

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA

Programa de Pós-Graduação em Metrologia Científica e Industrial

Sergio Augusto Bitencourt Petrovcic

**PROPOSTA DE ARQUITETURA DO SISTEMA
DE AUTOMAÇÃO APLICADO A ENSAIOS DE
DESEMPENHO DE COMPRESSORES
HERMÉTICOS DE REFRIGERAÇÃO**

Dissertação submetida à Universidade Federal de Santa Catarina
para obtenção do grau de Mestre em Metrologia

Orientador: Carlos Alberto Flesch, Dr. Eng.

Florianópolis, 26 de abril de 2007

Livros Grátis

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.

PROPOSTA DE ARQUITETURA DO SISTEMA DE AUTOMAÇÃO APLICADO A ENSAIOS DE DESEMPENHO DE COMPRESSORES HERMÉTICOS DE REFRIGERAÇÃO

Sergio Augusto Bitencourt Petrovcic

Esta dissertação foi julgada adequada para a obtenção do título de

“MESTRE EM METROLOGIA”

e aprovada na sua forma final pelo

Programa de Pós-Graduação em Metrologia Científica e Industrial

Prof. Carlos Alberto Flesch, Dr. Eng. (UFSC)

ORIENTADOR

Prof. Armando Albertazzi Gonçalves Júnior, Dr. Eng. (UFSC)

COORDENADOR DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Hari Bruno Mohr, Dr. Eng. (UFSC)

Eng. Maikon Ronsani Borges, M. Eng. (Embraco)

Prof. Marcelo Ricardo Stemmer, Dr. Ing. (UFSC)

Prof. Marco Antonio Martins Cavaco, Ph. D. (UFSC)

Aos meus pais,

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar aos meus pais, Sergio e Eliete, a minha irmã Daniela, e a minha namorada, Débora, pelo amor e incentivo. Vocês sempre foram e sempre serão meus grandes incetivadores!

Ao meu orientador Prof. Carlos Alberto Flesch pelos ensinamentos, pela paciência, didática e pelo exemplo de professor e pessoa.

Aos companheiros de projeto Poletto, Julio, Pedro, Fúlvio, Cesar, Rodolfo, Vitor, Igor, Miguel e Flávio, pela amizade, companhia e troca de experiências.

Ao pessoal da Embraco, Maikon Ronsani, André Rosa e Marco Aurélio, pela oportunidade de desenvolver o projeto do mestrado e pelo exemplo de competência profissional.

À turma 2005 que, apesar de ter se reduzido a um pequeno porém seletto grupo de pessoas, foram grandes companheiros.

Às turmas 2004 e 2006, pelo clima interpessoal agradável dentro do Labmetro.

À Rosana, pelo seu profissionalismo, e a todos os funcionários do Labmetro por esses anos de convívio.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	8
LISTA DE TABELAS	11
LISTA DE ABREVIATURAS	12
RESUMO.....	14
ABSTRACT.....	15
1 INTRODUÇÃO	16
1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO.....	16
1.2 OBJETIVO DO TRABALHO.....	17
1.3 IMPORTÂNCIA DO TRABALHO.....	17
1.4 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO.....	18
2 CARACTERÍSTICAS GERAIS DOS INSTRUMENTOS DE MEDIÇÃO.....	20
2.1 FAIXA DE MEDIÇÃO	20
2.2 ERRO DE ZERO	20
2.3 ERRO DE GANHO.....	21
2.4 NÃO LINEARIDADE.....	21
2.5 HISTERESE.....	22
2.6 RESOLUÇÃO.....	23
2.7 REPETITIVIDADE.....	24
2.8 DERIVA.....	24
2.9 FREQUÊNCIA DE AQUISIÇÃO	25
2.10 CROSSTALK	26
2.11 TEMPO DE ESTABILIZAÇÃO	27
2.12 RUÍDO TÉRMICO	28
2.13 SINAIS REFERENCIADOS E NÃO REFERENCIADOS.....	28
2.14 RECURSOS DE PROTEÇÃO.....	29

2.15 INTERFACES DE COMUNICAÇÃO	30
3 TEORIA GERAL DA AUTOMAÇÃO DA MEDIÇÃO	35
3.1 SISTEMA DE MEDIÇÃO	35
3.1.1 Transdução	36
3.1.2 Condicionamento de sinais	37
3.1.3 Conversão A/D e D/A	39
3.1.4 Atuação	39
3.2 ARQUITETURAS PARA SISTEMAS DE MEDIÇÃO.....	40
3.2.1 Placas de aquisição	40
3.2.2 Instrumentos dedicados	41
3.2.3 Controladores lógicos programáveis	42
3.2.4 <i>Programmable automation controllers</i> (PAC).....	42
3.2.5 VXI	43
3.2.6 PXI	44
3.2.7 Sistemas híbridos.....	45
4 BANCADA DE ENSAIO DE DESEMPENHO DE COMPRESSORES HERMÉTICOS	47
4.1 CARACTERIZAÇÃO DO ENSAIO	47
4.2 ESTÁGIO ATUAL DAS BANCADAS DE ..5.1451Qtu3IO OluOX..	

5.2 ANÁLISE DE SISTEMAS DE AQUISIÇÃO DISPONÍVEIS NO MERCADO	56
5.2.1 Instrumento dedicado.....	57
5.2.1.1 Agilent 34970A	57
5.2.1.2 Agilent 34980A	58
5.2.2 <i>Programmable Automation Controllers (PAC)</i>	59
5.2.2.1 CompactRIO	59
5.2.2.2 Compact FieldPoint.....	60
5.2.3 PXI	61
5.3 ARQUITETURA PROPOSTA.....	62
5.4 CONFIGURAÇÃO GERAL DO SISTEMA.....	64
5.4.1 Módulo SCXI de multiplexação	65
5.4.2 Módulo PXI multímetro	66
5.4.3 Módulo SCXI de isolamento	66
5.4.4 Módulo PXI DAQ.....	66
5.4.5 Módulo PXI CAN	67
5.4.6 Módulo PXI RS-485.....	67
5.4.7 Módulo PXI de saídas analógicas	67
5.5 INTEGRAÇÃO DE VÁRIAS BANCADAS DE ENSAIO	69
6 AVALIAÇÃO DAS INCERTEZAS DE MEDIÇÃO.....	71
6.1 AVALIAÇÃO DA INCERTEZA DA BANCADA INICIAL.....	72
6.1.1 Medições de potência	72
6.1.2 Medições de temperatura.....	72
6.1.3 Medições de pressão	73
6.1.4 Incerteza da bancada inicial.....	73
6.2 AVALIAÇÃO DA INCERTEZA DA BANCADA NA CONFIGURAÇÃO PROPOSTA NESTE TRABALHO	78
6.2.1 Medições de grandezas elétricas.....	78

6.2.1.1 Componentes de incerteza inerentes ao transdutor.....	79
6.2.1.2 Componentes de incerteza inerentes ao módulo de isolamento	80
6.2.1.3 Componentes de incerteza inerentes ao módulo DAQ	82
6.2.2 Medições de temperatura.....	83
6.2.2.1 Componentes de incerteza inerentes ao transdutor.....	83
6.2.2.2 Componentes de incerteza inerentes ao módulo de multiplexação.....	84
6.2.2.3 Componentes de incerteza inerentes ao multímetro	85
6.2.3 Medições de fluxo de massa.....	85
6.2.4 Medições de pressão	86
6.2.4.1 Componentes de incerteza inerentes aos transmissores CAN	86
6.2.4.2 Componentes de incerteza inerentes ao transmissor RS-485	87
6.2.5 Incerteza da bancada proposta.....	87
6.3 ANÁLISE DOS RESULTADOS DA BANCADA INICIAL E DA BANCADA PROPOSTA.....	93
6.4 IDENTIFICAÇÃO E QUANTIFICAÇÃO DAS FONTES DE INCERTEZAS DAS BANCADAS INICIAL E PROPOSTA.....	96
7 CONCLUSÃO E PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS	99
7.1 CONCLUSÕES	99
7.1.1 Atendimento aos requisitos estabelecidos	99
7.1.2 Forma de avaliação da incerteza de medição.....	101
7.1.3 Dificuldades encontradas	101
7.2 PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS	102
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	104
APÊNDICE – TABELAS DAS FONTES DE INCERTEZAS.....	111

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Erro de zero	21
Figura 2: Erro de ganho	21
Figura 3: Influência da não linearidade diferencial.....	22
Figura 4: Erro INL.....	22
Figura 5: Histerese	23
Figura 6: Erro de amostragem devido ao <i>aliasing</i> [5].....	25
Figura 7: <i>Crosstalk</i> entre canais.....	27
Figura 8: Duas configurações de sinais [16]	28
Figura 9: Medição diferencial com tensão de modo comum com um amplificador de isolamento [17].....	29
Figura 10: Interfaces de comunicação (datas aproximadas) [20].....	31
Figura 11: Seqüência de módulos utilizados para medição	35
Figura 12: Seqüência de módulos utilizados para atuação.....	36
Figura 13: Esquemático de um sistema de controle	36
Figura 14: Uso do filtro após conversor D/A [32].....	38
Figura 15: Exemplos de placas de aquisição	40
Figura 16: Exemplos de instrumentos dedicados	41
Figura 17: Exemplos de controladores lógicos programáveis.....	42
Figura 18: Exemplos de <i>programmable automation controllers</i>	43
Figura 19: Exemplo de VXI	44
Figura 20: Exemplo de PXI	45
Figura 21: Exemplo de arquitetura distribuída gerenciada por um PC [41].....	45
Figura 22: Circuito de refrigeração	47
Figura 23: Medição de resistência a 4 fios.....	55
Figura 24: Agilent 34970A [47].....	58
Figura 25: Agilent 34980A [48].....	59
Figura 26: CompactRIO	60
Figura 27: Compact FieldPoint.....	61

Figura 28: PXI	62
Figura 29: <i>Chassis</i> híbrido PXI/SCXI	63
Figura 30: Configuração geral do sistema proposto.....	65
Figura 31: Esquemático	68
Figura 32: Interligação de várias bancadas de ensaio	70
Figura 33: Histograma da capacidade de refrigeração da bancada inicial na condição (-35 e +65) °C	74
Figura 34: Histograma do consumo de potência da bancada inicial na condição (-35 e +65) °C	75
Figura 35: Histograma do coeficiente de performance da bancada inicial na condição (-35 e +65) °C	75
Figura 36: Histograma da capacidade de refrigeração da bancada inicial na condição (-23,3 e +54,4) °C	76
Figura 37: Histograma do consumo de potência da bancada inicial na condição (-23,3 e +54,4) °C	76
Figura 38: Histograma do coeficiente de performance da bancada inicial na condição (-23,3 e +54,4) °C	76
Figura 39: Histograma da capacidade de refrigeração da bancada inicial na condição (-5 e +45) °C	77
Figura 40: Histograma do consumo de potência da bancada inicial na condição (-5 e +45) °C	77
Figura 41: Histograma do coeficiente de performance da bancada inicial na condição (-5 e +45) °C	78
Figura 42: Modelagem da tensão termoelétrica para o módulo de multiplexação	85
Figura 43: Histograma da capacidade de refrigeração através do método calorímetro da bancada proposta na condição (-35 e +65) °C.....	88
Figura 44: Histograma da capacidade de refrigeração através do método fluxo de massa da bancada proposta na condição (-35 e +65) °C	88
Figura 45: Histograma do consumo de potência da bancada proposta na condição (-35 e +65) °C	88
Figura 46: Histograma do coeficiente de performance através do método calorímetro da bancada proposta na condição (-35 e +65) °C.....	89
Figura 47: Histograma do coeficiente de performance através do método fluxo de massa da bancada proposta na condição (-35 e +65) °C	89

Figura 48: Histograma da capacidade de refrigeração através do método calorímetro da bancada proposta na condição (-23,3 e +54,4) °C.....	90
Figura 49: Histograma da capacidade de refrigeração através do método fluxo de massa da bancada proposta na condição (-23,3 e +54,4) °C	90
Figura 50: Histograma do consumo de potência da bancada proposta na condição (-23,3 e +54,4) °C	90
Figura 51: Histograma do coeficiente de performance através do método calorímetro da bancada proposta na condição (-23,3 e +54,4) °C.....	91
Figura 52: Histograma do coeficiente de performance através do método fluxo de massa da bancada proposta na condição (-23,3 e +54,4) °C	91
Figura 53: Histograma da capacidade de refrigeração através do método calorímetro da bancada proposta na condição (-5 e +45) °C.....	92
Figura 54: Histograma da capacidade de refrigeração através do método fluxo de massa da bancada proposta na condição (-5 e +45) °C	92
Figura 55: Histograma do consumo de potência da bancada proposta na condição (-5 e +45) °C	92
Figura 56: Histograma do coeficiente de performance através do método calorímetro da bancada proposta na condição (-5 e +45) °C.....	93
Figura 57: Histograma do coeficiente de performance através do método fluxo de massa da bancada proposta na condição (-5 e +45) °C	93
Figura 58: Incertezas da capacidade, consumo e COP para a bancada inicial nas três condições de ensaio.....	94
Figura 59: Incertezas da capacidade, consumo e COP para a bancada proposta nas três condições de ensaio.....	94
Figura 60: Comparação da incerteza do COP, entre as bancadas inicial e proposta, para as três condições de ensaio.....	95
Figura 61: Gráfico de Pareto para as principais fontes de incerteza da bancada proposta na condição (-35 e +65) °C	97
Figura 62: Gráfico de Pareto para as principais fontes de incerteza da bancada proposta na condição (-23,3 e +54,4) °C	97
Figura 63: Gráfico de Pareto para as principais fontes de incerteza da bancada proposta na condição (-5 e +45) °C	98

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Requisitos das normas [45].....	50
Tabela 2: Limites de variação [45]	50
Tabela 3: Valores utilizados para as condições de ensaio	73
Tabela 4: Resultados obtidos através da avaliação por Monte Carlo para a bancada inicial na condição (-35 e +65) °C.....	74
Tabela 5: Resultados obtidos através da avaliação por Monte Carlo para a bancada inicial na condição (-23,3 e +54,4) °C.....	75
Tabela 6: Resultados obtidos através da avaliação por Monte Carlo para a bancada inicial na condição (-5 e +45) °C.....	77
Tabela 7: Resultados obtidos através da avaliação por Monte Carlo para a bancada proposta na condição (-35 e +65) °C	87
Tabela 8: Resultados obtidos através da avaliação por Monte Carlo para a bancada proposta na condição (-23,3 e +54,4) °C	89
Tabela 9: Resultados obtidos através da avaliação por Monte Carlo para a bancada proposta na condição (-5 e +45) °C	91
Tabela 10: Influência das condições de ensaio para cada bancada através do método calorímetro	94
Tabela 11: Influência das condições de ensaio para cada bancada através do método fluxo de massa	95
Tabela 12: Fontes de incerteza da CAP e do COP para a condição (-35 e +65) °C, para as bancadas inicial e proposta.....	111
Tabela 13: Fontes de incerteza da CAP e do COP para a condição (-23,3 e +54,4) °C, para as bancadas inicial e proposta.....	112
Tabela 14: Fontes de incerteza da CAP e do COP para a condição (-5 e +45) °C, para as bancadas inicial e proposta.....	113

LISTA DE ABREVIATURAS

BIT	<i>Binary Digit</i>
CAN	<i>Controller Area Network</i>
CLP	<i>Controladores Lógicos Programáveis</i>
cPCI	<i>Compact Peripheral Component Interconnect</i>
DAQ	<i>Data Acquisition</i>
DHCP	<i>Dynamic Host Configuration Protocol</i>
DNL	<i>Differential Non-linearity</i>
EIA	<i>Eletronic Industries Alliance</i>
EISA	<i>Extended Industry Standard Architecture</i>
ERP	<i>Enterprise Resource Planning</i>
FPGA	<i>Field Programmable Gate Arrays</i>
GPIB	<i>General Purpose Interface Board</i>
IEC	<i>Internation Electrotechnical Commission</i>
INL	<i>Integral Non-linearity</i>
ISA	<i>Industry Standar Architecture</i>
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
LAN	<i>Local Area Network</i>
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>

PLC	<i>Programmable Logic Controller</i>
PXI	<i>PCI Extension for Instrumentation</i>
PXISA	<i>PXI System Alliance</i>
PWM	<i>Pulse Width Modulation</i>
RAM	<i>Random Access Memory</i>
RS	<i>Recommended Standard</i>
RTD	<i>Resistive Temperature Devices</i>
SAH	<i>Sample And Hold</i>
SCXI	<i>Signal Conditioning Extension for Instrumentation</i>
UL	<i>Underwriters Laboratories</i>
USB	<i>Universal Serial Bus</i>
VXI	<i>VME Extensions for Instrumentations</i>
VIM	<i>Vocabulário Internacional de Metrologia</i>
VME	<i>Versa Module Eurocard</i>

RESUMO

Os ensaios de desempenho de compressores possuem grande importância para a indústria. As informações geradas através das medições podem realimentar o desenvolvimento de produto, fornecer parâmetros para ajustes no processo, fornecer informações para dados de catálogos e atestar a conformidade de lotes de produção.

Levantamento feito junto à empresa líder mundial na fabricação de compressores mostrou que atualmente várias gerações de bancadas coexistem. Essas bancadas possuem arquiteturas diversas e com diferentes graus de automação. Tais bancadas estão sofrendo forte demanda por parte da área de P&D, onde produtos com características inovadoras requerem dos sistemas a capacidade de medição de mais grandezas e com requisitos cada vez mais exigentes. Para suprir essa demanda, novas técnicas de ensaio serão em breve integradas ao ensaio de compressores, como análise de transitório utilizando inteligência artificial e avaliação de incerteza através do método Monte Carlo.

Nesse cenário, coube a este trabalho propor uma arquitetura para o sistema de automação de ensaios de desempenho de compressores que servirá de referência para futuras bancadas.

Para alcançar o objetivo, foram estabelecidos os requisitos da aplicação e foi proposta uma arquitetura padronizada, modular, que permite alto grau de automação e de flexibilidade dos ensaios, além de possibilitar que eles sejam realizados com pequenas incertezas nas medições.

A comprovação da adequação metrológica da estrutura proposta foi feita através da integração de dois métodos padronizados de avaliação da incerteza: o tradicional, baseado em combinação de incertezas e o numérico – Monte Carlo. Os resultados mostram que, na configuração proposta neste trabalho, é possível operar com incertezas de medição bem abaixo das atualmente praticadas na indústria.

ABSTRACT

The performance tests of compressors have great importance for the industry. The information generated by the measurements made during these tests can feedback the product development, supply setting parameters for manufacturing processes, supply catalogue data information and certify the conformity of production batches.

A very deep analysis carried out in partnership with the world wide leader company in manufacturing hermetic compressors revealed coexistence of various generations of testing equipments. These testing equipments have different architectures and degrees of automation. They are strongly demanded by R&D area, where innovative products require measuring systems capable to analyse additional features with more tight requirements. In order to comply with this demand, new test techniques will be integrated to these testing equipments, as transitory analysis using artificial intelligence and uncertainty evaluation through Monte Carlo simulation.

In this direction, this dissertation proposes an architecture for the automation and measurement uncertainty reduction of performance tests in compressors setting up a new reference for future testing equipment.

To achieve this goal, the requirements of this application had been established and a standardized and modular architecture was proposed. This architecture allows high degree of automation and flexibility of tests, besides assuring low measurements uncertainty.

The evidence of the metrologic compliance of the proposed architecture was made through the integration of two standardized methods of uncertainty evaluation: the traditional one - based on the combination of uncertainties, and numerical one – based on the Monte Carlo method. The results show that, with the proposed configuration, it is possible to operate with measurement uncertainties lower than the currently in use by the industry.

1 INTRODUÇÃO

Sistemas de medição são sistemas capazes de medir, localizar ou contar coisas ou eventos [1]. A história dos sistemas de medição tem origem há milênios onde várias civilizações como a babilônica e egípcia desenvolveram instrumentos para medição de tempo como os relógios de sol e relógios de água.

Para as indústrias, os sistemas de medição têm uma importância muito grande pois, com o aumento da concorrência pelos mercados, vêem-se diante da necessidade de fabricar produtos com maior qualidade, aliados a custos reduzidos. Nesse sentido, os sistemas de medição são capazes de contribuir de maneira significativa para competitividade das empresas através do conhecimento obtido tanto nas etapas de desenvolvimento de produtos e processos, quanto nas de produção. Esse conhecimento é de grande importância não só para se alcançar a qualidade de seus produtos, mas também para os planos estratégicos da empresa.

Na empresa Whirlpool S.A. – Unidade de Compressores Embraco, líder mundial em fabricação de compressores e parceira deste trabalho, o panorama não é diferente. Muitos recursos e esforços são investidos em sistemas de medição em busca da excelência de seus produtos mantendo assim, sua hegemonia internacional.

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

Entre os muitos ensaios realizados com compressores herméticos na Embraco, há um deles que mede, dentre outros parâmetros, o desempenho dos compressores. É conhecido na empresa por ensaio de desempenho em painel de calorímetro. Esses ensaios simulam a utilização do compressor em várias condições de operação. Como resultado desses ensaios tem-se um grande volume de informações que é analisado por vários setores da empresa, focando em diversas aplicações.

A área de pesquisa e desenvolvimento é uma das áreas que utiliza as informações geradas durante os ensaios como forma de realimentação, para que melhorias no projeto possam ser realizadas otimizando o desempenho dos compressores.

As informações obtidas nos ensaios também são utilizadas para ajustar os processos de fabricação do compressor, visando a garantir a qualidade do produto.

O levantamento de dados para catálogo de produtos também é feito através do ensaio de desempenho em calorímetro. Nesse caso, normas internacionais são utilizadas para padronizar o procedimento e evitar que cada fabricante utilize seus próprios índices de desempenho.

Uma outra aplicação para ensaios de desempenho de compressores surge da necessidade de atendimento a clientes específicos que, ao exigirem o procedimento de ensaio em algumas unidades de compressores de um lote, desejam garantir a conformidade do produto. Esses ensaios ora são realizados de acordo com as especificações do cliente, ora seguindo procedimentos já estabelecidos em normas internacionais.

Diante disso, pode-se dizer que o ensaio de desempenho é de extrema importância para a indústria de compressores. Por isso, a Embraco possui mais de 30 painéis dedicados a esses ensaios. Eles pertencem a diferentes gerações; os mais antigos são predominantemente manuais enquanto que os mais novos têm maior grau de automatização. Independente da motivação do ensaio, busca-se redução da duração do ensaio, confiabilidade metrológica e minimização do investimento.

A busca por produtos cada vez mais inovadores demanda sistemas de medição com requisitos mais exigentes. Para suprir essa demanda, intensas pesquisas estão sendo realizadas e seus frutos prestes a serem incorporados às bancadas de ensaios. Recursos como análise de transitório utilizando inteligência artificial, análise de incerteza através do método Monte Carlo e a crescente capacidade de processamento se tornam cada dia mais indispensáveis. Além disso, novos métodos de medição estão em desenvolvimento, como medição da resistência de enrolamento e medição de rotação.

1.2 OBJETIVO DO TRABALHO

O objetivo desta dissertação é propor uma arquitetura que sirva de referência para o desenvolvimento de bancadas de ensaio de compressores totalmente automatizadas. Busca-se com isso eliminar a intervenção dos operadores durante o ensaio, reduzir incertezas, tornar os ensaios mais rápidos, tornar o sistema mais modular e flexível, com maior capacidade de processamento e com controles mais eficientes, facilitando assim, a incorporação de medições especiais que atualmente não são viáveis.

Considerando a arquitetura proposta, projeta-se uma bancada e realiza-se a avaliação metrológica de todas as cadeias de medição da bancada. Para cada grandeza medida é avaliada a incerteza relativa aos transdutores, à eletrônica complementar e ao processamento da informação. Para isso, é usado o método numérico de avaliação de incerteza por simulação Monte Carlo [2] em conjunto com o método estabelecido pelo ISO-GUM [3].

1.3 IMPORTÂNCIA DO TRABALHO

O Labmetro - Laboratório de Metrologia e Automatização – está localizado na Universidade Federal de Santa Catarina. Diante dos sólidos conhecimentos que o Labmetro possui em metrologia e instrumentação e da excelente infra-estrutura laboratorial de que dispõe, vários projetos são desenvolvidos em conjunto com a Embraco.

Hoje, o Labmetro possui uma vasta frente de pesquisas voltadas para bancadas de ensaio de desempenho de compressores. Algumas dessas pesquisas são: otimização dos controles da bancada, técnicas especiais de aceleração do transitório, redução das incertezas de medição através da escolha adequada das técnicas e instrumentos de medição, recursos de inteligência artificial como redes neurais e lógica *fuzzy*, desenvolvimento de medições especiais como resistência de enrolamento de motores energizados e frequência rotacional.

Atualmente, o ensaio de desempenho de um compressor consome em média 4,5 h. Uma parcela desse tempo é inerente à característica desse ensaio, por se tratar de um circuito térmico, com vários componentes de alta inércia térmica, o que torna o

processo lento. A outra parcela é devida à predominância de bancadas semi-automáticas, com sistemas de aquisição e processamento limitados, parcialmente dependente do operador.

A primeira bancada de ensaio de compressores que chegou ao Labmetro, aqui denominada “bancada inicial”, era controlada via controladores Eurotherm, os quais possuem limitadas capacidades de controle, além de possuírem altas incertezas de medição e de atuação. As alimentações do compressor e do calorímetro eram realizadas através da rede elétrica, resultando em erros devido a flutuações da própria rede. Alguns controles e atuações no sistema eram feitos pelos operadores, ocasionando baixa repetitividade nos ensaios e longos períodos de estabilização.

Após vários estudos e pesquisas baseados na bancada inicial, várias modificações foram realizadas com o intuito de aprimorar os resultados gerados e reduzir o tempo de ensaio de um compressor. Tal bancada deu então origem a uma bancada modificada. Esta bancada agora possui, além dos controladores Eurotherm, um PC com placas de aquisição com características metrológicas superiores àqueles. Recebeu fontes de alimentação estáveis tanto para o compressor quanto para o calorímetro e teve alguns controles e atuadores automatizados, reduzindo assim, a intervenção do operador no sistema.

Para dar prosseguimento a todas as pesquisas em andamento e para aquelas que ainda estão por vir, uma nova arquitetura de bancada de ensaio de desempenho de compressores é proposta neste trabalho, focada na modularização, flexibilidade, alto grau de automação, padronização e não proprietária. Com isso, todas as alterações realizadas pelo Labmetro desde a bancada inicial e, inclusive, as alterações que ainda não foram implementadas, serão incorporadas nesta nova arquitetura.

1.4 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

O capítulo 2 apresenta as características gerais de instrumentos de medição com a definição de vários termos utilizados na especificação de sistemas para automação da medição. Para evitar que o texto fique demasiadamente extenso, somente aqueles mais importantes para o entendimento deste trabalho serão apresentados e detalhados.

O capítulo 3 apresenta a teoria geral de automação da medição, quais os módulos que compõem um sistema de medição e quais as transformações sofridas por um sinal desde sua transdução até a atuação no processo. Além disso, comenta as principais arquiteturas comercialmente existentes para condicionamento, aquisição e processamento de sinais.

O capítulo 4 apresenta o conceito de bancada de ensaio de compressores - o que é, seu funcionamento e sua importância na indústria. O estado atual de uma bancada de ensaio existente no Labmetro é apresentado. Traz também os requisitos que a bancada proposta deve atender, do ponto de vista da Embraco e de estudos anteriores realizados no Labmetro.

O capítulo 5 apresenta todos os sinais que serão interfaceados, uma pré-seleção de algumas arquiteturas que podem ser utilizadas para a automação da bancada de ensaio, a escolha da arquitetura mais adequada a esta aplicação e a configuração final proposta.

O capítulo 6 apresenta uma avaliação a priori da incerteza de medição do sistema com base em informações de catálogo. O método de avaliação de incerteza tradicional ISO-GUM [3] em conjunto com o método numérico Monte Carlo [2] são empregados.

O capítulo 7 apresenta as conclusões do presente trabalho, bem como propostas para trabalhos futuros.

2 CARACTERÍSTICAS GERAIS DOS INSTRUMENTOS DE MEDIÇÃO

Para a correta especificação de um sistema de medição, faz-se necessário o entendimento de alguns conceitos relacionados a instrumentos de medição. Devido à grande quantidade de conceitos existentes nesta área, serão apresentados apenas os conceitos julgados indispensáveis ao desenvolvimento deste trabalho.

2.1 FAIXA DE MEDIÇÃO

Segundo o VIM [4], é o “conjunto de valores de um mensurando para o qual se admite que o erro de um instrumento de medição mantém-se dentro dos limites especificados”. Existem instrumentos com faixas de medição unipolares e/ou bipolares. Faixas unipolares geralmente começam em zero, como (0 a 10) V, por exemplo, enquanto que as faixas bipolares são simétricas, como ± 10 V. Deve-se sempre optar por um instrumento capaz de cobrir todos os valores que serão medidos, através da escolha adequada de sua faixa de medição. Valores fora dessa faixa podem implicar erros que extrapolam a incerteza de medição estabelecida e até mesmo, quando estão além da faixa de operação, danificar o instrumento.

2.2 ERRO DE ZERO

Conforme o VIM [4], é o “erro no ponto de controle de um instrumento de medição para o valor zero do mensurando”. Em outras palavras, consiste numa indicação diferente de zero para um mensurando de valor zero. É também conhecido como erro de *offset*. Esse erro é constante para toda a faixa de medição e pode ser corrigido. A figura 1 demonstra o efeito do erro de zero.

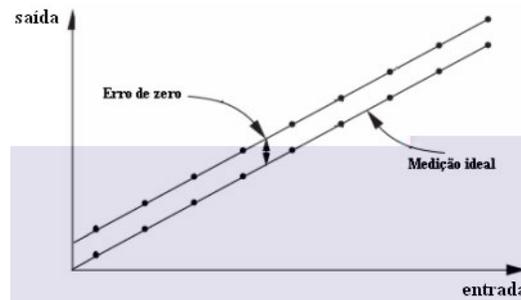


Figura 1: Erro de zero

2.3 ERRO DE GANHO

O erro de ganho é um erro dependente do valor medido. Isso porque, à medida que o valor lido aumenta, aumenta também o erro de ganho. Este erro também pode ser corrigido. A figura 2 demonstra o efeito causado pelo erro de ganho.

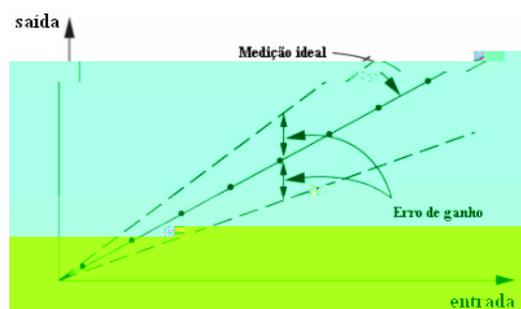


Figura 2: Erro de ganho

2.4 NÃO LINEARIDADE

A não linearidade está presente nos sensores, amplificadores e conversores A/D e é o máximo desvio quando comparado com uma reta teórica. Nos conversores A/D, está presente na forma de não linearidade diferencial (DNL) e não linearidade integral (INL).

A DNL ocorre quando, ao se aumentar a tensão em um conversor A/D, os códigos binários não aumentam na mesma proporção. A figura 3 mostra um conversor A/D ideal e um conversor A/D com não linearidade na tensão de entrada de 120 μV . Essa não linearidade é medida em termos de LSB [5].

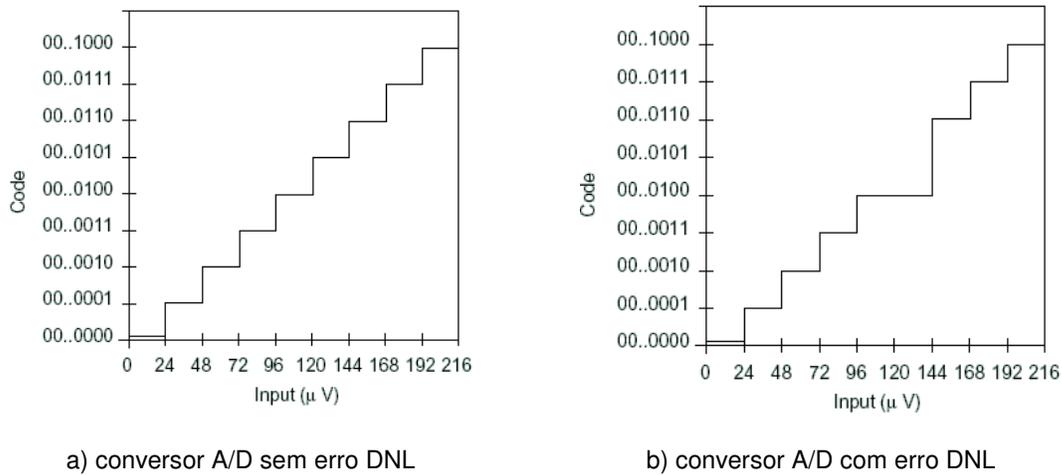


Figura 3: Influência da não linearidade diferencial

A INL também é medida em termos de LSB e, assim como para os amplificadores, é o máximo desvio de uma reta teórica, como mostrado na figura 4. Geralmente é expressa em termos do final da faixa de medição [6],[7].

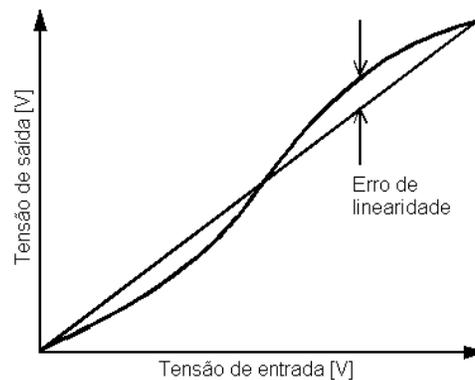


Figura 4: Erro INL

2.5 HISTERESE

A histerese está presente sempre que um instrumento apresentar respostas diferentes para entradas com valores crescentes e entradas com valores decrescentes [8]. Esta característica é muito comum em sistemas mecânicos e é causada principalmente por folgas. Também pode ser encontrada em sistemas eletrônicos. A figura 5 mostra o efeito da histerese.

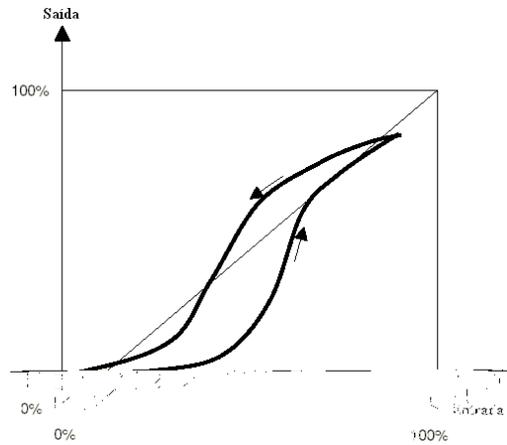


Figura 5: Histerese

2.6 RESOLUÇÃO

Segundo o VIM [4], é a “*menor diferença entre indicações que pode ser percebida*”. No contexto dos instrumentos digitais de medição, a resolução pode ser expressa em termos de bits ou dígitos.

Conversores A/D costumam expressar sua resolução em números de bits. Através da equação 1 [9], pode-se calcular o número de valores distintos na qual o sinal de entrada pode ser expresso.

$$R = \frac{FM}{2^N} = LSB \quad (1)$$

onde: R : é a resolução;

FM : é a faixa de medição;

N : é o número de bits.

O resultado desta expressão corresponde ao bit menos significativo (LSB) ou tamanho do código (*code width*) e pode ser convertido em dígitos através da equação 2 [9].

$$DIG = \log_{10} 2^N \quad (2)$$

onde: DIG : é o número de dígitos;

N : é o número de bits.

Os multímetros expressam sua resolução em termos do número de dígitos como, por exemplo, 5½. Isso significa que um instrumento pode mostrar cinco numerais de 0 a 9 e um numeral que pode ser 0 ou 1. O termo *counts* é comumente encontrado em especificações de multímetros e corresponde ao número de LSB do conversor A/D, ou seja, 2^N .

Algumas vezes os fabricantes fornecem o número efetivo de dígitos (ENOD). Este parâmetro indica, como o nome já diz, quantos bits o instrumento possui na prática. A diferença do valor teórico se dá por causa do ruído existente no instrumento [5],[10],[11]. Outras vezes os fabricantes fornecem o ruído como número de *counts*. Neste caso, para achar o ENOD, basta utilizar a equação 3 [11].

$$ENOD = \log_{10}\left(\frac{FM}{0,52.NC}\right) \quad (3)$$

onde: *ENOD* : é o número efetivo de dígitos;

FM : é a faixa de medição;

NC : é o número de *counts*.

2.7 REPETITIVIDADE

De acordo com o VIM [4], é o “*grau de concordância entre os resultados de medições sucessivas de um mesmo mensurando efetuadas sob as mesmas condições de medição*”. O termo “*As mesmas condições de medição*” a que o VIM se refere significa realizar o mesmo procedimento de medição, com o mesmo observador, com o mesmo instrumento de medição (utilizado nas mesmas condições), no mesmo local e dentro de um curto período de tempo [4]. Um procedimento com alta repetitividade apresenta desvios muito pequenos em relação à média.

2.8 DERIVA

Segundo o VIM [4], é a “*variação lenta de uma característica metrológica de um instrumento de medição*”. As formas mais comuns de deriva são ao longo do tempo (também conhecida como estabilidade) e como função da variação de temperatura.

A deriva térmica ocorrerá sempre que o sistema estiver operando numa faixa de temperatura diferente daquela estipulada pelo fabricante. Geralmente, os fabricantes fornecem uma faixa de temperatura na qual o seu instrumento deve operar, onde as características metrológicas são garantidas.

A deriva temporal funciona semelhante à deriva térmica, porém, com relação ao tempo. Os fabricantes geralmente fornecem as características metrológicas válidas somente durante certo período de tempo, como seis meses ou um ano. Extrapolando esse período, novos valores devem ser adotados, porém os fabricantes são omissos com relação a esses valores.

2.9 FREQUÊNCIA DE AQUISIÇÃO

Na aquisição de sinais, quanto maior a frequência de aquisição, mais fiel será a representação do sinal real. Sinais adquiridos com frequência baixa podem sofrer *aliasing*, que é a reconstrução de um sinal amostrado com frequência diferente do sinal original, introduzindo erros de medição, como mostrado na figura 6.

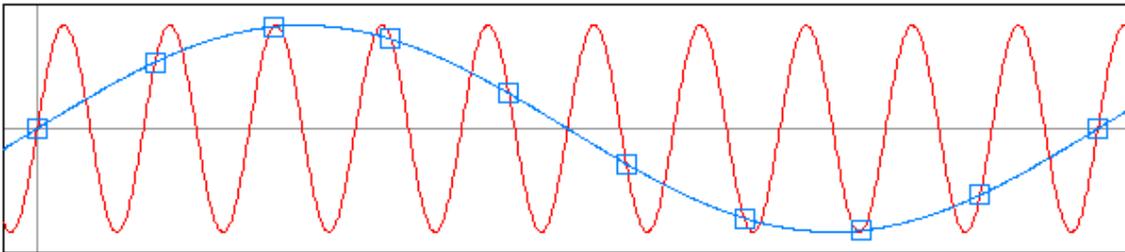


Figura 6: Erro de amostragem devido ao *aliasing* [5]

De acordo com o teorema de *Nyquist*, deve-se amostrar um sinal com no mínimo o dobro da frequência do sinal desejado, com o intuito de evitar a perda de informação com o *aliasing*. Isto significa que é preciso amostrar, converter e adquirir o próximo ponto a uma taxa duas vezes maior que a maior componente de frequência de interesse do sinal. Esta frequência pode ser obtida através da equação 4 [12].

$$f_N = \frac{1}{2(T_{ACQ} + T_{CONV} + T_{AP})} \quad (4)$$

onde: f_N : é a mínima frequência de amostragem segundo Nyquist [Hz];

T_{ACQ} : é o tempo de aquisição do SAH [s];

T_{CONV} : é o tempo de conversão do conversor A/D [s];

T_{AP} : é o tempo de abertura máximo [s].

Porém, o teorema de Nyquist garante apenas a frequência do sinal original, mas não a amplitude. Para garantir que a amplitude do sinal original não tenha erro maior que $\frac{1}{2}$ LSB, pode-se utilizar a equação 5 [12].

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

onde: f_{MAX} : é a máxima frequência de amostragem [Hz];

N : é o número de bits do conversor A/D;

T_{CONV} : é o tempo de conversão do conversor A/D [s].

2.10 CROSSTALK

É a influência de um canal em outro canal. Se dois canais, 1 e 2, estão sendo usados para medição, pode-se observar no sinal do canal 1 a influência do sinal do canal 2.

No caso de multiplexadores, os quais possuem capacitâncias que armazenam cargas diretamente proporcionais aos sinais de entrada, o *crosstalk* também está presente e é diretamente proporcional à impedância da carga e à frequência do sinal.

É geralmente expresso em dB e não tem sentido se não está associado a um valor específico de frequência, ou seja, seu valor é dependente da frequência e sofre degradação à medida que a frequência aumenta. A equação 6 expressa a relação entre a tensão da fonte de influência e a influência gerada [13]. A figura 7 ilustra o fenômeno *crosstalk*.

$$CT = 20 \log\left(\frac{V_{OUT}}{V_{IN}}\right) \quad (6)$$

onde: CT : é o *crosstalk* [dB];

V_{OUT} : é a influência do sinal oriundo de outro canal [V];

V_{IN} : é o sinal oriundo de outro canal [V].

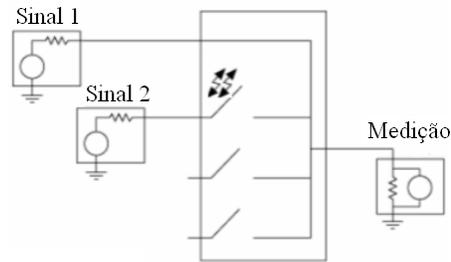


Figura 7: Crosstalk entre canais

2.11 TEMPO DE ESTABILIZAÇÃO

Também chamado como tempo de resposta, é segundo o VIM [4] o “*intervalo de tempo entre o instante em que um estímulo é submetido a uma variação brusca e o instante em que a resposta atinge e permanece dentro de limites especificados em torno do seu valor final estável*”.

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 [14]. Ganho e tempo de estabilização tipicamente têm uma relação direta [14], pois é preciso um tempo maior para a estabilização quando ganhos maiores são aplicados. A multiplexação pode influenciar no tempo de estabilização quando é necessário chavear mais de um canal. A combinação de instrumentos com alta impedância de saída com a carga e descarga das capacitâncias existentes na multiplexação, gera uma queda de tensão na impedância do instrumento, interferindo no tempo de estabilização. Cabos com alta capacitância funcionam como filtros passa baixa levando um tempo maior para carregar e descarregar [5],[10],[11],[14].

Para contornar essas influências, deve-se escolher corretamente o cabo utilizado na medição, como por exemplo, utilizar cabos curtos e com material dielétrico de baixa capacitância, reduzindo os efeitos de carga e descarga das capacitâncias. Instrumentos com baixa impedância de saída devem ser evitados e, quando isso não for possível, deve-se utilizar um seguidor de tensão [14].

2.12 RUÍDO TÉRMICO

O ruído térmico está presente em qualquer resistência e é oriundo da agitação dos elétrons submetidos a uma temperatura [15]. Também é conhecido como ruído Johnson. Este efeito pode ser representado segundo a equação 7.

$$V_R = \sqrt{4KTBR} \quad (7)$$

onde: V_R : é a tensão do ruído térmico [V];

K : é a constante de Boltzman, sendo $K = 1,3806503 \cdot 10^{-23}$ [J/K];

T : é a temperatura na qual a resistência está submetida [K];

B : é a banda de freqüência [Hz];

R : é o valor da resistência [Ω].

O ruído térmico é expresso em RMS, pois é composto por valores aleatórios com média zero. É um ruído branco, já que possui todas as freqüências, cujo valor é limitado pela freqüência de corte do sistema.

2.13 SINAIS REFERENCIADOS E NÃO REFERENCIADOS

Essas são as duas formas sob as quais os sinais podem se apresentar: referenciados ou flutuando [16]. A figura 8 apresenta as duas configurações.

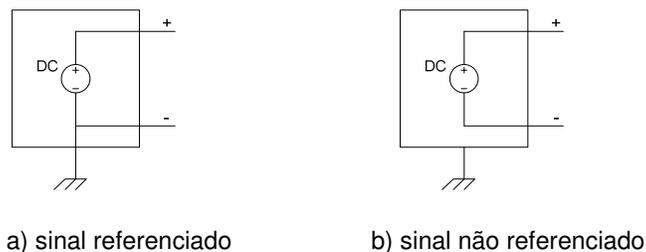


Figura 8: Duas configurações de sinais [16]

No primeiro caso, o sinal está referenciado a uma referência comum a todo o sistema (em geral o terra do sistema). Esses sinais podem ser medidos na forma *single ended*, o que significa que apenas um fio é necessário para se realizar a medição, já que eles compartilham da mesma referência. Essa configuração tem a

vantagem de utilizar um menor número de canais de medição, porém, a assimetria leva a maiores incertezas [16].

O segundo caso é o dos sinais que não possuem referência comum ao sistema e, portanto, estão flutuando. É o caso de medições com termopares ou em baterias e que precisam necessariamente ser realizadas na forma diferencial. Em geral, medições diferenciais são desejáveis, pois mantêm a simetria do sistema e rejeitam os *loops* de terra [16]. Um instrumento de medição diferencial ideal mede somente a diferença de potencial entre os terminais de entrada positivo e negativo. Qualquer tensão presente em ambos os sinais de entrada em relação ao terra do sistema é chamada tensão de modo comum e deve ser completamente rejeitada por um instrumento de medição diferencial ideal.

2.14 RECURSOS DE PROTEÇÃO

A isolação funciona como uma interface entre instrumentos externos e o sistema de aquisição de dados, fornecendo uma barreira galvânica entre a entrada e saída. Também rejeita sinais com grande parcela de modo comum na entrada e quebra *loops* de terra, já que a entrada e saída estão flutuando uma em relação à outra [13], como mostrado na figura 9.

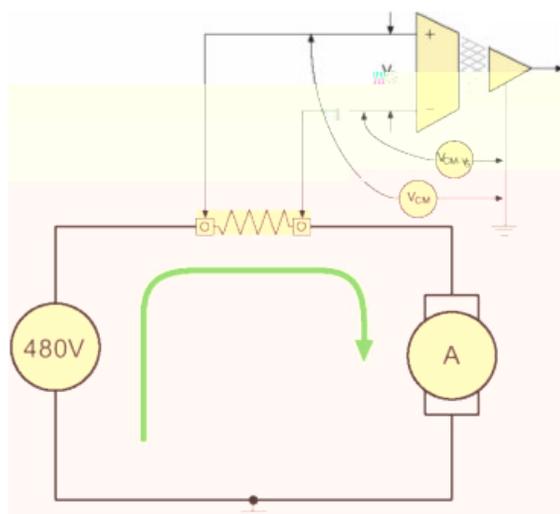


Figura 9: Medição diferencial com tensão de modo comum com um amplificador de isolação [17]

Um instrumento com isolamento passa o sinal, analógico ou digital, da entrada para a saída através de uma barreira de isolamento, garantindo que não haja conexão física entre entrada e saída. Existem muitas formas de isolamento, entre as mais usadas estão a isolamento óptica (com fotoemissores e fotorreceptores), eletromagnética (com transformadores) e capacitiva [18].

A proteção existente nos instrumentos permite que a faixa de medição seja ultrapassada sem dano para o equipamento (algumas vezes exige ajuste dos parâmetros), como no caso de se medir centenas de volts na escala de milivolts ou quando se ultrapassar a tensão máxima suportada pelo instrumento [19]. A proteção não é uma barreira física e, se negligenciada a especificação, pode causar danos ao instrumento.

2.15 INTERFACES DE COMUNICAÇÃO

Interfaces de comunicação são padrões lógicos e físicos que tratam da forma como são ligados e transmitidos os sinais entre instrumentos. Os padrões lógicos definem os níveis de tensão utilizados para representar os valores binários 0 e 1. Os padrões físicos definem a quantidade de fios necessários à transmissão, o tipo de fio, tipo de conector etc.

A escolha da interface de comunicação é muito importante durante a concepção do projeto, pois influencia na longevidade do sistema, taxa de transmissão e facilidade de configuração [20],[21].

O avanço da capacidade de processamento dos computadores ao longo dos anos e a necessidade de comunicação entre eles levaram ao desenvolvimento de várias interfaces de comunicação, que foram posteriormente incorporadas em sistemas de medição, como mostrado na figura 10.

Na seqüência são apresentadas as características das interfaces citadas, suas vantagens e desvantagens.

Interface	Ano
RS-232	1960
HP-IB	1972
Ethernet	1973
IEEE-488	1975
IEEE-488.2	1978
Ethernet 10base-T	1985
Ethernet 100base-T	1995
USB 1.0	1995
Gigabyte Ethernet	1998
USB 2.0	1999
LXI	2004

Figura 10: Interfaces de comunicação (datas aproximadas) [20]

O padrão RS-232 foi desenvolvido pela EIA para a comunicação serial entre dois dispositivos [22]. Os cabos podem ter no máximo 20 m de comprimento e velocidade de transmissão de 20 kb/s. As desvantagens deste padrão são os vários tipos de cabo, conectores e parâmetros de configuração (como *baud rate*, bits de dados, bits de parada, controle de fluxo e paridade) que exigem muito conhecimento e muito tempo despendido para sua implementação [21]. É uma interface bem consolidada e que ainda se encontra em grande parte dos equipamentos de instrumentação, mas está perdendo espaço para novas tecnologias.

O padrão GPIB foi introduzido em 1972 pela Hewlett Packard sob o nome HPIB (*Hewlett Packard Interface Bus*). Em 1975 foi padronizado pela IEEE passando a ser chamado IEEE-488.1 ou GPIB (*General Purpose Interface Bus*), com velocidade de transmissão de 1 Mb/s. Mais tarde a velocidade de transmissão foi aumentada para 1,5 Mb/s sendo denominado IEEE-488.2 [23]. Este padrão utiliza um barramento de 8 bits onde é possível conectar até 15 instrumentos. Consiste em um avanço significativo em relação ao padrão RS-232, pois possui maior velocidade, maior confiabilidade, determinismo e menos opções de cabos e conectores [21]. Porém, a necessidade de uma placa dedicada, alto custo, baixa velocidade de transmissão (mesmo sendo superior à RS-232), cabos pesados, de curto comprimento e de difícil aquisição são as desvantagens desta interface [20],[21],[24]. Distância máxima entre dispositivos de 4 m e comprimento máximo do cabo de 20 m. Mesmo assim, é muito popular e ainda perdurará por anos [24].

O padrão ethernet surgiu em 1973 introduzido pela *Xerox* e somente em 1985 tornou-se um padrão IEEE. As vantagens do *ethernet* são a possibilidade de operar a instrumentação remotamente, contar com vários protocolos, cobrir grandes distâncias,

topologia flexível, não necessita de *slots*, estar disponível em qualquer computador, cabos de fácil aquisição e manuseio, baixo custo, poder conectar uma infinidade de instrumentos, alta velocidade de transmissão (até 10 Gb/s), compatibilidade com versões anteriores e continuar em desenvolvimento [20].

As desvantagens desse padrão são o não determinismo, ausência de *triggering*, sincronização, tratamento de interrupção e complexidade de configuração de vários instrumentos, exigindo um certo conhecimento (endereçamento IP, máscara de sub-rede, servidor DHCP, *gateway*, servidor DNS) [20],[21],[24].

O padrão USB é um padrão de comunicação serial capaz de alimentar o dispositivo, dependendo de seu consumo. Inicialmente, a versão 1.1 possui velocidade de transmissão de 12 Mb/s, enquanto que, a versão 2.0, possui velocidade de até 480 Mb/s [24]. As vantagens deste padrão são a facilidade do cabeamento, facilidade de instalação (*plug & play*), baixo custo dos periféricos, suporta até 127 dispositivos por *host*, alta velocidade de transferência, protocolos simples, não necessita de *slots*, está disponível em qualquer computador e continua em desenvolvimento [21],[24],[25]. Como desvantagem tem-se o não determinismo e o distância máxima do cabeamento de 5 m.

O padrão LXI foi introduzido em setembro de 2004 pela *Agilent Technologies* e *VXI Technology* como a nova geração de interface baseada em LAN para plataformas modulares de sistemas de medição e teste automatizados. É um padrão aberto gerido pelo Consórcio LXI que conta com várias empresas. O LXI herda todas as vantagens e desvantagens do padrão *ethernet*. Para superar a preocupação gerada pela *ethernet* com relação à sincronização e *triggering*, o LXI faz uso do padrão IEEE-1588, que é uma técnica de *triggering* para *ethernet* e que fornece uma solução parcial a estes problemas [20].

O padrão MXI foi desenvolvido pela *National Instruments* e anunciado em abril de 1989 como um padrão aberto [26]. Trata-se de um *link* de comunicação entre dispositivos derivado inicialmente do barramento VME. O MXI-1 proporciona uma forma de se controlar sistemas VXI ou VME através da PCI ou criar configurações como múltiplos *chassis*, até mesmo entre sistemas VXI e VME. Em 1995, a *National Instruments* anunciou o MXI-2 que é uma ponte VME para VME que permite controlar um sistema VXI via PCI ou PXI e, além de oferecer desempenho superior, oferece sinais de *trigger*, sincronização, interrupção e *clock* para até 8 dispositivos, cabos de

até 20 m e transferência de dados de até 33 Mb/s em até 32 bits. O MXI-3, diferentemente do MXI-2, é uma ponte PCI para PCI, sendo também capaz controlar um sistema VXI via PCI ou PXI, porém, com distância de até 200 m. O MXI-4 permite controlar externamente um *chassis* PXI através de qualquer PC ou conectar múltiplos *chassis* PXI. As vantagens do MXI são a possibilidade de se controlar remotamente sistemas VXI e PXI (principalmente via PCI), instalação *plug & play* e dispensa o uso de *softwares*, pois utiliza uma comunicação via *hardware* através de mapeamento da memória (funcionando como uma extensão do barramento) [26],[27].

Fieldbus (barramento de campo) é o nome dado aos dispositivos de baixo nível, diretamente ligados ao processo [28], como atuadores, transmissores e *drivers*, dotados de inteligência, ou seja, capacidade de processamento e capacidade de comunicação com outros dispositivos. Portanto, *fieldbus* é um termo genérico para tais dispositivos.

Em 2000, foi criado um padrão, o IEC 61158, com oito tipos diferentes de protocolos: FOUNDATION Fieldbus H1, ControlNet, PROFIBUS, P-Net, FOUNDATION Fieldbus HSE, Interbus, SwiftNet e WorldFIP. Apesar de não terem sido contemplados nesse padrão, vários outros também são considerados como sendo do tipo *fieldbus*, como o CAN, DeviceNet, ASI-BUS, SERCOS e MODBUS, pois possuem características como determinismo, transmissão digital, serial e bidirecional de dados.

Alguns padrões *fieldbus* utilizam as interfaces citadas anteriormente ou variações delas, como é o caso do PROFIBUS (RS-485) e MODBUS (RS-232, RS-422 e RS-485) [28]. Nesse sentido, será abordado aqui o padrão CAN, que possui interface própria de comunicação e é bastante utilizado em aplicações para automação da medição.

O padrão CAN foi desenvolvido pela *Bosch* na década de 80 inicialmente para ser usado na indústria automobilística como um meio de comunicação entre os sensores embarcados. Hoje, o CAN está presente em várias áreas como militar, aviação e instrumentação, na forma padrão ISO 11898, que é um padrão de alta velocidade (1 Mb/s) e na forma padrão ISO 11519, que é de baixa velocidade (125 kb/s) tolerante a falhas. É um padrão determinístico de comunicação serial, *multicast*, com mais de 10 anos de aceitação na indústria automobilística. Suporta distâncias de até 40 m com velocidade de 1 Mb/s e até alguns quilômetros com velocidade de 10

kb/s, suporta aproximadamente 100 dispositivos na prática, é robusto (desenvolvido para ser usado em ambientes ruidosos, com interferência eletromagnética) [29],[30].

3 TEORIA GERAL DA AUTOMAÇÃO DA MEDIÇÃO

Para que se possa controlar um sistema, é necessário antes de mais nada medir as grandezas que o compõem. Esta medição pode ser realizada de várias maneiras mas, no âmbito deste trabalho foi considerado que deva, necessariamente, ser realizada automaticamente. Neste capítulo serão abordados os conceitos envolvidos na automação da medição, pois são essenciais para que se possa analisar as arquiteturas existentes no mercado de sistemas de medição.

3.1 SISTEMA DE MEDIÇÃO

Segundo o VIM [4], é o “conjunto completo de instrumentos de medição e outros equipamentos acoplados para executar uma medição específica”. Um sistema de medição pode conter vários módulos com funcionalidades distintas como: transdução, condicionamento de sinais, conversão A/D e processamento, como mostrado na figura 11. Toda a “seqüência de elementos de um instrumento ou sistema de medição que constitui o trajeto do sinal de medição desde o estímulo até a resposta” é chamada de cadeia de medição, segundo VIM [4].

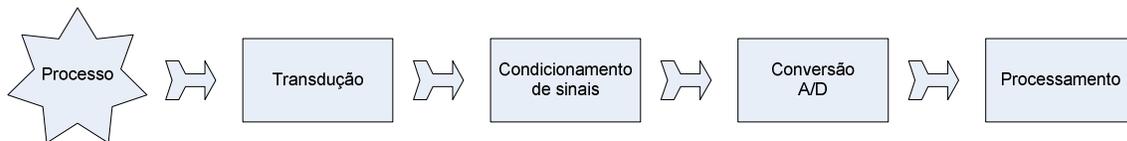


Figura 11: Seqüência de módulos utilizados para medição

Além da cadeia de medição, geralmente é necessário controlar o ambiente e/ou as condições do ensaio, como acontece no ensaio de compressores. Nesses casos, é preciso intervir no processo atuando direta ou indiretamente em certas variáveis, sendo necessário percorrer o caminho inverso, como mostrado na figura 12.



Figura 12: Seqüência de módulos utilizados para atuação

Não é raro encontrar sistemas comerciais para automação da medição que já possuem integrados os módulos de conversão A/D e conversão D/A num único módulo, geralmente denominado de módulo de aquisição de sinais. Nesse caso, estão disponíveis os recursos de medição e de atuação, que em conjunto formam a base de um sistema de controle (figura 13).

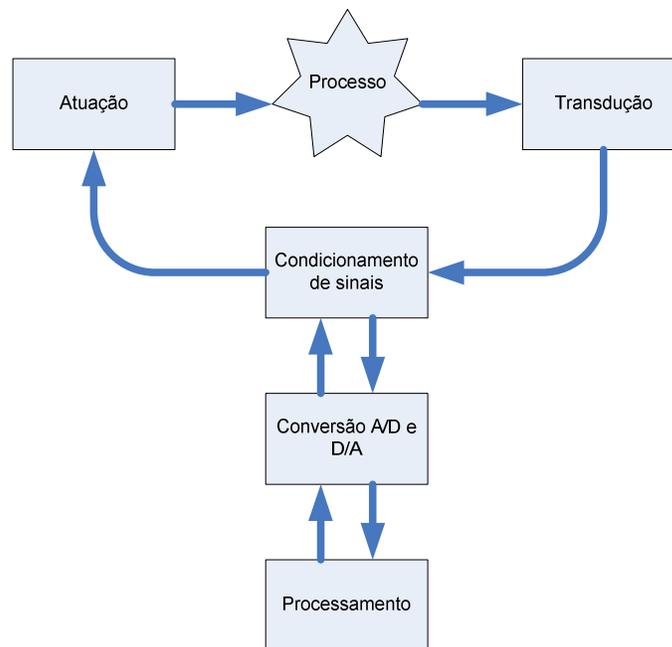


Figura 13: Esquemático de um sistema de controle

3.1.1 Transdução

A transdução é responsável pela conversão de um fenômeno ou grandeza físicos em um sinal, geralmente, elétrico.

Segundo o VIM [4], sensor é o “*elemento de um instrumento de medição ou de uma cadeia de medição que é diretamente afetado pelo mensurando*”, ou seja, é o elemento que fica em contato direto com a grandeza física de interesse. Um exemplo de sensor é a membrana mecânica de um dispositivo que mede pressão.

Transdutor é, segundo o VIM [4], o “*dispositivo que fornece uma grandeza de saída que tem uma correlação determinada com a grandeza de entrada*”, ou seja, é um dispositivo que possui outros elementos indispensáveis para a conversão da grandeza física. Um transdutor de pressão, por exemplo, normalmente usa extensômetros colados em uma membrana. Neste caso, todo o equipamento composto pela membrana, os extensômetros configurados em ponte de *Wheatstone* e a eletrônica embarcada necessária para a alimentação, filtro etc, é chamado de transdutor.

Já o transmissor, é um instrumento que tem como saída um sinal já condicionado, ou seja, um sinal amplificado ou até mesmo, em alguns casos, já na forma digital. No caso do exemplo anterior, teria-se depois da ponte de *Wheatstone* um amplificador fornecendo um sinal de saída de (0 a 10) V e, em alguns casos, um conversor A/D com interface de comunicação.

Transdutores autogeradores não requerem alimentação e retiram energia do processo. Os demais transdutores necessitam de uma fonte de energia externa para seu funcionamento.

3.1.2 Condicionamento de sinais

O condicionamento de sinais consiste em alterar as características de um sinal para que ele se comporte da maneira desejada.

Esse procedimento pode ser necessário antes do conversor A/D ou após o conversor D/A e pode fornecer os seguintes recursos: amplificação, atenuação, filtro, isolamento, ajuste de impedância, multiplexação, aquisição simultânea e excitação [1], [5],[10],[31].

Antes do conversor A/D, é normalmente utilizado nos casos em que se utiliza transdutores, ao invés de transmissores. A saída desses elementos geralmente é da ordem de milivolts, sendo algumas vezes na ordem de microvolts. São sinais não tratados, às vezes moduq.84737(u)-6.84607(q.84-5.96066()-2557(r)3.7878.737(153()1a(e)-6.84737(9.60

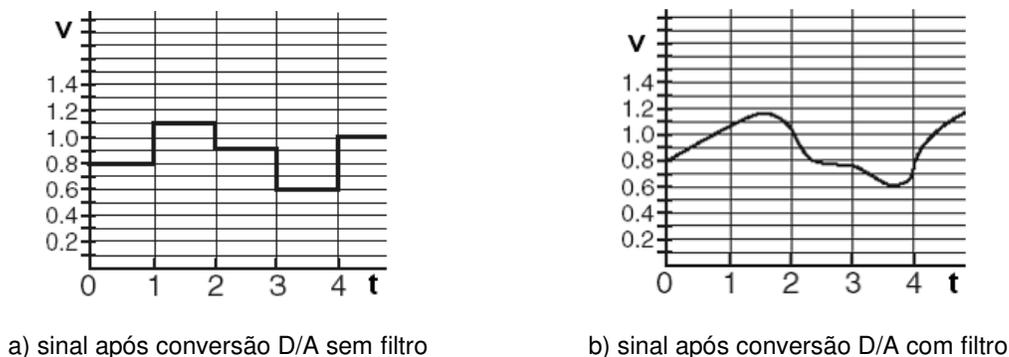


Figura 14: Uso do filtro após conversor D/A [32].

A amplificação é necessária para que se possa utilizar toda a faixa do conversor A/D, reduzindo assim, o erro de medição. Geralmente se dispõe de vários ganhos, maiores que um, a fim de ajustar o sinal da melhor forma possível. Deve estar localizado o mais próximo possível da fonte do sinal para minimizar a influência do ruído ambiente. Além disso, melhora a relação sinal/ruído que é a razão entre o sinal de interesse e o ruído presente. Quanto maior o valor da relação sinal/ruído, menor a influência do ruído.

O ajuste de impedância é necessário sempre que a impedância de entrada do conversor A/D é baixa em relação à impedância de saída do sensor ou transdutor. Caso este ajuste não seja realizado, grandes erros de medição irão ocorrer comprometendo a confiabilidade da medição.

A atenuação é o processo oposto ao da amplificação. É responsável por reduzir a amplitude do sinal para acomodá-lo dentro da faixa do conversor A/D. Assim como na amplificação, geralmente se dispõe de vários ganhos, neste caso menor que um, a fim de ajustar o sinal da melhor forma possível.

O filtro tem a função de eliminar sinais que de alguma forma, intencionalmente ou não, estão presentes no sinal de interesse (um exemplo de sinal intencionalmente inserido é a modulação). Geralmente, os filtros são utilizados para remover ruídos e interferências com frequências diferentes da frequência de interesse. Durante a aquisição de sinais é muito comum se utilizar filtros *antialiasing*, para evitar o fenômeno de *aliasing*.

A isolação é a transmissão de sinal sem um meio físico e pode ser através de transformadores, óptica ou capacitiva. Além de evitar laços de terra, bloqueia surtos de tensão e tensões de modo comum.

A multiplexação permite o compartilhamento de módulos em diferentes cadeias de medição, reduzindo o custo por canal. Através da multiplexação, vários sinais podem, por exemplo, ser roteados para um mesmo conversor A/D.

A aquisição simultânea é a aquisição de vários sinais ao mesmo tempo. Em algumas aplicações torna-se praticamente indispensável, como é o caso de medição de diferença de fase, entre sinais de alta frequência.

A excitação é necessária para transdutores que requerem alimentação, pois precisam de alimentação externa. Esta excitação deve ter exatidão¹ e estabilidade boas, caso contrário, irá acarretar erros na medição.

3.1.3 Conversão A/D e D/A

Esse módulo engloba os módulos conversor A/D e conversor D/A. O conversor A/D é responsável por transformar uma grandeza contínua em uma grandeza discreta, expressando-a em forma binária. A exatidão de um sinal digital tem uma relação direta com o número de bits usados na conversão para representá-lo nesta forma.

Estando digitalizada, a informação pode então ser processada externamente por um módulo adicional, normalmente sendo um microcontrolador ou um computador. O processamento pode incluir correções de tendência² e de linearização, e operações matemáticas para a computação do resultado.

O conversor D/A realiza o trabalho oposto do conversor A/D, ou seja, converte uma informação digital em sinal analógico.

3.1.4 Atuação

É através da atuação que o sistema interage com o processo impondo determinadas condições. A atuação pode ser realizada através de sinais digitais ou analógicos. Sinais digitais podem acionar cargas através de comandos do tipo abre/fecha, como por exemplo uma válvula *on/off*. Sinais analógicos podem promover acionamento contínuo, dentro da resolução estabelecida.

¹ Exatidão: de acordo com o VIM [4], é o “grau de concordância entre o resultado de uma medição e um valor verdadeiro de um mensurando”.

² Tendência: de acordo com o VIM [4], é o “erro sistemático da indicação de um instrumento de medição”.

de *slots* PCI no PC, e as de interface USB possuem estado imprevisível quando o PC é ligado ou reinicializado.

3.2.2 Instrumentos dedicados

Também conhecidos como *rack-and-stack*, são instrumentos independentes, geralmente utilizados em laboratórios, que possuem *chassis* próprio, com alimentação interna, interface com botões e *displays*, interface de comunicação (na maioria dos casos GPIB) [33]. Possuem funções bem definidas, como por exemplo multímetro, analisadores de rede, analisadores de ruído etc. A figura 16 mostra alguns exemplos de instrumentos dedicados.



Figura 16: Exemplos de instrumentos dedicados

Os instrumentos dedicados estão disponíveis em grande variedade. É estimado que haja hoje mais de 10.000 modelos de instrumentos com interface GPIB funcionando [25]. Se comparados com instrumentos modulares, são volumosos. Necessitam de um PC para processamento dos dados e gerenciamento dos instrumentos e, portanto, exigem uma placa GPIB no PC. Carregam consigo todas as desvantagens da interface GPIB. Os mais modernos já possuem interface LXI, que contornam as limitações da interface GPIB.

A desvantagem desses instrumentos é que eles são tipicamente fechados e suas funcionalidades definidas pelo fabricante, o que geralmente resulta para o usuário final pagar por funções que ele não irá usar. Instrumentos dedicados não são projetados para serem integrados em sistemas de medição e, portanto, torna-se um desafio a sua integração. Eles reduzem a possibilidade de expansão do sistema no futuro, requerendo um grande trabalho apenas para adicionar pequenas funcionalidades [34].

3.2.3 Controladores lógicos programáveis

Controladores lógicos programáveis são sucessores dos painéis de relés. O primeiro CLP foi desenvolvido em 1968 baseado nos critérios definidos pela *General Motors* [35]. São dispositivos muito utilizados na indústria para automação de processos desde a década de 70. A figura 17 mostra alguns exemplos de CLP.





a) CompactLogix da Allen
Bradley



b) SNAP PAC S-series da Opto
22



c) PACSystems RX3i da General
Electric

Figura 18: Exemplos de *programmable automation controllers*

As vantagens dos PAC são: utilização de tecnologia embarcada (não sendo necessária a utilização de um PC para gerenciar ou processar dados); alta velocidade de operação; maior capacidade de processamento e armazenamento, capaz de realizar controles complexos, possibilidade de comunicação com banco de dados (integração com sistemas ERP); avançado suporte de rede e comunicação (TCP, IP, UDP, FTP, SNMP e SMTP); suporte a sistemas de tempo real (determinístico); modularidade - possui módulos para diversas aplicações (aquisição de dados, monitoramento remoto, controle de processos etc); fácil integração (capaz de trocar dados com vários sistemas) [36],[37].

As desvantagens são: preço; arquitetura proprietária; o *hardware* não é intercambiável mas possui um banco de dados de parâmetros compartilhado por todas as ferramentas de desenvolvimento [37].

3.2.5 VXI

O Consórcio VXIbus foi formado com o intuito de definir um padrão modular para instrumentação. Em 1993, o IEEE adotou oficialmente a especificação VXI, chamando IEEE 1155. O VXI está apoiado em mais de 250 fabricantes, com mais de 1000 produtos disponíveis. Seu sucesso está baseado na plataforma aberta [38]. A figura 19 mostra um exemplo de um sistema VXI.





a) Chassis PXI



b) Módulos PXI

Figura 20: Exemplo de PXI

3.2.7 Sistemas híbridos

Sistemas híbridos combinam instrumentos de teste e medição de diversas arquiteturas como PXI, VXI, CLP, PAC, instrumentos dedicados e PC, que se conectam através de várias interfaces de comunicação [41]. A figura 21 mostra as arquiteturas para sistemas de medição apresentadas neste. Vale ressaltar que podem coexistir mais de uma arquitetura em um sistema híbrido.

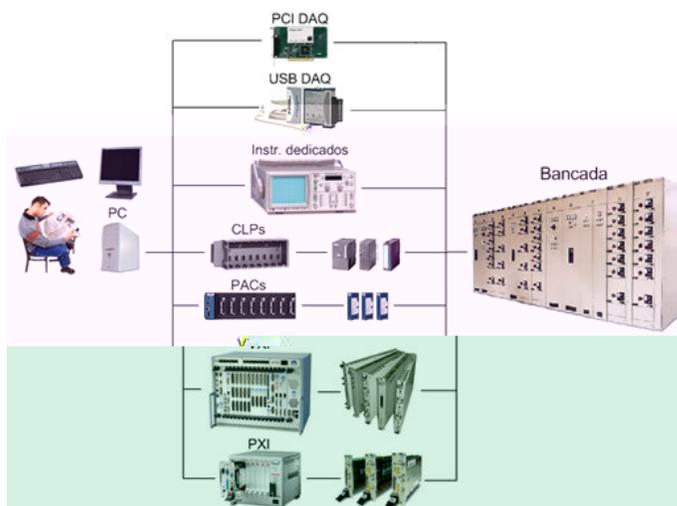


Figura 21: Exemplo de arquitetura distribuída gerenciada por um PC [41]

Quando se trata de sistemas grandes, é difícil conseguir cobrir 100% de todas as necessidades apenas com uma arquitetura [42]. Não é raro uma determinada arquitetura não atender todos os requisitos de um projeto, sendo necessário satisfazê-los de outra forma. Isto mostra a importância de se dispor de várias interfaces de comunicação.

As vantagens de um sistema híbrido são a possibilidade de se reutilizar recursos já existentes, maior flexibilidade, facilidade de expansão e aumento da longevidade. Como desvantagens têm-se o aumento de complexidade do sistema e maior dificuldade de manutenção.

4 BANCADA DE ENSAIO DE DESEMPENHO DE COMPRESSORES HERMÉTICOS

Para o completo entendimento da bancada de ensaio de compressores, faz-se necessário primeiramente introduzir alguns conceitos básicos de funcionamento de sistemas de refrigeração. Posteriormente, é apresentado o estágio atual da bancada de ensaio de compressores existente no Labmetro.

Durante um ensaio de desempenho de compressores, vários parâmetros como capacidade de refrigeração, consumo de potência e coeficiente de performance são medidos, ou calculados a partir de outras variáveis. Para que isso seja possível, uma boa instrumentação é necessária como transdutores, sistema de condicionamento e aquisição de sinais e atuadores. A toda esta aparelhagem indispensável à realização de ensaios em compressores é dado pela Embraco o nome de bancada de ensaio de desempenho de compressores ou painel de calorímetro – por simplicidade doravante chamada de bancada de ensaios.

Os métodos de ensaio, quais variáveis medir e controlar, os instrumentos que devem ser utilizados, os pontos, intervalos e incertezas de medição, entre outras coisas, são definidos por norma e devem ser obedecidos rigorosamente. As normas mais utilizadas na indústria são a ISO 917 [43] e ANSI/ASHRAE 23-2005 [44].

No âmbito deste trabalho foram estabelecidos em conjunto com a Embraco requisitos ainda mais exigentes do que os normatizados.

4.2 ESTÁGIO ATUAL DAS BANCADAS DE ENSAIOS USUAIS

A Embraco possui várias bancadas de ensaio de desempenho de compressores. Essas bancadas pertencem a diferentes gerações, o que resulta em diferentes configurações e níveis de automação.

A bancada de ensaio de desempenho de compressores localizada no Labmetro é semi-automática e já é uma evolução das bancadas existentes na Embraco. Ela conta hoje com 17 controladores Eurotherm cujas capacidades de processamento e controle são extremamente limitados. Eles estão interconectados via barramento RS-485 e, através de um conversor RS-485/RS-232, podem ser operados por um PC. Os processamentos mais complexos são realizados por este PC, que é munido de duas placas PCI DAQ e que fazem a interface com o processo.

Além dos controladores e placas PCI DAQ, a bancada possui uma fonte de tensão cc utilizada para fornecer potência na forma de calor para o evaporador e uma fonte de tensão ca utilizada para alimentação do compressor. Essas duas fontes possuem interfaces de comunicação GPIB e RS-232/GPIB, respectivamente. O PC possui uma placa GPIB e a utiliza para comunicação com as duas fontes. Um

transmissor de vazão com interface RS-485 também é utilizado no mesmo barramento que os controladores Eurotherm.

Algumas válvulas, comandos de partida, equalização, inicialização da unidade condensadora e da instrumentação, entre outros, estão funcionando de forma manual sob responsabilidade do operador.

Essa bancada de ensaio de desempenho de compressores existente no Labmetro serviu de base para definição dos requisitos, através dos resultados gerados em trabalhos baseados nela.

4.3 REQUISITOS DEFINIDOS PARA ESTABELECIMENTO DE UMA ARQUITETURA PADRONIZADA

No âmbito deste trabalho foram estabelecidos, em conjunto com a Embraco, os requisitos da arquitetura que deveriam servir de referência para os desenvolvimentos de novas bancadas para a empresa.

Os requisitos da bancada de ensaios compreendem todas as características que o projeto deve tentar satisfazer e foram obtidos com base em informações fornecidas pela Embraco e em resultados gerados através de trabalhos anteriores, na forma de artigos, dissertações, memoriais e procedimentos internos. A seguir, tais requisitos são elencados.

Atendimento às incertezas previstas em norma: é o requisito mais importante para a Embraco e deve ser atendido a qualquer custo. A área de pesquisa e desenvolvimento é a maior interessada no atendimento desse requisito.

Ambas as normas, ISO 917 [43] e ANSI/ASHRAE 23-2005 [44], mencionam as tolerâncias a respeito das incertezas permitidas para os transdutores utilizados e, em alguns casos, faixas nas quais uma determinada variável deve permanecer confinada durante o ensaio do compressor.

A norma ASHRAE 23-2005 [44] os especifica em função de seu erro máximo enquanto a norma ISO 917 [43], de seu desvio padrão. Esses valores foram transcritos das respectivas normas e estão listados na tabela 1. No que tange ao funcionamento da bancada na qual o ensaio do compressor é realizado, as normas especificam faixas nas quais cada variável deve permanecer confinada, como mostrado na tabela 2 [45].

Tabela 1: Requisitos das normas [45]

	ISO 917	ASHRAE 23-2005
grandeza	desvio padrão	erro máximo
diferença de temperaturas		±1,0% da diferença
temperatura de fluido ou água em calorímetros ou condensadores	0,06 K	±0,3 K
demais temperaturas	0,3 K	±0,3 K
pressão de sucção	1,0%	±1,0% do valor medido
demais pressões	2,0%	±1,0% do valor medido
fluxo de massa (fase líquida)	1,0%	±1,0% do valor medido
fluxo de massa (fase gasosa)	2,0%	±1,0% do valor medido
potência elétrica	1,0%	±1,0% do valor medido
tempo	0,1%	±0,5% do intervalo

Tabela 2: Limites de variação [45]

norma	ISO 917	ASHRAE 23-2005
grandeza	limites de operação	
tensão de alimentação	±3,0% do valor especificado	±1,0% do valor especificado
freqüência de alimentação	±1,0% do valor especificado	
pressão de sucção	±1,0% do valor especificado	±1,0% do valor especificado
pressão de descarga	±1,0% do valor especificado	±1,0% do valor especificado
demais pressões	±1,0% do valor especificado	
temperatura de sucção		±1,0 K
temperatura ambiente do compressor		±4,0 K
demais temperaturas	±3,0 K	±3,0 K
número mínimo de medidas	4	3
tempo de teste	1 h	
volume específico do refrigerante na sucção	±2,0% do valor especificado	
flutuações nas potências entregues ao calorímetro ou ao condensador não devem variar a capacidade do compressor mais que	±1,0%	
perdas em calorímetros ou condensadores	5 % da capacidade	

Isolação do sistema para medição de grandezas elétricas: como a bancada mede tensões alternadas com valor eficaz de até 264 V e correntes com valor eficaz de até 8 A, é necessário que haja isolação entre o processo e a instrumentação, garantindo assim a segurança não só do equipamento, mas também daqueles que irão operá-lo.

Proteção do equipamento: consiste em suportar valores de tensão maior que o valor máximo de medição. É interessante durante a ocorrência de surtos de tensão ou instalação inadequada do instrumento.

Garantia do comportamento nas condições praticadas: é a garantia de que as características metrológicas não sofrerão alterações em função das condições ambientais às quais o sistema estará exposto, como variações de temperatura, por exemplo. Essa característica é importante, pois essas condições certamente diferem de acordo com as estações do ano, e as características metrológicas devem permanecer inalteradas diante destas variações.

Garantia das incertezas praticadas por no mínimo seis meses: assim como é importante garantir a deriva em função das condições ambientais, também é

importante a estabilidade ao longo do tempo, evitando a necessidade de calibrações freqüentes e permitindo que a bancada permaneça mais tempo em operação.

Modularidade: a modularidade é interessante para uma eventual expansão do sistema. É interessante a possibilidade de se poder agregar novas funções como um gerador de onda quadrada, uma fonte ou um osciloscópio, o que torna o sistema muito mais flexível, além de aumentar sua longevidade. Além disso, facilita sua manutenção, visto que um módulo com problemas pode ser substituído, preferencialmente sem a necessidade de reconfiguração.

Facilidade de calibração fora do painel: é um requisito importante, pois evita que haja o deslocamento de padrões de calibração delicados para o local da bancada, dando opção de escolha entre calibração local ou em laboratório. Portanto, é desejável que o sistema escolhido possa ser retirado da bancada para ser levado ao laboratório de calibração.

Compatibilidade com LabVIEW: devido à grande utilização do *software* LabVIEW, em vários setores da empresa, é importante a compatibilidade do sistema com o LabVIEW. Esta compatibilidade pode ser traduzida como sendo a possibilidade de executar códigos escritos em LabVIEW ou o fornecimento de *drivers* para comunicação com determinado dispositivo.

Arquitetura não proprietária: é importante para a empresa a escolha de uma arquitetura aberta, para evitar a dependência de um fornecedor ou fabricante. Da mesma forma, é interessante o uso de soluções comerciais, evitando assim, o desenvolvimento de produtos.

Atendimento aos requisitos de normas de segurança: para segurança daqueles que operarão a bancada e da própria bancada, é indispensável que o sistema escolhido esteja de acordo com as normas de segurança, especialmente normas IEC e UL.

Inserção manual de dados: é interessante para a Embraco a possibilidade de inserir manualmente dados no sistema durante o ensaio. Portanto, é preciso que o sistema suporte este recurso de alguma forma, seja através de teclado, monitor *touchscreen* ou qualquer outra forma.

Maior grau de automação possível: a Embraco deseja que se alcance o maior grau de automação possível para esta bancada de ensaios, eliminando chaves e

botões mecânicos e tornando automáticas as rotinas que são executadas por operadores. Com isto, aumenta a relevância em se utilizar um computador supervisor, capaz de monitorar o estado de vários painéis e fornecer informações sobre os mesmos.

Capacidade de processamento: vários parâmetros são controlados através de controladores Eurotherm dedicados enquanto as demais variáveis são controladas por um PC. Com o novo sistema, deseja-se que todo o processamento seja realizado por um único controlador, exigindo um poder de processamento superior ao atual. Além disso, novos recursos como análise de transitórios através de redes neurais serão implementados, o que consumirá mais recursos.

Capacidade de armazenamento: esta nova geração de bancadas de ensaios irá gerar uma quantidade muito grande de informações durante um ensaio devido à utilização de técnicas de redes neurais e avaliações de incerteza por Monte Carlo, que não são realizadas atualmente. Esses dados terão que ser armazenados para consultas posteriores, o que exige uma grande capacidade de armazenamento.

Número de canais e módulos compatíveis com a necessidade: vários módulos e canais serão necessários para a medição e controle do ensaio. É importante que o sistema escolhido possua uma quantidade adequada de *slots* e que cada módulo também tenha uma quantidade adequada de canais.

Flexibilidade na comunicação: devido às formas de comunicação utilizadas na atual bancada (RS-485, GPIB) e à futura aquisição de transmissores de pressão CAN, é interessante que a nova bancada possua essas interfaces de comunicação além de outras interfaces que possam vir a ser utilizadas futuramente, de preferência interfaces modernas como USB e LAN.

Frequência de aquisição: a frequência de aquisição não é um problema para a grande maioria das variáveis, exceto para a tensão e corrente de alimentação do compressor. Essas duas variáveis são utilizadas para o cálculo de potência ativa, que é a potência consumida pelo compressor, e medições muito defasadas no tempo podem inserir erros significativos, já que a potência ativa é calculada com base na tensão e corrente instantâneas. Estudos anteriores realizados na bancada atual [6] verificaram que a frequência de, no mínimo, 50 kHz deve ser usada para as medições de tensão e corrente instantâneas, garantindo que o erro na potência ativa calculada esteja dentro dos limites desejados.

Vida útil longa: este requisito está associado à não utilização de relés mecânicos em módulos de multiplexação, já que eles possuem vida útil limitada, geralmente com poucos milhões de operações. Isto evita o investimento freqüente em novos módulos para reposição, além de manter a máquina em operação constantemente. Já para acionamentos do tipo *on/off* executados uma vez a cada ensaio, a utilização de relés não é um problema.

5 ESTABELECIMENTO DA ARQUITETURA DE UMA BANCADA COM ALTO GRAU DE AUTOMAÇÃO

5.1 SINAIS A INTERFACEAR

Os sinais a serem interfaceados compreendem todas as grandezas que serão medidas e, portanto, é importante determinar quais suas características, como número de medições, tipo de sinal, frequência de aquisição, incerteza desejada e forma de medição. As grandezas envolvidas na nova bancada de ensaio são temperatura, pressão, vazão, corrente ca e cc e tensão ca e cc. A seguir, são detalhadas as características de cada grandeza.

5.1.1 Temperatura

Serão realizadas 18 medições de temperatura. Destas 18 medições, uma será realizada internamente pelo próprio transmissor de vazão de fluido refrigerante que estará integrado ao sistema. As demais 17 medições serão realizadas utilizando-se termorresistores do tipo Pt100.

Os termorresistores de platina (Pt100) possuem 100 Ω de resistência a 0 °C, boa estabilidade ao longo do tempo, são quimicamente inertes (comparado com cobre e níquel), resistente à oxidação, possuem uma faixa maior de operação, boa linearidade, boa repetitividade e baixa incerteza [46].

A medição será realizada a 4 fios. Este tipo de medição permite uma menor incerteza já que é compensada a queda de tensão nos fios utilizados para a medição. Neste tipo de medição, são necessários uma fonte de corrente e um voltímetro como mostrado na figura 23. A corrente é forçada a passar pela resistência, já que a

resistência interna do voltímetro é teoricamente infinita, gerando uma queda de tensão que será medida pelo voltímetro.

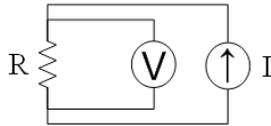


Figura 23: Medição de resistência a 4 fios

O sinal gerado em tensão é da ordem de milivolts e seu valor depende do valor da resistência (Pt100) e da fonte de corrente. Geralmente, utiliza-se valores menores que 1 mA para fonte de corrente, pois correntes muito altas geram aquecimento no Pt100, devido ao efeito Joule, causando erros na medição de temperatura. Como se trata de medição de temperatura e esta grandeza possui uma inércia muito grande, a frequência de aquisição não é crítica e pode ser realizada a cada 1 s ou mais.

5.1.2 Pressão

Serão realizadas 8 medições de pressão, das quais 7 serão através de transmissores digitais e somente 1 através de transmissor analógico (com possibilidade de saída digital via interface RS-485). Os transmissores digitais utilizam interface CAN enquanto que o analógico possui saída de (0 a 10) V. Ambos os casos dispensam o condicionamento de sinal e, somente no último, há a necessidade de conversão A/D. A frequência de aquisição só é importante para a pressão de descarga, que será utilizada para a medição de rotação através da pulsação da pressão. Esta é a razão de se ter um transmissor analógico, pois a frequência de atualização dos digitais são de apenas algumas dezenas de hertz enquanto que os analógicos não possuem esta limitação.

5.1.3 Vazão

Serão realizadas duas medições de vazão, uma de água de refrigeração e outra de fluido refrigerante. A medição de vazão de fluido refrigerante será realizada através de um transmissor de vazão com interface de comunicação dedicada RS-485 baseado no princípio *Coriolis*. A medição de vazão de água será realizada utilizando-se uma turbina, com sinal de saída de (0 a 10) V. Ambas as medições dispensam o condicionamento do sinal e, somente no último caso, há a necessidade de conversão

A/D. A frequência de aquisição e a incerteza do transmissor analógico não são importantes para o funcionamento da bancada e podem ser desprezadas.

5.1.4 Grandezas elétricas

As grandezas elétricas dessa bancada são caracterizadas pela potência ca de alimentação do compressor, pela potência cc entregue ao evaporador e pela tensão cc e corrente cc para medição de resistência de enrolamento.

A potência ca é calculada através do produto das medições instantâneas de tensão ca e corrente ca. A medição de tensão ca é realizada através de um divisor de tensão que condiciona sinais com valor eficaz de (85 a 264) V para a faixa bipolar de ± 10 V. A medição de corrente ca é realizada através de dois *shunts* que condicionam sinais com valor eficaz de (0,2 a 5,0) A para a faixa bipolar de $\pm 0,5$ V.

A potência cc é calculada com base no produto das medições de tensão cc e corrente cc. A medição de tensão cc também é realizada através de um divisor de tensão que condiciona sinais de (28 a 300) V para a faixa de (0 a 10) V. A medição de corrente cc é realizada através de dois *shunts* que condicionam o sinais de (0,35 a 5) A para a faixa de medição de (0 a 0,5) V.

A tensão cc e corrente cc são utilizadas para a medição da resistência de enrolamento do compressor cuja pesquisa ainda está em andamento e está sendo prevista para a nova bancada de ensaio de compressores.

A frequência de aquisição de 50 kHz deve ser atendida para as medições de tensão ca e corrente ca, sob pena de produzir incerteza muito elevada no cálculo da potência ca. Nas medições de tensão cc e corrente cc, não há esta preocupação com a frequência de aquisição.

5.2 ANÁLISE DE SISTEMAS DE AQUISIÇÃO DISPONÍVEIS NO MERCADO

Após realizar um estudo com base nas arquiteturas descritas no tópico 3.2 , verificou-se claramente que algumas delas não são capazes de atender alguns dos principais requisitos do projeto. Estas arquiteturas foram então excluídas do processo de escolha da melhor arquitetura cujas justificativas serão apresentadas a seguir.

As PCI DAQ e USB DAQ são instrumentos normalmente utilizados para poucas medições. Isto porque não há a possibilidade de multiplexação somente utilizando DAQ, apenas com a incorporação de outro dispositivo especificamente para esta função. Além disso, não são projetadas para a utilização em ambientes industriais e, por este motivo, não possuem *chassis*, deixando as conexões expostas ao ambiente.

O padrão VXI foi introduzido em 1985 pelas empresas *Hewlett Packard*, *Tektronix*, *Wavetek*, *Racal-Dana* e *Colorado Data Systems* [25]. Consiste em um aprimoramento do barramento VME permitindo a sincronização entre instrumentos. A velocidade de transmissão era inicialmente de 40 Mb/s mas hoje conta com 160 Mb/s e suporta até 256 dispositivos [23], [24]. Apesar de ser uma arquitetura desenvolvida para a área de medição, o VXI foi desconsiderado, pois foi concebida para ser utilizada em grandes projetos, devido à enorme quantidade de canais de medição que dispõe, o que acaba tornando-a cara e volumosa.

Mesmo dominando o chão de fábrica de muitas empresas, os CLP não foram desenvolvidos para a área de medição e sim para controle de processos. Por esse motivo, não possuem as características necessárias para um sistema de medição, deixando a desejar com relação às informações metrológicas, à capacidade de processamento, armazenamento e recursos limitados.

Para as demais arquiteturas descritas no capítulo anterior (instrumentos dedicados, PAC, PXI), alguns representantes foram escolhidos para uma análise profunda de suas características metrológicas e suas vantagens e desvantagens, do ponto de vista dos requisitos do projeto.

5.2.1 Instrumento dedicado

Os instrumentos escolhidos foram o 34970A [47] e 34980A [48] da *Agilent Technologies*.

5.2.1.1 Agilent 34970A

Este instrumento é uma unidade de aquisição/multiplexação baseado em um multímetro de 6 ½ dígitos (22 bits de resolução) e frequência de aquisição de até 250 Hz. Pelo fato de ser um multímetro, é capaz de medir temperatura (termopares, RTD e termistores), tensão ca e cc, corrente cc e cc, frequência e resistência (a 2 e 4 fios).

Possui 3 *slots* e 8 módulos de multiplexação e controle, software próprio e *drivers* para LabVIEW, custo relativamente baixo se comparado com as demais opções. É possível comprá-lo sem o multímetro, funcionando só como unidade multiplexadora.

É possível usar entre 20 e 120 canais configuráveis independentemente, atuadores, entradas e saídas analógicas e digitais. É compacto, modular, possui interfaces de comunicação GPIB e RS-232, alarme por canal onde é possível estabelecer limites superiores e inferiores e, caso a entrada ultrapasse esses valores, um alarme é emitido. Possui memória não volátil para armazenamento de dados e isolamento óptico de até 300 V nas entradas.

As desvantagens são as poucas e ultrapassadas interfaces de comunicação, chaveamento por relé mecânico, limitada quantidade e variedade de módulos bem como de *slots*, não possui processamento, baixa capacidade de armazenamento, baixa frequência de aquisição e o fato de ser uma solução proprietária. As vantagens são seu volume reduzido, preço acessível, isolamento e baixa incerteza. A figura 24 mostra o instrumento *Agilent 34970A*.



Figura 24: Agilent 34970A [47]

5.2.1.2 Agilent 34980A

Este instrumento é uma unidade de aquisição/chaveamento baseado em um multímetro de 6 ½ dígitos (22 bits de resolução) e frequência de aquisição de até 3 kHz. Pelo fato de ser um multímetro, é capaz de medir temperatura (termopares, RTD e termistores), tensão ca e cc, corrente ca e cc, frequência e resistência (a 2 e 4 fios). Possui 8 *slots* e 19 módulos de multiplexação e controle, *software* próprio com *drivers* para LabVIEW, custo superior ao 34970A mas, ainda assim, relativamente baixo se comparado com as demais alternativas. É possível comprá-lo sem o multímetro, funcionando somente como unidade multiplexadora.

É possível usar até 560 canais a dois fios configuráveis independentemente, atuadores, entradas e saídas analógicas e digitais. É compacto, modular e possui interfaces de comunicação *ethernet*, GPIB e USB, alarme por canal onde é possível estabelecer limites superiores e inferiores e, caso a entrada ultrapasse estes valores, um alarme é emitido. Possui memória não volátil para armazenamento de dados e isolamento óptico de até 300 V nas entradas. Apenas um módulo usa chave semicondutora, porém, com isolamento de 80 V apenas.

As vantagens são as modernas interfaces de comunicação, razoável variedade de módulos e quantidade de *slots*, chaveamento por chave semicondutora, volume reduzido, preço acessível, isolamento e baixa incerteza. As desvantagens são não possuir processamento, ter baixa capacidade de armazenamento, baixa frequência de aquisição e o fato de ser uma solução proprietária. A figura 25 mostra o instrumento *Agilent 34980A*.



Figura 25: Agilent 34980A [48]

5.2.2 Programmable Automation Controllers (PAC)

Os instrumentos escolhidos foram o CompactRIO e Compact FieldPoint da *National Instruments*.

5.2.2.1 CompactRIO

O CompactRIO é um sistema com características para controle de processos e para aquisição de sinais. Faz uso da tecnologia FPGA que consiste em um *chip* reconfigurável conectado aos módulos de entrada e saída em topologia estrela, capaz de executar códigos sem a necessidade de utilização da CPU. É capaz de rodar *software* embarcado operando em tempo real.

Como vantagens do CompactRIO têm-se a possibilidade de *hot swap*, possui variedade razoável de módulos (entradas e saídas analógicas e digitais, relé, contador,

timer e comunicação CAN) e de *slots*, é compacto, boas características metrológicas, alta frequência de aquisição e atualização (800 kHz e 100 kHz, respectivamente), capacidade de executar algoritmos complexos e possibilidade de se controlar remotamente através de placa PCI ou PXI até 4 *chassis* com capacidade para 4 módulos cada.

As desvantagens superam as vantagens. Os módulos possuem (em geral) 4 canais e o *chassis* suporta apenas 8 módulos. Para o projeto em questão, seriam necessários 13 módulos divididos em dois *chassis*, mas não é possível usar um *chassis* de extensão, sendo necessário adquirir outro controlador. Não possui módulo para condicionamento de sinais (os módulos de entrada analógica têm faixa de medição de no mínimo ± 10 V), o módulo para medição de temperatura com RTD possui faixa apenas 4 entradas, possui isolamento de apenas 250 V, dispõe de somente duas interfaces (LAN e RS-232) e possui capacidade de processamento (200 MHz e 512 MB de memória RAM) e armazenamento (64 MB) limitadas. A figura 26 mostra o

Como desvantagens, têm-se a necessidade de utilização de uma interface de rede de expansão para a aplicação em questão, variedade limitada de módulos (como entradas e saídas analógicas e digitais, relé, contador, gerador de pulsos, PWM e *encoder*), módulos de saída analógica com no máximo 12 bits, possui limitadas capacidades de processamento (188 MHz e 128 MB de memória RAM) e armazenamento (128 MB – é possível usar cartão de memória externo de até 512 MB), baixa frequência de aquisição e atualização (10 kHz e 200 Hz, respectivamente). A figura 27 mostra o instrumento CompactFieldPoint.



Figura 27: Compact FieldPoint

5.2.3 PXI

O padrão PXI nasceu em 1997 através da *National Instruments* e logo tornou-se um padrão aberto sendo gerido pela *PXI Systems Alliance*, um grupo formado por mais de 68 empresas e que fornecem mais de 1150 soluções de produtos baseados neste padrão [49]. O PXI é consequência de uma série de evoluções que começou com o PCI, no início da década de 90. O PCI deu origem ao *CompactPCI* (cPCI), que combina as características elétricas do PCI com as características mecânicas da *Eurocard* [50]. O PXI é uma extensão do cPCI para a instrumentação e guarda interoperabilidade de modo que qualquer placa cPCI pode ser usado num sistema PXI e vice-versa [51]. As vantagens do PXI são a alta velocidade de transferência (132 Mb/s), recurso *plug & play*, grande quantidade de *hardware* e *software* disponíveis, *trigger* e sincronização [40],[52].

Há menos de uma década a Intel desenvolveu e lançou o *PCI Express* para contornar as limitações de velocidade do PCI e, já a partir de 2004, foi incorporado aos PC. Ao invés de dividir a banda entre os dispositivos como faz o PCI, cada dispositivo tem seu próprio barramento, podendo transmitir dados na forma serial a mais de 2,5 Gb/s [53]. Essa tecnologia está começando a ser introduzida no PXI sendo denominado *PXI Express* e logo substituirão os atuais modelos PXI.

Por ser derivado do barramento PCI, herda todas as suas vantagens. É um sistema modular, podendo o *chassis* ser controlado através de um controlador embarcado ou externamente via PC, ou ainda, cascatear vários *chassis*. Pode rodar vários sistemas operacionais. Por se tratar de um consórcio dos quais participam várias empresas, foram analisadas as características gerais dos produtos oferecidos pelos maiores fabricantes.

As vantagens do PXI são a alta capacidade de processamento (*Pentium IV* com 2,2 GHz e 2 GB de memória RAM) e armazenamento (80 GB), vários tipos de interface de comunicação padrão no controlador (RS-232, paralela, USB, GPIB e LAN), fácil manutenção, *chassis* com até 17 *slots* disponível na forma de *rack*, grande quantidade e variedade de módulos (entradas e saídas analógicas e digitais, contador, *timer*, DAQ, multímetro, análise dinâmica, osciloscópio, aquisição de imagem, interfaces de comunicação, controle de movimento, rádio freqüência, geradores de sinal, relé, sincronização e multiplexação) e arquitetura não proprietária.

Como desvantagens têm-se o alto preço (porém menor que o VXI) e, dentre os fabricantes pesquisados, inexistência de proteção de até 300 V, de isolamento e de módulos com multiplexação através de chaves semicondutoras. A figura 28 mostra exemplos de dois *chassis* PXI.

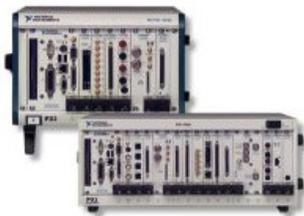


Figura 28: PXI

5.3 ARQUITETURA PROPOSTA

Diante das justificativas apresentadas no tópico anterior, a arquitetura PXI se mostra como a que melhor preenche os requisitos da bancada de ensaio de compressores:

- por ser uma arquitetura desenvolvida para a área de medição, possui baixa incerteza de medição capaz de atender as exigências das normas;

- boa especificação metrológica garantindo o comportamento nas condições praticadas e por no mínimo 1 ano;
- é uma arquitetura não proprietária, modular e com grande variedade de módulos e de *slots* disponíveis de acordo com a necessidade da bancada;
- possibilita a calibração fora da bancada caso o laboratório de metrologia também possua um *chassis* PXI;
- é compatível com o LabVIEW;
- atende os requisitos de normas de segurança;
- possibilita a inserção manual de dados através de teclado;
- possui a maior capacidade de processamento e armazenamento de todas as arquiteturas analisadas;
- possui grande flexibilidade de comunicação com várias interfaces modernas;
- frequência de aquisição elevada.

Infelizmente não atende aos requisitos de isolamento de 300 V e não possui chaveamento através de chaves semicondutoras. Porém, essas desvantagens podem ser compensadas com a escolha adequada de um sistema de condicionamento de sinais.

Uma alternativa interessante para o condicionamento de sinais é o SCXI. O SCXI foi desenvolvido pela *National Instruments* em 1992 e consiste em um sistema modular capaz de multiplexar e condicionar diversos tipos de sinais analógicos de uma grande variedade de transdutores diferentes. A motivação é a existência de um *chassis* híbrido da *National Instruments* que suporta vários módulos PXI e SCXI. A figura 29 mostra o *chassis* híbrido PXI/SCXI.



Figura 29: *Chassis* híbrido PXI/SCXI

As vantagens são a modularidade, pois possui vários módulos de tratamento analógico, alguns módulos de entrada e saída digital e de multiplexação, com a possibilidade de se configurar sistemas desde poucos canais até milhares de canais. Pode ser controlado por um laptop (PCMCIA), PC (PCI) ou PXI.

5.4.2 Módulo PXI multímetro

Este módulo corresponde a um multímetro de 7 ½ dígitos e será usado para as medições de temperatura em conjunto com o módulo SCXI de multiplexação. Este módulo permite a medição de resistência a 4 fios através de dois canais: um para medição de tensão e outro para injeção de corrente cc. Estes dois canais serão roteados através do módulo de multiplexação do SCXI.

5.4.3 Módulo SCXI de isolamento

Este módulo SCXI é responsável pela isolamento do sistema de aquisição com relação às grandezas elétricas. Cada canal possui isolamento de modo comum de 300 V entre canais ou entre canal e terra, 8 canais diferenciais que podem funcionar em modo multiplexado, chaveando os canais para uma única entrada de uma DAQ ou em modo paralelo, aumentando a velocidade de aquisição.

Há um amplificador de isolamento programável por canal, na qual é possível programar via *software* filtros passa-baixa e até 10 ganhos diferentes por canal. Pode-se realizar uma autocalibração através do aterramento das entradas dos amplificadores, armazenando na memória as constantes de ajuste de cada canal e, através de *software*, realizar a correção das medições.

Todos os canais deste módulo serão utilizados para a medição das grandezas elétricas, dedicando um canal para medição de: tensão ca, corrente ca com faixa de medição menor, corrente ca com faixa de medição maior, tensão cc, corrente cc com faixa de medição menor, corrente cc com faixa de medição maior, tensão e corrente cc para a medição de resistência de enrolamento.

Como a frequência de medição é um problema para a medição de potência ca, a utilização deste módulo deverá ser no modo paralelo, garantindo a transferência imediata do sinal da entrada para a saída, o que não ocorreria se fosse utilizado no modo multiplexado.

5.4.4 Módulo PXI DAQ

Este módulo fará a conversão dos sinais analógicos para digitais. Trata-se de um módulo de 18 bits de resolução, 16 canais c- ã co

medição na forma *single ended*, frequência de aquisição de 500 kHz multicanal, 7 faixas de medição programáveis por canal, assim como os filtros passa-baixa.

Os sinais que precisam ser digitalizados são: 8 sinais referentes às grandezas elétricas, 1 sinal de pressão e 1 sinal de vazão. Além dos canais de entrada analógica, este módulo possui 48 canais de entrada e saída digitais e que serão utilizados para vários comandos como, por exemplo, liga/desliga compressor, liga/desliga circuito auxiliar, liga/desliga aquecimento etc.

5.4.5 Módulo PXI CAN

Este é um módulo de interface CAN que possui duas portas de comunicação. Uma delas será utilizada para a comunicação com todos os transmissores de pressão CAN dispostos no mesmo barramento e, a outra porta, para comunicação com o *encoder* que será utilizado para o posicionamento do motor da válvula de descarga.

5.4.6 Módulo PXI RS-485

Assim como o módulo CAN, o módulo RS-485 será utilizado para a comunicação do transmissor de pressão digital RS-485 e para a comunicação do transmissor de vazão digital RS-485. Este módulo possui quatro portas de comunicação, onde apenas duas delas serão usadas, o que permite maior flexibilidade para expansão do sistema.

5.4.7 Módulo PXI de saídas analógicas

Este módulo possui 8 canais de saídas analógicas que podem ser utilizados para se atuar no processo. Conta também com 8 canais de entradas e saídas digitais que podem ser utilizados para comandos do tipo liga/desliga.

Dos 8 canais de saídas analógicas, será utilizado um para atuar na pressão de sucção do compressor, através de uma válvula solenóide controlada via comando analógico de (0 a 10) V, que é utilizada para restringir a vazão de fluxo refrigerante. Outros canais serão utilizados para controle da água de condensação, controle da água de sucção, controle da água do *box* e controle da ventilação do *box*.

A figura 31 apresenta o esquemático de todas as entradas e saídas mapeadas.

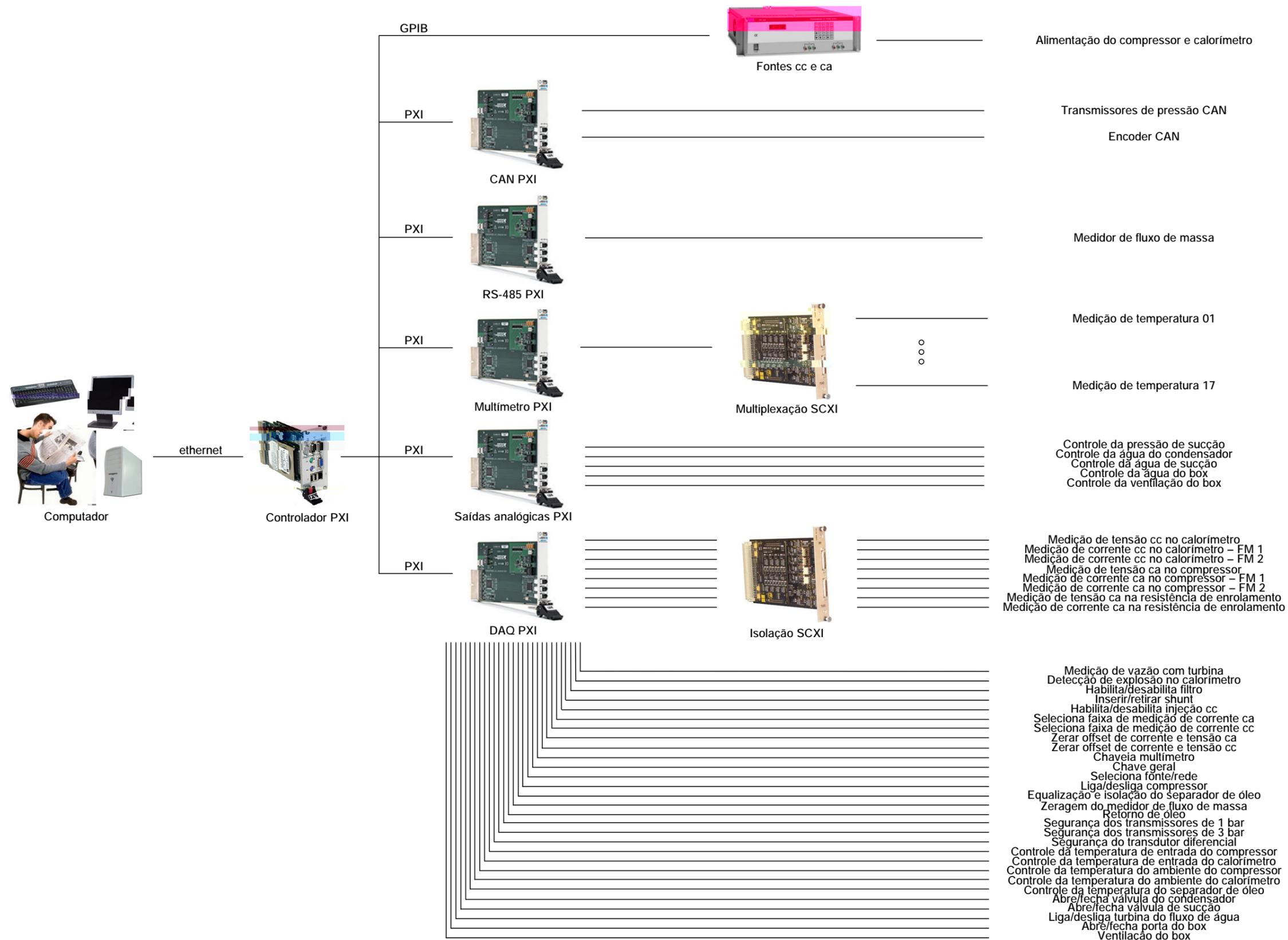


Figura 31: Esquemático

5.5 INTEGRAÇÃO DE VÁRIAS BANCADAS DE ENSAIO

Como outras bancadas de ensaio de desempenho de compressores serão construídas futuramente, existe a necessidade de integração para que as várias bancadas sejam monitoradas utilizando-se apenas um PC supervisor. Esta idéia evita a aquisição de um PC por bancada, centralizando as informações e conseqüentemente possibilitando que um operador administre mais de uma bancada.

Cada bancada é alimentada através de um relé de pulso. Este tipo de relé é acionado por um comando na forma de pulso e mantém seus contatos fechados durante determinado período de tempo. Geralmente é possível ajustar este período. Após o término desse período, os contatos abrem e o painel será desenergizado. Este relé de pulso é controlado pelo PXI/SCXI, o que permite que o controlador possa desligar e ligar o painel caso haja necessidade. Para mantê-lo energizado, o controlador deve emitir pulsos periódicos para o relé. Caso o sistema PXI/SCXI trave, as pressões no circuito de refrigeração podem aumentar comprometendo a segurança do equipamento e do operador, e então, automaticamente o painel será desenergizado pela ausência de pulsos.

O sistema PXI/SCXI também é alimentado através de um relé de pulso, porém, controlado pelo PC. Para isto, uma placa PCI de saídas digitais deverá ser instalada no PC. Este relé serve para reinicializar o PXI/SCXI assim que for detectado seu travamento. Antes de cada relé de pulso, há um botão de emergência no qual o operador pode acionar desenergizando o controlador e a bancada.

Caso ocorra do computador em que o *software* supervisor estiver rodando travar, o sistema PXI/SCXI deve ser capaz de continuar o ensaio, armazenando localmente os seus dados e, assim que o computador for reinicializado pelo operador, reestabelecer a conexão automaticamente e repassar os dados para o sistema supervisor.

Em ambos os casos, tanto a bancada quanto o controlador podem ser reinicializados pelo usuário através do PC supervisor. A figura 32 mostra o esquemático da integração das bancadas. As linhas vermelhas (tracejadas) correspondem à alimentação dos equipamentos enquanto que, as linhas azuis (contínuas), correspondem a sinais de comando.

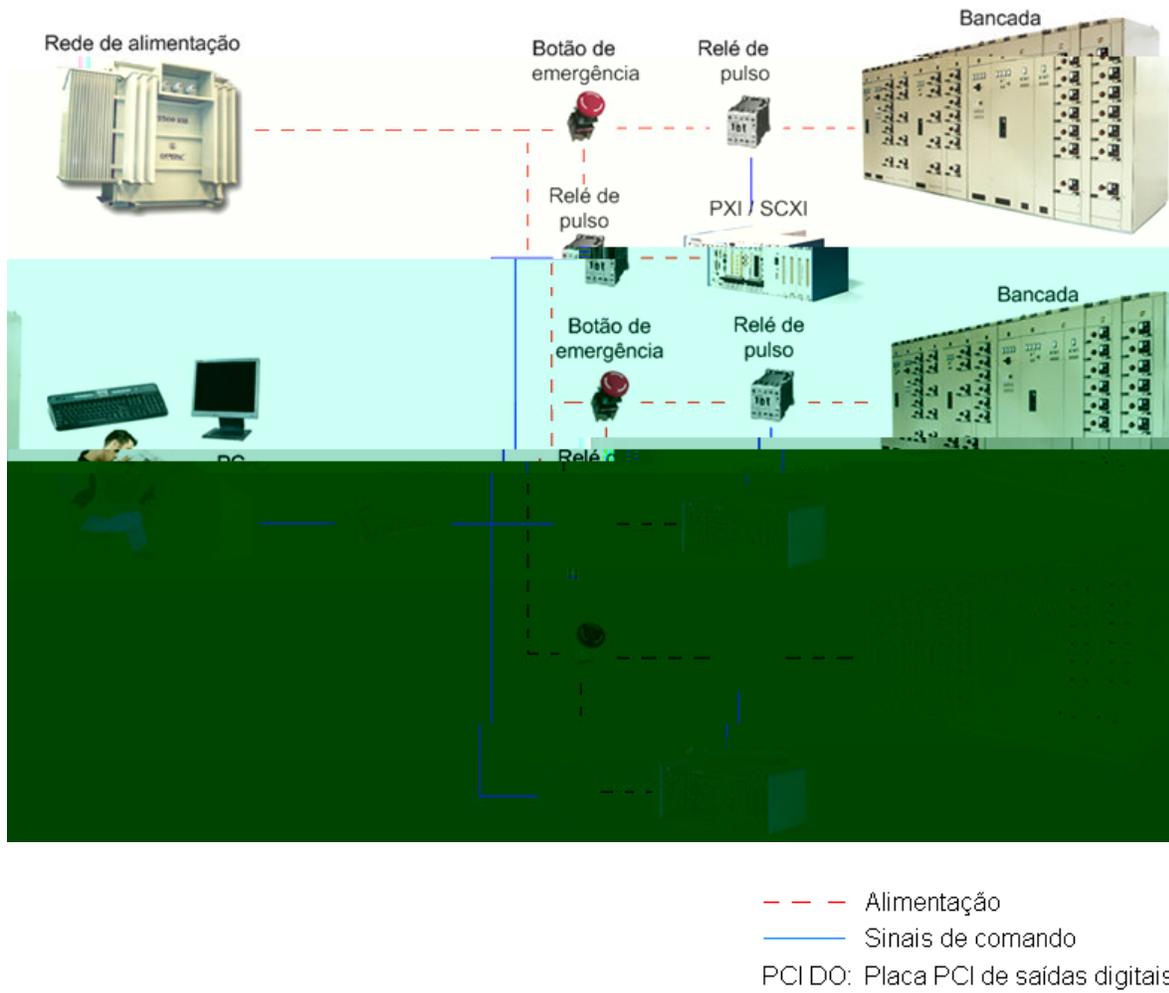


Figura 32: Interligação de várias bancadas de ensaio

6 AVALIAÇÃO DAS INCERTEZAS DE MEDIÇÃO

Poletto [45] avaliou a incerteza da bancada inicial, que foi a primeira bancada utilizada pelo Labmetro, apenas para a seguinte condição de operação: (-23,3 e +54,4) °C, respectivamente temperatura de condensação e evaporação.

Neste trabalho, a avaliação das incertezas da bancada inicial é estendida para outras duas condições de ensaio: (-35 e +65) °C e (-5 e +45) °C. Além disso, é avaliada também a incerteza da nova bancada nessas três condições de operação, para efeito de comparação.

Para isso, o método das derivadas parciais estabelecida pelo ISO-GUM [3] é utilizado em conjunto com o método numérico Monte Carlo [2]. Para cada cadeia de medição (temperatura, pressão, fluxo de massa e grandezas elétricas), é utilizado o método tradicional de avaliação de incertezas - ISO-GUM. Para obtenção da incerteza do coeficiente de performance (COP), capacidade de refrigeração e consumo de potência, é utilizado o método numérico Monte Carlo [54], com 250 mil iterações, de acordo com o método C da norma ISO-917 [43].

Para que se pudesse confrontar os resultados, na simulação de Monte Carlo, tanto o fator de perda quanto a incerteza oriunda do controle da pressão de sucção foram eliminados.

Na bancada inicial, o fator de perda era elevado [45]. Também a sua incerteza era elevada, já que os instrumentos de medição empregados na sua determinação apresentavam erros máximos elevados. Em contrapartida, a diferença de temperatura entre a temperatura ambiente do calorímetro e sua temperatura superficial era pequena, reduzindo a influência do fator de perda. Após estudos baseados na bancada inicial, o calorímetro foi modificado e seus valores levantados por Poletto [45]. Essa nova versão do calorímetro possuía baixa incerteza, porém grande diferencial de temperatura entre a temperatura superficial e sua temperatura ambiente, resultando numa grande incerteza na capacidade. Como o calorímetro não faz parte do escopo

deste trabalho foi eliminada a sua influência na composição da incerteza da capacidade.

O controle da pressão de sucção da bancada inicial era realizado manualmente e a sua contribuição na composição da incerteza foi avaliada por Poletto [45]. Para a bancada proposta, o controle da pressão de sucção será automático e não é possível quantificá-lo previamente. O que se pode afirmar é que, devido a sua automação e à superior performance da arquitetura proposta em relação à arquitetura inicial, a componente da incerteza devida ao controle da pressão de sucção será menor.

6.1 AVALIAÇÃO DA INCERTEZA DA BANCADA INICIAL

6.1.1 Medições de potência

De acordo com Poletto [45], a incerteza nas medições de potência, tanto ca quanto cc, podem ser obtidas através da equação 8.

$$U(P) = \sqrt{(0,0022.V_{medido})^2 + (0,0025.FM)^2} \quad (8)$$

onde: $U(P)$: é a incerteza expandida da potência;

V_{medido} : é o valor medido [W];

FM : é a faixa de medição [W].

A faixa de medição é de (0 a 1000) W para o calorímetro e compressores alimentados em 220 V e de (0 a 500) W para compressores alimentados em 110 V.

6.1.2 Medições de temperatura

Segundo Poletto [45], a incerteza nas medições de temperatura pode ser obtidas através da equação 9.

$$U(T) = \sqrt{1 + (0,001.V_{medido})^2} \quad (9)$$

onde: $U(T)$: é a incerteza expandida da temperatura;

V_{medido} : é o valor medido [°C].

6.1.3 Medições de pressão

De acordo com Poletto [45], a incerteza expandida nas medições de pressão pode ser obtidas através da equação 10. A incerteza do controle está sendo desconsiderada.

$$U(p) = \sqrt{(0,0029.V_{medido})^2 + (0,0018.FM)^2 + U(controle)^2} \quad (10)$$

onde: $U(p)$: é a incerteza expandida da pressão;

V_{medido} : é o valor medido [bar];

FM : é a faixa de medição [bar];

$U(controle)$: é a incerteza expandida do controle.

6.1.4 Incerteza da bancada inicial

Para a análise de Monte Carlo, foram utilizados os seguintes valores para cada condição de ensaio mostrados na tabela 3.

Tabela 3: Valores utilizados para as condições de ensaio

Variável	(-23,3 e +54,4) °C	(-35 e +65) °C	(-5 e +45) °C	Unidade
Potência no calorímetro	249,0	77,1	638,6	W
Temperatura ambiente do calorímetro	32,2	32,2	32,2	°C
Temperatura superficial do calorímetro	32,2	32,2	32,2	°C
Pressão de sucção	1,15	0,66	2,43	bar
Temperatura de entrada do compressor	32,2	32,2	32,2	°C
Pressão de descarga	14,70	18,90	11,60	bar
Fluxo de massa ¹	1,34	0,41	3,48	g/s
Potência no compressor	141,0	84,2	222,3	W
Temperatura de saída do calorímetro	32,2	32,2	32,2	°C
Pressão de saída do calorímetro	1,15	0,66	2,43	bar
Temperatura de entrada do calorímetro	25	25	25	°C
Pressão de entrada do calorímetro	8	8	8	bar

¹ Utilizado somente na bancada proposta

As incertezas de medição para as três condições de ensaio podem ser visualizadas nas tabelas 4, 5 e 6. As tabelas apresentam o valor central de cada variável, os limites inferiores e superiores, e a incerteza com a sua respectiva probabilidade de abrangência. As figuras 33 a 41 trazem os histogramas das variáveis analisadas via Monte Carlo.

Tabela 4: Resultados obtidos através da avaliação por Monte Carlo para a bancada inicial na condição (-35 e +65) °C

Variável	Valor central	Lim. Inf.	Lim. Sup.	Incerteza %	Conf.	Unid.
Capacidade	53,15	50,96	55,43	4,20	95%	W
Consumo	84,20	82,95	85,35	1,43	95%	W
COP	0,63	0,60	0,66	4,58	95%	-

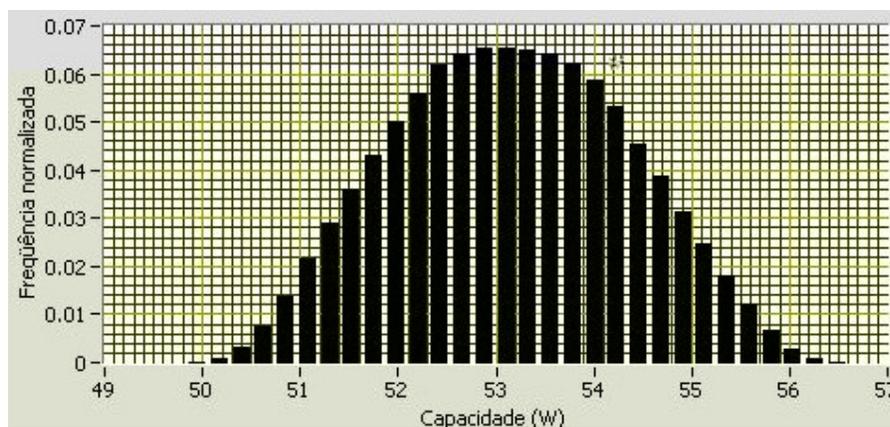


Figura 33: Histograma da capacidade de refrigeração da bancada inicial na condição (-35 e +65) °C

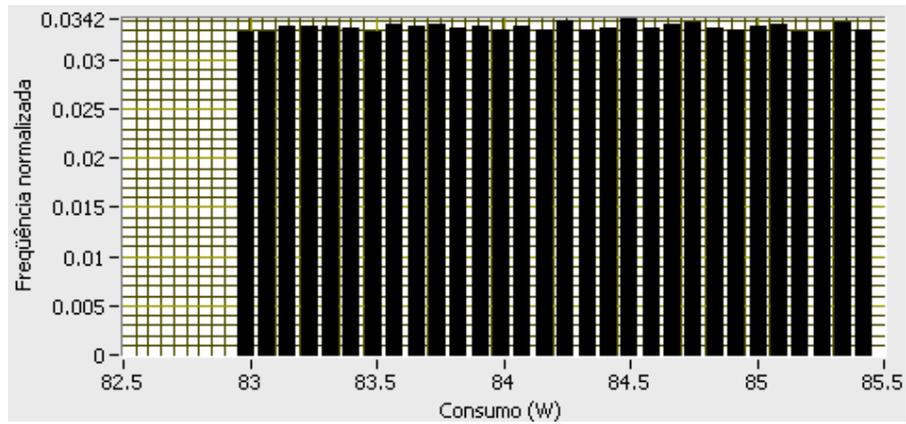


Figura 34: Histograma do consumo de potência da bancada inicial na condição (-35 e +65) °C

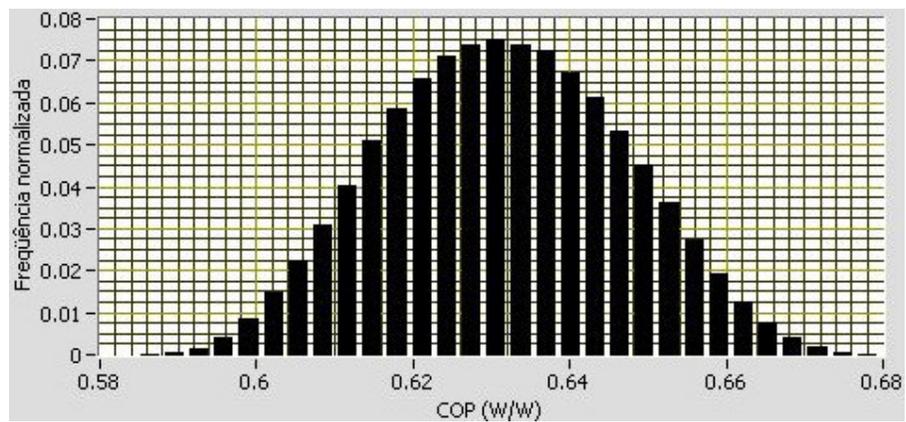


Figura 35: Histograma do coeficiente de performance da bancada inicial na condição (-35 e +65) °C

Tabela 5: Resultados obtidos através da avaliação por Monte Carlo para a bancada inicial na condição (-23,3 e +54,4) °C

Variável	Valor central	Lim. Inf.	Lim. Sup.	Incerteza %	Conf.	Unid.
Capacidade	193,191	189,42	197,15	2,00	95%	W
Consumo	141,00	139,72	142,16	0,87	95%	W
COP	1,37	1,34	1,40	2,26	95%	-

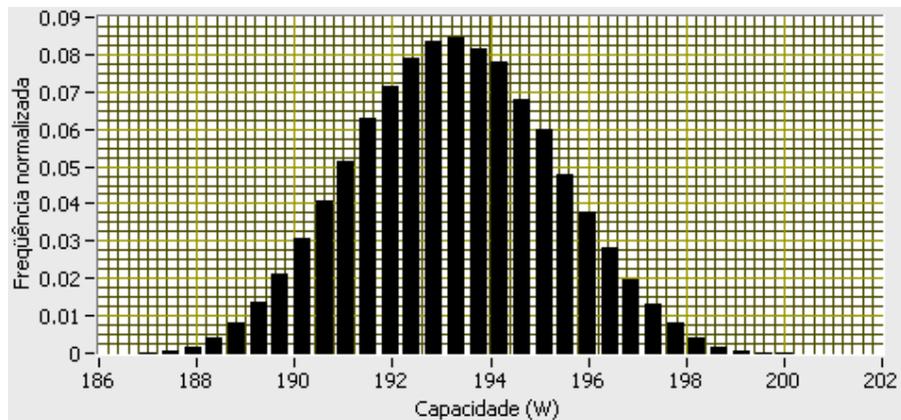


Figura 36: Histograma da capacidade de refrigeração da bancada inicial na condição (-23,3 e +54,4) °C

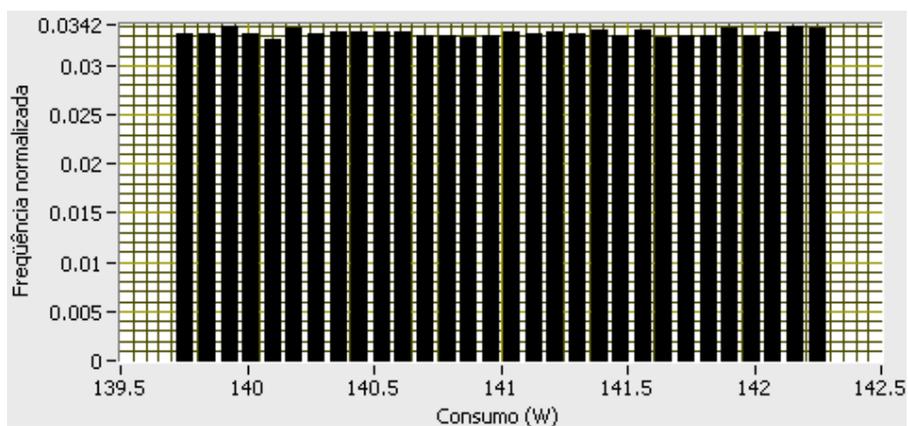


Figura 37: Histograma do consumo de potência da bancada inicial na condição (-23,3 e +54,4) °C

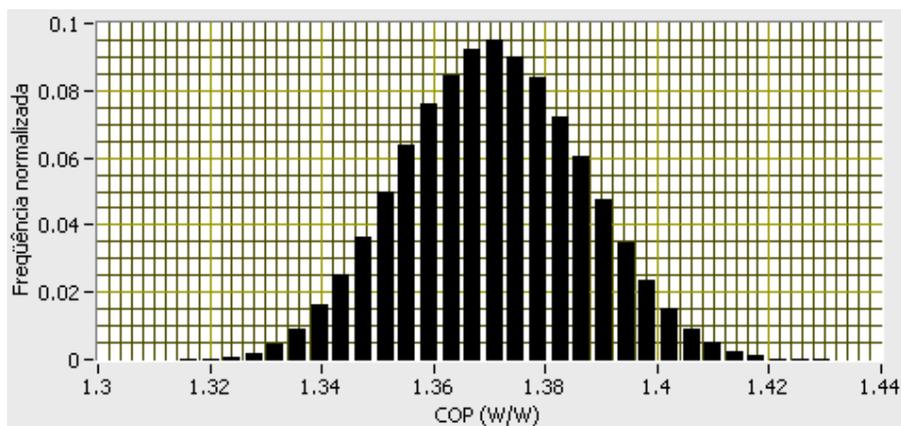


Figura 38: Histograma do coeficiente de performance da bancada inicial na condição (-23,3 e +54,4) °C

Tabela 6: Resultados obtidos através da avaliação por Monte Carlo para a bancada inicial na condição (-5 e +45) °C

Variável	Valor central	Lim. Inf.	Lim. Sup.	Incerteza %	Conf.	Unid.
Capacidade	541,78	534,43	549,20	1,36	95%	W
Consumo	222,30	221,06	223,61	0,57	95%	W
COP	2,44	2,40	2,47	1,53	95%	-

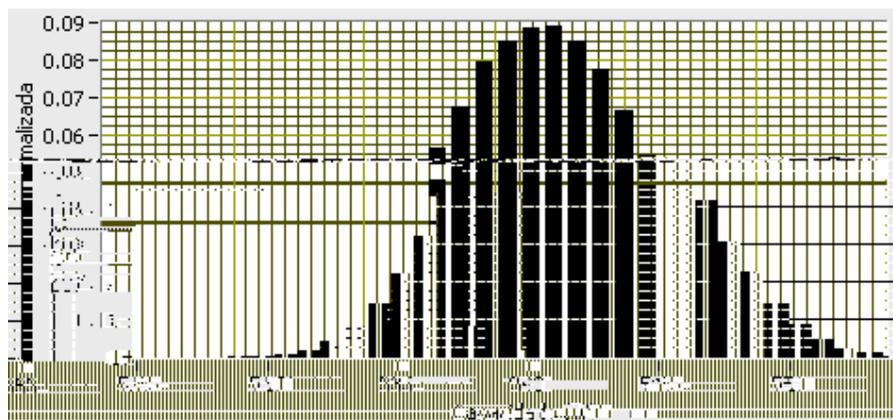


Figura 39: Histograma da capacidade de refrigeração da bancada inicial na condição (-5 e +45) °C

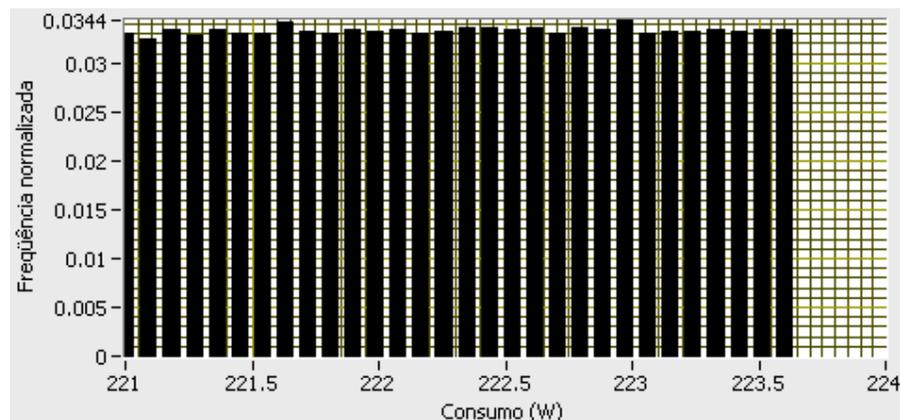


Figura 40: Histograma do consumo de potência da bancada inicial na condição (-5 e +45) °C

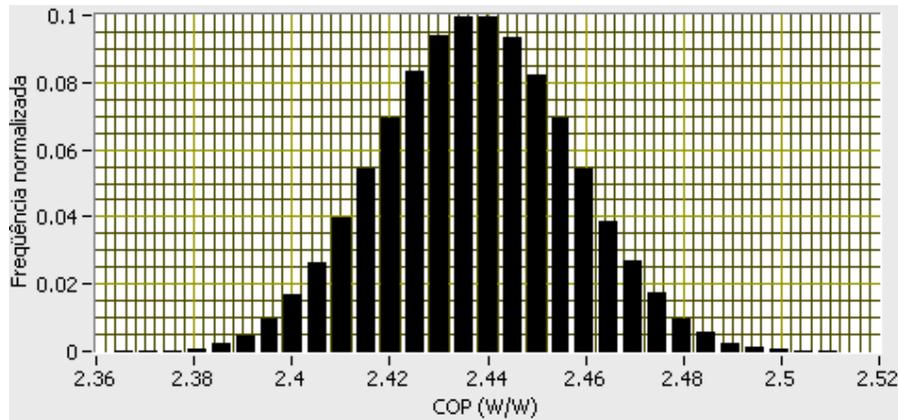


Figura 41: Histograma do coeficiente de performance da bancada inicial na condição (-5 e +45) °C

6.2 AVALIAÇÃO DA INCERTEZA DA BANCADA NA CONFIGURAÇÃO PROPOSTA NESTE TRABALHO

6.2.1 Medições de grandezas elétricas

A incerteza das grandezas elétricas é obtida a partir das incertezas do transdutor utilizado (divisor resistivo ou *shunt*), do módulo de isolamento e do módulo DAQ, como pode ser visto na equação 11. No caso da potência, deve-se utilizar a equação 12. Com a frequência de aquisição considerada, a parcela de incerteza devida à não simultaneidade é desprezível [6].

$$u(\text{tensão ou corrente}) = \sqrt{u(\text{transdutor})^2 + u(\text{isolação})^2 + u(\text{DAQ})^2} \quad (11)$$

$$u(\text{potência}) = \sqrt{I_{\text{medida}}^2 \cdot u(\text{tensão})^2 + V_{\text{medida}}^2 \cdot u(\text{corrente})^2} \quad (12)$$

onde: $u(\text{tensão ou corrente})$: é a incerteza combinada das grandezas elétricas em valores relativos;

$u(\text{transdutor})$: é a componente de incerteza inerente ao transdutor (*shunt* ou divisor resistivo) em valores relativos;

$u(\text{isolação})$: é a componente de incerteza inerente ao módulo de isolamento em valores relativos;

$u(DAQ)$: é a componente de incerteza inerente ao módulo DAQ em valores relativos;

$u(\text{potência})$: é a incerteza padrão da potência;

I_{medida} : é a corrente medida no *shunt*;

$u(\text{tensão})$: é a incerteza padrão da tensão;

V_{medida} : é a tensão medida no divisor resistivo;

$u(\text{corrente})$: é a incerteza padrão da corrente.

6.2.1.1 Componentes de incerteza inerentes ao transdutor

Para a medição de grandezas elétricas são utilizados resistores através de dois métodos de medição: divisor resistivo para a medição de tensão e *shunt* para a medição de corrente. As seguintes fontes de incerteza estão sendo consideradas:

- Incerteza de calibração: somente será possível conhecê-la após definido o procedimento e os equipamentos empregados na calibração. O valor de 0,02% será usado como referência por estar compatível com os níveis usuais de incerteza na medição de resistência em laboratório e até em campo.
- Estabilidade no tempo: a estabilidade do *shunt* é de 0,05% (para 2000 h). A estabilidade do divisor resistivo é de 0,06% (para 10000 h).
-

As equações 13 e 14 podem ser usadas para se obter a incerteza combinada do divisor resistivo e do *shunt*, respectivamente.

$$u(\text{divisor}) = \sqrt{\frac{0,02\%}{\sqrt{3}}^2 + \frac{E}{\sqrt{3}}^2 + \frac{D.\Delta T}{\sqrt{3}}^2 + \frac{\sqrt{4.k.T.B.R}}{V}^2 + \frac{V - \frac{V.Z}{R+Z}}{V.\sqrt{3}}^2} \quad (13)$$

$$u(\text{shunt}) = \sqrt{\frac{0,02\%}{\sqrt{3}}^2 + \frac{E}{\sqrt{3}}^2 + \frac{D.\Delta T}{\sqrt{3}}^2 + \frac{\sqrt{4.k.T.B.R}}{V}^2} \quad (14)$$

onde: $u(\text{divisor})$: é a incerteza combinada do divisor resistivo em valores relativos;

$u(\text{shunt})$: é a incerteza combinada do *shunt* em valores relativos;

E : é a estabilidade no tempo;

D : é a deriva com a temperatura;

ΔT : é a variação de temperatura [°C];

K : é a constante de Boltzman, sendo $K = 1,3806503 \cdot 10^{-23}$ [J/K];

T : é a temperatura do resistor [K];

B : é a banda de frequência [Hz];

R : é o valor da resistência do transdutor [Ω];

V : é a tensão no resistor [V];

Z : é a impedância de entrada do módulo de isolamento [Ω].

6.2.1.2 Componentes de incerteza inerentes ao módulo de isolamento

As componentes de incerteza deste módulo são:

- Não linearidade: é fornecida pelo fabricante como sendo 0,02% da faixa de medição;
- *Offset*: o fabricante fornece o valor típico e o valor máximo. O valor máximo ainda é apresentado para 30 dias, 90 dias e para período indeterminado após a calibração. Existe a possibilidade de se fazer a correção desse valor a cada ensaio antes de partir o compressor, quando se tem tensão zero no divisor resistivo e *shunt*. Nesse caso, será utilizado

o valor $0,1 \cdot 10^{-3}$ V, que corresponde a um terço da deriva máxima para o período de 30 dias. Esse valor deve ser dividido pelo ganho utilizado no módulo de isolamento;

- Incerteza do ganho: é fornecido pelo fabricante como sendo 0,08% do valor medido;
- Deriva do *offset*: é apresentada como função do ganho do módulo de isolamento e da variação de temperatura em relação à temperatura de calibração;
- Deriva do ganho: é fornecida como função da variação de temperatura em relação à temperatura de calibração;
- Ruído: é fornecido pelo fabricante, devendo ser dividido pelo ganho do módulo de isolamento;
- Ajuste do *offset*: é a incerteza expandida de ajuste do *offset*. Foi assumida a incerteza expandida do módulo DAQ (equação 16) para a medição 0 V.

A incerteza combinada em valores relativos associada ao módulo de isolamento pode ser obtida através da equação 15.

$$u(isolação) = \sqrt{\frac{0,02\% \cdot FM^2}{V_{medido} \cdot \sqrt{3}} + \frac{0,1 \cdot 10^{-3}}{V_{medido} \cdot G_{total} \cdot \sqrt{3}} + \frac{0,08\%}{\sqrt{3}} + \frac{A_{offset}}{\sqrt{3}} + 20 + \frac{220}{G_{total}} \cdot \frac{10^{-6} \cdot \Delta T}{V_{medido} \cdot \sqrt{3}} + \frac{20 \cdot 10^{-6} \cdot \Delta T}{\sqrt{3}} + \frac{500 \cdot 10^{-6}}{V_{medido} \cdot G_{total} \cdot \sqrt{3}}^2} \quad (15)$$

onde: $u(isolação)$: é a incerteza combinada do módulo de isolamento em valores relativos;

FM : é a faixa de medição [V];

G_{total} : é o ganho;

V_{medido} : é o valor medido [V];

A_{offset} : o valor $3,46 \cdot 10^{-6}$ está sendo usado [V];

ΔT : é a variação de temperatura [°C].

6.2.1.3 Componentes de incerteza inerentes ao módulo DAQ

Possui quatro componentes: ganho, *offset*, ruído e resolução. O erro de ganho é subdividido em: erro de ganho propriamente dito (“residual”), erro devido à variação de temperatura desde a última calibração interna (“tempco”) e erro devido à variação de temperatura desde a última calibração externa (“reference”). O valor da variação de temperatura interna desde a última calibração interna utilizado foi 1 °C e o valor da variação de temperatura externa desde a última calibração utilizado foi 20 °C.

O erro de *offset* é dividido em: erro de *offset* propriamente dito (“residual”), erro devido à variação de temperatura desde a última calibração interna (“tempco”) e erro de não linearidade. O valor da variação de temperatura interna desde a última calibração utilizado foi 1 °C e o valor da variação de temperatura externa desde a última calibração utilizado foi 20 °C. A faixa de medição utilizada foi de 10 V.

O ruído é fornecido na forma padrão (1) e é dividido pelo número de medições realizadas. A resolução para este módulo DAQ de 18 bits para a faixa de medição de 10 V é $3,81 \cdot 10^{-5}$ V.

A parcela da incerteza combinada em valores relativos imputável ao módulo DAQ pode ser obtido através da equação 16.

$$u(DAQ) = \sqrt{\frac{residual_{ganho}^2}{\sqrt{3}} + \frac{tempco_{ganho} \cdot \Delta T_{int}^2}{\sqrt{3}} + \frac{reference \cdot \Delta T_{ext}^2}{\sqrt{3}} + \frac{residual_{offset} \cdot FM^2}{V_{medido} \cdot \sqrt{3}} + \frac{tempco_{offset} \cdot \Delta T_{int} \cdot FM^2}{V_{medido} \cdot \sqrt{3}} + \frac{INL \cdot FM^2}{V_{medido} \cdot \sqrt{3}} + \frac{noise^2}{V_{medido} \cdot \sqrt{n}} + \frac{resol^2}{V_{medido} \cdot \sqrt{3}}} \quad (16)$$

onde: $u(DAQ)$: é a incerteza combinada do módulo DAQ em valores relativos;

$residual_{ganho}$: é o erro de ganho;

$tempco_{ganho}$: é a máxima deriva do ganho devido à variação de temperatura desde a última calibração interna;

ΔT_{int} : é a variação de temperatura interna [°C];

$reference$: é o erro de ganho devido à variação de temperatura desde a última calibração externa;

ΔT_{ext} : é a variação de temperatura externa [°C];

V_{medido} : é o valor medido [V];

$residual_{offset}$: é o máximo erro residual após compensação do *offset*;

$tempco_{offset}$: é a máxima deriva do *offset* devido à variação de temperatura desde a última calibração interna;

INL : é a não linearidade integral;

FM : é a faixa de medição [V];

$noise$: é o ruído;

$resol$: é a resolução;

n : é o número de medições (foi adotado $n=100$ que é o praticado atualmente no Labmetro).

6.2.2 Medições de temperatura

A incerteza total das medições de temperatura é composta por uma grande gama de fontes de incertezas [55]. As significativas relativas à instrumentação dizem respeito ao transdutor (Pt100), ao multímetro (DMM) e à multiplexação (MUX), e a combinação delas pode ser obtida através da equação 17.

$$u(T) = \sqrt{\frac{U(Pt100)^2}{\sqrt{3}} + \frac{U(MUX)^2}{\sqrt{3}} + \frac{U(DMM)^2}{\sqrt{3}}} \quad (17)$$

onde: $u(T)$: incerteza padrão das medições de temperatura em valores relativos;

$U(Pt100)$: é o erro máximo do transdutor de temperatura Pt100;

$U(MUX)$: é a parcela de incerteza inerente ao módulo de multiplexação;

$U(DMM)$: é o erro máximo do módulo multímetro.

6.2.2.1 Componentes de incerteza inerentes ao transdutor

Os transdutores utilizados são do tipo Pt100, classe A, de 4 fios. Esses transdutores possuem erro máximo admissível de 0,15 °C em 0 °C. Esse valor sofre acréscimo de 0,002 °C para cada grau Celsius da temperatura medida [56]. A incerteza do Pt100 utilizado é dada pela equação 18 [57]:

$$U(Pt100) = \frac{0,15 + 0,002.T_{medida}}{T_{medida}} \quad (18)$$

onde: $U(Pt100)$: é o erro máximo relativo do transdutor de temperatura Pt100;

T_{medida} : é a temperatura medida [°C].

A relação que determina a temperatura com base na resistência do transdutor Pt100 está mostrada na equação 19. As constantes A, B e C dependem do grau de platina utilizado e são definidos em várias normas como DIN43760, American e ITS-90 [58], por exemplo. Os valores adotados aqui são os definidos pela norma NBR 13772 [57]. A constante C só deve ser utilizada para valores de temperatura menores que 0 °C. Para valores maiores que 0 °C, a constante C vale 0.

$$R = R_{0^{\circ}C} \cdot (1 + A.T + B.T^2 + C.(T - 100).T^3) \quad (19)$$

onde: R : é a resistência equivalente à temperatura do Pt100 [Ω];

$R_{0^{\circ}C}$: é a resistência do Pt100 a 0 °C [Ω];

A, B, C : $A = 3,90802 \cdot 10^{-3} [^{\circ}C^{-1}]$, $B = -5,802 \cdot 10^{-7} [^{\circ}C^{-2}]$ e $C = -4,27350 \cdot 10^{-12} [^{\circ}C^{-4}]$;

T : é a temperatura a que o Pt100 está submetido [°C].

6.2.2.2 Componentes de incerteza inerentes ao módulo de multiplexação

O multiplexador utilizado apresenta, para cada canal diferencial, uma tensão termoelétrica proveniente da união de materiais diferentes (efeito Seebeck), com valor menor que 25 μV para temperaturas de (0 a 25) °C e valor menor que 100 μV para temperaturas maiores que 25 °C. Para amenizar esse salto de 25 μV para 100 μV, assumiu-se que, a partir de 25 °C, a função seja uma reta que inicia em 25 μV e termina em 100 μV para a temperatura de 50 °C, que é a temperatura máxima de funcionamento deste módulo. Assim, para a temperatura de 30 °C (temperatura máxima em que a instrumentação deve se manter, segundo informações fornecidas pela empresa parceira deste trabalho), tem-se 40 μV, conforme equação 20. O efeito relativo ao canal de injeção de corrente pode ser considerada desprezível [59]. No canal de medição de tensão, esse efeito foi modelado como sendo uma fonte de tensão em série com a resistência do Pt100 [60], conforme mostrado na figura 42.

$$U(MUX) = \frac{40\mu}{V_{medida}} \quad (20)$$

onde: V_{medida} : é a tensão, produto da corrente do multímetro pela resistência do Pt100.

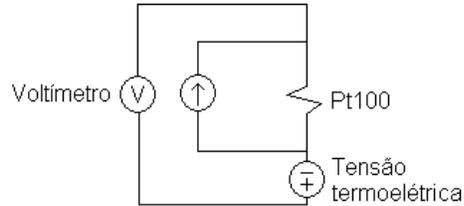


Figura 42: Modelagem da tensão termoeétrica para o módulo de multiplexação

Por se tratar de medição a quatro fios, o efeito da resistência de contato foi considerada desprezível [61].

6.2.2.3 Componentes de incerteza inerentes ao multímetro

O multímetro utilizado realizará medições de resistência a 4 fios. A faixa de medição a ser utilizada será a de 1 k (corrente de 1 mA), a qual possui uma parcela de incerteza relativa ao valor medido e outra relativa à faixa de medição. As especificações são garantidas pelo fabricante para intervalo de calibração e regulagem de 2 anos. Um erro adicional de ruído também é levado em consideração relativo à faixa de medição, como mostrado no último termo da equação 21.

$$U(DMM) = \frac{\sqrt{(80 \cdot 10^{-6} \cdot R_{medida})^2 + (3 \cdot 10^{-6} \cdot FM)^2 + (10 \cdot 10^{-6} \cdot FM)^2}}{R_{medida}} \quad (21)$$

onde: $U(DMM)$: é o erro máximo do módulo multímetro em valor relativo;

R_{medida} : é a resistência medida [Ω];

FM : é a faixa de medição [V].

6.2.3 Medições de fluxo de massa

O instrumento responsável pela medição do fluxo de massa será o mesmo utilizado hoje na bancada atual e, conseqüentemente, possui as mesmas

características metrológicas. Segundo Poletto [45], a incerteza nas medições de fluxo de massa pode ser obtida pela equação 22.

$$U(fm) = 0,001.V_{medido} \quad (22)$$

onde: $U(fm)$: é o erro máximo da medição do fluxo de massa;

V_{medido} : é o valor medido [kg/s].

6.2.4 Medições de pressão

A nova bancada fará uso de dois tipos de transmissores de pressão. Para todas as medições, exceto descarga do compressor, serão utilizados os transmissores com interface de comunicação CAN. Na sucção do compressor e saída do calorímetro, serão usados transmissores de 1 bar e 3 bar. Na entrada do calorímetro, será usado um transmissor de 10 bar. Para a medição de pressão na descarga do compressor, será usado o transmissor com interface de comunicação RS-485 de 10 bar. A justificativa para se utilizar esse transmissor baseia-se no fato dele também ser um transmissor analógico, realizando leituras com frequência muito superior aos transmissores digitais. Isso é necessário para uma linha de pesquisa em andamento no Labmetro. Sua desvantagem é a incerteza um pouco maior que a dos transmissores CAN. Isso, porém, não compromete a incerteza de medição porque o coeficiente de sensibilidade relativo a tal grandeza é pequeno em todas as condições de operação [45].

6.2.4.1 Componentes de incerteza inerentes aos transmissores CAN

O erro máximo desses transmissores é dado pela equação 23 para valores de (0 a 50) % da faixa de medição. Para valores de (50 a 100) % da faixa de medição, deve-se utilizar a equação 24.

$$U(CAN) = 0,1\%.V_{medido} + 0,1\%.FM \quad (23)$$

$$U(CAN) = 0,2\%.V_{medido} + 0,1\%.FM \quad (24)$$

onde: $U(CAN)$: é o erro máximo da medição de pressão com transdutor CAN;

V_{medido} : é a pressão medida [bar];

FM : é a faixa de medição [bar].

6.2.4.2 Componentes de incerteza inerentes ao transmissor RS-485

O erro máximo desse transmissor de pressão é dado pela equação 25. Será utilizada apenas uma faixa de medição de 10 bar (descarga do compressor).

$$U(RS - 485) = 0,3\%.FM \quad (25)$$

onde: $U(RS - 485)$: é o erro máximo da medição de pressão com transmissor RS-485;

FM : é a faixa de medição [bar].

6.2.5 Incerteza da bancada proposta

Para a avaliação da incerteza da nova bancada, foram utilizados os mesmos valores que foram utilizados para a avaliação de incerteza da bancada inicial (veja tabela 3). Diante disso, as tabelas 7, 8 e 9 foram montadas com os resultados obtidos através da simulação Monte Carlo. As figuras 43 a 57 trazem os histogramas das variáveis analisadas via Monte Carlo.

Tabela 7: Resultados obtidos através da avaliação por Monte Carlo para a bancada proposta na condição (-35 e +65) °C

Variável	Valor central	Lim. Inf.	Lim. Sup.	Incerteza %	Conf.	Unid.
Capacidade – calorímetro	53,15	52,90	53,42	0,49	95%	W
Capacidade – fluxo de massa	53,15	52,95	53,36	0,39	95%	W
Consumo	84,20	84,00	84,40	0,24	95%	W
COP – calorímetro	0,63	0,63	0,63	0,55	95%	-
COP – fluxo de massa	0,63	0,63	0,63	0,47	95%	-

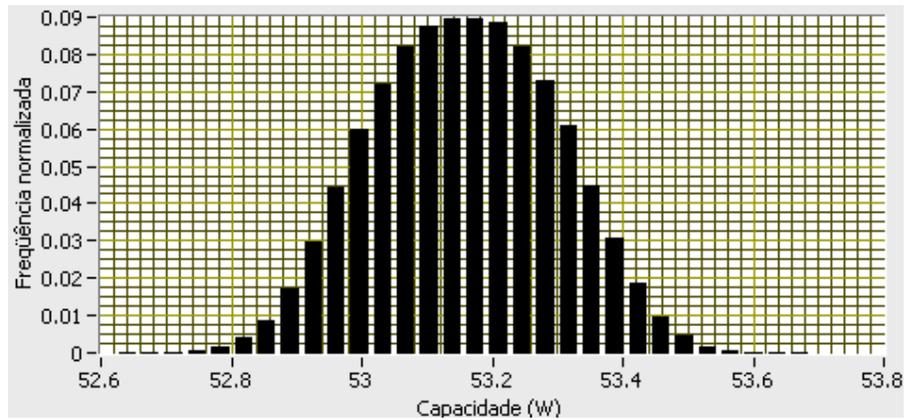


Figura 43: Histograma da capacidade de refrigeração através do método calorímetro da bancada proposta na condição (-35 e +65) °C

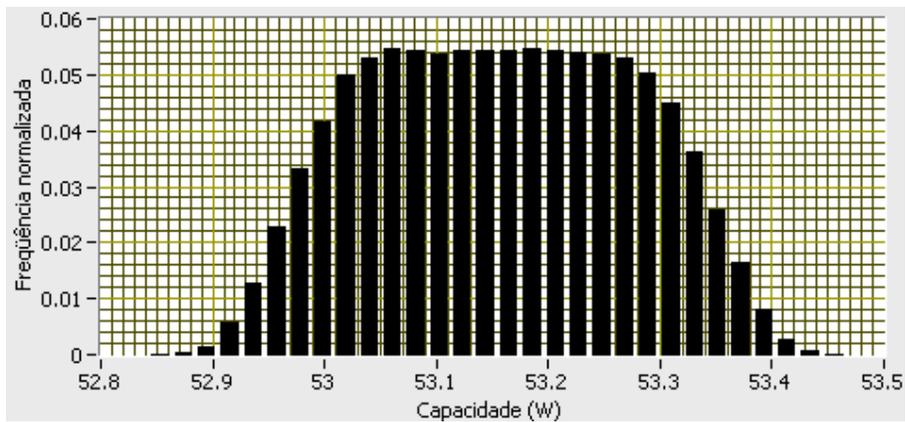


Figura 44: Histograma da capacidade de refrigeração através do método fluxo de massa da bancada proposta na condição (-35 e +65) °C

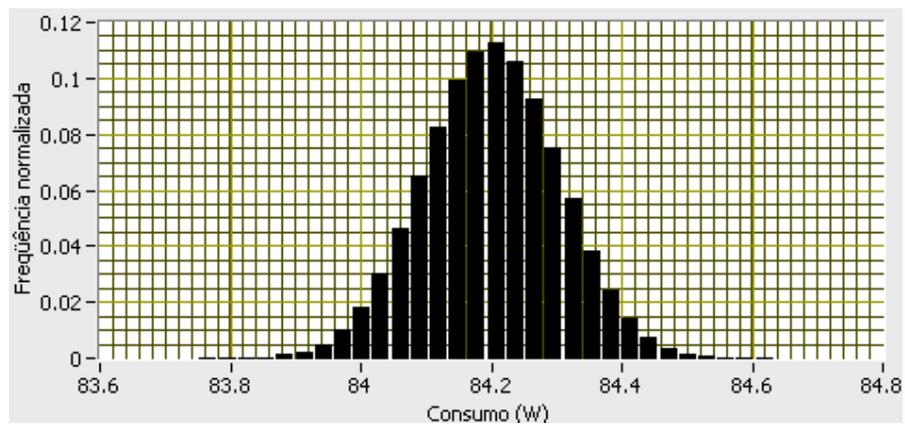


Figura 45: Histograma do consumo de potência da bancada proposta na condição (-35 e +65) °C

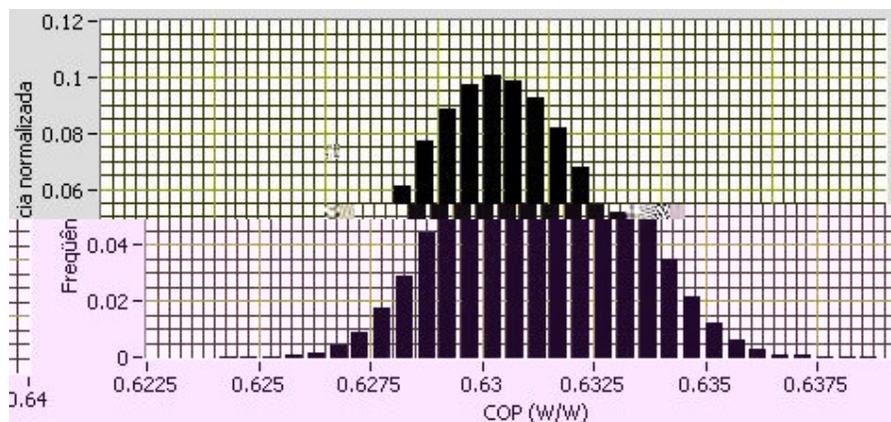


Figura 46: Histograma do coeficiente de performance através do método calorímetro da bancada proposta na condição (-35 e +65)°C

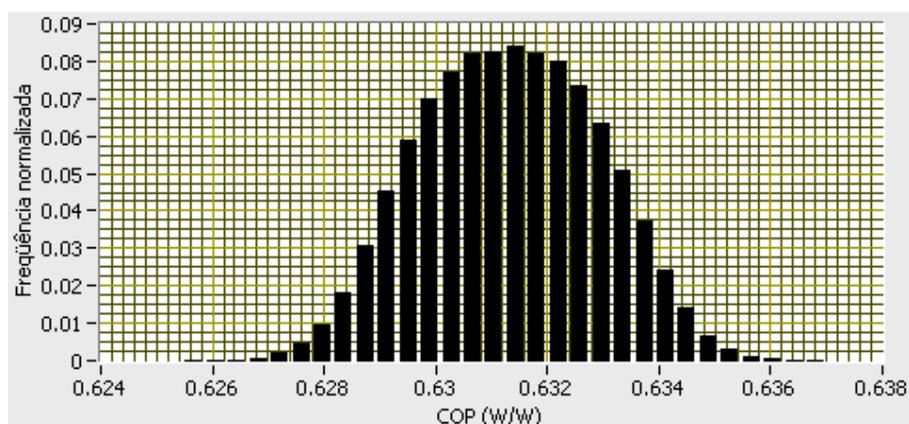


Figura 47: Histograma do coeficiente de performance através do método fluxo de massa da bancada proposta na condição (-35 e +65)°C

Tabela 8: Resultados obtidos através da avaliação por Monte Carlo para a bancada proposta na condição (-23,3 e +54,4)°C

Variável	Valor central	Lim. Inf.	Lim. Sup.	Incerteza %	Conf.	Unid.
Capacidade – calorímetro	193,19	192,22	194,24	0,52	95%	W
Capacidade – fluxo de massa	193,19	192,40	194,06	0,43	95%	W
Consumo	141,00	140,71	141,29	0,21	95%	W
COP – método calorímetro	1,37	1,36	1,38	0,57	95%	-
COP – método fluxo de massa	1,37	1,36	1,38	0,49	95%	-

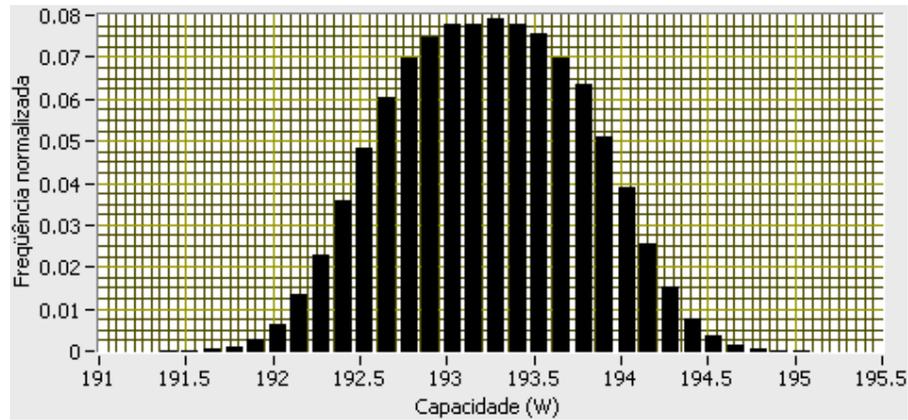


Figura 48: Histograma da capacidade de refrigeração através do método calorímetro da bancada proposta na condição (-23,3 e +54,4) °C

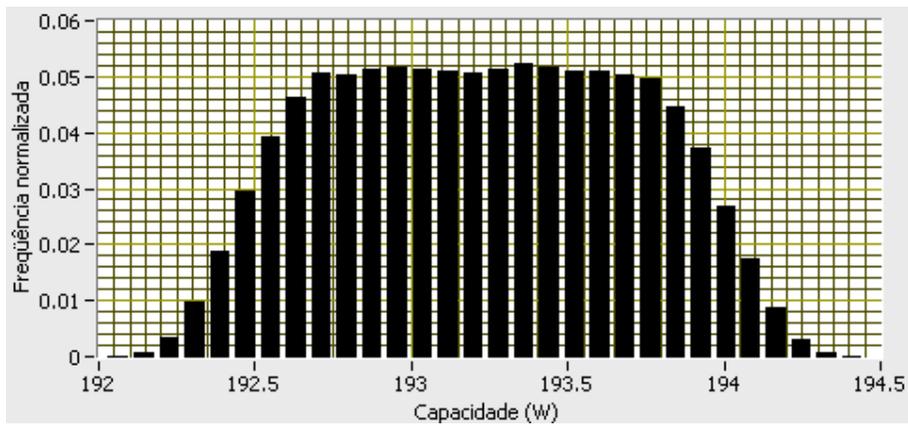


Figura 49: Histograma da capacidade de refrigeração através do método fluxo de massa da bancada proposta na condição (-23,3 e +54,4) °C

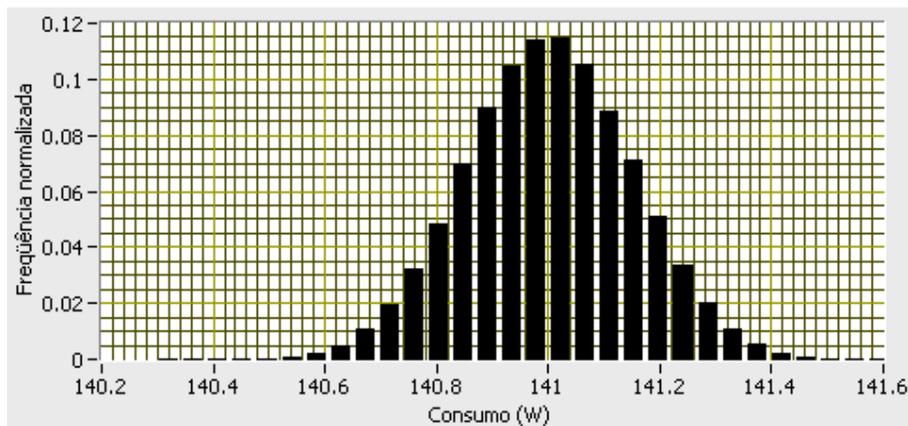


Figura 50: Histograma do consumo de potência da bancada proposta na condição (-23,3 e +54,4) °C

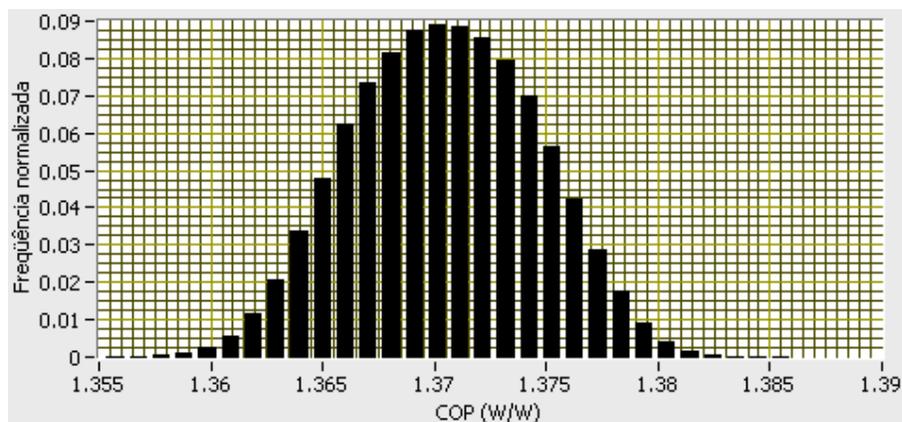


Figura 51: Histograma do coeficiente de performance através do método calorímetro da bancada proposta na condição (-23,3 e +54,4) °C

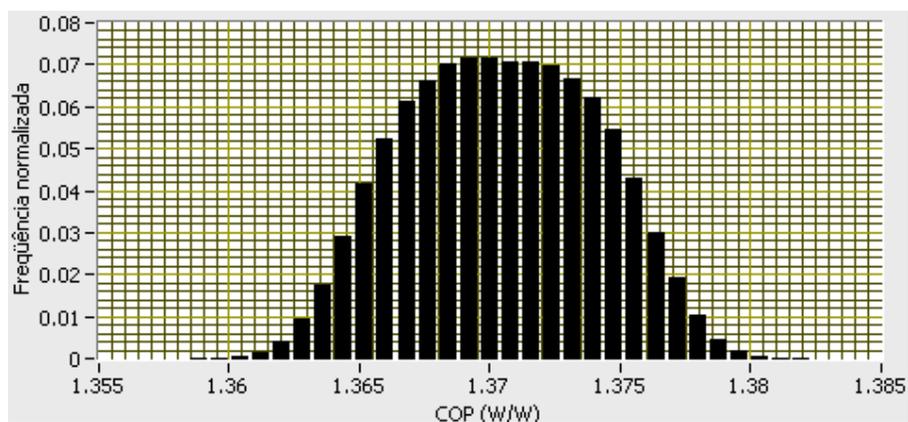


Figura 52: Histograma do coeficiente de performance através do método fluxo de massa da bancada proposta na condição (-23,3 e +54,4) °C

Tabela 9: Resultados obtidos através da avaliação por Monte Carlo para a bancada proposta na condição (-5 e +45) °C

Variável	Valor central	Lim. Inf.	Lim. Sup.	Incerteza %	Conf.	Unid.
Capacidade – calorímetro	541,78	539,14	544,46	0,49	95%	W
Capacidade – fluxo de massa	541,78	539,68	543,91	0,39	95%	W
Consumo	222,30	221,85	222,74	0,20	95%	W
COP – método calorímetro	2,44	2,42	2,45	0,53	95%	-
COP – método fluxo de massa	2,44	2,43	2,45	0,45	95%	-

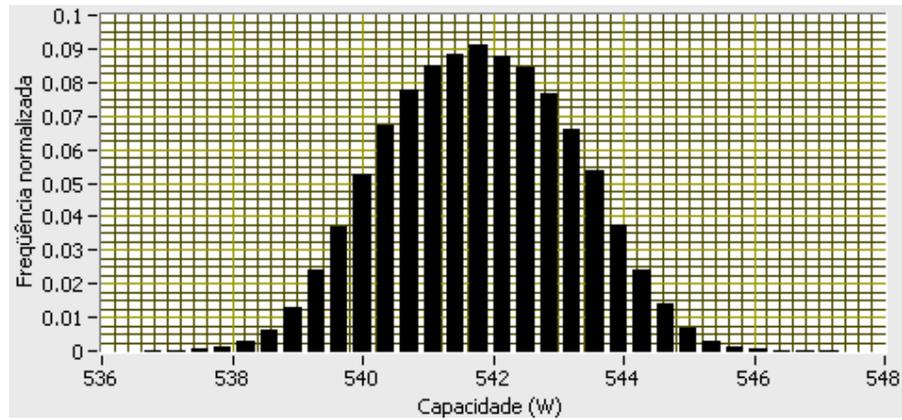


Figura 53: Histograma da capacidade de refrigeração através do método calorímetro da bancada proposta na condição (-5 e +45) °C

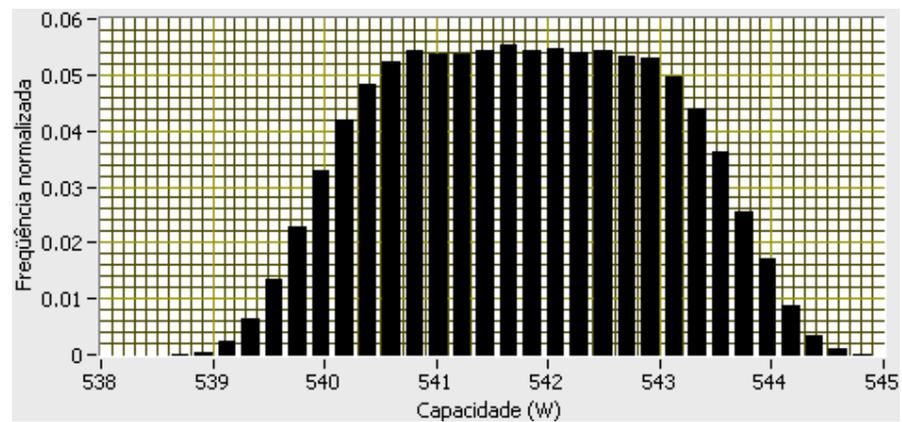


Figura 54: Histograma da capacidade de refrigeração através do método fluxo de massa da bancada proposta na condição (-5 e +45) °C

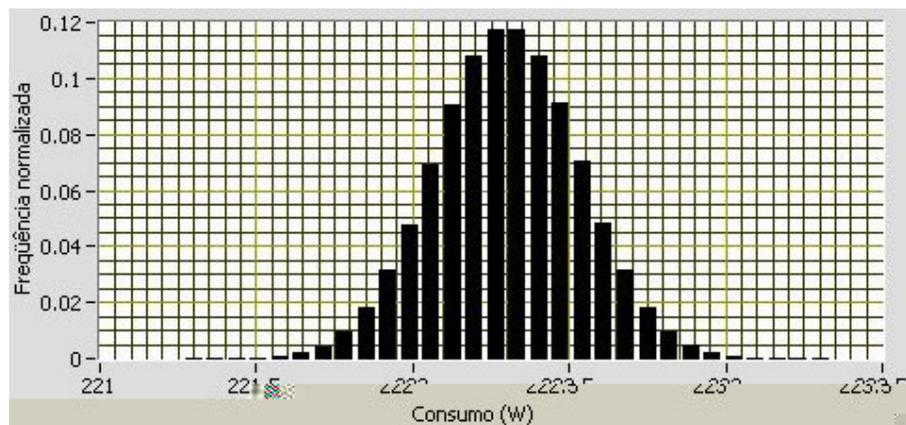


Figura 55: Histograma do consumo de potência da bancada proposta na condição (-5 e +45) °C

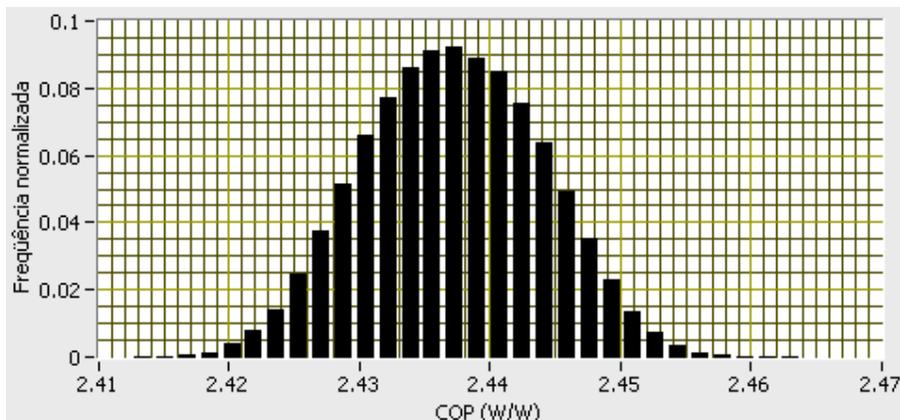


Figura 56: Histograma do coeficiente de performance através do método calorímetro da bancada proposta na condição (-5 e +45) °C

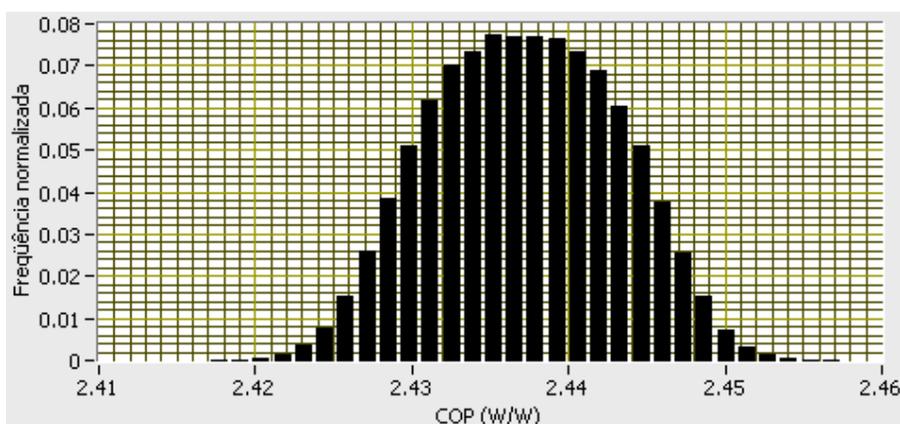


Figura 57: Histograma do coeficiente de performance através do método fluxo de massa da bancada proposta na condição (-5 e +45) °C

6.3 ANÁLISE DOS RESULTADOS DA BANCADA INICIAL E DA BANCADA PROPOSTA

A avaliação da incerteza de medição das duas bancadas, inicial e proposta, nas três condições de ensaio (-35 e +65) °C, (-5 e +45) °C e (-23,3 e +54,4) °C, forneceu resultados bastante conclusivos, como podem ser vistos na tabela 10. Esses resultados também são apresentados na forma de gráfico, como mostrado nas figuras 58, 59 e 60.

Tabela 10: Influência das condições de ensaio para cada bancada através do método calorímetro

	Capacidade		Consumo		COP	
	Inicial	Proposta	Inicial	Proposta	Inicial	Proposta
(-5 e +45) °C	1.36%	0.49%	0.57%	0.20%	1.53%	0.53%
(-23,3 e +54,4) °C	2.00%	0.52%	0.87%	0.21%	2.26%	0.57%
(-35 e +65) °C	4.20%	0.49%	1.43%	0.24%	4.58%	0.55%

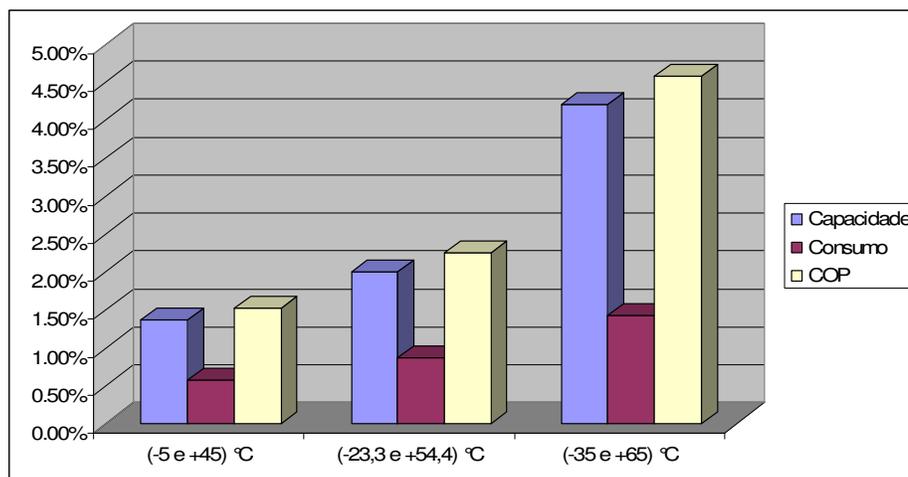


Figura 58: Incertezas da capacidade, consumo e COP para a bancada inicial nas três condições de ensaio

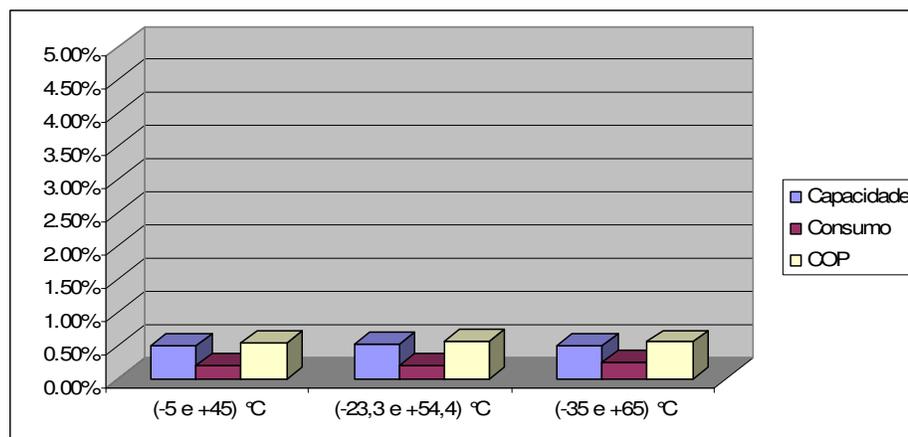


Figura 59: Incertezas da capacidade, consumo e COP para a bancada proposta nas três condições de ensaio

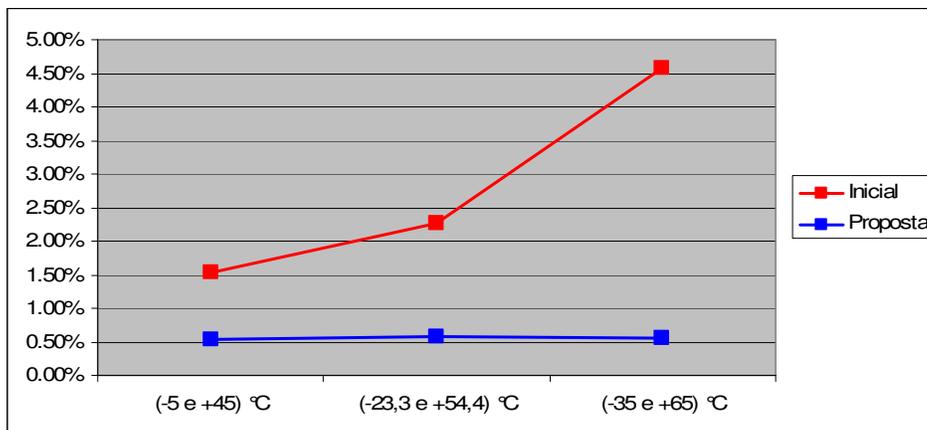


Figura 60: Comparação da incerteza do COP, entre as bancadas inicial e proposta, para as três condições de ensaio

É possível visualizar a redução de incerteza tanto na capacidade (através do método do calorímetro) quanto no consumo e no COP, para as três condições de ensaio, da bancada proposta em relação à bancada inicial. Além disso, a bancada proposta mantém os valores de incerteza independente da condição de operação, o que não ocorre com a bancada inicial.

Para o método do fluxo de massa, a tabela 11 apresenta os valores de capacidade e COP somente para a bancada proposta, pois a bancada inicial não possuía esse método de medição. O consumo é apresentado na tabela 10. Pode-se verificar que o método do fluxo de massa apresenta resultados melhores que o método do calorímetro.

Tabela 11: Influência das condições de ensaio para cada bancada através do método fluxo de massa

	Capacidade	COP
(-5 e +45) °C	0.39%	0.45%
(-23,3 e +54,4) °C	0.43%	0.49%
(-35 e +65) °C	0.39%	0.47%

As justificativas para a redução da incerteza de medição na bancada proposta em relação à bancada inicial são várias. Primeiramente, a redução da incerteza é fruto de vários desenvolvimentos realizados em trabalhos anteriores e que serão implementados na bancada proposta. Além disso, a utilização de um sistema de aquisição com excelentes características metrológicas, como é o caso do PXI, propicia medições com baixa incerteza até mesmo em ambientes hostis.

Adicionalmente ao comportamento metrológico da instrumentação, espera-se que a grande capacidade de processamento permita laços de controle mais rápidos, respondendo imediatamente às perturbações do processo, mantendo as grandezas controladas no alvo. As interfaces de comunicação permitem a troca de informação de modo mais rápido. A interface RS-485 foi quase que totalmente substituída pelo barramento PXI e pela interface CAN. Apenas a medição de fluxo de massa continua sendo realizada via RS-485.

interfacedeAutomaçã,534 6287650 Tde (c) Sistema de (o) 64737(o)-6.84718-8406 47285364103552 (P) 6284537

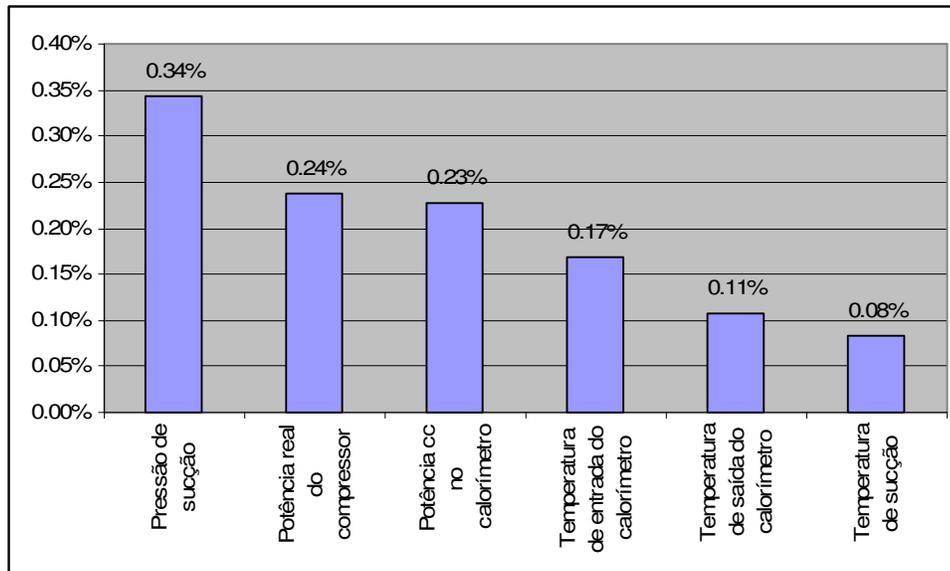


Figura 61: Gráfico de Pareto para as principais fontes de incerteza da bancada proposta na condição (-35 e +65) °C

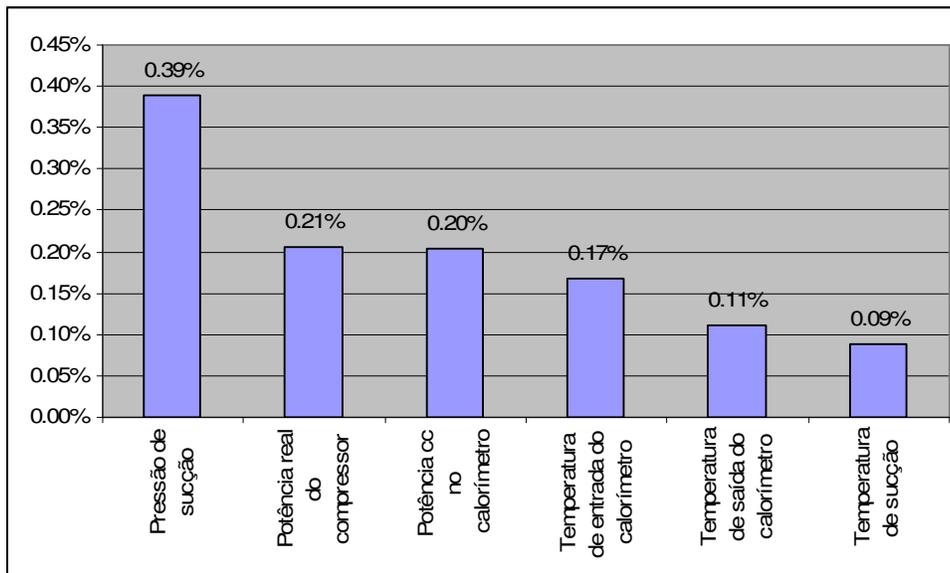


Figura 62: Gráfico de Pareto para as principais fontes de incerteza da bancada proposta na condição (-23,3 e +54,4) °C

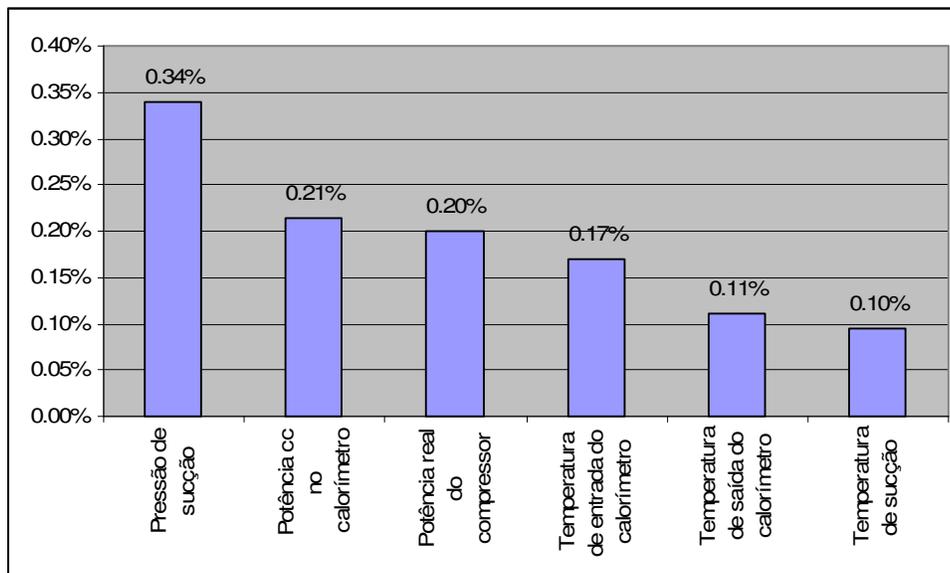


Figura 63: Gráfico de Pareto para as principais fontes de incerteza da bancada proposta na condição (-5 e +45) °C

7 CONCLUSÃO E PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS

7.1 CONCLUSÕES

As conclusões foram divididas com o intuito de torná-las mais organizadas, facilitando assim a sua compreensão. Primeiramente, será comentado a respeito do atendimento aos requisitos da bancada proposta. Em seguida, a respeito da forma de avaliação da incerteza de medição e, para finalizar, acerca das dificuldades encontradas no percurso deste trabalho.

7.1.1 Atendimento aos requisitos estabelecidos

Os requisitos da arquitetura - que foram estabelecidos em conjunto com a empresa parceira, na condição de líder no mercado de compressores em nível mundial - foram admitidas como extremamente representativas do estado-da-arte no segmento. Esses requisitos foram todos atendidos, ratificando a escolha adequada da arquitetura.

As incertezas encontradas através da avaliação apresentada no capítulo 6 estão em conformidade com as normas ISO 917 e ANSI/ASHRAE 23-2005. A garantia dessas incertezas com o tempo e com a temperatura também está sendo atendida, assegurando a confiabilidade dos resultados. A tabela 10, no item 6.3, mostra que a configuração proposta permite a realização de ensaios com baixa incerteza, mantendo-se praticamente constante, independente da condição de operação. Isso se deve à adoção de duas faixas de medição de pressão, fazendo com que os valores medidos situem-se mais no final da faixa, reduzindo o erro de medição.

A redução da incerteza não é mérito exclusivo desta dissertação. Ela foi alcançada principalmente como resultado conjunto dos trabalhos de Poletto [45],

Scussel [62], Barbosa [6], Henklein [63], Flesch [54] e Pacheco [64]. Coube, no entanto, a este trabalho, propor uma solução de mercado para o sistema de automação que atendesse a uma grande gama de requisitos, sem comprometer a confiabilidade metrológica. Além disso, para a pressão de sucção – grandeza altamente crítica – foi viabilizada a adição de transmissores de pressão com interface CAN que apresentavam as melhores características metrológicas dentre os disponíveis no mercado.

A proteção e a isolação da instrumentação para as grandezas elétricas foram observadas e módulos dedicados a essas funções especificados, garantindo a segurança não só do sistema, mas também dos usuários.

A arquitetura proposta é modular e flexível nas suas interfaces de comunicação, permitindo fácil expansão e integração com outros instrumentos. Também é não proprietária, com grande disponibilidade de fabricantes e produtos no mercado. Além disso, seus módulos estão em conformidade com as normas de segurança IEC e UL.

A compatibilidade com LabVIEW é total, já que suporta o sistema operacional LabVIEW *Real-Time*. Comunicação com computadores Windows via rede é suportado facilitando a troca de informações com outros sistemas corporativos e a inserção manual de dados no sistema.

O desempenho e a capacidade de armazenamento podem ser considerados estado-da-arte, já que se trata de processadores e discos rígidos de última geração, como os encontrados em computadores pessoais.

A automação do ensaio permitiu a eliminação da intervenção do operador quase que totalmente do ensaio. Antes o operador era responsável pela entrada dos *setpoints* nos controladores *Eurotherm*, o que poderia inserir erros de referência. Além disso, o operador tinha forte participação no controle da pressão de sucção do compressor. Nessa nova arquitetura proposta, os *setpoints* serão carregados automaticamente pelo sistema e os recursos de processamento ali viabilizados permitirão que o controle da pressão de sucção seja realizado automaticamente.

Para garantir que a incerteza permaneça em níveis reduzidos, alguns cuidados devem ser tomados. Primeiramente, deve-se garantir a temperatura ambiente da instrumentação em 25 °C e variando entre ± 5 °C, pois influencia diretamente na deriva do *offset* do módulo de isolação, a principal fonte de incerteza na medição de potência.

Deve-se, sempre que possível, utilizar o maior ganho do módulo de isolamento, o que faz com que a incerteza desse módulo seja a menor possível. O módulo de isolamento é o que mais influencia a incerteza da medição da potência. Adicionalmente, deve-se manter a temperatura dos transdutores de pressão entre (10 e 60) °C, faixa na qual a especificação do erro máximo fornecido pelo fabricante é válida.

7.1.2 Forma de avaliação da incerteza de medição

Foi realizada a avaliação das incertezas de medição da bancada inicial e da bancada proposta, através da integração dos métodos ISO-GUM e Monte Carlo, em três condições diferentes de ensaio: (-35 e +65) °C, (-5 e +45) °C e (-23,3 e +54,4) °C.

A combinação ISO-GUM e Monte Carlo permite usufruir as vantagens de cada método. Com o ISO-GUM, pode-se substituir um instrumento de medição ou fonte de incerteza e verificar rapidamente sua influência na cadeia de medição. Com o método Monte Carlo, pode-se verificar quais as principais fontes de incerteza que compõem o resultado final do ensaio para consumo, capacidade e COP. O Monte Carlo também é indicado para a avaliação em questão, já que é necessário, a partir de medições de temperatura e pressão, adquirir dados de tabelas de entalpia, sendo realizado automaticamente nesse caso. Simular várias condições de ensaio torna-se uma tarefa fácil, apenas alterando algumas variáveis de entrada. A saída do método Monte Carlo é mais realista que a do ISO-GUM, já que permite distribuições e intervalos de incerteza assimétricos. Além disso há possibilidade de incorporação do procedimento de avaliação à bancada de ensaio, permitindo a realização de avaliação da incerteza em tempo real.

As fontes que mais contribuem para a incerteza do ensaio foram identificadas e quantificadas. Isso permitirá que, futuramente, ações possam ser tomadas no sentido de reduzir ainda mais a incerteza.

7.1.3 Dificuldades encontradas

Entre as dificuldades encontradas neste trabalho, está a falta de dispositivos de isolamento e/ou proteção para tensões de 300 V. Dos poucos dispositivos encontrados, quase todos apresentavam características metrológicas que não atendiam aos requisitos estabelecidos.

Módulos de multiplexação PXI baseados em chaves estáticas e com vários canais também são raros de serem encontrados, limitando as opções de escolha. A utilização de chaves semicondutoras é indispensável para a vida útil do equipamento, já que serão acionadas muitas vezes durante o ensaio.

A inexistência de padronização nos dados de catálogos de fabricantes dificulta a interpretação, pois cada fabricante possui sua própria nomenclatura. Há ainda muitos catálogos inconsistentes e sem informações metrológicas.

Há rápida obsolescência dos sistemas e lançamentos diários de novas opções. A acelerada evolução tecnológica faz com que o tempo de vida de um produto seja reduzido. A cada dia, há novos instrumentos a serem analisados. Soluções que antes não atendiam determinado requisito, hoje podem estar atendendo e vice-versa. Isso inviabiliza estabelecer uma solução específica, com todos os módulos perfeitamente definidos, que se mantenha como o estado-da-arte por um longo tempo. A adoção de soluções modulares, padronizada e com grande número de fornecedores permite, no entanto, prever vida mais longa; pelo menos para a arquitetura básica, fazendo com que módulos específicos sejam substituídos por outros modelos em futuros painéis de ensaio.

7.2 PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS

Alguns aspectos não puderam ser tratados no presente trabalho com a profundidade que mereciam. Em função disso, são apresentados na seqüência sugestões de temas a serem explorados em futuros desenvolvimentos e pesquisas dentro da linha deste trabalho:

- Especificação e desenvolvimento de um software supervisor: estudar os requisitos e características desejadas para um software supervisor e desenvolver um protótipo piloto.
- Operação remota: estudar a possibilidade de acompanhamento e operação das bancadas remotamente através da internet. No caso de acompanhamento, clientes podem visualizar a distância ensaios sendo realizados. No caso de operação, pessoas com acesso autorizado podem interferir no ensaio remotamente via internet sem estar presente junto à bancada.

- Aprofundamento do estudo da influência do fator de perda. O fator de perda pode vir a ser fonte predominante de incerteza da capacidade e do COP na bancada proposta caso possua incerteza elevada e grande diferença entre a temperatura ambiente do calorímetro e sua temperatura superficial.
- Desenvolvimento de um software de avaliação de incerteza via método Monte Carlo com interface amigável. Seria ferramenta importante para análise da influência de alterações de meios e métodos de medição nesta e em outra bancadas de ensaio.
- Customização da bancada de ensaio para os diferentes setores da empresa como controle de qualidade, pesquisa e desenvolvimento etc, permitindo otimizar caso a caso as relações características/custos.
- Uso de recursos de metrologia bayesiana para reduzir e garantir os níveis de incerteza de medição praticados.
- Aprofundamento no estudo e aplicação de técnicas de controle mais adequadas. O grande potencial de interfaceamento, processamento e armazenamento de informações incorporadas à bancada proposta pode ser explorado nesse sentido.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] NORTHROP, R. B. **Introduction to Instrumentation and Measurements**. Electronic Engineering Systems Series, 1997.
- [2] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **Numerical Methods for the Propagation of Distributions**. ISO-GUM Supplement 1. 2004.
- [3] ABNT e INMETRO. **Guia para a Expressão da Incerteza de Medição**. Terceira Edição Brasileira. Edição Revisada (agosto de 2003).
- [4] INMETRO. **Vocabulário Internacional de Termos Fundamentais e Gerais de Metrologia**. Segunda edição - 2000.
- [5] NATIONAL INSTRUMENTS. **Data Acquisition Tutorial**. Tutorial, 1999. Disponível em: <http://colos.fcu.um.es/rlab/varios/CDQTUTO.pdf>. Acesso em: 20/09/2006.
- [6] BARBOSA, F. Q. **Redução das Incertezas nas Medições de Grandezas Elétricas em uma Bancada de Ensaios de Desempenho de Compressores**. Florianópolis, 2006. 190 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico. Programa de Pós-Graduação em Metrologia Científica e Industrial.
- [7] NATIONAL INSTRUMENTS. **Data Acquisition Specifications**. A Glossary. Disponível em: <http://zone.ni.com/devzone/cda/tut/p/id/3218>. Acesso em: 24/10/2006.
- [8] FOWLER, K. R.; SCHMALZEL, J. L. **Sensors: The First Stage in the Measurement Chain**. IEEE Instrumentation & Measurement Magazine, p.60-66, September 2004.
- [9] NATIONAL INSTRUMENTS. **Digital Multimeter Measurement Fundamentals**. Disponível em: <http://zone.ni.com/devzone/conceptd.nsf/webmain/41936F7FC227A7C486256E0C005A560F>. Acesso em: 20/09/2006.

- [10] NATIONAL INSTRUMENTS. **Data Acquisition Fundamentals**. Application Note 007, 2002.
- [11] HADDAD, M.; REGIER, C. **Demystifying Instrument Specifications – How To Make Sense Out of the Jargon**. National Instruments, Application Note 1555, 2000.
- [12] NACHTIGAL C. **Instrumentation and Control**. Fundamentals and Applications – Wiley Series in Mechanical Engineering Practice, 1990.
- [13] NATIONAL INSTRUMENTS. **RF Switching Considerations**. Disponível em: <http://zone.ni.com/devzone/conceptd.nsf/webmain/46B8D4D45C860C6F86256F1C006FD48F#6>. Acesso em: 20/09/2006.
- [14] KASIN, S. **Is Your Data Inaccurate Because of Instrumentation Amplifier Settling Time?**. National Instruments, Application Note 045, 1993.
- [15] FERNANDES, J. B. **Avaliação do Comportamento dos Padrões de Referência e Trabalho de Resistência Elétrica do Inmetro, em Função da Mudança de Temperatura de Trabalho**. Dissertação de Mestrado – Curso de Pós-graduação em Metrologia para a Qualidade Industrial, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2001.
- [16] NATIONAL INSTRUMENTS. **Measurements Manual**. Edição de 07/2000. Disponível em: <http://www.ni.com/pdf/manuals/322661b.pdf>. Acesso em: 25/09/2006.
- [17] 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. Acesso em: 28/09/2006.
- [18] PICKERING, P. **A System Designer's Guide To Isolation Devices**. Disponível em: <http://archives.sensormag.com/articles/0199/iso0199/main.shtml>. Acesso em: 28/09/2006.
- [19] DATAFORTH CORPORATION. **Answer Five PC-Based Measurement Questions with Isolated Signal Conditioners**. White paper, 2001.

- [20] SWANSTROM, J. **Finding a Lasting Interface for Your ATE System**. National Instruments, Application Note 030, p.27-32, 2005.
- [21] WILLIAMS, S. R. **Test and Measurement Equipment Adopts Computer Industry Standards**. IEEE, p.367-378, 2002.
- [22] DALLAS SEMICONDUCTORS. **Selecting and Using RS-232, RS-422, and RS-485 Serial Data**. Application Note 723. 12/2000.
- [23] GUTTERMAN, L. **PXI: The Future of Test**. IEEE, p.205-214, 2002.
- [24] SETHUNADH, R. **Using New Instrument Interface Standards to Increase Automatic Test System Performance**. IEEE, p.677-682, 2005.
- [25] DRENKOW, G. **Future Test System Architectures**. IEEE A & E SYSTEMS MAGAZINE, p.27-32, 2005.
- [26] NATIONAL INSTRUMENTS. **Short Tutorial on VXI/MXI**. Disponível em: <http://zone.ni.com/devzone/cda/tut/p/id/2899>. Acesso em: 25/10/2006.
- [27] NATIONAL INSTRUMENTS. **Five Things to Consider When Choosing a VXI Controller**. Disponível em: <http://zone.ni.com/devzone/cda/tut/p/id/3350>. Acesso em: 29/10/2006.
- [28] STEMMER, M. R. **DAS 5331 – Sistemas Distribuídos e Redes de Computadores para Controle e Automação Industrial**. Versão 2001. Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico. Departamento de Automação e Sistemas.
- [29] BOSCH. **What is CAN?**. Disponível em: <http://www.can.bosch.com>. Acesso em: 26/10/2006.
- [30] BOSCH. **CAN Specification**. Versão 2.0B. Disponível em: www.semiconductors.bosch.de. Acesso em: 03/10/2006.
- [31] NATIONAL INSTRUMENTS. **Signal Conditioning Fundamentals for Computer-Based Measurement Systems**. Application Note 048, 2001.

- [32] LUECKE, J. **Analog and Digital Circuits for Electronic Control System Applications**. Embedded Technology Series, Team LRN. 09/2004.
- [33] CIMINO, C. **Rack-and-stack**. IEEE Computing & Control Engineering, p.16-19, 2005.
- [34] NAIR, C. **MODULAR TEST ARCHITECTURES FOR THE AEROSPACE INDUSTRY**. IEEE, p.241-247, 2002.
- [35] ERICKSON, K. T. **Programmable Logic Controllers**. IEEE Potentials, p.14-17, 1996.
- [36] BELL, I. **The Future of Control**. IEEE Manufacturing Engineer, p.36-39, 2005.
- [37] OPTO22. **Understanding Programmable Automation Controllers (PACs) in Industrial Automation**. White paper.
- [38] WOLFE, R. **Short Tutorial on VXI/MXI**. National Instruments, Application Note 030, p.27-32, 2005.
- [39] LAUTERBACH, M. J. **Building an Automated Test System Using Modular Signal Sources and Digitalizers**. IEEE, p.72-76, 2003.
- [40] STARKLOFF, E.; FOUNTAIN, T.; BLACK, G. **The PXI Modular Instrumentation Architecture**. IEEE, p.156-165, 2003.
- [41] NATIONAL INSTRUMENTS. **Hybrid Systems – Integrating Your Multivendor, Multiplatform Test Equipment**. Disponível em: <http://zone.ni.com/devzone/cda/tut/p/id/3464>. Acesso em: 18/10/2006.
- [42] CAESAR, G. **Integrating PXI with VXI, GPIB, USB, and LXI Instrumentation**. IEEE, p.857-861, 2005.
- [43] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 917: Testing of Refrigerant Compressors**. 2. ed. Switzerland, 1989.
- [44] ASHRAE STANDARD. **ANSI/ASHRAE 23-2005: Methods of Testing for Rating Positive Displacement Refrigerant Compressors and Condensing Units**. Atlanta, EUA, 2005.

- [45] POLETTI, E. L. **Aprimoramento de Uma Bancada de Ensaio de Desempenho de Compressores Herméticos Visando Reduzir Incertezas de Medição**. Florianópolis, 2005. 107 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico. Programa de Pós-Graduação em Metrologia Científica e Industrial.
- [46] CRC PRESS LLC. **The Measurement Instrumentation and Sensors Handbook**. 1999.
- [47] AGILENT TECHNOLOGIES. **Agilent 34970A Data Acquisition/Switch Unit**. Product Overview. Disponível em: www.agilent.com. Acesso em: 23/09/2006.
- [48] AGILENT TECHNOLOGIES. **Agilent 34980A Multifunction Switch/Measure Unit**. Data Sheet. Disponível em: www.agilent.com. Acesso em: 23/09/2006.
- [49] PXI SYSTEM ALLIANCE. **One Industry Standard**. Disponível em: <http://www.pxisa.org/>. Acesso em: 10/10/2006.
- [50] NEAL, T. M. **NEXT GENERATION COTS TEST SYSTEMS**. IEEE, p.134-138, 2003.
- [51] NAIR, C. **Architecting Production Test Systems**. IEEE, p.572-575, 2000.
- [52] PULS, C. **PXI and VXI Modular Instrumentation in the New Millennium**. IEEE, p.623-625, 1999.
- [53] NATIONAL INSTRUMENTS. **Introduction to PCI Express**. An Overview of the PCI Express Standard. Disponível em: <http://zone.ni.com/devzone/cda/tut/p/id/3540>. Acesso em: 24/10/2006.
- [54] FLESCHE, R.C.C. **Desenvolvimento e Instalação de Recursos de Automação Aplicados a Ensaio de Compressores de Refrigeração da Embraco**. Florianópolis, 2006. 120 f. Monografia (Graduação) – Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico. Departamento de Automação e Sistemas.
- [55] FLESCHE, C. A.; BARP A. M. **Avaliação a Priori da Incerteza em Sistemas Modulares de Medição de Temperatura**. IV Congresso Iberoamericano de

Ingeniería Mecánica CIDIM/99. Santiago de Chile, Chile, 23 a 26/11/1999, Anais em CDROM.

- [56] SENSOR SCIENTIFIC, INC. **Platinum Thin Film RTD Elements**. Disponível em: <http://www.sensorsci.com/>. Acesso: 12/10/2006
- [57] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 13772 – Termorresistência – Calibração por Comparação com Termorresistência de Referência**. 1997.
- [58] NATIONAL INSTRUMENTS. **Measuring Temperature With an RTD or Thermistor**. Disponível em: <http://zone.ni.com/devzone/cda/tut/p/id/3643>. Acesso em: 08/11/2006.
- [59] FLESCHE, C. A.; BLANK, M. **Análise Comparativa entre Erros Metrológicos Decorrentes da Multiplexação Automatizada Obtidos em Análise Teórica e Experimental**. XV Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica; Baurú, SP, 12/1997; Anais.
- [60] FLESCHE, C. A.; CAMARANO, D. M. **Proposta de Metodologia de Seleção dos Módulos Físicos e Lógicos de um Processo de Medição Automatizado de Temperatura com Transdutores dos Tipos Termopar, Termorresistor e Termistor**. XII Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica, Brasília, DF, 12/1993, Anais, v.3, p 269 – 274.
- [61] CAMARANO, D. M.; FLESCHE, C. A. **Erros na Multiplexação Automatizada de Transdutores de Temperatura Tipo Termopar, Termorresistor e Termistor**. V Congresso Nacional de Ingeniería Mecánica, Punta Arenas, Chile 12/1992; Anais.
- [62] SCUSSEL, J. N. **Propostas de Ações para Reduzir o Tempo Demandado por Ensaio de Desempenho de Compressores Herméticos**. Florianópolis, 2007. 153 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico. Programa de Pós-Graduação em Metrologia Científica e Industrial.
- [63] HENKLEIN, P. **Análise de Ensaio de Desempenho de Compressores Herméticos Durante o Transitório**. Florianópolis, 2006. 136 f. Dissertação

(Mestrado) – Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico.
Programa de Pós-Graduação em Metrologia Científica e Industrial.

- [64] PACHECO, A. L. S. **Desenvolvimento de Sistema para Medir a Resistência de Enrolamento em Motores de Compressores Energizados**. Florianópolis, 2007. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico. Programa de Pós-Graduação em Metrologia Científica e Industrial.

APÊNDICE – TABELAS DAS FONTES DE INCERTEZAS

Tabela 12: Fontes de incerteza da CAP e do COP para a condição (-35 e +65) °C, para as bancadas inicial e proposta

Bancada Inicial - Condição (-35 +65) °C						Bancada Proposta - Condição (-35 +65) °C					
Análise da capacidade						Análise da capacidade					
Critério	Val. Med.	Lim. Inf.	Lim. Sup.	Inc. Abs.	Inc. Rel.	Critério	Val. Med.	Lim. Inf.	Lim. Sup.	Inc. Abs.	Inc. Rel.
Pressão de descarga	53.1471	53.1471	53.1471	0.0000	0.00%	Pressão de descarga	53.14710	53.14710	53.14710	0.00000	0.00%
Fator de perda	53.1471	53.1471	53.1471	0.0000	0.00%	Fator de perda	53.14710	53.14710	53.14710	0.00000	0.00%
Potência real do compressor	53.1471	53.1471	53.1471	0.0000	0.00%	Potência real do compressor	53.14710	53.14710	53.14710	0.00000	0.00%
Temperatura ambiente do calorímetro	53.1471	53.1471	53.1471	0.0000	0.00%	Fluxo de massa	53.14710	53.14710	53.14710	0.00000	0.00%
Temperatura superficial do calorímetro	53.1471	53.1471	53.1471	0.0000	0.00%	Pressão de entrada do calorímetro	53.14710	53.14710	53.14710	0.00000	0.00%
Pressão de entrada do calorímetro	53.1471	53.1471	53.1472	0.0000	0.00%	Temperatura ambiente do calorímetro	53.14710	53.14710	53.14710	0.00000	0.00%
Pressão de saída do calorímetro	53.1471	53.1415	53.1526	0.0055	0.01%	Temperatura superficial do calorímetro	53.14710	53.14710	53.14710	0.00000	0.00%
Temperatura de sucção	53.1471	52.9883	53.3343	0.1730	0.33%	Pressão de saída do calorímetro	53.14710	53.14610	53.14820	0.00105	0.00%
Temperatura de saída do calorímetro	53.1471	52.9180	53.3583	0.2202	0.41%	Temperatura de sucção	53.14710	53.11090	53.20040	0.04475	0.08%
Temperatura de entrada do calorímetro	53.1471	52.7695	53.4975	0.3640	0.68%	Temperatura de saída do calorímetro	53.14710	53.08870	53.20330	0.05730	0.11%
Pressão de sucção	53.1471	52.1373	54.1023	0.9825	1.85%	Temperatura de entrada do calorímetro	53.14710	53.05990	53.23890	0.08950	0.17%
Potência ac no calorímetro	53.1471	51.5308	54.8113	1.6403	3.09%	Potência cc no calorímetro	53.14710	53.02170	53.26360	0.12095	0.23%
Capacidade	53.1471	50.8840	55.3634	2.2397	4.21%	Pressão de sucção	53.14710	52.95800	53.32200	0.18200	0.34%
Fluxo de massa	.	.	.	.	.	Capacidade	53.14710	52.88730	53.41530	0.26400	0.50%
Análise do COP						Análise do COP					
Critério	Val. Med.	Lim. Inf.	Lim. Sup.	Inc. Abs.	Inc. Rel.	Critério	Val. Med.	Lim. Inf.	Lim. Sup.	Inc. Abs.	Inc. Rel.
Pressão de descarga	0.6312	0.6312	0.6312	0.0000	0.00%	Pressão de descarga	0.63120	0.63120	0.63120	0.00000	0.00%
Fator de perda	0.6312	0.6312	0.6312	0.0000	0.00%	Fator de perda	0.63120	0.63120	0.63120	0.00000	0.00%
Pressão de entrada do calorímetro	0.6312	0.6312	0.6312	0.0000	0.00%	Pressão de entrada do calorímetro	0.63120	0.63120	0.63120	0.00000	0.00%
Temperatura ambiente do calorímetro	0.6312	0.6312	0.6312	0.0000	0.00%	Fluxo de massa	0.63120	0.63120	0.63120	0.00000	0.00%
Temperatura superficial do calorímetro	0.6312	0.6312	0.6312	0.0000	0.00%	Temperatura ambiente do calorímetro	0.63120	0.63120	0.63120	0.00000	0.00%
Pressão de saída do calorímetro	0.6312	0.6311	0.6313	0.0001	0.01%	Temperatura superficial do calorímetro	0.63120	0.63120	0.63120	0.00000	0.00%
Temperatura de sucção	0.6312	0.6293	0.6334	0.0021	0.33%	Pressão de saída do calorímetro	0.63120	0.63119	0.63121	0.00001	0.00%
Temperatura de saída do calorímetro	0.6312	0.6285	0.6337	0.0026	0.41%	Temperatura de sucção	0.63120	0.63077	0.63183	0.00053	0.08%
Temperatura de entrada do calorímetro	0.6312	0.6267	0.6354	0.0043	0.68%	Temperatura de saída do calorímetro	0.63120	0.63051	0.63187	0.00068	0.11%
Potência real do compressor	0.6312	0.6219	0.6399	0.0090	1.42%	Temperatura de entrada do calorímetro	0.63120	0.63017	0.63229	0.00106	0.17%
Pressão de sucção	0.6312	0.6192	0.6425	0.0117	1.85%	Potência cc no calorímetro	0.63120	0.62971	0.63259	0.00144	0.23%
Potência ac no calorímetro	0.6312	0.6120	0.6510	0.0195	3.09%	Potência real do compressor	0.63120	0.62970	0.63271	0.00150	0.24%
COP	0.6312	0.6032	0.6607	0.0288	4.56%	Pressão de sucção	0.63120	0.62896	0.63328	0.00216	0.34%
Fluxo de massa	.	.	.	.	.	COP	0.63120	0.62779	0.63482	0.00351	0.56%

Tabela 13: Fontes de incerteza da CAP e do COP para a condição (-23,3 e +54,4) °C, para as bancadas inicial e proposta

Bancada Inicial - Condição (-23,3 +54,4) °C						Bancada Proposta - Condição (-23,3 +54,4) °C					
Análise da capacidade						Análise da capacidade					
Critério	Val. Med.	Lim. Inf.	Lim. Sup.	Inc. Abs.	Inc. Rel.	Critério	Val. Med.	Lim. Inf.	Lim. Sup.	Inc. Abs.	Inc. Rel.
Pressão de descarga	193.19100	193.1910	193.1910	0.00000	0.00%	Pressão de descarga	193.19100	193.19100	193.19100	0.00000	0.00%
Fator de perda	193.19100	193.1910	193.1910	0.00000	0.00%	Fator de perda	193.19100	193.19100	193.19100	0.00000	0.00%
Potência real do compressor	193.19100	193.1910	193.1910	0.00000	0.00%	Potência real do compressor	193.19100	193.19100	193.19100	0.00000	0.00%
Pressão de entrada do calorímetro	193.19100	193.1910	193.1910	0.00000	0.00%	Fluxo de massa	193.19100	193.19100	193.19100	0.00000	0.00%
Temperatura superficial do calorímetro	193.19100	193.1910	193.1910	0.00000	0.00%	Pressão de entrada do calorímetro	193.19100	193.19100	193.19100	0.00000	0.00%
Temperatura ambiente do calorímetro	193.19100	193.1910	193.1910	0.00000	0.00%	Temperatura ambiente do calorímetro	193.19100	193.19100	193.19100	0.00000	0.00%
Pressão de saída do calorímetro	193.19100	193.1690	193.2110	0.02100	0.01%	Temperatura superficial do calorímetro	193.19100	193.19100	193.19100	0.00000	0.00%
Temperatura de sucção	193.19100	192.6080	193.9050	0.64850	0.34%	Pressão de saída do calorímetro	193.19100	193.18400	193.19800	0.00700	0.00%
Temperatura de saída do calorímetro	193.19100	192.3590	193.9830	0.81200	0.42%	Temperatura de sucção	193.19100	193.05600	193.39400	0.16900	0.09%
Temperatura de entrada do calorímetro	193.19100	191.7980	194.4610	1.33150	0.69%	Temperatura de saída do calorímetro	193.19100	192.98100	193.40700	0.21300	0.11%
Potência ca no calorímetro	193.19100	191.3120	195.0800	1.88400	0.98%	Temperatura de entrada do calorímetro	193.19100	192.86100	193.50700	0.32300	0.17%
Pressão de sucção	193.19100	191.0820	195.3340	2.12600	1.10%	Potência cc no calorímetro	193.19100	192.79400	193.58100	0.39350	0.20%
Capacidade	193.19100	189.3250	197.0690	3.87200	2.00%	Pressão de sucção	193.19100	192.47600	193.97600	0.75000	0.39%
Fluxo de massa	•	•	•	•	•	Capacidade	193.19100	192.23700	194.25800	1.01050	0.52%
Análise do COP						Análise do COP					
Critério	Val. Med.	Lim. Inf.	Lim. Sup.	Inc. Abs.	Inc. Rel.	Critério	Val. Med.	Lim. Inf.	Lim. Sup.	Inc. Abs.	Inc. Rel.
Pressão de descarga	1.37015	1.37015	1.37015	0.00000	0.00%	Pressão de descarga	1.37015	1.37015	1.37015	0.00000	0.00%
Fator de perda	1.37015	1.37015	1.37015	0.00000	0.00%	Fator de perda	1.37015	1.37015	1.37015	0.00000	0.00%
Pressão de entrada do calorímetro	1.37015	1.37015	1.37015	0.00000	0.00%	Pressão de entrada do calorímetro	1.37015	1.37015	1.37015	0.00000	0.00%
Temperatura superficial do calorímetro	1.37015	1.37015	1.37015	0.00000	0.00%	Fluxo de massa	1.37015	1.37015	1.37015	0.00000	0.00%
Temperatura ambiente do calorímetro	1.37015	1.37015	1.37015	0.00000	0.00%	Temperatura ambiente do calorímetro	1.37015	1.37015	1.37015	0.00000	0.00%
Pressão de saída do calorímetro	1.37015	1.36999	1.37029	0.00015	0.01%	Temperatura superficial do calorímetro	1.37015	1.37015	1.37015	0.00000	0.00%
Temperatura de sucção	1.37015	1.36601	1.37521	0.00460	0.34%	Pressão de saída do calorímetro	1.37015	1.37010	1.37020	0.00005	0.00%
Temperatura de saída do calorímetro	1.37015	1.36425	1.37576	0.00576	0.42%	Temperatura de sucção	1.37015	1.36919	1.37159	0.00120	0.09%
Temperatura de entrada do calorímetro	1.37015	1.36027	1.37916	0.00944	0.69%	Temperatura de saída do calorímetro	1.37015	1.36866	1.37168	0.00151	0.11%
Potência real do compressor	1.37015	1.35879	1.38252	0.01187	0.87%	Temperatura de entrada do calorímetro	1.37015	1.36781	1.37239	0.00229	0.17%
Potência ca no calorímetro	1.37015	1.35682	1.38355	0.01337	0.98%	Potência cc no calorímetro	1.37015	1.36733	1.37292	0.00279	0.20%
Pressão de sucção	1.37015	1.35519	1.38535	0.01508	1.10%	Potência real do compressor	1.37015	1.36733	1.37298	0.00283	0.21%
COP	1.37015	1.34018	1.40233	0.03108	2.27%	Pressão de sucção	1.37015	1.36507	1.37572	0.00533	0.39%
Fluxo de massa	•	•	•	•	•	COP	1.37015	1.36272	1.37826	0.00777	0.57%

Tabela 14: Fontes de incerteza da CAP e do COP para a condição (-5 e +45) °C, para as bancadas inicial e proposta

Bancada Inicial - Condição (-5 +45) °C						Bancada Proposta - Condição (-5 +45) °C					
Análise da capacidade						Análise da capacidade					
Critério	Val. Med.	Lim. Inf.	Lim. Sup.	Inc. Abs.	Inc. Rel.	Critério	Val. Med.	Lim. Inf.	Lim. Sup.	Inc. Abs.	Inc. Rel.
Pressão de descarga	541.7750	541.7750	541.7750	0.0000	0.00%	Pressão de descarga	541.7750	541.7750	541.7750	0.0000	0.00%
Fator de perda	541.7750	541.7750	541.7750	0.0000	0.00%	Pressão de entrada do calorímetro	541.7750	541.7750	541.7750	0.0000	0.00%
Potência real do compressor	541.7750	541.7750	541.7750	0.0000	0.00%	Potência real do compressor	541.7750	541.7750	541.7750	0.0000	0.00%
Temperatura superficial do calorímetro	541.7750	541.7750	541.7750	0.0000	0.00%	Fluxo de massa	541.7750	541.7750	541.7750	0.0000	0.00%
Temperatura ambiente do calorímetro	541.7750	541.7750	541.7750	0.0000	0.00%	Fator de perda	541.7750	541.7750	541.7750	0.0000	0.00%
Pressão de entrada do calorímetro	541.7750	541.7740	541.7750	0.0005	0.00%	Pressão de saída do calorímetro	541.7750	541.7750	541.7750	0.0000	0.00%
Pressão de saída do calorímetro	541.7750	541.7090	541.8470	0.0690	0.01%	Temperatura ambiente do calorímetro	541.7750	541.7750	541.7750	0.0000	0.00%
Temperatura de sucção	541.7750	539.8260	543.8170	1.9955	0.37%	Temperatura superficial do calorímetro	541.7750	541.7750	541.7750	0.0000	0.00%
Potência ca no calorímetro	541.7750	539.4330	544.0320	2.2995	0.42%	Temperatura de sucção	541.7750	541.2650	542.2980	0.5165	0.10%
Temperatura de saída do calorímetro	541.7750	539.5340	544.2570	2.3615	0.44%	Temperatura de saída do calorímetro	541.7750	541.1790	542.3780	0.5995	0.11%
Pressão de sucção	541.7750	538.5610	544.9680	3.2035	0.59%	Temperatura de entrada do calorímetro	541.7750	540.8390	542.6720	0.9165	0.17%
Temperatura de entrada do calorímetro	541.7750	537.9260	545.4620	3.7680	0.70%	Potência cc no calorímetro	541.7750	540.6070	542.9240	1.1585	0.21%
Capacidade	541.7750	534.6010	549.3400	7.3695	1.36%	Pressão de sucção	541.7750	539.8420	543.5260	1.8420	0.34%
Fluxo de massa	541.7750	539.4450	544.7000	2.0410	0.40%						

Val. Med.	Lim. Inf.	Lim. Sup.	Inc. Abs.	Inc. Rel.	Crítério	Val. Med.	Lim. Inf.	Lim. Sup.	Inc. Abs.	Inc. Rel.	Crítério
2.4371	2.4371	2.4371	0.0000	0.00%	Fator de perda	2.4371	2.4371	2.4371	0.0000	0.00%	Fluxo de massa
2.4371	2.4371	2.4371	0.0000	0.00%	Temperatura superficial do calorímetro	2.4371	2.4371	2.4371	0.0000	0.00%	Pressão de saída do calorímetro
2.4371	2.4371	2.4371	0.0000	0.00%	Pressão de saída do calorímetro	2.4371	2.4368	2.4375	0.0003	0.01%	Temperatura superficial do calorímetro
2.4371	2.4348	2.4395	0.0023	0.10%	Potência ca no calorímetro	2.4371	2.4266	2.4473	0.0103	0.42%	Temperatura de sucção
2.4371	2.4329	2.4412	0.0041	0.17%	Potência real do compressor	2.4371	2.4226	2.4504	0.0139	0.57%	Temperatura de entrada do calorímetro
2.4371	2.4319	2.4423	0.0052	0.21%	Temperatura de entrada do calorímetro	2.4371	2.4198	2.4537	0.0170	0.70%	Potência cc no calorímetro
2.4371	2.4245	2.4504	0.0129	0.53%	Fluxo de massa	.	.	.	.	.	COP

Livros Grátis

(<http://www.livrosgratis.com.br>)

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)
[Baixar livros de Matemática](#)
[Baixar livros de Medicina](#)
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)
[Baixar livros de Meteorologia](#)
[Baixar Monografias e TCC](#)
[Baixar livros Multidisciplinar](#)
[Baixar livros de Música](#)
[Baixar livros de Psicologia](#)
[Baixar livros de Química](#)
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)
[Baixar livros de Serviço Social](#)
[Baixar livros de Sociologia](#)
[Baixar livros de Teologia](#)
[Baixar livros de Trabalho](#)
[Baixar livros de Turismo](#)