modo a possibilitar que a medição seja feita com o compressor energizado e sem necessidade de instrumentação<sup>4</sup>. Para isso, aprimorou um Sistema de Injeção de Corrente Contínua – SICC –, desenvolvido por SILVEIRA (2010)<sup>5</sup>, voltado para as necessidades da BPT automatizada, embora não tenha integrado o SICC a ela.

O SICC aprimorado por SCHLICKMANN (2012) apresenta características de funcionamento e operação diferentes das dos termopares, no caso de medição de temperatura, e dos métodos utilizados na BPT automatizada para aquecimento acelerado do compressor. Por isso, para sua integração na rotina de ensaios e *software* da BPT automatizada, é necessário que atenda a determinadas condições.

---

<sup>4</sup>A Bancada de Ensaios de Partida e Tombamento – BPT – automatizada, ponto de partida deste trabalho, necessitava que os compressores nela utilizados fossem instrumentados com termopares para se realizar a medição da temperatura de seus enrolamentos.

<sup>5</sup>SILVEIRA (2010) desenvolveu um Sistema de Injeção de Corrente Contínua – SICC – para diminuição de tempo de transitório em ensaios de desempenho que permite o aquecimento acelerado dos compressores através da medição da resistência ôhmica de seus enrolamentos. Para tanto, baseou-se em trabalhos anteriores, como de SCUSSEL (2006) que buscou formas e propôs soluções para o aquecimento acelerado de compressores e PACHECO (2007) que desenvolveu um sistema capaz de medir a resistência ôhmica do enrolamento do motor de compressores herméticos energizados.

Outro ponto relevante e ainda não abordado é a influência da variação da curva de pressão, a qual a descarga do compressor em teste está submetida, nos resultados dos ensaios de tombamento.

A curva de pressão da descarga indica o seu comportamento durante a elevação de pressão até o instante de tombamento, depois que a condição de pressão imposta na sucção do compressor está estabilizada, o que corresponde ao *setpoint* de ensaio. É necessário identificar quais são as influências nos resultados dos ensaios quando, a partir de um mesmo *setpoint* de ensaio, se alteram as curvas de pressão, as quais a descarga do compressor em teste está submetida, até o instante de tombamento.

Com tais questões respondidas, e como o projeto aproxima-se de uma concepção final, é possível estabelecer uma arquitetura de BPT que possua características metrológicas adequadas ao processo de medição, além de boa reprodutibilidade. Para tanto, o trabalho desenvolvido por PETROVIC (2007) é de grande utilidade.

PETROVIC (2007) propôs uma arquitetura para um sistema de automação aplicado a ensaios de desempenho de compressores de refrigeração que permitisse elevado grau de automação aliado a resultados com baixos níveis de incerteza, comparados aos sistemas utilizados anteriormente para o mesmo tipo de ensaio. Visa-se realizar procedimento semelhante na BPT. Com essas questões resolvidas, é possível estabelecer arquitetura que atenda às necessidades da bancada, que considere fatores externos (custos, facilidade de programação, entre outros) aliados a baixos níveis de incerteza nos componentes envolvidos, quando comparados aos atualmente empregados.

## 1.2 Objetivos do trabalho

O objetivo geral deste trabalho é o aumento de produtividade, reprodutibilidade e repetibilidade, assim como diminuição das incertezas, de uma bancada automatizada de ensaios de partida e tombamento de compressores de refrigeração em condições extremas, além de validar seu desenvolvimento.

Para atingir o objetivo geral, é necessários atender aos objetivos específicos descritos a seguir:

- integrar um SICC na rotina de ensaios, *hardware* e *software* da bancada, a fim de reduzir o tempo de ensaio pela redução do tempo de transitório e permitir estimativa da temperatura

do enrolamento do compressor sem necessidade de instrumentá-lo ou desligá-lo;

- realizar ensaios e comparar os resultados com os obtidos na bancada manual instalada na empresa, com o propósito de validar a BPT aprimorada<sup>6</sup>;
- avaliar a influência da variação da curva de pressão, a qual a descarga do compressor em teste está submetida, nos resultados dos ensaios de tombamento;
- definir uma arquitetura final para ser aplicada na BPT aprimorada conforme as necessidades identificadas, que proporcione maior reprodutibilidade e confiabilidade metrológica.

### 1.3 Estratégia de solução

O desenvolvimento desta dissertação ocorreu com a execução das seguintes atividades:

- estabelecimento, através de análise teórica e experimental, de procedimento para integração do SICC a BPT automatizada e posterior operação do mesmo;
- comparação dos resultados dos ensaios empregando o SICC com os obtidos na bancada manual;
- avaliação teórica e experimental da influência da variação da curva de pressão de descarga no compressor em teste nos resultados dos ensaios de tombamento;
- proposição de arquitetura para BPT aprimorada com base nos requisitos definidos, comparação com arquitetura atual e análise de disponibilidade de mercado.

---

<sup>6</sup>Considera-se BPT aprimorada aquela com as modificações e implementações realizadas neste projeto. Automatizada e manual, como já comentado, respectivamente são as de ponto inicial deste trabalho e a utilizada na empresa fabricante de compressores de refrigeração.

## 1.4 Estrutura da dissertação

Esta dissertação está dividida em 8 capítulos.

É realizada revisão da literatura no capítulo 2 sobre os assuntos tratados neste trabalho, iniciando com os conceitos básicos de circuitos e compressores de refrigeração. Na sequência, é feito um detalhamento do que são ensaios de partida e de tombamento. Explicam-se também conceitos relacionados à questão da variação da curva de pressão na qual o compressor está submetido. Realiza-se ainda revisão sobre conceitos básicos de injeção de CC em motores CA, assim como suas aplicações no âmbito desta dissertação. Por fim, é apresentada revisão acerca de arquiteturas aplicadas em bancadas com alto grau de automação, bem como os conceitos envolvidos nessa análise.

No capítulo 3 são apresentadas as diferenças entre a bancada manual (utilizada atualmente na empresa) e a automatizada (ponto inicial do presente projeto), assim como os procedimentos necessários para os ensaios.

O capítulo 4 aborda como foi feita a integração do SICCC na rotina de ensaios e no *software* da bancada.

Avalia-se no capítulo 5 os resultados encontrados através de ensaios realizados na BPT aprimorada. Os resultados obtidos são comparados com os obtidos na bancada manual. O novo método de aquecimento acelerado do compressor é ainda objeto de análise.

No capítulo 6 é exposta a estratégia utilizada, assim como os ensaios realizados e resultados obtidos, para avaliação da influência da variação da curva de pressão de descarga no compressor em teste nos resultados dos ensaios de tombamento.

O capítulo 7 aponta as características da arquitetura atual da BPT e suas necessidades. Na sequência, é realizada uma análise de disponibilidade de mercado para as soluções mais adequadas e, por fim, a proposta final de arquitetura para a BPT é apresentada.

O capítulo 8 contém as considerações finais do trabalho e sugestões para trabalhos futuros.

Ao final dos capítulos 4, 5, 6 e 7 são apresentadas conclusões específicas referentes aos assuntos em questão.



## 2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1 Circuitos de refrigeração

Durante muito tempo, o gelo foi a solução adotada para problemas relacionados à refrigeração. Utilizavam-se recipientes isolados, de maneira que sua parte inferior fosse preenchida com o que se desejava resfriar ou manter resfriado (alimentos, geralmente), e a superior com gelo (natural ou produzido em centrais). Desse modo, o calor era transferido do que se desejava resfriar para o gelo. O processo de refrigeração ocorria enquanto durasse o gelo ou houvesse reposição do mesmo. Portanto, para que o efeito refrigerante se mantivesse, era necessária a reposição contínua de gelo (PIZARRO, 2007; DOSSAT, 2004).

A refrigeração industrial tornou-se comercialmente importante durante o século XVIII devido ao transporte e venda de alimentos (ALTHOUSE; TURNQUIST; BRACCIANO, 2004). Com os avanços da tecnologia, o gelo foi substituído pelos circuitos com mudança de fase de fluido refrigerante (COSTA, 2010). Com o seu uso, em sistemas de refrigeração, o calor é retirado do ambiente que se deseja resfriar e rejeitado para o ambiente externo. O resfriamento por esse procedimento passou a ser conhecido como refrigeração por compressão mecânica (DOSSAT, 2004). A base de todo o processo de refrigeração é a mudança de fase do fluido refrigerante (SCUSSEL, 2006). É nessa mudança que ocorre a transferência de grande volume de energia do ambiente que se deseja resfriar para o ambiente quente; espaço no qual será rejeitado o calor.

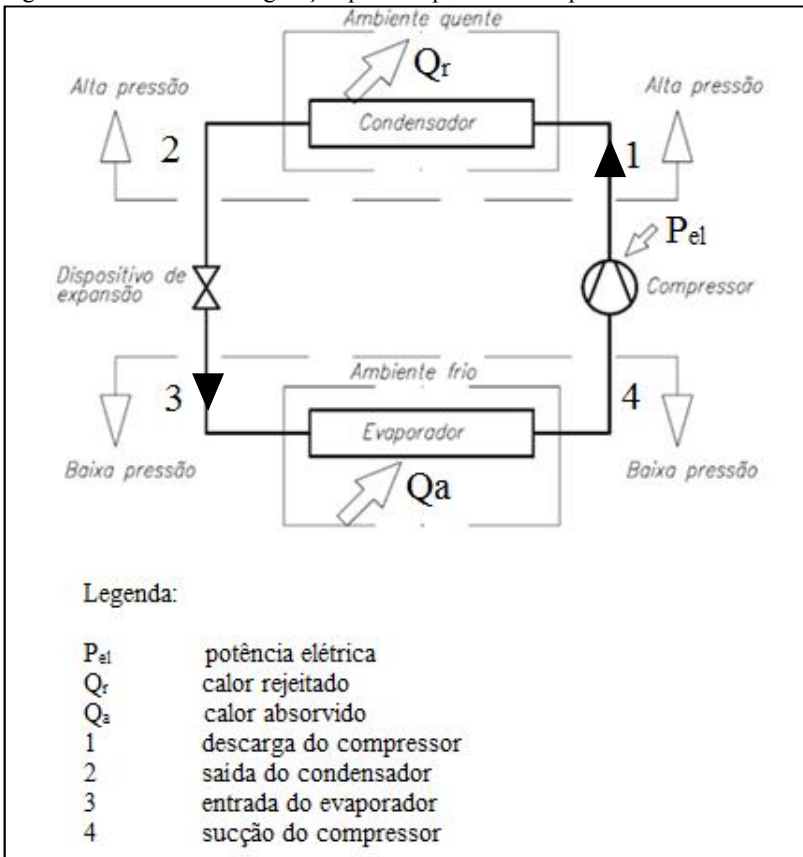
Atualmente, importantes atividades humanas dependem fortemente da presença de circuitos de refrigeração, como condicionamento de ambientes, estocagem e transporte de medicamentos e alimentos, além de processos de fabricação (COSTA, 2010; SCUSSEL, 2006; STOECKER; SAIJ JABARDO, 2002).

Circuitos de refrigeração podem ser compreendidos como sequências de equipamentos que atuam de modo conjunto, de maneira a transferir calor de um ambiente a uma baixa temperatura para outro submetido a uma temperatura maior (STOECKER; SAIJ JABARDO, 2002). Percebe-se, portanto, que um circuito de refrigeração opera de maneira contrária ao comportamento natural da transferência de calor, o que resulta na necessidade de uma fonte externa de energia para que essa transferência ocorra.

Aplicações para circuitos de refrigeração são amplamente diversificadas, culminando em grande diversidade de configurações de circuitos (STOECKER; SAIZ JABARDO, 2002). Parâmetros como temperatura de evaporação, tamanho e custo influenciam na escolha da configuração mais adequada para determinada aplicação.

O circuito de refrigeração com processo mecânico de compressão e mudança de fase é, basicamente, composto por cinco elementos: compressor, condensador, dispositivo de expansão, evaporador e tubulação (SCUSSEL, 2006), como apresentado na figura 1.

Figura 1: Circuito de refrigeração por compressão de vapor



Fonte: Adaptada de (SCUSSEL, 2006).

O ciclo de refrigeração ocorre com a compressão de vapor pelo compressor; liquefação após compressão, pela remoção de calor no condensador; expansão e evaporação, com a cessão de calor pelo ambiente externo ao fluido que circula no interior do evaporador (STOECKER; SAIZ JABARDO, 2002).

A análise ponto a ponto feita na sequência pode ser acompanhada tanto na figura 1 como na figura 2.

No ponto 1 o fluido encontra-se no estado gasoso superaquecido. Ao atravessar o condensador (trocador de calor a alta temperatura), o fluido transfere calor para um meio externo<sup>7</sup> que está numa temperatura mais baixa e, com isso, seu estado é alterado para líquido sub-resfriado – ponto 2.

Ao passar pelo dispositivo de expansão, a pressão do fluido é diminuída (expansão isoentálpica) e o fluido passa para líquido superaquecido – ponto 3. Nele, o fluido refrigerante, em um estado em que o mínimo calor absorvido fará com que passe da fase líquida para a gasosa<sup>8</sup>, atravessa o evaporador (trocador de calor a baixa temperatura) e retira calor do meio a ser resfriado. Dessa maneira, o refrigerante continua em estado de baixa pressão e passa para vapor superaquecido – ponto 4.

No ponto 4, o fluido se encontra nas condições ideais para ser aspirado e comprimido pelo compressor. O ciclo então é repetido continuamente conforme necessidade.

Devido à diferença de temperatura proporcionada pelas mudanças de fases de líquido e vapor, o calor flui do ambiente circundante para o fluido, ou seja, calor é retirado do ambiente que se deseja resfriar e, conseqüentemente, ocorre a queda de temperatura do mesmo.

As temperaturas de evaporação e de condensação do circuito dependem do tipo de refrigerante utilizado e dos níveis de pressão praticados nas linhas de alta e baixa temperatura (SCUSSEL, 2006).

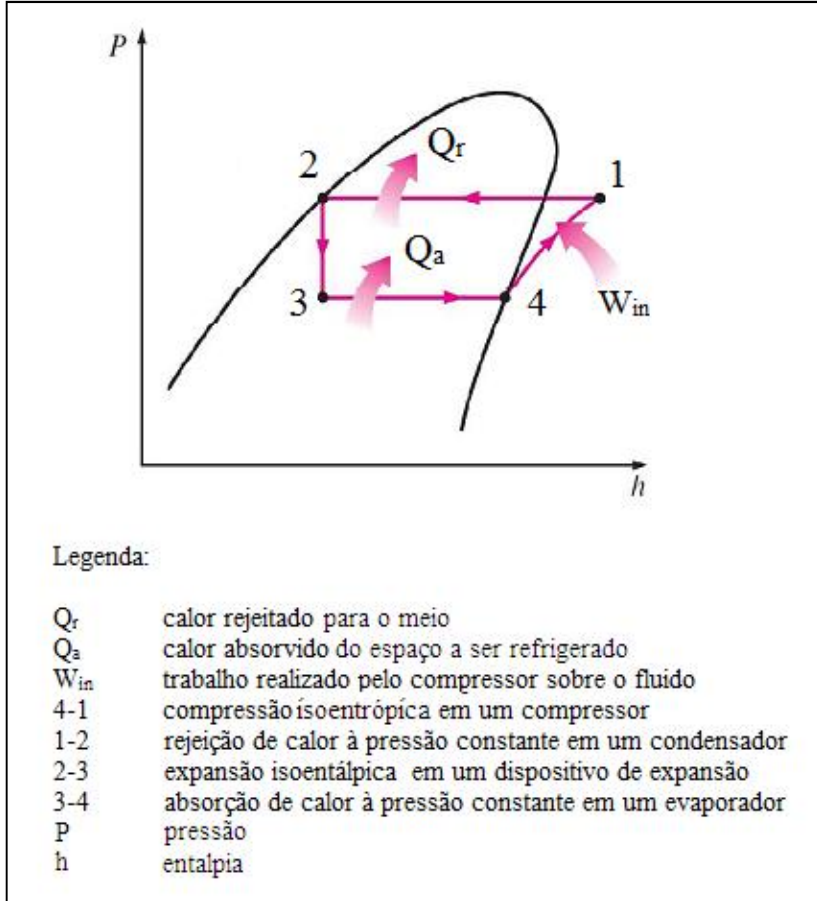
---

<sup>7</sup>Nessa etapa, quando o vapor é resfriado, suas moléculas perdem velocidade, não conseguem superar as forças atrativas existentes entre si e voltam à estrutura molecular do estado líquido (DOSSAT, 2004).

<sup>8</sup>Nessa etapa, durante a evaporação de um líquido, as moléculas que possuem maior energia escapam de sua superfície. Quando uma parte de líquido vaporiza, uma quantidade de calor de evaporação é absorvida por essa parte. Esse calor pode ser proveniente da massa do líquido, do ar circundante ou dos objetos adjacentes (DOSSAT, 2004).

Outra maneira de demonstrar os mesmos pontos é através do diagrama P-h (Pressão-Entalpia), que pode ser observado na figura 2.

Figura 2: Diagrama P-h do ciclo de refrigeração ideal por compressão de vapor.



Fonte: Adaptada de (ÇENGEL; BOLES, 2006).

## 2.2 Compressores para refrigeração

O principal componente dos circuitos de refrigeração é o compressor (SCHLICKMANN, 2012). Ele é o dispositivo responsável pela entrega da energia externa necessária ao sistema, para que o fluido refrigerante circule no circuito e realize as trocas de calor. Em outras

palavras, o compressor tem por função o aumento da pressão do fluido na fase de vapor (levando-o de um estado de baixa para alta pressão). Isso acontece através da realização de trabalho sobre o fluido, que proporciona aumento de sua temperatura como efeito indesejado. Tal diferença de pressão provoca a movimentação do fluido através da tubulação do circuito.

Em refrigeração, são utilizados praticamente todos os tipos de compressores: alternativos, rotativos – parafuso e de palhetas – e centrífugos. Os tipos mais comuns de compressores industriais em aplicações de até 1 MW são os alternativos e os rotativos parafuso (STOECKER; SAIZ JABARDO, 2002).

Estudos (IBGE, 2010) mostram que, no triênio 2007/2008/2009, 92,1% dos 57492895 domicílios particulares permanentes brasileiros possuíam, ao menos, um refrigerador. Ainda, 15,8% desses domicílios possuíam, ao menos, um freezer (IBGE, 2010). Assim, pode-se perceber o grande mercado relacionado a compressores, tendo por base somente o mercado nacional. Em refrigeração doméstica, são utilizados compressores alternativos herméticos (PACHECO, 2007). Por isso, este trabalho foca em compressores alternativos, especificamente nos modelos herméticos, largamente utilizados nos sistemas de refrigeração domésticos.

Compressores alternativos podem ser separados em distintos grupos, destacando-se os tipos aberto, semi-hermético e hermético. No tipo aberto, o eixo de acionamento atravessa a carcaça e é acionado por um motor externo. Já os semi-herméticos e os herméticos alojam na própria carcaça o compressor propriamente dito e o motor de acionamento. O hermético possui apenas os acessos de entrada e saída do refrigerante e conexões elétricas na carcaça, ao passo que o semi-hermético permite a remoção do cabeçote; permitindo, por exemplo, acesso às válvulas e os pistões (STOECKER; SAIZ JABARDO, 2002).

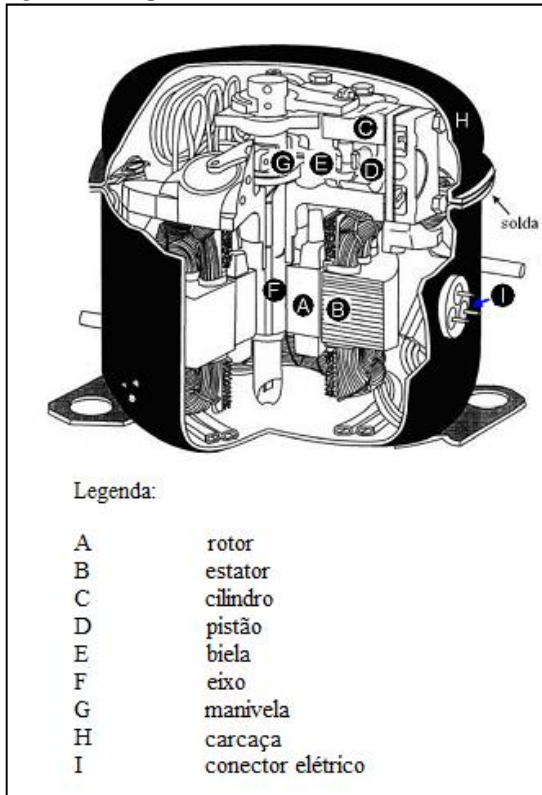
Como desvantagem, nos herméticos não se tem acesso ao interior do compressor, de modo que não é possível realizar qualquer tipo de manutenção. Por outro lado, como vantagem, justamente por ele ser hermético, atenuam-se os problemas relacionados às vedações e vazamentos.

A figura 3 mostra os principais componentes internos<sup>9</sup> de um compressor alternativo hermético.

---

<sup>9</sup>Com destaque para o estator, local onde se deve medir temperatura nos ensaios de partida e tombamento. Dessa forma, percebe-se a dificuldade

Figura 3: Compressor alternativo hermético



Fonte: Adaptada de (HENKLEIN, 2006).

Os primeiros modelos de compressores alternativos para refrigeração foram desenvolvidos entre 1860 e 1875. Desde então, o mecanismo de compressão sofreu leves modificações, ocorrendo maiores melhorias relacionadas principalmente à construção e ao emprego de novos materiais (SERRANO, 2002).

Já nas décadas de 60 e 70 do século passado houve uma melhora significativa em termos tecnológicos, como, operação em frequências rotacionais mais altas e válvulas mais eficientes (SCUSSEL, 2006).

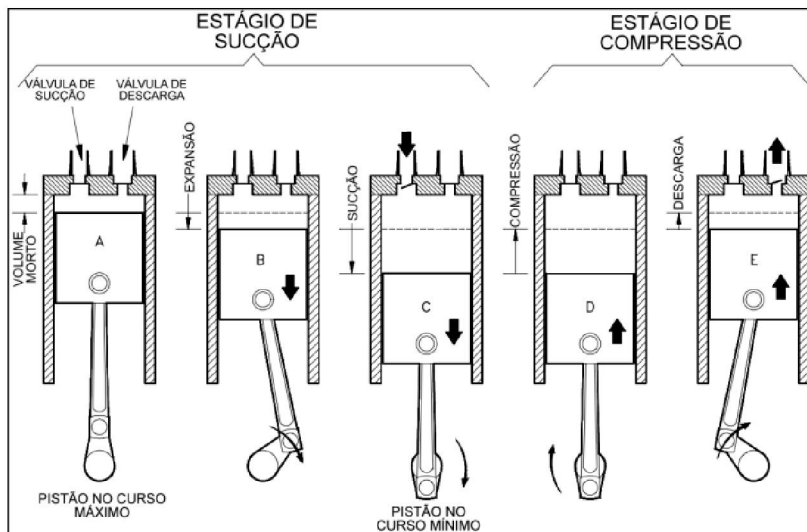
Compressores alternativos possuem um pistão conectado ao eixo do motor através de uma biela, válvulas que restringem o fluxo do fluido

---

de instrumentação com termopares para esse tipo de compressor, levando em consideração que originalmente o compressor é soldado (hermético).

em apenas um sentido e uma câmara de compressão. O ciclo de compressão de um compressor alternativo é mostrado na figura 4.

Figura 4: Ciclo de compressão em um compressor alternativo



Fonte: Adaptado de (U.S. DEPARTMENT OF ENERGY, 2013).

A partir da etapa A, o pistão se movimenta para baixo, de maneira que a pressão interna na câmara de compressão se torna menor que a pressão externa – etapa B. Após isso, inicia-se a etapa C, onde a válvula de sucção é aberta e o fluido é aspirado, preenchendo a câmara de compressão até que o pistão atinja seu curso mínimo. A partir da etapa D é iniciada a compressão. A válvula de sucção é fechada pelo aumento de pressão no interior do cilindro para evitar o fluxo de fluido no sentido contrário, e o pistão se movimenta para cima comprimindo o fluido. A compressão continua ocorrendo até o momento em que a pressão interna da câmara de combustão atinge um valor imediatamente maior que a pressão de descarga. Assim, na etapa E, começa a ocorrer a descarga, com a válvula de descarga se abrindo para permitir a saída do fluido até que o pistão atinja novamente o seu curso máximo (etapa A) e se inicia um novo ciclo.

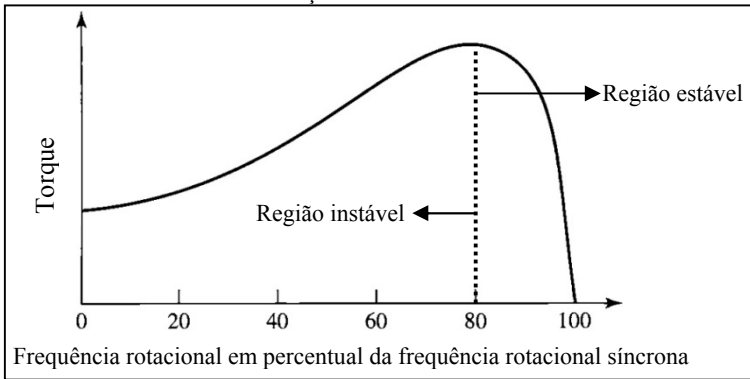
Compressores herméticos de refrigeração produzidos pela empresa parceira deste projeto utilizam motores de indução do tipo

gaiola de esquilo<sup>10</sup>, nos quais os enrolamentos do estator são excitados por corrente alternada, que induzem corrente no rotor (SCHLICKMANN, 2012).

O rotor de um motor de indução não gira em sincronismo com o campo elétrico do estator, isso leva ao chamado “escorregamento”<sup>11</sup> do rotor em relação a esse campo, dando origem às correntes induzidas no rotor e, portanto, ao conjugado ou torque (FITZGERALD; KINGSLEY; UMANS, 2003). Esse escorregamento é proporcional ao torque de carga, logo, quanto maior o torque de carga (torque resistente), maior será a diferença entre o campo girante e a frequência rotacional do rotor (SCHLICKMANN, 2012).

Estudos mostram que o maior torque produzido por um motor de indução é obtido quando a frequência rotacional do rotor é aproximadamente 80% da frequência rotacional síncrona. Abaixo dessa frequência, o torque diminui de maneira substancial (FITZGERALD; KINGSLEY; UMANS, 2003). A figura 5 mostra esse comportamento.

Figura 5: Curva característica do conjugado (torque) vs. frequência rotacional síncrona de um motor de indução



Fonte: Adaptada de (SCHLICKMANN, 2012).

Percebe-se então que há uma região de funcionamento estável onde, caso ocorra solicitação de maior torque, o motor é capaz de

<sup>10</sup>Excetuando-se os modelos com capacidade variável (VCC), que compõem uma pequena parcela dos modelos produzidos.

<sup>11</sup>Frequência de escorregamento é a diferença entre a frequência de alimentação e a rotacional (DEL TORO, 1999).



atender, com decréscimo de sua frequência rotacional até 80% de sua frequência nominal. A outra região é a instável, onde, caso o torque de carga continue aumentando, a frequência rotacional diminuirá e a diferença entre o torque de carga e o fornecido pelo motor aumentará rapidamente, até um ponto em que a frequência rotacional será nula, caracterizando o bloqueio do motor (HUGHES, 2006).

Em sistemas de refrigeração, os circuitos são projetados e montados de maneira que as pressões impostas na sucção e descarga do compressor operem em valores dentro de limites que proporcionem o funcionamento contínuo e adequado do sistema. Ou seja, limites em que o compressor esteja operando dentro da sua região estável, permitindo que ele suporte situações extremas ou não usuais. O desempenho dos compressores nessas condições é avaliado em ensaios de partida e tombamento.

### 2.3 Ensaios de partida e tombamento

Ensaios de partida e tombamento têm como objetivo caracterizar a capacidade dos compressores operarem em condições adversas ou extremas, que são os limites a partir dos quais haverá prejuízo significativo no desempenho ou parada do motor, do compressor, por excesso de solicitação em seu eixo.

Para nenhum dos ensaios (partida e tombamento) há normas que regem os procedimentos a serem adotados para padronização e repetição dos mesmos. Portanto, neste trabalho serão adotados os parâmetros e procedimentos de ensaio da empresa fabricante de compressores herméticos de refrigeração e parceira deste projeto.

Parte fundamental em ensaios de partida e tombamento é a temperatura do enrolamento do compressor, pois a resistência ôhmica do enrolamento é função de sua temperatura, assim como a corrente que percorre os enrolamentos é função da sua resistência. Portanto, o torque produzido pelo motor é afetado inversamente pela temperatura do enrolamento (SCHLICKMANN, 2012). Logo, para os ensaios de partida e tombamento, é fundamental padronizar as faixas de temperaturas dentro das quais os ensaios ocorrem, visto que ambos os ensaios são relacionados ao torque que o motor consegue proporcionar.

### 2.3.1 Ensaio de partida

No ensaio de partida é avaliada a mínima tensão de alimentação necessária para que o motor do compressor entre em funcionamento em determinadas condições de carga e se mantenha estável<sup>12</sup> após a partida; no caso, em situações equalizadas ou diferenciais de pressão nas conexões de entrada e saída do compressor.

O resultado deste ensaio é fundamental para que o compressor atenda a determinada aplicação<sup>13</sup>, mesmo que ela não seja usual. Por exemplo, um refrigerador residencial que passe por um corte do fornecimento de energia elétrica; dependendo do tempo do corte, a partida será equalizada ou diferencial.

Caso o tempo do corte da energia elétrica seja longo, as pressões no circuito tenderão a se equalizar, até estabilizarem, em função da temperatura ambiente. Com o retorno da energia elétrica, o compressor será religado, em condições de pressão equalizadas.

Já no caso em que o tempo do corte de energia é pequeno ou momentâneo, o compressor tende a ser religado em condições próximas às de operação, ou seja, com grandes diferenças de pressão. Como no caso das pressões equalizadas, o compressor deve conseguir partir e entrar em regime permanente.

O ensaio de partida é realizado conforme as seguintes etapas (EMBRACOa, 2003):

- a) pré-aquecimento do enrolamento do motor do compressor em teste para  $(105 \pm 4) ^\circ\text{C}^{14}$ ;
- b) ajuste das pressões (equalizada ou diferencial) de evaporação e condensação do compressor em teste;
- c) alimentação do compressor com determinada tensão e tentativa de partir o motor do compressor. Monitoramento da

---

<sup>12</sup>Após a partida do motor do compressor, seu enrolamento auxiliar (de partida) é desligado e o rotor do motor deve manter sua rotação para aquela condição.

<sup>13</sup>Os ensaios de partida também são fundamentais para a correta especificação do protetor térmico e dos ciclos do termostato no caso de refrigeradores domésticos. Ambos ligam e desligam o compressor conforme necessidade.

<sup>14</sup>As condições delimitam as faixas de temperaturas em que o ensaio pode ocorrer (padronização e repetibilidade), além de permitir limites de temperatura em que o compressor pode operar sem que haja danos à peça.

frequência rotacional do mesmo. Caso o motor do compressor não tenha partido, aumenta-se<sup>15</sup> a tensão de alimentação e realiza-se nova tentativa. Caso contrário, diminui-se a tensão de alimentação, e realiza-se nova tentativa;

- d) a mínima tensão de partida é definida como a tensão em que o motor do compressor consegue partir e, após desligamento do enrolamento auxiliar, manter seu funcionamento. O compressor não deve ser capaz de partir em tensão de alimentação imediatamente inferior (decremento de 1 V) e o procedimento precisa ser repetido 3 vezes para definir a mínima tensão de partida.

### 2.3.2 Ensaio de Tombamento

No ensaio de tombamento são avaliadas as condições máximas de carga nas quais o compressor em funcionamento é ainda capaz de manter sua operação na região estável. Assim como o ensaio de partida, seu resultado é fundamental na seleção de um compressor para determinada aplicação.

Em outras palavras, neste ensaio avalia-se o torque máximo (80% da frequência rotacional) proporcionado pelo motor elétrico através da imposição de carga mecânica. O ensaio de tombamento é realizado conforme as seguintes etapas (EMBRACOb, 2003):

- a) pré-aquecimento do enrolamento do motor do compressor para  $(80 \pm 4)$  °C;
- b) alimentação do compressor com tensão determinada<sup>16</sup> para o ensaio;
- c) ajuste da temperatura de evaporação do compressor em teste (conforme *setpoint* do ensaio) com ele em funcionamento;

---

<sup>15</sup>Para compressores com tensão de alimentação nominal de 115 V varia-se 1 V a cada nova tentativa de partida. Já os com alimentação nominal de 220 V, varia-se 2 V a cada nova tentativa de partida (EMBRACOb, 2003).

<sup>16</sup>O ensaio de tombamento é realizado com 90% da tensão de alimentação nominal (EMBRACOb, 2003). Procedimento adotado para se obter maior margem de segurança.

- d) com a temperatura de evaporação no *setpoint* de ensaio, e tendo sido verificada a condição de temperatura, inicia-se o aumento da pressão de descarga indefinidamente e, por consequência, a pressão e temperatura de condensação (com a temperatura de evaporação sendo mantida no *setpoint* do ensaio), até o momento em que o motor do compressor não consegue proporcionar torque suficiente para vencer o torque de carga, ou seja, não consegue manter sua frequência rotacional. Este instante é denominado como instante de tombamento, caracterizado por um par de pressões no evaporador e condensador, correspondendo, respectivamente, a uma temperatura de evaporação e condensação.

O ensaio de tombamento é realizado para diferentes pressões de sucção, com o intuito de gerar uma curva de tombamento, com os pares de pressão de evaporação e condensação.

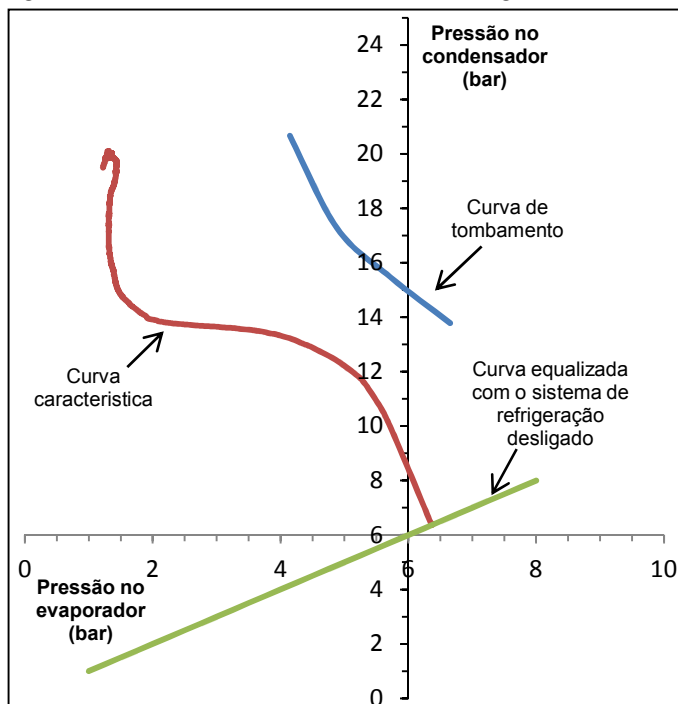
A curva de tombamento é então confrontada com as curvas características dos sistemas de refrigeração, que representam os pares de pressões de evaporação e condensação ao qual o compressor estará sujeito em operação, em determinado sistema de refrigeração.

A correta seleção de um compressor para um sistema de refrigeração leva, respectivamente, a suas curvas de tombamento e característica nunca se cruzarem, sendo que a de tombamento deve sempre estar acima da característica.

A figura 6 mostra essas curvas para um compressor e um sistema de refrigeração genéricos. No caso, o compressor está adequado para o sistema de refrigeração, ou seja, as curvas não se cruzam. Quanto mais distantes elas estiverem uma da outra, menor a chance de o compressor não prover a condição solicitada pelo sistema, em uma condição limite. Deve-se também atentar ao fato que curvas muito distantes representam a utilização de um compressor superdimensionado para aquele sistema.

A curva verde representa os pares de pressões de evaporação e condensação equalizadas no sistema de refrigeração desligado, em função da temperatura ambiente. A curva característica, além de mostrar a solicitação imposta pelo sistema, indica a partir da onde o sistema de refrigeração é ligado.

Figura 6: Curvas característica e de tombamento genéricas

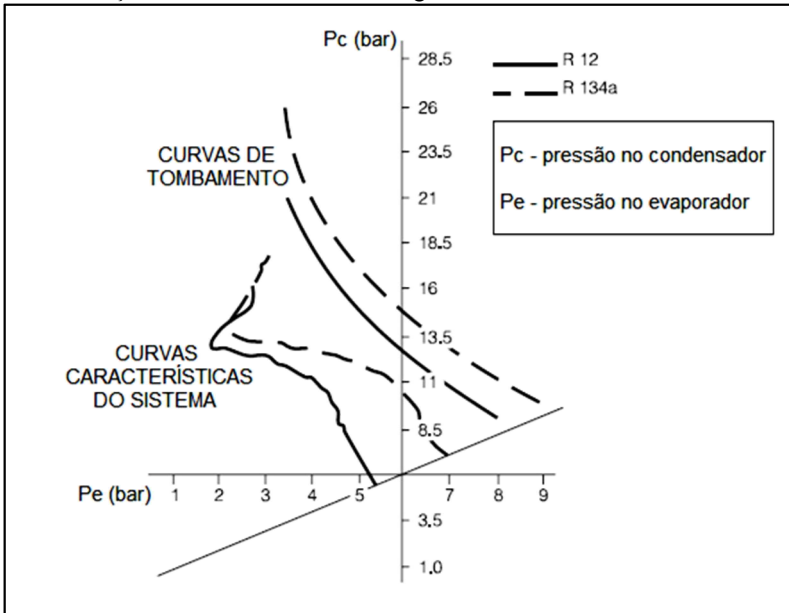


Fonte: Autor.

As curvas também podem ser representadas em função das temperaturas de trabalho (temperaturas de evaporação e condensação), ao invés das pressões (COSTA, 2010). Dessa maneira, a especificação das condições de operação independe do tipo de fluido refrigerante que será utilizado no sistema. Caso o sistema opere com um fluido refrigerante diferente, as curvas em função das temperaturas permanecerão as mesmas. No entanto, as pressões de trabalho serão diferentes de acordo com o fluido refrigerante utilizado (COSTA, 2010).

Essa diferença de pressões causada pela utilização de diferentes fluidos refrigerantes é mostrada na figura 7.

Figura 7: Curva de tombamento e característica de um sistema de refrigeração com utilização de diferentes fluidos refrigerantes: R-12 e R-134a



Fonte: Adaptada de (EMBRACOC, 1996).

#### 2.4 Efeito da variação das pressões de sucção e descarga em compressores alternativos herméticos

Como anteriormente apresentado, o torque exigido no compressor varia conforme as pressões presentes em sua sucção e descarga. Esse torque é proporcional à potência de compressão mostrada na equação 1 (STOECKER; SAIZ JABARDO, 2002):

$$P_c = \dot{m} \Delta h \quad (1)$$

onde:

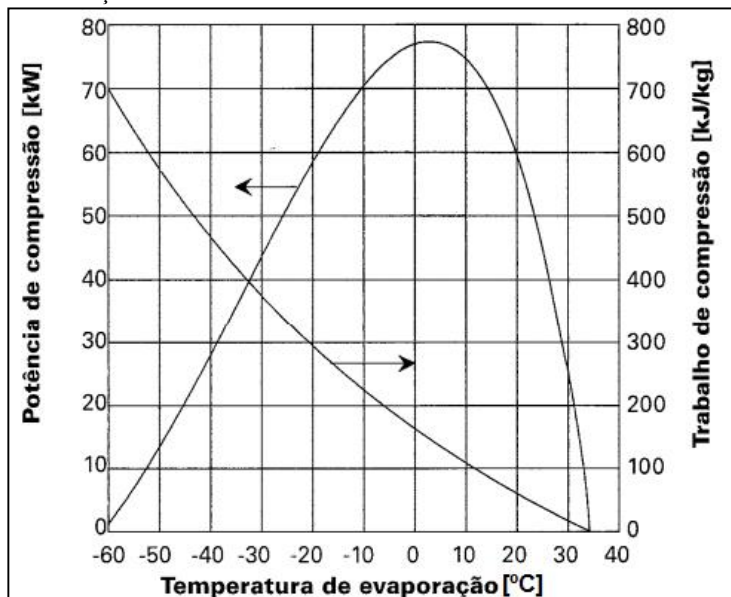
- $P_c$       potência de compressão [kW];
- $\dot{m}$       vazão mássica [kg/s];
- $\Delta h$       trabalho de compressão [kJ/kg].

Em relação à pressão de sucção, tem-se que o trabalho de compressão isoentrópico é elevado a temperaturas de evaporação

reduzidas, e diminui progressivamente, à medida que a temperatura de evaporação se eleva, anulando-se à temperatura de condensação, uma vez que, nessa condição, o compressor não comprime o fluido (STOECKER; SAIZ JABARDO, 2002). Por outro lado, o aumento da temperatura de evaporação proporciona o aumento da vazão mássica. Como apresentado na equação 1, a potência de compressão se anula para vazões de refrigerante ou trabalhos de compressão nulos. Portanto, a potência de compressão assume um valor máximo entre esses limites. A maioria dos sistemas de refrigeração operam à esquerda desse ponto máximo. Dessa maneira, um aumento da temperatura de evaporação, que leva ao aumento da pressão de sucção do compressor, ocasionará maior potência de compressão devido ao maior aumento da vazão mássica comparada à queda do trabalho de compressão (ALTHOUSE; TURNQUIST; BRACCIANO, 2004; STOECKER; SAIZ JABARDO, 2002).

A figura 8 ilustra os comportamentos descritos acima para um compressor genérico com temperatura de condensação de 35°C.

Figura 8: Potência de compressão e trabalho de compressão em função da temperatura de evaporação para um compressor genérico com temperatura de condensação de 35°C



Fonte: Adaptada de (STOECKER; SAIZ JABARDO, 2002)

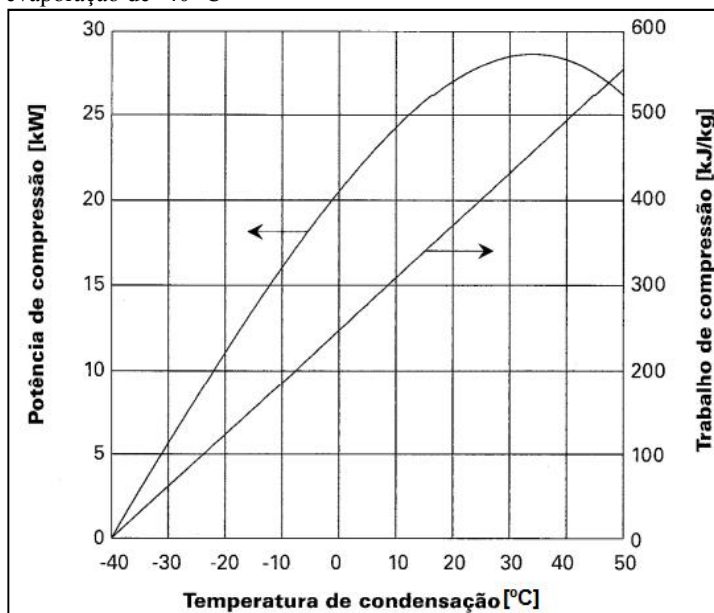
Aumentando-se a pressão de descarga, que corresponde à temperatura de condensação, e mantendo-se a temperatura de evaporação constante, observa-se maior diferença de entalpias, o que corresponde a um maior trabalho de compressão e, conseqüentemente, uma maior potência de compressão. Por outro lado, resulta em uma menor vazão mássica através do compressor, devido a uma maior pressão no volume morto do cilindro de compressão do compressor (STOECKER; SAIZ JABARDO, 2002).

A partir da equação 1, é possível observar que, mantendo-se a temperatura de evaporação constante, a curva de potência de compressão em função da temperatura de condensação apresenta dois pontos em que seu valor é nulo. Um deles ocorre quando as temperaturas de evaporação e condensação são iguais, ou seja, as pressões de sucção e descarga são iguais e não há trabalho de compressão. O outro ponto ocorre quando a vazão de refrigerante é nula. Isso acontece quando a pressão de descarga é muito maior que a de sucção, a ponto de não entrar mais fluido no cilindro de compressão do compressor devido à grande pressão de fluido residual no volume morto do cilindro. Assim, como no caso da variação da temperatura de evaporação, existe um ponto entre esses dois limites onde a potência de compressão assume um valor máximo.

Novamente, é normal que os sistemas de refrigeração operem à esquerda desse ponto de máximo, de maneira que o aumento da pressão de descarga do compressor leve ao aumento da potência de compressão que, conseqüentemente, aumenta o torque exigido (ALTHOUSE; TURNQUIST; BRACCIANO, 2004; STOECKER; SAIZ JABARDO, 2002). A figura 9 ilustra os comportamentos citados acima para um compressor genérico com temperatura de evaporação de  $-40^{\circ}\text{C}$ .



Figura 9: Potência de compressão e trabalho de compressão em função da temperatura de condensação para um compressor genérico com temperatura de evaporação de  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$



Fonte: Adaptada de (STOECKER; SAIZ JABARDO, 2002).

## 2.5 Injeção de CC em motores CA

A presença de uma componente CC em uma rede CA é, geralmente, prejudicial. Cargas indutivas, como motores ou transformadores, representam uma impedância muito baixa para a CC, o que resulta em aumento da corrente. Isso pode, por exemplo, causar superaquecimento dos componentes e equipamentos conectados (STUMBERGER, 2010).

Por outro lado, a injeção de CC em motores de CA possui algumas finalidades conhecidas na literatura. Dentre elas, se destacam: medição de temperatura de enrolamento (feita através da medição de resistência), aquecimento acelerado (feito através da própria inserção de CC) e frenagem dinâmica (SILVEIRA, 2010).

Nesta dissertação serão utilizados conceitos relacionados à medição de temperatura de enrolamento e ao aquecimento acelerado, ambos descritos a seguir.

### 2.5.1 Medição de temperatura de enrolamento em operação

A resistência de qualquer condutor com área constante ao longo do comprimento pode ser calculada através da equação 2 (HALLIDAY; RESNICK; WALKER, 2012; MICHALSKI, 2001):

$$R = \rho \frac{l}{A} \quad (2)$$

onde:

R	resistência elétrica [ $\Omega$ ];
$\rho$	resistividade do condutor [ $\Omega \text{ m}$ ];
l	comprimento do condutor [m];
A	área da seção transversal do condutor [ $\text{m}^2$ ].

Verifica-se então que a resistência de um condutor:

- depende do material de sua constituição  $\rightarrow \rho$ ;
- é diretamente proporcional ao seu comprimento  $\rightarrow l$ ;
- é inversamente proporcional à área de sua seção transversal  $\rightarrow A$ .

Através da injeção de CC pode-se medir indiretamente a resistência elétrica, através da medição de tensão e corrente presentes no condutor que compõe o enrolamento do estator do compressor (SCHLICKMANN, 2012). Obtém-se a resistência elétrica do enrolamento utilizando a seguinte equação (PACHECO, 2007):

$$R_E = \frac{V_{CC}}{I_{CC}} \quad (3)$$

onde:

$R_E$	resistência elétrica do enrolamento do estator [ $\Omega$ ];
$V_{CC}$	tensão contínua superposta à fonte de alimentação [V];
$I_{CC}$	corrente contínua inserida no motor [A].

A partir da resistência medida e da equação 4 pode-se estimar a temperatura do enrolamento do compressor. A equação 4 relaciona uma resistência conhecida a uma temperatura de referência com a resistência estimada, necessitando para isso um fator representativo da variação de

resistividade do material em função da temperatura –  $\alpha$  (HALLIDAY; RESNICK; WALKER, 2012; SILVEIRA, 2010; PACHECO, 2007).

$$T_E = \frac{R_E - R_{E0}}{\alpha R_{E0}} + T_{E0} \quad (4)$$

onde:

- $T_E$  temperatura estimada do enrolamento do estator [°C];
- $R_E$  resistência elétrica medida no enrolamento do estator [ $\Omega$ ];
- $T_{E0}$  temperatura de referência [°C];
- $R_{E0}$  resistência elétrica no enrolamento do estator na temperatura de referência [ $\Omega$ ];
- $\alpha$  variação da resistividade do material em função da temperatura [°C<sup>-1</sup>].

Em literatura, é comum encontrar variações na resistividade de um mesmo material numa mesma temperatura. Geralmente, essas variações são devidas ao grau de pureza do material, ao método de fabricação e o diâmetro do fio analisado. Observa-se que quanto menor o diâmetro do fio analisado, maior será a sua resistividade. (HALLIDAY; RESNICK; WALKER, 2012; PACHECO, 2007).

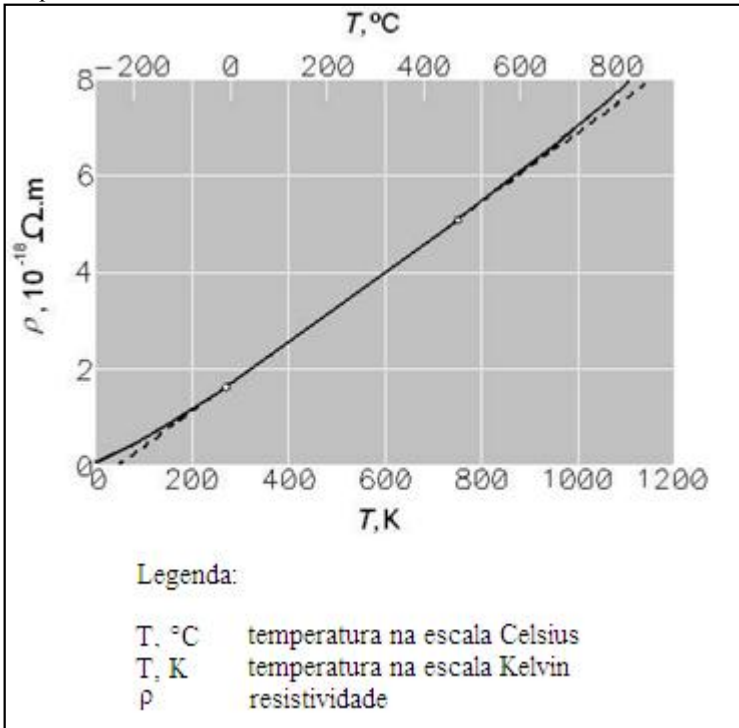
Na prática, diversos metais puros podem ser utilizados para a medição de temperatura, como, cobre, níquel e platina<sup>17</sup> (SCHLICKMANN, 2012; SILVEIRA, 2010). O material do enrolamento dos motores elétricos dos compressores utilizados neste projeto é o cobre.

Neste trabalho, o material do enrolamento do estator do compressor é o cobre. Para este material a variação da resistividade em função da temperatura é demonstrada na figura 10.

---

<sup>17</sup>A platina é conhecida pela estabilidade do seu coeficiente de resistividade, alta temperatura de fusão e resistência à corrosão. No entanto, quando comparada a outros metais condutores, seu preço é elevado. Já o cobre é usualmente utilizado na medição de temperatura de motores, transformadores e indutores, de maneira que o próprio enrolamento é utilizado como elemento transdutor (CHILDS, 2001). Essa é uma prática comum na indústria (ABNT, 2003).

Figura 10: Curva da resistividade do cobre em função da variação da temperatura



Fonte: Adaptada de (HALLIDAY; RESNICK; WALKER, 2012).

Alguns autores consideram aproximadamente linear a variação da resistividade do cobre em função da temperatura na faixa de (0 a 400) °C (HALLIDAY; RESNICK; WALKER, 2012; SILVEIRA, 2010; PACHECO, 2007).

PACHECO (2007) comentou a respeito de como a resistividade nos materiais condutores aumenta com o incremento de temperatura. Considerando um fluxo contínuo e desordenado de elétrons (agitação térmica) no interior do cobre, e supondo que o aumento da temperatura eleva o grau de desordem desse fluxo, a oposição oferecida pelo material à passagem de corrente elétrica será maior, ou seja, a resistividade será maior (HALLIDAY; RESNICK; WALKER, 2012; PACHECO, 2007).

SCHLICKMANN (2012) investigou a influência dessa linearização da resistividade nos resultados das medições para a faixa de

(20 a 80) °C. Essa faixa contempla a temperatura ambiente e a de realização dos ensaios de tombamento. SCHLICKMANN (2012) confrontou dados da literatura com os obtidos experimentalmente<sup>18</sup> e concluiu que, no pior caso, a diferença é de 0,35% do valor alcançado. Essa diferença representa uma incerteza de 0,89 °C para um condutor com temperatura de 70 °C, valor muito menor que o calculado utilizando os coeficientes encontrados na literatura para variação da resistividade do cobre nessa faixa de temperaturas (SCHLICKMANN, 2012).

Percebe-se então que, considerando as faixas de temperatura necessárias aos ensaios, (105 ±4) °C para o ensaio de partida e (80 ±4) °C para o de tombamento, é aceitável utilizar a linearização do valor da resistividade do cobre para a faixa de temperaturas dos ensaios.

Portanto, o método para estimar a temperatura do enrolamento do compressor realizado pela medição de tensão e corrente através da injeção de CC mostra-se possível de ser aplicado a BPT automatizada.

### 2.5.2 Aquecimento acelerado

Em alguns ensaios, como os de partida e tombamento, o tempo demandado para se atingir temperaturas determinadas é maior do que o tempo útil utilizado para aquisição de dados. Por isso, métodos para aquecimento acelerado são de grande importância para redução do tempo total de ensaio.

SCUSSEL (2006) buscou formas e propôs soluções para o aquecimento acelerado de compressores, em especial para os ensaios de desempenho de compressores, onde a maior parte do tempo demandado por ensaio corresponde ao aquecimento do corpo do compressor. SCUSSEL (2006) concluiu que a injeção de corrente contínua é uma alternativa promissora para diminuição do tempo de aquecimento de compressores de refrigeração.

Além disso, SCUSSEL (2006) também concluiu que a injeção de CC somente é eficiente quando utilizada com o compressor em funcionamento. Em resumo, o procedimento consiste em somar uma componente CC à alimentação CA do compressor de refrigeração, de

---

<sup>18</sup>Fez-se comparação entre a resistência calculada com o coeficiente linear da resistividade do cobre geralmente utilizado na indústria e literatura e as medições realizadas experimentalmente.

modo que provoque um aumento das perdas elétricas e consequente aquecimento.

PACHECO (2007) desenvolveu um sistema capaz de medir a resistência ôhmica do enrolamento do motor de compressores de refrigeração. No entanto, esse sistema não atende as características dinâmicas dos ensaios de partida e tombamento, como o tempo necessário para medição de temperatura (SCHLICKMANN, 2012).

SILVEIRA (2010) desenvolveu um SICC para diminuição do tempo de transitório em ensaios de desempenho, que permite o aquecimento acelerado dos compressores através da inserção de CC. O SICC desenvolvido por SILVEIRA (2010) foi projetado para medir resistências na faixa de (1 a 60)  $\Omega$  com erro máximo, ao realizar a estimativa de temperatura, de  $\pm 10$  °C.

Com a necessidade de um método de medição da temperatura do enrolamento do compressor para a BPT – que não fosse necessário instrumentar o compressor, o SICC desenvolvido por SILVEIRA (2010) mostrou-se promissor. Entretanto, seria necessário um aprimoramento em seus circuitos de medição, para adequá-lo aos parâmetros de ensaio utilizados na BPT.

SCHLICKMANN (2012) realizou esse aprimoramento com enfoque nas necessidades da BPT. Dessa maneira, o SICC aprimorado se tornou o instrumento de medição de temperatura de enrolamento do compressor e aquecimento acelerado do mesmo na BPT, em substituição aos métodos já utilizados nela. Com os aprimoramentos, obteve-se, no pior caso dentro da faixa de resistências de (1 a 60)  $\Omega$ , ao realizar a estimativa de temperatura, uma incerteza de  $\pm 1,43$  °C, valor abaixo dos  $\pm 4$  °C exigidos como faixa para realização dos ensaios de partida e tombamento.

## 2.6 Estabelecimento da arquitetura de uma BPT com alto grau de automação

Com o objetivo de estabelecer uma arquitetura que atenda as necessidades da BPT, assim como fatores externos (custos, facilidade de programação, entre outros) aliados a baixos níveis de incerteza e maior robustez nos componentes envolvidos, se faz necessário o entendimento dos principais conceitos utilizados na especificação de sistemas para automação da medição.

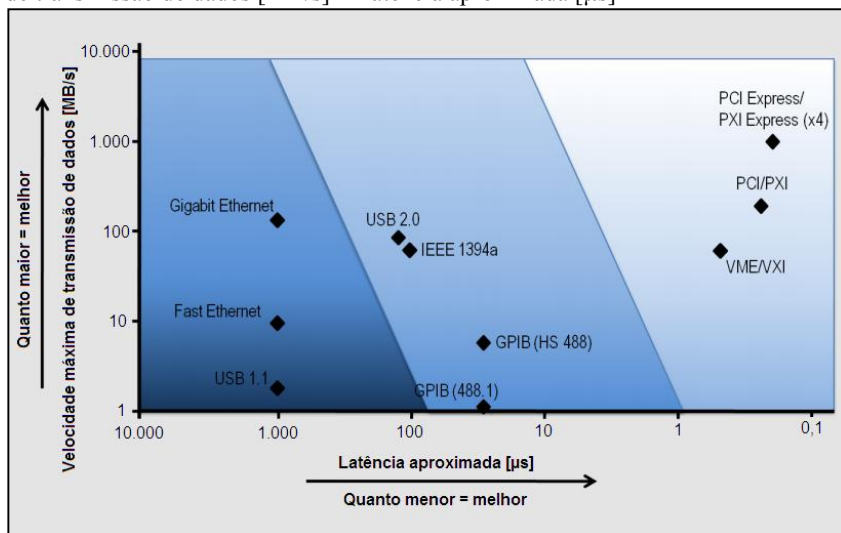
Além disso, uma análise dos sistemas disponíveis no mercado também se mostra necessária.

## 2.6.1 Principais características de sistemas de medição e automação

As informações sobre as principais características de sistemas de medição e automação estão contidas no apêndice.

A figura 11 mostra a comparação entre algumas interfaces de comunicação quanto suas velocidades máximas de transmissão de dados aproximadas e tempos de latência<sup>19</sup> aproximados.

Figura 11: Comparação entre interfaces de comunicação: Velocidade máxima de transmissão de dados [MB/s] x Latência aproximada [ $\mu$ s]



Fonte: Adaptada de (NATIONAL INSTRUMENTSc, 2012).

## 2.6.2 Grandezas envolvidas

As grandezas envolvidas na BPT que devem ser medidas representam todos os sinais que devem ter interface. Desse modo, é fundamental conhecer suas características, como, número de medições, frequência de aquisição, forma de medição, entre outras.

<sup>19</sup>É o tempo de acesso. Pode ser entendido como a diferença de tempo entre o início de um evento e o momento em que seus efeitos tornam-se perceptíveis. Ou seja, é o atraso de tempo entre o momento em que um evento se iniciou até o momento em que seus respectivos efeitos se iniciem.

No presente trabalho, as grandezas envolvidas que deverão ser medidas com a nova arquitetura são elétricas, de temperatura e pressão.

Em relação às medições de temperatura, serão feitas quatro medições utilizando termorresistores do tipo Pt100<sup>20</sup>. Também serão necessárias cinco medições de pressão que serão realizadas através de transmissores de pressão analógicos.

Maior detalhamento das medições planejadas com a nova arquitetura será discutido no capítulo 7.

### 2.6.3 Análise dos sistemas disponíveis no mercado

Existem diversos fabricantes que disponibilizam diferentes tipos de arquiteturas (características exclusivas) para montar um sistema de automação de medições. Será feita uma análise das principais arquiteturas disponíveis no mercado para aplicação neste trabalho, iniciando com o detalhamento das opções.

CLP: foram os sucessores dos painéis de relés e, desde a década de 1970, são dispositivos bastante utilizados na indústria para automação de processos. O primeiro CLP foi desenvolvido em 1968, baseado nos critérios definidos pela *General Motors* (ERICKSON, 1996).

Entre as vantagens, pode-se destacar: grande quantidade de entradas e saídas disponíveis, diversidade de linguagens de programação, facilidade na programação, modularidade, robustez (são projetados para aplicação em ambientes hostis), compactos e baixo custo (BOLTON, 2009).

Como desvantagens, aponta-se: pseudo-determinismo, carência de especificações metrológicas, processamento sequencial, baixa velocidade de operação, arquitetura proprietária e baixa capacidade de processamento e de armazenamento, quando comparado com outras arquiteturas (BOLTON, 2009).

Pesa contra o CLP o fato de ele não ter sido desenvolvido para a área de medição, e sim para a de controle de processos (PETROVIC, 2007). Essa questão ilustra que o CLP não possui as características recomendadas para um sistema de medição, mesmo sendo amplamente utilizado em chão de fábrica de muitas empresas.

---

<sup>20</sup>O Pt100 é uma termorresistência de platina que a 0 °C apresenta resistência de 100 Ω.



Placas de aquisição (DAQ): basicamente, digitalizam os sinais analógicos (PETROVIC, 2007). Podem ser divididas em embarcadas e para PC, de modo que as embarcadas são utilizadas em arquiteturas com chassis e as para PC podem ser conectadas internamente (PCI) ou externamente (USB) ao mesmo.

Como vantagens, pode-se citar: grande variedade de modelos disponíveis para diversas aplicações e tamanho reduzido. Em contrapartida, têm-se: características metrológicas limitadas quando comparadas as de, por exemplo, um PXI, não possuem chassis de proteção, necessidade de um PC para operá-las, entre outras.

PAC: foi concebido para solucionar as deficiências do CLP, combinando suas funcionalidades com as de um PC. A utilização desse equipamento teve maior crescimento a partir de 1990 (BELL, 2005).

Como vantagens do PAC, têm-se: utilização de tecnologia embarcada (dispensa a utilização de um PC para gerenciamento ou processamento de dados), modularidade, possibilidade de comunicação com banco de dados, suporte a sistemas de tempo real (determinístico), fácil integração (capaz de trocar dados com diferentes sistemas), maior capacidade de processamento, armazenamento e velocidade de operação comparadas ao CLP (NATIONAL INSTRUMENTSd, 2012; BOLTON, 2009). As principais desvantagens são: arquitetura proprietária e custo (BELL, 2005; BOLTON, 2009).

Dentre os modelos disponíveis de PAC, destacam-se para a aplicação neste trabalho o Compact FieldPoint e o CompactRIO.

Compact FieldPoint: possui características para controle de processos e aquisição de sinais, além de permitir *software* embarcado operando em tempo real e operação remota (PETROVIC, 2007).

São vantagens: permitir comunicação com diferentes interfaces de comunicação (LAN, RS-485 e RS-232), possuir módulos com proteção contra sobrecorrente de até 300 V e possibilitar *hot swap*<sup>21</sup> (NATIONAL INSTRUMENTSe, 2012).

Entre as desvantagens estão: possui limitadas capacidades de processamento e armazenamento quando comparadas com, por exemplo, as de um PXI. Além de baixas frequências de aquisição e atualização.

---

<sup>21</sup>É a capacidade de se poder retirar ou inserir componentes em um circuito sem a necessidade de desligá-lo.

CompactRIO: assim como o Compact FieldPoint, possui características para controle de processos e aquisição de sinais. Utiliza-se da tecnologia FPGA<sup>22</sup>, e permite operação com *software* embarcado em tempo real.

Apresenta como vantagens: ser compacto, possibilidade de *hot swap*, melhores características metrológicas e frequências de aquisição e atualização quando comparadas com as do Compact FieldPoint (NATIONAL INSTRUMENTSf, 2012).

Como desvantagens, assim como o Compact FieldPoint, possui limitadas capacidades de processamento e armazenamento, quando comparadas com as de um PXI.

VXI: adotado oficialmente pelo IEEE em 1993, sendo chamado de IEEE 1155. O VXI conta com mais de 250 fabricantes e 1000 produtos disponíveis (PETROVCIC, 2007).

As principais vantagens são: padrão aberto, modularidade, robustez, possibilitar controle embarcado ou remoto, facilidade de configuração, compacto, programação e integração através de recursos do tipo *plug&play*, entre outras (WOLFE, 2005).

A maior desvantagem em sua aplicação é o alto custo inicial, de maneira que é recomendado para aplicações de grande porte, visto que possui enorme quantidade de canais de medição disponíveis.

PXI: é uma plataforma robusta baseada em PC para sistemas de medição e automação. Possui controlador interno ou remoto via PC, utilizando Windows ou LabVIEW *Real-Time*<sup>23</sup>. Nele, é possível interconectar diferentes chassis para diferentes aplicações (NATIONAL INSTRUMENTSh, 2012). Possui alta capacidade de processamento e armazenamento e permite diversos tipos de interfaces de comunicação (NATIONAL INSTRUMENTSsc, 2012). Ainda, o PXI

---

<sup>22</sup>Consiste em um chip reconfigurável conectado aos módulos de entrada e saída, capaz de realizar códigos sem uso da CPU (PETROVCIC, 2007).

<sup>23</sup>Sistemas operacionais em tempo real são aqueles que permitem executar aplicações que necessitem de um desempenho determinístico ou de um maior tempo sem falhas (NATIONAL INSTRUMENTSg, 2012). Por exemplo, sistemas operacionais como o Microsoft Windows ou MAC OS são projetados para um propósito geral, de maneira que não são indicados para desenvolvimento e execução de aplicações críticas de medição e controle.

possui alta velocidade de transmissão de dados (até 132 MB/s) e o recurso *plug&play* (NATIONAL INSTRUMENTS<sup>h</sup>, 2012).

Por se tratar de um consórcio de diferentes empresas, foram consideradas as características gerais dos equipamentos oferecidos pelos maiores fabricantes (PETROVICIC, 2007).

Atualmente existem mais de 1500 produtos PXI no mercado, sendo que mais de 400 foram projetados pela National Instruments (NATIONAL INSTRUMENTS<sup>i</sup>, 2012).

A desvantagem é o seu preço que, apesar de ser menor que o do VXI, é maior que o do CLP e maioria dos modelos de PAC.

## 2.7 Conclusões

De posse dos conceitos que serão utilizados ao longo deste trabalho, é possível iniciar maior detalhamento da BPT que será aprimorada, assim como das suas deficiências e soluções alcançadas e propostas. Esse detalhamento será feito nos próximos capítulos.



### 3. BANCADA DE ENSAIOS DE PARTIDA E TOMBAMENTO

#### 3.1 Bancada manual vs. bancada automatizada

Neste tópico serão apresentadas as principais diferenças entre a bancada manual e automatizada para a realização dos ensaios de partida e tombamento. A configuração da bancada manual é a utilizada atualmente como referência na empresa que serviu de estudo de caso desta dissertação. Já a BPT automatizada é o ponto de início deste trabalho.

##### 3.1.1 Bancada manual

Na bancada manual, são utilizados cinco manômetros para as medições de pressão, e a leitura é feita pelo operador a cada verificação do mesmo para determinação das condições. Os manômetros estão instalados nas sucções e descargas dos compressores auxiliar e em teste, além de um no reservatório da bancada. Os manômetros utilizados para medição de pressão de evaporação e condensação do compressor em teste possuem também uma escala adicional em temperatura, para o fluido que será utilizado nos ensaios, de maneira que é possível para o operador anotar dados em temperatura e pressão.

O compressor auxiliar é utilizado para configuração de pressões necessárias aos ensaios, atuando juntamente com um conjunto de válvulas manuais instaladas no circuito, estas também sob responsabilidade do operador.

Há ainda um reservatório para garantir que a quantidade necessária de fluido para a realização dos ensaios esteja disponível.

A bancada permite o controle da tensão de alimentação (proveniente da rede) do compressor em teste através de um varivolt<sup>24</sup>, e possui terminais elétricos que possibilitam a conexão de resistência de partida e capacitores de partida e permanentes, caso seja necessário para o compressor que se deseja ensaiar. Ela possui ainda dois separadores de óleo conectados à descarga dos compressores com suas temperaturas controladas por resistências variáveis sem realimentação (malha aberta).

---

<sup>24</sup>Equipamento eletromecânico que recebe em sua entrada uma tensão alternada fixa e fornece em sua saída um valor de tensão alternada ajustável.

Para estimativa de temperatura utiliza-se um ohmímetro, o qual só pode ser utilizado com o compressor desenergizado. O operador também é responsável por essa tarefa, na qual ele mantém o compressor em funcionamento por certo tempo, baseando-se na experiência própria ou histórico do modelo do compressor sob ensaio. O compressor é então desligado e o operador realiza a medição de resistência, que proporciona a estimativa de temperatura. Caso a temperatura esteja abaixo da necessária para os ensaios, o compressor é religado, e o procedimento de medição é repetido. Se a temperatura estiver acima, é então dado um intervalo de tempo para o compressor esfriar, e o procedimento para medição também é repetido. Caso esteja dentro da tolerância para realização dos ensaios, iniciam-se os mesmos.

Por fim, a bancada opera com o mínimo de fluido necessário para execução dos ensaios, devido à falta de um sistema de aquecimento do reservatório de armazenamento. O mínimo fluido necessário é definido, principalmente, pela experiência do operador, assim como outras atividades críticas para os ensaios, tais como: controle de todas as válvulas da bancada, monitoramento dos manômetros e carga de fluido, detecção do instante de tombamento através do tato, memorização dos dados e resultados para preenchimento manual dos relatórios dos ensaios etc.

Dessa maneira, percebe-se a fundamental importância do operador para a bancada manual. Ou seja, para a correta operação da bancada manual de ensaios de partida e tombamento, é necessário um operador altamente treinado e experiente. No entanto, mesmo assim, ocorre que nem sempre é o mesmo que realiza os ensaios, de modo que a reprodutibilidade é afetada dentro de uma mesma planta, piorando quando os ensaios são realizados em diferentes plantas, que utilizam diferentes *hardwares*. Ainda, ressalta-se que a bancada manual tem os seus resultados interpretados pelos sentidos do operador como, por exemplo, a detecção do instante de tombamento, que é identificada através da percepção manual de vibrações na carcaça do compressor, ao mesmo tempo em que se registram visualmente os valores de pressão.

### 3.1.2 Bancada automatizada

A bancada automatizada é um protótipo que foi construído no LIAE e foi o ponto de partida deste trabalho. Nela são utilizados, para as medições de pressões de evaporação e condensação dos compressores,

transmissores de pressão, ao invés dos manômetros, conforme apresentado na figura 12.

Figura 12: Características dos transmissores (WIKAA, 2012; WIKAB, 2012) instalados na bancada automatizada

Ponto de medição	Faixa de medição	Tipo de sinal de saída	Sinal de saída
Sucção Auxiliar	(-1 a +24) bar	Corrente	(4 a 20) mA
Descarga Auxiliar	(-1 a +39) bar	Corrente	(4 a 20) mA
Sucção Teste	(-1 a +24) bar	Tensão	0 a 5 V
Descarga Teste	(-1 a +39) bar	Corrente	(4 a 20) mA

Fonte: Adaptada de (SCHLICKMANN, 2012).

Adicionalmente, foram substituídas as válvulas manuais para controle de vazão e pressão por válvulas do tipo agulha (SWAGELOK, 2013). As válvulas que tinham função ON/OFF foram substituídas por conjuntos combinados de válvulas solenoides e esferas com atuadores pneumáticos.

Para o acionamento das válvulas agulha foram utilizados motores de corrente contínua em conjunto com controladores que realizam controle de posição em malha fechada e determinam a velocidade de abertura e fechamento, através de interfaces de comunicação CAN (SCHLICKMANN, 2012).

Ainda, foram adicionadas resistências elétricas para aquecimento do reservatório de fluido refrigerante e nos dois separadores de óleo, bem como uma resistência elétrica na sucção do compressor auxiliar, para garantir o estado de superaquecimento do vapor na entrada no compressor. Tanto os separadores de óleo quanto o reservatório e a sucção do compressor auxiliar têm suas temperaturas controladas através de controladores do fabricante *Eurotherm* (EUROTHERM, 2012).

Como há controle de aquecimento no reservatório, é possível realizar ensaios impondo grandes diferenças de pressão entre sucção e descarga do compressor em teste, dessa forma é viável realizar ensaios em compressores HST, os quais operam com grandes diferenças de pressão.

Para alimentação do compressor em teste, utiliza-se uma fonte que permite a variação de tensão e frequência de saída, condições necessárias para serem realizados diferentes ensaios, com diferentes compressores. A fonte, fabricada pela *Extech* (EXTECH

ELECTRONICS, 2012), é conectada ao PC da bancada através de interface GPIB.

Para a detecção do instante de tombamento e partida do compressor, é utilizada a medição da frequência rotacional do compressor (SCHLICKMANN, 2012; COSTA, 2010). São utilizados dois métodos para medição dessa grandeza. Através da vibração do compressor, medida por um acelerômetro preso à carcaça do mesmo, e através da pulsação de pressão de descarga. Foram empregados os métodos matemáticos desenvolvidos por DEMAY (2008) para identificação da frequência rotacional do compressor no espectro de frequências dos sinais adquiridos. Como resultado utiliza-se o método que, naquele determinado momento, apresenta o sinal com a maior razão entre amplitude<sup>25</sup> e distorção, o que significa menor erro na medição de frequência rotacional do compressor.

Em relação à medição de temperatura do enrolamento do compressor em teste (fator determinante para correta realização dos ensaios), são utilizados termopares. Portanto, é necessário instrumentar o compressor em teste, abrindo-o e instalando os termopares no local desejado. Esse método é pouco prático, pois não permite, por exemplo, retirar uma peça da linha de produção e ensaiá-la na sequência. Além disso, os termopares proporcionam uma estimativa da temperatura pontual do local em que está instalado, e não da peça como um todo, como se deseja.

Por fim, a comunicação entre o PC que gerencia a bancada e os sinais oriundos desta é feita através de placas de aquisição de sinais (DAQ) da *National Instruments*.

### 3.2 Procedimentos dos ensaios

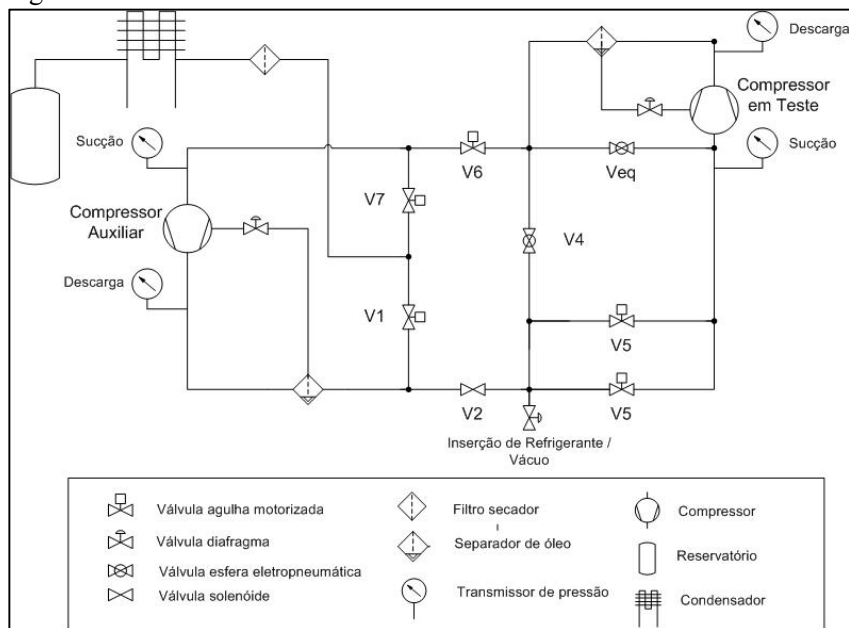
A BPT em desenvolvimento no LIAE conta com o seguinte circuito:

---

<sup>25</sup>O método de pulsação de pressão apresenta, por exemplo, amplitudes reduzidas em condições de pressões equalizadas na sucção e descarga do compressor. Por outro lado, o método a partir das vibrações do compressor, apresenta, por exemplo, amplitudes reduzidas quando o acelerômetro é fixado na carcaça de compressores de menores tamanhos (COSTA, 2010).



Figura 13: Circuito da BPT em desenvolvimento no LIAE



Fonte: Adaptada de (SCHLICKMANN, 2012).

Essa configuração existente possibilita que sejam realizados os ensaios de partida equalizada, partida diferencial e tombamento.

A programação da bancada foi feita através do *software* de linguagem gráfica LabVIEW, o qual permite integração com as placas de aquisição utilizadas e é amplamente utilizado para esse tipo de aplicação (NATIONAL INSTRUMENTSj, 2012).

Na sequência, faz-se breve explanação de como são realizados os três ensaios na BPT automatizada, sem a inserção do SICC.

### 3.2.1 Ensaio de partida equalizada

Para este ensaio, o operador define no *software* as pressões de sucção e descarga que devem ser impostas no compressor em teste. Caso elas sejam iguais, inicia-se a rotina do ensaio de partida equalizada.

Assim que o ensaio é iniciado, realiza-se a rotina de aquecimento da BPT automatizada e compressor, até que as condições estabelecidas para o ensaio sejam atingidas.

É então realizado aquecimento através da imposição de condições elevadas de pressão no compressor em teste, para que o mesmo aqueça pelo aumento de sua corrente de alimentação, que proporciona maiores perdas por efeito joule no seu enrolamento. Temperaturas mais altas, como a condição de ensaio ( $105 \pm 4$ ) °C, são mais difíceis de serem alcançadas através desse aquecimento. É utilizado então o aquecimento da bobina através do bloqueio do rotor, onde se energiza somente o enrolamento principal, mantendo o auxiliar desligado. Com este procedimento, o motor não parte, resultando numa alta corrente de alimentação, que aquece rapidamente o enrolamento principal até as temperaturas de ensaio. Caso a bancada não esteja previamente aquecida através do método da imposição de condições elevadas de pressão no compressor em teste, assim que o compressor entra em funcionamento, seu calor é rapidamente transferido para o fluido frio da bancada.

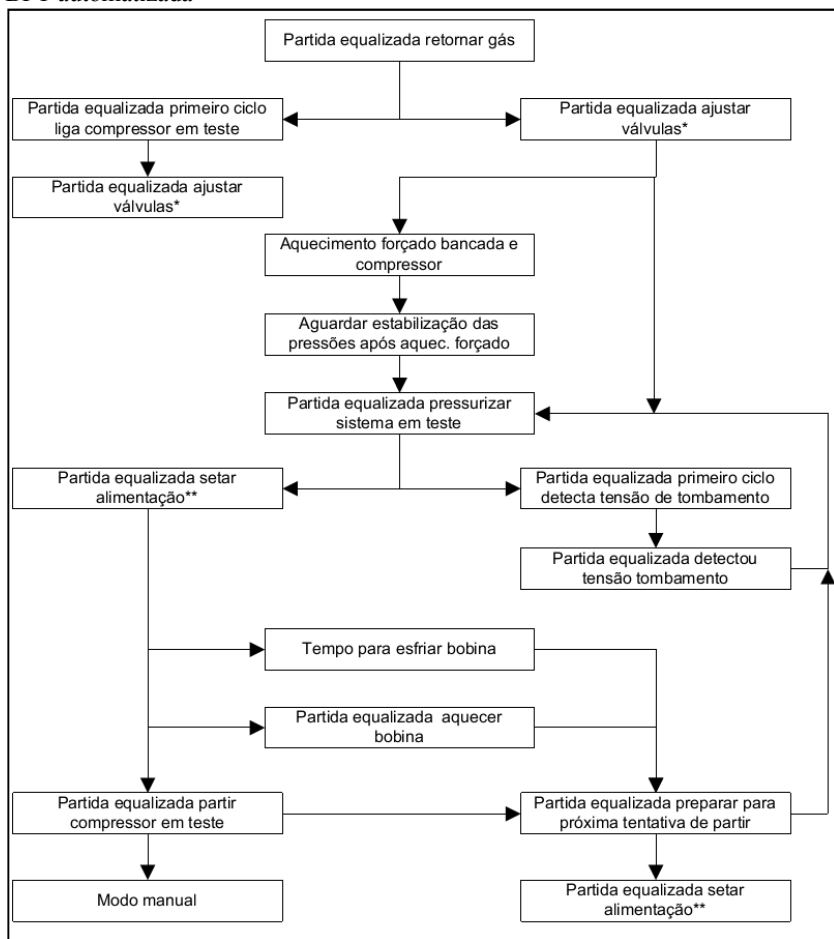
Há a possibilidade de o operador informar ao *software* uma tensão de alimentação inicial para a execução do ensaio, ou optar pela busca automática dela. Na busca automática, as válvulas automatizadas da bancada e o compressor auxiliar configuraram os *setpoints* de ensaio na sucção e descarga do compressor em teste e, a tensão nominal é gradativamente diminuída até o instante de tombamento. A tensão no instante do tombamento é utilizada como ponto de início nos ensaios de partida.

Com a tensão inicial definida, ajustam-se novamente as pressões de sucção e descarga do compressor em teste para o *setpoint* de ensaio, dessa vez com o compressor em teste desligado.

Na sequência, o compressor é energizado com a tensão previamente informada – ou encontrada – e é verificado se ele foi capaz de partir na condição estipulada com determinada alimentação. Caso o compressor não consiga partir, aumenta-se sua tensão de alimentação, e uma nova tentativa é realizada. Isso ocorre sucessivamente até se encontrar a tensão onde o compressor é capaz de partir no *setpoint* determinado. Com esse valor de tensão, o processo é repetido três vezes, e o compressor deve ser capaz de partir e entrar em regime nas três tentativas, configurando aquela tensão como a “mínima tensão de partida”.

A figura abaixo mostra o fluxograma das etapas do ensaio de partida equalizada realizado na BPT automatizada.

Figura 14: Etapas do ensaio de partida equalizada automatizado aplicado na BPT automatizada



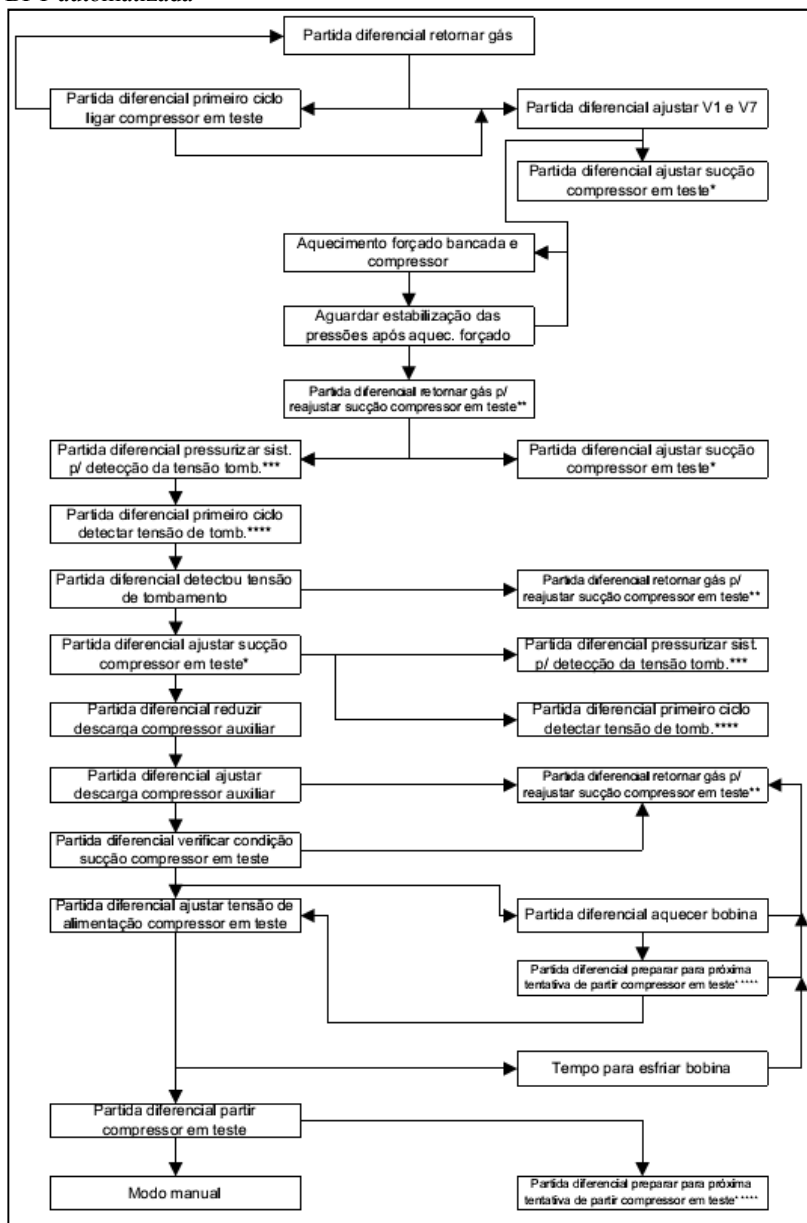
Fonte: Autor.

### 3.2.2 Ensaio de partida diferencial

Este ensaio segue as mesmas condições do ensaio de partida equalizada (temperatura de ensaio, métodos de aquecimento, incremento de tensão etc). A diferença é que o ensaio de partida diferencial é realizado com diferentes pressões na sucção e descarga do compressor em teste.

A figura 15 mostra o fluxograma das etapas do ensaio de partida diferencial realizado na BPT automatizada.

Figura 15: Etapas do ensaio de partida diferencial automatizado aplicado na BPT automatizada



Fonte: Autor.

### 3.2.3 Ensaio de tombamento

Neste ensaio, o operador determina em que *setpoints* (temperaturas de evaporação do compressor em teste) os ensaios serão realizados, a quantidade de ciclos que deverão ser feitos em cada *setpoint* e a tensão nominal de alimentação do compressor em teste.

As rotinas de aquecimento são semelhantes às utilizadas nos ensaios de partida, diferindo na temperatura do compressor para realização dos ensaios, que neste caso é de  $(80 \pm 4)$  °C.

Com a temperatura na faixa desejada, as válvulas automatizadas trabalham em conjunto com o compressor auxiliar, para atingir a temperatura de evaporação do compressor em teste, especificada para aquele *setpoint*. Assim que o *setpoint* é atingido, as válvulas na descarga do compressor em teste são fechadas. Nessa condição, a descarga do compressor auxiliar é praticamente ligada à descarga do compressor em teste. Desse modo, a pressão de descarga, assim como a temperatura de condensação por consequência, do compressor em teste aumenta continuamente até o instante de tombamento.

Após o compressor em teste “tombar”, o fluido é recolhido para o reservatório da bancada, a fim de se realizar novo ensaio, caso seja necessário.

Cabe observar que, durante o aumento de temperatura de condensação do compressor em teste, sua temperatura de evaporação é controlada através de válvula agulha instalada em sua sucção. Dessa forma, o *setpoint* do ensaio é mantido.

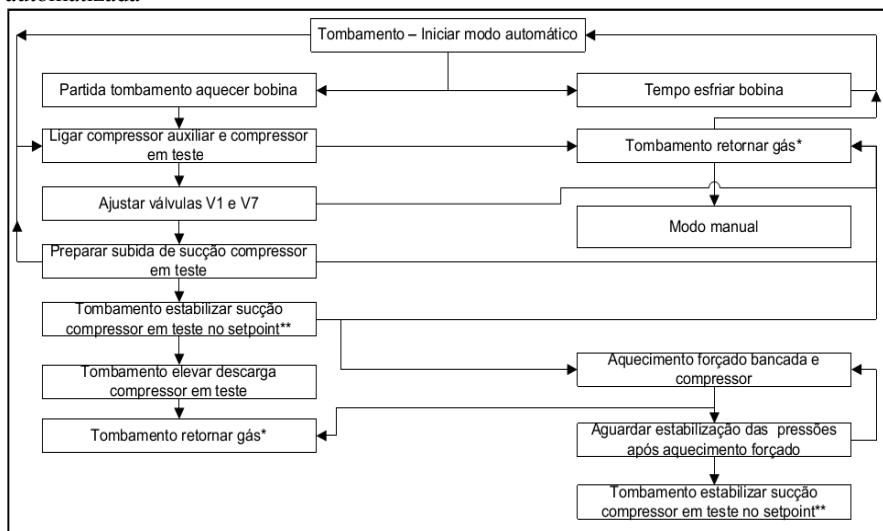
Adotou-se considerar o compressor “tombado” quando se chega a 80% de sua frequência rotacional nominal, que representa o instante em que o maior torque é oferecido pelo motor do compressor<sup>26</sup> (SCHLICKMANN, 2012; COSTA, 2010).

A figura 16 mostra o fluxograma das etapas do ensaio de tombamento realizado na BPT automatizada.

---

<sup>26</sup>Na empresa fabricante de compressores alternativos herméticos e parceira deste projeto, são realizados ensaios para avaliação do torque proporcionado pelos motores utilizados em seus compressores. Os resultados desses ensaios mostram que os motores, mantendo a condição de carga previamente aplicada, não conseguem restabelecer sua frequência rotacional em situações onde o escorregamento é superior a 20% da frequência rotacional nominal do compressor (COSTA, 2010). Portanto, adota-se como 80% da frequência rotacional nominal do compressor como o limite de operação, abaixo disso considera-se o compressor “tombado”.

Figura 16: Etapas do ensaio de tombamento automatizado aplicado na BPT automatizada



Fonte: Autor.

### 3.3 Conclusões

Com a definição de como são realizados os ensaios na BPT automatizada, é viável buscar formas de como integrar o SICC ao seu *software*, *hardware* e rotina de ensaios, assunto abordado no próximo capítulo.





## 4. INTEGRAÇÃO DO SISTEMA DE INJEÇÃO DE CC A BANCADA DE ENSAIOS DE PARTIDA E TOMBAMENTO AUTOMATIZADA

### 4.1 Integração do sistema de injeção CC a bancada de ensaios de partida e tombamento automatizada

Neste tópico serão discutidas as principais modificações e ajustes necessários para integração do SICC na BPT automatizada. Mais especificamente, serão discutidos: dificuldades, limitações, vantagens, modificações físicas e no *software*, mudança na rotina e sequência dos ensaios e resultados.

Como já discutido, o SICC desenvolvido por SILVEIRA (2010) é capaz de realizar aquecimento acelerado de compressores através da injeção de CC em seus enrolamentos, além da medição da resistência ôhmica de seus enrolamentos, o que permite indiretamente à medição de temperatura. SCHLICKMANN (2012) realizou aprimoramento no SICC voltado diretamente para as necessidades e tolerâncias envolvidas nos ensaios de partida e tombamento.

Com o SICC montado conforme especificações de SCHLICKMANN (2012) e calibrado, iniciou-se sua integração a BPT automatizada.

Como é utilizada uma fonte de alimentação exclusivamente para alimentação do compressor sob ensaio, realizou-se o seguinte procedimento: a saída da fonte foi conectada ao SICC e a saída do mesmo à alimentação do compressor em teste. Dessa maneira, a alimentação do compressor é realizada através da CA enviada pela fonte, juntamente com uma componente contínua proveniente do SICC.

Além disso, para o correto funcionamento do SICC, suas saídas digitais e analógicas, assim como as entradas analógicas necessárias foram conectadas nos *slots* disponíveis nas placas de aquisição já utilizadas na BPT automatizada.

Decidiu-se utilizar o SICC somente em situações onde o compressor em teste estivesse em operação, isso devido às altas correntes que seriam praticadas caso o mesmo estivesse desligado. Ainda, essas altas correntes causariam maiores incertezas na medição da resistência do enrolamento, o que, por consequência, interfeririam nos

valores estimados de temperatura. Outra questão diz respeito à integridade dos componentes do SICC e do próprio compressor, que estariam mais sujeitos a danos temporários ou permanentes, caso fossem regularmente utilizados com correntes mais altas.

Ainda, com o compressor em funcionamento, realiza-se aquecimento do próprio compressor e do fluido que passa por ele, de maneira que indiretamente a bancada também seja aquecida. Com o compressor desligado, o aquecimento ficaria restrito aos seus componentes e conexões mais próximas.

Anteriormente, a medição da temperatura do enrolamento do compressor em teste era realizada através de termopares instalados nele, não havendo restrições quanto deixar ou não o compressor em funcionamento, visto que a leitura era contínua e independente dessa condição.

Foi então necessário realizar algumas mudanças nas rotinas dos ensaios e *software* da BPT, para adequá-los às restrições do SICC.

Realizou-se o seguinte procedimento: identificaram-se quais etapas dos ensaios não necessitavam de leitura da temperatura do enrolamento do compressor em teste, quais necessitavam e aquelas que, além da leitura, demandavam aquecimento.

Para as etapas onde não há necessidade da leitura de temperatura, o SICC foi programado para não fornecer qualquer componente CC, ou seja, caso o compressor em teste necessitasse estar em funcionamento nesta etapa, ele seria alimentando exclusivamente pela componente CA proveniente da fonte de alimentação da BPT.

Nas etapas que demandam leitura de temperatura, foi configurado para garantir que o compressor em teste estivesse em funcionamento, e que o SICC fornecesse, em conjunto com a componente CA da fonte, uma componente CC que proporcionasse uma tensão mínima<sup>27</sup>, suficiente para medição de temperatura e aquecimento mínimo do compressor. Essa tensão mínima é específica para cada modelo de compressor.

Quando as etapas exigem que, além da estimativa de temperatura, seja realizado o aquecimento do compressor em teste, configurou-se que, com o compressor em funcionamento, fosse inserida, juntamente com a componente CA da fonte, uma componente CC que proporcionasse uma tensão máxima para o compressor em teste, suficiente para aquecê-lo adequadamente e não invalidar algumas

---

<sup>27</sup>O controle da CC inserida no compressor em teste é feito através do monitoramento da tensão contínua medida em seus enrolamentos.

condições que serão comentadas na sequência. Essa tensão máxima também é específica para cada modelo de compressor.

Cada modelo de compressor possui diferentes características que influenciam diretamente na determinação das tensões máxima e mínima, sendo a mais importante delas a resistência da bobina principal do modelo. Compressores com maiores resistências na bobina principal apresentam maiores tensões para uma mesma CC inserida, se comparados àqueles que possuem menores resistências. Percebe-se assim a necessidade de uma avaliação prévia do compressor para determinação dessas tensões, caso determinado modelo nunca tenha sido ensaiado na BPT.

Para se determinar essas tensões, adotou-se parcialmente o procedimento proposto por SILVEIRA (2010).

#### 4.1.1 Determinação da tensão máxima proporcionada pela inserção de CC

Como comentado anteriormente, SILVEIRA (2010) sugeriu um roteiro para identificar a tensão máxima. Nele, o compressor, em determinada condição de pressão, tem sua inserção de CC aumentada gradativamente, enquanto algumas condições são monitoradas. Assim que uma dessas condições é ultrapassada, a tensão contínua medida naquele momento é considerada a máxima para o compressor em questão.

As principais condições sugeridas por SILVEIRA (2010) são:

- tensão contínua maior que 65 V;
- corrente rms maior que 12 A;
- escorregamento maior que 8%.

O *software* da bancada foi configurado para monitorar todas as condições.

Nos ensaios realizados na BPT aprimorada<sup>28</sup> verificou-se que a primeira condição a ser ultrapassada era a relacionada ao escorregamento do motor. SILVEIRA (2010) sugeriu 8% como valor máximo de escorregamento para determinação da tensão máxima

---

<sup>28</sup>Considera-se BPT aprimorada como a bancada que possui as modificações propostas neste trabalho, como a integração do SICC na sua rotina de ensaios, *hardware* e *software*.

proporcionada pela inserção de CC em determinado compressor, valor conservador para garantir que o compressor não tombe durante essa etapa. Visto que na BPT aprimorada são eficientemente monitorados, por dois diferentes métodos, escorregamentos de até 20% (que representam os 80% da frequência rotacional nominal do compressor sob ensaio), decidiu-se então para a BPT aprimorada aumentar a inserção de CC até 12% de escorregamento. Isso propicia a utilização de maiores níveis de CC no compressor, o que resulta em menores tempos de aquecimento.

Foi também desenvolvido no *software* um controlador PID, para ajustar a magnitude de injeção de CC no compressor, em conjunto com a CA.

Dessa maneira o procedimento para determinação da máxima tensão proporcionada pela injeção de CC a ser aplicada no compressor é o seguinte:

- 1) alimentar o compressor através da fonte de alimentação com 90% da tensão nominal referente às exigências de ensaio;
- 2) estabelecer condições de pressão<sup>29</sup> na sucção e descarga do compressor em teste;
- 3) aumentar gradativamente a CC inserida enquanto todas as condições estão sendo monitoradas;
- 4) assim que uma condição é ultrapassada, determina-se a máxima tensão contínua para o compressor em teste como aquela que estava sendo medida.

#### 4.1.2 Determinação da tensão mínima proporcionada pela inserção de CC

SILVEIRA (2010) sugeriu o valor de 4 V como tensão mínima contínua proporcionada pela injeção de CC, para se realizar a medição de temperatura dentro das tolerâncias estabelecidas. Neste trabalho realizou-se o seguinte procedimento:

---

<sup>29</sup>Condições de pressão em que a frequência rotacional do compressor se aproxima da nominal. Por exemplo, um compressor 60 Hz em determinada condição de pressão em que sua frequência rotacional está entre (58 e 60) Hz. A mesma observação é válida para compressores 50 Hz – (48 e 50) Hz.

- 1) após determinar a tensão máxima, alimentar o compressor através da fonte de alimentação com 90% da tensão nominal referente às exigências de ensaio;
- 2) estabelecer condições de pressão na sucção e descarga do compressor em teste. As condições devem ser iguais às empregadas anteriormente na determinação da tensão máxima;
- 3) realizar medições alternadas utilizando a tensão máxima (previamente encontrada) e tensões mínimas a partir dos 4 V até verificar um par de medições que apresente leituras semelhantes;
- 4) aumentar a tensão mínima. Se não houver modificações na leitura de temperatura, considera-se esse último valor como tensão mínima contínua.

Este procedimento busca evitar diferenças significativas entre as medições realizadas com a tensão máxima e com a mínima. Em especial para compressores com maiores resistências na bobina principal, os quais proporcionam maiores tensões contínuas.

É possível também realizar medição de temperatura do enrolamento do compressor fora das rotinas de ensaio. Para tanto, foi configurada no *software* uma rotina de medição manual de temperatura, onde, assim que executada, coloca o compressor em operação com a componente CA da fonte (caso ele não esteja em funcionamento) e injeta componente CC que proporcione tensão mínima, previamente determinada.

Como discutido no tópico anterior, os três ensaios realizados na BPT automatizada utilizavam dois métodos de aquecimento: um para aquecimento do compressor e BPT (que não era adequado para se chegar às condições de ensaio) e outro exclusivo para aquecimento da bobina principal do compressor em teste.

Para os três ensaios, ambos os métodos de aquecimento foram substituídos por um único, que utiliza o SICC. Com ele, o aquecimento é realizado através da configuração de pressões no compressor em teste, e injeção de componente CC junto à CA proveniente da fonte. Neste método, como o compressor está em funcionamento e há fluido refrigerante circulando no mesmo, o que permite realizar, ao mesmo tempo, aquecimento da BPT aprimorada como um todo e da bobina principal do compressor em teste.

Portanto, de posse das novas condições impostas pelo SICC, foi necessária alteração das rotinas dos três ensaios. As mudanças exigidas serão explicadas nos tópicos a seguir.

#### 4.1.3 Ensaio de partida equalizada com inserção do SICC

A substituição dos métodos de aquecimento para utilização do SICC implicou mudança da rotina de ensaios e *software* da bancada.

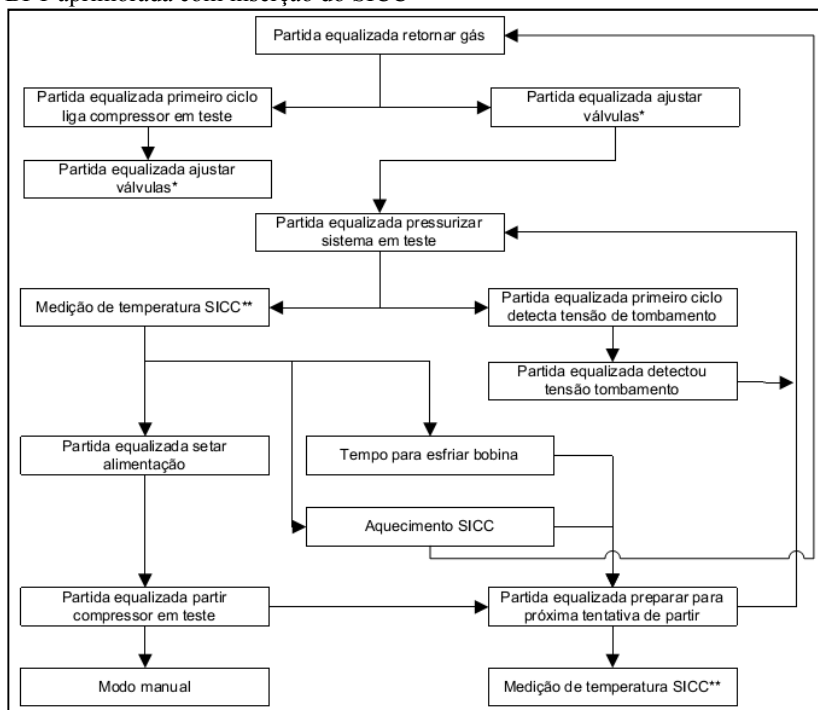
Duas novas etapas foram criadas. Em uma delas (Medição de temperatura SICC), é realizada exclusivamente a medição indireta de temperatura através do SICC. É a partir dela que se dá sequência ao ensaio, seja para a tentativa de partir o compressor em teste, aquecê-lo ou permitir tempo para esfriá-lo.

A outra etapa (Aquecimento SICC) é a de aquecimento propriamente dito, onde o SICC injetará componente CC que proporcione a tensão máxima previamente determinada, até o enrolamento do compressor em teste atingir a temperatura de ensaio.

Ressalta-se que, para que o SICC não exerça qualquer tipo de influência nos resultados dos ensaios, na etapa em que se tenta partir o compressor em teste ele é completamente desligado.

A figura abaixo mostra o fluxograma das etapas do ensaio de partida equalizada realizado na BPT aprimorada com inserção do SICC.

Figura 17: Etapas do ensaio de partida equalizada automatizado aplicado na BPT aprimorada com inserção do SICC



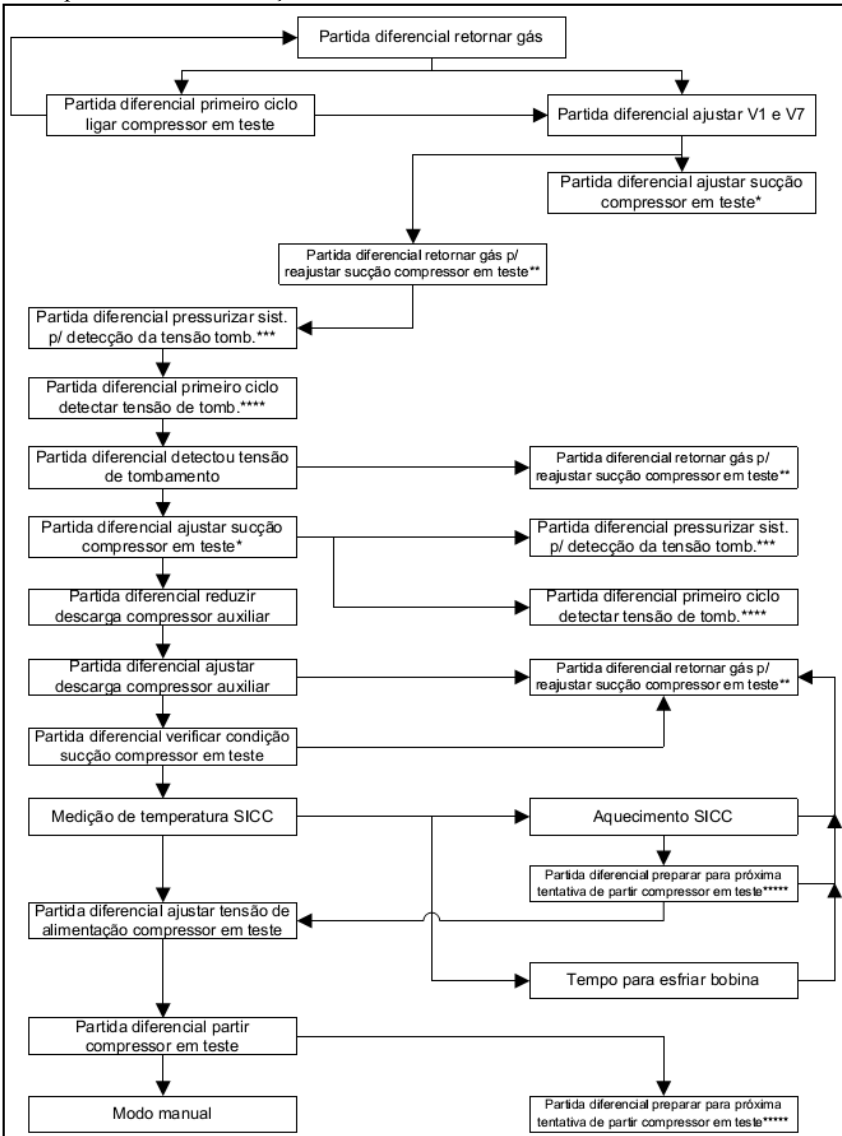
Fonte: Autor.

#### 4.1.4 Ensaio de partida diferencial com inserção do SICC

Nesse ensaio, a adaptação do SICC exigiu também a inserção de duas novas etapas (Medição de temperatura SICC e Aquecimento SICC) à rotina de ensaios da bancada. E, assim como no ensaio de partida equalizada, na etapa em que se tenta partir o compressor em teste o SICC é totalmente desligado para evitar qualquer influência nos resultados.

A figura 18 mostra o fluxograma das etapas do ensaio de partida diferencial realizado na BPT aprimorada com inserção do SICC.

Figura 18: Etapas do ensaio de partida diferencial automatizado aplicado na BPT aprimorada com inserção do SICC



Fonte: Autor.



#### 4.1.5 Ensaio de tombamento com inserção do SICC

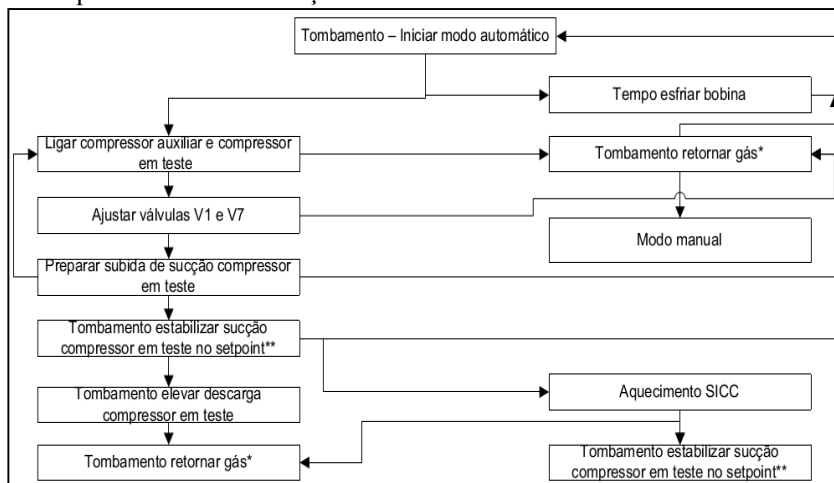
Para o ensaio de tombamento foi necessária a criação de apenas uma nova etapa (Aquecimento SICC), visto que foi possível adaptar as necessidades do SICC às outras etapas já existentes.

Como nesse ensaio o compressor em teste já está em funcionamento nas etapas anteriores à de elevação de carga que o conduz ao tombamento, foi configurada a medição de temperatura através do SICC nessas próprias etapas.

De forma semelhante aos ensaios de partida, na etapa em que é aumentada a condição de pressão na descarga do compressor em teste a fim de tombá-lo, o SICC é completamente desligado para se evitar qualquer possível influência nos resultados.

A figura abaixo mostra o fluxograma das etapas do ensaio de tombamento realizado na BPT aprimorada com inserção do SICC.

Figura 19: Etapas do ensaio de tombamento automatizado aplicado na BPT aprimorada com inserção do SICC



Fonte: Autor.

## 4.2 Conclusões

Os procedimentos escolhidos para as modificações nas rotinas de ensaios, *hardware*, *software* da bancada, determinação de parâmetros

(tensões contínuas máximas e mínimas para cada modelo de compressor), mostraram-se adequados, visto que as condições necessárias, tanto para o correto funcionamento do SICC quanto para a realização dos ensaios dentro dos padrões estabelecidos pela empresa parceira deste projeto, foram buscadas e atingidas.

A medição indireta de temperatura do enrolamento principal do compressor em teste proporcionada pelo SICC permitiu que fossem realizados ensaios na BPT aprimorada sem a necessidade de instrumentá-lo com termopares ou realizar a medição indireta manualmente com o mesmo desligado, como é feito atualmente na empresa. Isso aumenta a produtividade da bancada, pois permite que um compressor seja retirado da linha de montagem e levado diretamente para a BPT aprimorada, além de minimizar as incertezas quando comparadas com as obtidas no processo manual com o compressor desligado.

Ainda, o método de aquecimento acelerado proporcionado pelo SICC possibilitou que os dois métodos utilizados previamente na BPT automatizada fossem substituídos por um único, que satisfaz as condições necessárias aos ensaios e resolve as deficiências dos anteriores. Além disso, proporciona menores tempos de aquecimento (os resultados são apresentados no capítulo 5), que aumentam a produtividade da bancada.

## 5. AVALIAÇÃO DA BANCADA DE ENSAIOS DE PARTIDA E TOMBAMENTO APRIMORADA

### 5.1 Comparação de resultados

Para validar o desenvolvimento da BPT aprimorada<sup>30</sup>, e a integração do SICC em sua rotina de ensaios, *hardware* e *software*, foi solicitado junto à empresa parceira deste trabalho que fossem realizados testes de partida e tombamento em sua BPT manual com alguns modelos de compressores.

Foram feitos então ensaios de partida e tombamento em três diferentes modelos de compressores na BPT manual, instalada na empresa. Assim que os ensaios na empresa foram finalizados, as peças ensaiadas, bem como os dados obtidos nos ensaios, foram enviadas para o LIAE. Os ensaios foram repetidos na BPT aprimorada e os resultados comparados.

As principais características, relevantes para este trabalho, dos compressores utilizados estão apresentadas na figura 20.

Figura 20: Características dos compressores utilizados

Modelo <sup>31</sup>	Tensão de alimentação nominal [V]	Frequência rotacional nominal [Hz]	Resistência da bobina principal a 25 °C [ $\Omega$ ] <sup>32</sup>	Fluido refrigerante
A	220	50	26,62	R-134a
B	220	60	10,50	R-134a

<sup>30</sup>Ainda não havia comparações dos resultados obtidos na BPT manual com os da BPT automatizada (visto que ela não é operacional, devido à deficiência na medição de temperatura, de modo que não é viável instrumentar com termopares todos os compressores que se deseja ensaiar e, mesmo instrumentando as mesmas peças, as características originais do compressor hermético são alteradas) utilizando as mesmas peças.

<sup>31</sup>Por questões de sigilo industrial, os compressores utilizados neste trabalho serão identificados por letras e não pelos seus nomes comerciais.

<sup>32</sup>Dados provenientes da empresa fabricante dos compressores alternativos herméticos de refrigeração.

C	115	60	1,13	R-134a
---	-----	----	------	--------

Fonte: Autor.

Percebe-se que foram escolhidos três modelos de compressores que possuem diferentes resistências de bobina principal, característica interessante para avaliar se o SICC atua satisfatoriamente nessa faixa de resistências. Segundo informações provenientes da empresa, essa faixa contempla os valores de resistência utilizados nos modelos mais vendidos de compressores.

A empresa disponibilizou os resultados dos ensaios de:

- partida equalizada dos três modelos em condições usuais já ensaiadas na empresa;
- partida diferencial para o Modelo C, também em condição usual já ensaiada na empresa;
- tombamento dos três modelos, cada modelo com três diferentes *setpoints*.

Para os ensaios de partida, o procedimento foi o mesmo que foi realizado na empresa, ou seja, identifica-se uma tensão em que, em certa condição de pressão, com o seu valor imediatamente inferior (1 V de decréscimo) não é possível partir o compressor em teste. O compressor deve ser capaz de partir três vezes seguidas com a tensão identificada e esta é então denominada como a tensão mínima de partida para aquela condição.

A variabilidade apresentada para os ensaios de partida realizados na BPT manual são estimados a partir do histórico para determinados modelo de compressor e condição, e consideram apenas o resultado final, utilizando coeficiente de Student para amostras finitas, com intervalo de confiança de 95%.

Nos ensaios de tombamento, o procedimento foi diferente do realizado na empresa. O operador realizou um ensaio de tombamento para cada *setpoint* de cada compressor, sendo que a variabilidade apresentada é do histórico de ensaios de determinado modelo de compressor, e não da peça em questão. Assim, como nos ensaios de partida, considera-se apenas o resultado final, utilizando coeficiente de Student para amostras finitas, com intervalo de confiança de 95%. Ou seja, não consideram os instrumentos de medição, como é feito no método utilizado no LIAE, comentado logo abaixo.

No LIAE, para cada novo modelo de compressor integrado à BPT aprimorada foram realizados ensaios individuais, com o intuito de determinar os melhores parâmetros para o modelo em questão<sup>33</sup>.

Após determinação desses parâmetros iniciais, estipulou-se que para cada *setpoint* fossem realizados dez ensaios de tombamento, para cada um dos três modelos de compressores.

Com os resultados obtidos nos ensaios de tombamento, realizou-se avaliação de incertezas através do método de Monte Carlo (JCGM, 2008), a fim de contornar as limitações do tradicional ISO GUM (2003) para este caso<sup>34</sup>, conforme recomendações de SCHLICKMANN (2012), considerando tanto a incerteza instrumental da medição de pressão quanto o desvio padrão das medições obtidas nos ensaios. Para essa avaliação, foram feitas as adaptações necessárias no *software* elaborado por SCHLICKMANN (2012). O mesmo foi utilizado para avaliação de incertezas da curva de tombamento, seguindo orientações de JCGM (2008), sobre parâmetros como o número de iterações e nível de confiança. No caso, foi utilizado o valor de 95% como nível de confiança.

Por fim, antes de qualquer ensaio, foram determinadas as tensões máximas e mínimas contínuas que deveriam ser proporcionadas em cada novo modelo de compressor. Esses valores são mostrados na figura 21.

Figura 21: Tensões máximas e mínimas proporcionadas em cada modelo de compressor

<b>Modelo</b>	<b>Tensão máxima CC [V]</b>	<b>Tensão mínima CC [V]</b>
A	40	25
B	25	10
C	8	5

Fonte: Autor.

<sup>33</sup>Dessa forma, foram otimizados parâmetros como ganho das válvulas agulha automatizadas instaladas no circuito, determinação de limites de aquecimento (visto que cada modelo de compressor possui inércia térmica diferente), entre outros.

<sup>34</sup>O ISO GUM apresenta limitações quando o modelo matemático da medição apresenta considerável não linearidade (KACKER, R; TOMAN, B; HUNANG, D, 2006).

Na sequência, serão apresentados os resultados obtidos, tanto na empresa quanto no LIAE, de todos os ensaios realizados com os três modelos de compressores.

### 5.1.1 Ensaios de partida equalizada

Modelo A: condição 7,0 bar imposta na sucção e descarga do compressor em teste.

- BPT manual:  $(139,0 \pm 3,1)$  V;
- BPT aprimorada:

Figura 22: Ensaio de partida equalizada na BPT aprimorada – Modelo A

Tentativas com êxito	Tensão de alimentação (CA) [V]	Temperatura da bobina principal [°C]
1 <sup>a</sup>	$(138,0 \pm 1,6)^{35}$	$(105,31 \pm 0,43)^{36}$
2 <sup>a</sup>	$(138,0 \pm 1,6)$	$(105,19 \pm 0,43)$
3 <sup>a</sup>	$(138,0 \pm 1,6)$	$(104,86 \pm 0,43)$

Fonte: Autor.

Apresenta resultado de 1 V a menos do que o encontrado na bancada manual e está dentro da variabilidade fornecida pela empresa.

Modelo B: condição 6,0 bar imposta na sucção e descarga do compressor em teste.

<sup>35</sup>Incerteza calculada através de dados fornecidos pelo fabricante da fonte de alimentação. Válido para todos os ensaios de partida.

<sup>36</sup>Incerteza calculada através da utilização da equação 4 para estimar a resistência da bobina principal do compressor, utilizando-se  $\alpha = 0,0039$  °C<sup>-1</sup> (PACHECO, 2007) e  $T_E$  = valor estimado. Com a resistência calculada, recorreu-se aos dados providos por SCHLICKMANN (2012) para se chegar à incerteza instrumental para a temperatura em questão. Este procedimento foi realizado em todos os ensaios para cálculo da incerteza de medição da temperatura.

- BPT manual:  $(135,0 \pm 3,3)$  V;
- BPT aprimorada:

Figura 23: Ensaio de partida equalizada na BPT aprimorada – Modelo B

Tentativas com êxito	Tensão de alimentação (CA) [V]	Temperatura da bobina principal [°C]
1ª	$(135,0 \pm 1,5)$	$(104,98 \pm 0,38)$
2ª	$(135,0 \pm 1,5)$	$(105,34 \pm 0,38)$
3ª	$(135,0 \pm 1,5)$	$(105,47 \pm 0,38)$

Fonte: Autor

Apresenta resultado igual ao encontrado na bancada manual.

Modelo C: condição 8,0 bar imposta na sucção e descarga do compressor em teste.

- BPT manual:  $(101,0 \pm 3,0)$  V;
- BPT aprimorada:

Figura 24: Ensaio de partida equalizada na BPT aprimorada – Modelo C

Tentativas com êxito	Tensão de alimentação (CA) [V]	Temperatura da bobina principal [°C]
1ª	$(100,0 \pm 1,2)$	$(104,62 \pm 0,79)$
2ª	$(100,0 \pm 1,2)$	$(105,09 \pm 0,79)$
3ª	$(100,0 \pm 1,2)$	$(104,97 \pm 0,79)$

Fonte: Autor.

Apresenta resultado de 1 V a menos do que o encontrado na bancada manual e está dentro da variabilidade fornecida pela empresa.

### 5.1.2 Ensaio de partida diferencial

Modelo C: condição 2,0 bar imposta na sucção do compressor em teste e 6,7 bar em sua descarga.

- BPT manual: (102,0 ±3,0) V;
- BPT aprimorada:

Figura 25: Ensaio de partida diferencial na BPT aprimorada – Modelo C

Tentativas com êxito	Tensão de alimentação (CA) [V]	Temperatura da bobina principal [°C]
1ª	(101,0 ±1,2)	(104,89 ±0,79)
2ª	(101,0 ±1,2)	(105,78 ±0,79)
3ª	(101,0 ±1,2)	(104,88 ±0,79)

Fonte: Autor.

Apresenta resultado de 1 V a menos do que o encontrado na bancada manual e está dentro da variabilidade fornecida pela empresa.

### 5.1.3 Ensaio de tombamento

Modelo A: *setpoints*: 20 °C, 25 °C e 30 °C (temperaturas de evaporação) no compressor em teste.

- BPT manual:

Figura 26: Ensaio de tombamento na BPT manual – Modelo A

<i>Setpoint</i> [°C]	Temperatura de condensação [°C] <sup>37</sup>
20	(71,7 ±7,5)
25	(67,7 ±4,3)

<sup>37</sup>É a temperatura de condensação no instante de tombamento.



30	(65,3 ±3,4)
----	-------------

Fonte: Autor.

- BPT aprimorada:

Figura 27: Ensaio de tombamento na BPT aprimorada – Modelo A – *Setpoint* 20 °C (média no compressor em teste de 19,7 °C)

Ensaio	Temperatura de condensação [°C]	Temperatura da bobina principal [°C]	Tempo de ensaio [s] <sup>38</sup>
1°	70,5	(79,82 ±0,42)	39
2°	70,7	(80,77 ±0,42)	32
3°	69,7	(79,07 ±0,42)	31
4°	69,6	(80,37 ±0,42)	29
5°	69,3	(79,43 ±0,42)	29
6°	69,6	(80,51 ±0,42)	28
7°	69,5	(79,99 ±0,42)	30
8°	68,7	(79,71 ±0,42)	31
9°	69,1	(79,72 ±0,42)	28
10°	69,2	(80,05 ±0,42)	31
<b>Resultado</b>	(69,6 ±2,1)		(30,8 ±7,2) <sup>39</sup>

Fonte: Autor.

<sup>38</sup>Considerado o tempo para se levar ao tombamento propriamente dito, ou seja, é contado a partir do momento em que se aumenta a pressão imposta na descarga do compressor em teste até seu tombamento. É a última etapa do ensaio que ocorre somente quando a pressão imposta na sucção do compressor em teste está no *setpoint* e a temperatura da bobina principal dentro da faixa.

<sup>39</sup>Variabilidade calculada através da utilização do coeficiente de Student para amostras finitas e intervalo de confiança de 95% (ALBERTAZZI; SOUZA, 2008).

Figura 28: Ensaio de tombamento na BPT aprimorada – Modelo A – *Setpoint* 25 °C (média no compressor em teste de 24,8 °C)

Ensaio	Temperatura de condensação [°C]	Temperatura da bobina principal [°C]	Tempo de ensaio [s]
1°	66,7	(80,19 ±0,42)	30
2°	67,6	(79,46 ±0,42)	31
3°	66,8	(79,56 ±0,42)	33
4°	66,1	(80,31 ±0,42)	27
5°	66,3	(80,20 ±0,42)	28
6°	66,3	(80,06 ±0,42)	28
7°	66,3	(79,57 ±0,42)	30
8°	65,3	(80,30 ±0,42)	29
9°	66,9	(79,24 ±0,42)	32
10°	66,6	(79,43 ±0,42)	30
<b>Resultado</b>	(66,5 ±2,2)		(29,8 ±4,2)

Fonte: Autor

Figura 29: Ensaio de tombamento na BPT aprimorada – Modelo A – *Setpoint* 30 °C (média no compressor em teste de 30,0 °C)

Ensaio	Temperatura de condensação [°C]	Temperatura da bobina principal [°C]	Tempo de ensaio [s]
1°	66,0	(79,75 ±0,42)	24
2°	66,1	(80,43 ±0,42)	24
3°	66,2	(80,11 ±0,42)	27
4°	65,9	(79,90 ±0,42)	25
5°	65,8	(79,98 ±0,42)	26
6°	65,8	(79,70 ±0,42)	24

7°	66,1	(80,09 ±0,42)	28
8°	65,7	(80,21 ±0,42)	31
9°	65,7	(80,55 ±0,42)	26
10°	65,7	(80,30 ±0,42)	25
<b>Resultado</b>	(65,9 ±1,7)		(26,0 ±5,0)

Fonte: Autor.

Para os três *setpoints* os resultados estão dentro da variabilidade fornecida pela empresa.

Modelo B: *setpoints*: 20 °C, 25 °C e 30 °C (temperaturas de evaporação) no compressor em teste.

- BPT manual:

Figura 30: Ensaios de tombamento na BPT manual – Modelo B

<i>Setpoint</i> [°C]	Temperatura de condensação [°C]
20	(69,3 ±5,3)
25	(64,7 ±4,4)
30	(62,4 ±4,1)

Fonte: Autor.

- BPT aprimorada:

Figura 31: Ensaio de tombamento na BPT aprimorada – Modelo B – *Setpoint* 20 °C (média no compressor em teste de 20,2 °C)

Ensaio	Temperatura de condensação [°C]	Temperatura da bobina principal [°C]	Tempo de ensaio [s]
1°	69,2	(80,67 ±0,38)	14
2°	69,5	(80,27 ±0,38)	12

3°	69,3	(80,25 ±0,38)	13
4°	69,7	(79,52 ±0,38)	15
5°	68,9	(79,85 ±0,38)	16
6°	69,1	(80,58 ±0,38)	15
7°	68,9	(81,08 ±0,38)	15
8°	69,1	(79,96 ±0,38)	16
9°	69,4	(79,51 ±0,38)	16
10°	69,2	(80,25 ±0,38)	14
<b>Resultado</b>	(69,2 ±2,2)		(14,6 ±3,0)

Fonte: Autor.

Figura 32: Ensaio de tombamento na BPT aprimorada – Modelo B – *Setpoint* 25 °C (média no compressor em teste de 25,0 °C)

Ensaio	Temperatura de condensação [°C]	Temperatura da bobina principal [°C]	Tempo de ensaio [s]
1°	65,2	(79,42 ±0,38)	12
2°	64,6	(80,53 ±0,38)	12
3°	64,7	(80,27 ±0,38)	13
4°	65,3	(79,58 ±0,38)	15
5°	64,9	(80,27 ±0,38)	11
6°	64,7	(79,87 ±0,38)	14
7°	64,7	(79,82 ±0,38)	14
8°	64,9	(80,35 ±0,38)	13
9°	64,9	(80,72 ±0,38)	14
10°	64,9	(80,45 ±0,38)	15
<b>Resultado</b>	(64,9 ±1,9)		(13,3 ±3,0)

Fonte: Autor.

Figura 33: Ensaio de tombamento na BPT aprimorada – Modelo B – *Setpoint* 30 °C (média no compressor em teste de 30,1 °C)

Ensaio	Temperatura de condensação [°C]	Temperatura da bobina principal [°C]	Tempo de ensaio [s]
1°	62,6	(79,70 ±0,38)	12
2°	62,3	(80,21 ±0,38)	9
3°	62,3	(80,69 ±0,38)	9
4°	62,7	(80,22 ±0,38)	10
5°	62,8	(79,77 ±0,38)	11
6°	62,4	(80,36 ±0,38)	10
7°	62,3	(79,53 ±0,38)	9
8°	62,2	(80,27 ±0,38)	10
9°	62,5	(80,29 ±0,38)	10
10°	62,6	(80,31 ±0,38)	9
<b>Resultado</b>	(62,4 ±1,8)		(9,9 ±2,2)

Fonte: Autor.

Para os três *setpoints* os resultados estão dentro da variabilidade fornecida pela empresa. Em especial, para o *setpoint* de 30 °C onde a média dos resultados encontrados é a mesma do resultado proveniente da bancada manual.

Modelo C: *setpoints*: 15 °C, 20 °C e 25 °C (temperaturas de evaporação) no compressor em teste.

- BPT manual:

Figura 34: Ensaio de tombamento na BPT manual – Modelo C

<i>Setpoint</i> [°C]	Temperatura de condensação [°C]
15	(68 ±10)

20	(63,3 ±8,8)
25	(57,3 ±8,1)

Fonte: Autor.

- BPT aprimorada:

Figura 35: Ensaio de tombamento na BPT aprimorada – Modelo C – *Setpoint* 15 °C (média no compressor em teste de 15,0 °C)

Ensaio	Temperatura de condensação [°C]	Temperatura da bobina principal [°C]	Tempo de ensaio [s]
1°	71,3	(80,27 ±0,79)	28
2°	71,5	(80,18 ±0,79)	25
3°	71,2	(80,52 ±0,79)	27
4°	72,0	(79,42 ±0,79)	28
5°	72,7	(80,72 ±0,79)	29
6°	71,9	(79,53 ±0,79)	29
7°	71,7	(80,35 ±0,79)	31
8°	71,1	(80,35 ±0,79)	31
9°	71,4	(80,32 ±0,79)	30
10°	71,5	(80,32 ±0,79)	29
<b>Resultado</b>	(71,6 ±2,2)		(28,7 ±4,1)

Fonte: Autor.

Figura 36: Ensaio de tombamento na BPT aprimorada – Modelo C – *Setpoint* 20 °C (média no compressor em teste de 20,1 °C)

Ensaio	Temperatura de condensação [°C]	Temperatura da bobina principal [°C]	Tempo de ensaio [s]
1°	65,8	(79,54 ±0,79)	18

2°	66,5	(80,51 ±0,79)	17
3°	66,3	(80,43 ±0,79)	16
4°	65,9	(80,52 ±0,79)	19
5°	66,4	(80,21 ±0,79)	18
6°	65,8	(80,53 ±0,79)	19
7°	65,8	(80,56 ±0,79)	17
8°	65,9	(80,00 ±0,79)	17
9°	66,1	(79,96 ±0,79)	16
10°	65,8	(79,79 ±0,79)	17
<b>Resultado</b>	(66,0 ±2,0)		(17,4 ±2,4)

Fonte: Autor.

Figura 37: Ensaio de tombamento na BPT aprimorada – Modelo C – *Setpoint* 25 °C (média no compressor em teste de 25,2 °C)

Ensaio	Temperatura de condensação [°C]	Temperatura da bobina principal [°C]	Tempo de ensaio [s]
1°	58,6	(79,95 ±0,79)	12
2°	57,7	(80,17 ±0,79)	9
3°	58,9	(80,03 ±0,79)	9
4°	57,6	(79,80 ±0,79)	9
5°	57,5	(80,49 ±0,79)	10
6°	57,7	(80,42 ±0,79)	11
7°	57,5	(79,79 ±0,79)	9
8°	57,6	(79,72 ±0,79)	10
9°	58,1	(80,19 ±0,79)	8
10°	57,7	(80,48 ±0,79)	9

<b>Resultado</b>	(57,9 ±3,1)		(9,6 ±2,6)
------------------	-------------	--	------------

Fonte: Autor.

Para os três *setpoints* os resultados estão dentro da variabilidade fornecida pela empresa.

#### 5.1.4 Aquecimento acelerado

Com o objetivo de se avaliar os ganhos proporcionados pelo SICC (além daqueles relacionados à substituição dos dois métodos de aquecimento anteriores por um único e mais eficiente) relativos à redução do tempo de aquecimento, fez-se o seguinte procedimento: de posse dos três modelos de compressores já utilizados para os ensaios, realizaram-se cinco ciclos de aquecimento, cada um deles a partir de 25 °C<sup>40</sup> até 80 °C, utilizando os métodos anteriores e o atual com o SICC.

É importante ressaltar que os compressores utilizados não foram instrumentados com termopares (visto que nas novas rotinas com o SICC integrado os mesmos não são mais necessários), logo, mesmo nos ciclos em que são utilizados os métodos anteriores de aquecimento, há necessidade de utilização do SICC para se obter a estimativa da temperatura. Dessa maneira, mesmo utilizando a tensão mínima contínua, os tempos obtidos são menores do que aqueles que seriam encontrados caso fossem utilizados exclusivamente os métodos anteriores em compressores instrumentados com termopares.

Na sequência, seguem os resultados dos três modelos de compressores.

#### Modelo A:

Figura 38: Ciclos de aquecimento – Modelo A

<b>Ciclos de Aquecimento</b>	<b>Tempo de aquecimento sem o SICC [s]</b>	<b>Tempo de aquecimento com o SICC [s]</b>
1°	1045	367

<sup>40</sup>Como a temperatura ambiente no LIAE oscila entre 20 °C e 25 °C, optou-se utilizar a partir de 25°C como temperatura inicial para efeito de comparação.



2°	1020	394
3°	898	440
4°	945	417
5°	992	435
<b>Resultado</b>	$(980 \pm 164)^{41}$	$(411 \pm 84)$

Fonte: Autor.

O tempo de aquecimento com o SICCC é cerca de 42% do tempo obtido quando utiliza-se os métodos anteriores, que representa, nos piores casos, diferença de até 817 s.

### Modelo B:

Figura 39: Ciclos de aquecimento – Modelo B

<b>Ciclos de Aquecimento</b>	<b>Tempo de aquecimento sem o SICCC [s]</b>	<b>Tempo de aquecimento com o SICCC [s]</b>
1°	719	385
2°	775	392
3°	820	374
4°	754	405
5°	745	411
<b>Resultado</b>	$(763 \pm 105)$	$(393 \pm 41)$

Fonte: Autor.

O tempo de aquecimento com o SICCC é cerca de 51% do tempo obtido quando utiliza-se os métodos anteriores, que representa, nos piores casos, diferença de até 516 s.

---

<sup>41</sup>Variabilidade calculada através da utilização do coeficiente de Student para amostras finitas e 95% como intervalo de confiança (ALBERTAZZI; SOUZA, 2008). Também utilizado para o cálculo da variabilidade para o tempo de aquecimento com o SICCC.

Modelo C:

Figura 40: Ciclos de aquecimento – Modelo C

Ciclos de Aquecimento	Tempo de aquecimento sem o SICC [s]	Tempo de aquecimento com o SICC [s]
1°	422	202
2°	532	223
3°	499	198
4°	456	185
5°	410	206
<b>Resultado</b>	(464 ±143)	(203 ±88)

Fonte: Autor.

O tempo de aquecimento com o SICC é cerca de 44% do tempo obtido quando utiliza-se os métodos anteriores, que representa, nos piores casos, diferença de até 492 s.

## 5.2 Análise dos resultados

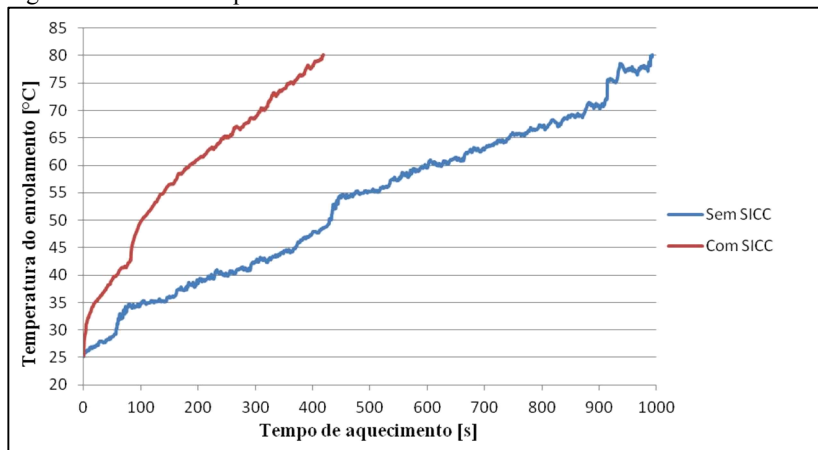
A análise dos resultados é feita com relação aos dados obtidos com o aquecimento acelerado dos compressores e ensaios de partida e tombamento.

### 5.2.1 Aquecimento acelerado

As figuras a seguir mostram as curvas de aquecimento dos três modelos de compressores ensaiados com e sem o SICC, relacionando a temperatura do enrolamento com o tempo de aquecimento. As curvas escolhidas são as dos ciclos de medição que mais se aproximaram da média.

- Modelo A:

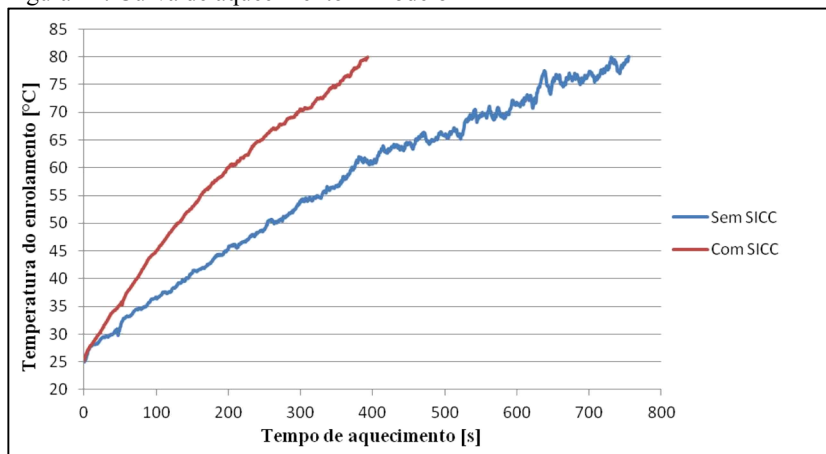
Figura 41: Curva de aquecimento – Modelo A



Fonte: Autor.

- Modelo B:

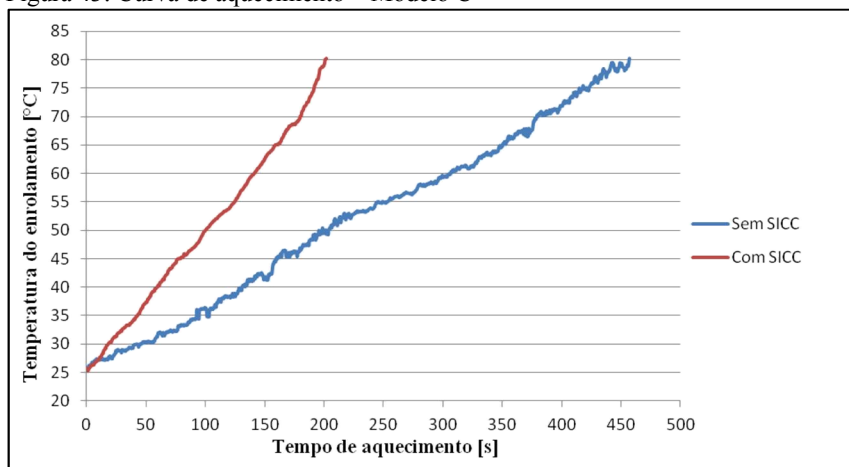
Figura 42: Curva de aquecimento – Modelo B



Fonte: Autor.

- Modelo C:

Figura 43: Curva de aquecimento – Modelo C



Fonte: Autor.

Com base nos dados apresentados, nota-se que a maior diferença ocorre com o Modelo A, onde o tempo de aquecimento com o SICC é cerca de 42% do tempo obtido quando utiliza-se os métodos anteriores, que representa, nos piores casos, diferença de até 817 s. Valores que mostram o ganho de tempo alcançado que proporciona o aumento de produtividade da BPT, especialmente para a empresa, onde devem ser ensaiados diversos modelos de compressores no menor tempo possível, além de minimizar a influência do operador.

### 5.2.2 Ensaio de partida e tombamento

Em relação aos resultados obtidos, conclui-se que a BPT aprimorada com o SICC integrado é capaz de realizar ensaios de partida equalizada, diferencial e tombamento dentro dos padrões exigidos por estes. É importante ressaltar que os métodos de avaliação utilizados na BPT manual e na BPT aprimorada são diferentes. O método utilizado na BPT manual é mais simples e utiliza somente os resultados propriamente ditos (de maneira que seu resultado representa a variabilidade), ao passo que na BPT aprimorada são consideradas as incertezas dos instrumentos de medição envolvidos nos ensaios e o

desvio padrão das medições obtidas. Dessa maneira, para uma comparação completa, seria necessária maior análise da BPT manual, considerando sua instrumentação, e não somente os resultados, bem como a repetição do mesmo procedimento de ensaio nas duas bancadas.

Entretanto, com a comparação dos resultados provenientes da BPT manual instalada na empresa parceira, foi possível validar o desenvolvimento e adequação da BPT aprimorada, uma vez que todos os resultados obtidos estão dentro das variabilidades fornecidas pela empresa, assim como as médias alcançadas na BPT aprimorada estão próximas dos resultados obtidos na BPT manual.

Em acréscimo, as incertezas obtidas na BPT aprimorada são pequenas e conhecidas, de modo que os resultados apresentam boa repetibilidade e reprodutibilidade. Ao passo que na BPT manual, estão contidas em sua incerteza a variação das peças ensaiadas e sua própria incerteza instrumental, e desconhece-se a influência de cada uma.

Cabe destacar que, com os ganhos alcançados, na BPT aprimorada, torna-se possível o ensaio de mais peças em menos tempo (necessidade de menos BPT e operadores, aumento de produtividade etc), retirar um compressor da linha de produção e ensaiá-lo na sequência, repetição dos ensaios em um mesmo compressor, o que leva a resultados com maior repetibilidade (maior confiabilidade nos resultados), minimização da influência do operador, melhor controle de qualidade, comparação de resultados obtidos em diferentes plantas com diferentes BPT.



## 6. AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DA VARIAÇÃO DA CURVA DE PRESSÃO NOS RESULTADOS DOS ENSAIOS DE TOMBAMENTO

### 6.1 Estratégia adotada

Nos ensaios de tombamento, com a configuração atual da BPT aprimorada (figura 13), ocorre que, na última etapa, onde se aumenta a pressão imposta na descarga do compressor em teste até o seu tombamento, a descarga do compressor auxiliar é praticamente conectada à descarga do compressor em teste através do posicionamento das válvulas instaladas na bancada. Em outras palavras, é o compressor auxiliar que conduz o compressor em teste até o tombamento deste, de modo que variações na condição de pressão imposta na sucção do compressor auxiliar refletem em variações em sua descarga, que, por sua vez, afetam a descarga do compressor em teste.

Da literatura, tem-se que o torque exigido em um compressor é proporcional à potência de compressão, e que esta aumenta proporcionalmente à vazão mássica (tópico 2.5).

Portanto, quando se altera a pressão imposta na sucção (temperatura de evaporação) do compressor auxiliar, a vazão mássica deve acompanhar essa variação. Dessa maneira, se a pressão de sucção do compressor auxiliar é diminuída, o resultado será menor vazão mássica através dele, que acabará por exigir maior tempo para atingir uma mesma pressão de descarga, caso fosse utilizada maior pressão de sucção em sua entrada. Essa variação de tempo é importante, pois indica a maneira como o compressor em teste será exigido até o tombamento, ou seja, se ele chegará lenta ou rapidamente até o instante de tombamento e se este é o mesmo nos dois modos.

Em vista disso, decidiu-se investigar a influência nos resultados dos ensaios de tombamento a partir da variação da pressão imposta na sucção do compressor auxiliar, tanto nos resultados, como no tempo para se chegar ao instante de tombamento.

Para tanto, foram utilizados os três modelos de compressores já mostrados no capítulo 5. Ensaios de tombamento foram realizados mantendo-se a pressão imposta na sucção do compressor auxiliar constante, em 6 bar, na última etapa, como apresentado no capítulo anterior. Neste capítulo, novos ensaios de tombamento foram realizados, dessa vez com 4 bar e 2 bar impostos na sucção do compressor auxiliar. Os ensaios realizados e resultados são apresentados no próximo tópico.

## 6.2 Ensaio realizados e resultados

Modelo A: *setpoints*: 20 °C, 25 °C e 30 °C (temperaturas de evaporação) no compressor em teste. Pressão imposta na sucção do compressor auxiliar: 4 bar.

Figura 44: Ensaio de tombamento na BPT aprimorada – Modelo A – *Setpoint* 20 °C (média no compressor em teste de 19,8 °C) – 4 bar

Ensaio	Temperatura de condensação [°C]	Temperatura da bobina principal [°C]	Tempo de ensaio [s]
1°	71,2	(79,99 ±0,42)	64
2°	70,6	(79,77 ±0,42)	55
3°	71,0	(80,56 ±0,42)	53
4°	70,3	(79,78 ±0,42)	46
5°	71,6	(80,58 ±0,42)	61
6°	71,1	(79,87 ±0,42)	58
7°	71,1	(80,00 ±0,42)	63
8°	70,8	(80,17 ±0,42)	55
9°	71,0	(80,55 ±0,42)	58
10°	70,4	(79,57 ±0,42)	55
<b>Resultado</b>	(70,9 ±2,7)		(57 ±12)

Fonte: Autor.

Figura 45: Ensaio de tombamento na BPT aprimorada – Modelo A – *Setpoint* 25 °C (média no compressor em teste de 24,7 °C) – 4 bar

Ensaio	Temperatura de condensação [°C]	Temperatura da bobina principal [°C]	Tempo de ensaio [s]
1°	67,1	(80,46 ±0,42)	55
2°	67,3	(80,09 ±0,42)	43



3°	67,3	(79,85 ±0,42)	48
4°	67,6	(79,20 ±0,42)	54
5°	67,5	(79,80 ±0,42)	45
6°	66,7	(79,85 ±0,42)	40
7°	67,7	(79,57 ±0,42)	38
8°	67,7	(78,13 ±0,42)	42
9°	66,8	(80,80 ±0,42)	46
10°	66,9	(80,48 ±0,42)	44
<b>Resultado</b>	(67,2 ±2,1)		(45 ±12)

Fonte: Autor.

Figura 46: Ensaio de tombamento na BPT aprimorada – Modelo A – *Setpoint* 30 °C (média no compressor em teste de 30,1 °C) – 4 bar

Ensaio	Temperatura de condensação [°C]	Temperatura da bobina principal [°C]	Tempo de ensaio [s]
1°	66,4	(80,15 ±0,42)	37
2°	66,2	(79,99 ±0,42)	38
3°	66,3	(80,36 ±0,42)	42
4°	66,1	(79,94 ±0,42)	41
5°	66,5	(80,38 ±0,42)	41
6°	66,7	(80,28 ±0,42)	40
7°	66,3	(80,77 ±0,42)	35
8°	66,2	(79,60 ±0,42)	47
9°	66,2	(79,76 ±0,42)	40
10°	66,2	(79,90 ±0,42)	42
<b>Resultado</b>	(66,3 ±1,7)		(40,3 ±7,4)

Fonte: Autor.

Percebe-se que, com a diminuição da pressão imposta na sucção do compressor auxiliar (6 bar para 4 bar), a média das temperaturas de condensação aumentou, assim como a dos tempos de ensaio.

Modelo A: *setpoints*: 20 °C, 25 °C e 30 °C (temperaturas de evaporação) no compressor em teste. Pressão imposta na sucção do compressor auxiliar: 2 bar.

Figura 47: Ensaio de tombamento na BPT aprimorada – Modelo A – *Setpoint* 20 °C (média no compressor em teste de 20,1 °C) – 2 bar

Ensaio	Temperatura de condensação [°C]	Temperatura da bobina principal [°C]	Tempo de ensaio [s]
1°	72,2	(80,15 ±0,42)	106
2°	72,4	(79,17 ±0,42)	109
3°	72,1	(80,12 ±0,42)	95
4°	71,6	(79,54 ±0,42)	100
5°	71,5	(79,99 ±0,42)	103
6°	71,0	(80,69 ±0,42)	117
7°	71,3	(79,83 ±0,42)	88
8°	71,4	(79,67 ±0,42)	96
9°	71,3	(79,29 ±0,42)	92
10°	72,4	(80,55 ±0,42)	109
<b>Resultado</b>	(71,7 ±2,4)		(102 ±20)

Fonte: Autor.

Figura 48: Ensaio de tombamento na BPT aprimorada – Modelo A – *Setpoint* 25 °C (média no compressor em teste de 24,9 °C) – 2 bar

Ensaio	Temperatura de condensação [°C]	Temperatura da bobina principal [°C]	Tempo de ensaio [s]
1°	66,9	(80,03 ±0,42)	79

2°	67,0	(79,86 ±0,42)	88
3°	66,9	(80,27 ±0,42)	86
4°	66,8	(80,09 ±0,42)	92
5°	67,1	(80,02 ±0,42)	100
6°	67,4	(80,05 ±0,42)	95
7°	67,6	(79,48 ±0,42)	86
8°	67,6	(79,94 ±0,42)	95
9°	67,6	(80,30 ±0,42)	92
10°	67,7	(79,92 ±0,42)	88
<b>Resultado</b>	(67,3 ±1,9)		(90 ±14)

Fonte: Autor.

Figura 49: Ensaio de tombamento na BPT aprimorada – Modelo A – *Setpoint* 30 °C (média no compressor em teste de 30,2 °C) – 2 bar

<b>Ensaio</b>	<b>Temperatura de condensação [°C]</b>	<b>Temperatura da bobina principal [°C]</b>	<b>Tempo de ensaio [s]</b>
1°	66,8	(79,58 ±0,42)	82
2°	66,7	(79,73 ±0,42)	84
3°	66,4	(80,06 ±0,42)	82
4°	66,3	(80,64 ±0,42)	79
5°	66,5	(80,80 ±0,42)	80
6°	66,8	(80,34 ±0,42)	78
7°	67,0	(80,54 ±0,42)	78
8°	66,9	(80,09 ±0,42)	88
9°	66,4	(80,12 ±0,42)	80
10°	66,5	(79,69 ±0,42)	79

<b>Resultado</b>	(66,6 ±1,8)		(81,0 ±7,1)
------------------	-------------	--	-------------

Fonte: Autor.

Percebe-se que, com a nova diminuição da pressão imposta na sucção do compressor auxiliar (4 bar para 2 bar), a média das temperaturas de condensação aumentou mais ainda, assim como a dos tempos de ensaio, em relação à situação anterior.

Modelo B: *setpoints*: 20 °C, 25 °C e 30 °C (temperaturas de evaporação) no compressor em teste. Pressão imposta na sucção do compressor auxiliar: 4 bar.

Figura 50: Ensaio de tombamento na BPT aprimorada – Modelo B – *Setpoint* 20 °C (média no compressor em teste de 20,2 °C) – 4 bar

Ensaio	Temperatura de condensação [°C]	Temperatura da bobina principal [°C]	Tempo de ensaio [s]
1°	70,3	(79,30 ±0,38)	18
2°	69,3	(80,32 ±0,38)	16
3°	69,8	(80,19 ±0,38)	16
4°	69,3	(81,00 ±0,38)	15
5°	69,8	(80,80 ±0,38)	15
6°	70,3	(79,96 ±0,38)	15
7°	69,8	(80,33 ±0,38)	18
8°	70,0	(80,06 ±0,38)	24
9°	69,8	(80,35 ±0,38)	18
10°	70,1	(80,27 ±0,38)	18
<b>Resultado</b>	(69,9 ±2,3)		(17,3 ±6,1)

Fonte: Autor.

Figura 51: Ensaio de tombamento na BPT aprimorada – Modelo B – *Setpoint* 25 °C (média no compressor em teste de 25,1 °C) – 4 bar

Ensaio	Temperatura de condensação [°C]	Temperatura da bobina principal [°C]	Tempo de ensaio [s]
1°	66,0	(79,97 ±0,38)	14
2°	65,6	(80,69 ±0,38)	15
3°	65,4	(80,03 ±0,38)	15
4°	65,4	(80,57 ±0,38)	14
5°	65,4	(80,43 ±0,38)	15
6°	65,4	(80,41 ±0,38)	16
7°	66,6	(79,86 ±0,38)	16
8°	66,9	(79,74 ±0,38)	17
9°	65,1	(80,07 ±0,38)	18
10°	66,2	(80,31 ±0,38)	17
<b>Resultado</b>	(65,8 ±2,2)		(15,7 ±3,0)

Fonte: Autor.

Figura 52: Ensaio de tombamento na BPT aprimorada – Modelo B – *Setpoint* 30 °C (média no compressor em teste de 30,1 °C) – 4 bar

Ensaio	Temperatura de condensação [°C]	Temperatura da bobina principal [°C]	Tempo de ensaio [s]
1°	63,5	(80,02 ±0,38)	11
2°	62,9	(79,93 ±0,38)	10
3°	63,6	(79,88 ±0,38)	10
4°	63,6	(80,59 ±0,38)	15
5°	63,5	(80,46 ±0,38)	13
6°	62,9	(79,69 ±0,38)	11

7°	62,5	(80,29 ±0,38)	13
8°	62,8	(80,41 ±0,38)	12
9°	63,0	(79,62 ±0,38)	9
10°	62,8	(80,29 ±0,38)	11
<b>Resultado</b>	(63,1 ±2,0)		(11,5 ±4,0)

Fonte: Autor.

Percebe-se que, com a diminuição da pressão imposta na sucção do compressor auxiliar (6 bar para 4 bar), a média das temperaturas de condensação aumentou, assim como a dos tempos de ensaio.

Modelo B: *setpoints*: 20 °C, 25 °C e 30 °C (temperaturas de evaporação) no compressor em teste. Pressão imposta na sucção do compressor auxiliar: 2 bar.

Figura 53: Ensaio de tombamento na BPT aprimorada – Modelo B – *Setpoint* 20 °C (média no compressor em teste de 20,0 °C) – 2 bar

Ensaio	Temperatura de condensação [°C]	Temperatura da bobina principal [°C]	Tempo de ensaio [s]
1°	70,6	(80,62 ±0,38)	45
2°	70,6	(80,39 ±0,38)	42
3°	70,4	(80,59 ±0,38)	48
4°	70,3	(80,80 ±0,38)	45
5°	70,6	(79,51 ±0,38)	41
6°	70,7	(78,97 ±0,38)	46
7°	70,3	(80,83 ±0,38)	47
8°	70,1	(81,97 ±0,38)	46
9°	70,2	(79,23 ±0,38)	42
10°	70,2	(80,57 ±0,38)	45
<b>Resultado</b>	(70,4 ±1,6)		(44,7 ±5,2)

Fonte: Autor.

Figura 54: Ensaio de tombamento na BPT aprimorada – Modelo B – *Setpoint* 25 °C (média no compressor em teste de 25,0 °C) – 2 bar

Ensaio	Temperatura de condensação [°C]	Temperatura da bobina principal [°C]	Tempo de ensaio [s]
1°	66,1	(80,47 ±0,38)	36
2°	66,3	(79,48 ±0,38)	38
3°	66,2	(79,94 ±0,38)	40
4°	66,2	(80,41 ±0,38)	31
5°	66,1	(80,33 ±0,38)	33
6°	66,5	(80,43 ±0,38)	38
7°	66,4	(79,65 ±0,38)	37
8°	66,6	(80,13 ±0,38)	37
9°	66,1	(80,39 ±0,38)	32
10°	66,1	(80,30 ±0,38)	33
<b>Resultado</b>	(66,3 ±1,7)		(35,5 ±6,8)

Fonte: Autor.

Figura 55: Ensaio de tombamento na BPT aprimorada – Modelo B – *Setpoint* 30 °C (média no compressor em teste de 30,1 °C) – 2 bar

Ensaio	Temperatura de condensação [°C]	Temperatura da bobina principal [°C]	Tempo de ensaio [s]
1°	63,8	(80,33 ±0,38)	24
2°	63,6	(80,44 ±0,38)	28
3°	63,6	(79,81 ±0,38)	27
4°	63,2	(80,13 ±0,38)	30

5°	63,1	(80,30 ±0,38)	31
6°	63,5	(79,71 ±0,38)	26
7°	63,4	(80,83 ±0,38)	27
8°	63,3	(79,83 ±0,38)	28
9°	63,6	(79,84 ±0,38)	26
10°	63,8	(80,53 ±0,38)	28
<b>Resultado</b>	(63,5 ±1,8)		(27,5 ±4,5)

Fonte: Autor

Percebe-se que, com a nova diminuição da pressão imposta na sucção do compressor auxiliar (4 bar para 2 bar), a média das temperaturas de condensação aumentou mais ainda, assim como a dos tempos de ensaio, em relação à situação anterior.

Modelo C: *setpoints*: 15 °C, 20 °C e 25 °C (temperaturas de evaporação) no compressor em teste. Pressão imposta na sucção do compressor auxiliar: 4 bar.

Figura 56: Ensaio de tombamento na BPT aprimorada – Modelo C – *Setpoint* 15 °C (média no compressor em teste de 15,0 °C) – 4 bar

Ensaio	Temperatura de condensação [°C]	Temperatura da bobina principal [°C]	Tempo de ensaio [s]
1°	75,1	(79,72 ±0,79)	32
2°	74,4	(80,54 ±0,79)	35
3°	72,1	(80,51 ±0,79)	34
4°	74,9	(80,55 ±0,79)	34
5°	73,8	(79,85 ±0,79)	37
6°	74,2	(80,28 ±0,79)	36
7°	74,4	(79,93 ±0,79)	35
8°	73,7	(79,94 ±0,79)	36



9°	74,2	(79,85 ±0,79)	34
10°	73,9	(80,46 ±0,79)	34
<b>Resultado</b>	(74,1 ±2,5)		(34,7 ±3,2)

Fonte: Autor.

Figura 57: Ensaio de tombamento na BPT aprimorada – Modelo C – *Setpoint* 20 °C (média no compressor em teste de 20,0 °C) – 4 bar

Ensaio	Temperatura de condensação [°C]	Temperatura da bobina principal [°C]	Tempo de ensaio [s]
1°	67,1	(79,63 ±0,79)	23
2°	66,8	(80,68 ±0,79)	23
3°	65,8	(79,83 ±0,79)	25
4°	66,4	(80,28 ±0,79)	24
5°	66,4	(80,37 ±0,79)	25
6°	66,8	(80,59 ±0,79)	26
7°	67,4	(80,10 ±0,79)	23
8°	66,4	(79,85 ±0,79)	23
9°	65,9	(79,72 ±0,79)	22
10°	66,5	(80,33 ±0,79)	23
<b>Resultado</b>	(66,5 ±2,2)		(23,7 ±2,8)

Fonte: Autor.

Figura 58: Ensaio de tombamento na BPT aprimorada – Modelo C – *Setpoint* 25 °C (média no compressor em teste de 25,4 °C) – 4 bar

Ensaio	Temperatura de condensação [°C]	Temperatura da bobina principal [°C]	Tempo de ensaio [s]
1°	58,3	(80,29 ±0,79)	19

2°	59,1	(80,38 ±0,79)	18
3°	58,8	(80,26 ±0,79)	19
4°	58,8	(79,69 ±0,79)	18
5°	58,2	(80,80 ±0,79)	17
6°	59,1	(80,10 ±0,79)	17
7°	58,7	(79,99 ±0,79)	18
8°	59,3	(79,78 ±0,79)	22
9°	58,7	(80,35 ±0,79)	21
10°	58,3	(80,41 ±0,79)	17
<b>Resultado</b>	(58,7 ±2,3)		(18,6 ±3,9)

Fonte: Autor.

Percebe-se que, com a diminuição da pressão imposta na sucção do compressor auxiliar (6 bar para 4 bar), a média das temperaturas de condensação aumentou, assim como a dos tempos de ensaio.

Modelo C: *setpoints*: 15 °C, 20 °C e 25 °C (temperaturas de evaporação) no compressor em teste. Pressão imposta na sucção do compressor auxiliar: 2 bar.

Figura 59: Ensaio de tombamento na BPT aprimorada – Modelo C – *Setpoint* 15 °C (média no compressor em teste de 15,2 °C) – 2 bar

Ensaio	Temperatura de condensação [°C]	Temperatura da bobina principal [°C]	Tempo de ensaio [s]
1°	75,5	(79,57 ±0,79)	39
2°	75,0	(79,48 ±0,79)	37
3°	75,3	(80,57 ±0,79)	37
4°	75,5	(80,40 ±0,79)	36
5°	75,3	(80,62 ±0,79)	38

6°	75,2	(79,97 ±0,79)	40
7°	75,8	(80,69 ±0,79)	39
8°	75,9	(79,79 ±0,79)	39
9°	75,9	(80,04 ±0,79)	39
10°	75,6	(80,13 ±0,79)	38
<b>Resultado</b>	(75,5 ±2,2)		(38,2 ±2,8)

Fonte: Autor.

Figura 60: Ensaio de tombamento na BPT aprimorada – Modelo C – *Setpoint* 20 °C (média no compressor em teste de 20,0 °C) – 2 bar

Ensaio	Temperatura de condensação [°C]	Temperatura da bobina principal [°C]	Tempo de ensaio [s]
1°	66,8	(80,45 ±0,79)	29
2°	66,6	(79,26 ±0,79)	28
3°	66,6	(80,74 ±0,79)	29
4°	66,9	(80,37 ±0,79)	33
5°	66,3	(80,74 ±0,79)	27
6°	67,3	(79,83 ±0,79)	27
7°	67,1	(80,17 ±0,79)	28
8°	67,6	(79,91 ±0,79)	29
9°	66,7	(80,33 ±0,79)	30
10°	67,4	(79,72 ±0,79)	27
<b>Resultado</b>	(66,9 ±2,1)		(28,7 ±4,1)

Fonte: Autor.

Figura 61: Ensaio de tombamento na BPT aprimorada – Modelo C – *Setpoint* 25 °C (média no compressor em teste de 25,3 °C) – 2 bar

Ensaio	Temperatura de condensação [°C]	Temperatura da bobina principal [°C]	Tempo de ensaio [s]
1°	59,0	(80,48 ±0,79)	22
2°	59,0	(80,13 ±0,79)	19
3°	58,6	(79,84 ±0,79)	26
4°	58,7	(80,35 ±0,79)	22
5°	59,2	(80,19 ±0,79)	23
6°	58,9	(80,42 ±0,79)	24
7°	59,4	(79,98 ±0,79)	23
8°	58,5	(79,62 ±0,79)	22
9°	59,3	(79,77 ±0,79)	23
10°	59,1	(80,49 ±0,79)	24
<b>Resultado</b>	(59,0 ±2,2)		(22,8 ±4,1)

Fonte: Autor.

Percebe-se que, com a nova diminuição da pressão imposta na sucção do compressor auxiliar (4 bar para 2 bar), a média das temperaturas de condensação aumentou mais ainda, assim como a dos tempos de ensaio, em relação à situação anterior.

### 6.3 Análise de resultados

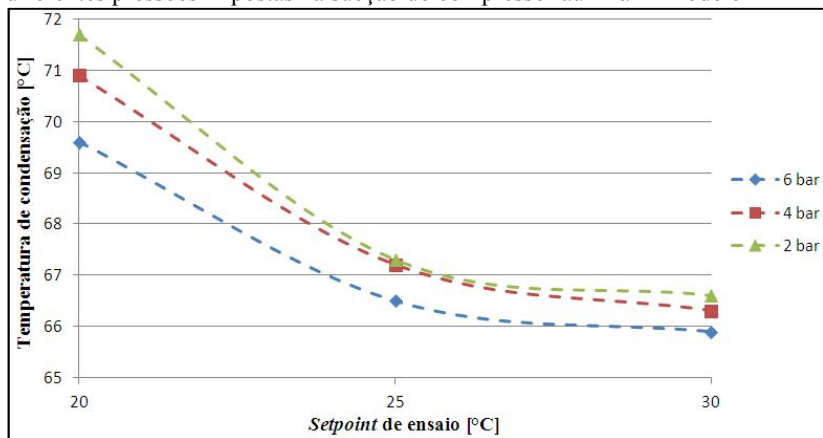
Com os ensaios realizados neste capítulo foi possível comprovar que variações na condição de pressão imposta na sucção do compressor auxiliar implicam mudanças na sua descarga que, pela configuração do circuito da BPT aprimorada, afetam a descarga do compressor em teste, a qual está diretamente relacionada aos resultados dos ensaios de

tombamento. Visto isso, quantificou-se a influência dessas variações nos resultados de cada modelo.

Nos três modelos de compressores ensaiados, os comportamentos se repetiram: quanto menor a condição de pressão imposta na sucção do compressor auxiliar, maiores foram os tempos de ensaio e as temperaturas de condensação. Os resultados são apresentados nas figuras a seguir e relacionam as temperaturas de condensação e os tempos de ensaio com seus respectivos *setpoints* de ensaio, para cada pressão imposta na sucção do compressor auxiliar.

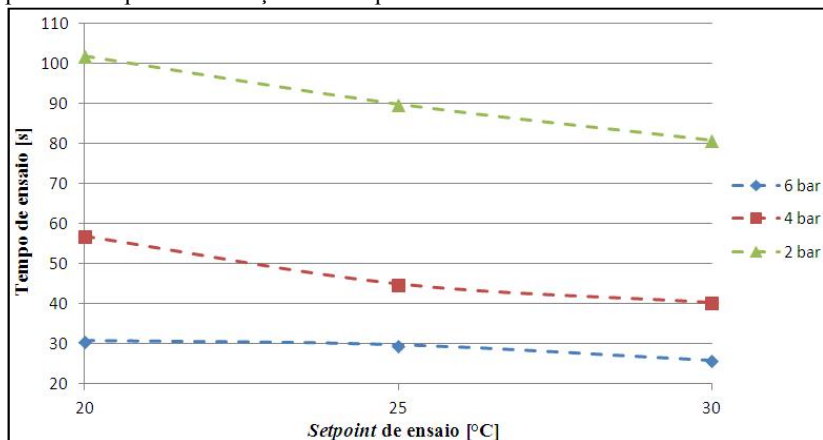
- Modelo A:

Figura 62: Temperatura de condensação [°C] x *Setpoint* de ensaio [°C]. Com diferentes pressões impostas na sucção do compressor auxiliar – Modelo A



Fonte: Autor.

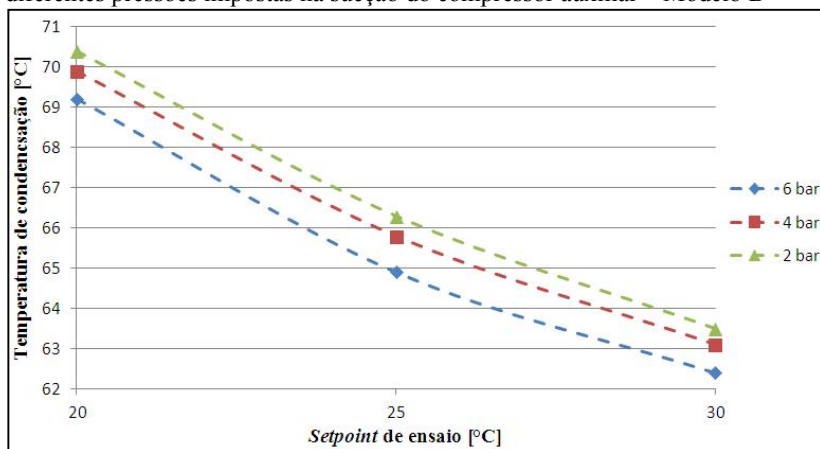
Figura 63: Tempo de ensaio [s] x *Setpoint* de ensaio [°C]. Com diferentes pressões impostas na sucção do compressor auxiliar – Modelo A



Fonte: Autor.

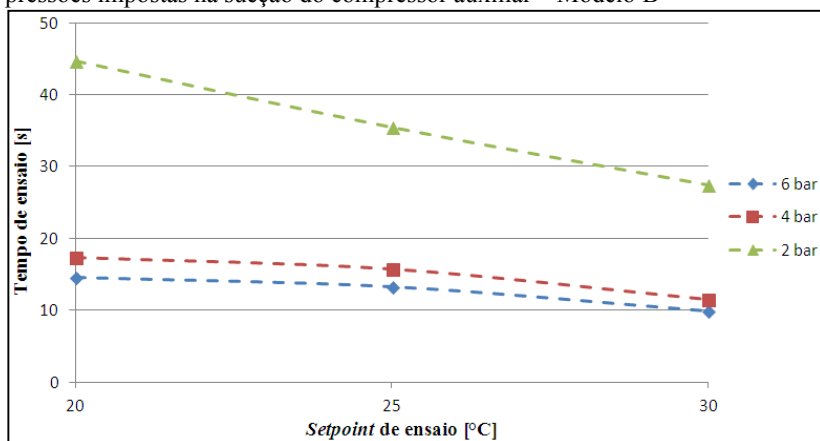
- Modelo B:

Figura 64: Temperatura de condensação [°C] x *Setpoint* de ensaio [°C]. Com diferentes pressões impostas na sucção do compressor auxiliar – Modelo B



Fonte: Autor.

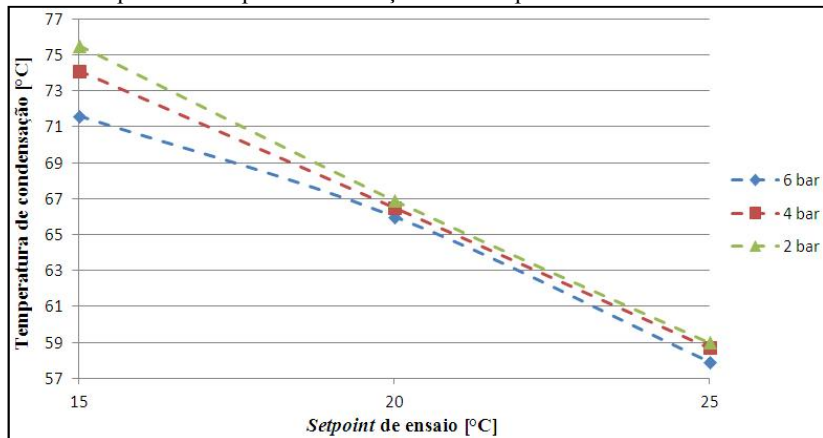
Figura 65: Tempo de ensaio [s] x *Setpoint* de ensaio [°C]. Com diferentes pressões impostas na sucção do compressor auxiliar – Modelo B



Fonte: Autor.

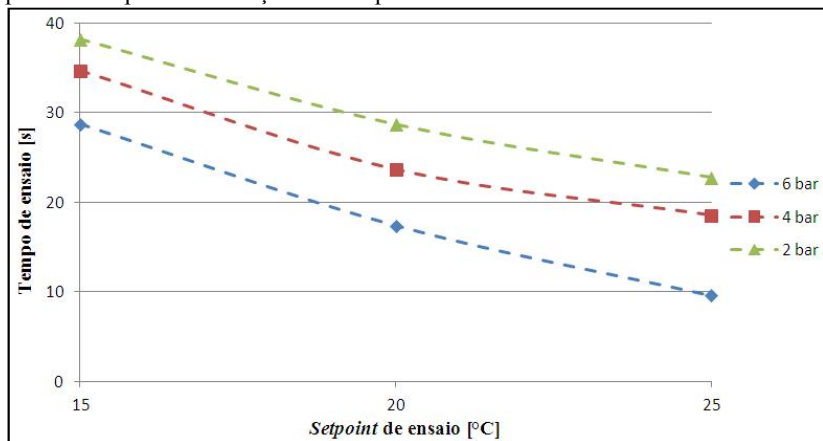
- Modelo C:

Figura 66: Temperatura de condensação [°C] x *Setpoint* de ensaio [°C]. Com diferentes pressões impostas na sucção do compressor auxiliar – Modelo C



Fonte: Autor.

Figura 67: Tempo de ensaio [s] x *Setpoint* de ensaio [°C]. Com diferentes pressões impostas na sucção do compressor auxiliar – Modelo C



Fonte: Autor.

Com base dos dados apresentados, nota-se que a maior diferença entre as temperaturas de condensação ocorreu no compressor Modelo C,



com temperaturas de 71,6 °C e 75,5 °C<sup>42</sup>, que, nos piores casos, resultam em uma diferença de 8,3 °C. Para essa faixa de temperaturas, isso representa uma diferença de aproximadamente 4,2 bar, o que é consideravelmente elevado, visto que a incerteza nessa faixa de temperaturas é de cerca de 1,1 bar.

Em relação aos tempos de ensaio, encontrou-se a maior diferença para o compressor Modelo A, com tempos de 102 s e 30,8 s, que, nos piores casos, resultam em uma diferença de 98,4 s.

Essas diferenças mostram a fundamental importância de padronizar a condição de pressão imposta na sucção do compressor auxiliar da bancada e utilizar o mesmo modelo de compressor para essa função, e, caso isso não seja possível, recomenda-se a utilização de compressores com características semelhantes (como, por exemplo, capacidade de refrigeração) ao que deveria ser utilizado.

Com a utilização de maiores pressões impostas na sucção no compressor auxiliar, como já comentado, menores tempos de ensaio serão alcançados, aumentando assim a produtividade da bancada. No entanto, deve-se atentar ao fato de que elevar demasiadamente a condição de pressão imposta na sucção do compressor auxiliar pode levar a uma situação onde o compressor em teste será ensaiado em condições diferentes das que ele estará submetido em um sistema de refrigeração onde se prevê que ele seja utilizado.

Assim, os resultados encontrados evidenciam a necessidade de se controlar adequadamente a sucção do compressor auxiliar durante a realização dos ensaios, independente do valor utilizado, tarefa que é laboriosa na BPT manual devido à dependência do operador, mas que é realizada automaticamente através de válvulas agulha e controladores na BPT aprimorada.

---

<sup>42</sup>Para o R-134a, temperatura de 75 °C equivale aproximadamente a uma pressão de 23,6 bar.



## 7. DEFINIÇÃO DE ARQUITETURA PARA A BANCADA DE ENSAIOS DE PARTIDA E TOMBAMENTO

Desde o início do desenvolvimento do projeto, foram adicionadas novas funcionalidades e, conseqüentemente, o número de equipamentos de medição foi elevado. Como o projeto está próximo da solução final, uma arquitetura que contemple todas as medições necessárias e proporcione maior reprodutibilidade e confiabilidade metrológica mostra-se necessária.

### 7.1 Arquitetura atual e especificação de sinais

Atualmente, na BPT aprimorada, a interface entre os sinais provenientes da bancada e o computador é feita exclusivamente por placas de aquisição (DAQ) da National Instruments. Como a bancada estava em desenvolvimento, adicionaram-se novas placas, conforme as necessidades foram surgindo. Isso foi possível devido ao baixo custo desses tipos de placa, quando comparadas a outros sistemas que, apesar de possuírem melhores características metrológicas, são consideravelmente mais caros. Dessa forma, a decisão de utilização desse tipo de placa durante o desenvolvimento da BPT aprimorada mostrou-se acertada.

A figura 68 mostra as placas utilizadas na BPT aprimorada e suas funções atualmente utilizadas.

Figura 68: Placas de aquisição utilizadas atualmente na BPT aprimorada e suas funções utilizadas

<b>Placa</b>	<b>Funções utilizadas</b>
PCI – CAN	Interface CAN
PCI – GPIB	Interface GPIB
PCI – 6024E	Termopar e saída analógica
USB – 6210	Entradas analógicas
USB – 6501	Digitais
PCI – 6070E	Entradas analógicas

Fonte: Autor.

A partir do momento que se define os sinais provenientes da bancada, torna-se viável e interessante a escolha de uma arquitetura específica para as necessidades da BPT, que proporcione maior robustez e melhores características metrológicas.

De posse disso, fez-se a especificação dos sinais e requisitos recomendados de aquisição provenientes da BPT aprimorada integrada com o SICC. Na sequência, são reunidos os sinais que devem ter interface na BPT aprimorada integrada com o SICC:

- quatro pontos de medição de temperatura realizadas através de termorresistores do tipo Pt100;
- comunicação GPIB;
- comunicação CAN;
- 22 digitais (DIO);
- 14 entradas analógicas (AI) [1,25 MHz – 16 bits];
- uma saída analógica (AO) [25 kHz – 16 bits].

## 7.2 Comparação dos sistemas disponíveis no mercado

A partir da análise dos sistemas disponíveis no mercado, apresentada no tópico 2.7.3, foi possível descartar alguns deles para aplicação na BPT aprimorada.

O VXI foi descartado pelo seu alto custo inicial, pois é indicado para aplicações de grande porte, que não é o caso deste trabalho.

Já as placas DAQ, que atualmente são utilizadas e têm suas limitações conhecidas, foram desconsideradas para especificação dessa nova arquitetura, pela necessidade de se obter melhores características metrológicas, principalmente com maior robustez e estabilidade e sem dependência do número de portas USB ou PCI disponíveis no PC.

Também se descartaram os CLP, por não possuírem características necessárias para um sistema de medição, assim como por suas capacidades de processamento e armazenamento serem limitadas, quando comparados a outros sistemas disponíveis no mercado.

Dessa maneira restaram duas opções: PAC e PXI.

Com relação aos PAC, optou-se por uma busca mais detalhada de informações relativas ao CompactRIO, visto que este possui melhores características metrológicas, como frequência de aquisição, quando comparadas às do Compact FieldPoint (NATIONAL INSTRUMENTSf, 2012).

Ao se comparar as características de um sistema CompactRIO com as de um PXI, buscou-se informações junto a fabricantes, a fim de se obter as configurações mais adequadas para as necessidades da BPT aprimorada. Ainda, questões como facilidade de operação, atualização e custo, foram consideradas, além das características técnicas.

Por fim, realizou-se essa comparação empregando componentes e módulos para os dois sistemas, de modo que ao final da especificação o custo total de ambos fosse equivalente.

A figura 69 mostra a comparação dos principais itens dos dois sistemas escolhidos.

Figura 69: Comparação entre os principais itens de um sistema CompactRIO e um PXI, voltados para aplicação na BPT aprimorada

<b>Item</b>	<b>CompactRIO</b>	<b>PXI</b>
Chassi	8 slots	4 slots
Velocidade do processador da controladora	400 MHz	1,66 GHz
Quantidade de memória RAM da controladora	128 MB	512 MB
Capacidade do disco rígido	256 MB	512 MB
Porta Ethernet	Sim (2)	Sim (1)
Porta serial RS232	Sim (1)	Sim (1)
Porta USB	Não	Sim (2)
<b>Entradas analógicas</b>	32	32
Resolução	16 bits	16 bits
Frequência de aquisição	250 kS/s <sup>43</sup>	1,25 MS/s
Faixa máxima	(-10 a +10) V	(-10 a +10) V
Faixa mínima	(-0,2 a +0,2) V	(-0,1 a +0,1) V
Erro máximo na faixa máxima / mínima	6220 $\mu$ V / 157 $\mu$ V	1920 $\mu$ V / 52 $\mu$ V

<sup>43</sup>A unidade [S/s] é comumente utilizada nos catálogos dos fabricantes e pode ser entendida como [Hz].

Sensibilidade na faixa máxima / mínima	96 $\mu\text{V}$ / 4 $\mu\text{V}$	112 $\mu\text{V}$ / 6 $\mu\text{V}$
<b>Saídas analógicas</b>	4	4
Resolução	16 bits	16 bits
Frequência de atualização	100 kS/s	2,86 MS/s <sup>44</sup>
Faixa máxima	(-10 a +10) V	(-10 a +10) V
Faixa mínima	(-10 a +10) V	(-5 a +5) V
Erro máximo na faixa máxima / mínima	0,11 V / 0,11 V	2080 $\mu\text{V}$ / 1045 $\mu\text{V}$
<b>Digitais</b>	32	48
Faixa máxima de entrada e saída	0 a 5 V	0 a 5 V
<b>Interface CAN</b>	Sim	Sim
<b>Interface GPIB</b>	Sim	Sim
<b>Medição de temperatura (termorresistores)</b>	Sim (4)	Sim (4)
<b>Custo aproximado</b> <sup>45</sup>	US\$ 7350	US\$ 7800

Fonte: Autor.

Observa-se, a partir dos dados apresentados, que a arquitetura PXI se mostra mais completa e com maior possibilidade de expansão, com custo equivalente ao do CompactRIO.

### 7.3 Arquitetura proposta

De posse dos dados apresentados no tópico anterior, conclui-se que, apesar de possuir custo ligeiramente maior, a arquitetura PXI é a mais indicada para as necessidades da BPT aprimorada. A seguir são listados alguns fatores que contribuíram para essa escolha:

<sup>44</sup>Este valor diminui, até o limite de 1,25 MS/s, quando são utilizadas as quatro saídas analógicas da placa simultaneamente.

<sup>45</sup>Valor puro, ou seja, direto com o fabricante e sem impostos, taxas de importação, frete etc.

- maior capacidade de processamento e armazenamento;
- possibilidade de utilização de portas USB;
- maior frequência de aquisição;
- menor faixa mínima de tensão nas entradas analógicas;
- menores erros máximos.

Essas características apontam que o PXI é a escolha mais adequada, pois mostram melhores características metrológicas, que consequentemente levam a menores incertezas nos resultados, além de possuir *hardware* com maior possibilidade de expansão e capacidade de processamento e armazenamento.

No entanto, salienta-se que, apesar de nesta configuração o CompactRIO possuir disponibilidade de 8 *slots* em seu chassi, caso todos sejam utilizados, é necessária a compra de outra controladora para se obter um novo chassi com mais *slots*. Ao passo que no PXI, caso o número total de *slots* seja preenchido, é possível a compra de apenas um novo chassi, o qual é substancialmente mais barato que uma controladora.

Ainda, no LIAE já existem outras bancadas em funcionamento (para outros tipos de ensaios) que utilizam arquitetura PXI, com excelentes resultados. Além disso, com mais bancadas utilizando arquitetura PXI, se torna possível a troca entre seus módulos quando necessário.

#### 7.4 Conclusões

A definição e aplicação de uma nova arquitetura, específica para as necessidades da BPT aprimorada, propiciará uma bancada mais robusta e com melhores incertezas em suas medições, por exemplo, na medição das pressões e temperatura de enrolamento. Essas melhores incertezas são possíveis tendo em vista que atualmente a maioria das entradas e saídas analógicas utilizam placas com resolução de 12 bits com erro máximo na faixa utilizada de, aproximadamente, 15 mV, características metrológicas inferiores as que podem ser entregues pela arquitetura PXI proposta.

As placas atualmente utilizadas na BPT aprimorada (figura 68) foram suficientes para a realização deste trabalho dentro das tolerâncias exigidas e, como já discutido, foram escolhidas e utilizadas devido ao caráter experimental do desenvolvimento dessa bancada. Porém,

somando o custo de todas as placas atualmente utilizadas na BPT aprimorada, tem-se um valor maior (aproximadamente US\$ 10000) do que o custo da nova arquitetura PXI voltada para suas necessidades. Embora pareça estranho, isso ocorre justamente porque nem todas as funcionalidades das placas empregadas estão sendo utilizadas, já que elas não foram compradas ou aplicadas exclusivamente para utilização na BPT aprimorada.

Ainda, a aplicação na empresa necessita uma bancada mais robusta e estável, que possibilite grande número de ensaios sem ocupar integralmente o operador que, dessa forma, poderia ser alocado para realizar outras atividades ou mesmo monitorar mais de uma BPT ao mesmo tempo. E essas características buscadas são providas pela arquitetura PXI proposta.



## 8. CONSIDERAÇÕES FINAIS

### 8.1 Conclusões

O objetivo geral deste trabalho (aumento de produtividade de uma bancada automatizada de ensaios de compressores em condições extremas) foi alcançado graças ao cumprimento dos objetivos específicos (integração do SICC; avaliação da BPT aprimorada e influência da variação da curva de pressão nos resultados dos ensaios de tombamento e definição de arquitetura para BPT aprimorada). De posse da BPT automatizada, ponto de início deste projeto, foram feitos aprimoramentos e implementações que resultaram na BPT aprimorada, com os resultados já discutidos. A seguir, são feitos comentários específicos de cada objetivo alcançado.

#### 8.1.1 Integração do SICC

A integração do SICC na BPT mostrou-se adequada, de modo que tanto as condições para o correto funcionamento do SICC quanto as para realização dos ensaios de partida e tombamento foram respeitadas.

Além disso, os novos métodos de estimativa de temperatura do enrolamento principal do compressor e aquecimento acelerado do mesmo também se mostraram adequados e eficientes.

#### 8.1.2 Avaliação da BPT aprimorada

A utilização do SICC, devido a sua correta integração a BPT, proporcionou ganhos de até 58% no tempo de aquecimento dos modelos de compressores utilizados para os ensaios. Além de possibilitar a retirada de um compressor da linha de produção e ensaiá-lo diretamente na BPT. Fatores que aumentam substancialmente a produtividade da bancada e da quantidade de ensaios que podem ser realizados.

Ainda, concluiu-se que a BPT aprimorada, integrada com o SICC, é capaz de realizar os ensaios de partida e tombamento dentro das condições impostas para estes, e proporciona baixas incertezas nos resultados.

Por fim, permite também a minimização da influência do operador.

Todas essas contribuições levam a uma BPT aprimorada que realiza os ensaios de maneira automática e sem a necessidade de instrumentar o compressor em teste, ou desligá-lo, para se obter a estimativa da sua temperatura.

### 8.1.3 Avaliação da influência da variação da curva de pressão nos resultados dos ensaios de tombamento

Com os dados obtidos no capítulo 6, foi possível comprovar que variações na curva de descarga do compressor em teste, durante os ensaios de tombamento, influenciam em seus resultados, tanto nos tempos de ensaio quanto nos instantes de tombamento. Assim, mostrou-se a fundamental importância de padronizar e controlar eficientemente a pressão imposta na sucção do compressor auxiliar, que é o responsável por gerar a curva de pressão pela qual o compressor em teste será conduzido até o instante de tombamento.

### 8.1.4 Definição de arquitetura para BPT aprimorada

A arquitetura PXI proposta propiciará maior reprodutibilidade e confiabilidade metrológica, (características fundamentais para aplicação em empresa) e melhores características metrológicas que geram menores incertezas nos resultados das medições, quando comparadas com as proporcionadas pelos dispositivos atualmente utilizados.

## 8.2 Sugestões para trabalhos futuros

Com a implementação da arquitetura definida, será possível comparar as incertezas dos resultados obtidos nas bancadas manual e aprimorada com a arquitetura definitiva.

Adicionalmente, sugere-se realizar, como comentado no capítulo 5, avaliação de incerteza de medição na bancada manual.

Outro fator que deve ser observado é a temperatura do ambiente (onde ocorre a condensação) em que a BPT está instalada, visto que, por exemplo, em dias frios (caso o ambiente não seja aquecido) a taxa de remoção de calor será maior e os tempos de ensaio provavelmente menores.

Como os resultados encontrados nos ensaios de partida, geralmente, foram de 1 V a menos dos encontrados da bancada manual instalada na empresa, essa diferença pode ser causada pela diferença de impedância entre as bancadas. Recomenda-se uma avaliação nesse sentido em ambas as bancadas.

Em relação à condição de pressão imposta na sucção do compressor auxiliar durante os ensaios de tombamento, deve-se buscar e padronizar determinado valor que atenda um compromisso entre produtividade dos ensaios e representatividade das situações reais onde o compressor em teste será utilizado. Ainda, verificar possibilidade de utilização de um reservatório como pulmão de armazenamento na descarga do compressor em teste, de maneira que a sua condução ao tombamento não dependeria mais da curva proporcionada pelo compressor auxiliar e sim de sua própria compressão contra um volume fixo.

Adicionalmente, como foi identificada a ocorrência do fenômeno em que se alterando as curvas de pressão as quais o compressor está submetido, alteram-se também os resultados dos ensaios de tombamento, deve-se então entender a causa desse fenômeno, se ele é relacionado à velocidade do escoamento, golpe de aríete etc. Além disso, verificar os ganhos que seriam alcançados com a instalação de medidores de vazão mássica em pontos de estudo do circuito.

Por fim, avaliar se, com as baixas incertezas alcançadas, ainda é necessário realizar os ensaios de tombamento alimentando o compressor em teste com 90% de sua tensão nominal como margem de segurança.



## REFERÊNCIAS

ALBERTAZZI, A.; SOUZA, A. R. **Fundamentos Metrologia Científica e Industrial**. Manole, 2008.

ALTHOUSE, A. D.; TURNQUIST, C. H.; BRACCIANO, A. F. **Modern Refrigeration and Air Conditioning**. The Goodheart-Willcox Company, Inc, 2004.

ABNT. **NBR 0794**. 2003.

BELL, I. **The Future of Control**. IEEE Manufacturing Engineer, p.36-39, 2005.

BOLTON, W. **Programmable Logic Controllers**. 5. ed. Newnes, 2009.

BOSCH. CAN. Disponível em:  
<http://www.semiconductors.bosch.de/en/ipmodules/can/can.asp>. Acesso em: 12/11/2012.

COSTA, J. G. F. D. **Automação de ensaios de compressores de refrigeração operando sob condições extremas**. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Metrologia Científica e Industrial. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 2010.

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

CHILDS, P. R. N. **Practical Temperature Measurement**. Jordan Hill: Butterworth Heinemann, 2001.

DEL TORO, V. **Fundamentos de Máquinas Elétricas**. LTC. 1999.

DALLAS SEMICONDUCTORS. **Selecting and Using RS-232, RS-422, and RS-485 Serial Data**. Application Note 723, 2001.

DEMAY, M. B. **Desenvolvimento de um sistema para medição de frequência rotacional em compressores herméticos**. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Metrologia Científica e Industrial. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 2008.

DOSSAT, R. J. **Princípios de Refrigeração**. Hemus, 2004.

EMBRACOA. **Padrão Operacional (POP) - Ensaio de Partida**. 2003.

EMBRACOB. **Padrão Operacional (POP) - Ensaio de Tombamento**. 2003.

EMBRACOC. **Informativo Técnico - Utilização do R 134a em Sistemas Herméticos de Refrigeração LBP**. 1996.

ERICKSON, K. T. **Programmable Logic Controllers**. IEEE Potentials, 1996.

EUROTHERM. **2216e Series Temperature Controller /Programmer**. Disponível em: <http://www.eurotherm.com/products/controllers/single-loop/2200/2216/>. Acesso em: 04/12/2012.

EXTECH ELECTRONICS. **6500 Series High Power Programmable AC Power Source**. Disponível em: [http://www.extech-electronics.com/product\\_ac\\_1\\_1.htm?pc\\_no=12](http://www.extech-electronics.com/product_ac_1_1.htm?pc_no=12). Acesso em 05/12/2012.

FITZGERALD, A. E.; KINGSLEY, C.; UMANS, S. D. **Electric Machinery**. 6. ed. New York: McGraw-Hill, 2003.

GALOR, O. **Discrete Dynamical Systems**. 1. ed. New York: Springer, 2011.

GUTTERMAN, L. **PXI: The Future of Test**. IEEE, p.205-214, 2002.

HALLIDAY, D.; RESNICK, R.; WALKER, J. **Fundamentos de Física - 3**. 9. ed. Livros Técnicos e Científicos Editora, São Paulo, 2012.

HENKLEIN, P. **Análise de Ensaios de Compressores Herméticos Durante o Transitório**. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Metrologia Científica e Industrial. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 2006.

HUGHES, A. **Electric Motors and Drives**. 3. ed. Burlington: Newnes/Elsevier, 2006.

IBGE. **Habituação – 2007/2008/2009**. Disponível em:  
[http://www.ibge.gov.br/brasil\\_em\\_sintese/tabelas/habitacao.htm](http://www.ibge.gov.br/brasil_em_sintese/tabelas/habitacao.htm).  
Acesso em 26/10/2012.

INMETRO. **Vocabulário internacional de metrologia – Conceitos fundamentais e termos associados**. 1. ed. 2012.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **Guide to the expression of uncertainty in measurement**. Tradução de ABNT Inmetro. 3. ed. Rio de Janeiro. 2003.

JOINT COMMITTEE FOR GUIDES IN METROLOGY. **Evaluation of measurement data - Supplement 1 to the "Guide to the expression of uncertainty in measurement" – Propagation of distributions using a Monte Carlo method.** 1. ed. 2008.

KACKER, R.; TOMAN, B.; HUNANG, D. **Comparison of ISO-GUM, draft GUM Supplement 1 and Bayesian statistics using simple linear calibration.** Institute of Physics Publishing, p. s167-s177, 2006.

LOCKHART, R. **Learn the Importance of Isolation in Four Easy Lessons.** DATAQ Instruments. Disponível em: [http://www.dataq.com/support/documentation/pdf/article\\_pdfs/isolation.pdf](http://www.dataq.com/support/documentation/pdf/article_pdfs/isolation.pdf). Acesso em: 07/11/2012.

MATOS, F. F. S. **Análise Numérica do Comportamento Dinâmico de Válvulas Tipo Palheta em Compressores Alternativos.** Tese (Doutorado), - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 2002.

MICHALSKI, L. **Temperature Measurement.** 2. ed. Chichester: Wiley, 2001.

MORAN, M. J; SHAPIRO, H, N. **Fundamentals of Engineering Thermodynamics.** 7. ed. Wiley, 2010.

NACHTIGAL C. **Instrumentation and Control. Fundamentals and Applications – Wiley Series in Mechanical Engineering Practice.** 1990.

NATIONAL INSTRUMENTS<sup>sa</sup>. **The HS488 Protocol.** Disponível em: <http://www.ni.com/white-paper/4283/>. Acesso em: 09/11/2012.



NATIONAL INSTRUMENTSb. **Short Tutorial on VXI/MXI.**

Disponível em: <http://www.ni.com/white-paper/2899/en>. Acesso em: 12/11/2012.

NATIONAL INSTRUMENTSc. **PXI Express Specification Tutorial.**

Disponível em: <http://www.ni.com/white-paper/2876/en>. Acesso em: 18/10/2012.

NATIONAL INSTRUMENTSd. **PAC (Programmable Automation Controller).** Disponível em: <http://www.ni.com/white-paper/6090/pt>. Acesso em: 16/11/2012.

NATIONAL INSTRUMENTSe. **NI Compact FieldPoint.** Disponível em: <http://sine.ni.com/np/app/main/p/ap/imc/lang/pt/pg/1/sn/n24:cFP/>. Acesso em: 19/11/2012.

NATIONAL INSTRUMENTSf. **O que é CompactRIO?** Disponível em: <http://www.ni.com/compactrio/whatis/pt/>. Acesso em: 19/11/2012.

NATIONAL INSTRUMENTSg. **O que é a Tecnologia de Tempo Real?** Disponível em: <http://www.ni.com/white-paper/3938/pt>. Acesso em: 20/11/2012.

NATIONAL INSTRUMENTSh. **O que é PXI?** Disponível em: <http://www.ni.com/pxi/whatis/pt/#tab3>. Acesso em: 20/11/2012.

NATIONAL INSTRUMENTSi. **Benefícios da instrumentação modular NI PXI.** Disponível em: <http://www.ni.com/white-paper/13346/pt>. Acesso em: 20/11/2012.

NATIONAL INSTRUMENTSj. **O que é o LabVIEW?** Disponível em: <http://www.ni.com/labview/whatis/pt/>. Acesso em: 07/12/2012.

PACHECO, A. L. S. **Desenvolvimento de um sistema para medir a resistência de enrolamento em motores de compressores energizados.** Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Metrologia Científica e Industrial. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 2007.

PADUANO, J. D.; GREITZER, E. M.; EPSTEIN, H. **Compression System Stability and Active Control.** Annu. Rev. Fluid Mech. 2001.

PETROVIC, S. A. B. **Proposta de Arquitetura do Sistema de Automação Aplicado a Ensaios de Desempenho de Compressores Herméticos de Refrigeração.** Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Metrologia Científica e Industrial. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 2007.

PIZARRO, R. A. **Influência do óleo lubrificante na transferência de calor em um compressor hermético alternativo.** Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 2007.

SCHLICKMANN, D. G. **Aprimoramento e caracterização do comportamento metrológico de uma bancada de ensaios de partida e de tombamento de compressores de refrigeração.** Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 2012.

SETHUNADH, R. **Using New Instrument Interface Standards to Increase Automatic Test System Performance.** IEEE, p.677-682, 2005.

SERRANO, J. R. **Numerical simulation and experimental validation of hermetic compressors Integration in vapour compression refrigerating systems.** Tese (Doutorado). Centre Tecnològic de

Transferência de Calor. Terrassa: Universidad Politècnica de Catalunya, 2002.

SCUSSEL, J. N. **Propostas de ações para reduzir o tempo demandado por ensaio de desempenho de compressores herméticos.** Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Metrologia Científica e Industrial. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 2006.

SILVEIRA, A. N. **Diminuição do tempo de transitório em ensaios de desempenho de compressores utilizando injeção de corrente contínua.** Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós Graduação em Metrologia Científica e Industrial. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 2010.

STOECKER, W. F.; SAIZ JABARDO, J. M. **Refrigeração Industrial.** 2. ed. Edgard Blücher LTDA, 2002.

STUMBERGER, G. **Prevention of iron core saturation in multi-winding transformers for dc-dc converters.** Magnetics, IEEE Transactions on, v. 46, n. 2, p. 582 –585, 2010.

SWAGELOK. **Metering Valves.** Disponível em: <http://www.swagelok.com/downloads/WebCatalogs/EN/MS-01-142.pdf>. Acesso em: 05/01/2013.

SWANSTROM, J. **Finding a Lasting Interface for Your ATE System.** National Instruments, 2005.

TOLIYAT, H. A; KLIMAN, G. B. **Handbook of Electric Motors.** 2. ed. Macel Dekker, Inc. 2004

U.S. DEPARTMENT OF ENERGY. **DOE Fundamentals Handbook, Mechanical Science, Volume 2 of 2.** Washington D.C., Janeiro 1993.

Disponível em:

<http://www.hss.doe.gov/nuclearsafety/techstds/docs/handbook/h1018v2.pdf>. Acesso em: 03/01/2013.

WIKAA. **Pressure Transmitter for Precision Measurement: Model P-10.** Disponível em: [http://wika-ekb.ru/catalog/elektronika\\_-\\_izmerenie\\_davleniya/preobrazovately\\_i\\_datchiki\\_davleniya/visokotochnie/model\\_p-10\\_standartnoe\\_ispolnenie\\_preobrazovatel\\_davleniya\\_dlya\\_visokotochnih\\_izmerenii/DS\\_PE8132\\_GB\\_1572.pdf](http://wika-ekb.ru/catalog/elektronika_-_izmerenie_davleniya/preobrazovately_i_datchiki_davleniya/visokotochnie/model_p-10_standartnoe_ispolnenie_preobrazovatel_davleniya_dlya_visokotochnih_izmerenii/DS_PE8132_GB_1572.pdf). Acesso em: 04/12/2012.

WIKAB. **Druckmeßumformer für Präzisionsmessungen.** Disponível em: <http://www.alfredmeyer.com/pdf/wika/pe8110.pdf>. Acesso em: 04/12/2012.

WILLIAMS, S. R. **Test and Measurement Equipment Adopts Computer Industry Standards.** IEEE, p.367-378, 2002.

WOLFE, R. **Short Tutorial on VXI/MXI.** National Instruments, Application Note 030, p.27-32, 2005.

## APÊNDICE - PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS DE SISTEMAS DE MEDIÇÃO E AUTOMAÇÃO

A seguir são apresentados os principais conceitos utilizados na especificação de sistemas para automação da medição.

Faixa de medição: segundo o INMETRO (2012), é o “conjunto de valores de grandezas da mesma natureza que pode ser medido por um dado instrumento de medição ou sistema de medição com incerteza de medição instrumental especificada, sob condições determinadas”. Em outras palavras, a faixa de medição representa o conjunto de valores da grandeza medida que o sistema de medição é capaz de medir com incertezas conhecidas.

Existem sistemas que utilizam faixas unipolares, geralmente começam do zero, como por exemplo, 0 a 5 V, e outros que utilizam faixas bipolares como, por exemplo, (-5 a +5) V.

Ressalta-se que medições realizadas fora da faixa de medição do instrumento podem resultar em uma incerteza de medição desconhecida, além da possibilidade de danificar o equipamento.

Erro de ganho: é um erro dependente do valor medido (PETROVIC, 2007), que aumenta juntamente com o valor lido.

Erro de zero: segundo o INMETRO (2012) é o “erro no ponto de controle quando o valor medido especificado é zero”. Ou seja, consiste em uma indicação diferente de zero para a medição de um mensurando que apresenta valor zero. Pode também ser chamado de erro de *offset*.

Esse erro é constante para toda a faixa de medição e pode ser corrigido (PETROVIC, 2007).

Histerese: é a diferença indicada pelo instrumento de medição para um mesmo valor dentro da faixa de trabalho quando a variável percorre toda a escala, nos sentidos ascendente e descendente.

Essa característica é muito comum em sistemas mecânicos, e é causada principalmente por folgas (PETROVIC, 2007), embora possa ocorrer também em sistemas eletrônicos.

Erro de linearidade: é o máximo desvio da resposta quando comparada com uma reta teórica (INMETRO, 2012).

Está presente, por exemplo, em sensores, conversores A/D, amplificadores, entre outros.

Repetibilidade: conforme o INMETRO (2012) é o “*grau de concordância entre os resultados de medições sucessivas de um mesmo mensurando efetuadas sob as mesmas condições de medição*”. Também segundo o INMETRO (2012), as mesmas condições de medição representam: os mesmos procedimentos de medição, operadores, sistema de medição, condições de operação e local, assim como medições repetidas no mesmo objeto ou em objetos similares durante um curto período de tempo.

Uma medição com alta repetibilidade apresenta pequenos desvios em relação à média.

Reprodutibilidade: suas condições, segundo o INMETRO (2012), são: diferentes locais, diferentes operadores, diferentes sistemas de medição e medições repetidas no mesmo objeto ou em objetos similares.

Em outras palavras, uma medição com alta reprodutibilidade permite que a medição seja feita adequadamente (dentro da incerteza esperada) em diferentes locais, com diferentes operadores, e sem a necessidade de serem realizadas em um curto período de tempo.

Frequência de aquisição: quanto maior a frequência de aquisição, mais próximo do sinal real será a representação do sinal adquirido. Caso os sinais sejam adquiridos com baixa frequência pode ocorrer *aliasing*, frequência abaixo do dobro da frequência de interesse. Isso quer dizer que o sinal seria reconstruído com frequência diferente do sinal original, introduzindo erros de medição (PETROVIC, 2007).

Para evitar esse problema, deve-se seguir o teorema de Nyquist para o sinal adquirido que garante a frequência do sinal original. Já para garantir que a amplitude do sinal original não apresente erro maior que  $\frac{1}{2}$  LSB, deve-se utilizar a seguinte equação (NACHTIGAL, 1990):

$$f_{MAX} = \frac{1}{(2^N + 1) \pi T_C} \quad (5)$$

onde:

$f_{MAX}$       máxima frequência de amostragem [Hz];  
 N            número de bits do conversor A/D;  
 $T_C$         tempo de conversão do conversor A/D.

Resolução: de acordo com INMETRO (2012) é a “*menor variação da grandeza medida que causa uma variação perceptível na indicação correspondente*”. Nos instrumentos digitais de medição, a resolução pode ser expressa em termos de dígitos ou bits.

Deriva: segundo o INMETRO (2012) é a “*variação da indicação ao longo do tempo, contínua ou incremental, devida a variações nas propriedades metrológicas de um instrumento de medição*”.

Em relação à deriva temporal, é comum os fabricantes de equipamentos de medição fornecerem as características metrológicas dos seus aparelhos para um determinado período de tempo, em geral três ou seis meses. Ao atingir os prazos estipulados, novos valores deveriam ser adotados. No entanto os fabricantes são omissos com relação a esses valores (PETROVIC, 2007).

Já a deriva térmica ocorrerá sempre que o sistema estiver operando em faixas de temperatura diferentes das estipuladas pelo fabricante (PETROVIC, 2007). As características metrológicas oferecidas pelo fabricante são apenas garantidas se o equipamento estiver operando dentro da faixa de temperatura determinada.

Crosstalk: é a influência de um canal em outro. Utilizando-se, por exemplo, dois canais de medição, é quando o sinal de um influencia no sinal do outro.

Ruído térmico: está presente, por exemplo, em qualquer resistência, e é oriundo da agitação dos elétrons a uma temperatura (PETROVIC, 2007). Também é conhecido como ruído Johnson.

É um ruído branco, visto que possui todas as frequências, e cujo valor é limitado pela frequência de corte do sistema.

Tempo de estabilização: conforme o INMETRO (2012) é o “*intervalo de tempo entre o instante em que um valor de entrada de um instrumento de medição ou de um sistema de medição é submetido a uma variação brusca entre dois valores constantes especificados e o instante em que a indicação correspondente se mantém entre limites especificados em torno do seu valor final estável*”. Também chamado de tempo de resposta.

O tempo de estabilização de um sinal elétrico é afetado pelo ganho a ele aplicado, pela impedância de saída do instrumento, pela capacitância dos cabos e se o sinal é multiplexado (PETROVIC, 2007).

Recursos de proteção: a proteção permite, por exemplo, que a faixa de medição seja excedida sem que ocorram danos permanentes ao sistema de medição, como no caso da utilização de escalas menores do que o valor da grandeza que está sendo medida, ou quando o limite do aparelho para determinada grandeza é ultrapassado (LOCKHART, 2012).

Interfaces de comunicação: são padrões físicos e lógicos que tratam da forma como são ligados e transmitidos os sinais entre instrumentos (PETROVIC, 2007). Os padrões físicos definem a quantidade de fios necessários à transmissão, tipo de conector etc. Já os padrões lógicos definem os níveis de tensão utilizados para representar os valores binários.

A correta escolha da interface de comunicação é fundamental para o sucesso do projeto, visto que ela influencia na sua longevidade, facilidade de programação e *upgrade*, taxa de transmissão de informações, entre outros (SWANSTROM, 2005).

Abaixo serão apresentadas as principais interfaces utilizadas, assim como suas principais características.

RS232: foi desenvolvido pela ANSI/EIA no início da década de 60 para a comunicação serial entre dois dispositivos (DALLAS SEMICONDUCTORS, 2001). Possibilita cabos com no máximo 20 m de comprimento, apresenta velocidades de transmissão de dados de até 200 kB/s para curtas distâncias e 20 kB/s para maiores (20 m). Como possuem diversos tipos de cabos, conectores e parâmetros de configuração, sua implementação demanda muito tempo e conhecimento, quando comparada com outras interfaces (WILLIAMS, 2002). É uma interface bem consolidada e que ainda se encontra em grande parte dos equipamentos de instrumentação (PETROVIC, 2007). No entanto, está obsoleta e cada vez mais perde espaço para novas tecnologias, como USB.

Em 1969, a partir de uma revisão, passou a ser chamada de RS232-C e em 1987 de RS232-D.

RS-485: também é interface serial. Suporta distâncias de até 1200 m com interligação de até 32 equipamentos. Apresenta velocidades de transmissão de dados de até 1,25 MB/s para curtas distâncias e até 12,5 kB/s para maiores.



GPIB: foi criado pela Hewlett Packard em 1965 sob o nome HP-IB. Em 1975 foi padronizada pela IEEE, passando a ser chamada de IEEE-488 ou GPIB. Nessa época, já atingia velocidade de transmissão de dados de até 1 MB/s. Depois, em 1988, passou por uma revisão (IEEE-488.2) e sua velocidade de transmissão de dados aumentou para 1,5 MB/s (GUTTERMAN, 2002). É considerado um avanço significativo em relação ao padrão RS-232, pois permite maiores velocidades, com mais confiabilidade e determinismo<sup>46</sup>.

Permite interconectar até 15 instrumentos. Possibilita um comprimento máximo de 20 m para os cabos e 4 m entre os instrumentos. É muito popular e difundida, foi a interface mais utilizada com sistemas de medição nas últimas décadas (SETHUNADH, 2005). No entanto, alto custo, cabos pesados, de curto comprimento e difícil aquisição, necessidade de placa dedicada e baixa velocidade de transmissão de dados (quando comparada a outras interfaces de comunicação disponíveis) são desvantagens dessa interface (SETHUNADH, 2005; SWANSTROM, 2005; WILLIAMS, 2002).

Atualmente, há a possibilidade de utilizar o protocolo HS488 que permite velocidades de transmissão de dados de até 8 MB/s (NATIONAL INSTRUMENTS, 2012).

Ethernet: foi desenvolvido pela Xerox em 1973 e se tornou padrão IEEE em 1985. As principais vantagens são: está disponível em qualquer PC, cabos de fácil manuseio e aquisição, baixo custo, compatibilidade com versões anteriores, alta velocidade de transmissão de dados (até 1,25 GB/s) e contínuo desenvolvimento (SETHUNADH, 2005; SWANSTROM, 2005).

Como desvantagens, podem ser citadas: não determinismo, complexidade na configuração e interligação de instrumentos.

USB: é um padrão de comunicação serial que permite alimentar o dispositivo que está conectado (SETHUNADH, 2005). Têm como principais vantagens: facilidade de instalação (*plug & play*<sup>47</sup>) e

---

<sup>46</sup>Um sistema pode ser considerado determinístico quando determinada tarefa é sempre realizada em um tempo pré-estabelecido, ou seja, há a garantia disso. Em outras palavras, um sistema determinístico é aquele em que a diferença entre o tempo desejado de execução de uma tarefa e o tempo em que ela efetivamente é executada é pequeno.

<sup>47</sup>Tecnologia que tem como função permitir que o sistema reconheça e configure automaticamente dispositivos que sejam nele conectados.

cabeamento, disponível em todos os PC, baixo custo dos periféricos e suporta a interligação de até 128 equipamentos (SETHUNADH, 2005; SWANSTROM, 2005). Em relação às desvantagens, pode-se destacar a distância máxima de cabeamento de 5 m e o não determinismo.

Apresenta as seguintes velocidades de transmissão de dados:

- USB 1.0 (1996) até 1,5 MB/s;
- USB 2.0 (2000) até 60 MB/s;
- USB 3.0 (2008) até 640 MB/s.

CAN: foi desenvolvido pela Bosch na década de 80 para ser utilizado na indústria automobilística como meio de comunicação entre sistemas embarcados (PETROVCIC, 2007). Atualmente está presente em diferentes áreas.

É um padrão determinístico de comunicação serial que permite velocidade de transmissão de dados de até 128 kB/s para 40 m de cabeamento e até aproximadamente 15 kB/s para 500 m. Suporta até 100 dispositivos interligados e é de construção e operação robusta, ou seja, pode ser utilizado, por exemplo, em ambientes ruidosos (BOSCH, 2012).

LXI: disponibilizado em 2004 pela *Agilent Technologies e VXI Technology* como a nova geração de interface para plataformas modulares de sistemas de medição e testes automatizados (PETROVCIC, 2007). O LXI herda todas as vantagens e desvantagens do padrão ethernet (PETROVCIC, 2007; SWANSTROM, 2005).

MXI: desenvolvido pela *National Instruments* e anunciado em 1989 como um padrão aberto (NATIONAL INSTRUMENTSb, 2012). O MXI-1 possibilita controlar sistemas VXI ou VME através da PCI, além de permitir criar configurações com, por exemplo, múltiplos chassis, até mesmo entre sistemas VXI e VME (PETROVCIC, 2007). Em 1995 foi anunciado o MXI-2 que permite controlar um sistema VXI via PCI ou PXI, além de permitir cabos de até 20 m com velocidade de transmissão de dados de até 4 MB/s. Já o MXI-3 permite cabeamentos de até 200 m. Por fim, o MXI-4 permite controlar externamente um chassi PXI através de qualquer PC ou conectar múltiplos chassis PXI (PETROVCIC, 2007).

Como vantagens do MXI, pode-se destacar: instalação *plug & play* e a possibilidade de se controlar remotamente, principalmente via PCI, sistemas VXI e PXI (NATIONAL INSTRUMENTS<sup>b</sup>, 2012).

