

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA

Centro Tecnológico

Pós-graduação em Metrologia Científica e Industrial

**Redução das incertezas nas medições de grandezas
elétricas em uma bancada de ensaios de desempenho de
compressores**

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

Autor: Fúlvio Queiroz Barbosa

Orientador: Carlos Alberto Flesch, Dr. Eng.

Florianópolis, outubro de 2006.

**Redução das incertezas nas medições de grandezas
elétricas em uma bancada de ensaios de desempenho de
compressores**

Fúlvio Queiroz Barbosa

Esta dissertação foi julgada adequada para 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.
Orientador

Prof. Marco Antonio Martins Cavaco, Ph. D.
Coordenador do Curso de Pós-graduação em Metrologia Científica e Industrial

Banca Examinadora:

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

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

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

André Paz Rosa, M. Sc. (EMBRACO)

Aos meus pais,

José Alcides Barbosa

Mirza Aparecida de Queiroz Barbosa

Às minhas irmãs,

Flávia Queiroz Barbosa

Fernanda Queiroz Barbosa

Fabiana Queiroz Barbosa

À minha noiva,

Liliane Mendonça Ornelas

Agradecimentos

Em primeiro lugar aos meus pais, José Alcides e Mirza, às minhas irmãs Flávia, Fernanda e Fabiana, e à minha noiva, Liliane, pelo amor e incentivo. Sem vocês, com certeza, eu não teria chegado até aqui.

À família da minha noiva, Dona Rose, Seu Juscelino, Luciana, Netinho, Nandinho e Vitor e Ana Luiza, que aprendi a considerar também meus familiares.

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

Aos meus grandes amigos, Carlão e Guilherme. Vocês fizeram a distância da minha família ser menos dolorosa durante esse tempo que estive em Florianópolis.

À turma 2004 que apesar ser constituída de pessoas muito diferentes acabou se tornando a melhor turma com quem eu já convivi.

Aos companheiros de projeto Poletto, Julio, Pedro, Sergio, Cesar, Rodolfo e Vitor pela amizade, companhia e troca de experiências.

Às turmas 2003, 2005 e 2006 pelo clima interpessoal agradável dentro do Labmetro.

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.

Aos professores do Labmetro pela competência, paciência e dedicação.

À Rosana, pelo seu profissionalismo.

A todos os funcionários do Labmetro e da Fundação CERTI por esses anos de convívio.

Sumário

LISTA DE FIGURAS.....	9
LISTA DE TABELAS.....	13
RESUMO	15
ABSTRACT	16
LISTA DE ABREVIATURAS.....	17
1 INTRODUÇÃO.....	18
1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO	18
1.2 IMPORTÂNCIA DO TRABALHO.....	19
1.3 OBJETIVO DE TRABALHO	20
1.4 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	21
2 ENSAIOS DE DESEMPENHO DE COMPRESSORES HERMÉTICOS DE REFRIGERAÇÃO.....	23
2.1 DEFINIÇÕES	23
2.2 GENERALIDADES	25
2.3 GRANDEZAS ELÉTRICAS EM ENSAIOS DE DESEMPENHO DE COMPRESSORES.....	26
2.4 MEDIÇÃO DE POTÊNCIA CONSUMIDA E CAPACIDADE DE REFRIGERAÇÃO.....	28
3 MEDIÇÃO DE GRANDEZAS ELÉTRICAS EM BAIXA TENSÃO	30
3.1 DEFINIÇÕES PARA MEDIÇÃO DE POTÊNCIA	30
3.2 COMPARAÇÃO DE ALGUNS SISTEMAS DE MEDIÇÃO DE POTÊNCIA	33
3.3 COMPARAÇÃO DE ALGUNS SISTEMAS DE MEDIÇÃO DE TENSÃO.....	39
3.4 COMPARAÇÃO DE ALGUNS SISTEMAS DE MEDIÇÃO DE CORRENTE	44

3.5	CONSIDERAÇÕES SOBRE OS SISTEMAS DE MEDIÇÃO ANALISADOS	48
4	DESENVOLVIMENTO DE SISTEMAS DE MEDIÇÃO	51
4.1	CONFIGURAÇÃO DA MEDIÇÃO EM CONJUNTO DE TENSÃO E CORRENTE	51
4.2	DETERMINAÇÃO DOS VALORES DOS RESISTORES DOS DIVISORES E <i>SHUNTS</i>	53
4.2.1	<i>Resistores dos transdutores CA</i>	53
4.2.2	<i>Resistores dos transdutores CC</i>	55
4.3	CIRCUITO ELETRÔNICO DOS SISTEMAS DE MEDIÇÃO	56
4.3.1	<i>Sistema de medição de tensão e corrente CA</i>	58
4.3.2	<i>Sistema de medição de tensão e corrente CC</i>	61
4.4	FONTES DE INCERTEZA DOS SISTEMAS DE MEDIÇÃO	63
4.4.1	<i>Incerteza do sensor resistivo (divisor e shunt)</i>	64
4.4.1.1	Ruído térmico	64
4.4.1.2	Deriva térmica dos resistores	64
4.4.1.3	Deriva temporal dos resistores	65
4.4.1.4	Tensão termelétrica	66
4.4.2	<i>Incertezas do circuito eletrônico</i>	66
4.4.2.1	Tensão e corrente de <i>bias</i>	66
4.4.2.2	Offset e deriva (<i>drift</i>)	67
4.4.2.3	Efeito da temperatura	67
4.4.2.4	Ruído de entrada	67
4.4.2.5	Não-linearidade	68
4.4.3	<i>Incertezas da placa de aquisição de sinais</i>	68
4.4.3.1	Resolução e erro de quantização	69
4.4.3.2	Ruído da placa de aquisição de sinais	70
4.4.3.3	Erro de linearidade da placa de aquisição de sinais	70
4.5	BALANÇO DE INCERTEZAS DOS SISTEMAS DE MEDIÇÃO	71
4.6	PROBLEMAS ENCONTRADOS	80

4.6.1	<i>Capacitância nos fios dos resistores do divisor</i>	80
4.6.2	<i>Descontinuidades provocadas pela variação da temperatura</i>	82
4.6.3	<i>Circulação de ar sobre os resistores do divisor</i>	83
4.6.4	<i>Aquecimento dos resistores por efeito Joule</i>	84
4.6.5	<i>Resistência de isolamento de equipamentos e instrumentos isolados do terra</i>	85
5	COMPORTAMENTO METROLÓGICO DOS SISTEMAS DE MEDIÇÃO	
	ANALISADOS	89
5.1	CALIBRAÇÃO DOS SISTEMAS DE MEDIÇÃO.....	89
5.1.1	<i>Balanço de incertezas das calibrações</i>	89
5.1.2	<i>Padrão de tensão e corrente</i>	90
5.2	ENSAIOS E CALIBRAÇÕES DOS SISTEMAS DE MEDIÇÃO ANALISADOS.....	91
5.2.1	<i>Análise dos sistemas de medição de tensão</i>	91
5.2.2	<i>Análise dos sistemas de medição na medição de corrente</i>	95
5.2.3	<i>Análise dos sistemas de medição na medição de potência</i>	103
5.3	ENSAIOS ADICIONAIS DOS SISTEMAS DE MEDIÇÃO DESENVOLVIDOS.....	107
5.3.1	<i>Ensaio do coeficiente de temperatura</i>	107
5.3.2	<i>Ensaio em frequência</i>	110
5.4	INFLUÊNCIA DA MEDIÇÃO DE GRANDEZAS ELÉTRICAS NA INCERTEZA DA	
	BANCADA DE ENSAIOS	112
5.4.1	<i>Potência consumida</i>	112
5.4.2	<i>Capacidade de refrigeração</i>	113
5.4.3	<i>Coefficiente de performance</i>	115
6	CONCLUSÕES E PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS	117
6.1	CONCLUSÕES	117
6.2	PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS	119
	REFERÊNCIAS	121

A	APÊNDICE 1 – TABELAS DE BALANÇO DE INCERTEZAS DOS SISTEMAS DESENVOLVIDOS.....	127
B	APÊNDICE 2 - PROGRAMAS DE MEDIÇÃO DE TENSÃO, CORRENTE E POTÊNCIA	142
B.1	MEDIÇÃO CA	142
B.2	MEDIÇÃO CC.....	145
C	APÊNDICE 3 – CALIBRAÇÃO DOS SISTEMAS DE MEDIÇÃO	150
C.1	CALIBRAÇÃO DO SISTEMA DE MEDIÇÃO DESENVOLVIDO.....	158
C.2	CALIBRAÇÃO DO TRANSDUTOR DA FONTE AGILENT-6812B	171
C.3	CALIBRAÇÃO DO WT130	177
C.4	CALIBRAÇÃO DO WATTÍMETRO 2480E	183
C.5	CALIBRAÇÃO DO TRANSDUTOR DA FONTE AGILENT-6030A	184
C.6	MULTÍMETRO DIGITAL HP-34401A	188

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 2.1 – CIRCUITO DE REFRIGERAÇÃO UTILIZANDO MÉTODO DO CALORÍMETRO A SECO [1]	24
FIGURA 3.1 – TRANSDUTOR DE POTÊNCIA ATIVA OM10	34
FIGURA 3.2 – TRANSDUTOR DE POTÊNCIA PWT	34
FIGURA 3.3 – MEDIDOR DE GRANDEZAS ELÉTRICAS 2480E	35
FIGURA 3.4 – WATTÍMETRO WT130	35
FIGURA 3.5 – FONTE AGILENT-6812B	36
FIGURA 3.6 – FONTE AGILENT-6030A	36
FIGURA 3.7 – RESISTORES CADDOCK PARA DIVISOR RESISTIVO	39
FIGURA 3.8 – DIVISOR RESISTIVO DE TENSÃO	39
FIGURA 3.9 – MULTÍMETRO DIGITAL AGILENT-34401A	40
FIGURA 3.10 – TRANSDUTOR DE TENSÃO RMS, OM9	41
FIGURA 3.11 – RESISTOR <i>SHUNT</i> VISHAY VFP-4 COM MEDIÇÃO A QUATRO FIOS	44
FIGURA 3.12 – TRANSDUTOR DE CORRENTE POR EFEITO HALL AGILENT-1146A	45
FIGURA 3.13 – ESQUEMA DE LIGAÇÃO DO MULTÍMETRO DIGITAL HP-34401A ...	49
FIGURA 4.1 – CONFIGURAÇÃO PARA MEDIÇÃO SIMULTÂNEA DE TENSÃO E CORRENTE	52
FIGURA 4.2 – DIVISOR RESISTIVO COM SELEÇÃO DE FAIXAS NA MEDIÇÃO DE TENSÃO	54
FIGURA 4.3 – SELEÇÃO DE FAIXAS NA MEDIÇÃO DE CORRENTE	54
FIGURA 4.4 – IMPORTÂNCIA DA ISOLAÇÃO DO SINAL DE UM SENSOR	57
FIGURA 4.5 – CIRCUITO ELETRÔNICO DO SISTEMA DE MEDIÇÃO DE TENSÃO CA	60
FIGURA 4.6 – CIRCUITO ELETRÔNICO DO SISTEMA DE MEDIÇÃO DE CORRENTE CA	61
FIGURA 4.7 – CIRCUITO ELETRÔNICO DO SISTEMA DE MEDIÇÃO DE TENSÃO CC	62
FIGURA 4.8 – CIRCUITO ELETRÔNICO DO SISTEMA DE MEDIÇÃO DE CORRENTE CC	63
FIGURA 4.9 – TENSÃO TERMELÉTRICA EM MEDIÇÃO DE PEQUENOS SINAIS	66
FIGURA 4.10 – MODELO DA TENSÃO E CORRENTE DE <i>BIAS</i>	66
FIGURA 4.11 – MODELO DA TENSÃO E CORRENTE DE <i>OFFSET</i>	67
FIGURA 4.12 – MODELO DA TENSÃO DE RUÍDO DE ENTRADA	68

FIGURA 4.13 – ERRO DE QUANTIZAÇÃO E RESOLUÇÃO DE UM CONVERSOR A/D IDEAL	69
FIGURA 4.14 – NÃO-LINEARIDADES DE UM CONVERSOR A/D: (A) INL; (B) DNL [37].....	71
FIGURA 4.15 – INCERTEZA DE MEDIÇÃO DE TENSÃO CA, RELATIVO AO VALOR MEDIDO, COM AUTO-ZERO.....	76
FIGURA 4.16 – INCERTEZA DE MEDIÇÃO DE TENSÃO CA, RELATIVO AO VALOR MEDIDO, SEM AUTO-ZERO.....	76
FIGURA 4.17 – INCERTEZA DE MEDIÇÃO DE CORRENTE CA, RELATIVO AO VALOR MEDIDO, COM AUTO-ZERO	77
FIGURA 4.18 – INCERTEZA DE MEDIÇÃO DE CORRENTE CA, RELATIVO AO VALOR MEDIDO, SEM AUTO-ZERO	77
FIGURA 4.19 – INCERTEZA DE MEDIÇÃO DE TENSÃO CC, RELATIVO AO VALOR INDICADO, COM AUTO-ZERO.....	78
FIGURA 4.20 – INCERTEZA DE MEDIÇÃO DE TENSÃO CC, RELATIVO AO VALOR INDICADO, SEM AUTO-ZERO.....	78
FIGURA 4.21 – INCERTEZA DE MEDIÇÃO DO CORRENTE CC, RELATIVO AO VALOR MEDIDO, COM AUTO-ZERO	79
FIGURA 4.22 INCERTEZA DE MEDIÇÃO DO CORRENTE CC, RELATIVO AO VALOR MEDIDO, SEM AUTO-ZERO.....	79
FIGURA 4.23 – FOTO DO SISTEMA DE MEDIÇÃO COM FIOS EM PARALELO COM RESISTORES DO DIVISOR	82
FIGURA 4.24 – DESCONTINUIDADE NA MEDIÇÃO DE TENSÃO COM A VARIAÇÃO DE TEMPERATURA.....	82
FIGURA 4.25 – DESCONTINUIDADE NA MEDIÇÃO DE CORRENTE COM A VARIAÇÃO DE TEMPERATURA	83
FIGURA 4.26 – VARIAÇÃO DO VALOR INDICADO DEVIDO AO AR-CONDICIONADO.....	83
FIGURA 4.27 – ESTABILIZAÇÃO DOS RESISTORES POR EFEITO JOULE	84
FIGURA 4.28 – DIFERENÇA NA ESTABILIZAÇÃO DOS RESISTORES DO DIVISOR	85
FIGURA 4.29 – TENSÃO MEDIDA NA SAÍDA DA FONTE AGILENT-6812B COM DIVISOR RESISTIVO E FLUKE-8508A.....	86
FIGURA 4.30 – CIRCUITO EQUIVALENTE NA MEDIÇÃO DA TENSÃO NA SAÍDA DA FONTE AGILENT-6812B COM DIVISOR RESISTIVO	87
FIGURA 4.31 – CIRCUITO EQUIVALENTE DA MEDIÇÃO DA TENSÃO NA SAÍDA DA FONTE AGILENT-6812B COM DIVISOR RESISTIVO ATERRADO	88
FIGURA 5.1 – MULTÍMETRO DE REFERÊNCIA FLUKE-8508A	91
FIGURA 5.2 – COMPARAÇÃO DOS DADOS DE CATÁLOGO DOS SISTEMAS DE MEDIÇÃO DE TENSÃO CA ANALISADOS	92
FIGURA 5.3 – COMPARAÇÃO DA CALIBRAÇÃO DOS SISTEMAS DE MEDIÇÃO DE TENSÃO CA ESTUDADOS.....	93

FIGURA 5.4 – COMPARAÇÃO DOS DADOS DE CATÁLOGO DOS SISTEMAS DE MEDIÇÃO DE TENSÃO CC ANALISADOS	93
FIGURA 5.5 – COMPARAÇÃO DA CALIBRAÇÃO DOS SISTEMAS DE MEDIÇÃO DE TENSÃO CC ESTUDADOS	95
FIGURA 5.6 – COMPARAÇÃO DAS ESPECIFICAÇÕES DE CATÁLOGO DOS SISTEMAS DE MEDIÇÃO DE CORRENTE CA ANALISADOS.....	96
FIGURA 5.7 – COMPARAÇÃO DA CALIBRAÇÃO DOS SISTEMAS DE MEDIÇÃO DE CORRENTE CA ANALISADOS	96
FIGURA 5.8 – COMPARAÇÃO ENTRE OS DOIS MELHORES RESULTADOS DE CALIBRAÇÃO DOS SISTEMAS ANALISADOS.....	96
FIGURA 5.9 – GRÁFICO DE ERRO MÁXIMO NA MEDIÇÃO DE CORRENTE CA DO TRANSDUTOR DA FONTE AGILENT-6812B, FAIXA DE (0.5 A 1.0) A	98
FIGURA 5.10 – GRÁFICO DE ERRO MÁXIMO DO SISTEMA DE MEDIÇÃO DE CORRENTE CA, FAIXA DE 0.5 A	99
FIGURA 5.11 – PARETO DE COMPARAÇÃO ENTRE AS FONTES DE INCERTEZAS DAS CALIBRAÇÕES DE CORRENTE CA NOS PONTOS DE 0.15 A E 0.25 A	99
FIGURA 5.12 – DIFERENÇA ENTRE OS VALORES INDICADOS NA MEDIÇÃO DE CORRENTE CA DOS MULTÍMETROS DE REFERÊNCIA FLUKE-8508A DO LABMETRO E DA ELETROSUL	100
FIGURA 5.13 – COMPARAÇÃO DA INCERTEZA ESPECIFICADA PARA MEDIÇÃO DE CORRENTE CC EM CATÁLOGO DOS SISTEMAS ANALISADOS	101
FIGURA 5.14 – COMPARAÇÃO DO ERRO MÁXIMO NA MEDIÇÃO DE CORRENTE CC DA CALIBRAÇÃO DOS SISTEMAS DE MEDIÇÃO ANALISADOS.....	101
FIGURA 5.15 – COMPARAÇÃO DO ERRO MÁXIMO NA MEDIÇÃO DE CORRENTE CC DA CALIBRAÇÃO DOS SISTEMAS DE MEDIÇÃO ANALISADOS (DOIS MELHORES RESULTADOS).....	102
FIGURA 5.16 – GRÁFICO DE ERRO MÁXIMO DO SISTEMA DESENVOLVIDO DE MEDIÇÃO DE CORRENTE CC, FAIXA DE 1.15 A A 2.35 A, COM AUTO-ZERO	102
FIGURA 5.17 – GRÁFICO DE ERRO MÁXIMO NA MEDIÇÃO DE CORRENTE CC DO TRANSDUTOR DA FONTE AGILENT-6812B, FAIXA DE (0.1 A 0.5) A	103
FIGURA 5.18 – INCERTEZAS DE CATÁLOGO DE TODOS OS SISTEMAS DE MEDIÇÃO DE POTÊNCIA CA COM TENSÃO DE ALIMENTAÇÃO DE 115 V E FATOR DE POTÊNCIA UNITÁRIO.....	105
FIGURA 5.19 – INCERTEZAS DE CATÁLOGO DE TODOS OS SISTEMAS DE MEDIÇÃO DE POTÊNCIA CA COM TENSÃO DE ALIMENTAÇÃO DE 220 V E FATOR DE POTÊNCIA UNITÁRIO.....	105
FIGURA 5.20 – INCERTEZAS DE CATÁLOGO PARA MEDIÇÃO DE POTÊNCIA CC DOS SISTEMAS DE MEDIÇÃO ANALISADOS.....	106
FIGURA 5.21 – INCERTEZAS DE CATÁLOGO PARA MEDIÇÃO DE POTÊNCIA CC DO SISTEMA DESENVOLVIDO E DO HP-34401A.....	106
FIGURA 5.22 – COMPORTAMENTO DO SISTEMA DE MEDIÇÃO CA DESENVOLVIDO COM A VARIAÇÃO DE TEMPERATURA	107

FIGURA 5.23 – COMPORTAMENTO DO SISTEMA DE MEDIÇÃO CC DESENVOLVIDO COM A VARIAÇÃO DE TEMPERATURA	108
FIGURA 5.24 – VARIAÇÃO DA TENSÃO DO DIVISOR RESISTIVO COM A VARIAÇÃO DE TEMPERATURA	109
FIGURA 5.25 – VARIAÇÃO DA TENSÃO DO <i>SHUNT</i> COM A VARIAÇÃO DE TEMPERATURA	110
FIGURA 5.26 – DISTRIBUIÇÃO DOS VALORES INDICADOS DA CAPACIDADE DE REFRIGERAÇÃO COM SISTEMA DE MEDIÇÃO DE POTÊNCIA ATUAL	114
FIGURA 5.27 – DISTRIBUIÇÃO DOS VALORES INDICADOS DA CAPACIDADE DE REFRIGERAÇÃO COM SISTEMA DE MEDIÇÃO DE POTÊNCIA DESENVOLVIDO.....	114
FIGURA 5.28 – DISTRIBUIÇÃO DOS VALORES INDICADOS DA CAPACIDADE DE REFRIGERAÇÃO UTILIZANDO O MÉTODO F	115

LISTA DE TABELAS

TABELA 1.1 – FONTES DE INCERTEZA DE MEDIÇÃO [1]	20
TABELA 1.2 – MÁXIMAS INCERTEZAS ESPECIFICADAS POR NORMA	21
TABELA 2.1 – COMBINAÇÕES POSSÍVEIS DE MÉTODOS SEGUNDO ISO 917 [1]....	26
TABELA 2.2 – LIMITES DE VARIAÇÃO DAS GRANDEZAS DE INTERESSE IMPOSTOS PELAS NORMAS.....	27
TABELA 3.1 – COMPARAÇÃO DOS SISTEMAS DE MEDIÇÃO DE POTÊNCIA ANALISADOS	38
TABELA 3.2 – COMPARAÇÃO DOS SISTEMAS DE MEDIÇÃO DE TENSÃO ANALISADOS	43
TABELA 3.3 – COMPARAÇÃO DOS SISTEMAS DE MEDIÇÃO DE CORRENTE ANALISADOS	47
TABELA 4.1 – ENSAIO DA MEDIÇÃO DE TENSÃO EM VÁRIAS FREQUÊNCIAS COM FIOS EM PARALELO COM OS RESISTORES DO DIVISOR.....	80
TABELA 4.2 – MEDIÇÕES DE IMPEDÂNCIA DO RESISTOR DE 10 MΩ DO DIVISOR	81
TABELA 4.3 – MEDIÇÕES DE IMPEDÂNCIA DO RESISTOR DE 275 KΩ DO DIVISOR	81
TABELA 5.1 – BALANÇO DE INCERTEZAS UTILIZADO NAS CALIBRAÇÕES DOS INSTRUMENTOS ENSAIADOS	90
TABELA 5.2 – TABELA UTILIZADA PARA APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS DA CALIBRAÇÃO.....	90
TABELA 5.3 – CALIBRAÇÃO DA MEDIÇÃO DE CORRENTE CA DO TRANSDUTOR DA FONTE AGILENT-6812B, FAIXA DE (0.5 A 1.0) A	98
TABELA 5.4 – CALIBRAÇÃO DO SISTEMA DE MEDIÇÃO DE CORRENTE CA, FAIXA DE 0.5 A	99
TABELA 5.5 – ENSAIO EM FREQUÊNCIA DO SISTEMA DE MEDIÇÃO DE TENSÃO CA UTILIZANDO A CHAVE ELETRÔNICA MPC509.....	110
TABELA 5.6 – ENSAIO EM FREQUÊNCIA DO SISTEMA DE MEDIÇÃO DE CORRENTE CA UTILIZANDO A CHAVE ELETRÔNICA MPC509.....	111
TABELA 5.7 – ENSAIO EM FREQUÊNCIA DO SISTEMA DE MEDIÇÃO DE TENSÃO CA SEM A CHAVE ELETRÔNICA MPC509.....	111
TABELA 5.8 – ENSAIO EM FREQUÊNCIA DO SISTEMA DE MEDIÇÃO DE CORRENTE CA SEM A CHAVE ELETRÔNICA MPC509.....	111
TABELA 5.9 – VALORES DAS VARIÁVEIS NA CONDIÇÃO DE ENSAIO ANALISADA	112
TABELA 5.10 – COMPARAÇÃO DO RESULTADO DA MEDIÇÃO DA POTÊNCIA CONSUMIDA.....	113

TABELA 5.11 – COMPARAÇÃO DO RESULTADO DA MEDIÇÃO DE CAPACIDADE DE REFRIGERAÇÃO	114
TABELA 5.12 – COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS DO COP, MÉTODO C	116
TABELA 5.13 – COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS DO COP, MÉTODO F	116

RESUMO

O ensaio de desempenho é um dos mais importantes meios de avaliação de um compressor, tanto no desenvolvimento, quanto no controle de qualidade. Os principais resultados obtidos nos ensaios são a capacidade de refrigeração, a potência consumida e o coeficiente de performance. Mesmo normatizados e largamente empregados tais ensaios atualmente geram resultados aquém do desejado. Os ensaios são demorados – é comum que ensaios levem mais de quatro horas – e apresentam incerteza de medição muito elevada frente aos desafios atuais do mercado globalizado de refrigeração. O resultado é que tais ensaios acabam não satisfazendo às necessidades dos setores de P&D e nem mesmo do controle de qualidade das empresas. Este trabalho é parte de um projeto de aprimoramento de uma bancada de ensaios visando reduzir a incerteza de medição. Uma das componentes que mais contribuem na composição da incerteza do ensaio são as grandezas elétricas. Em particular, este trabalho foca a medição de tais grandezas. São analisados vários sistemas de medição de potência disponíveis no mercado. A falta de uma solução pronta, adequada em termos de custos e de incertezas, levou ao desenvolvimento de um sistema próprio, específico para o caso. Dentre várias concepções analisadas, o emprego de *shunts*, divisores resistivos e aquisição e processamento de valores instantâneos automatizados mostrou-se a mais adequada. Um protótipo foi implementado. Análises teórica e experimental – através de calibrações e ensaios – foram feitas para avaliar metrologicamente a concepção adotada e o protótipo desenvolvido. O resultado foi o alcance de significativa redução na incerteza dos ensaios, mesmo empregando instrumentos mais baratos, o que demonstrou o pleno alcance dos objetivos propostos.

ABSTRACT

Performance test is one of the most important activities for compressor evaluation in product development and quality control. Some relevant results of these tests are capacity of refrigeration, power consumption and coefficient of performance. Despite these tests have been run in conformance to standards worldwide, the results currently obtained are far from the state-of-art in metrology. Normally these tests are very time consuming taking more than four hours to complete carrying high measurement uncertainties which do not satisfy the global refrigeration market. These results mostly do not satisfy the research and development neither the quality control processes in industry. This dissertation is part of a project to improve a compressor test bench aiming on reduction of measurement uncertainty. The electrical quantities are among the most contributing components in the measurement uncertainty of performance tests results. In particular, this dissertation focuses the measurement of such quantities. Some power measurement systems available in the market are analyzed. The non-availability of a market solution which was adequate in terms of costs and uncertainties led to the development of a specific measurement system. Among the analyzed conceptions, the use of current shunts, resistive voltage dividers and automated acquisition and processing of instantaneous values was revealed the most adequate. A prototype was implemented and analyzed theoretically and experimentally - through calibrations and tests – for metrological confirmation. A significant reduction in the uncertainty of compressors performance tests was reached even using low cost instruments. The obtained results fully agree with the stated objectives of this dissertation.

Lista de Abreviaturas

ASHRAE	<i>American Society of Heating, Refrigerating and Air-conditioning Engineers</i>
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
COP	<i>Coefficient of Performance</i>
P&D	Pesquisa e Desenvolvimento
CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
VI	Valor Indicado
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
THD	<i>Total Harmonic Distortion</i>
FFM	Final da Faixa de Medição
FP	Fator de Potência
TP	Transformador de Potencial
TC	Transformador de Corrente
A/D	Analógico para digital
VIM	Vocabulário Internacional de Termos Fundamentais e Gerais de Metrologia
INL	<i>Integral Nonlinearity</i>
DNL	<i>Differential Nonlinearity</i>
LSB	Bit Menos Significativo (<i>Lower significant bit</i>)

1 INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização

A sociedade em geral apresenta grande dependência de algumas tecnologias criadas pelo homem com a finalidade de lhe trazer comodidade e conforto. Dentre essas tecnologias estão os sistemas de refrigeração em geral, os quais têm forte impacto sobre a vida da sociedade.

Os sistemas de refrigeração mais comuns encontrados na sociedade são equipamentos condicionadores de ar, refrigeradores e *freezers*. Esses sistemas estão em todos os setores (comercial, residencial e industrial). É até razoável a hipótese de que cada residência e estabelecimento comercial ou industrial possua pelo menos um sistema de refrigeração, acompanhado de um compressor [1].

Devido a essa tamanha demanda por compressores, existem grandes grupos empresariais atuando nesse nicho mercadológico. A grande competitividade faz com que as exigências de qualidade aumentem, sendo necessários investimentos em pesquisa e desenvolvimento (P&D) e em métodos para evidenciar resultados. No caso dos compressores um poderoso instrumento de auxílio à P&D e ao controle de qualidade são as bancadas de ensaio de desempenho.

Naturalmente, todas as empresas fabricantes de compressor apresentam os resultados dos ensaios de desempenho em seus catálogos. Porém, existem várias formas de ensaio de compressores, cada qual com seus resultados. A discrepância entre os resultados dos ensaios das diversas empresas fez surgir a necessidade de criação de normas regulamentadoras para padronizar os métodos de ensaio e conseqüentemente normatizar o resultado especificado em catálogo, facilitando o trabalho de projetistas e usuários de sistemas de refrigeração. Nos ensaios de desempenho de compressores de refrigeração as duas normas mais frequentemente utilizadas pela indústria são a “ISO 917 – *Testing of refrigerant compressors*” [2] e a

“ANSI/ASHRAE 23-2005: *Methods of testing for rating positive displacement refrigerant compressors and condensing units*” [3].

1.2 Importância do trabalho

As bancadas de ensaios utilizadas atualmente, mesmo utilizando métodos previstos por normas, geram resultados aquém do desejado. Os ensaios são muito demorados – é comum que ensaios levem mais de quatro horas – e apresentam baixa repetitividade. Dessa forma, as seguidas necessidades de repetição de ensaios que atualmente ocorrem por falta de confiabilidade, implicam desperdício de recursos.

Poletto [1] realizou um trabalho de aprimoramento de uma bancada de ensaios de desempenho visando baixar as incertezas e, com isso, melhorar a repetitividade e confiabilidade dos resultados. Em seu trabalho, Poletto conseguiu reduzir a incerteza de 3.2% para 1.1% na medição do COP (Coeficiente de Performance); de 1.8% para 0.6% na medição da Capacidade de Refrigeração; e de 0.9% para 0.6% na medição de potência consumida para uma condição específica utilizada na indústria (as pressões de sucção e descarga equivalentes às pressões de saturação do refrigerante para as temperaturas de -23.3 °C e $+54.4\text{ °C}$).

Tal trabalho implementou os métodos C, F e G previstos nas normas [2] e [3]. A tabela 1.1 apresenta as fontes de incerteza na bancada de ensaios do trabalho de Poletto [1]. São apresentados apenas os métodos C – calorímetro a seco e F – fluxo de massa na fase líquida, devido ao método G – balanço de energia no condensador – apresentar resultados com uma incerteza associada muito elevada.

Tabela 1.1 – Fontes de incerteza de medição [1]

Método de medição	C		F	
Capacidade de refrigeração (W)	205			
Fator de perdas - calorímetro (W/°C)	0.28	7.7%		0.0%
Fator de perdas - condensador (W/°C)		0.0%		0.0%
Fluxo de massa - água (g/s)		0.0%		0.0%
Fluxo de massa - refrigerante (g/s)		0.0%	0.20	16.0%
Potência CC - calorímetro (W)	1.70	46.8%		0.0%
Pressão de entrada do calorímetro (bar)	0.001	0.0%		0.0%
Pressão de entrada do condensador (bar)		0.0%		0.0%
Pressão de saída do calorímetro (bar)	0.009	0.2%		0.0%
Pressão de saída do condensador (bar)		0.0%		0.0%
Pressão de sucção (bar)	0.85	23.4%	0.85	68.0%
Temperatura ambiente do calorímetro (°C)	0.05	1.4%		0.0%
Temperatura ambiente do condensador (°C)		0.0%		0.0%
Temperatura da sucção (°C)	0.20	5.5%	0.20	16.0%
Temperatura de entrada da água (°C)		0.0%		0.0%
Temperatura de entrada do calorímetro (°C)	0.21	5.8%		0.0%
Temperatura de entrada do condensador (°C)		0.0%		0.0%
Temperatura de saída da água (°C)		0.0%		0.0%
Temperatura de saída do calorímetro (°C)	0.28	7.7%		0.0%
Temperatura de saída do condensador (°C)		0.0%		0.0%
Temperatura superficial do calorímetro (°C)	0.05	1.4%		0.0%
COP				
	1.5			
Capacidade de refrigeração (W)	2.7	75.5%	0.2	18,6%
Potência consumida (W)	0.6	24.5%	0.6	81.4%

1.3 Objetivo de trabalho

O objetivo global deste trabalho é reduzir ainda mais incerteza de medição de uma bancada de ensaios de desempenho de compressores iniciadas no trabalho de Poletto.

Como mostrado na tabela 1.1, a medição de grandezas elétricas é uma das fontes de incertezas mais significativas no processo de ensaio de desempenho. O objetivo específico do trabalho é melhorar a medição de grandezas elétricas, especificamente a medição de potência elétrica CC e CA.

As normas ISO 917 e ASHRAE 23-2005 impõem alguns requisitos relacionados aos transdutores a serem utilizados na bancada de ensaios. A norma ASHRAE 23-2005 especifica os transdutores em função do seu erro máximo. Já a norma ISO 917 especifica os medidores em função do seu desvio padrão. Os valores podem ser vistos na tabela 1.2.

Tabela 1.2 – Máximas incertezas especificadas por norma

	ISO 917	ASHRAE 23-2005
Grandeza	desvio padrão	erro máximo
Diferença de temperaturas		$\pm 1,0\%$ 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%	$\pm 1.0\%$ VI
Demais pressões	2.0%	$\pm 1.0\%$ VI
Fluxo de massa (fase líquida)	1.0%	$\pm 1.0\%$ VI
Fluxo de massa (fase gasosa)	2.0%	$\pm 1.0\%$ VI
Potência elétrica	1.0%	$\pm 1.0\%$ VI
Tempo	0.1%	$\pm 0.5\%$ intervalo

Como pode ser visto, a menor incerteza especificada por norma é $\pm 1.0\%$. Porém, para aplicação em pesquisa e desenvolvimento (P&D) as exigências são mais rígidas. Para que o resultado de pequenas alterações em um compressor seja identificado, são necessárias incertezas menores. Essa exigência é o ponto de partida desse trabalho.

A Embraco, empresa financiadora desse trabalho, apresentou a exigência de a incerteza na medição da potência consumida pelo compressor ser menor que 0.2%, e como o ideal de 0.1%. A origem dessa exigência é a incerteza na medição de fluxo de massa no método F - fluxo de massa na fase líquida – de medição da capacidade de refrigeração, como pode ser visto na tabela 1.1, é de 0.2 g/s, correspondendo a 0.1% do valor medido.

Para a medição de potência CC, a incerteza exigida foi a mesma para a potência CA, partindo do princípio que medições CA são mais complicadas que CC. Padrões primários de potência CA são conseguidos através de padrões de transferência CA-CC, no qual a potência dissipada em um resistor por uma tensão senoidal é comparada com a potência média dissipada no mesmo resistor por uma tensão CC [4].

1.4 Estrutura da dissertação

O capítulo 2 apresenta uma breve explicação sobre bancadas de ensaios de desempenho de compressores, apresentando os métodos de ensaio previstos em norma. É dada uma ênfase

especial à medição de grandezas elétricas, relacionando-as ao resultado do ensaio. São apresentadas também as alterações realizadas na bancada de ensaios antes do presente trabalho.

O capítulo 3 detalha teoricamente a medição de potência elétrica, mostrando como deve ser o tratamento para medições mesmo quando com variáveis não-senoidais. Além disso, são apresentados sistemas de medição disponíveis no mercado para realizar tal medição. A viabilidade da medição de potência a partir de medições de tensão e corrente por transdutores separados também é analisada.

O capítulo 4 apresenta o projeto de um sistema de medição utilizando transdutores estudados no capítulo 3, que foram julgados viáveis para a aplicação. Neste capítulo são listadas e detalhadas as fontes de incerteza e apresentados o balanço e a incerteza total do instrumento desenvolvido. Alguns problemas encontrados durante a confecção do sistema de medição são citados.

O capítulo 5 compara tanto os dados de catálogo, quanto o resultado da calibração dos transdutores escolhidos para ensaio, inclusive o transdutor desenvolvido. Aproveitando o resultado da comparação é realizada uma análise da incerteza da bancada de ensaio caso o transdutor com melhor resultado fosse implantado.

O capítulo 6 apresenta as conclusões deste trabalho e as propostas para trabalhos futuros.

2 ENSAIOS DE DESEMPENHO DE COMPRESSORES HERMÉTICOS DE REFRIGERAÇÃO

Vários métodos podem ser utilizados para o ensaio de compressores de refrigeração. Porém, as normas ISO 917 [2] e ASHRAE 23-2005 [3] limitam os métodos admissíveis. Essas normas também definem a máxima incerteza permitida para os transdutores utilizados e, em alguns casos, as faixas nas quais determinada grandeza deve permanecer ao longo do ensaio de desempenho dos compressores.

Vários são os resultados dos ensaios de desempenho de compressores, porém os resultados de maior importância para a Embraco são a capacidade de refrigeração, a potência consumida pelo compressor e o coeficiente de performance (COP). A capacidade de refrigeração indica a potência de refrigeração de um determinado compressor sobre um determinado sistema de refrigeração. A potência consumida é a medida da potência absorvida pelo compressor em uma determinada condição de operação. O COP, coeficiente de performance, é a razão entre a capacidade de refrigeração e a potência consumida pelo compressor.

2.1 Definições

Capacidade de refrigeração é dada pela equação (2.1). Consiste no produto entre a vazão mássica de refrigerante e a diferença das entalpias de entrada e saída do calorímetro. Esse valor é igual à potência fornecida para manter o equilíbrio térmico dentro de um calorímetro ideal [3].

$$\Phi_0 = q_{mf} \cdot (h_{g2} - h_{f2}) \quad (2.1)$$

onde: Φ_0 : capacidade de refrigeração;

q_{mf} : fluxo de massa de refrigerante;

h_{g2} : entalpia na saída do calorímetro;

h_{f2} : entalpia na entrada do calorímetro.

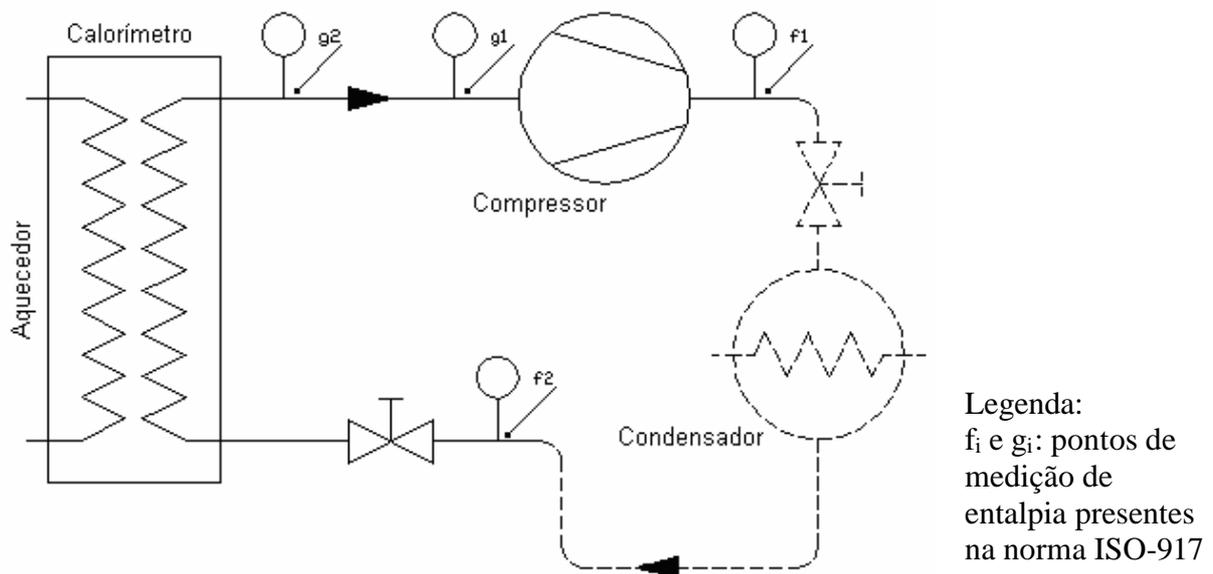


Figura 2.1 – Circuito de refrigeração utilizando método do calorímetro a seco [1]

Calorímetro é um dispositivo inserido no circuito capaz de controlar a vazão de refrigerante no sistema e também medir o fluxo de massa que passa através dele [1]. Nessa dissertação o calorímetro também será chamado de trocador de calor. Entalpia é a energia associada ao estado da substância, principalmente em função da sua temperatura. Seu valor é dado pela soma da energia interna com o produto de pressão e volume da substância.

A potência consumida (P) é a potência ativa na entrada do compressor [5]. Todos os dispositivos auxiliares, tais como inversores de frequência, capacitores e relés, devem estar conectados. Assim, a medição de consumo é mais fidedigna, pois a potência consumida, além do compressor, envolve também os dispositivos necessários para o seu funcionamento.

O coeficiente de performance (COP) é a razão da capacidade de refrigeração e a potência consumida. É uma medida do rendimento do compressor.

2.2 Generalidades

Uma das principais diferenças entre as diversas montagens possíveis para realizar o ensaio dos compressores é a forma de medição do fluxo de massa de refrigerante. Em todos os métodos são necessários alguns dispositivos capazes de manipular as condições de contorno do ensaio em torno do compressor: pressões de sucção e descarga e temperatura do refrigerante na entrada do compressor. Existem várias formas de se controlar essas grandezas, sendo as mais comuns o uso de válvulas e o controle da troca de calor no condensador [1].

Os métodos de ensaio previstos nas normas são:

- Método A: balanço de energia no calorímetro de fluido secundário.
- Método B: balanço de energia no calorímetro inundado.
- Método C: balanço de energia no calorímetro a seco.
- Métodos D1 e D2: medição de fluxo de massa na fase gasosa.
- Método F: medição do fluxo de massa na fase líquida.
- Método G: balanço de energia no condensador.
- Método J: balanço de energia na mistura do refrigerante condensado e o não condensado.
- Método K: balanço de energia no calorímetro na linha de descarga.

Os métodos utilizados na bancada de ensaios atual são o método C, o F e o G. Como apresentado no Capítulo 1, o método G não será utilizado devido à grande incerteza associada a seus resultados.

A descrição de cada método pode ser encontrado nas referências [1], [2] e [3]. Nessas referências além do circuito de refrigeração para cada método, são encontrados uma descrição detalhada, os pontos de medição das grandezas de interesse e equações para o cálculo das variáveis desejadas.

Tanto a norma ISO 917 quanto a ASHRAE 23-2005 exigem que a medição de vazão seja realizada pelo menos duas vezes, simultaneamente e por sistemas de medição independentes, para que ao final do ensaio os resultados possam ser analisados, sendo os mesmos rejeitados caso haja discrepância entre seus valores. A norma ASHRAE 23-2005 permite que haja repetição de método, desde que os sistemas de medição operem independentemente. Já a ISO 917 exige que os métodos sejam diferentes, e ainda limita os métodos que podem ser combinados. A tabela 2.1 apresenta as combinações possíveis de métodos, segundo a norma ISO 917.

Tabela 2.1 – Combinações possíveis de métodos segundo ISO 917 [1]

Método primário	Métodos permitidos
A	D1, D2, F, G, K
B	D1, D2, F, G, K
C	D1, D2, F, G, K
D1	A, B, C, D2, F, G, J, K
D2	A, B, C, D1, F, J
F	A, B, C, D1, D2, J, K
G	A, B, C, D1, F, J
J	D1, D2, F, G, K
K	A, B, C, D1, F, J

2.3 Grandezas elétricas em ensaios de desempenho de compressores

A medição e o controle de grandezas elétricas em ensaios de compressores é fundamental, posto que o COP, a quantificação do rendimento do compressor, é a razão entre duas grandezas nas quais esse tipo de grandeza tem influência bastante significativa. Por isso, grandezas elétricas em ensaios de compressores devem ter uma atenção especial.

Além das especificações exigidas pelas normas, apresentadas na tabela 1.2, tanto a ISO 917 quanto a ASHRAE 23-2005 impõem limites quanto à variação das grandezas de interesse. Naturalmente, as grandezas elétricas estão entre elas: tensão e frequência de alimentação e flutuações na potência entregue ao calorímetro ou condensador. A tabela 2.2 apresenta as limitações impostas pelas duas normas.

Tabela 2.2 – Limites de variação das grandezas de interesse impostos pelas normas

Grandeza	ISO 917	ASHRAE 23-2005
Tensão de alimentação	± 1.0% do valor especificado	± 3.0% do valor especificado
Frequência de alimentação	± 1.0% do valor especificado	± 1.0% do valor especificado
Pressão de sucção		± 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
Número mínimo de medidas	3	
Tempo de teste		1 h
Volume específico do refrigerante de sucção		± 2.0% do valor especificado
Flutuações nas potências entregues ao calorímetro ou ao condensador não devem variar a capacidade de refrigeração mais que		± 1.0 %
Perdas em calorímetros ou condensadores		5 W

Esses limites foram impostos devido à necessidade de se definir o regime permanente do compressor, apesar de algumas dessas grandezas serem fixas desde o início do ensaio. A interpretação da tabela 2.2 poderia ser a máxima variação das grandezas em 1 hora de ensaio (tempo de teste nessa tabela). Essa imposição tem influência direta, visto que o resultado é a média das “n” medições realizadas ao longo do ensaio. Quanto maior a variação das grandezas, menos confiável e exato será o resultado.

Relacionado a grandezas elétricas, algumas alterações foram feitas na bancada de ensaio de desempenho de compressores atualmente disponível no Labmetro. A finalidade das alterações é diminuir a faixa de variação dessas grandezas durante o ensaio. Em vez de usar a rede elétrica para alimentar o compressor, foi utilizada uma fonte de tensão CA realimentada –Agilent-6812B [6] – garantindo a estabilidade da tensão de alimentação e da frequência (0.01% + 10 μ Hz).

Em relação às flutuações nas potências entregues ao calorímetro ou ao condensador, a alimentação CA originada da rede elétrica e controlada por um varivolt foi substituída por uma fonte CC – fonte Agilent-3060A [7]. A garantia da tensão da fonte é feita pela realimentação, porém a faixa de variação dessa grandeza é dependente do sistema de refrigeração da bancada de ensaios e do compressor. A fonte CC é acionada pelo sistema de controle da bancada de ensaios. Quanto mais estável for o sistema de refrigeração, menores

serão as alterações na tensão de saída da fonte e conseqüentemente menores as flutuações durante o ensaio.

Essas alterações nos sistemas de alimentação de grandezas elétricas da bancada de ensaios foram realizadas no trabalho de Poletto [1].

2.4 Medição de potência consumida e capacidade de refrigeração

A medição da potência consumida durante o ensaio é feita nos terminais de alimentação do compressor. A medição é realizada uma vez a cada cinco segundos. O resultado final é a média das medições realizadas ao longo do ensaio. Normalmente é utilizado wattímetro para realizar tal medição. Algumas exigências devem ser citadas quanto à medição da potência consumida pelo compressor:

- desejável medição de tensão de até 300 V RMS, necessário até 250 V RMS;
- medição de corrente de até 5.0 A RMS;
- deve ser protegido contra sobre-tensão de até 300 V RMS;
- a medição de potência deve considerar sinais com até a 50ª harmônica;
- desejável medição de fator de potência.

A medição de capacidade é feita através da equação (2.1). De acordo com a equação, a capacidade de refrigeração é dependente do fluxo de massa de refrigerante e das entalpias de entrada e de saída do calorímetro. A medição do fluxo de massa é definida de acordo com o método de ensaio utilizado. No método F – fluxo de massa na fase líquida – o fluxo de massa é medido diretamente com um transdutor apropriado. No método C – calorímetro a seco – o fluxo de massa é dado pela equação (2.2).

$$q_{mf} = \frac{F_h + F_1 \cdot (t_a - t_c)}{h_{g2} - h_{f2}} \quad (2.2)$$

onde: q_{mf} : fluxo de massa de refrigerante;

f_h : potência entregue;

F_1 : fator de perda do calorímetro;

t_a : temperatura ambiente do calorímetro;

t_c : temperatura média da superfície interna do calorímetro;

h_{g2} : entalpia na saída do calorímetro;

h_{f2} : entalpia na entrada do calorímetro.

O fator de perdas, as temperaturas ambiente e de superfície do calorímetro e as entalpias foram devidamente detalhadas no trabalho de Poletto [1]. Neste trabalho, atenção especial será dada à medição de potência. Para a aplicação ao calorímetro o sistema de medição de potência CC deverá cobrir a faixa de (0 a 300) V e (0.0 a 5.0) A.

3 MEDIÇÃO DE GRANDEZAS ELÉTRICAS EM BAIXA TENSÃO

Este capítulo apresenta as formas usuais de medição de potência para o estudo da melhor forma de medição CA e CC para a aplicação à bancada de ensaio de desempenho de compressores. São apresentados, além de sistemas de medição disponíveis no mercado, sistemas que podem ser construídos utilizando teorias de circuitos elétricos.

3.1 Definições para medição de potência

As definições e equações usadas hoje para medições em sistemas de potência comuns, tais como potência ativa, reativa e aparente são as mesmas desde a década de 1940 [8]. Quando essas definições foram desenvolvidas, as cargas existentes eram motores, lâmpadas incandescentes e outras cargas lineares. Porém, grandes mudanças aconteceram a partir da década de 1950. Equipamentos eletrônicos, conversores de frequência, computadores pessoais e outras cargas não-lineares foram introduzidos nos sistemas de potência causando distorção nas formas de onda de tensão e corrente [8], [9], [10], [11]. Essas distorções, além de causar efeitos indesejáveis no sistema de potência, causam erros significativos na instrumentação tradicional, projetada para situações em que a forma de onda é senoidal [9].

O termo “potência ativa total” vem sendo usado para se referir à potência ativa, como definida no IEEE *Standard Dictionary*, que, além da potência ativa fundamental, define a potência ativa harmônica, resultado de formas de onda de tensão e corrente distorcidas [10].

A IEEE *Standard 1459-2000* resumida em [8] apresenta algumas recomendações para a medição de potência em condições não-senoidais. Alguns novos conceitos também são criados por esse documento. Essas definições estão descritas a seguir.

- Potência ativa [W]: a equação (3.1) descreve o cálculo da potência ativa. A equação apresenta essa potência como sendo a média da potência instantânea, que por sua vez, é o produto da tensão e corrente instantâneas.

$$P = \frac{1}{kT} \int_t^{t+kT} p(t) dt \quad (3.1)$$

onde: P : é a potência ativa [W];

kT : é o tempo de medição [s];

t : é o instante de tempo do início da medição [s];

$p(t)$: é a potência instantânea, definida como $p(t) = v(t) \times i(t)$ [W].

- Potência reativa [var]: a equação (3.2) apresenta a fórmula para o cálculo da potência reativa.

$$Q = \frac{1}{2p} \int_t^{t+kT} i(t) \left[\int v(t) dt \right] dt \quad (3.2)$$

onde: Q : é a potência reativa [var];

kT : é o tempo de medição [s];

t : é o instante de tempo do início da medição [s];

$i(t)$: é a corrente instantânea [A];

$v(t)$: é a tensão instantânea [V].

- Potência aparente [VA]: a potência aparente é definida como o produto da tensão e corrente eficaz.

$$S = V_{RMS} \times I_{RMS} \quad (3.3)$$

onde: S : é a potência aparente [VA];

V_{RMS} : é a tensão eficaz do sistema em medição [V];

I_{RMS} : é a corrente eficaz do sistema em medição [A].

- Fator de potência: o fator de potência caracteriza o grau de utilização da potência consumida pelo equipamento e é definido como a razão entre potência ativa e potência aparente.

$$PF = \frac{P}{S} \quad (3.4)$$

onde: PF : é o fator de potência;

P : é a potência ativa consumida [W];

S : é a potência aparente do equipamento [VA].

- Distorção harmônica total (THD): representa o grau de distorção da forma de onda. A distorção harmônica é calculada pelas equações (3.5) e (3.6).

$$THD_V = \frac{V_H}{V_1} \quad (3.5)$$

$$THD_I = \frac{I_H}{I_1} \quad (3.6)$$

onde: THD_V : é a distorção harmônica da tensão;

V_H : é o valor eficaz das harmônicas do sinal de tensão;

V_1 : é o valor eficaz da fundamental do sinal de tensão;

THD_I : é a distorção harmônica da corrente;

I_H : é o valor eficaz das harmônicas do sinal de corrente;

I_1 : é o valor eficaz da fundamental do sinal de corrente.

- Potência não-ativa [var]: é a potência entregue que não que não é aproveitada. No caso de formas de onda senoidais, a potência não-ativa é igual à potência reativa. A equação (3.7) apresenta o cálculo da potência não-ativa.

$$N = \sqrt{S^2 - P^2} \quad (3.7)$$

onde: N : é a potência não-ativa [var];

S : potência aparente [VA];

P : potência ativa [W].

A referência [8] ainda apresenta outras definições que não são úteis para o desenvolvimento deste trabalho: potência ativa fundamental [W], potência reativa fundamental [var], potência aparente não-fundamental [VA], potência da distorção na corrente [var], potência da distorção na tensão [var], potência aparente harmônica [VA], potência da distorção harmônica [var] e outras definições para sistemas trifásicos.

3.2 Comparação de alguns sistemas de medição de potência

A definição de potência ativa é fundamental para o cálculo da potência consumida pelo compressor, dado utilizado como resultado no ensaio de desempenho de compressores. O cálculo da potência ativa, mostrado na equação (3.1), é a média da potência instantânea, que por sua vez é calculada pelo produto da tensão e corrente instantâneas. A medição de tensão e corrente devem ser feitas no mesmo instante, caso contrário haverá erro na medição da potência.

A medição de potência CC é mais simples. Em sistemas nos quais a tensão e a corrente são estáveis, não é expressamente necessária a medição da tensão e da corrente instantânea. Logicamente, quanto menor o intervalo entre as medições de tensão e corrente mais exato será o resultado da potência. A potência CC é calculada apenas pela multiplicação dos valores de tensão e corrente.

Para as medições de potência, podem ser utilizados sistemas prontos que utilizam internamente os algoritmos de medição apresentados. Algumas formas de medição de potência são mostradas na tabela 3.1. A tabela é utilizada para a análise dos sistemas de medição tanto para medição de potência CA quanto CC. Dentre os sistemas de medição analisados estão:

- **OM10 [12]:** mede apenas potência CA e apresenta um grande problema, sua frequência de trabalho é de apenas 60 Hz ou 400 Hz. Não é apresentada em catálogo a incerteza desse sistema de medição trabalhando em frequências maiores ou com sinais com alto índice de distorção harmônica. Essa especificação é fundamental no ensaio de desempenho de compressores, no qual mesmo a tensão sendo senoidal pura a corrente apresenta um espectro de frequência com componentes acima do especificado para esses transdutores.



Figura 3.1 – Transdutor de potência ativa OM10

- **PWT [13]:** apresenta os mesmos problemas apresentados pelo OM10. Porém, não possui a opção de frequência de 400 Hz.



Figura 3.2 – Transdutor de potência PWT

- **2480E [14]:** mede apenas potência CA. Sua frequência de trabalho, ao contrário dos dois sistemas de medição anteriores, atende o previsto para a aplicação. Porém, esse transdutor apresenta algumas deficiências: seu catálogo não apresenta a faixa de temperatura de validade do erro máximo e o coeficiente de temperatura. Utiliza transformador de potencial e transformador de corrente como métodos de medição de tensão e corrente.



Figura 3.3 – Medidor de grandezas elétricas 2480E

- **WT130 [15]:** pode ser utilizado tanto em medições CA quanto em CC. Dependendo da tensão e corrente a serem medidas, esse instrumento pode ser uma boa opção. Todos os demais instrumentos utilizam apenas uma faixa de medição enquanto o WT130 utiliza várias faixas para medição de tensão e corrente. Esse instrumento é o utilizado hoje nos processos da Embraco. Por isso, é de grande importância que este instrumento faça parte do trabalho de escolha do método mais adequado para medição de potência.



Figura 3.4 – Wattímetro WT130

- **Transdutor da fonte Agilent-6812B [6]:** capaz de medir grandezas CA e CC. Devido à utilização dessa fonte no projeto, e devido à boa qualidade de seus transdutores, eles foram incluídos nessa comparação. Essa fonte apresenta dois canais para medições, sendo um deles é obrigatoriamente utilizado pela fonte para sua regulação e proteção, e o outro utilizado para a finalidade que exigir a aplicação, no caso do presente trabalho, a medição da potência CC do trocador de calor. Apesar de esse transdutor medir potência CC, tal especificação não pode ser encontrada em catálogo. Apenas é especificada a medição de tensão CC. Para efeito de comparação, admitiu-se que a medição de potência CC apresente um erro máximo na mesma ordem das medições CA. O coeficiente de temperatura também não é especificado.



Figura 3.5 – Fonte Agilent-6812B

- **Transdutor da fonte Agilent-6030A [7]:** mede apenas tensão e corrente CC. A potência no caso desses transdutores é conseguida pelo produto dessas duas medições. Esses transdutores, a exemplo da fonte Agilent-6812B são utilizados na sua regulação e proteção. Para melhor análise desse transdutor será incluído nos itens 3.3 e 3.4.



Figura 3.6 – Fonte Agilent-6030A

- **Compostos de transdutores de tensão e corrente:** dependendo do projeto, o uso de transdutores de tensão e corrente para medição de potência pode ser uma boa

opção. Projetos dedicados, desenhados para atender uma aplicação específica, podem apresentar melhores resultados que os melhores transdutores encontrados no mercado. A medição de potência CC é facilmente conseguida pela multiplicação direta das medições de tensão e corrente. Para medições CA, o uso da equação (3.1) e das definições apresentadas nesse item é essencial. Esses sistemas de medição serão analisados nos itens 3.3 e 3.4.

Tabela 3.1 – Comparação dos sistemas de medição de potência analisados

Transdutor	OM10	PWT	2480E	WT130	Transdutor fonte Agilent-6812B	Transdutor fonte Agilent-6030A	Transdutores de tensão e corrente
Fabricante	Omega	Moore Industries	Ciber do Brasil	Yokogawa	Agilent	Agilent	Diversos
Medição de potência CA	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Não	Sim
Medição de potência CC	Não	Não	Não	Sim	Sim	Sim	Sim
Medição de fator de potência	Não	Sim	Sim	Sim	Sim	Não	Sim
Erro máximo (AC)	± 0.2% FFM	± 0.2% VI	± (0.14% VI + 0.07% FFM)	± (0.25% VI + 0.1% FFM)*	± (0.1% VI + 0.3 W + 1.2 mW/V)	---	item 3.2 e 3.3
Erro máximo (CC)	---	---	---	± (0.3% VI + 0.3% FFM)**	N.E.	± (0.08% VI + 0.08) V ± (0.36% VI + 0.015) A	item 3.2 e 3.3
Erro máximo (FP)	---	± 0.01% FFM	± 0.01 FP ou ± 0.2°	± 0.25% FFM*	0.01	---	item 3.2 e 3.3
Temperatura de validade do erro máximo	N.E.	(25 ± 2) °C	N.E.	(23 ± 5) °C	(25 ± 5) °C	(25 ± 5) °C	item 3.2 e 3.3
Coefficiente de temperatura	N.E.	0.005%/°C	N.E.	± 0.03% FFM / °C	N.E.	± (50 ppm + 12 mV)/°C ± (100 ppm + 3 mA)/°C	item 3.2 e 3.3
Validade das especificações	1 ano	1 ano	1 ano	3 meses	1 ano	1 ano	item 3.2 e 3.3
Faixa de medição	120 V ou 240 V 5 A	120 V ou 240 V 5 A	150 V, 300 V ou 600V 6,0 A ou 7.5 A	15/30/60/150/300/600 V 0.5/1/2/5/10/20 A	300 V 6.5 A	200 V 17 A	item 3.2 e 3.3
Faixa de frequência	60 Hz ou 400 Hz	60 Hz	(50 a 3050) Hz	(0 a 20) kHz	(0 a 3) kHz	CC	item 3.2 e 3.3
Sinal de saída	(0 a 1) mA CC ou (4 a 20) mA CC	(-1 a 1) mA, (- 10 a 10) mA, (4 a 20) mA, (1 a 5) V ou (-5 a + 5) V	RS-485	Valor indicado/GPIB	Valor indicado/GPIB	Valor indicado/GPIB	item 3.2 e 3.3
Isolação	Sim	Sim	Sim	Sim	---	---	item 3.2 e 3.3
Custo	US\$ 445,00		R\$ 1200,00	R\$ 8000,00			item 3.2 e 3.3

Legenda:

* Válida para a faixa de (45 a 66) Hz.

** Adicionar 0.2% FFM para faixas de corrente de 0.5 A e 1 A.

VI: Valor indicado.

FFM: Final da faixa de medição.

N.E.: Não especificado.

3.3 Comparação de alguns sistemas de medição de tensão

Este item apresenta uma comparação de transdutores de tensão que serão aplicados caso se apresentem como melhor opção, juntamente com transdutores de corrente, para medição de potência CA e CC no painel de ensaio de desempenho de compressores.

A tabela 3.2 detalha a comparação entre os transdutores estudados. Abaixo estão descritas as principais características dos sistemas analisados.

- **Divisor resistivo:** pode ser utilizado na medição tanto de tensão CA quanto CC com baixíssimos valores de incerteza, que depende basicamente da estabilidade ao longo do tempo e do coeficiente de temperatura dos resistores. A referência [16] apresenta um sistema de medição de potência no qual a medição de grandezas elétricas apresentou erro máximo de 0.1% e erro de fase menor que 3×10^{-3} rad em uma faixa de frequência de 7 kHz. Esse sistema de medição de tensão é um divisor resistivo, construído com um sistema eletrônico para isolamento do sinal e cinco faixas de medição.

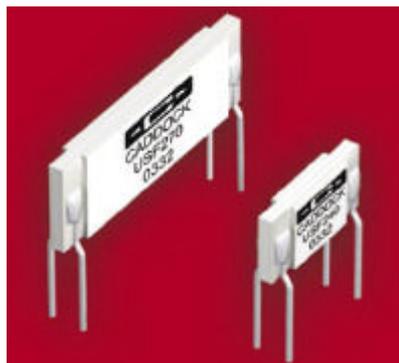
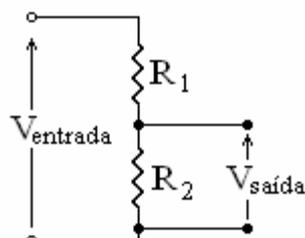


Figura 3.7 – Resistores CADDOCK para divisor resistivo



Legenda:

V_{entrada} : tensão de entrada do divisor resistivo.

$V_{\text{saída}}$: tensão de saída do divisor resistivo.

R1: resistor da alta tensão do divisor resistivo.

R2: resistor da baixa tensão do divisor resistivo.

Figura 3.8 – Divisor resistivo de tensão

- **DMM HP-34401A [17]:** pode ser utilizado para medição tanto CA quanto CC, porém com a finalidade de medição de potência apenas a medição CC pode ser aproveitada. A medição de tensão CA não fornece os valores instantâneos, fornece apenas o RMS. A incerteza especificada em catálogo para medição de tensão CC é a melhor dentre os sistemas analisados.



Figura 3.9 – Multímetro digital Agilent-34401A

- **Transdutor da fonte Agilent-6030A:** como a fonte é de tensão CC, o seu transdutor foi projetado apenas para medição de tensão CC. Este transdutor só poderá ser utilizado quando essa fonte for usada para o aquecimento dos resistores do trocador de calor.
- **Transdutor da fonte Agilent-6812B:** pode ser utilizado tanto para CA quanto para CC. Como apresentado no item 3.2, essa fonte apresenta a possibilidade de medição por dois canais, um para controle da própria fonte e outro para medições adicionais. A incerteza especificada em catálogo apresenta tanto para tensão CA e CC quanto para corrente, além da parcela dependente do valor medido, uma parcela fixa. Essa parcela é bastante significativa, acentuando-se ainda mais à medida que se aproxima do início da faixa de medição. Essa é a única especificação para grandezas CC apresentada no catálogo. A faixa de frequência atende à aplicação prevista.
- **Transformador de potencial:** não pode ser utilizado na medição de tensão CC, e apresenta algumas deficiências na medição de tensão CA. A referência [18]

apresenta ensaios de transformadores de potencial que apresentou erros consideráveis com a variação da frequência. Os resultados de um dos ensaios de transformador de potencial mostraram um espectro de frequência variável, tanto para a amplitude do sinal quanto para a fase. Esse comportamento não satisfaz a medição de potência CA, que depende tanto da fase quanto da amplitude do sinal.

- **Transdutor de tensão OM9:** não pode ser utilizado pois não apresenta em sua saída os valores instantâneos da tensão. Como não é possível medir tensão CC, este transdutor não pode ser utilizado na medição de nenhuma das aplicações previstas. Sua incerteza especificada em catálogo é 0.2% do valor indicado, mas não é apresentada a faixa de temperatura de validade do erro máximo e também não apresenta coeficiente de temperatura, o que torna imprevisível os valores de erro máximo que seriam conseguidas caso fosse possível implantá-lo.



Figura 3.10 – Transdutor de tensão RMS, OM9

- **WT130:** pode ser utilizado para medição de tensão CA e CC, porém caso esse seja o melhor método, não será medido apenas tensão, mas potência CA e/ou CC. Apesar da especificação de erro máximo ser um pouco mais alta que a dos demais sistemas de medição, esse instrumento trabalha com diversas faixas de medição.

Isso pode torná-lo melhor que outros instrumentos quando esses trabalham no início da faixa de medição.

- **2480E:** utilizado apenas em medições CA. O método utilizado para medição de tensão é um transformador de potencial. A incerteza especificada em catálogo, quando a faixa de medição é bem aproveitada, pode ser uma boa opção. Porém, a falta de informações, temperatura de validade do erro máximo e coeficiente de temperatura, tornam o sistema imprevisível.

Tabela 3.2 – Comparação dos sistemas de medição de tensão analisados

Sistema de medição	Divisor Resistivo	DMM 34401A	Transdutor fonte Agilent-6030A	Transdutor fonte Agilent 6812B	Transformador de potencial (TP)	OM9	WT130	2480E
Fabricante	CADDOCK	Agilent	Agilent	Agilent	Qualquer	Omega	Yokogawa	Ciber do Brasil
Medição de sinais instantâneos	Sim	Não	Não	Sim	Sim	Não	Sim	Sim
Medição de tensão CC	Sim	Sim	Sim	Sim	Não	Não	Sim	Não
Inserir erro de fase	Não	---	---	Não	Sim	N.E.	N.E.	N.E.
Erro máximo	(+ 0.030 ± 0.030)%	± 0.0045% VI ± 0.0010% FFM	± (0.08% VI + 0.08) V	CC: ± (0.05% VI + 0.15) V CA: ± (0.03% + 0.10) V	0.3% FFM	0.2% VI	CC: ± (0.2% VI + 0.2% FFM) V CA** : ± (0.15% + 0.1% FFM) V	± (0.1% VI + 0.05% FFM)
Temperatura de validade do erro máximo	(- 40 a + 85) °C	(23 ± 5) °C	(25 ± 5) °C	(25 ± 5) °C		N.E.	(23 ± 5) °C	N.E.
Coefficiente de temperatura	2 ppm/°C	± 0.0005% VI ± 0.0001% FFM	± (50 ppm + 12 mV)/°C	N.E.		N.E.	± 0.03% FFM / °C	N.E.
Validade das especificações	1 ano	1 ano	1 ano	1 ano	1 ano	1 ano	3 meses	1 ano
Faixa de medição	Configurável	100 / 1000 V	200 V	CC: 425 V CA: 300 V	Vários valores	150 V ou 300 V	15/30/60/150/300/600 V	150 V, 300 V ou 600 V
Faixa de frequência	(0 a 3) kHz	0 Hz (CC)	0 Hz (CC)	(0 a 3) kHz	60 Hz	50 / 60 Hz ou 400 Hz	(0 a 20) kHz	(0 a 3) kHz
Sinal de saída	Tensão (configurável)	Valor indicado / GPIB	Valor indicado / GPIB	Valor indicado / GPIB	Tensão (Vários valores)	(0 a 1) mA ou (4 a 20) mA	Valor indicado/GPIB	RS-485
Isolação	Sim*	Sim	---	N.E.	Sim	Sim	Sim	Sim
Custo aproximado	US\$ 60.00	US\$ 1200.00				US\$ 520.00	R\$ 8,000.00	R\$ 1,200.00

Legenda:

* Utilizando circuito eletrônico de isolamento.

** Válida para a faixa de (45 a 66) Hz.

VI: Valor indicado.

FFM: Final da faixa de medição.

N.E.: Não especificado.

3.4 Comparação de alguns sistemas de medição de corrente

Este item apresenta uma comparação de alguns métodos de medição de corrente. Assim como no item 3.2, os transdutores serão analisados segundo a sua aplicação, podendo ser utilizados na medição de potência CA ou CC.

A tabela 3.3 apresenta a comparação dos transdutores analisados. Alguns detalhes sobre cada transdutor serão dados a seguir.

- **Shunts:** pode ser utilizado para medição de corrente CA e CC. Dependendo da aplicação, a faixa de medição de corrente CC vai de alguns miliampères a centenas de ampères. A medição de corrente CA inclui correntes senoidais puras, correntes complexas e pulsadas ou até transientes de corrente [19]. Uma atenção especial sempre é dada para o tipo de material e o seu comportamento com a temperatura do *shunt*. Outro fator que influencia sensivelmente é a eletrônica utilizada para proteger os sistemas de aquisição de sinais. Um sistema de aquisição de qualidade também é importante um baixo erro máximo nesse tipo de medição.

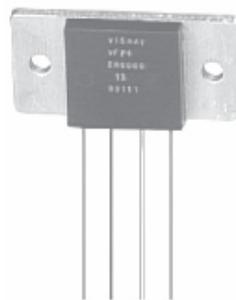


Figura 3.11 – Resistor *shunt* Vishay VFP-4 com medição a quatro fios

- **Ponteira de efeito hall Agilent-1146A [20]:** medições de corrente na faixa de 0 Hz a 100 kHz. Porém, a incerteza de medição é bastante alta, $\pm (3\% + 50 \text{ mA})$. Além disso, altera a fase do sinal em até 1.5° para sinais com frequências de até 65 Hz. O catálogo não apresenta essa especificação para frequências maiores, mas

acredita-se ser maior quanto maior a frequência. O erro de fase é uma especificação insignificante na medição de potência CC, porém é um fator crítico em medições de potência CA.



Figura 3.12 – Transdutor de corrente por efeito hall Agilent-1146A

- **DMM HP-34401A:** mede corrente CA e CC, mas para medição de potência apenas o CC é aproveitável. O sistema de medição não mede valores instantâneos, apresentando em sua saída apenas o valor RMS. Além disso, esse sistema é limitado em 3 A na medição de corrente, a não ser que seja adquirido um sistema adicional para medições de correntes de até 10 A.
- **Transdutor da fonte Agilent-6030A:** mede apenas corrente CC. Apresenta um problema: possui apenas uma faixa de medição e extensa (17 A). Trabalhando no início da faixa de medição de corrente, a incerteza especificada será bastante alta.
- **Transdutor da fonte Agilent-6812B:** mede corrente CA e CC. É parte integrante de um sistema de medição de potência acoplado a uma fonte CA. Trabalha com dois canais: um para regulação e proteção da própria fonte, e outro canal para medições complementares. Pode ser utilizada para medição da potência consumida pelo compressor e potência dissipada nas resistências do trocador de calor em um mesmo sistema de medição.
- **Transformadores de corrente:** mede apenas corrente CA. O TC converte a corrente do primário em uma pequena corrente no secundário. Por causa da

corrente de magnetização, o TC apresenta tipicamente um erro de fase de (0.1 a 0.3)°, que quando na medição de potência envolvendo fatores de potência muito baixos pode apresentar erros consideráveis [21]. Samesima [18] realizou ensaios com um transformador 30:5 em uma ampla faixa de frequência utilizando a corrente correspondente a 50% da faixa de medição. Os resultados obtidos foram que, ao contrário do transformador de potencial, obteve um comportamento linear até 50 kHz. Embora a faixa de frequência seja grande, a faixa de frequência do transformador de corrente apresentada na tabela 3.3 está como (50 a 3000) Hz, faixa desejada para a aplicação.

- **WT130:** mede corrente CA e CC. É parte integrante de um sistema de medição de potência. O princípio utilizado para a medição de corrente é resistor *shunt*. Ao contrário dos demais sistemas de medição, o WT130 apresenta várias faixas de medição, bem distribuídas na faixa de corrente que será utilizada no painel de ensaio de desempenho de compressores. Esse fato é importante quando se trata de incerteza de medição.
- **2480E:** mede apenas corrente CA. Apesar de bastante boa incerteza de medição, o catálogo não apresenta alguns dados essenciais para o cálculo da incerteza, coeficiente de incerteza e faixa de temperatura de validade do erro máximo.

Tabela 3.3 – Comparação dos sistemas de medição de corrente analisados

Sistema de medição	Shunt	Ponteira de Efeito Hall	DMM 34401A	Transdutor fonte Agilent-6030A	Transdutor fonte Agilent-6812B	Transformador de corrente (TC)	WT130	2480E
Fabricante	VISHAY	Agilent	Agilent	Agilent	Agilent	Qualquer	Yokogawa	Ciber do Brasil
Medição de sinais instantâneos	Sim	Sim	Não	Não	Sim	Sim	Sim	Sim
Medição de tensão CC	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Não	Sim	Não
Insere erro de fase	Não	Sim	---	---	Não	Sim	N.E.	N.E.
Erro máximo	$\pm 0.05\% \text{ VI}$	$3\% \text{ VI} + 50 \text{ mA}$	$1 \text{ A: } \pm 0.1\% \text{ VI} \pm 0.01\% \text{ FFM}$ $3 \text{ A: } 0.12\% \text{ VI} \pm 0.02\% \text{ FFM}$	$\pm (0.36\% \text{ VI} + 0.015) \text{ A}$	CC: N.E. CA: $\pm (0.05\% \text{ VI} + 0.0015) \text{ A}$	0.3% FFM	CC**: $\pm (0.2\% \text{ VI} + 0.2\% \text{ FFM}) \text{ A}$ CA***: $\pm (0.15\% + 0.1\% \text{ FFM}) \text{ A}$	$\pm (0.1\% \cdot \text{VI} + 0.05\% \cdot \text{FFM})$
Temperatura de validade do erro máximo	25 °C	(23 ± 5) °C	(23 ± 5) °C	(25 ± 5) °C	(25 ± 5) °C		(23 ± 5) °C	N.E.
Coefficiente de temperatura	25 ppm/°C	0.2%/°C	$\pm 0.005\% \text{ VI} \pm 0.002\% \text{ FFM}$	$\pm (100 \text{ ppm} + 3 \text{ mA})/\text{°C}$	N.E.		$\pm 0.03\% \text{ FFM} / \text{°C}$	N.E.
Validade das especificações	1 ano	1 ano	1 ano	1 ano	1 ano	1 ano	3 meses	1 ano
Faixa de medição	Configurável	(0,05 a 10) A (pico)	1 / 3 A	17 A	CC: 5.0 A CA: 6.5 A	Vários valores	0.5/1.0/2.0/5.0/10/20 A	6.0 A ou 7.5 A
Faixa de frequência	(0 a 3) kHz	(0 a 100) kHz	0 Hz (CC)	0 Hz (CC)	(0 a 3) kHz	(50 a 3000) Hz	(0 a 20) kHz	(0 a 3) kHz
Sinal de saída	Tensão (configurável)	Tensão (100 mV/A)	Valor indicado / GPIB	Valor indicado / GPIB	Valor indicado / GPIB	Corrente (Vários valores)	Valor indicado/GPIB	RS-485
Isolação	Sim*	Sim	Sim	---	N.E.	Sim	Sim	Sim
Custo aproximado	\$30.00		\$1,200.00				R\$ 8,000.00	R\$ 1,200.00

Legenda:

* Utilizando circuito eletrônico de isolação.

** Adicionar 0.2% FFM para faixas de corrente de 0.5 A e 1 A.

*** Válida apenas para a faixa de (45 a 66) Hz.

VI: Valor indicado.

FFM: Final da faixa de medição.

N.E.: Não especificado.

3.5 Considerações sobre os sistemas de medição analisados

Comparados teoricamente os sistemas de medição, este trabalho se propõe a fazer ensaios práticos para melhor caracterização dos sistemas analisados. Alguns desses sistemas não foram incluídos nos ensaios práticos, visto que, como mostrado nas tabelas 3.1, 3.2 e 3.3, apresentam características comportamentais não satisfatórias, tais como erro de fase ou faixa de frequência menor que 3 kHz.

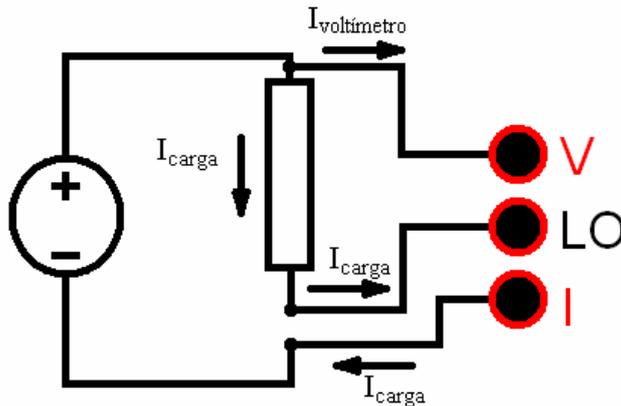
Devido à facilidade de instalação e manipulação, seria ideal a utilização de sistemas de medição que apresentem alguma interface de comunicação digital com computadores pessoais, tais como GPIB, RS-232 ou RS-485. Exemplo desses sistemas de medição são o WT130, as fontes Agilent e o DMM Agilent-34401A. Outros sistemas necessitam de sistemas de aquisição de dados adicionais, que tornam o sistema de medição mais complexo.

A análise prática dos sistemas de medição será dividida em sistemas de medição de potência CA e CC. Para medição de potência CC foram ensaiados todos os sistemas apresentados no item 3.2 capazes de realizar esse tipo de medição. Os sistemas de medição são o wattímetro WT130, os transdutores das fontes Agilent-6030A e Agilent-6812B. Além desses sistemas de medição, dentre os sistemas de medição de tensão e corrente, foram ensaiados o multímetro digital Agilent-34401A e um composto divisor resistivo e resistor *shunt*.

A figura 3.13 mostra o esquema de ligação do multímetro digital Agilent-34401A para medição de potência CC. Os contatos “V”, “LO” e “I”, são os terminais de entrada de sinal do DMM. Dessa forma, via GPIB é possível fazer medições de tensão e corrente com apenas um multímetro, sem a necessidade de comutar o circuito de potência. O resultado da medição de potência será dado pela equação (3.8).

$$P = V \times (-I) \quad (3.8)$$

Onde: P: potência CC (W);
 V: valor indicado de tensão (V);
 I: valor indicado de corrente (A).



Legenda:

$I_{\text{voltímetro}}$: corrente através da resistência interna do voltímetro (A);

I_{carga} : corrente através da carga e do amperímetro do HP-34401A (A).

Figura 3.13 – Esquema de ligação do multímetro digital HP-34401A

O esquema de ligação do divisor resistivo e do resistor *shunt* para a medição de potência CC será mostrado no Capítulo 4, onde será apresentado também o projeto de um circuito de amplificação e isolamento dos sinais desses transdutores.

No ensaio dos instrumentos de medição de potência CA foram analisados o 2480E, o WT130, o transdutor da fonte Agilent-6812B e um sistema utilizando a medição de tensão e corrente em separado. O sistema a ser analisado, assim como para o ensaio dos sistemas de medição de potência CC, será o composto divisor resistivo mais resistor *shunt*. Os demais sistemas não apresentam características desejáveis, tais como a incerteza maior que a permitida por norma para a aplicação (transdutor por efeito hall analisado), não possui a banda de frequência desejada (Transformador de potencial, OM9), apresentam erro de fase (transformador de corrente, transdutor por efeito hall, transformador de potencial) ou apresentam apenas o valor RMS como resultado impossibilitando o cálculo da potência CA.

O Capítulo 4 apresentará o projeto de um sistema de medição utilizando divisor resistivo de tensão e resistor *shunt* para medição de corrente, no qual será estabelecido o esquema de

ligação a ser utilizado para a medição de potência CA, bem como o projeto de um circuito eletrônico para amplificação e isolamento do sinal para proteção do sistema de aquisição de sinal.

4 DESENVOLVIMENTO DE SISTEMAS DE MEDIÇÃO

Este capítulo apresenta o projeto e desenvolvimento de sistemas de medição de tensão, corrente e potência, utilizando como métodos de medição o divisor resistivo e o resistor *shunt* que, dentre os métodos de medição estudados, foram identificados como as formas mais indicadas para a medição de tensão e corrente. A potência é calculada utilizando o resultado das medições de tensão e corrente.

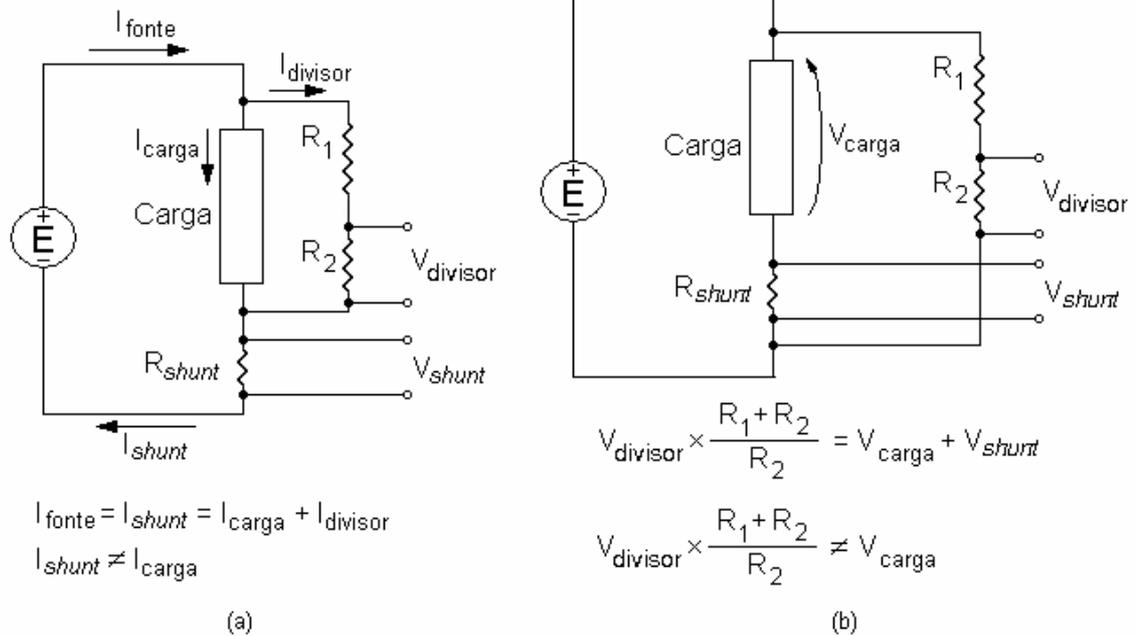
4.1 Configuração da medição em conjunto de tensão e corrente

Como o sistema de medição tem como objetivo principal a medição de potência, os transdutores de tensão e corrente devem ser utilizados em conjunto. Entretanto, as configurações possíveis de medição em conjunto inserem erros na medição de tensão ou de corrente. As configurações e erros podem ser vistos na figura 4.1.

A figura 4.1(a) mostra a configuração em que ocorre erro na medição da corrente da carga devido à presença do divisor. A corrente medida pelo *shunt* é a soma das correntes da carga e do divisor. Caso o desejado seja medir a corrente da fonte, esta configuração se torna a ideal. A medição da tensão da carga é correta devido ao divisor estar em paralelo com a mesma, eliminando a influência dos cabos de alimentação.

A figura 4.1(b) mostra a configuração em que ocorre erro na medição da tensão da carga. A tensão medida é a soma das tensões da carga e do resistor *shunt*. Nessa configuração a corrente da carga é medida corretamente.

Com aplicação de correções (utilizar a medição correta para fazer a correção da medição da grandeza sobre influência), qualquer das configurações apresentadas poderia ser utilizada. Porém em medições CA os cálculos envolveriam fasores, tornando o cálculo complexo. Isso se tornaria mais uma fonte de incerteza para o sistema de medição.



Legenda:

I_{fonte} : corrente fornecida pela fonte (A);

I_{divisor} : corrente através do divisor (A);

I_{carga} : corrente através da carga (A);

I_{shunt} : corrente através do resistor *shunt* (A);

V_{carga} : tensão sobre a carga (V);

V_{divisor} : tensão sobre o resistor da baixa tensão do divisor resistivo (V);

V_{shunt} : tensão sobre o resistor *shunt* (V);

R_1 : resistor da alta tensão do divisor resistivo (Ω);

R_2 : resistor da baixa tensão do divisor resistivo (Ω).

Figura 4.1 – Configuração para medição simultânea de tensão e corrente

Em medições CC, para evitar os erros mostrados na figura 4.1, além da possibilidade de correção, seria possível chavear a medição de tensão, desconectando o divisor do circuito quando na medição de corrente. Porém, isso implica aquecer os resistores do divisor por efeito Joule [22], [23] em cada medição, fazendo com que o resistor não entre em regime permanente, com isso inserindo erros nas medições. Em medições CA é necessário que tensão e corrente sejam medidos simultaneamente, pois o cálculo da potência envolve além da forma de onda, a defasagem entre esses sinais.

Na configuração da figura 4.1(a), poder-se-ia conviver com a influência na medição de corrente elevando-se os resistores R_1 e R_2 o suficiente para que a corrente I_{divisor} se torne uma

parcela muito pequena de I_{fonte} e fazendo com que se possa considerar $I_{\text{carga}} = I_{\text{fonte}}$. Para que se possa fazer tal consideração, a corrente I_{divisor} deve ser muito menor (por exemplo, um décimo) que a incerteza desejada na medição da corrente I_{carga} . Se é possível conviver com esse erro, evita-se outros erros que poderiam se tornar maiores no caso de correção ou chaveamento.

4.2 Determinação dos valores dos resistores dos divisores e *shunts*

4.2.1 Resistores dos transdutores CA

Como a aplicação prevista será para medição de no mínimo 50 W em 220 V CA e a incerteza desejada é de 0.1%, pode-se calcular a corrente I_{divisor} considerando o pior caso – fator de potência unitário.

$$I_{\text{carga}} = \frac{50 \text{ W}}{220 \text{ V}} = 227 \text{ mA} \quad (4.1)$$

Considerando que com a corrente I_{divisor} como 0.01% da corrente I_{carga} , tem-se:

$$I_{\text{divisor}} < 0,01\% \times I_{\text{carga}}$$

$$I_{\text{divisor}} < 22,7 \text{ mA} \quad (4.2)$$

Com a corrente máxima e com a tensão pode-se calcular os valores de R_1 e R_2 , vistos na figura 4.1.

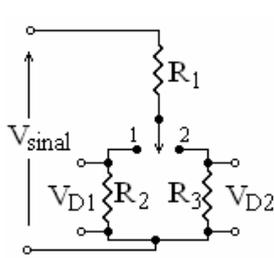
$$R_1 + R_2 > \frac{220 \text{ V}}{22,7 \cdot 10^{-6} \text{ A}}$$

$$R_1 + R_2 > 9,68 \text{ M}\Omega \quad (4.3)$$

Como são duas faixas de medição, uma para a medição de 115 V e outra para 220 V, foram calculados os resistores para finais de faixa de medição de 150 V e 250 V em condições senoidais puras. Assim, os cálculos são facilitados e o sistema de medição realiza medições de

115 V e 220 V, mesmo em condições não-senoidais. Os resistores, considerando a condição da equação (4.3) e a figura 4.2, são:

- $R_1 = 10 \text{ M}\Omega$;
- $R_2 = 500 \text{ k}\Omega$, para a faixa de medição de 150 V;
- $R_3 = 275 \text{ k}\Omega$, para a faixa de medição de 250 V.



Legenda:

V_{sinal} : tensão a ser medida (V);

V_{D1} : tensão de saída do divisor quando o relé está na posição 1 (V);

V_{D2} : tensão de saída do divisor quando o relé está na posição 2 (V);

R_1 : resistor da alta tensão do divisor resistivo (Ω);

R_2 : resistor da baixa tensão do divisor quando o relé está na posição 1;

R_3 : resistor da baixa tensão do divisor quando o relé está na posição 2;

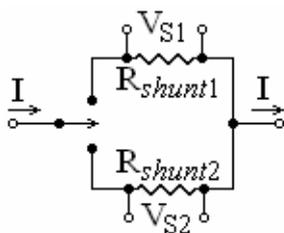
Figura 4.2 – Divisor resistivo com seleção de faixas na medição de tensão

O cálculo dos resistores foi feito de tal forma que, quando no final da faixa de medição, a tensão de pico do sinal de saída do divisor seja de + 10 V ou – 10 V, faixa de tensão da placa de aquisição utilizada na medição [24].

Para a medição de corrente CA, foram utilizados dois resistores *shunt*, comutados por um relé (figura 4.3). O chaveamento dos *shunts* ocorre de acordo com a corrente que passa por eles.

Na aplicação prevista, a máxima corrente a ser medida é 5 A. Os *shunts* selecionados foram:

- $R_{\text{shunt}1} = 0.5 \text{ }\Omega / 10 \text{ W}$, para as faixas de 0.5 A e 1.0 A;
- $R_{\text{shunt}2} = 0.1 \text{ }\Omega / 10 \text{ W}$, para as faixas de medição de 2.5 A e 5.0 A.



Legenda:

I : corrente a ser medida (A);

$R_{\text{shunt}1}$: resistor *shunt* para medição de corrente maior que 1.0 A (Ω);

$R_{\text{shunt}2}$: resistor *shunt* para medição de corrente menor que 1.0 A (Ω);

V_{S1} : tensão sobre o resistor $R_{\text{shunt}1}$ (V);

V_{S2} : tensão sobre o resistor $R_{\text{shunt}2}$ (V).

Figura 4.3 – Seleção de faixas na medição de corrente

4.2.2 Resistores dos transdutores CC

Os transdutores CC serão aplicados à bancada de ensaios para medição da potência consumida pelos resistores do trocador de calor, cuja resistência equivalente atualmente é de 80Ω . A fonte utilizada para aquecer a resistência possui uma tensão máxima de 200 V [7]. Com esses dados pode-se calcular a corrente consumida pelos resistores do trocador de calor, e também a corrente do divisor. Utilizando os mesmos argumentos do item 4.2.1, a corrente do divisor pode ser calculada como 0.01% da corrente consumida pelos resistores de aquecimento do trocador de calor.

Os cálculos são feitos para a tensão de 200 V, porém este cálculo é válido para toda a faixa de tensão, devido à carga, nesta aplicação, ser uma resistência pura.

$$I_{\text{trocador}} = \frac{200 \text{ V}}{80 \Omega} = 2,5 \text{ A} \quad (4.4)$$

$$I_{\text{divisor}} = 0,01\% \times 2,5 \text{ A} = 250 \text{ mA} \quad (4.5)$$

$$R_1 + R_2 > \frac{200}{250 \times 10^{-6}}$$

$$R_1 + R_2 > 800 \text{ k}\Omega \quad (4.6)$$

Apesar de a soma dos resistores do divisor de tensão CC exigir apenas que seja maior que $800 \text{ k}\Omega$, optou-se por utilizar resistores com valores muito maiores para evitar problemas de alteração do valor das resistências por causa do efeito Joule, e também caso futuramente queiram aumentar o valor do resistor do trocador de calor. Quanto maior a resistência, menor será o efeito Joule, como pode ser visto na equação (4.7).

$$P_{\text{trocador}} = \frac{V^2}{R_{\text{divisor}}} \quad (4.7)$$

Como o sinal de saída vai para um conversor A/D, o ideal seria trabalhar com o maior número possível de bits medindo as tensões de trabalho mais comuns. Por isso, toda a faixa de

trabalho foi dividida, prevendo dois ganhos diferentes no circuito eletrônico, em quatro faixas de medição: 100 V, 150 V, 200 V e 300 V. A faixa de medição de 300 V é para o caso de ser utilizado uma fonte com tensão máxima maior que 200 V.

A configuração utilizada para a seleção de faixa de medição é a mesma da figura 4.2, com dois ganhos de tensão diferentes para cada resistor da baixa tensão, completando as quatro faixas de medição. Os valores escolhidos para os resistores foram:

- $R_1 = 10 \text{ M}\Omega$;
- $R_2 = 500 \text{ k}\Omega$, para as faixas de medição de 100 V e 200 V;
- $R_3 = 300 \text{ k}\Omega$, para as faixas de medição de 150 V e 300 V.

Para a medição de corrente CC, como na medição de corrente CA, foram utilizados dois resistores *shunt* na configuração mostrada na figura 4.3. Da mesma forma da medição de tensão, cada faixa de medição de corrente representada na figura 4.3 possui dois ganhos.

Os valores dos resistores *shunt* escolhidos foram:

- $R_{shunt1} = 0.5 \text{ }\Omega$, para as faixas de 0.5 A e 1.0 A;
- $R_{shunt2} = 0.1 \text{ }\Omega$, para as faixas de medição de 2.5 A e 5.0 A.

4.3 Circuito eletrônico dos sistemas de medição

Os transdutores desenvolvidos neste trabalho são o divisor resistivo, para medição de tensão, e o resistor *shunt*, para medição de corrente. Porém, esses métodos de medição não são seguros o suficiente para o uso direto de instrumentos não isolados. Em caso de falhas de conexão, dependendo do circuito, na entrada dos instrumentos pode aparecer uma tensão elevada danificando o mesmo. A figura 4.4 ilustra esta situação.

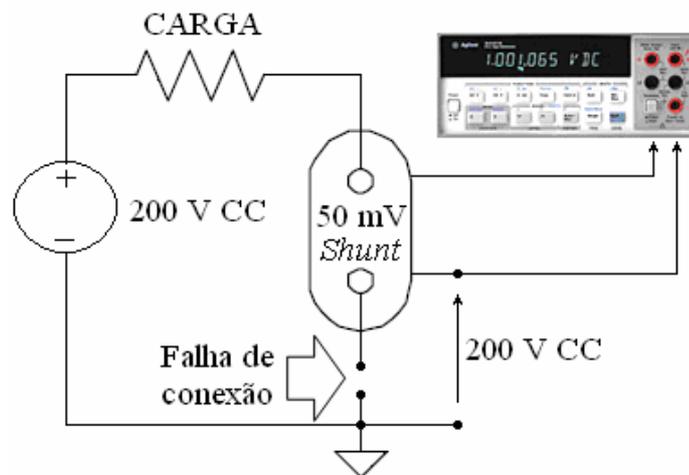


Figura 4.4 – Importância da isolamento do sinal de um sensor

Por envolver equipamentos caros, é aconselhável utilizar algum tipo de proteção, para que, em caso de falhas, não haja prejuízo considerável. A melhor proteção neste tipo de aplicação é a isolamento do sistema de medição do sistema de potência [25], [26]. Como no mercado não foram encontrados equipamentos de isolamento com boa exatidão, foram construídos circuitos eletrônicos para esse fim.

Na construção de circuitos de alta exatidão é necessário ter o menor número possível de componentes semicondutores na cadeia de medição, pois eles tendem a aumentar a incerteza de medição [27].

Apesar dessa desvantagem dos componentes semicondutores, a etapa eletrônica do sistema é expressamente necessária. Dentre as razões para tal necessidade estão:

- Seleção das faixas de medição: necessidade satisfeita com o uso do MPC509A, multiplexador diferencial analógico com 4 canais [28].
- Amplificação de baixos sinais: necessidade de sinais de saída com amplitudes na faixa de ± 10 V, para que estes possam utilizar o maior número possível de bits do conversor A/D; necessidade satisfeita com o amplificador de instrumentação INA101 [29].

- Redução do efeito da impedância de entrada dos instrumentos de medição: necessidade devido ao alto valor das resistências do divisor e à baixa impedância de entrada dos instrumentos, causando o erro de carga nas medições [30]; necessidade satisfeita com o amplificador de instrumentação INA101, cuja impedância de entrada é de $10^{10} \Omega$ em paralelo com um capacitor de 3 pF [29].
- Isolação do sinal de saída: necessidade de proteção do equipamento de aquisição de sinais, que possui um custo bastante elevado, contra tensões de modo comum indesejadas [25], [26]; necessidade satisfeita com o uso do amplificador de isolação ISO124 [31].

Além dessas necessidades para o circuito, há também necessidades metrológicas, que estão listadas a seguir:

- baixo erro combinado (linearidade, repetitividade e histerese);
- baixo erro de zero e erro de ganho;
- baixa deriva com temperatura;
- boa resposta em frequência até 3 kHz;
- imunidade a ruídos e interferências;
- boa estabilidade no tempo.

Nos itens 4.3.1 e 4.3.2 serão apresentados os circuitos eletrônicos desenvolvidos.

4.3.1 Sistema de medição de tensão e corrente CA

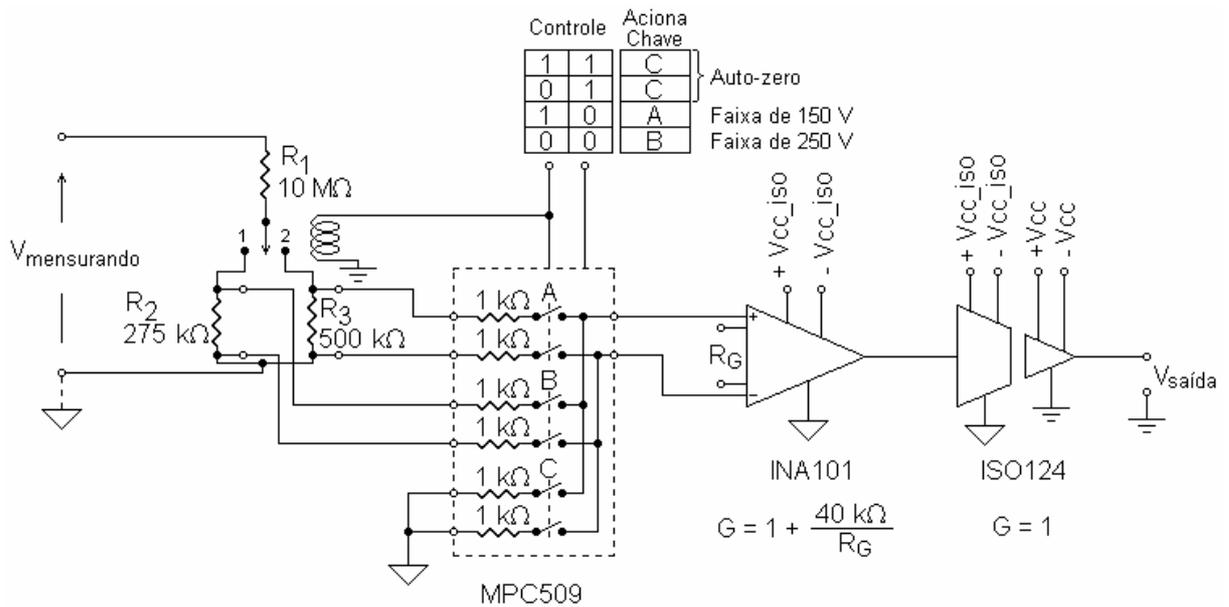
O circuito de medição de tensão CA é apresentado na figura 4.5. O circuito possui duas entradas de controle; uma para seleção da faixa de medição e outra para o auto-zero.

A entrada de controle da seleção da faixa de medição aciona o relé para seleção dos resistores, e seleciona o canal de entrada do multiplexador analógico MPC509. O sinal de controle de auto-zero, seleciona o canal cujas entradas estão ligadas à referência do sistema. A

função dessa entrada de controle é minimizar ou eliminar o efeito da tensão de *offset* na saída do sistema.

O ciclo de medição consiste em fazer uma medição com o auto-zero acionado, momento em que o sinal de saída do sistema é a tensão de *offset*, e logo em seguida outra com o auto-zero desligado, quando o sinal na saída é o sinal a ser medido somado à tensão de *offset*. O *software* faz a diferença entre os dois sinais e aplica a correção com a equação obtida na calibração.

A figura 4.6 apresenta o sistema de medição de corrente CA. Este circuito é semelhante ao circuito de medição de tensão CA. Os sinais de controle são praticamente os mesmos, diferenciando apenas na inclusão de uma nova entrada para seleção da faixa de medição. Agora, em vez de duas são quatro faixas de medição, resultado da combinação da seleção do resistor *shunt* com a seleção do ganho do amplificador de instrumentação. Os resistores de ganho foram calculados com base nas tensões de pico, considerando forma de onda senoidal pura.



Legenda:

$V_{\text{mensurando}}$: tensão a ser medida (V);

$V_{\text{saída}}$: tensão de saída do transdutor (V);

R_1 : resistor da alta tensão do divisor resistivo de tensão (Ω);

R_2 : resistor da baixa tensão do divisor resistivo quando o relé está na posição 1 (Ω);

R_3 : resistor da baixa tensão do divisor resistivo quando o relé está na posição 2 (Ω);

G: ganho do amplificador de instrumentação;

R_G : conexão para o resistor de ganho do amplificador de instrumentação;

V_{cc} : fonte de alimentação;

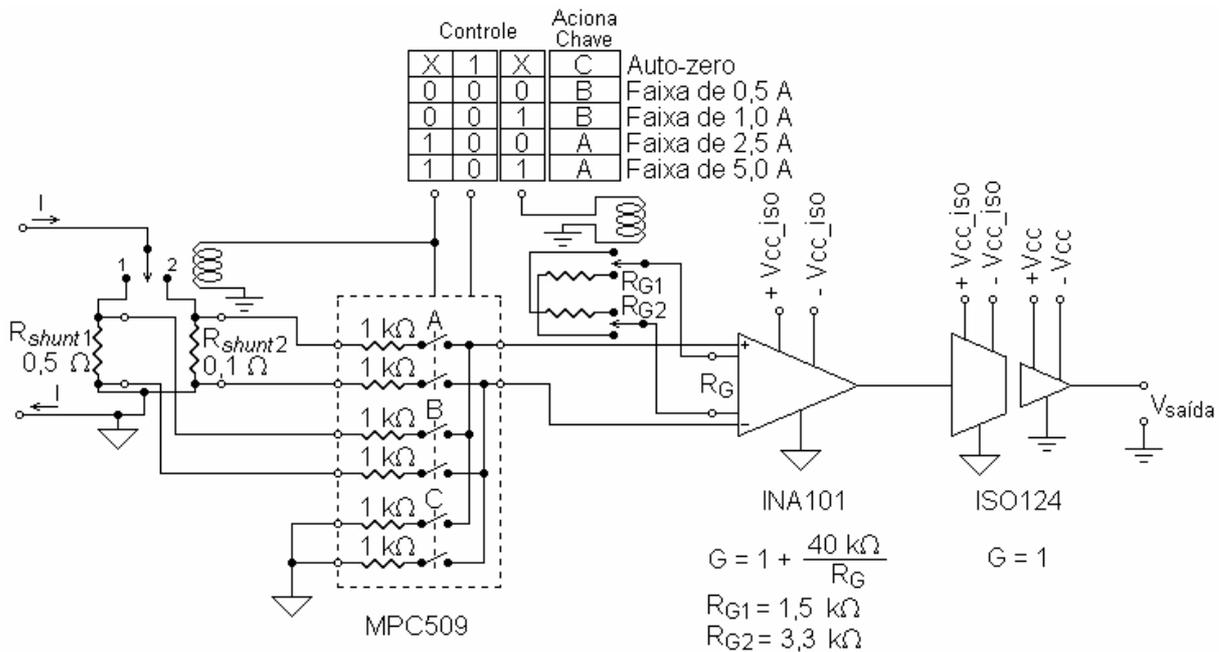
V_{cc_iso} : fonte de alimentação isolada;

MPC509: multiplexador analógico;

INA101: amplificador de instrumentação;

ISO124: amplificador de isolamento.

Figura 4.5 – Circuito eletrônico do sistema de medição de tensão CA



Legenda:

I: corrente a ser medida (A);

$V_{saída}$: tensão de saída do transdutor (V);

R_{shunt1} : resistor *shunt* selecionado quando o relé está na posição 1 (Ω);

R_{shunt2} : resistor *shunt* selecionado quando o relé está na posição 2 (Ω);

G: ganho do amplificador de instrumentação;

R_{G1} e R_{G2} : resistores de ganho (Ω);

R_G : conexão para o resistor de ganho do amplificador de instrumentação;

V_{cc} : fonte de alimentação;

V_{cc_iso} : fonte de alimentação isolada;

MPC509: multiplexador analógico;

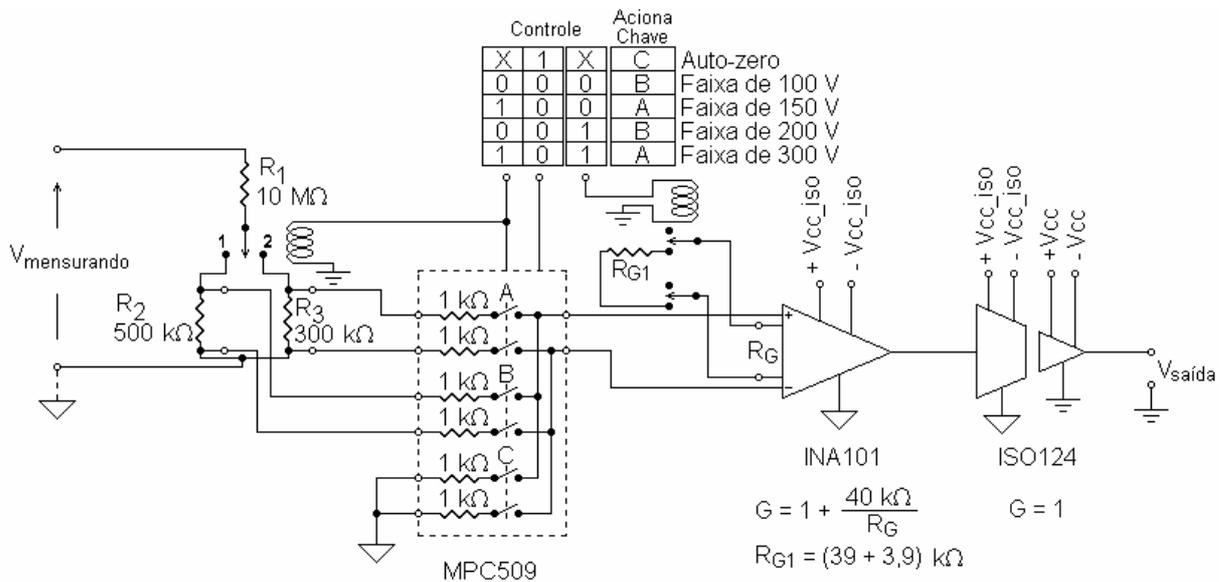
INA101: amplificador de instrumentação;

ISO124: amplificador de isolação.

Figura 4.6 – Circuito eletrônico do sistema de medição de corrente CA

4.3.2 Sistema de medição de tensão e corrente CC

A figura 4.7 apresenta o circuito eletrônico do sistema de medição de tensão CC, que se assemelha muito ao circuito de medição de tensão CA. Para a seleção da faixa de medição, além dos resistores do divisor de tensão, o circuito apresenta mais uma entrada para seleção de ganho, que pode ser aproximadamente 1 ou aproximadamente 2.



Legenda:

$V_{\text{medurando}}$: tensão a ser medida (V);

$V_{\text{saída}}$: tensão de saída do transdutor (V);

R_1 : resistor da alta tensão do divisor resistivo de tensão (Ω);

R_2 : resistor da baixa tensão do divisor resistivo quando o relé está na posição 1 (Ω);

R_3 : resistor da baixa tensão do divisor resistivo quando o relé está na posição 2 (Ω);

G: ganho do amplificador de instrumentação;

R_{G1} : resistor de ganho (Ω);

R_G : conexão para o resistor de ganho do amplificador de instrumentação;

V_{cc} : fonte de alimentação;

V_{cc_iso} : fonte de alimentação isolada;

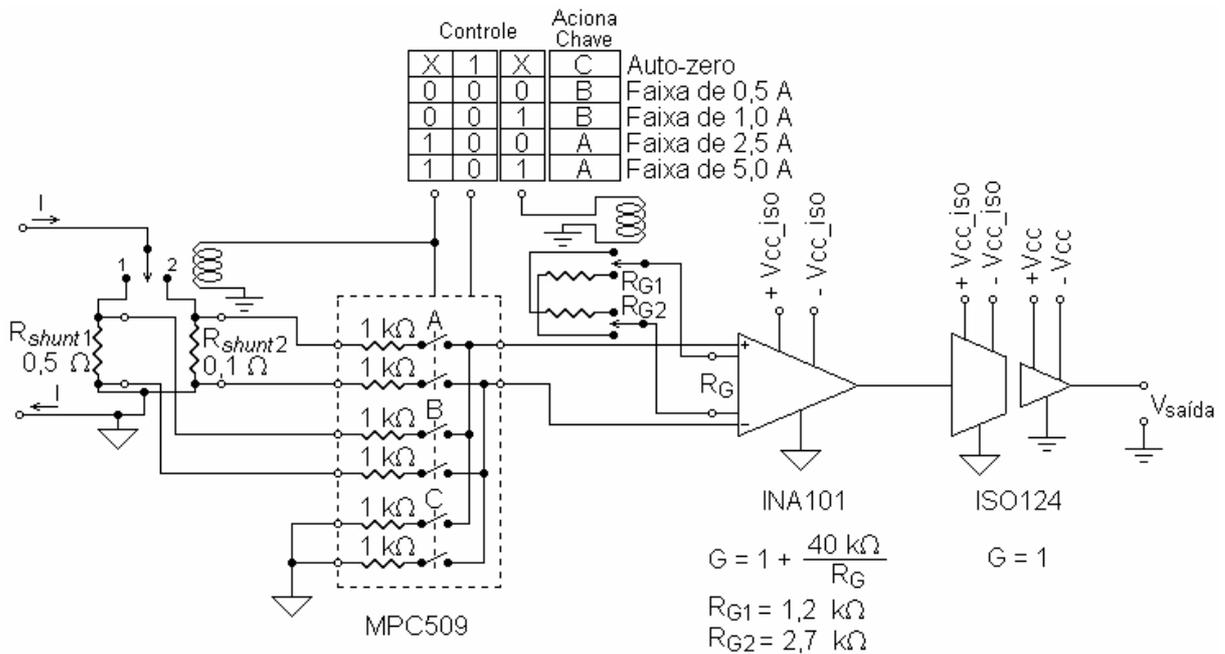
MPC509: multiplexador analógico;

INA101: amplificador de instrumentação;

ISO124: amplificador de isolação.

Figura 4.7 – Circuito eletrônico do sistema de medição de tensão CC

O circuito da figura 4.8 mostra o circuito de medição de corrente CC que difere do circuito de medição de corrente CA apenas no valor dos resistores de ganho do amplificador de instrumentação. Os resistores de ganho do circuito de medição de corrente CA são calculados tendo como limite a tensão de pico, valor RMS multiplicado por $\sqrt{2}$. Já os resistores de ganho do circuito de medição de corrente CC são baseados no próprio valor CC.



Legenda:

I: corrente a ser medida (A);

$V_{saída}$: tensão de saída do transdutor (V);

R_{shunt1} : resistor *shunt* selecionado quando o relé está na posição 1 (Ω);

R_{shunt2} : resistor *shunt* selecionado quando o relé está na posição 2 (Ω);

G: ganho do amplificador de instrumentação;

R_{G1} e R_{G2} : resistores de ganho (Ω);

R_G : conexão para o resistor de ganho do amplificador de instrumentação;

V_{cc} : fonte de alimentação;

V_{cc_iso} : fonte de alimentação isolada;

MPC509: multiplexador analógico;

INA101: amplificador de instrumentação;

ISO124: amplificador de isolamento.

Figura 4.8 – Circuito eletrônico do sistema de medição de corrente CC

4.4 Fontes de incerteza dos sistemas de medição

Nesta seção serão apresentadas as fontes de incertezas dos sistemas de medição desenvolvidos. Para efeito de análise, o circuito foi dividido em três partes: resistores (divisor e *shunt*), circuito eletrônico e conversor A/D. Cada etapa será analisada nos itens abaixo.

4.4.1 Incerteza do sensor resistivo (divisor e *shunt*)

4.4.1.1 Ruído térmico

O ruído térmico, também conhecido como ruído Johnson, é causado pela agitação dos elétrons devido à temperatura do resistor [33]. A equação (4.8) modela o valor da tensão do ruído térmico.

$$V_R = \sqrt{4.k.T.B.R} \quad (4.8)$$

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

k : constante de Boltzmann = 1.38×10^{-23} [J/K];

T : temperatura do resistor [K];

B : banda de frequência [Hz];

R : valor da resistência [Ω].

Como pode ser visto na equação (4.8), a tensão do ruído, cujo resultado já está expresso em RMS, é dependente da temperatura do resistor (normalmente em 300 K), da banda de frequência e do valor da resistência. Logicamente, quanto maior a resistência e a banda de frequência, maior será a tensão do ruído. Apesar do espectro de frequência ser constante (o ruído térmico é um ruído branco) a largura de banda de frequência é limitada pela frequência de corte do sistema. A frequência de corte, como não possui filtro passa-baixas, fica limitada à menor frequência de corte dos componentes eletrônicos do sistema de medição. Dentre os componentes, o ISO124 apresenta a menor frequência de corte (50 kHz).

4.4.1.2 Deriva térmica dos resistores

Devido ao material pelo qual são construídos, os resistores apresentam certa variação com a mudança temperatura [32]. Existem três efeitos diferentes que contribuem para a variação de temperatura de um resistor:

- temperatura ambiente: temperatura do ambiente em torno do resistor;
- efeito Joule (coeficiente de carga): a circulação de corrente por qualquer resistor dissipa potência e aumenta a temperatura do componente [23], [33]. A potência dissipada pelo resistor pode ser calculada pela equação (4.9);

$$P = R \times I^2 \quad (4.9)$$

onde: P : potência dissipada [W] ou [J/s];

R : valor da resistência por onde circula a corrente [Ω];

I : valor da corrente que circula pelo resistor [A];

- condição de dissipação de calor: o aumento real da temperatura, devido ao efeito Joule, é limitado pela condutividade térmica entre o resistor e o ambiente [33]. Além da condutividade térmica do material do resistor, a condutividade do ambiente também é importante. Por exemplo, a circulação de ar sobre o resistor retira mais calor por unidade de tempo do que a convecção natural, mantendo assim o resistor em uma temperatura mais baixa [22].

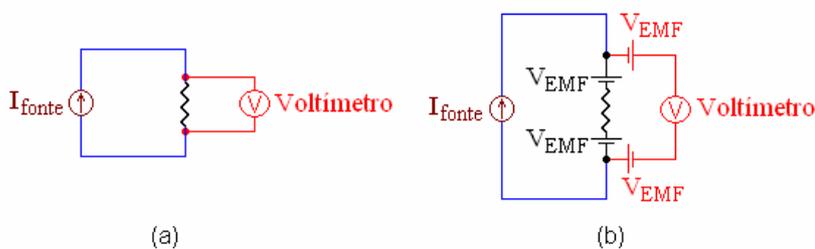
4.4.1.3 Deriva temporal dos resistores

Os resistores apresentam uma leve variação da resistência com o tempo. A máxima variação normalmente é dada em catálogo pelo fabricante que, normalmente, a apresenta de duas formas:

- *load life stability*: deriva da resistência após o resistor trabalhar na tensão nominal durante determinado número de horas;
- *shelf life stability*: deriva da resistência após determinado tempo sem uso - normalmente menor que a *load life stability*.

4.4.1.4 Tensão termelétrica

A tensão termelétrica é uma das fontes mais comuns de erros na medição de baixos níveis de tensão. Essas tensões são geradas quando condutores feitos de materiais diferentes são conectados [30]. A figura 4.9(a) ilustra a situação em que o fio que conduz a corrente até o *shunt* é de um material (representado em azul), o *shunt* é feito de outro tipo de material (representado em preto) e o fio utilizado pelo voltímetro é de um terceiro material (representado em vermelho). As tensões termelétricas geradas por este tipo de ligação estão apresentadas na figura 4.9(b).



Legenda:

I_{fonte} : fonte da corrente que passa através do *shunt* (A);

V_{EMF} : tensão termelétrica nos contatos dos fios conectados ao *shunt* (V).

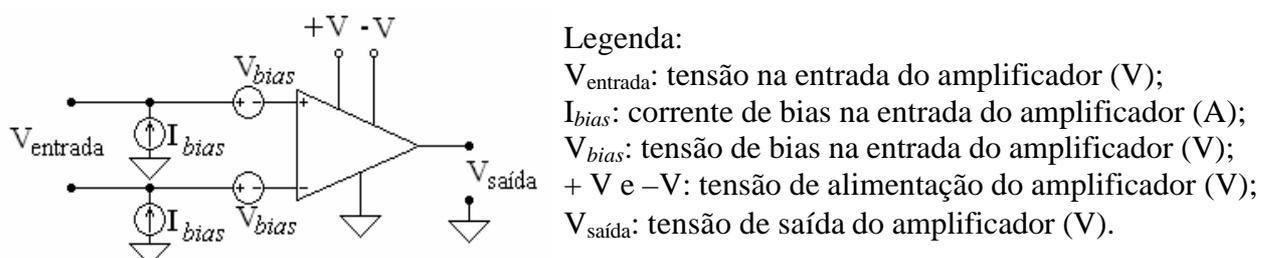
Figura 4.9 – Tensão termelétrica em medição de pequenos sinais

4.4.2 Incertezas do circuito eletrônico

4.4.2.1 Tensão e corrente de *bias*

Todo elemento ativo precisa de certa corrente e tensão para se tornar operante na região desejada. Essa tensão e corrente são chamados tensão de *bias* e corrente de *bias*, respectivamente [27].

A figura 4.10 mostra o modelo do circuito de entrada de um amplificador com a tensão e corrente de *bias* para análise de circuitos.



Legenda:

V_{entrada} : tensão na entrada do amplificador (V);

I_{bias} : corrente de *bias* na entrada do amplificador (A);

V_{bias} : tensão de *bias* na entrada do amplificador (V);

$+V$ e $-V$: tensão de alimentação do amplificador (V);

$V_{\text{saída}}$: tensão de saída do amplificador (V).

Figura 4.10 – Modelo da tensão e corrente de *bias*

4.4.2.2 Offset e deriva (*drift*)

Por definição, a tensão de entrada que torna a saída do sistema zero, é a tensão de *offset* de entrada de um elemento ativo [27]. Da mesma forma, por definição, a corrente de *offset* é a corrente de entrada que zera a tensão de saída. Em amplificadores diferenciais a tensão e a corrente de *offset* podem ser entendidas como a diferença entre as tensões e correntes de *bias* de cada entrada. Deriva (*drift*) pode ser definido como a variação da tensão e corrente de *offset* e ganho do sistema em função de grandezas de influência, por exemplo, tempo e temperatura [27].

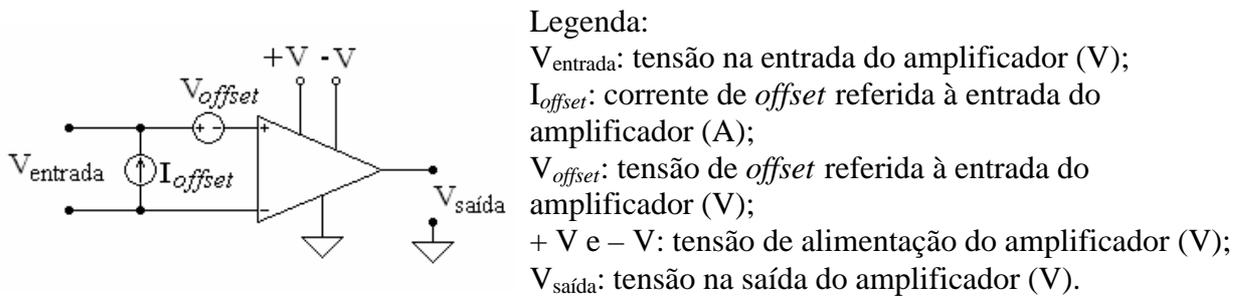


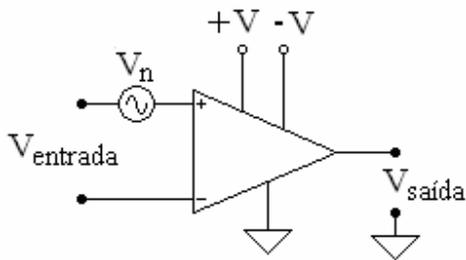
Figura 4.11 – Modelo da tensão e corrente de *offset*

4.4.2.3 Efeito da temperatura

A influência da temperatura, causando a deriva do sinal, é devido à maioria dos parâmetros eletrônicos serem dependentes da temperatura. A deriva da temperatura é a causa principal da variação da tensão e corrente de *offset*, e é muito difícil de ser corrigido. Em geral, o zero do sinal é válido somente para uma determinada temperatura [27].

4.4.2.4 Ruído de entrada

Todo amplificador tem uma fonte de ruído parasita interna. Este ruído é medido na saída do amplificador e referenciado à entrada. Este ruído é normalmente dado em catálogo em tensão e/ou corrente equivalente [34]. A Figura 4.12 mostra o modelo da tensão de ruído de um amplificador, onde V_n representa a tensão de ruído do componente.



Legenda:

V_{entrada} : tensão na entrada do amplificador (V);

V_n : tensão do ruído na entrada do amplificador (V);

+ V e - V: tensão de alimentação do amplificador (V);

$V_{\text{saída}}$: tensão na saída do amplificador (V).

Figura 4.12 – Modelo da tensão de ruído de entrada

4.4.2.5 Não-linearidade

Em sistemas de medição lineares, a relação entre o valor do mensurando e o valor indicado pelo instrumento deveria poder ser representada por uma linha reta. Porém, na prática, isso nem sempre acontece. Por limitações construtivas, ou pela não-linearidade dos fenômenos físicos, a curva obtida não é uma linha reta [35]. A não-linearidade pode ser definida como o máximo desvio da linearidade aproximada de um sistema de medição [27], [35].

4.4.3 Incertezas da placa de aquisição de sinais

O cálculo da incerteza de medição de uma placa de aquisição de sinais envolve as seguintes características:

- erro de quantização;
- ruído da placa;
- erro de linearidade.

Cada uma dessas características está detalhada nos itens 4.4.3.1, 4.4.3.2 e 4.4.3.3.

O catálogo da placa de aquisição de sinais não apresenta as especificações de erro de ganho, histerese, repetitividade e coeficiente de temperatura. Os ensaios mostraram que essas características apresentam pouca influência no sistema de medição desenvolvido.

4.4.3.1 Resolução e erro de quantização

Segundo o VIM [36], resolução de um sistema de medição é a “menor diferença entre indicações de um dispositivo mostrador que pode ser significativamente percebida”. A resolução do sistema de medição desenvolvido é a própria resolução da placa de aquisição de sinais, 16 *bits* para o caso da placa PCI-4452. Como o arredondamento pode estar sendo feito para cima ou para baixo, é considerada uma distribuição aleatória.

A resolução pode ser calculada como:

$$R = \frac{1}{2^{n^\circ \text{ bits}}} \times V_{\text{pico a pico}} \quad (4.10)$$

onde R : resolução do sistema de medição [V];

$n^\circ \text{ bits}$: número de bits do conversor A/D da placa de aquisição de sinais;

$V_{\text{pico a pico}}$: é a faixa de tensão na qual o conversor A/D trabalha [V].

O erro de quantização pode ser aproximado para uma forma de onda dente-de-serra com amplitude pico-a-pico de 1 LSB [37]. Analisando a figura 4.13 pode-se notar que o erro de quantização e a resolução estão intimamente ligados, apresentando o mesmo efeito quando se trata de incerteza na medição.

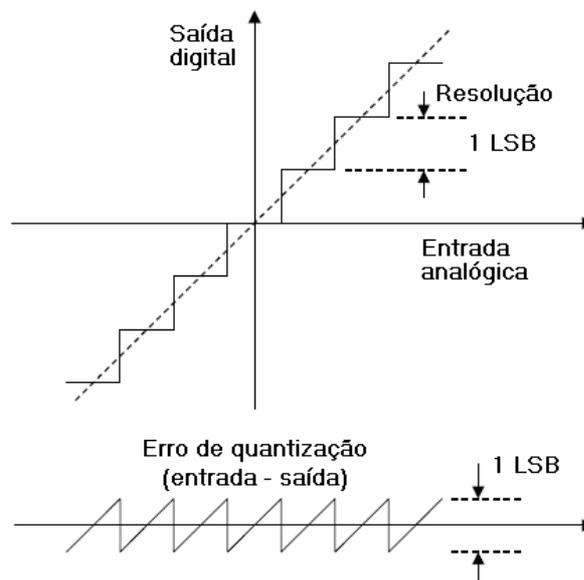


Figura 4.13 – Erro de quantização e resolução de um conversor A/D ideal

4.4.3.2 Ruído da placa de aquisição de sinais

A placa de aquisição de sinais PCI-4452 apresenta um nível de ruído de 0.65 LSB RMS. Em relação à faixa dinâmica¹ – termo empregado pelo fabricante para indicar o número de *bits* (16 *bits*) - representa um ruído de 91 dB. Porém, vários fatores podem piorar este nível de ruído. A proximidade com equipamentos emissores de interferência na forma de radiação eletromagnética, como fontes de tensão, monitores de computadores e leitores de disco rígido podem piorar a relação sinal/ruído [24].

Para se garantir um baixo nível de ruído, deve-se garantir uma boa blindagem dos cabos e do sistema de medição em geral, e garantir que o caminho do cabo esteja longe de fontes de radiação eletromagnéticas.

4.4.3.3 Erro de linearidade da placa de aquisição de sinais

Existem dois tipos de especificações de não-linearidades quando se trata de conversores A/D e placas de aquisição de sinais: INL (*Integral Nonlinearity*) e DNL (*Differential Nonlinearity*). A INL de um conversor A/D é análoga à não-linearidade de um amplificador, e é definida como o máximo desvio da curva de transferência real do conversor de uma linha reta, em geral obtida pelo método dos mínimos quadrados [37]. Normalmente é expressa como porcentagem do final da faixa de medição. A figura 4.14(a) mostra o INL em um conversor A/D.

O outro tipo de especificação de não-linearidade é a DNL, que é a não-linearidade na transição do código do conversor. Idealmente, a mudança de 1 (um) LSB no código digital representa também uma variação de exatamente 1 (um) LSB no sinal analógico. O DNL é

¹ Faixa de medição dentro da qual o valor instantâneo de um determinado sinal pode ser medido.

definido como o máximo desvio, em toda a faixa de medição, do tamanho ideal de 1 (um) LSB [37]. A figura 4.13(b) apresenta este tipo de não-linearidade.

Para o balanço de incertezas apenas o INL é considerado, pois considera-se que a INL representa o pior caso na soma de não-linearidades DNL consecutivas.

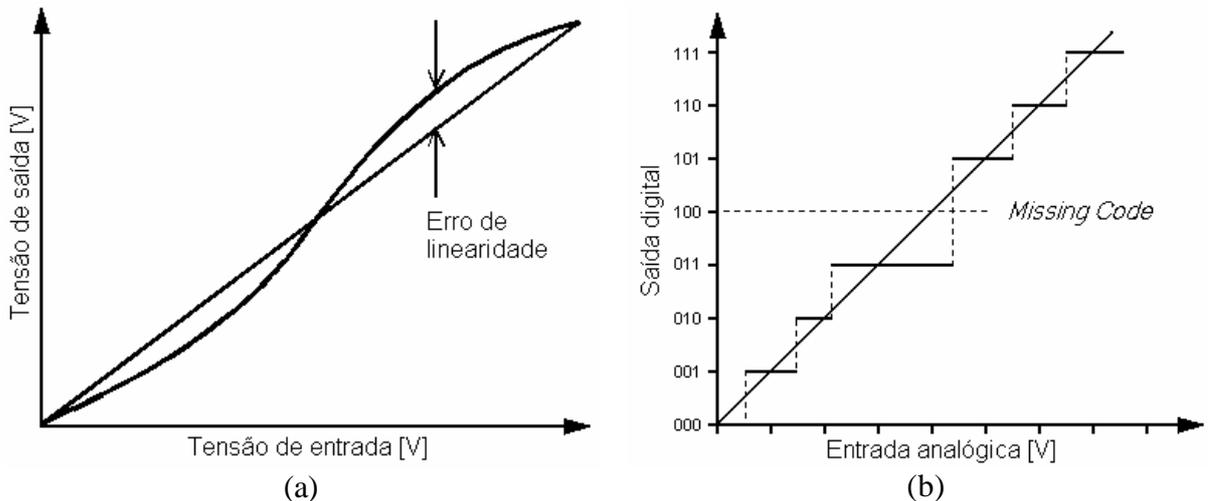


Figura 4.14 – Não-linearidades de um conversor A/D: (a) INL; (b) DNL [37]

4.5 Balanço de incertezas dos sistemas de medição

Já conhecidas as componentes de incerteza dos sistemas, neste item serão mostrados os balanços de incertezas de cada sistema desenvolvido.

No balanço de incertezas foram consideradas apenas as fontes de incerteza com comportamento aleatório ou sistemático não-corrigível. Para as fontes de incertezas que apresentam comportamento sistemático com possibilidade de correção considerou-se que, com a calibração, serão corrigidas. Os erros corrigíveis são os erros de zero e ganho, que são corrigidos com a curva levantada na calibração e utilizada no cálculo do valor a ser indicado.

Os erros sistemáticos corrigíveis inseridos por cada componente do circuito podem ser vistos abaixo:

- MPC509A [28]:
 - $I_S(OFF)$, off input leakage current: 10 nA;
 - $I_D(OFF)$, off output leakage current: 5 nA;

- $I_D(ON)$, on channel leakage current: 10 nA;
- I_{DIFF} , differential off output leakage current: 10 nA;
- INA101 [29]:
 - gain error from equation, CC: $\pm \left((0.3 + 0.0002 \times G) - \frac{0,10}{G} \right) \%$, onde G é o ganho configurado no amplificador;
 - input offset voltage: $\pm \left(250 + \frac{900}{G} \right) \mu\text{V}$, onde G é o ganho configurado no amplificador;
 - input current bias: ± 30 nA;
- ISO124 [31]:
 - gain error: $\pm 0.50\%$;
 - input offset voltage: ± 50 mV.

O balanço de incertezas do sistema de medição, como em qualquer cadeia de medição, deve levar em consideração o circuito envolvido, a relação de ganhos e a seqüência de operações. Essas considerações estão apenas nas tabelas dos balanços, abaixo está quantificada cada componente explicada no item 4.4, separadas por componentes² - resistores e circuitos integrados.

- Resistores CADDOCK [38]:
 - absolute temperature coefficient: 0.0002%/°C;
 - load life stability: $(+ 0.030 \pm 0.030)\%$ à tensão nominal por 10000 horas; + 0.060% como o pior caso;

² O componente MCP509 (multiplexador analógico) não apresenta em catálogo componentes de incerteza aleatórias ou sistemáticas não-corrigíveis.

- *shelf life stability*: $(+ 20 \pm 20) \left(\frac{\text{m}\Omega}{\Omega} \right) / \text{ano}$ - pode ser desconsiderado, pois a especificação de *load time stability* cobre um tempo maior que um ano;
- ruído térmico:
 $V_R = 24 \text{ mV}$, para a faixa de medição de 150 V e;
 $V_R = 17 \text{ mV}$, para a faixa de medição de 250 V.
- Resistores VISHAY [39]:
 - *temperature coefficient of resistance*: $\pm 0.0015\%/^{\circ}\text{C}$;
 - *load time stability*: $\pm 0.05\%$ à potência nominal por 2000 horas;
 - *shelf time stability*: $\pm 0.0025\%/\text{ano}$;
 - *thermal EMF*: $\pm 0.5 \mu\text{V/V}$ devido as conexões + $4 \mu\text{V/W}$;
 - ruído térmico:
 $V_R = 0.69 \text{ mV}$ para a faixa de 0.5 A,
 $V_R = 0.33 \text{ mV}$ para as faixas de 1.0 A e 2.5 A,
 $V_R = 0.16 \text{ mV}$ para a faixa de 5.0 A.
- INA101:
 - *gain temperature coefficient*: $0.0005\%/^{\circ}\text{C}$;
 - *nonlinearity, DC*: $\pm (0.005 + 2 \times 10^{-5} \times G) \%$ da máxima tensão de pico na saída do amplificador;
 - *input offset voltage vs. temperature*: $\pm \left(2 + \frac{20}{G} \right) \mu\text{V}/^{\circ}\text{C}$;

- *input offset voltage vs. time*³: $\pm \left(1 + \frac{20}{G}\right) \mu\text{V/mês}$;
- *input noise*³: $13 \text{ nV} / \sqrt{\text{Hz}}$, com a frequência de corte do sistema 50 kHz.
- ISO124⁴:
 - *gain error vs. temperature*³: $\pm 0.0010\%/^{\circ}\text{C}$;
 - *nonlinearity*: $\pm 0.010\%$ do final da faixa;
 - *input offset voltage vs. temperature*³: $\pm 200 \mu\text{V}/^{\circ}\text{C}$;
 - *input noise*³: $4 \text{ mV} / \sqrt{\text{Hz}}$, com a frequência de corte do sistema 50 kHz.
- DAQ PCI-4452 [24]:
 - *resolution*: 16 bits;
 - *integral nonlinearity (INL)*: $\pm 2 \text{ LSB}$;
 - *grounded noise*: $\pm 0.65 \text{ LSB}$.

Os sistemas de medição foram projetados prevendo o uso do auto-zero. Porém, existe a possibilidade de ser utilizado sem esta opção. Serão apresentados nesta etapa os balanços de incertezas, para cada sistema, prevendo ambos os casos, com e sem o auto-zero.

Os gráficos dos resultados dos balanços de incertezas dos sistemas desenvolvidos que serão apresentados apresentam quatro resultados, que estão detalhados a seguir.

1. Divisor resistivo: foi calculado de forma conservadora. A estabilidade temporal dos resistores é dado como $(+ 0.030\% \pm 0.030\%)$ [38]. Caso a primeira parcela do erro máximo especificado fosse corrigida, essa componente da incerteza cairia pela metade.

³ O fabricante não fornece valores máximos, fornece apenas valores típicos.

⁴ O fabricante não fornece em catálogo a deriva do ganho e da tensão de *offset* com o tempo.

2. Divisor, a chave semicondutora (MPC509) e o amplificador de instrumentação (INA101): nota-se pelo gráfico que a chave e o amplificador contribuem pouco na incerteza total do sistema.
3. Sistema desenvolvido: representa a incerteza do sinal de saída do transdutor, ou seja, a saída do amplificador de isolamento – ISO124. Nota-se um grande aumento na incerteza de medição do sistema devido à presença desse componente.
4. Sistema e placa de aquisição de sinais: a medição do sinal com a placa de aquisição de sinais, como era de se esperar, também tem uma pequena parcela de contribuição na incerteza total do sistema.

Nota-se, em todos os gráficos, que o uso do auto-zero reduz a incerteza total do sistema. Com o auto-zero, fazendo a correção de zero a cada medição, os efeitos da tensão de *offset* e sua deriva com temperatura e tempo são praticamente eliminados.

A seguir serão apresentados os gráficos das incertezas de medição ao longo da faixa de medição que será utilizada na aplicação. Os balanços de incertezas dos sistemas de medição se encontram no Apêndice 01.

- Balanço de incerteza do sistema de medição de tensão CA:

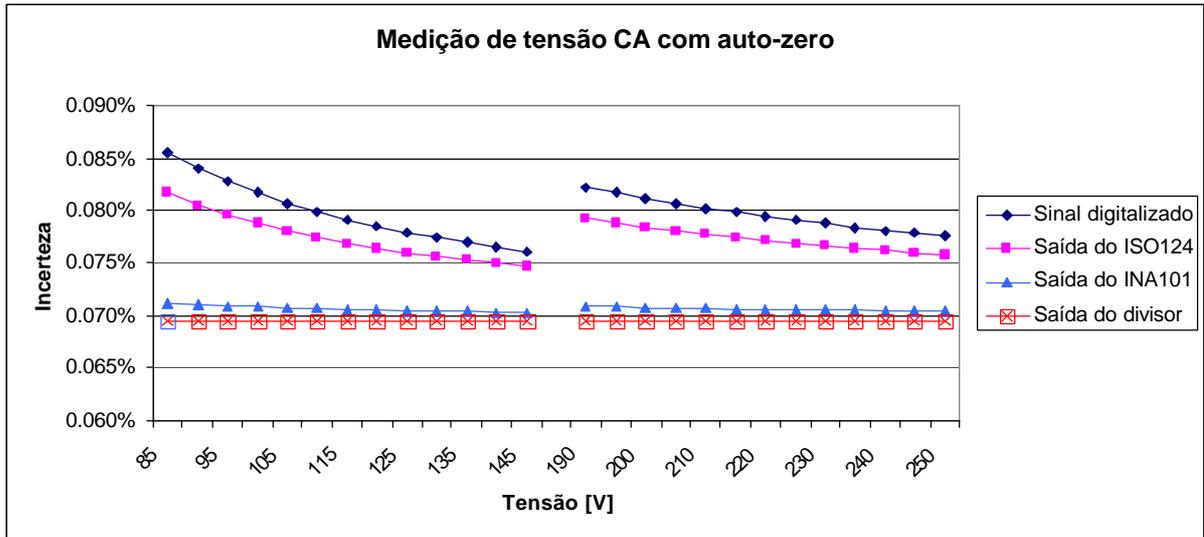


Figura 4.15 – Incerteza de medição de tensão CA, relativo ao valor medido, com auto-zero

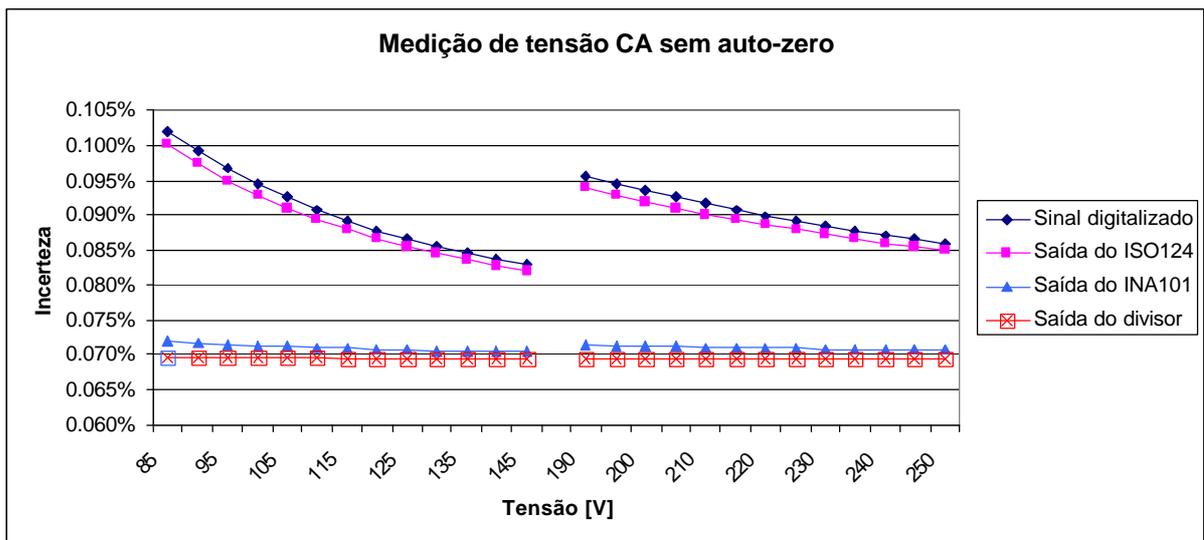


Figura 4.16 – Incerteza de medição de tensão CA, relativo ao valor medido, sem auto-zero

- Balanço de incerteza do sistema de medição de corrente CA

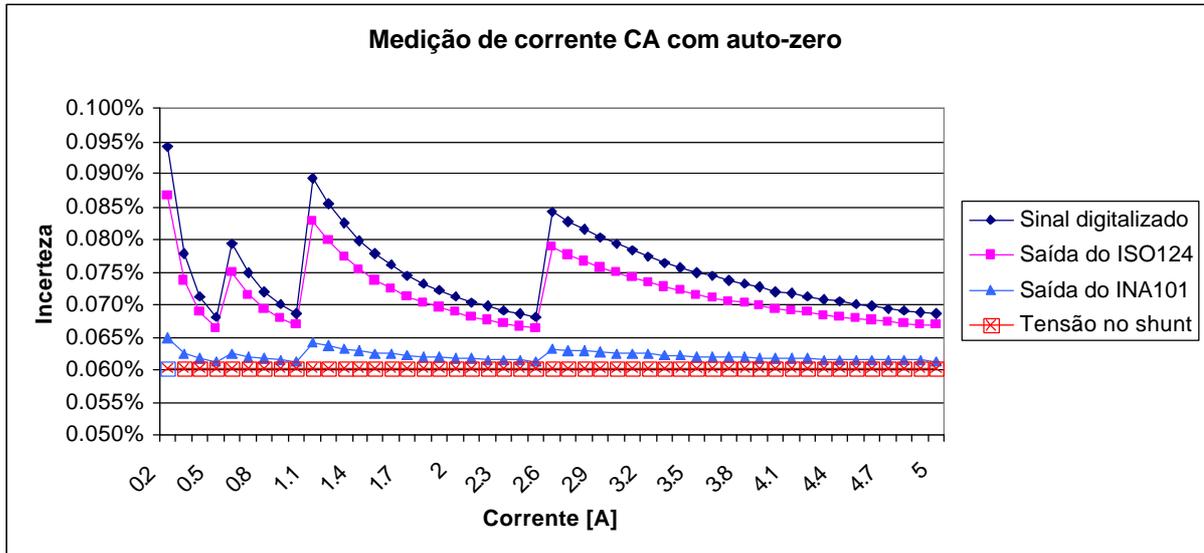


Figura 4.17 – Incerteza de medição de corrente CA, relativo ao valor medido, com auto-zero

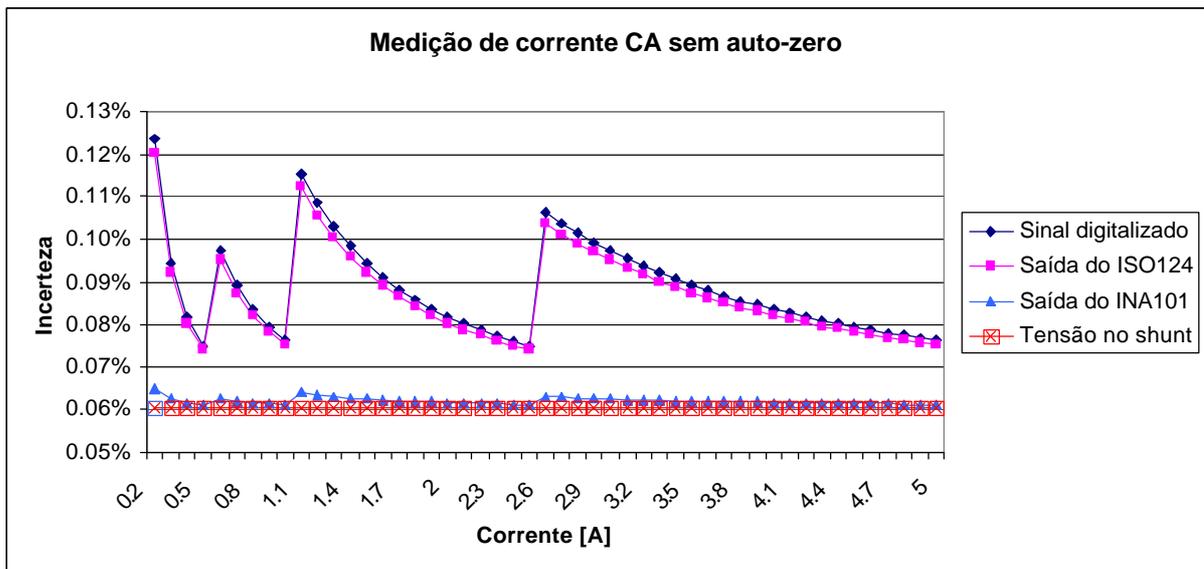


Figura 4.18 – Incerteza de medição de corrente CA, relativo ao valor medido, sem auto-zero

- Balanço de incerteza do sistema de medição de tensão CC

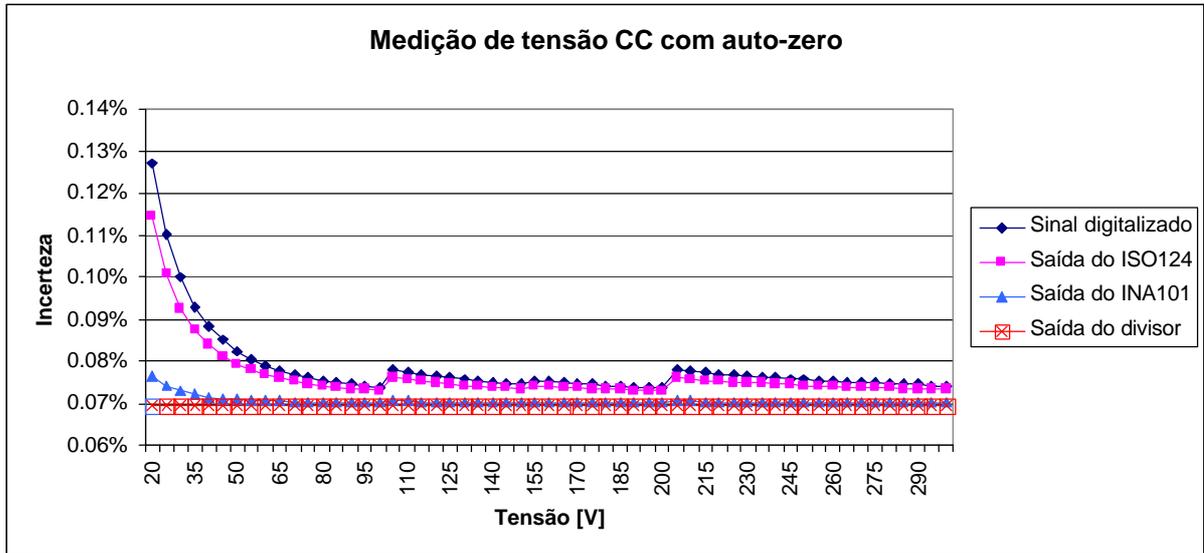


Figura 4.19 – Incerteza de medição de tensão CC, relativo ao valor indicado, com auto-zero

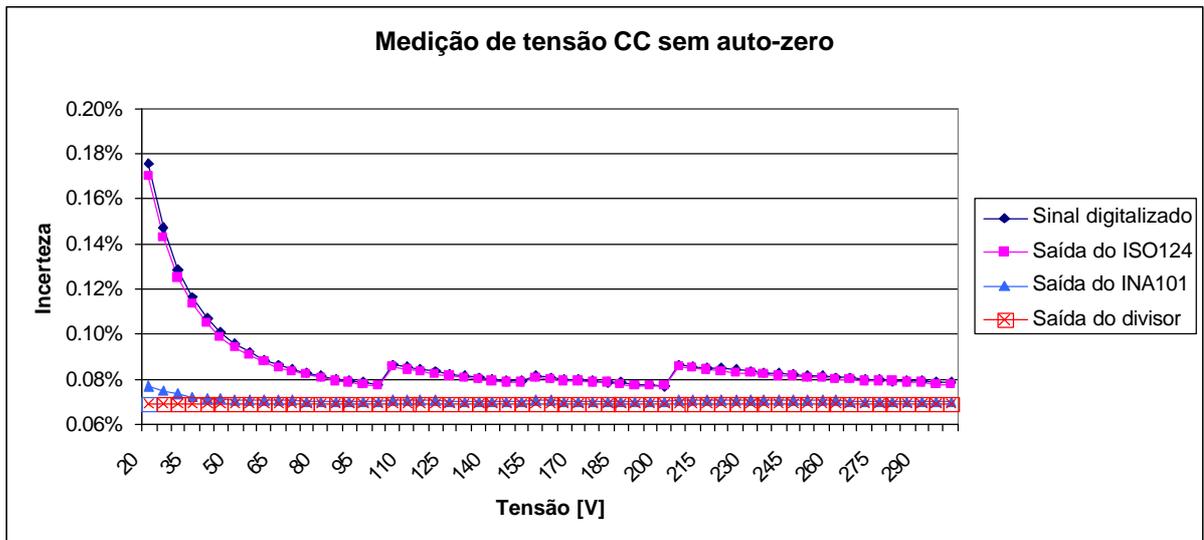


Figura 4.20 – Incerteza de medição de tensão CC, relativo ao valor indicado, sem auto-zero

- Balanço de incerteza do sistema de medição de corrente CC

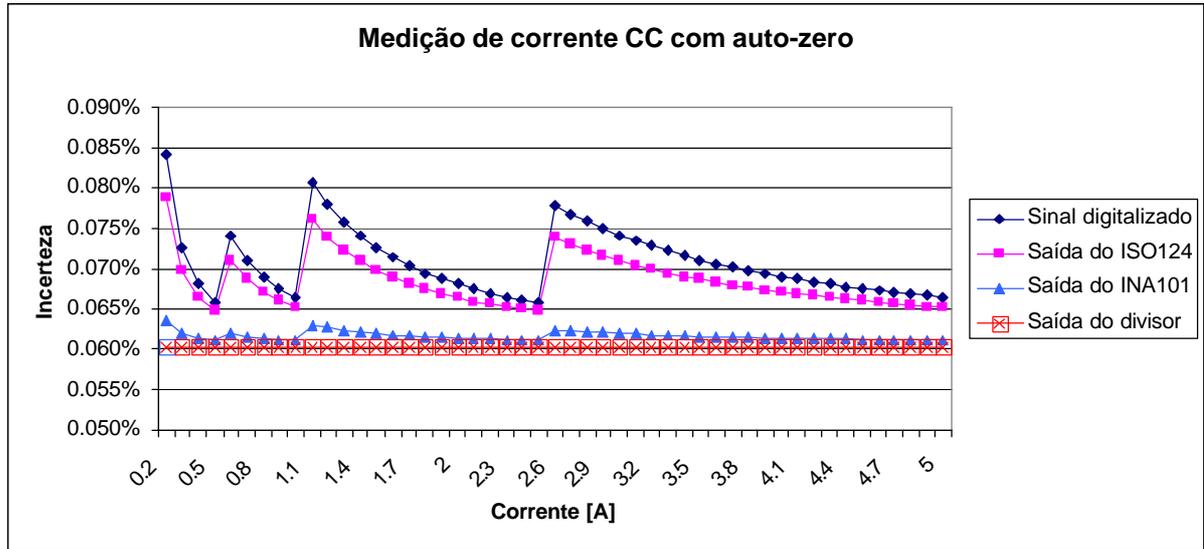


Figura 4.21 – Incerteza de medição do corrente CC, relativo ao valor medido, com auto-zero

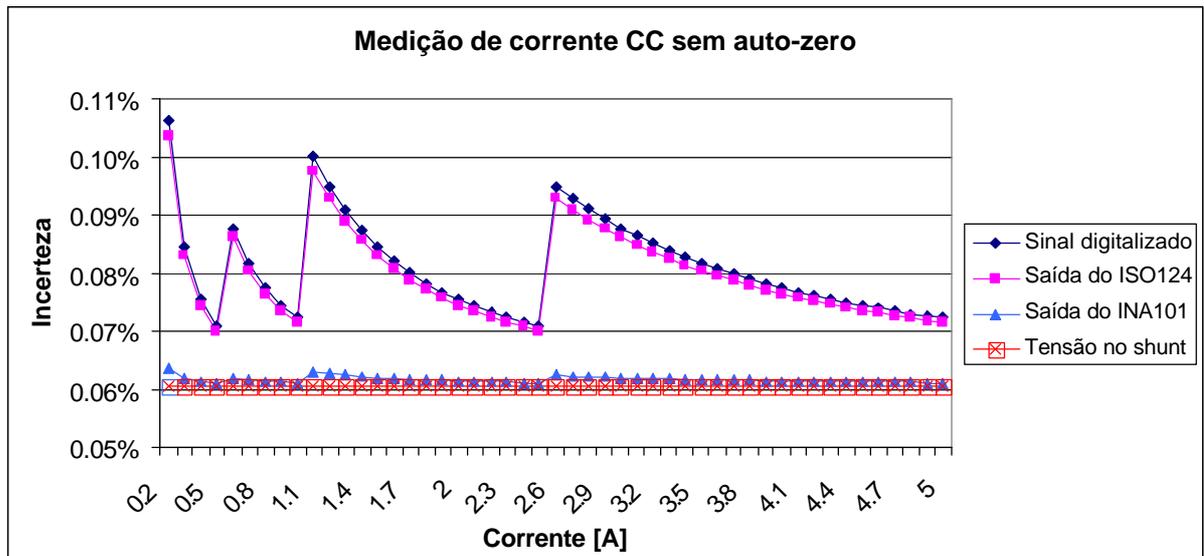


Figura 4.22 – Incerteza de medição do corrente CC, relativo ao valor medido, sem auto-zero

4.6 Problemas encontrados

Durante o ensaio dos transdutores ocorreram alguns imprevistos. Dentre eles podem ser citados:

- capacitância nos fios dos resistores do divisor;
- descontinuidades provocadas pela variação da temperatura;
- circulação de ar sobre os resistores do divisor;
- aquecimento dos resistores por efeito Joule;
- resistência de isolamento de equipamentos e instrumentos isolados do terra.

4.6.1 Capacitância nos fios dos resistores do divisor

Quando a frequência da tensão de teste do divisor resistivo aumentava o valor indicado aumentava proporcionalmente. Porém, a tensão indicada pelo medidor de referência Fluke-8508A permanecia praticamente a mesma, comprovando que a origem do problema era no sistema desenvolvido de medição de tensão. A tabela 4.1 apresenta o resultado dos ensaios.

Tabela 4.1 – Ensaio da medição de tensão em várias frequências com fios em paralelo com os resistores do divisor

Tensão	Frequência [Hz]	Média dos valores indicados FLUKE_8508A [V]	Média dos valores indicados DIVISOR [V]	Desvio padrão dos valores indicados DIVISOR [V]
50 V	60	50.1035	50.0709	0.0168
	180	50.1007	50.2016	0.0015
	300	50.0961	50.4676	0.0012
	660	50.0862	51.9178	0.0006
	1500	50.0800	58.1290	0.0006
	3000	50.0444	73.4769	0.0011

A origem do problema eram capacitâncias parasitas dos fios que levavam o sinal da placa dos resistores do divisor para a placa do circuito eletrônico. A capacitância dos fios em paralelo com os resistores fazia com que a impedância equivalente diminuísse com o aumento da frequência. Como pode ser visto nas tabelas 4.2 e 4.3, as capacitâncias do resistor da alta tensão do divisor e da baixa são da mesma ordem de grandeza. Assim, a capacitância

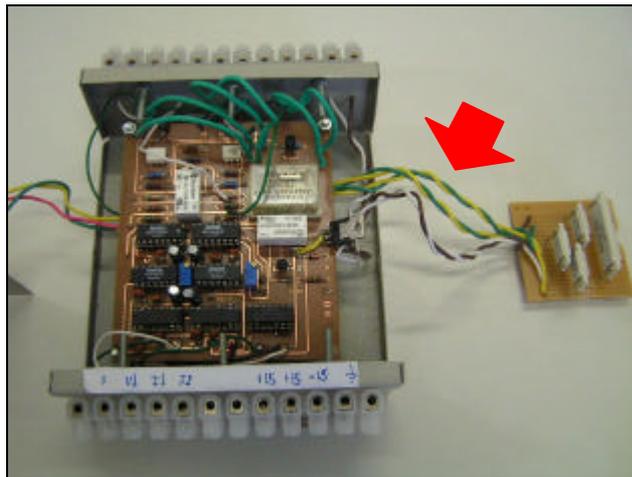


Figura 4.23 – Foto do sistema de medição com fios em paralelo com resistores do divisor

4.6.2 Descontinuidades provocadas pela variação da temperatura

O sistema apresentou descontinuidade no ensaio de coeficiente de temperatura. Essa descontinuidade era provocada falta de capacitores de tântalo nas alimentações dos amplificadores de isolamento utilizados no circuito eletrônico. As figuras 4.24 e 4.25 apresentam os resultados. O item 5.3.1 apresenta o resultado após uma solução que reduziu o problema drasticamente.

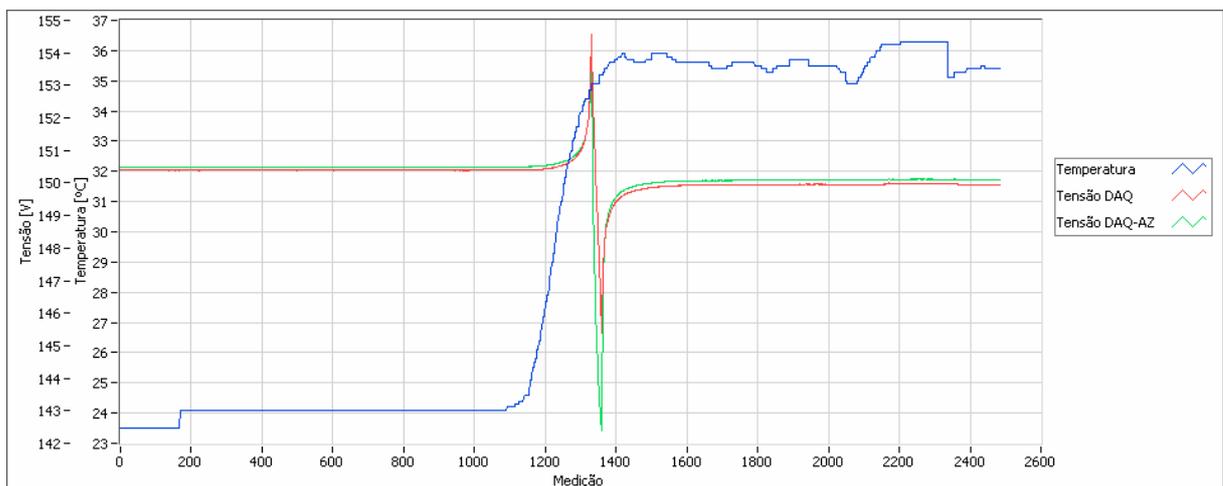


Figura 4.24 – Descontinuidade na medição de tensão com a variação de temperatura

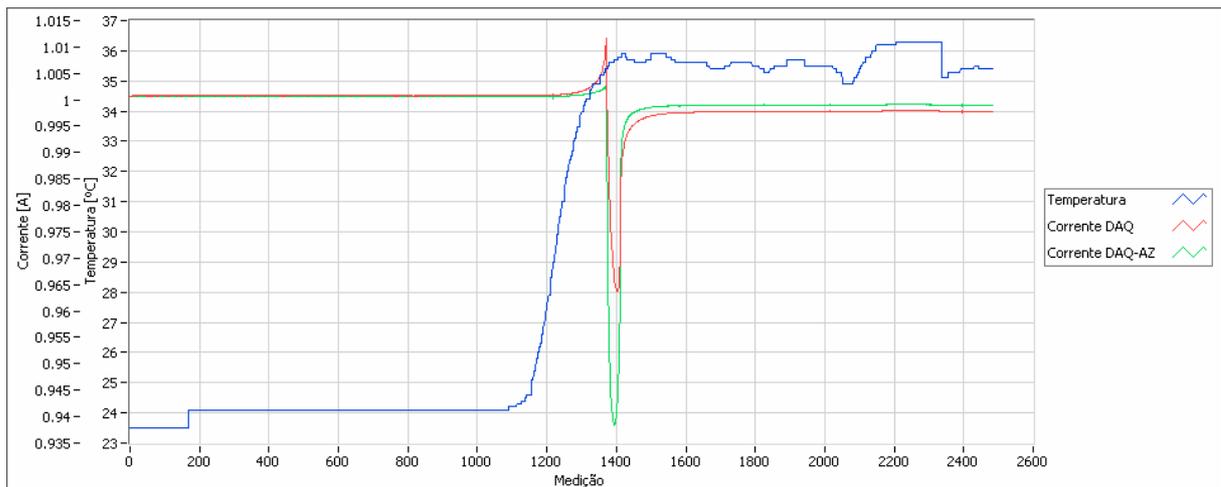


Figura 4.25 – Descontinuidade na medição de corrente com a variação de temperatura

4.6.3 Circulação de ar sobre os resistores do divisor

Circulação de ar sobre os resistores do divisor faz com que haja alteração dos valores e com isso variação do valor indicado. Medições com os resistores expostos ao ambiente mostraram que resistores, mesmo com baixíssimos coeficientes de temperatura, são sensíveis à ventilação. A figura 4.26 mostra o comportamento do divisor resistivo quando os resistores ficam expostos à ventilação de equipamentos de ar-condicionado. A frequência do sinal na figura 4.26 é igual à frequência do controle *on/off* do aparelho de ar-condicionado local.

A solução para este problema é evitar a circulação de ar pelos resistores. Colocá-los dentro de uma caixa fechada eliminou esse problema.

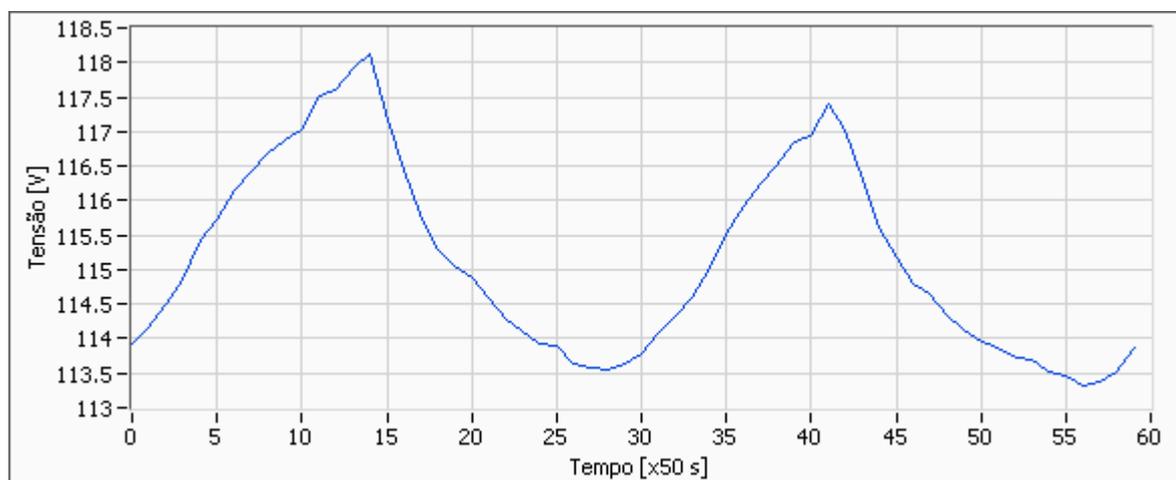


Figura 4.26 – Variação do valor indicado devido ao ar-condicionado

4.6.4 Aquecimento dos resistores por efeito Joule

O sistema de medição de tensão CA apresenta um pequeno regime transitório a partir do momento em que os resistores do divisor são energizados com a tensão a ser medida, sendo mais acentuado em medições de tensões maiores que 200 V. A figura 4.27 apresenta o resultado de medições consecutivas com o divisor resistivo e o Fluke-8508A a partir da energização dos resistores.

O comportamento apresentado na figura 4.27 pode ser explicado pela diferença da potência dissipada pelos resistores do divisor. A diferença entre as quedas de tensão, e consequentemente diferença entre as dissipações de potência, sobre os resistores faz com que a curva de aquecimento para cada resistor seja diferente, fazendo com que haja um período transitório. A figura 4.28 ilustra essa situação. O ponto em que a diferença entre as duas curvas de aquecimento é maior equivale ao ponto de maior tensão indicada no gráfico da figura 4.27. Depois de estabilizado, o sistema pode ser utilizado sem maiores problemas de incerteza de medição.

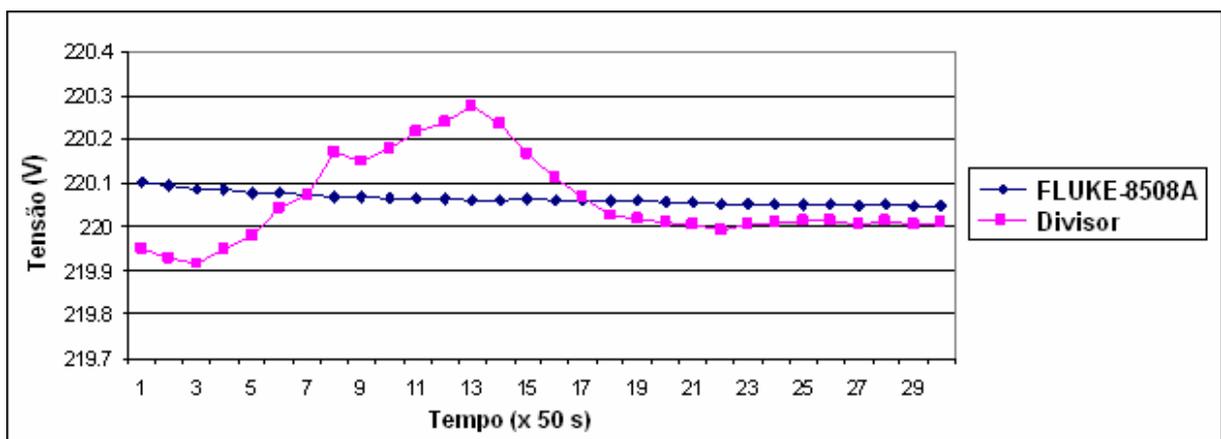


Figura 4.27 – Estabilização dos resistores por efeito Joule

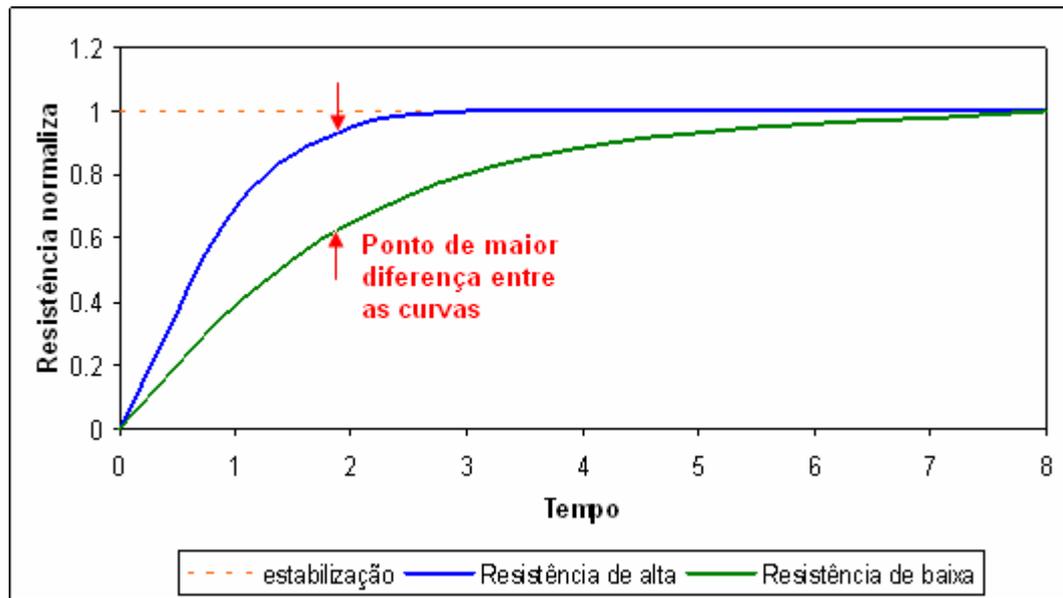


Figura 4.28 – Diferença na estabilização dos resistores do divisor

4.6.5 Resistência de isolamento de equipamentos e instrumentos isolados do terra

Quando o sistema de medição desenvolvido foi instalado na saída da fonte Agilent-6812B, o desvio padrão das medições aumentou significativamente. Porém, medições realizadas com o multímetro de referência mostraram que a variação da tensão na saída da fonte não era tão alta. A figura 4.29 apresenta o resultado das medições.

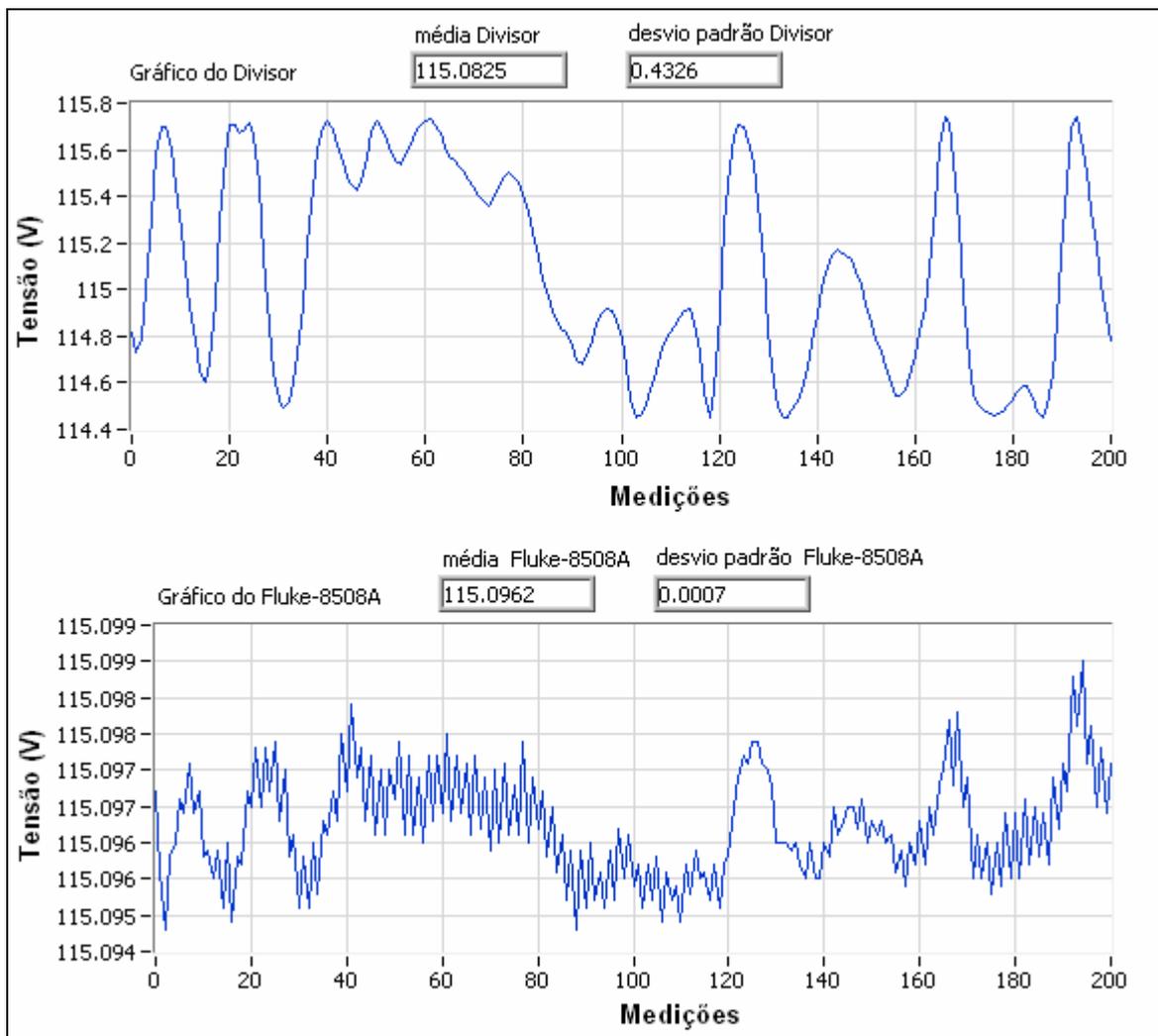
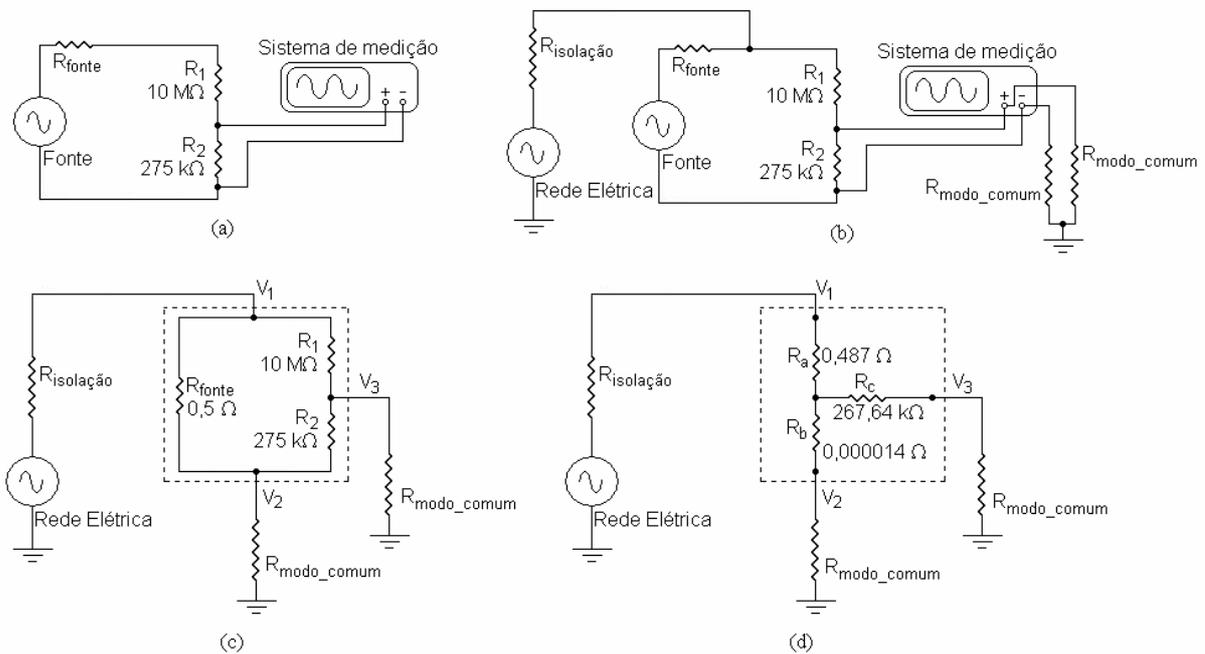


Figura 4.29 – Tensão medida na saída da fonte Agilent-6812B com divisor resistivo e Fluke-8508A

Os gráficos apresentados na figura 4.29, apesar de apresentarem desvios padrão muito diferentes, apresentam a mesma forma de onda. Isso significa que a variação da tensão é real.

A explicação para a variação na tensão na saída da fonte está apresentada na figura 4.30. Existe uma pequena parcela da tensão da rede elétrica na tensão de saída da fonte. O resultado da soma das duas tensões é a tensão apresentada no gráfico das medições com o multímetro de referência Fluke-8508A mostrado na figura 4.29. A amplitude é variável devido à diferença entre as frequências da rede e da fonte. A frequência de variação da amplitude é baixa pois a diferença entre essas frequências é pequena.



Legenda:

R_{fonte} : resistência interna da fonte (Ω);

$R_{isolação}$: resistência da saída da fonte para a fase da rede elétrica (Ω);

R_1 : resistor da alta tensão do divisor resistivo de tensão (Ω);

R_2 : resistor da baixa tensão do divisor resistivo de tensão (Ω);

R_{modo_comum} : resistência de modo comum do sistema de medição (Ω);

R_a , R_b e R_c : resistores equivalentes em ligação estrela dos resistores R_{fonte} , R_1 e R_2 .

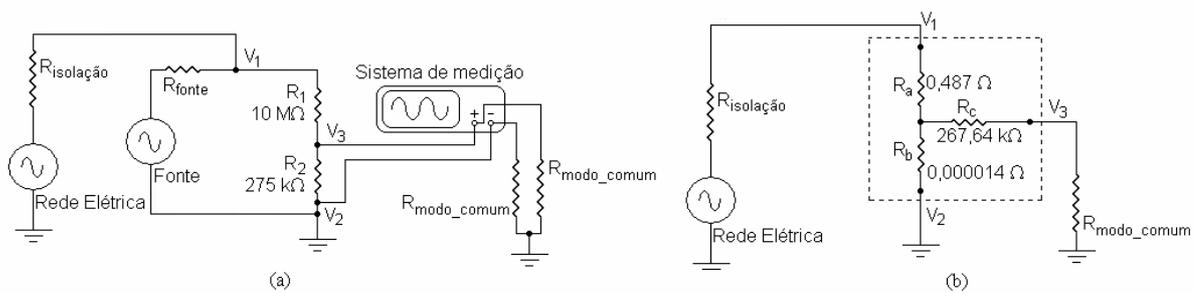
Figura 4.30 – Circuito equivalente na medição da tensão na saída da fonte Agilent-6812B com divisor resistivo

A figura 4.30 explica o porquê da grande amplitude na variação da tensão na saída do divisor resistivo. A figura 4.30(b) apresenta um circuito equivalente, considerando as resistências de modo comum do sistema de medição e a resistência de isolamento entre a fonte e a rede elétrica. A figura 4.30(c) apresenta o mesmo circuito da figura 4.30(b), porém utilizando o teorema da superposição, considerando apenas as tensões geradas pela rede elétrica. Naturalmente, para a aplicação desse teorema, a fonte de tensão, representando a fonte CA, foi curto-circuitada. A figura 4.30(d) apresenta o circuito utilizando a equivalência de rede de resistores delta (Δ) para triângulo (Y). O resultado que pode ser visto é que a tensão no ponto central dos resistores em triângulo (Y) dentro do quadrado tracejado na figura 4.30(d) é de aproximadamente 1/3 da tensão da rede elétrica, considerando o valor dos

resistores de modo comum do sistema de medição da mesma ordem de grandeza da resistência de isolamento da fonte CA. Isso faz com que uma tensão significativa, para os valores de incerteza desejados, apareça entre os pontos V_3 e V_2 .

A solução para esse problema está apresentada na figura 4.31. Aterrando o divisor resistivo, ou a saída da fonte, a tensão no ponto central dos resistores em triângulo dentro do quadrado tracejado fica praticamente zero. Isso faz com que a diferença de tensão entre os pontos V_3 e V_2 também zere.

A diferença de tensão entre os pontos V_3 e V_2 é importante pois é a tensão de saída do divisor resistivo, como pode ser visto na figura 4.31(a).



Legenda:

R_{fonte} : resistência interna da fonte (Ω);

R_{isolacao} : resistência da saída da fonte para a fase da rede elétrica (Ω);

R_1 : resistor da alta tensão do divisor resistivo de tensão (Ω);

R_2 : resistor da baixa tensão do divisor resistivo de tensão (Ω);

$R_{\text{modo_comum}}$: resistência de modo comum do sistema de medição (Ω);

R_a , R_b e R_c : resistores equivalentes em ligação estrela dos resistores R_{fonte} , R_1 e R_2 .

Figura 4.31 – Circuito equivalente da medição da tensão na saída da fonte Agilent-6812B com divisor resistivo aterrado

5 COMPORTAMENTO METROLÓGICO DOS SISTEMAS DE MEDIÇÃO ANALISADOS

A plena caracterização dos erros sistemáticos e aleatórios, apresentados nas condições em que o sistema de medição será utilizado, é uma condição necessária para que resultados de medições confiáveis sejam obtidas. A forma usual de caracterizar o desempenho metrológico de um sistema de medição é fazer a calibração do mesmo [35].

Nesse item será apresentado o resultado da calibração dos sistemas de medição analisados na faixa de medição em que o sistema será utilizado.

5.1 Calibração dos sistemas de medição

Segundo o VIM [36]: “calibração é o conjunto de operações que estabelece, sob condições especificadas, a relação entre os valores indicados por um instrumento de medição ou sistema de medição ou valores representados por uma medida materializada ou um material de referência, e os valores correspondentes das grandezas estabelecidos por padrões”. O resultado da calibração permite tanto o estabelecimento dos valores do mensurando para as indicações, como a determinações das correções a serem aplicadas.

5.1.1 Balanço de incertezas das calibrações

A comparação do comportamento metrológico dos instrumentos foi feita com base em suas calibrações. Tendo em mente que essas calibrações são válidas para esses instrumentos especificamente, e não para os dispositivos do mesmo modelo. A calibração, para os sistemas desenvolvidos, também serviu como validação metrológica.

O balanço de incertezas da calibração foi baseado na tabela 5.1, que exemplifica a situação de sistemas de medição de tensão. Este balanço de incertezas apresenta dois resultados: a correção combinada e a incerteza expandida. Esses são apresentados no

resultado como “Tendência [V]” e “Incerteza [V]”, respectivamente, na tabela 5.2. Os cálculos foram feitos para apenas uma medição. Os resultados das calibrações estão apresentados no Apêndice 3.

Tabela 5.1 – Balanço de incertezas utilizado nas calibrações dos instrumentos ensaiados

BALANÇO DE INCERTEZAS						
Fontes de incerteza		efeitos sistemáticos	efeitos aleatórios			
símbolo	descrição	erro	U	distribuição	u	g.l.
Te	Tendência					
Re	Repetitividade das medições (tipo A)			normal		
Res-MET	Resolução do medidor em teste			retangular		
U-PAD	Incerteza do medidor de referência			normal		
Res-PAD	Resolução do medidor de referência			retangular		
Cc	Correção combinada					
uc	Incerteza combinada			normal		
Uc	Incerteza expandida			normal		

A tabela 5.2 mostra como são apresentados os resultados da calibração. A coluna “Medição (média)” apresenta a média das medições de um mesmo ponto, feitas com o sistema em calibração. A coluna “Padrão (média)” apresenta a média das medições feitas com o multímetro de referência Fluke-8508A [42]. O valor da “Tendência [V]” é a diferença entre os valores das duas colunas anteriores. A coluna “Incerteza [V]” apresenta a incerteza expandida calculada com o uso da tabela 5.1. O “Erro máximo [V]” é o maior valor absoluto encontrado na composição (tendência [V] \pm incerteza [V]). O “Erro máximo [%]” é a porcentagem representada pelo “Erro máximo [V]” relativo ao valor medido.

Tabela 5.2 – Tabela utilizada para apresentação dos resultados da calibração

Sistema de medição em calibração					
Medição (média)	Padrão (média)	Tendência [V]	Incerteza [V]	Erro máximo [V]	Erro máximo [%]

5.1.2 Padrão de tensão e corrente

Um padrão é uma medida materializada, instrumento de medição, material de referência ou sistema de medição destinado a definir, realizar, conservar ou reproduzir uma unidade ou um ou mais valores de uma grandeza para servir como referência [35], [36].

O padrão utilizado para os sistemas de medição foi o multímetro de referência de 8.5 dígitos Fluke-8508A [42], mostrado na figura 5.1.



Figura 5.1 – Multímetro de referência Fluke-8508A

5.2 Ensaios e calibrações dos sistemas de medição analisados

Devido à impossibilidade de separar os transdutores da fonte Agilent-6812B de seus terminais de saída, a calibração foi realizada utilizando as próprias tensão e corrente. Este mesmo sinal foi utilizado tanto para os transdutores da fonte como para o WT130. Para o sistema de medição desenvolvido e para o 2480E, a fonte de sinal foi o multicalibrador Fluke-5520A [43]. Como padrão, foram utilizadas as medições com o multímetro de referência Fluke-8508A.

O resultado da calibração está apresentado de duas formas: a tabela apresentada na tabela 5.2 e um gráfico de erro máximo, o qual também apresenta a especificação do sistema em calibração. Assim, torna-se mais fácil verificar se o sistema de medição atende às especificações do fabricante. O resultado da calibração de todos os sistemas de medição analisados pode ser visto no Apêndice 3.

5.2.1 Análise dos sistemas de medição de tensão

A figura 5.2 apresenta uma comparação dos dados de catálogo da medição de tensão CA, dos sistemas de medição analisados. Pode-se notar que, para a aplicação, todos os sistemas de medição atendem às exigências das normas de ensaio de desempenho de compressores, apresentadas na tabela 1.2. Porém, como apresentado no item 1.3, tolerâncias mais “apertadas” são exigidas para pesquisa e desenvolvimento. Para esse caso, as melhores opções

para a medição de tensão CA são o sistema desenvolvido (divisor resistivo) e o transdutor da fonte Agilent-6812B. Logicamente, a escolha do transdutor dessa fonte implica escolha do transdutor de corrente da mesma para trabalho em conjunto na medição de potência.

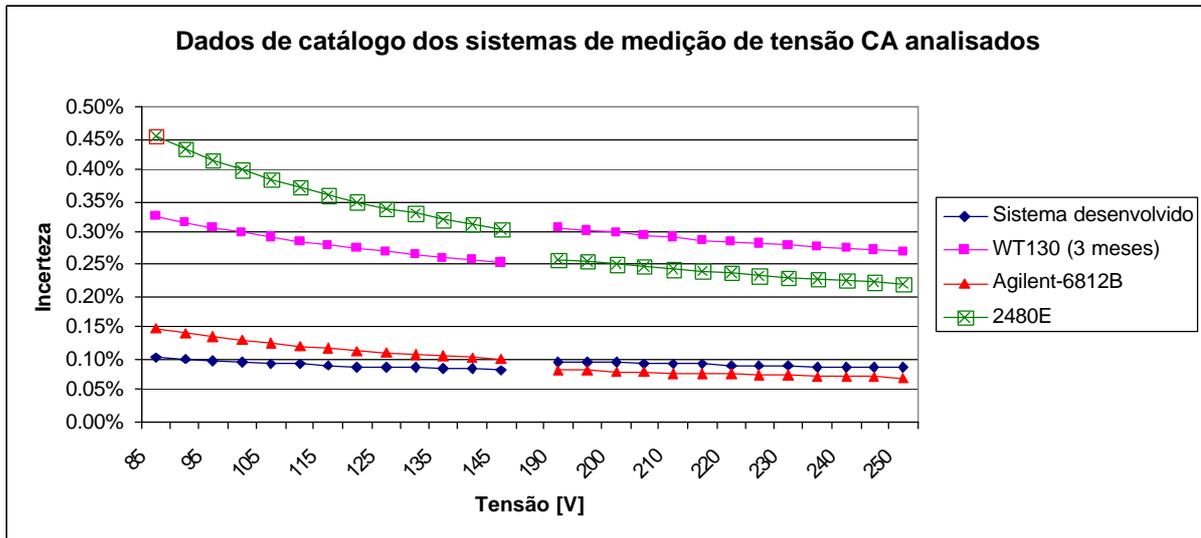


Figura 5.2 – Comparação dos dados de catálogo dos sistemas de medição de tensão CA analisados

A figura 5.3 apresenta a comparação dos resultados da calibração dos sistemas de medição de tensão CA analisados. Todos os sistemas de medição de tensão CA estudados atendem às especificações de catálogo. Da mesma forma que a comparação dos dados de catálogo, o divisor resistivo com um sistema de aquisição de boa qualidade e o transdutor da fonte Agilent-6812B apresentaram os melhores resultados na calibração. Apesar de todos os transdutores, na calibração, apresentarem incertezas menores que 0.1%, com o tempo o desempenho metrológico é desconhecido, sendo garantidas pelo fabricante, as especificações de catálogo.

Devido ao alto custo, pode ser que, em futuros painéis de ensaio de compressores, não seja utilizada a fonte Agilent-6812B. Isso faz com o que a solução mais adequada para medição de tensão CA seja o divisor resistivo.

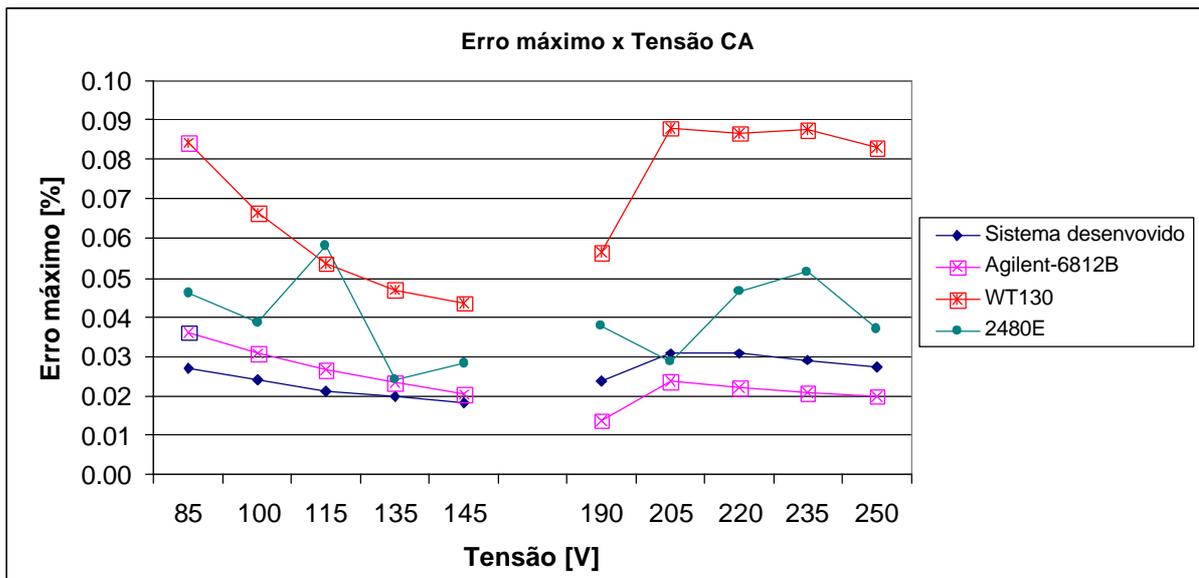


Figura 5.3 – Comparação da calibração dos sistemas de medição de tensão CA estudados

A incerteza especificada em catálogo dos sistemas de medição de tensão CC está apresentada na figura 5.4. Nota-se pelo gráfico que a especificação do multímetro 6.5 dígitos, HP-34401A, é significativamente melhor que os demais sistemas de medição. O WT130 possui a maior incerteza especificada em catálogo a partir de 40 V. O sistema desenvolvido, o divisor resistivo, apresenta a segunda melhor especificação entre os sistemas de medição de tensão CC analisados, atendendo aos 0.1% de incerteza desejados.

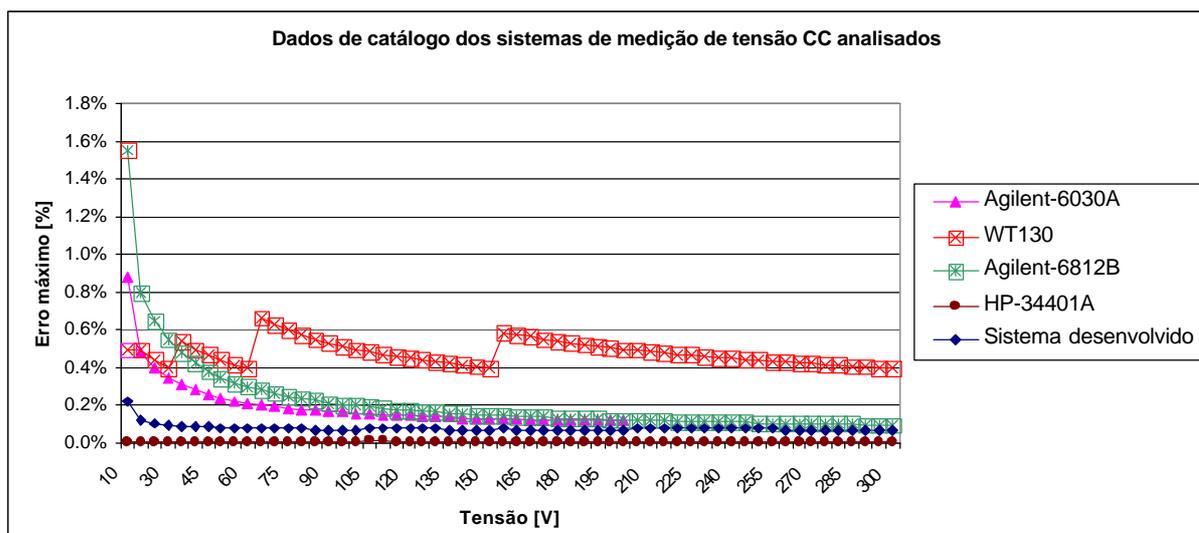


Figura 5.4 – Comparação dos dados de catálogo dos sistemas de medição de tensão CC analisados

Na figura 5.4 é apresentada a incerteza especificada de todos os sistemas de medição até 300 V, exceto o transdutor da fonte Agilent-6030A cujo final da faixa de medição é 200 V. Devido à impossibilidade de calibrar esse transdutor separado da saída de tensão, a calibração foi realizada utilizando o sinal de tensão da fonte e as medições com o multímetro de referência Fluke-8508A como padrão. Em paralelo com o transdutor da fonte Agilent-6030A, foram calibrados todos os outros sistemas de medição, exceto o sistema desenvolvido. Para a calibração deste último sistema de medição também foi utilizado como padrão as medições com o multímetro de referência Fluke-8508A, porém o sinal de teste foi gerado com o multicalibrador Fluke-5520A. Por esse motivo, a calibração do sistema desenvolvido foi feito até 290 V, e os demais sistemas de medição foram apenas até 200 V.

A figura 5.5 apresenta o gráfico de comparação dos erros máximos encontrados na calibração dos sistemas analisados. Todos os sistemas atendem às especificações do fabricante e ainda apresentaram incerteza na ordem de grandeza da desejada. Porém, da mesma forma que nos sistemas de medição de tensão CA, o fabricante garante apenas as informações de catálogo.

Pelo gráfico da figura 5.5, não é possível constatar se realmente o HP-34401A atende às especificações. Mas isso pode ser confirmado nas figuras C.60, C.61 e C.62 no Apêndice 3. Os gráficos de erro máximo e tabelas com os dados das calibrações de todos os sistemas analisados também podem ser encontrados nesse apêndice.

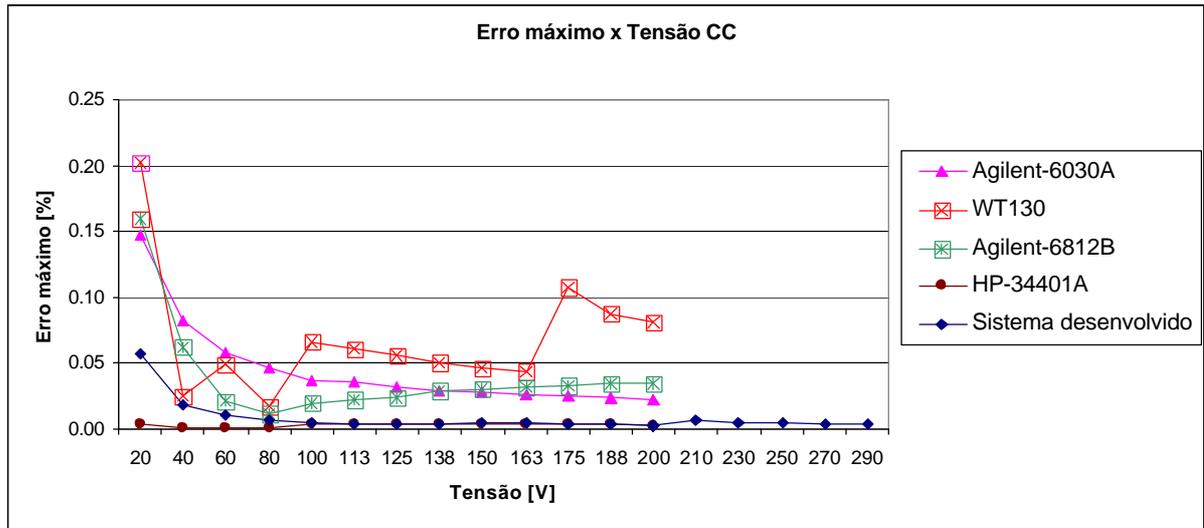


Figura 5.5 – Comparação da calibração dos sistemas de medição de tensão CC estudados

5.2.2 Análise dos sistemas de medição na medição de corrente

A figura 5.6 apresenta a comparação dos dados de catálogo dos sistemas de medição analisados na medição de corrente CA. Pode-se notar certa vantagem do sistema desenvolvido que, além de apresentar especificação melhor que a dos demais sistemas, é o único a atender a especificação de 0.1% de incerteza ao longo de toda a faixa de medição de corrente CA. O transdutor de corrente da fonte Agilent-6812B atende à especificação desejada apenas na medição de correntes superiores a 2.5 A.

As figuras 5.7 e 5.8 apresentam a comparação entre os erros máximos encontrados na calibração dos sistemas de medição analisados. A figura 5.7 compara os quatro métodos de medição estudados, o wattímetro 2480E é apresentado em três formas diferentes: a primeira com os dados brutos, a segunda com correção de ganho, e a terceira com correção de zero e ganho. Nota-se claramente que os dois melhores métodos utilizados são o sistema desenvolvido e o WT130. A figura 5.8 compara a calibração desses dois métodos.

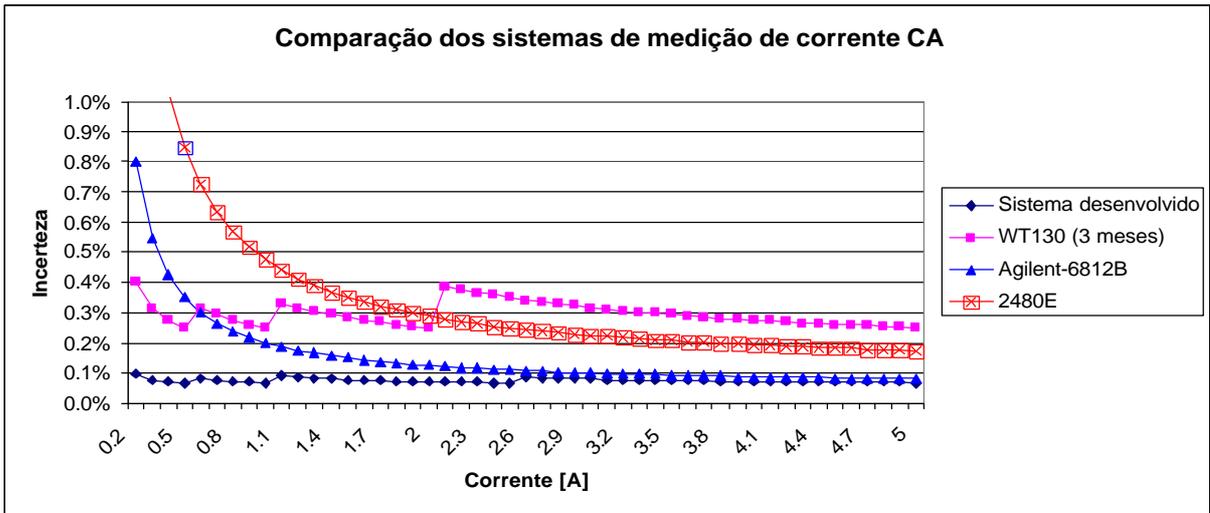


Figura 5.6 – Comparação das especificações de catálogo dos sistemas de medição de corrente CA analisados

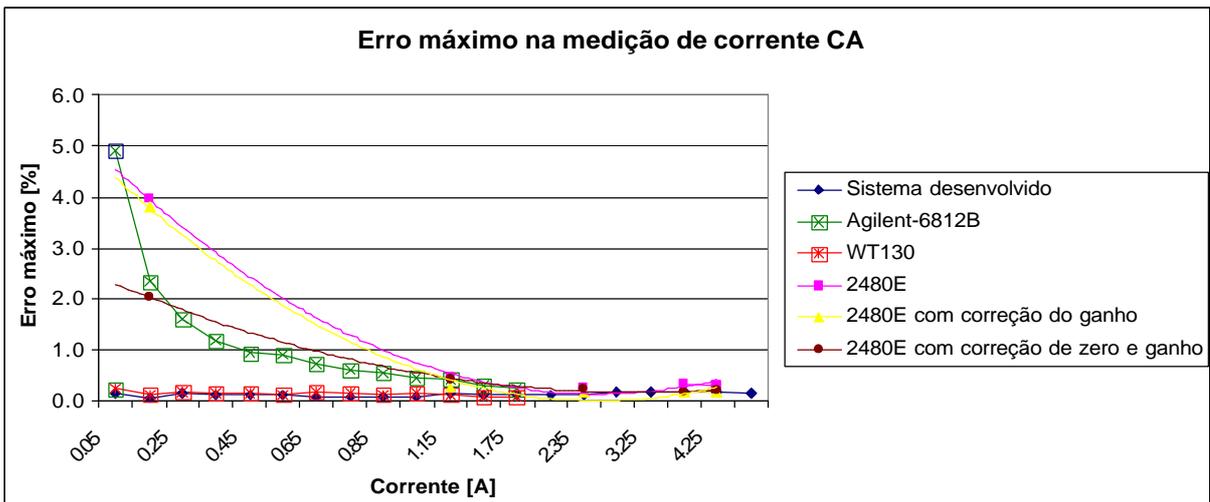


Figura 5.7 – Comparação da calibração dos sistemas de medição de corrente CA analisados

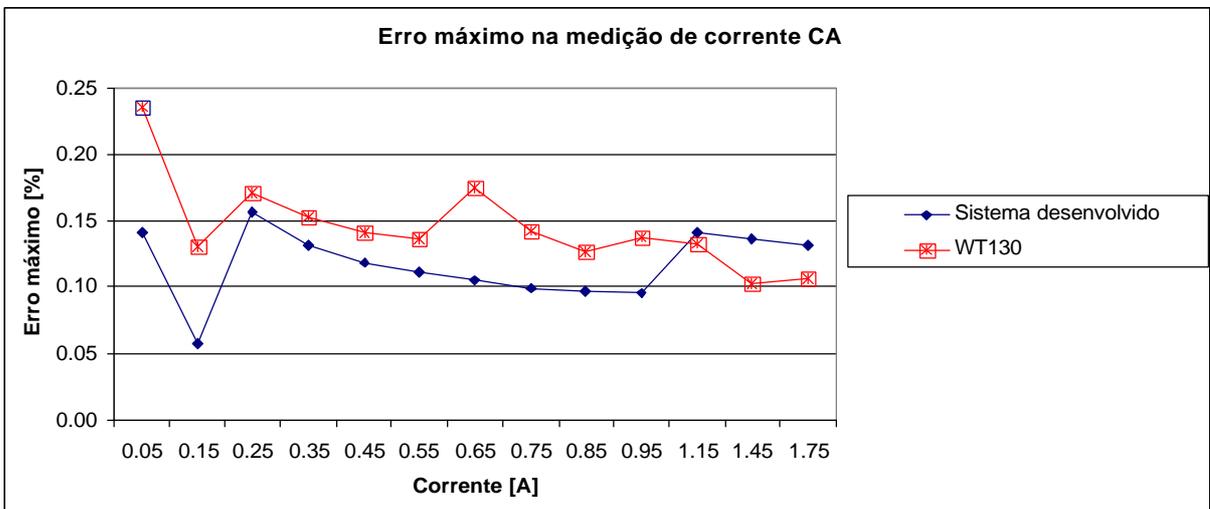


Figura 5.8 – Comparação entre os dois melhores resultados de calibração dos sistemas analisados

Alguns resultados não eram esperados. O transdutor da fonte Agilent-6812B, que segundo as especificações é melhor que o WT130 a partir de 0.5 A, nas calibrações apresentou erro máximo maior ao longo de toda a faixa de medição ensaiada. A explicação para esse fato pode ser visto nos gráficos de erro máximo da calibração no Apêndice 03 (figuras C.29, C.30 e C.31). Erros de zero e ganho são facilmente identificados na curva de calibração.

Observando-se as tabelas de calibração pode-se notar que a coluna “Incerteza [A]” das tabelas C.29, C.30 e C.31, que apresenta a parte aleatória da incerteza, é menor que a incerteza do catálogo. Com isso acredita-se que correções de erro de zero e ganho fariam com que o sistema atenda às especificações do fabricante.

A figura 5.9 apresenta o gráfico de erro máximo na calibração do transdutor de corrente CA da fonte Agilent-6812B na faixa de (0.5 a 1.0) A. A tabela 5.3 mostra os detalhes da calibração desse transdutor. Esse gráfico e essa tabela também podem ser encontrados no Apêndice 3 com os outros gráficos e tabelas das outras faixas de medição.

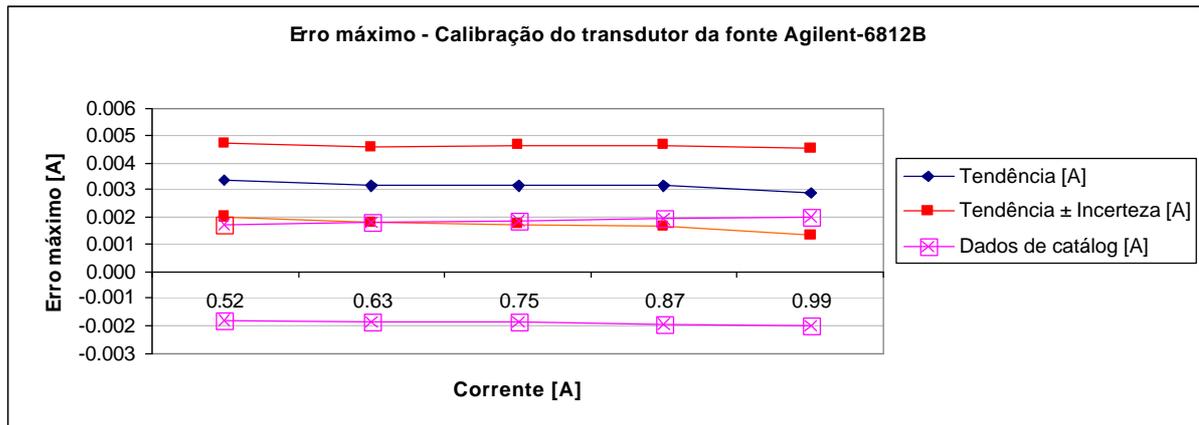


Figura 5.9 – Gráfico de erro máximo na medição de corrente CA do transdutor da fonte Agilent-6812B, faixa de (0.5 a 1.0) A

Tabela 5.3 – Calibração da medição de corrente CA do transdutor da fonte Agilent-6812B, faixa de (0.5 a 1.0) A

Calibração do transdutor da fonte Agilent-6812B					
Medição (média)	Padrão (média)	Tendência [A]	Incerteza [A]	Erro máximo [A]	Erro máximo [%]
0.52150	0.51813	0.0034	0.0014	0.0047	0.91
0.63793	0.63475	0.0032	0.0014	0.0045	0.72
0.75649	0.75332	0.0032	0.0014	0.0046	0.61
0.87298	0.86981	0.0032	0.0015	0.0047	0.53
0.99128	0.98837	0.0029	0.0016	0.0045	0.45

Outro resultado não esperado foi que, apesar de a calibração do sistema desenvolvido de medição de corrente CA ter apresentado erro máximo melhor que dos demais sistemas de medição, o erro máximo encontrado na calibração foi maior que a incerteza calculada para o sistema de medição desenvolvido. Isso pode ser visto na figura 5.10 e na tabela 5.4. Nota-se um aumento significativo do erro máximo entre os pontos 0.15 A e 0.25 A fazendo com que a partir desse último valor o sistema não atenda às especificações.

Isso pode ser explicado pela mudança da faixa de medição do medidor de referência. A figura 5.11 apresenta a comparação entre os Paretos das fontes de incerteza da calibração do sistema de medição de corrente CA nos pontos de 0.15 A e 0.25 A. Esse Pareto explica de forma gráfica o aumento do erro máximo, mostrando que a fonte de incerteza mais significativa, a incerteza de catálogo do multímetro de referência, para o caso da medição de 0.25 A é consideravelmente maior que para o caso de 0.15 A.

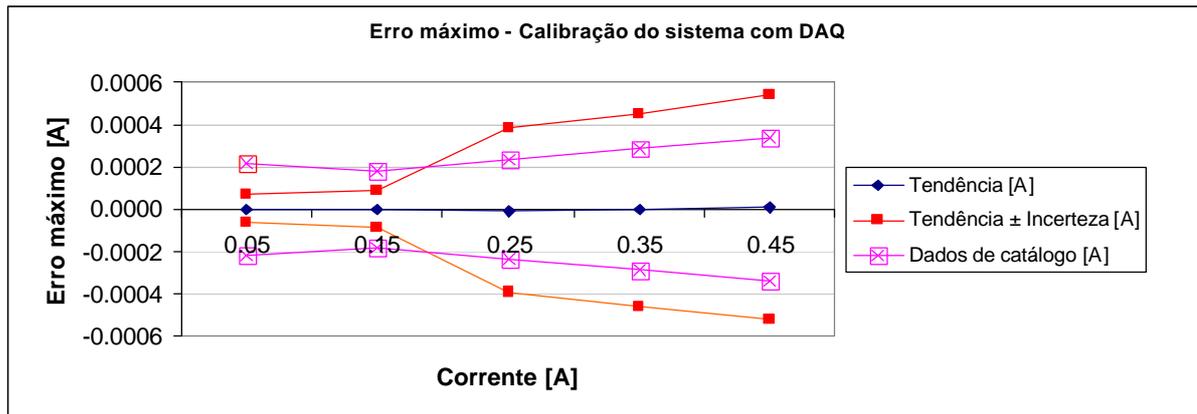


Figura 5.10 – Gráfico de erro máximo do sistema de medição de corrente CA, faixa de 0.5 A

Tabela 5.4 – Calibração do sistema de medição de corrente CA, faixa de 0.5 A

Calibração do sistema com DAQ					
Medição (média)	Padrão (média)	Tendência [A]	Incerteza [A]	Erro máximo [A]	Erro máximo [%]
0.04999	0.04999	0.000003	0.000068	0.00007	0.14
0.14998	0.14998	0.000000	0.000087	0.00009	0.06
0.24997	0.24998	-0.000007	0.000386	0.00039	0.16
0.35006	0.35006	-0.000002	0.000458	0.00046	0.13
0.45009	0.45009	0.000005	0.000530	0.00054	0.12

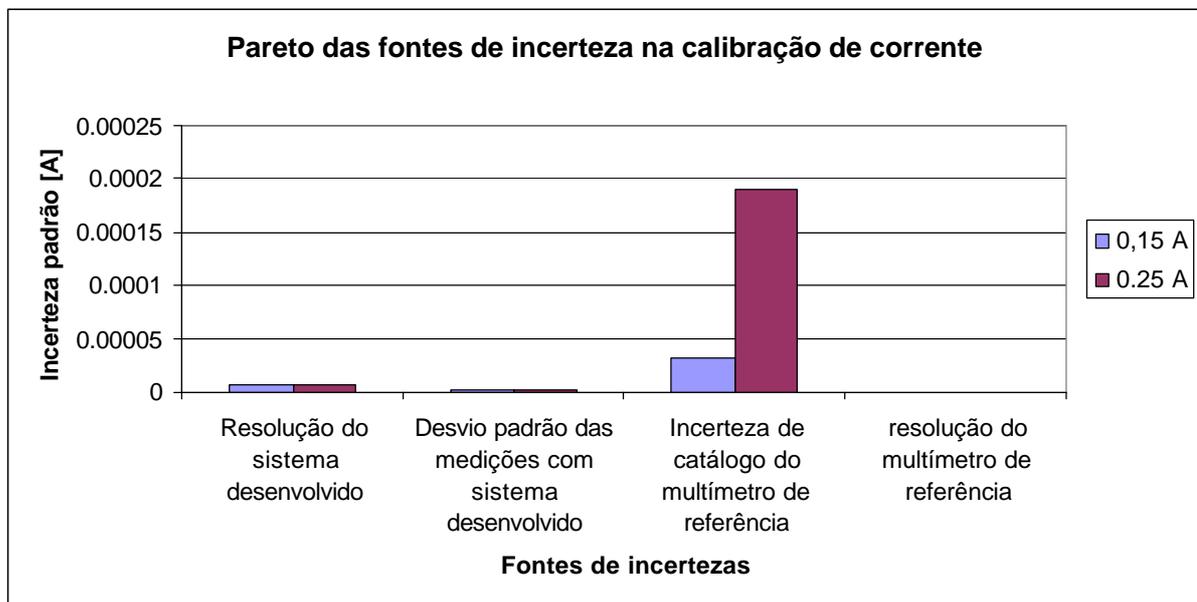


Figura 5.11 – Pareto de comparação entre as fontes de incertezas das calibrações de corrente CA nos pontos de 0.15 A e 0.25 A

Durante as calibrações de corrente CA observou-se que a partir de 2.0 A todos os sistemas analisados apresentavam um erro sistemático bastante elevado. Devido a todos os instrumentos terem apresentado o desvio suspeitou-se do multímetro de referência Fluke-

8508A. Um ensaio de comparação entre o Fluke-8508A do Labmetro e o da ELETROSUL confirmaram a suspeita. O resultado pode ser visto na figura 5.12.

Com isso, a calibração dos sistemas de medição de corrente CA ficou limitada em até 2.0 A, mesmo o sistema sendo projetado para trabalhar com correntes de até 5 A. Os resultados das calibrações de corrente CA podem ser vistos no Apêndice 03.

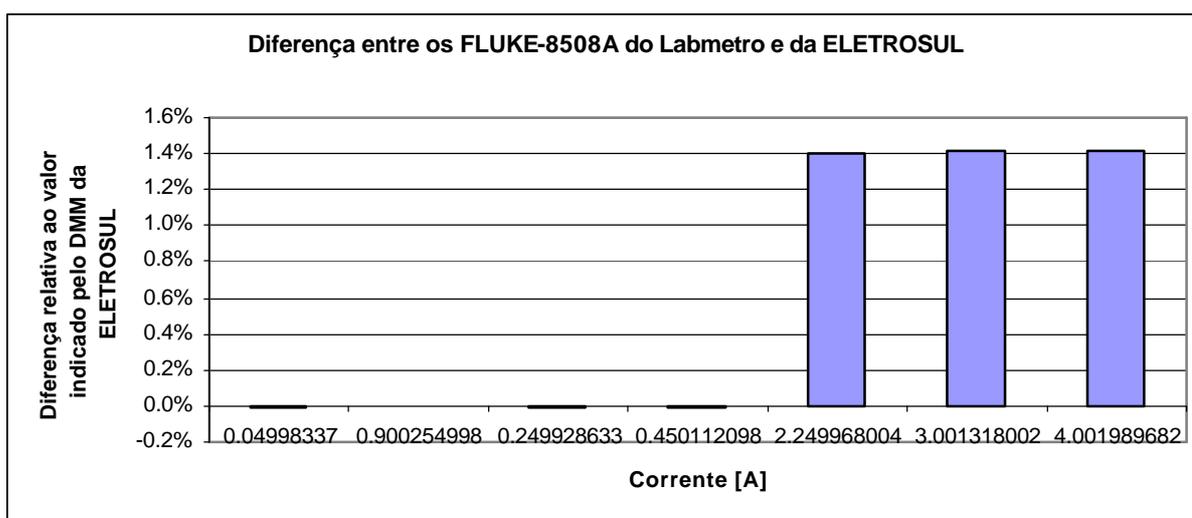


Figura 5.12 – Diferença entre os valores indicados na medição de corrente CA dos multímetros de referência Fluke-8508A do Labmetro e da ELETROSUL

A figura 5.13 apresenta a comparação da incerteza na medição de corrente CC dos sistemas de medição estudados. Nota-se que o sistema desenvolvido apresenta menor incerteza ao longo de toda a faixa exigida.

As figuras 5.14 e 5.15 apresentam os erros máximos encontrados nas calibrações dos sistemas analisados. A figura 5.15 mostra apenas os dois melhores resultados. Pode-se notar que o sistema desenvolvido na calibração também apresenta o melhor resultado.

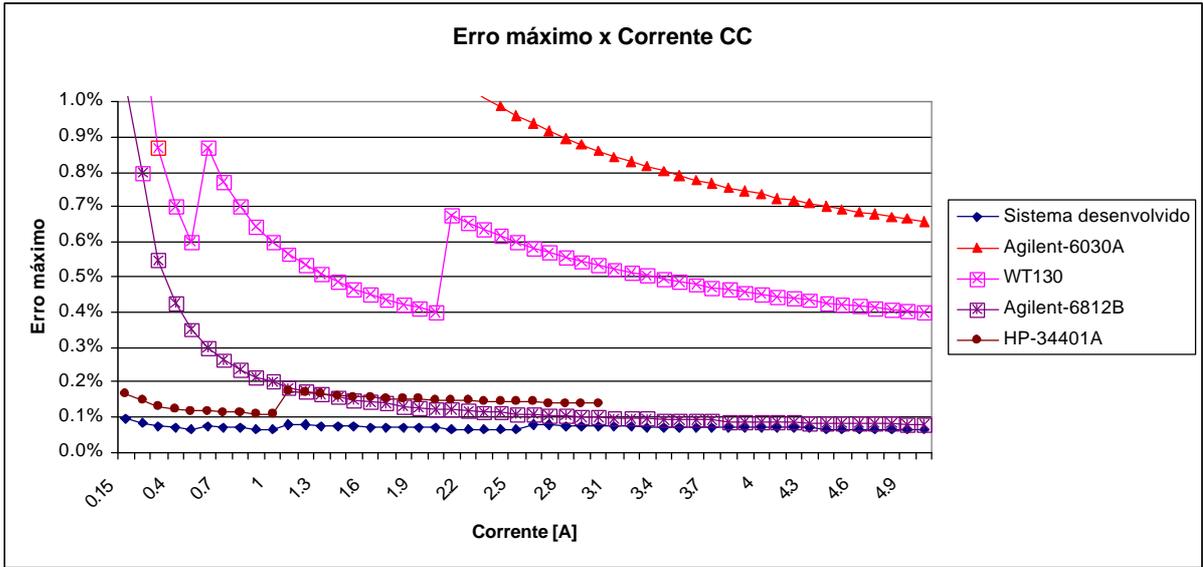


Figura 5.13 – Comparação da incerteza especificada para medição de corrente CC em catálogo dos sistemas analisados

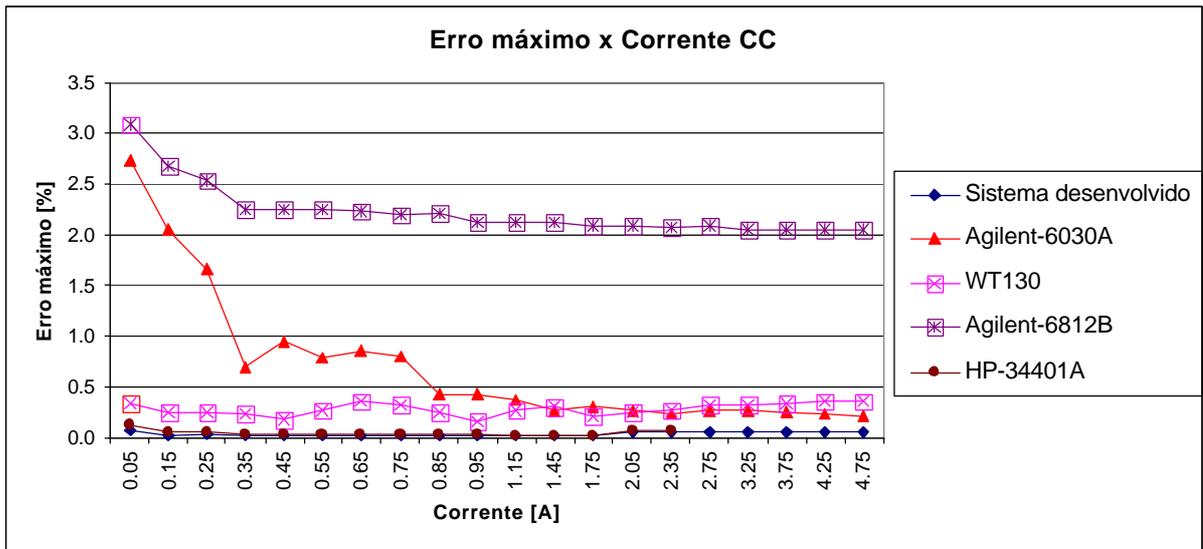


Figura 5.14 – Comparação do erro máximo na medição de corrente CC da calibração dos sistemas de medição analisados

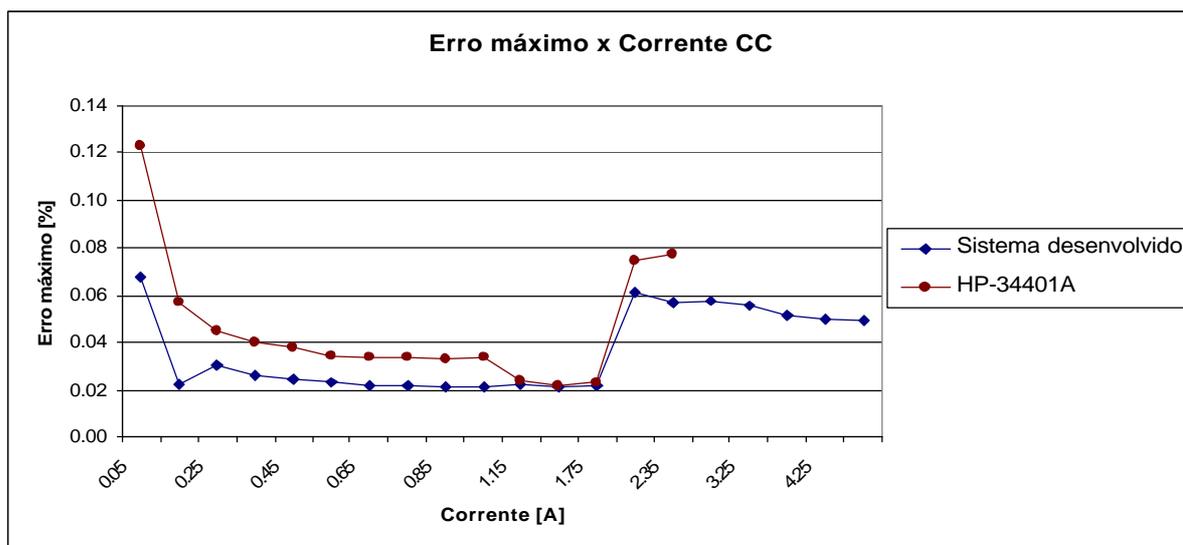


Figura 5.15 – Comparação do erro máximo na medição de corrente CC da calibração dos sistemas de medição analisados (dois melhores resultados)

O erro máximo encontrado calibração de corrente CC, como na de corrente CA, apresentou um aumento significativo quando o multímetro de referência muda de faixa de medição. Porém, mesmo com o aumento do erro máximo do sistema desenvolvido ainda permaneceu menor que a incerteza especificada. A figura 5.16 mostra o resultado. A calibração das demais faixas de medição pode ser encontrada no Apêndice 03.

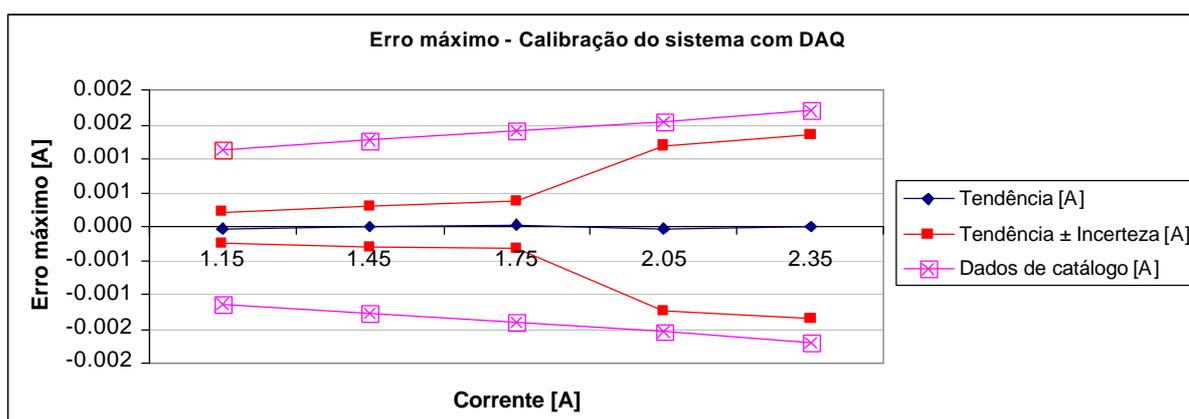


Figura 5.16 – Gráfico de erro máximo do sistema desenvolvido de medição de corrente CC, faixa de 1.15 A a 2.35 A, com auto-zero

Da mesma forma que na medição de corrente CA com o transdutor da fonte Agilent-6812B, na medição de corrente CC o sistema apresentou erros de zero e ganho consideráveis.

Essa situação é apresentada na figura 5.17. Com correção de zero e ganho o sistema pode atender às especificações.

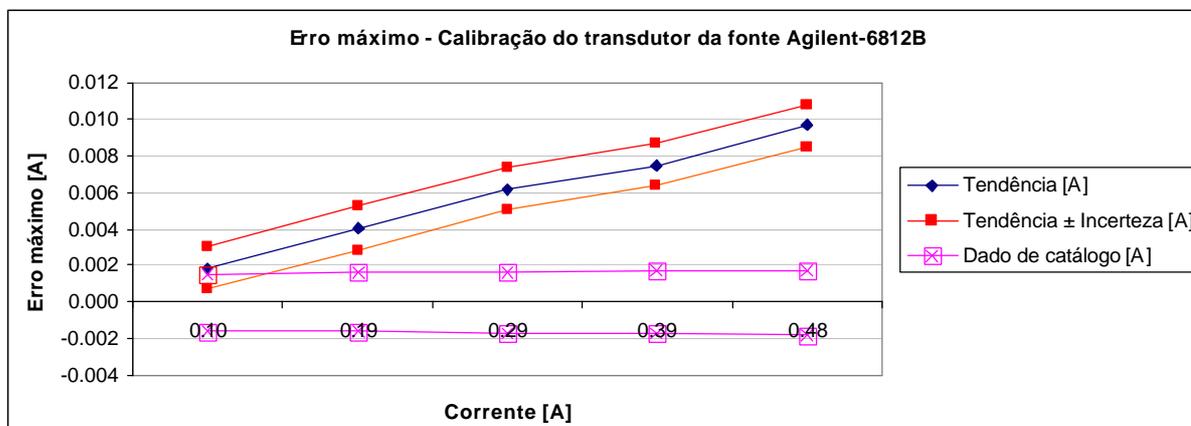


Figura 5.17 – Gráfico de erro máximo na medição de corrente CC do transdutor da fonte Agilent-6812B, faixa de (0.1 a 0.5) A

5.2.3 Análise dos sistemas de medição na medição de potência

Como dito no capítulo 2, existe a necessidade de um sistema para medição da potência consumida pelo compressor e também a potência entregue às resistências do trocador de calor no painel de ensaio de desempenho de compressores. A potência consumida pelos compressores e a potência entregue ao trocador de calor, como dito no capítulo 3, são calculadas a partir da medição de tensão e corrente.

Os sistemas foram analisados até agora considerando apenas a medição de tensão e corrente. Neste item será analisada a incerteza na medição de potência. A calibração da medição potência não pode ser realizada, pois o padrão adotado para as medições de tensão e corrente, o multímetro de referência Fluke-8508A, não mede potência.

Como o sistema não pode ser calibrado, a única forma de comparar os sistemas de medição foi comparando as especificações de catálogo. O WT130 apresenta as especificações de incerteza na medição de potência apenas para um fator de potência unitário, e apresenta uma incerteza adicional que é função da diferença de fase entre tensão e corrente. Os demais equipamentos não apresentam incerteza dependente do fator de potência. Por esse motivo,

para efeito de análise, a comparação dos sistemas de medição de potência foi realizada considerando fator de potência unitário.

Exceto para o sistema desenvolvido, todos apresentam em catálogo a incerteza na medição de potência. Dessa forma, foi necessário o cálculo da incerteza, e para isso foi utilizado o ISO GUM tradicional [44]. A fórmula utilizada para os cálculos, tanto para CA quanto para CC, foi a seguinte:

$$P = V \times I$$
$$\frac{u^2(P)}{P^2} = \frac{u^2(V)}{V^2} + \frac{u^2(I)}{I^2} \quad (5.1)$$

Os gráficos comparativos dos sistemas de medição de potência CA estão apresentados nas figuras 5.19 e 5.20. Os gráficos apresentados consideram fator de potência unitário.

Como o sistema de medição de potência CA será aplicado na medição da potência consumida de compressores, os gráficos para comparação dos sistemas de medição foram separados em dois grupos, um medindo potência em compressores cuja tensão de alimentação é 115 V e outro cuja tensão é 220 V. A figura 5.18 apresenta o gráfico da incerteza especificada na medição de potência CA em compressores de 115 V, e a figura 5.19 apresenta o gráfico para compressores cuja tensão de alimentação é 220 V. Nota-se nos dois casos que a incerteza apresentada pelo sistema desenvolvido é menor que a dos demais sistemas de medição. O WT130 e os transdutores da fonte Agilent-6812B ficam logo acima, sendo que o primeiro se apresenta melhor na medição no início da faixa.

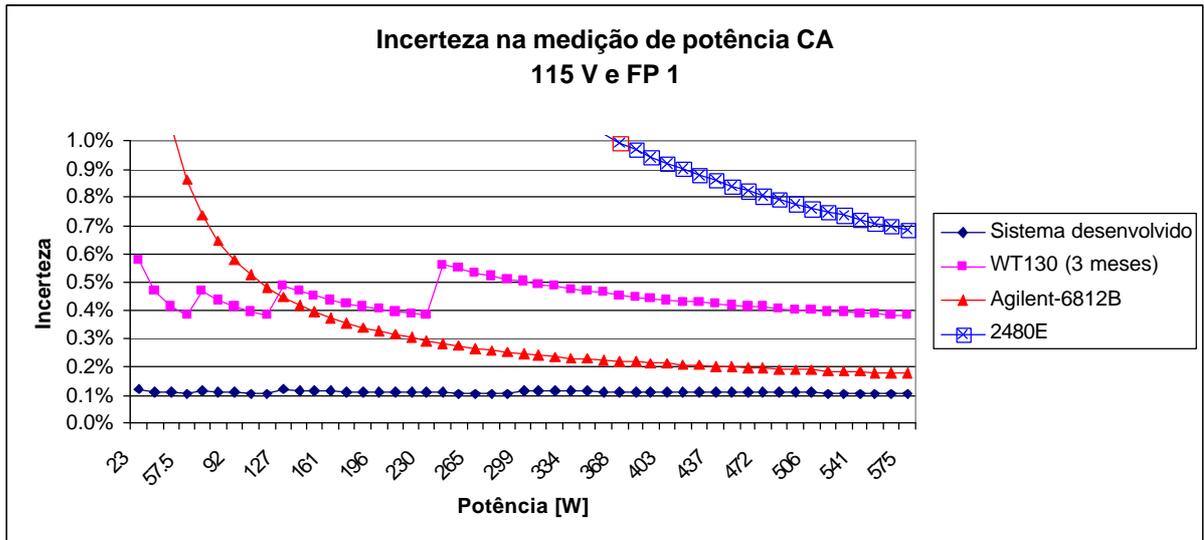


Figura 5.18 – Incertezas de catálogo de todos os sistemas de medição de potência CA com tensão de alimentação de 115 V e fator de potência unitário

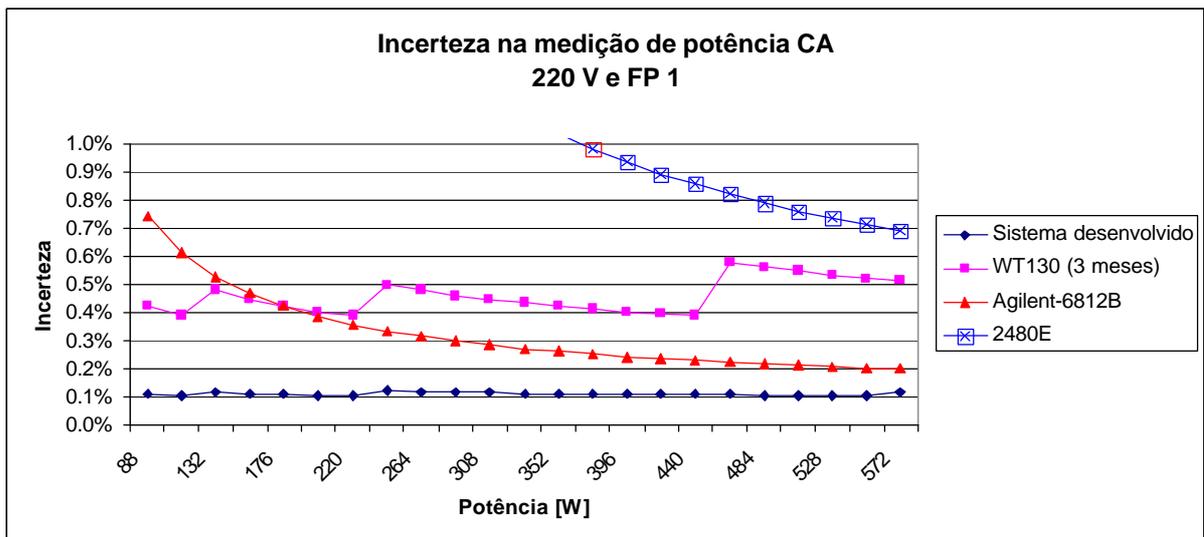


Figura 5.19 – Incertezas de catálogo de todos os sistemas de medição de potência CA com tensão de alimentação de 220 V e fator de potência unitário

Para a análise da incerteza na medição de potência CC, dois gráficos são apresentados. O gráfico da figura 5.20 mostra a comparação de todos os sistemas de medição analisados. Nesse gráfico fica claro que o WT130 e os transdutores da fonte Agilent-6030A não podem ser utilizados. A incerteza de medição desses sistemas é maior que 1%, especificado em norma, ao longo de quase toda a faixa de medição. Os transdutores da fonte Agilent-6812B pode ser utilizado no painel, porém apenas para o ensaio de compressores cuja capacidade seja maior que 50 W. A figura 5.21 compara a incerteza de medição de potência CC do

HP-34401A e do sistema desenvolvido. Em ambos os casos, como a medição de tensão e corrente são feitas separadamente, o cálculo da incerteza de medição foi feito utilizando o ISO GUM, da mesma forma como foi calculada para a medição de potência CA – equação (5.1).

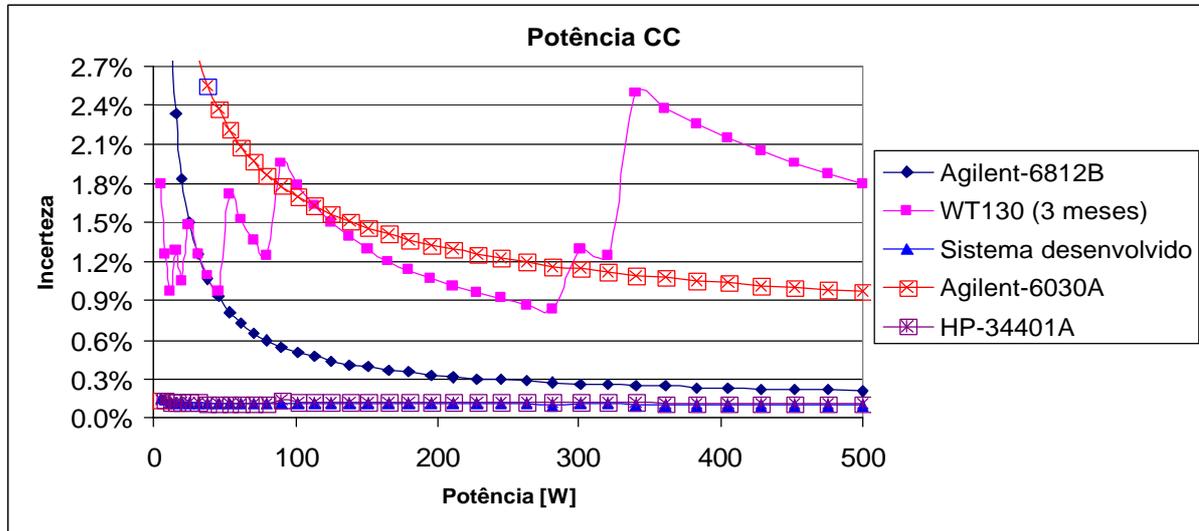


Figura 5.20 – Incertezas de catálogo para medição de potência CC dos sistemas de medição analisados

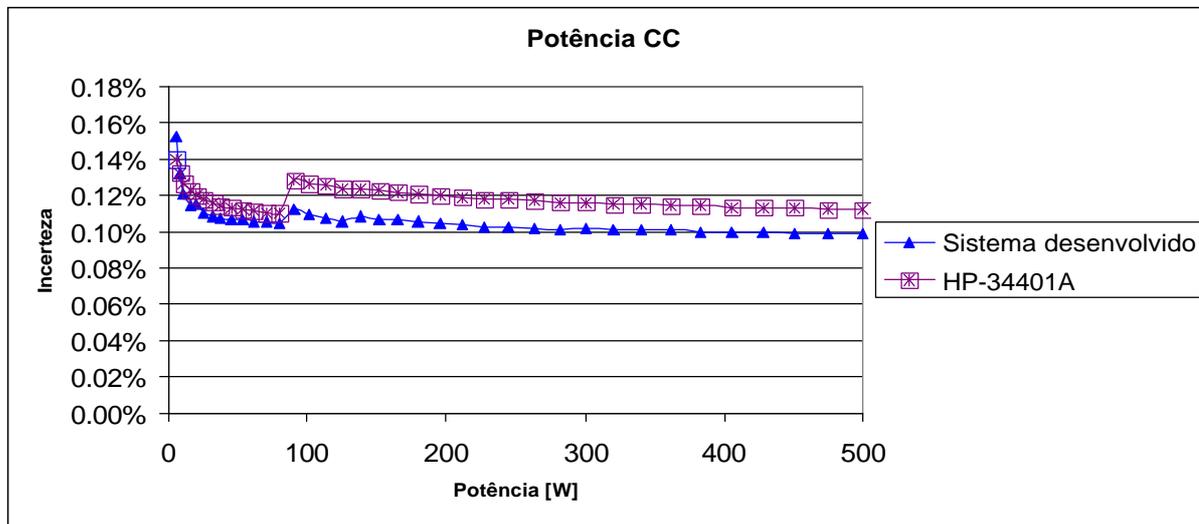


Figura 5.21 – Incertezas de catálogo para medição de potência CC do sistema desenvolvido e do HP-34401A

Tanto na medição de potencia CA quando CC, o sistema de medição desenvolvido se apresenta como a melhor opção para a aplicação. Esse sistema de medição, além de apresentar menor incerteza também apresenta menor custo, que para a Embraco é de grande interesse.

5.3 Ensaios adicionais dos sistemas de medição desenvolvidos

5.3.1 Ensaio do coeficiente de temperatura

O ensaio de variação de temperatura é um ensaio importante para a validação do sistema desenvolvido. O sistema desenvolvido foi projetado para apresentar baixo coeficiente de temperatura, pois em sua aplicação real estará sujeito a variações de temperatura, e este deve se manter dentro da especificação projetada. Os balanços de incertezas do item 4.5 prevêm uma variação de $\pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ na temperatura ambiente do sistema de medição.

A figura 5.22 mostra o resultado do ensaio na medição de tensão e corrente com a variação de temperatura. Devido ao efeito da temperatura no ganho do sistema ser muito maior que o mesmo efeito no erro de zero, as medições de tensão e corrente sem o uso do auto-zero tiveram resultado semelhante ao com o uso do auto-zero. Por isso apenas o gráfico do sistema com auto-zero foi mostrado.

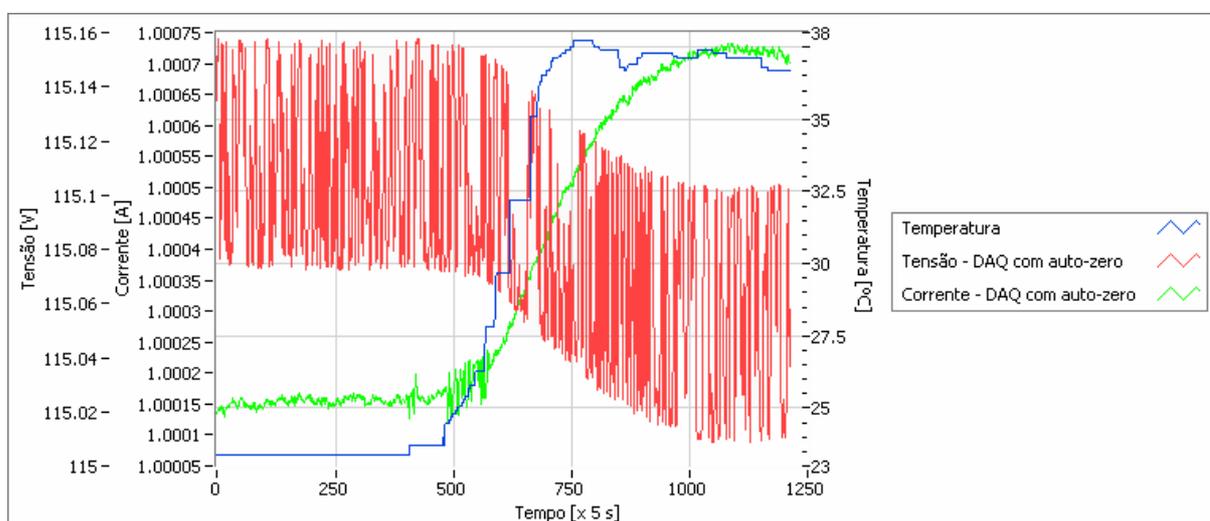


Figura 5.22 – Comportamento do sistema de medição CA desenvolvido com a variação de temperatura

O comportamento do sistema de medição de tensão e de corrente CA com a variação de temperatura foi diferente, enquanto o sistema de medição de corrente apresentou resultados maiores, o sistema de medição de tensão passou a apresentar resultados menores que o apresentado antes do aquecimento. Isso pode ser explicado pelo fato de no sistema de

medição de tensão CA não existir resistor de ganho. O efeito da temperatura no resistor de ganho leva o sistema a apresentar resultados maiores. O mesmo acontece nos sistemas de medição CC (figura 5.23), que tanto no circuito de medição de tensão quanto no de corrente, o resistor de ganho está presente. Os circuitos dos sistemas de medição CA e CC podem ser vistos nas figuras 4.5, 4.6, 4.7 e 4.8. As discontinuidades nos gráficos de tensão e corrente CC foram explicadas no item 4.6.2.

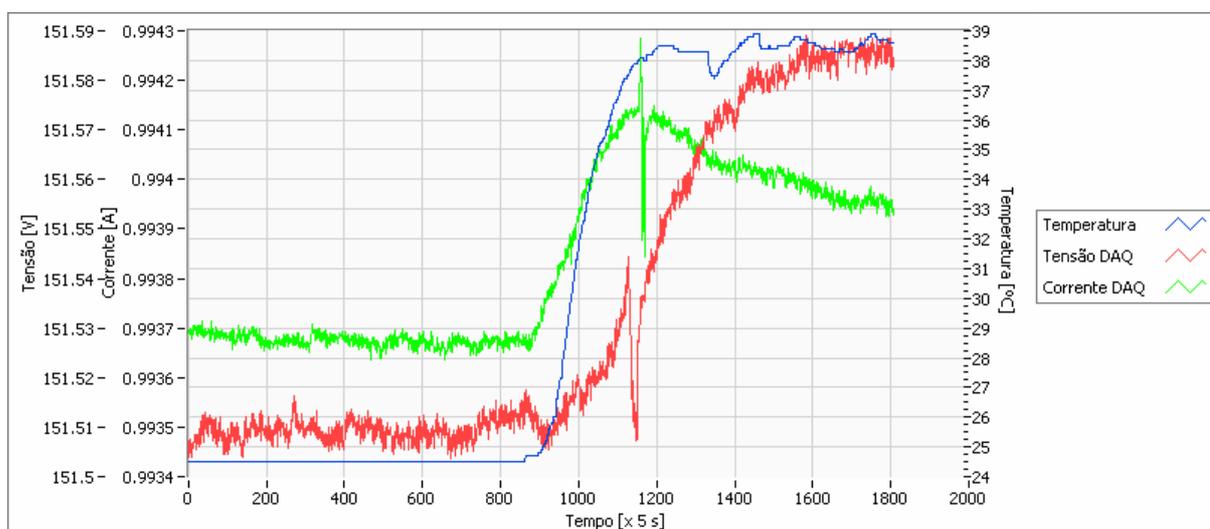


Figura 5.23 – Comportamento do sistema de medição CC desenvolvido com a variação de temperatura

Traduzindo os dados do gráfico do comportamento do sistema desenvolvido com a variação de temperatura de 14 °C em números, tem-se:

- variação da indicação de tensão CA: -0.049%;
- variação da indicação de corrente CA: 0.056%;
- variação na indicação de tensão CC: 0.050%;
- variação na indicação de corrente CC: 0.043% (máxima).

O ensaio de temperatura realizado serviu para caracterizar o comportamento do sistema de medição desenvolvido. Esta caracterização engloba os resistores, divisor e *shunt*, e a parte eletrônica projetada, além da placa de aquisição de sinais, cuja temperatura ambiente não foi alterada durante o ensaio.

Foi realizado mais um ensaio adicional para caracterizar o divisor resistivo e o *shunt* com a variação de temperatura. O ensaio do divisor resistivo só pode ser realizado com tensão CC devido ao alto valor dos resistores do divisor. A impedância de entrada dos multímetros disponíveis para a medição da tensão de saída do divisor é baixa para medições CA (1 M Ω). Já para medições de tensão CC, o multímetro digital HP-34401A apresenta duas opções para impedância de entrada, 10 M Ω ou > 10 G Ω . A impedância de 10 G Ω foi suficiente para a realização do ensaio. Para as medições da tensão do *shunt*, o problema de impedâncias não existiu devido ao baixo valor das resistências. O resultado pode ser visto nas figuras 5.24 e 5.25.

Traduzindo os gráficos em números, a variação da tensão de saída dos transdutores ficou a seguinte:

- divisor resistivo: 0.006% em 14 °C;
- *shunt*: - 0.003% em 14 °C.

Com esses valores pode-se concluir que a maior parte do erro do sistema de medição está na eletrônica. A substituição da parte eletrônica por uma comercial de melhor qualidade pode apresentar ainda melhores resultados.

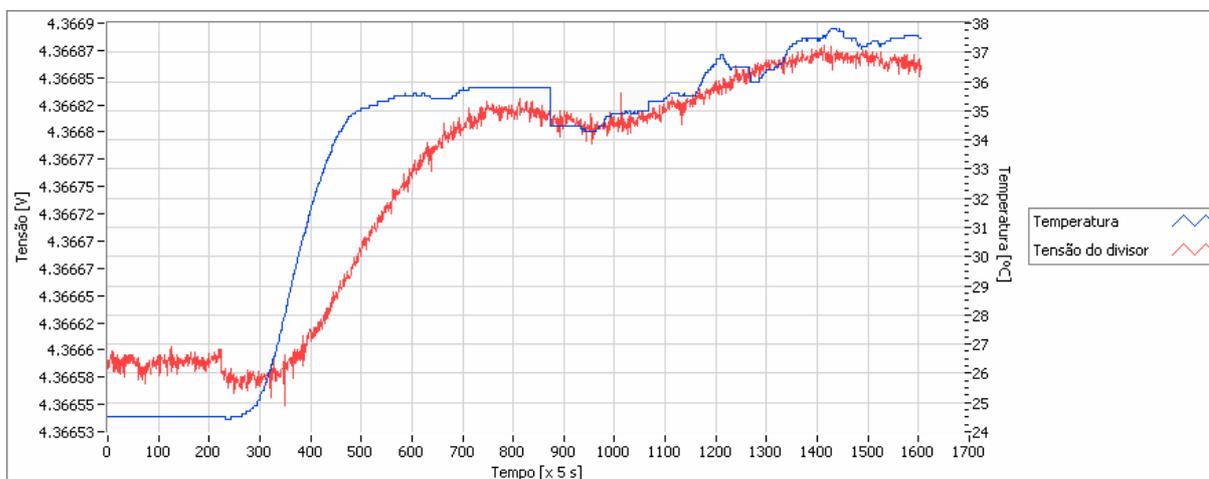


Figura 5.24 – Variação da tensão do divisor resistivo com a variação de temperatura

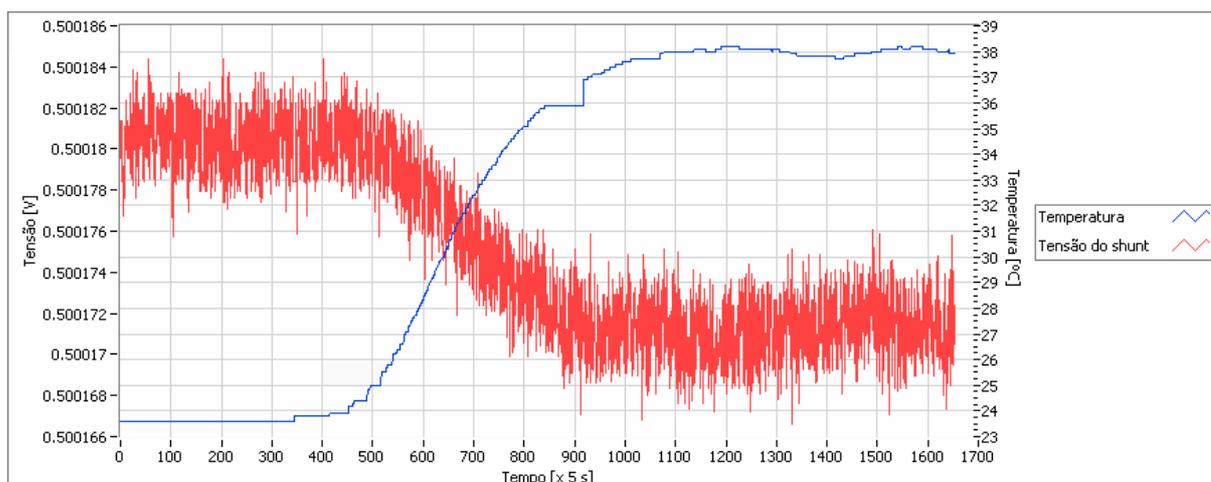


Figura 5.25 – Variação da tensão do *shunt* com a variação de temperatura

5.3.2 Ensaio em frequência

O sistema de medição de tensão e corrente CA foi projetado para o uso em 60 Hz, porém foi previsto a medição de harmônicas, cujo máximo valor seria 3 kHz (50ª harmônica).

Os resultados dos ensaios podem ser vistos nas tabelas 5.5 e 5.6. Pode-se notar que, em 3 kHz, o sistema de medição de tensão apresenta um erro maior que o sistema de medição de corrente. Isso pode ser explicado pela alta impedância dos resistores do divisor. O resistor da baixa tensão em paralelo com a capacitância de entrada da chave eletrônica MPC509, dado não especificado em catálogo, apresentam uma impedância equivalente menor em 3 kHz, baixando o sinal de saída do sistema de medição.

Tabela 5.5 – Ensaio em frequência do sistema de medição de tensão CA utilizando a chave eletrônica MPC509

Ensaio com o MPC509				
frequência [Hz]	tensão do calibrador [V]	tensão medida pelo divisor [V]	desvio padrão das medições [V]	erro em relação a 60 Hz [%]
50	100	100.035	0.0009	0.006
60		100.028	0.0039	0.000
120		99.981	0.0012	-0.047
180		99.939	0.0010	-0.089
240		99.900	0.0008	-0.128
1000		99.371	0.0009	-0.657
3000		97.040	0.0010	-2.988

Tabela 5.6 – Ensaio em frequência do sistema de medição de corrente CA utilizando a chave eletrônica MPC509

Ensaio com o MPC509				
frequência [Hz]	corrente do calibrador [A]	corrente medida pelo <i>shunt</i> [A]	desvio padrão das medições [A]	erro em relação a 60 Hz [%]
50	0.4	0.4000473	0.0000034	0.000
60		0.4000464	0.0000125	0.000
120		0.4000497	0.0000043	0.001
180		0.4000496	0.0000132	0.001
240		0.4000409	0.0000032	-0.001
1000		0.4000942	0.0000069	0.012
3000		0.4009361	0.0000084	0.222

Foram repetidos os ensaios, agora sem a chave eletrônica MPC509, para confirmar a hipótese da capacitância de entrada da chave estar inserindo erros na medição de sinais com frequências maiores. O resultado está apresentado nas tabelas 5.7 e 5.8. Pode-se observar que o erro na medição de tensão em 3 kHz caiu significativamente, agora 0.53% do valor medido. O erro na medição de corrente não apresentou nenhuma alteração devido à baixa impedância do resistor *shunt*.

Tabela 5.7 – Ensaio em frequência do sistema de medição de tensão CA sem a chave eletrônica MPC509

Ensaio sem o MPC509				
frequência [Hz]	tensão do calibrador [V]	tensão medida pelo divisor [V]	desvio padrão das medições [V]	Erro em relação a 60 Hz [%]
50	100	100.026	0.0008	0.005
60		100.021	0.0035	0.000
120		99.982	0.0015	-0.039
180		99.949	0.0012	-0.071
240		99.921	0.0011	-0.099
1000		99.710	0.0019	-0.310
3000		99.492	0.0021	-0.529

Tabela 5.8 – Ensaio em frequência do sistema de medição de corrente CA sem a chave eletrônica MPC509

Ensaio sem o MPC509				
frequência [Hz]	corrente do calibrador [A]	corrente medida pelo <i>shunt</i> [A]	desvio padrão das medições [A]	Erro em relação a 60 Hz [%]
50	0.4	0.4000619	0.0000051	0.003
60		0.4000513	0.0000137	0.000
120		0.4000769	0.0000066	0.006
180		0.4000722	0.0000104	0.005
240		0.4000721	0.0000069	0.005
1000		0.4001211	0.0000059	0.017
3000		0.4009559	0.0000059	0.226

Para a aplicação, mesmo utilizando a chave analógica, o sistema estaria apto para ser utilizado. Referências indicam que atualmente, as harmônicas mais freqüentes na rede elétrica são as harmônicas ímpares até a 11ª, embora a 3ª, a 5ª e a 7ª sejam predominantes [45], [46].

5.4 Influência da medição de grandezas elétricas na incerteza da bancada de ensaios

Este item apresenta o cálculo da incerteza para o caso de o sistema de medição desenvolvido seja instalado na bancada de ensaios. A incerteza do sistema de medição desenvolvido utilizada para os cálculos inclui as derivas com tempo e temperatura (± 10 °C).

O método utilizado foi o método de Monte Carlo [47]. Serão comparados os resultados da bancada de ensaios de desempenho de compressores – potência consumida, capacidade de refrigeração e COP.

Para essa análise será utilizada a condição de ensaio apresentada no trabalho de Poletto [1]. Os valores das variáveis estão na tabela 5.9.

Tabela 5.9 – Valores das variáveis na condição de ensaio analisada

Variável	Valor	Unidade
Fator de perda do calorímetro	1.5	W/°C
Fluxo de massa de refrigerante	1.3493	g/s
Potência entregue ao calorímetro	250	W
Potência entregue ao compressor	140	W
Pressão de descarga	14.698	bar
Pressão de sucção	1.148	bar
Temperatura ambiente do calorímetro	32.2	°C
Temperatura de entrada do calorímetro	32.2	°C
Temperatura de saída do calorímetro	32.2	°C
Temperatura da superfície interna do calorímetro	32.2	°C

5.4.1 Potência consumida

A incerteza de medição do resultado da medição de potência consumida é a própria incerteza do sistema de medição utilizado. Como esse dado é utilizado em todos os métodos de ensaio, a análise da incerteza para potência consumida é válida para todos os métodos.

Na condição utilizada por Poletto[1] a potência consumida média foi de 140 W. A incerteza na medição de potência para esse caso é expresso pela equação (5.2).

$$u(P) = 0,1\% \cdot P_{medido} + 0,3 + 1,2 \text{ mW} / V_{medido} \quad (5.2)$$

Onde: $u(P)$: incerteza na medição de potência (W);

P_{medido} : potência medida (W);

V_{medido} : tensão medida (V).

A incerteza para essa medição é ± 0.58 W, ou seja, o valor indicado será (140.00 ± 0.58) W para a medição com o transdutor da fonte Agilent-6812B.

Para a medição com o sistema de medição desenvolvido a incerteza será de 0.11%, segundo o gráfico da figura 5.18. O resultado com o sistema de medição desenvolvido seria (140.00 ± 0.15) W.

Didaticamente, a comparação é melhor visualizada em uma tabela. A tabela 5.10 apresenta a comparação dos resultados.

Tabela 5.10 – Comparação do resultado da medição da potência consumida

	Potência medida (W)	Erro máximo (W)	Erro Max. Relativo
Sistema de medição atual	140	0.58	0.41%
Sistema de medição desenvolvido		0.15	0.11%

5.4.2 Capacidade de refrigeração

Esse item é aplicável para todos os métodos de ensaio que utilizam calorímetro para a medição de fluxo de massa. Para este trabalho foi utilizado o método C – calorímetro a seco. Para o método F – medidor de fluxo de massa na fase líquida – a medição de potência CC não interfere nesse tipo de medição.

O impacto do uso do sistema de medição desenvolvido na bancada de ensaios de desempenho de compressores pode ser visto na tabela 5.11. A incerteza caiu de 0.87% para 0.58%. O cálculo da incerteza de medição foi feito utilizando o método Monte Carlo. A

distribuição dos valores medidos da capacidade de refrigeração pode ser vista nas figuras 5.26 e 5.27.

Tabela 5.11 – Comparação do resultado da medição de capacidade de refrigeração

Capacidade de refrigeração utilizando Método C						
Configuração	Valor Central	Limite inferior	Limite superior	MinIC	Incerteza	Confiança
Com sistema de medição de potência atual (W)	251.115	-0.22	4.148	4.368	0.87%	95%
Com sistema de medição de potência desenvolvido (W)	251.115	1.408	1.462	2.870	0.57%	95%

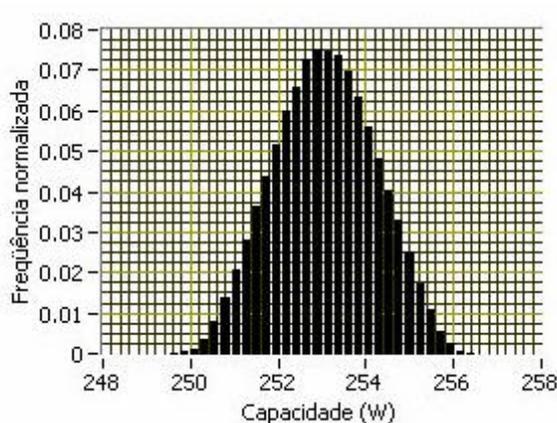


Figura 5.26 – Distribuição dos valores indicados da capacidade de refrigeração com sistema de medição de potência atual

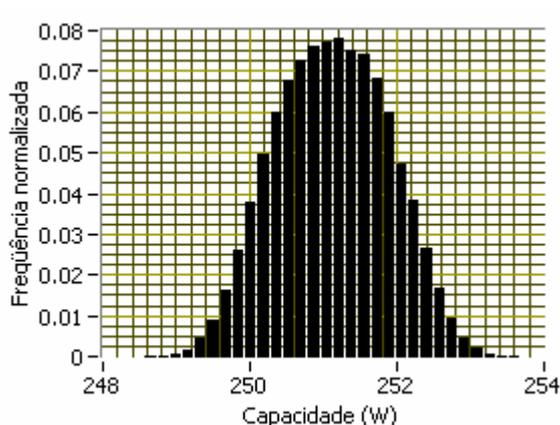


Figura 5.27 – Distribuição dos valores indicados da capacidade de refrigeração com sistema de medição de potência desenvolvido

A figura 5.28 apresenta a distribuição da capacidade de refrigeração utilizando o método F – fluxo de massa na fase líquida. Essa distribuição não é alterada pela substituição dos sistemas de medição de grandezas elétricas. A incerteza para esse caso é 0.46% para 0.95% de

confiança. O valor central é 251.115 e os limites inferior e superior (- 1.148) e (+ 1.159), respectivamente.

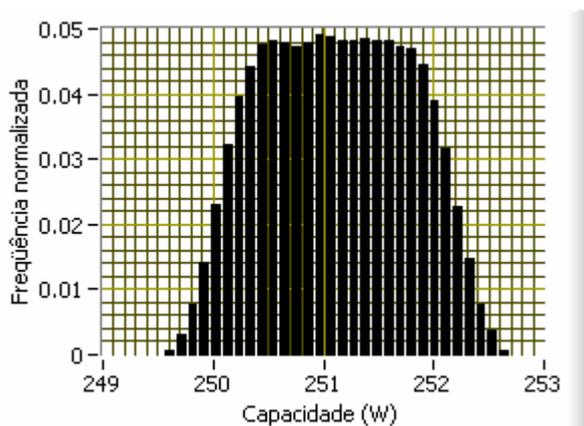


Figura 5.28 – Distribuição dos valores indicados da capacidade de refrigeração utilizando o método F

5.4.3 Coeficiente de performance

Neste item será apresentada a comparação da incerteza para cada método de ensaio de desempenho de compressores, cada método utilizando os resultados apresentados nos itens 5.4.1 e 5.4.2. A incerteza será calculada utilizando o método ISO GUM tradicional [44].

O Coeficiente de Performance (COP) é a razão entre potência consumida e capacidade de refrigeração. O cálculo da incerteza de medição é apresentada pela equação (5.3).

$$\frac{u^2(COP)}{COP^2} = \left(\frac{u(P)}{P_{medido}} \right)^2 + \left(\frac{u(CAP)}{CAP_{medido}} \right)^2 \quad (5.3)$$

Onde: COP : coeficiente de performance do compressor;

P : potência consumida.

CAP : capacidade de refrigeração do compressor;

A comparação dos resultados será feita para cada método em separado.

- método C – calorímetro a seco:

Tabela 5.12 – Comparação dos resultados do COP, método C

Método C - calorímetro a seco			
Configuração	COP	Erro máximo	Erro max. relativo
Com sistema de medição de potência atual	1.79	0.017	0.96%
Com sistema de medição de potência desenvolvido		0.011	0.58%

- método F – medidor de fluxo de massa na fase líquida:

Tabela 5.13 – Comparação dos resultados do COP, método F

Método F - medidor de fluxo de massa na fase líquida			
Configuração	COP	Erro máximo	Erro max. relativo
Com sistema de medição de potência atual	1.79	0.011	0.62%
Com sistema de medição de potência desenvolvido		0.008	0.47%

6 CONCLUSÕES E PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS

6.1 Conclusões

O presente trabalho apresenta uma pesquisa para aprimoramento de uma bancada de ensaios de desempenho de compressores. A finalidade principal foi melhorar os sistemas de medição de grandezas elétricas, os quais estão entre as fontes de incertezas mais significativas da bancada.

Foram realizadas pesquisas de mercado, em busca de um método de medição de potência que atendesse ao objetivo inicial proposto. Além disso, foi realizado o desenvolvimento de um sistema de medição de potência, utilizando divisor resistivo de tensão e resistor *shunt* para corrente. Os instrumentos cujas características estavam próximas de atender o especificado foram comparados quanto aos dados de catálogo e quanto às calibrações realizadas. Uma análise foi realizada para quantificar a melhora da bancada de ensaios de desempenho de compressores.

Os objetivos propostos foram alcançados. Mostrou-se viável a implementação de sistemas de medição de tensão, corrente e potência com incertezas de 0.1%.

As avaliações das incertezas da bancada de ensaios utilizando os transdutores instalados atualmente e os transdutores selecionados nesse trabalho foram comparadas para uma situação típica de ensaio, mostrando grande melhora. A incerteza para esta condição de ensaio caiu de 0.41% para 0.11% para a medição de potência consumida. A incerteza na medição de capacidade de refrigeração caiu de 0.96% para 0.57% no método C – calorímetro a seco. A incerteza na medição do COP foi de 0.96% para 0.58% para o caso do método C e de 0.62% para 0.47% no método F. Esses resultados mostram que a qualidade na medição de grandezas

elétricas é de grande importância para o resultado do ensaio. Redução mais significativa nas incertezas de capacidade e COP não foram alcançadas em função das incertezas das demais grandezas envolvidas, destacando-se a incerteza da pressão de sucção.

Outras conclusões podem ser citadas.

- Instrumentos projetados para uma aplicação específica são mais baratos e apresentam menores incertezas.
- Instrumentos com faixa de medição única não são uma boa opção quando se deseja trabalhar em uma faixa de medição extensa, já que o erro máximo é geralmente especificado de forma relativa, tendo como valor fiducial o final da faixa de medição e não o valor medido.
- Apesar de alguns resultados de calibração serem excelentes, o que deve ser levado em consideração é a incerteza especificada em catálogo, pois é o que o fabricante garante. Compensações de tendência só podem ser aplicadas se a incerteza residual ficar perfeitamente caracterizada, incluindo efeitos das grandezas de influência, especialmente deriva com tempo e com temperatura.
- A medição de corrente é menos problemática que medição de tensão. Isso pode ser visto em transformadores de instrumentação, em que o transformador de potencial além do erro de fase, erro apresentado pelo transformador de corrente, apresenta também um espectro em frequência inconstante. Outro fato são os problemas gerados pela necessidade de alta impedância de entrada nos sistemas de medição de tensão, o que não acontece em sistemas de medição de corrente.
- Os resistores de um divisor resistivo devem apresentar valores intermediários, ou seja, nem muito elevados nem muito baixos. Problemas com impedância de isolamento e modo comum aparecem quando são utilizados resistores de valores elevados, além da própria impedância de isolamento dos cabos que levam o sinal

até o divisor. Além disso, a impedância de entrada do sistema de medição da tensão de saída do divisor deve ser muito mais alta para que não implique alteração significativa da razão de divisão do divisor resistivo. Quando são utilizados resistores muito baixos, aparecem problemas de aquecimento por efeito joule alterando o valor do resistor, e, conseqüentemente, a razão de divisão.

- Quando se trata de sinais não-senoidais, a melhor opção para medição é utilizar componentes resistivos puros (resistores não-indutivos), pois devido a elementos capacitivos e indutivos além de alteração da indicação, a fase também é alterada quando em frequência muito diferentes.
- Para melhor exatidão, não apenas os resistores do transdutor, resistor *shunt* e resistores do divisor, devem apresentar boa estabilidade. No circuito eletrônico, os resistores de ganho e outros que influenciam diretamente no sinal de saída devem apresentar essa mesma característica.
- O projeto da placa deve prever trilhas que conduzem sinais de medição bem espaçadas para evitar problemas com a frequência.
- O sistema de blindagem e de aterramento é importantíssimo. Sistemas de medição com incertezas de medição muito baixas devem ser devidamente protegidos, principalmente quando se trabalha com tensões menores que 10 V. Quanto menor a amplitude do sinal mais crítica é essa situação.

6.2 Propostas para trabalhos futuros

Durante o desenvolvimento do presente trabalho foram identificadas frentes potenciais de pesquisa que poderiam conduzir a melhorias nos sistemas desenvolvidos ou na bancada de ensaios de desempenho de compressores como um todo. As consideradas mais relevantes estão relacionadas a seguir como propostas de temas para futuros trabalhos:

- avaliação da influência da rede elétrica (presença de harmônicas, variação de amplitude) na incerteza de medição do resultado do ensaio de desempenho de compressores;
- desenvolvimento de uma fonte de tensão CC específica para a aplicação, de baixo custo, para implantação no painel de ensaios de desempenho de compressores;
- desenvolvimento de um instrumento de bancada, microprocessado, específico para medição de potência consumida por compressores;
- desenvolvimento de dispositivos para isolamento de sinais, com baixos valores de incerteza;
- análise detalhada do sistema desenvolvido em função de tempo e temperatura para, na avaliação da incerteza, substituir-se valores máximos por valores reais, o que implicaria redução da incerteza de medição.

REFERÊNCIAS

- [1] Poletto, E. L. **Aprimoramento de uma bancada de ensaios de desempenho de compressores herméticos visando reduzir incertezas de medição**. Dissertação de Mestrado – Curso de Pós-graduação em Metrologia Científica e Industrial, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2006.
- [2] ISO – INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO-917: Testing Refrigerant Compressors**. 2. ed. Suécia, 1989.
- [3] ASHRAE STANDARD. **ANSI/ASHRAE 23-2005: Methods of Testing for Rating Displacement Refrigerant Compressors and Condensing Units**. Atlanta, EUA, 2005.
- [4] FLUKE Corporation. **Calibration: philosophy in practice**. Fluke Corporation, 2 ed. 1994.
- [5] Nilson, J. W., Riedel, S. A. **Circuitos Elétricos**. 5. ed. Rio de Janeiro. LTC, 1999.
- [6] Agilent Technologies. **User's Guide AC Power Solutions Agilent Models 6811B, 6812B, and 6813B**. Abril de 2000.
- [7] Agilent Technologies. **Agilent 603XA Family auto-ranging system DC power supplies, Operating Manual**. Fevereiro de 2000.
- [8] Gunter, E. W., McGranaghan, M. F. **Power measurements in distorted and unbalanced conditions – An overview of IEEE Trial-use Standard 1459-2000**. IEEE, 2002.

- [9] Willems, J. L., Ghijselen, J. A. **Apparent power and power factor concepts in unbalanced and nonsinusoidal situations.** IEEE Bologna Powertech Conference, Bologna, Itália. 23 a 26 de junho de 2003.
- [10] Durante, L. G., Ghosh, P. K. **Active power measurements in nonsinusoidal environments.** IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 15, nº 3. Agosto de 2000.
- [11] Makram, E. B., Haines, R. B. **Effect of harmonic distortion in reactive power measurement.** IEEE Transaction on Industry Applications, Vol. 28, nº 4. Julho/Agosto de 1992.
- [12] OMEGA. **OM10 Series – Watt Transducers** – disponível em www.omega.com – acesso em 15-03-2005.
- [13] Moore Industries. **PVT, PWT & PWV AC Power Transducers.** Novembro de 1998.
- [14] Yokogawa. **2480E Medidor multivariável de grandezas elétricas.**
- [15] Yokogawa. **WT110/WT130 Digital Power Meter User's Manual.**
- [16] Cristaldi, L., Ferrero, A., Ottoboni, R. **Measuring Equipment for Electric Quantities at the terminals of an Inverter-Fed Induction Motor.** IEEE TRANSACTIONS ON INSTRUMENTATION AND MEASUREMENT. VOL. 45, nº 2. Abril de 1996.
- [17] Agilent Technologies. **Agilent-34401A Digital Multimeter User's Guide.** Setembro de 2005.

- [18] Samesima, M. I., Oliveira, J. C., Dias, E. M. **Frequency response analysis and modeling of measurement transformers under distorted current and voltage supply.** IEEE Transaction on Power Delivery. Vol. 6, nº 4. Outubro de 1991.
- [19] Destefan, D. E., Stant, R.S., Ramboz, J. D. **AC and DC Shunts: Can You Believe their Specs?** IMTC 2003 – Instrumentation and Measurement Technology Conference. Vail, CO, USA. Maio de 2003.
- [20] Agilent Technologies. **Agilent-1146A AC/DC Oscilloscope Probe User's Guide.** Setembro de 2002.
- [21] Koon, Willian. **Current Sensing for Energy Metering.** Conference Proceedings, China, 2002.
- [22] OHMITE – **Resistor selection, Application Notes** – disponível em www.ohmite.com – acesso em 22-03-2006.
- [23] Rosa, A. P. – **Desenvolvimento de um sistema de calibração de padrões de alta resistência.** Dissertação de Mestrado – Curso de Pós-graduação em Metrologia Científica e Industrial, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2004.
- [24] National Instruments. **PCI-4451/4452 User manual.** Abril de 1998.
- [25] Roger Lockhart, DATAQ Instruments. **The importance of isolation.**
- [26] DATAFORTH Corporation. **Answer Five PC-Based Measurement Questions with Isolated Signal Conditioners.** White paper, 2001.

- [27] Putten, A. D. O. **Electronic Measurement Systems: Theory and Practice**. 2.ed. Bristol: Institute of Physics Publishing, 1996.
- [28] Texas Instruments Incorporated. **MPC508A MPC509A, Single-ended 8-channel / Differential 4-channel CMOS ANALOG MULTIPLEXERS**. Janeiro de 1988, revisada em outubro de 2003.
- [29] Texas Instruments Incorporated. **INA101, High accuracy INSTRUMENTATION AMPLIFIER**. Julho de 1998.
- [30] Keithley Instruments Inc. **Low Level Measurements – Precision DC: Current, Voltage and Resistance**. 4.ed, 1992.
- [31] Texas Instruments Incorporated. **ISO124, Precision Lowest-cost ISOLATION AMPLIFIER**. Setembro de 1997, revisado em setembro de 2005.
- [32] 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.
- [33] Braudaway, D. W. **Precision Resistors: A Review of Material Characteristics, Resistor Design, and Construction Practices**. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. Outubro de 1999.
- [34] Texas Instruments. **Op Amps for Everyone**. Agosto de 2002.
- [35] Albertazzi, A. G. Jr. **Fundamentos de Metrologia Científica e Industrial**. Apostila –LABMETRO – Laboratório de Metrologia e Automação –

Departamento de Engenharia Mecânica. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, 2004.

- [36] INMETRO – Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial. **Vocabulário internacional de termos fundamentais e gerais de metrologia** – Versão Brasileira do “Vocabulary of basic and general terms in metrology” 3ª ed. Brasileira, Brasília, 2003.
- [37] Analog Devices. **Analog-Digital Conversion**. Março de 2004.
- [38] CADDOCK Electronics, INC. **Type USF Ultra-Stable Low TC Film Resistors, 200 Series and 300 Series**. 2004. Disponível em <<http://www.caddock.com>>. acesso em: 2 de junho de 2005.
- [39] VISHAY Technologies. **Bulk Metal® Foil Technology Power and Current Sense Resistors**. Março de 2005. Disponível em: <<http://www.vishay.com>>. acesso em: 23 de junho de 2005.
- [40] Dias, Guilherme Alfredo Dentzien. **Harmônicas em sistemas industriais**. EDIPUCRS, Porto Alegre, 1998.
- [41] Moreno, Hilton. **Harmônicas nas instalações elétricas: causas, efeitos e soluções**. Instituto Brasileiro do Cobre, 1ª edição. Novembro de 2001.
- [42] FLUKE Corporation. **8508A Digital Reference Multimeter User’s Manual**. Julho de 2002.
- [43] FLUKE Corporation. **5520A Multi-Product Calibrator Operator’s Manual**. Agosto de 1998.

- [44] BIPM, et al. **Guia para a expressão da incerteza de medição**. 2 ed. Tradução por INMETRO et al. de “Guide to the expression of uncertainty in measurement”. Rio de Janeiro: INMETRO, ago. 1998.
- [45] Gopalakrishnan, C., Udayakumar, K., Raghavendiran, T. A. **Survey of harmonic distortion from power quality measurements and the application of standards including simulation**. IEEE, 2002.
- [46] Emanuel, A. E., Orr, J. A., Cyganski, D., Gulachenski, E. M. **A survey of harmonic voltages and currents at the costumer’s bus**. IEEE Transaction on Power Delivery, vol. 8, N° 1. Janeiro de 1993.
- [47] **ISO GUM Suppl. 1 – Guide to expression of uncertainty in measurement (GUM) – Supplement 1: Numerical methods for propagation of distributions**. 2004.

A APÊNDICE 1 – TABELAS DE BALANÇO DE INCERTEZAS DOS SISTEMAS DESENVOLVIDOS

LISTA DE TABELAS

TABELA A.1 – BALANÇO DE INCERTEZAS DA MEDIÇÃO DE TENSÃO CA, COM AUTO-ZERO	128
TABELA A.2 – BALANÇO DE INCERTEZAS DA MEDIÇÃO DE TENSÃO CA, SEM AUTO-ZERO	129
TABELA A.3 – BALANÇO DE INCERTEZAS DA MEDIÇÃO DE CORRENTE CA, FAIXAS DE 0.5 A E 1.0 A, COM AUTO-ZERO	130
TABELA A.4 – BALANÇO DE INCERTEZAS DA MEDIÇÃO DE CORRENTE CA, FAIXAS DE 2.5 A E 5.0 A, COM AUTO-ZERO	131
TABELA A.5 – BALANÇO DE INCERTEZAS DA MEDIÇÃO DE CORRENTE CA, FAIXAS DE 0.5 A E 1.0 A, SEM AUTO-ZERO	132
TABELA A.6 – BALANÇO DE INCERTEZAS DA MEDIÇÃO DE CORRENTE CA, FAIXAS DE 2.5 A E 5.0 A, SEM AUTO-ZERO	133
TABELA A.7 – BALANÇO DE INCERTEZAS DO SISTEMA DE MEDIÇÃO DE TENSÃO CC, FAIXAS DE 100 V E 150 V, COM AUTO-ZERO	134
TABELA A.8 – BALANÇO DE INCERTEZAS DO SISTEMA DE MEDIÇÃO DE TENSÃO CC, FAIXAS DE 200 V E 300 V, COM AUTO-ZERO	135
TABELA A.9 – BALANÇO DE INCERTEZAS DO SISTEMA DE MEDIÇÃO DE TENSÃO CC, FAIXAS DE 100 V E 150 V, SEM AUTO-ZERO	136
TABELA A.10 – BALANÇO DE INCERTEZAS DO SISTEMA DE MEDIÇÃO DE TENSÃO CC, FAIXAS DE 200 V E 300 V, SEM AUTO-ZERO	137
TABELA A.11 – BALANÇO DE INCERTEZAS DO SISTEMA DE MEDIÇÃO DE CORRENTE CC, FAIXAS DE 0.5 A E 1.0 A, COM AUTO-ZERO	138
TABELA A.12 – BALANÇO DE INCERTEZAS DO SISTEMA DE MEDIÇÃO DE CORRENTE CC, FAIXAS DE 2.5 A E 5.0 A, COM AUTO-ZERO	139
TABELA A.13 – BALANÇO DE INCERTEZAS DO SISTEMA DE MEDIÇÃO DE CORRENTE CC, FAIXAS DE 0.5 A E 1.0 A, SEM AUTO-ZERO	140
TABELA A.14 – BALANÇO DE INCERTEZAS DO SISTEMA DE MEDIÇÃO DE CORRENTE CC, FAIXAS DE 2.5 A E 5.0 A, SEM AUTO-ZERO	141

Tabela A.1 – Balanço de incertezas da medição de tensão CA, com auto-zero

Fontes de incerteza		Faixa de 150 V						Faixa de 250 V					
Origem	Nome	Valores relativos ao valor medido [%]			Valores fixos [V]			Valores relativos ao valor medido [%]			Valores fixos [V]		
		exp.	k	pad.	exp.	k	pad.	exp.	k	pad.	exp.	k	pad.
Resistores	<i>absolute temperature coefficient</i>	0.005%	1.732	0.003%	---			0.005%	1.732	0.003%	---		
	<i>load time stability</i>	0.060%	1.732	0.035%	---			0.060%	1.732	0.035%	---		
	ruído térmico	---			0.000024	1.000	0.000024	---			0.000017	1.000	0.000017
INA101	<i>gain temperature coefficient</i>	0.005%	1.732	0.003%	---			0.005%	1.732	0.003%	---		
	<i>nonlinearity, DC</i>	---			0.000502	1.732	0.000290	---			0.000502	1.732	0.000290
	<i>input offset voltage vs. temperature</i>	---			0.000000	1.732	0.000000	---			0.000000	1.732	0.000000
	<i>input offset voltage vs. time</i>	---			0.000000	1.732	0.000000	---			0.000000	1.732	0.000000
	<i>input noise</i>	---			0.000003	1.732	0.000002	---			0.000003	1.732	0.000002
ISO124	<i>gain temperature coefficient</i>	0.010%	1.732	0.006%	---			0.010%	1.732	0.006%	---		
	<i>nonlinearity, DC</i>	---			0.001000	1.732	0.000577	---			0.001000	1.732	0.000577
	<i>input offset voltage vs. temperature</i>	---			0.000000	1.732	0.000000	---			0.000000	1.732	0.000000
	<i>input noise</i>	---			0.000894	1.732	0.000516	---			0.000894	1.732	0.000516
DAQ PCI-4452	<i>resolution</i>	---			0.000610	1.732	0.000352	---			0.000610	1.732	0.000352
	<i>integral nonlinearity (INL)</i>	---			0.000610	1.732	0.000352	---			0.000610	1.732	0.000352
	<i>grounded noise</i>	---			0.000198	1.732	0.000115	---			0.000198	1.732	0.000115
Incerteza expandida na saída do divisor		0.070%			0.00005			0.070%			0.00003		
Incerteza expandida na saída do INA101		0.070%			0.00058			0.070%			0.00058		
Incerteza expandida na saída do ISO124		0.071%			0.00165			0.071%			0.00165		
Incerteza expandida total		0.071%			0.00195			0.071%			0.00195		

Tabela A.2 – Balanço de incertezas da medição de tensão CA, sem auto-zero

Fontes de incerteza		Faixa de 150 V						Faixa de 250 V					
Origem	Nome	Valores relativos ao valor medido [%]			Valores fixos [V]			Valores relativos ao valor medido [%]			Valores fixos [V]		
		exp.	k	pad.	exp.	k	pad.	exp.	k	pad.	exp.	k	pad.
Resistores	<i>absolute temperature coefficient</i>	0.005%	1.732	0.003%	---			0.005%	1.732	0.003%	---		
	<i>load time stability</i>	0.060%	1.732	0.035%	---			0.060%	1.732	0.035%	---		
	ruído térmico	---			0.000024	1.000	0.000024	---			0.000017	1.000	0.000017
INA101	<i>gain temperature coefficient</i>	0.005%	1.732	0.003%	---			0.005%	1.732	0.003%	---		
	<i>nonlinearity, DC</i>	---			0.000502	1.732	0.000290	---			0.000502	1.732	0.000290
	<i>input offset voltage vs. temperature</i>	---			0.000220	1.732	0.000127	---			0.000220	1.732	0.000127
	<i>input offset voltage vs. time</i>	---			0.000252	1.732	0.000145	---			0.000252	1.732	0.000145
	<i>input noise</i>	---			0.000003	1.732	0.000002	---			0.000003	1.732	0.000002
ISO124	<i>gain temperature coefficient</i>	0.010%	1.732	0.006%	---			0.010%	1.732	0.006%	---		
	<i>nonlinearity, DC</i>	---			0.001000	1.732	0.000577	---			0.001000	1.732	0.000577
	<i>input offset voltage vs. temperature</i>	---			0.002000	1.732	0.001155	---			0.002000	1.732	0.001155
	<i>input noise</i>	---			0.000894	1.732	0.000516	---			0.000894	1.732	0.000516
DAQ PCI-4452	<i>resolution</i>	---			0.000305	1.732	0.000176	---			0.000305	1.732	0.000176
	<i>integral nonlinearity (INL)</i>	---			0.000610	1.732	0.000352	---			0.000610	1.732	0.000352
	<i>grounded noise</i>	---			0.000198	1.732	0.000115	---			0.000198	1.732	0.000115
Incerteza expandida na saída do divisor		0.070%			0.00005			0.070%			0.00003		
Incerteza expandida na saída do INA101		0.070%			0.00070			0.070%			0.00070		
Incerteza expandida na saída do ISO124		0.071%			0.00287			0.071%			0.00287		
Incerteza expandida total		0.071%			0.00298			0.071%			0.00298		

Tabela A.3 – Balanço de incertezas da medição de corrente CA, faixas de 0.5 A e 1.0 A, com auto-zero

Fontes de incerteza		Faixa de 0,5 A						Faixa de 1,0 A					
Origem	Nome	Valores relativos ao valor medido [%]			Valores fixos [V]			Valores relativos ao valor medido [%]			Valores fixos [V]		
		exp.	k	pad.	exp.	k	pad.	exp.	k	pad.	exp.	k	pad.
Resistores	<i>temperature coefficient of resistance</i>	0.015%	1.732	0.009%	---			0.015%	1.732	0.009%	---		
	<i>load time stability</i>	0.050%	1.732	0.029%	---			0.050%	1.732	0.029%	---		
	<i>shelf time stability</i>	0.003%	1.732	0.001%	---			0.003%	1.732	0.001%	---		
	<i>thermal EMF</i>	---			0.000006	1.732	0.000003	---			0.000007	1.732	0.000004
	ruído térmico	---			0.000001	1.000	0.000001	---			0.000000	1.000	0.000000
INA101	<i>gain temperatura coeficient</i>	0.005%	1.732	0.003%	---			0.005%	1.732	0.003%	---		
	<i>nonlinearity, DC</i>	---			0.000555	1.732	0.000321	---			0.000526	1.732	0.000304
	<i>input offset voltage vs. temperature</i>	---			0.000000	1.732	0.000000	---			0.000000	1.732	0.000000
	<i>input offset voltage vs. time</i>	---			0.000000	1.732	0.000000	---			0.000000	1.732	0.000000
	<i>input noise</i>	---			0.000003	1.732	0.000002	---			0.000003	1.732	0.000002
ISO124	<i>gain temperatura coeficient</i>	0.010%	1.732	0.006%	---			0.010%	1.732	0.006%	---		
	<i>nonlinearity, DC</i>	---			0.001000	1.732	0.000577	---			0.001000	1.732	0.000577
	<i>input offset voltage vs. temperature</i>	---			0.000000	1.732	0.000000	---			0.000000	1.732	0.000000
	<i>input noise</i>	---			0.000894	1.732	0.000516	---			0.000894	1.732	0.000516
DAQ PCI-4452	<i>resolution</i>	---			0.000610	1.732	0.000352	---			0.000610	1.732	0.000352
	<i>integral nonlinearity (INL)</i>	---			0.000610	1.732	0.000352	---			0.000610	1.732	0.000352
	<i>grounded noise</i>	---			0.000198	1.732	0.000115	---			0.000198	1.732	0.000115
Incerteza expandida na saída do divisor		0.060%			0.000006			0.060%			0.000008		
Incerteza expandida na saída do INA101		0.061%			0.000641			0.061%			0.000608		
Incerteza expandida na saída do ISO124		0.062%			0.001677			0.062%			0.001664		
Incerteza expandida total		0.062%			0.001964			0.062%			0.001953		

Tabela A.4 – Balanço de incertezas da medição de corrente CA, faixas de 2.5 A e 5.0 A, com auto-zero

Fontes de incerteza		Faixa de 2,5 A						Faixa de 5,0 A					
Origem	Nome	Valores relativos ao valor medido [%]			Valores fixos [V]			Valores relativos ao valor medido [%]			Valores fixos [V]		
		exp.	k	pad.	exp.	k	pad.	exp.	k	pad.	exp.	k	pad.
Resistores	<i>temperature coefficient of resistance</i>	0.015%	1.732	0.009%	---			0.015%	1.732	0.009%	---		
	<i>load time stability</i>	0.050%	1.732	0.029%	---			0.050%	1.732	0.029%	---		
	<i>shelf time stability</i>	0.003%	1.732	0.001%	---			0.003%	1.732	0.001%	---		
	<i>thermal EMF</i>	---			0.000008	1.732	0.000004	---			0.000015	1.732	0.000009
	ruído térmico	---			0.000000	1.000	0.000000	---			0.000000	1.000	0.000000
INA101	<i>gain temperatura coeficient</i>	0.005%	1.732	0.003%	---			0.005%	1.732	0.003%	---		
	<i>nonlinearity, DC</i>	---			0.000555	1.732	0.000321	---			0.000526	1.732	0.000304
	<i>input offset voltage vs. temperature</i>	---			0.000000	1.732	0.000000	---			0.000000	1.732	0.000000
	<i>input offset voltage vs. time</i>	---			0.000000	1.732	0.000000	---			0.000000	1.732	0.000000
	<i>input noise</i>	---			0.000003	1.732	0.000002	---			0.000003	1.732	0.000002
ISO124	<i>gain temperatura coeficient</i>	0.010%	1.732	0.006%	---			0.010%	1.732	0.006%	---		
	<i>nonlinearity, DC</i>	---			0.001000	1.732	0.000577	---			0.001000	1.732	0.000577
	<i>input offset voltage vs. temperature</i>	---			0.000000	1.732	0.000000	---			0.000000	1.732	0.000000
	<i>input noise</i>	---			0.000894	1.732	0.000516	---			0.000894	1.732	0.000516
DAQ PCI-4452	<i>resolution</i>	---			0.000610	1.732	0.000352	---			0.000610	1.732	0.000352
	<i>integral nonlinearity (INL)</i>	---			0.000610	1.732	0.000352	---			0.000610	1.732	0.000352
	<i>grounded noise</i>	---			0.000198	1.732	0.000115	---			0.000198	1.732	0.000115
Incerteza expandida na saída do divisor		0.060%			0.000009			0.060%			0.000017		
Incerteza expandida na saída do INA101		0.061%			0.000641			0.061%			0.000608		
Incerteza expandida na saída do ISO124		0.062%			0.001677			0.062%			0.001664		
Incerteza expandida total		0.062%			0.001964			0.062%			0.001953		

Tabela A.5 – Balanço de incertezas da medição de corrente CA, faixas de 0.5 A e 1.0 A, sem auto-zero

Fontes de incerteza		Faixa de 0,5 A						Faixa de 1,0 A					
Origem	Nome	Valores relativos ao valor medido [%]			Valores fixos [V]			Valores relativos ao valor medido [%]			Valores fixos [V]		
		exp.	k	pad.	exp.	k	pad.	exp.	k	pad.	exp.	k	pad.
Resistores	<i>temperature coefficient of resistance</i>	0.015%	1.732	0.009%	---			0.015%	1.732	0.009%	---		
	<i>load time stability</i>	0.050%	1.732	0.029%	---			0.050%	1.732	0.029%	---		
	<i>shelf time stability</i>	0.003%	1.732	0.001%	---			0.003%	1.732	0.001%	---		
	<i>thermal EMF</i>	---			0.000006	1.732	0.000003	---			0.000007	1.732	0.000004
	ruído térmico	---			0.000001	1.000	0.000001	---			0.000000	1.000	0.000000
INA101	<i>gain temperatura coeficient</i>	0.005%	1.732	0.003%	---			0.005%	1.732	0.003%	---		
	<i>nonlinearity, DC</i>	---			0.000555	1.732	0.000321	---			0.000526	1.732	0.000304
	<i>input offset voltage vs. temperature</i>	---			0.000027	1.732	0.000016	---			0.000035	1.732	0.000020
	<i>input offset voltage vs. time</i>	---			0.000021	1.732	0.000012	---			0.000030	1.732	0.000017
	<i>input noise</i>	---			0.000003	1.732	0.000002	---			0.000003	1.732	0.000002
ISO124	<i>gain temperatura coeficient</i>	0.010%	1.732	0.006%	---			0.010%	1.732	0.006%	---		
	<i>nonlinearity, DC</i>	---			0.001000	1.732	0.000577	---			0.001000	1.732	0.000577
	<i>input offset voltage vs. temperature</i>	---			0.002000	1.732	0.001155	---			0.002000	1.732	0.001155
	<i>input noise</i>	---			0.000894	1.732	0.000516	---			0.000894	1.732	0.000516
DAQ PCI-4452	<i>resolution</i>	---			0.000305	1.732	0.000176	---			0.000305	1.732	0.000176
	<i>integral nonlinearity (INL)</i>	---			0.000610	1.732	0.000352	---			0.000610	1.732	0.000352
	<i>grounded noise</i>	---			0.000198	1.732	0.000115	---			0.000198	1.732	0.000115
Incerteza expandida na saída do divisor		0.060%			0.000006			0.060%			0.000008		
Incerteza expandida na saída do INA101		0.061%			0.000642			0.061%			0.000610		
Incerteza expandida na saída do ISO124		0.062%			0.002854			0.062%			0.002847		
Incerteza expandida total		0.062%			0.002970			0.062%			0.002963		

Tabela A.6 – Balanço de incertezas da medição de corrente CA, faixas de 2.5 A e 5.0 A, sem auto-zero

Fontes de incerteza		Faixa de 2,5 A						Faixa de 5,0 A					
Origem	Nome	Valores relativos ao valor medido [%]			Valores fixos [V]			Valores relativos ao valor medido [%]			Valores fixos [V]		
		exp.	k	pad.	exp.	k	pad.	exp.	k	pad.	exp.	k	pad.
Resistores	<i>temperature coefficient of resistance</i>	0.015%	1.732	0.009%	---			0.015%	1.732	0.009%	---		
	<i>load time stability</i>	0.050%	1.732	0.029%	---			0.050%	1.732	0.029%	---		
	<i>shelf time stability</i>	0.003%	1.732	0.001%	---			0.003%	1.732	0.001%	---		
	<i>thermal EMF</i>	---			0.000008	1.732	0.000004	---			0.000015	1.732	0.000009
	ruído térmico	---			0.000000	1.000	0.000000	---			0.000000	1.000	0.000000
INA101	<i>gain temperatura coefficient</i>	0.005%	1.732	0.003%	---			0.005%	1.732	0.003%	---		
	<i>nonlinearity, DC</i>	---			0.000555	1.732	0.000321	---			0.000526	1.732	0.000304
	<i>input offset voltage vs. temperature</i>	---			0.000027	1.732	0.000016	---			0.000035	1.732	0.000020
	<i>input offset voltage vs. time</i>	---			0.000021	1.732	0.000012	---			0.000030	1.732	0.000017
	<i>input noise</i>	---			0.000003	1.732	0.000002	---			0.000003	1.732	0.000002
ISO124	<i>gain temperatura coefficient</i>	0.010%	1.732	0.006%	---			0.010%	1.732	0.006%	---		
	<i>nonlinearity, DC</i>	---			0.001000	1.732	0.000577	---			0.001000	1.732	0.000577
	<i>input offset voltage vs. temperature</i>	---			0.002000	1.732	0.001155	---			0.002000	1.732	0.001155
	<i>input noise</i>	---			0.000894	1.732	0.000516	---			0.000894	1.732	0.000516
DAQ PCI-4452	<i>resolution</i>	---			0.000305	1.732	0.000176	---			0.000305	1.732	0.000176
	<i>integral nonlinearity (INL)</i>	---			0.000610	1.732	0.000352	---			0.000610	1.732	0.000352
	<i>grounded noise</i>	---			0.000198	1.732	0.000115	---			0.000198	1.732	0.000115
Incerteza expandida na saída do divisor		0.060%			0.000009			0.060%			0.000017		
Incerteza expandida na saída do INA101		0.061%			0.000643			0.061%			0.000610		
Incerteza expandida na saída do ISO124		0.062%			0.002854			0.062%			0.002847		
Incerteza expandida total		0.062%			0.002970			0.062%			0.002963		

Tabela A.7 – Balanço de incertezas do sistema de medição de tensão CC, faixas de 100 V e 150 V, com auto-zero

Fontes de incerteza		Faixa de 100 V						Faixa de 150 V					
Origem	Nome	Valores relativos ao valor medido [%]			Valores fixos [V]			Valores relativos ao valor medido [%]			Valores fixos [V]		
		exp.	k	pad.	exp.	k	pad.	exp.	k	pad.	exp.	k	pad.
Resistores	<i>absolute temperature coefficient</i>	0.005%	1.732	0.003%	---			0.005%	1.732	0.003%	---		
	<i>load time stability</i>	0.060%	1.732	0.035%	---			0.060%	1.732	0.035%	---		
	ruído térmico	---			0.000024	1.000	0.000024	---			0.000017	1.000	0.000017
INA101	<i>gain temperature coefficient</i>	0.005%	1.732	0.003%	---			0.005%	1.732	0.003%	---		
	<i>nonlinearity, DC</i>	---			0.000504	1.732	0.000291	---			0.000504	1.732	0.000291
	<i>input offset voltage vs. temperature</i>	---			0.000000	1.732	0.000000	---			0.000000	1.732	0.000000
	<i>input offset voltage vs. time</i>	---			0.000000	1.732	0.000000	---			0.000000	1.732	0.000000
	<i>input noise</i>	---			0.000003	1.732	0.000002	---			0.000003	1.732	0.000002
ISO124	<i>gain temperature coefficient</i>	0.010%	1.732	0.006%	---			0.010%	1.732	0.006%	---		
	<i>nonlinearity, DC</i>	---			0.001000	1.732	0.000577	---			0.001000	1.732	0.000577
	<i>input offset voltage vs. temperature</i>	---			0.000000	1.732	0.000000	---			0.000000	1.732	0.000000
	<i>input noise</i>	---			0.000894	1.732	0.000516	---			0.000894	1.732	0.000516
DAQ PCI-4452	<i>resolution</i>	---			0.000610	1.732	0.000352	---			0.000610	1.732	0.000352
	<i>integral nonlinearity (INL)</i>	---			0.000610	1.732	0.000352	---			0.000610	1.732	0.000352
	<i>grounded noise</i>	---			0.000198	1.732	0.000115	---			0.000198	1.732	0.000115
Incerteza expandida na saída do divisor		0.070%			0.00005			0.070%			0.00003		
Incerteza expandida na saída do INA101		0.070%			0.00058			0.070%			0.00058		
Incerteza expandida na saída do ISO124		0.071%			0.00166			0.071%			0.00166		
Incerteza expandida total		0.071%			0.00195			0.071%			0.00195		

Tabela A.8 – Balanço de incertezas do sistema de medição de tensão CC, faixas de 200 V e 300 V, com auto-zero

Fontes de incerteza		Faixa de 200 V						Faixa de 300 V					
Origem	Nome	Valores relativos ao			Valores fixos [V]			Valores relativos ao			Valores fixos [V]		
		exp.	k	pad.	exp.	k	pad.	exp.	k	pad.	exp.	k	pad.
Resistores	<i>absolute temperature coefficient</i>	0.005%	1.732	0.003%	---			0.005%	1.732	0.003%	---		
	<i>load time stability</i>	0.060%	1.732	0.035%	---			0.060%	1.732	0.035%	---		
	ruído térmico	---			0.000024	1.000	0.000024	---			0.000017	1.000	0.000017
INA102	<i>gain temperature coefficient</i>	0.005%	1.732	0.003%	---			0.005%	1.732	0.003%	---		
	<i>nonlinearity, DC</i>	---			0.000502	1.732	0.000290	---			0.000502	1.732	0.000290
	<i>input offset voltage vs. temperature</i>	---			0.000000	1.732	0.000000	---			0.000000	1.732	0.000000
	<i>input offset voltage vs. time</i>	---			0.000000	1.732	0.000000	---			0.000000	1.732	0.000000
	<i>input noise</i>	---			0.000003	1.732	0.000002	---			0.000003	1.732	0.000002
ISO125	<i>gain temperature coefficient</i>	0.010%	1.732	0.006%	---			0.010%	1.732	0.006%	---		
	<i>nonlinearity, DC</i>	---			0.001000	1.732	0.000577	---			0.001000	1.732	0.000577
	<i>input offset voltage vs. temperature</i>	---			0.000000	1.732	0.000000	---			0.000000	1.732	0.000000
	<i>input noise</i>	---			0.000894	1.732	0.000516	---			0.000894	1.732	0.000516
DAQ PCI-4453	<i>resolution</i>	---			0.000610	1.732	0.000352	---			0.000610	1.732	0.000352
	<i>integral nonlinearity (INL)</i>	---			0.000610	1.732	0.000352	---			0.000610	1.732	0.000352
	<i>grounded noise</i>	---			0.000198	1.732	0.000115	---			0.000198	1.732	0.000115
Incerteza expandida na saída do divisor		0.070%			0.00005			0.070%			0.00003		
Incerteza expandida na saída do INA102		0.070%			0.00058			0.070%			0.00058		
Incerteza expandida na saída do ISO125		0.071%			0.00165			0.071%			0.00165		
Incerteza expandida total		0.071%			0.00195			0.071%			0.00195		

Tabela A.9 – Balanço de incertezas do sistema de medição de tensão CC, faixas de 100 V e 150 V, sem auto-zero

Fontes de incerteza		Faixa de 100 V						Faixa de 150 V					
Origem	Nome	Valores relativos ao valor medido [%]			Valores fixos [V]			Valores relativos ao valor medido [%]			Valores fixos [V]		
		exp.	k	pad.	exp.	k	pad.	exp.	k	pad.	exp.	k	pad.
Resistores	<i>absolute temperature coefficient</i>	0.005%	1.732	0.003%	---			0.005%	1.732	0.003%	---		
	<i>load time stability</i>	0.060%	1.732	0.035%	---			0.060%	1.732	0.035%	---		
	ruído térmico	---			0.000024	1.000	0.000024	---			0.000017	1.000	0.000017
INA101	<i>gain temperature coefficient</i>	0.005%	1.732	0.003%	---			0.005%	1.732	0.003%	---		
	<i>nonlinearity, DC</i>	---			0.000504	1.732	0.000291	---			0.000504	1.732	0.000291
	<i>input offset voltage vs. temperature</i>	---			0.000123	1.732	0.000071	---			0.000123	1.732	0.000071
	<i>input offset voltage vs. time</i>	---			0.000136	1.732	0.000079	---			0.000136	1.732	0.000079
	<i>input noise</i>	---			0.000003	1.732	0.000002	---			0.000003	1.732	0.000002
ISO124	<i>gain temperature coefficient</i>	0.010%	1.732	0.006%	---			0.010%	1.732	0.006%	---		
	<i>nonlinearity, DC</i>	---			0.001000	1.732	0.000577	---			0.001000	1.732	0.000577
	<i>input offset voltage vs. temperature</i>	---			0.002000	1.732	0.001155	---			0.002000	1.732	0.001155
	<i>input noise</i>	---			0.000894	1.732	0.000516	---			0.000894	1.732	0.000516
DAQ PCI-4452	<i>resolution</i>	---			0.000305	1.732	0.000176	---			0.000305	1.732	0.000176
	<i>integral nonlinearity (INL)</i>	---			0.000610	1.732	0.000352	---			0.000610	1.732	0.000352
	<i>grounded noise</i>	---			0.000198	1.732	0.000115	---			0.000198	1.732	0.000115

Incerteza expandida na saída do divisor	0.070%	0.00005	0.070%	0.00003
Incerteza expandida na saída do INA101	0.070%	0.00062	0.070%	0.00062
Incerteza expandida na saída do ISO124	0.071%	0.00285	0.071%	0.00285
Incerteza expandida total	0.071%	0.00297	0.071%	0.00297

Tabela A.10 – Balanço de incertezas do sistema de medição de tensão CC, faixas de 200 V e 300 V, sem auto-zero

Fontes de incerteza		Faixa de 200 V						Faixa de 300 V					
Origem	Nome	Valores relativos ao			Valores fixos [V]			Valores relativos ao			Valores fixos [V]		
		exp.	k	pad.	exp.	k	pad.	exp.	k	pad.	exp.	k	pad.
Resistores	<i>absolute temperature coefficient</i>	0.005%	1.732	0.003%	---			0.005%	1.732	0.003%	---		
	<i>load time stability</i>	0.060%	1.732	0.035%	---			0.060%	1.732	0.035%	---		
	ruído térmico	---			0.000024	1.000	0.000024	---			0.000017	1.000	0.000017
INA102	<i>gain temperature coefficient</i>	0.005%	1.732	0.003%	---			0.005%	1.732	0.003%	---		
	<i>nonlinearity, DC</i>	---			0.000502	1.732	0.000290	---			0.000502	1.732	0.000290
	<i>input offset voltage vs. temperature</i>	---			0.000220	1.732	0.000127	---			0.000220	1.732	0.000127
	<i>input offset voltage vs. time</i>	---			0.000252	1.732	0.000145	---			0.000252	1.732	0.000145
	<i>input noise</i>	---			0.000003	1.732	0.000002	---			0.000003	1.732	0.000002
ISO125	<i>gain temperature coefficient</i>	0.010%	1.732	0.006%	---			0.010%	1.732	0.006%	---		
	<i>nonlinearity, DC</i>	---			0.001000	1.732	0.000577	---			0.001000	1.732	0.000577
	<i>input offset voltage vs. temperature</i>	---			0.002000	1.732	0.001155	---			0.002000	1.732	0.001155
	<i>input noise</i>	---			0.000894	1.732	0.000516	---			0.000894	1.732	0.000516
DAQ PCI-4453	<i>resolution</i>	---			0.000305	1.732	0.000176	---			0.000305	1.732	0.000176
	<i>integral nonlinearity (INL)</i>	---			0.000610	1.732	0.000352	---			0.000610	1.732	0.000352
	<i>grounded noise</i>	---			0.000198	1.732	0.000115	---			0.000198	1.732	0.000115
Incerteza expandida na saída do divisor		0.070%			0.00005			0.070%			0.00003		
Incerteza expandida na saída do INA102		0.070%			0.00070			0.070%			0.00070		
Incerteza expandida na saída do ISO125		0.071%			0.00287			0.071%			0.00287		
Incerteza expandida total		0.071%			0.00298			0.071%			0.00298		

Tabela A.11 – Balanço de incertezas do sistema de medição de corrente CC, faixas de 0.5 A e 1.0 A, com auto-zero

Fontes de incerteza		Faixa de 0,5 A						Faixa de 1,0 A					
Origem	Nome	Valores relativos ao valor medido [%]			Valores fixos [V]			Valores relativos ao valor medido [%]			Valores fixos [V]		
		exp.	k	pad.	exp.	k	pad.	exp.	k	pad.	exp.	k	pad.
Resistores	<i>temperature coefficient of resistance</i>	0.015%	1.732	0.009%	---			0.015%	1.732	0.009%	---		
	<i>load time stability</i>	0.050%	1.732	0.029%	---			0.050%	1.732	0.029%	---		
	<i>shelf time stability</i>	0.003%	1.732	0.001%	---			0.003%	1.732	0.001%	---		
	<i>thermal EMF</i>	---			0.000006	1.732	0.000003	---			0.000007	1.732	0.000004
	ruído térmico	---			0.000001	1.000	0.000001	---			0.000000	1.000	0.000000
INA101	<i>gain temperatura coeficient</i>	0.005%	1.732	0.003%	---			0.005%	1.732	0.003%	---		
	<i>nonlinearity, DC</i>	---			0.000569	1.732	0.000328	---			0.000532	1.732	0.000307
	<i>input offset voltage vs. temperature</i>	---			0.000000	1.732	0.000000	---			0.000000	1.732	0.000000
	<i>input offset voltage vs. time</i>	---			0.000000	1.732	0.000000	---			0.000000	1.732	0.000000
	<i>input noise</i>	---			0.000003	1.732	0.000002	---			0.000003	1.732	0.000002
ISO124	<i>gain temperatura coeficient</i>	0.010%	1.732	0.006%	---			0.010%	1.732	0.006%	---		
	<i>nonlinearity, DC</i>	---			0.001000	1.732	0.000577	---			0.001000	1.732	0.000577
	<i>input offset voltage vs. temperature</i>	---			0.000000	1.732	0.000000	---			0.000000	1.732	0.000000
	<i>input noise</i>	---			0.000894	1.732	0.000516	---			0.000894	1.732	0.000516
DAQ PCI-4452	<i>resolution</i>	---			0.000610	1.732	0.000352	---			0.000610	1.732	0.000352
	<i>integral nonlinearity (INL)</i>	---			0.000610	1.732	0.000352	---			0.000610	1.732	0.000352
	<i>grounded noise</i>	---			0.000198	1.732	0.000115	---			0.000198	1.732	0.000115
Incerteza expandida na saída do divisor		0.060%			0.000006			0.060%			0.000008		
Incerteza expandida na saída do INA101		0.061%			0.000657			0.061%			0.000614		
Incerteza expandida na saída do ISO124		0.062%			0.001683			0.062%			0.001666		
Incerteza expandida total		0.062%			0.001969			0.062%			0.001955		

Tabela A.12 – Balanço de incertezas do sistema de medição de corrente CC, faixas de 2.5 A e 5.0 A, com auto-zero

Fontes de incerteza		Faixa de 2,5 A						Faixa de 5,0 A					
Origem	Nome	Valores relativos ao valor medido [%]			Valores fixos [V]			Valores relativos ao valor medido [%]			Valores fixos [V]		
		exp.	k	pad.	exp.	k	pad.	exp.	k	pad.	exp.	k	pad.
Resistores	<i>temperature coefficient of resistance</i>	0.015%	1.732	0.009%	---			0.015%	1.732	0.009%	---		
	<i>load time stability</i>	0.050%	1.732	0.029%	---			0.050%	1.732	0.029%	---		
	<i>shelf time stability</i>	0.003%	1.732	0.001%	---			0.003%	1.732	0.001%	---		
	<i>thermal EMF</i>	---			0.000008	1.732	0.000004	---			0.000015	1.732	0.000009
	ruído térmico	---			0.000000	1.000	0.000000	---			0.000000	1.000	0.000000
INA101	<i>gain temperatura coefficient</i>	0.005%	1.732	0.003%	---			0.005%	1.732	0.003%	---		
	<i>nonlinearity, DC</i>	---			0.000569	1.732	0.000328	---			0.000532	1.732	0.000307
	<i>input offset voltage vs. temperature</i>	---			0.000000	1.732	0.000000	---			0.000000	1.732	0.000000
	<i>input offset voltage vs. time</i>	---			0.000000	1.732	0.000000	---			0.000000	1.732	0.000000
	<i>input noise</i>	---			0.000003	1.732	0.000002	---			0.000003	1.732	0.000002
ISO124	<i>gain temperatura coefficient</i>	0.010%	1.732	0.006%	---			0.010%	1.732	0.006%	---		
	<i>nonlinearity, DC</i>	---			0.001000	1.732	0.000577	---			0.001000	1.732	0.000577
	<i>input offset voltage vs. temperature</i>	---			0.000000	1.732	0.000000	---			0.000000	1.732	0.000000
	<i>input noise</i>	---			0.000894	1.732	0.000516	---			0.000894	1.732	0.000516
DAQ PCI-4452	<i>resolution</i>	---			0.000610	1.732	0.000352	---			0.000610	1.732	0.000352
	<i>integral nonlinearity (INL)</i>	---			0.000610	1.732	0.000352	---			0.000610	1.732	0.000352
	<i>grounded noise</i>	---			0.000198	1.732	0.000115	---			0.000198	1.732	0.000115
Incerteza expandida na saída do divisor		0.060%			0.000009			0.060%			0.000017		
Incerteza expandida na saída do INA101		0.061%			0.000657			0.061%			0.000614		
Incerteza expandida na saída do ISO124		0.062%			0.001683			0.062%			0.001666		
Incerteza expandida total		0.062%			0.001969			0.062%			0.001955		

Tabela A.13 – Balanço de incertezas do sistema de medição de corrente CC, faixas de 0.5 A e 1.0 A, sem auto-zero

Fontes de incerteza		Faixa de 0,5 A						Faixa de 1,0 A					
Origem	Nome	Valores relativos ao valor medido [%]			Valores fixos [V]			Valores relativos ao valor medido [%]			Valores fixos [V]		
		exp.	k	pad.	exp.	k	pad.	exp.	k	pad.	exp.	k	pad.
Resistores	<i>temperature coefficient of resistance</i>	0.015%	1.732	0.009%	---			0.015%	1.732	0.009%	---		
	<i>load time stability</i>	0.050%	1.732	0.029%	---			0.050%	1.732	0.029%	---		
	<i>shelf time stability</i>	0.003%	1.732	0.001%	---			0.003%	1.732	0.001%	---		
	<i>thermal EMF</i>	---			0.000006	1.732	0.000003	---			0.000007	1.732	0.000004
	ruído térmico	---			0.000001	1.000	0.000001	---			0.000000	1.000	0.000000
INA101	<i>gain temperatura coeficient</i>	0.005%	1.732	0.003%	---			0.005%	1.732	0.003%	---		
	<i>nonlinearity, DC</i>	---			0.000569	1.732	0.000328	---			0.000532	1.732	0.000307
	<i>input offset voltage vs. temperature</i>	---			0.000026	1.732	0.000015	---			0.000033	1.732	0.000019
	<i>input offset voltage vs. time</i>	---			0.000019	1.732	0.000011	---			0.000027	1.732	0.000016
	<i>input noise</i>	---			0.000003	1.732	0.000002	---			0.000003	1.732	0.000002
ISO124	<i>gain temperatura coeficient</i>	0.010%	1.732	0.006%	---			0.010%	1.732	0.006%	---		
	<i>nonlinearity, DC</i>	---			0.001000	1.732	0.000577	---			0.001000	1.732	0.000577
	<i>input offset voltage vs. temperature</i>	---			0.002000	1.732	0.001155	---			0.002000	1.732	0.001155
	<i>input noise</i>	---			0.000894	1.732	0.000516	---			0.000894	1.732	0.000516
DAQ PCI-4452	<i>resolution</i>	---			0.000305	1.732	0.000176	---			0.000305	1.732	0.000176
	<i>integral nonlinearity (INL)</i>	---			0.000610	1.732	0.000352	---			0.000610	1.732	0.000352
	<i>grounded noise</i>	---			0.000198	1.732	0.000115	---			0.000198	1.732	0.000115
Incerteza expandida na saída do divisor		0.060%			0.000006			0.060%			0.000008		
Incerteza expandida na saída do INA101		0.061%			0.000658			0.061%			0.000616		
Incerteza expandida na saída do ISO124		0.062%			0.002858			0.062%			0.002848		
Incerteza expandida total		0.062%			0.002973			0.062%			0.002964		

Tabela A.14 – Balanço de incertezas do sistema de medição de corrente CC, faixas de 2.5 A e 5.0 A, sem auto-zero

Fontes de incerteza		Faixa de 2,5 A						Faixa de 5,0 A					
Origem	Nome	Valores relativos ao valor medido [%]			Valores fixos [V]			Valores relativos ao valor medido [%]			Valores fixos [V]		
		exp.	k	pad.	exp.	k	pad.	exp.	k	pad.	exp.	k	pad.
Resistores	<i>temperature coefficient of resistance</i>	0.015%	1.732	0.009%	---			0.015%	1.732	0.009%	---		
	<i>load time stability</i>	0.050%	1.732	0.029%	---			0.050%	1.732	0.029%	---		
	<i>shelf time stability</i>	0.003%	1.732	0.001%	---			0.003%	1.732	0.001%	---		
	<i>thermal EMF</i>	---			0.000008	1.732	0.000004	---			0.000015	1.732	0.000009
	ruído térmico	---			0.000000	1.000	0.000000	---			0.000000	1.000	0.000000
INA101	<i>gain temperatura coefficient</i>	0.005%	1.732	0.003%	---			0.005%	1.732	0.003%	---		
	<i>nonlinearity, DC</i>	---			0.000569	1.732	0.000328	---			0.000532	1.732	0.000307
	<i>input offset voltage vs. temperature</i>	---			0.000026	1.732	0.000015	---			0.000033	1.732	0.000019
	<i>input offset voltage vs. time</i>	---			0.000019	1.732	0.000011	---			0.000027	1.732	0.000016
	<i>input noise</i>	---			0.000003	1.732	0.000002	---			0.000003	1.732	0.000002
ISO124	<i>gain temperatura coefficient</i>	0.010%	1.732	0.006%	---			0.010%	1.732	0.006%	---		
	<i>nonlinearity, DC</i>	---			0.001000	1.732	0.000577	---			0.001000	1.732	0.000577
	<i>input offset voltage vs. temperature</i>	---			0.002000	1.732	0.001155	---			0.002000	1.732	0.001155
	<i>input noise</i>	---			0.000894	1.732	0.000516	---			0.000894	1.732	0.000516
DAQ PCI-4452	<i>resolution</i>	---			0.000305	1.732	0.000176	---			0.000305	1.732	0.000176
	<i>integral nonlinearity (INL)</i>	---			0.000610	1.732	0.000352	---			0.000610	1.732	0.000352
	<i>grounded noise</i>	---			0.000198	1.732	0.000115	---			0.000198	1.732	0.000115
Incerteza expandida na saída do divisor		0.060%			0.000009			0.060%			0.000017		
Incerteza expandida na saída do INA101		0.061%			0.000658			0.061%			0.000616		
Incerteza expandida na saída do ISO124		0.062%			0.002858			0.062%			0.002848		
Incerteza expandida total		0.062%			0.002973			0.062%			0.002964		

B APÊNDICE 2 - PROGRAMAS DE MEDIÇÃO DE TENSÃO, CORRENTE E POTÊNCIA

B.1 Medição CA

Neste item está apresentado o programa de medição de tensão, corrente e potência CA. O programa, feito em Labview 7.1, possui duas partes principais: o painel frontal e o diagrama de blocos.

O painel frontal é a interface do programa com o usuário. Apresenta, de forma visual, os controles, gráficos e indicadores, numa tela que simula o painel físico de um instrumento. A figura b.1 mostra o painel frontal do medidor de tensão, corrente e potência CA.

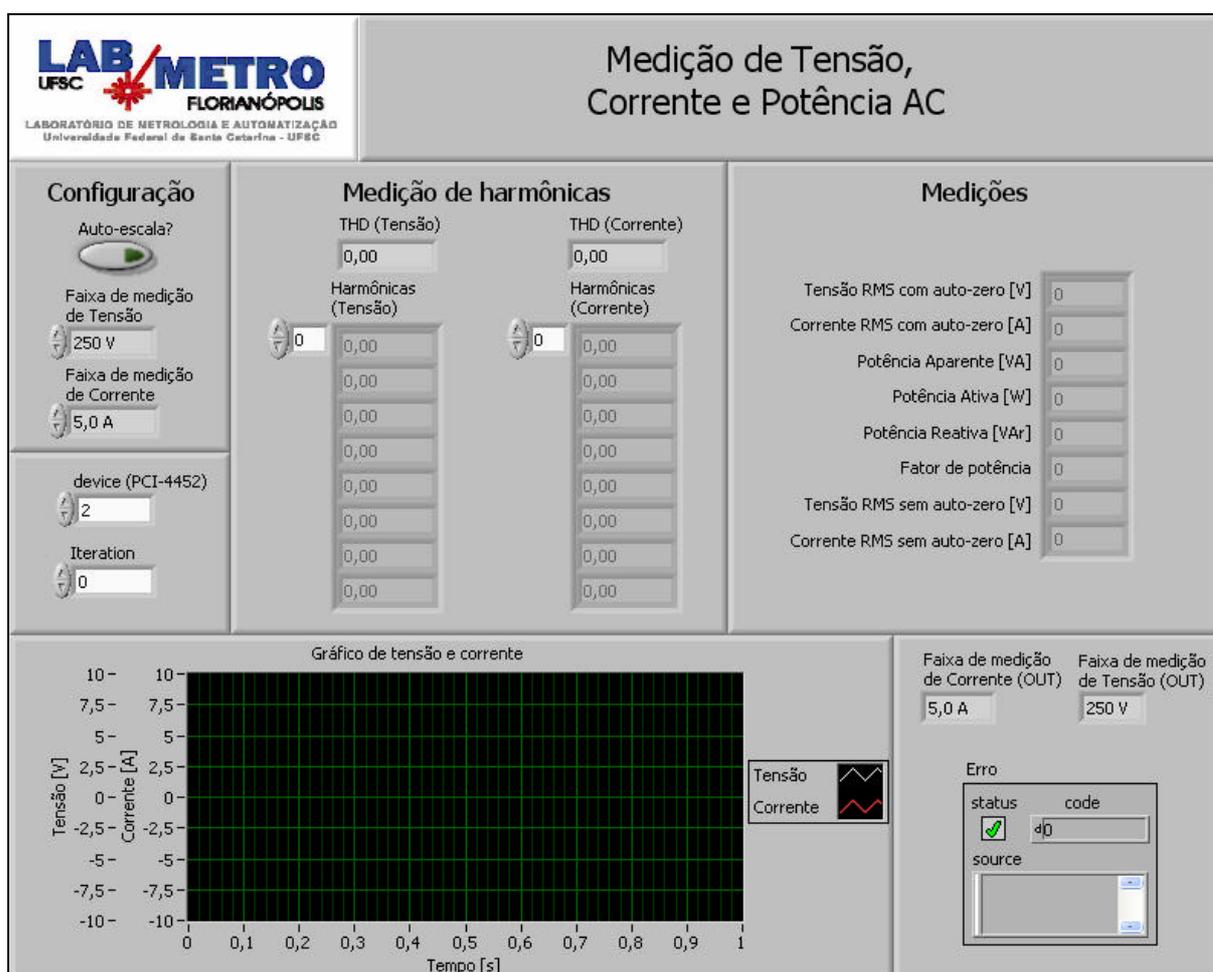


Figura B.1 – Painel frontal do programa de medição de grandezas CA

O diagrama de blocos é a estrutura do código fonte do programa, construído de forma gráfica. A figura b.2 apresenta o diagrama de blocos do programa de medição de grandezas elétricas CA. Este diagrama foi dividido em duas importantes etapas.

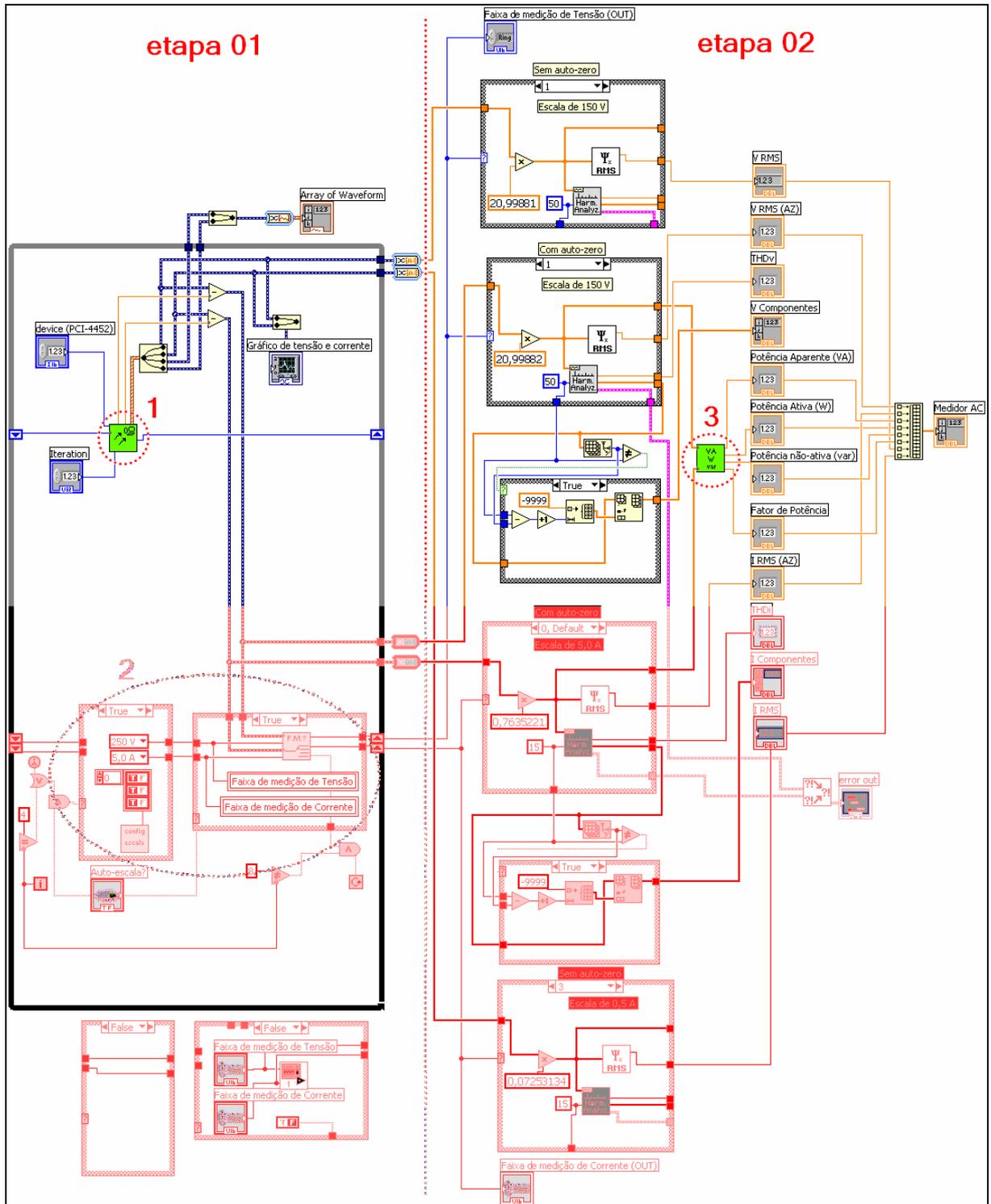


Figura B.2 – Diagrama de blocos do programa de medição de grandezas CA

A etapa 01 é responsável pela aquisição do sinal na saída do sistema de medição desenvolvido. A elipse número 1 é a responsável pela aquisição propriamente dita, cujo algoritmo está representado na figura b.3. A elipse 2 é responsável por verificar se a aquisição está sendo realizada na melhor faixa de medição possível. Caso a aquisição não seja feita na melhor faixa de medição, o bloco dentro da elipse 2 muda a faixa e faz com que o programa faça nova aquisição de dados.

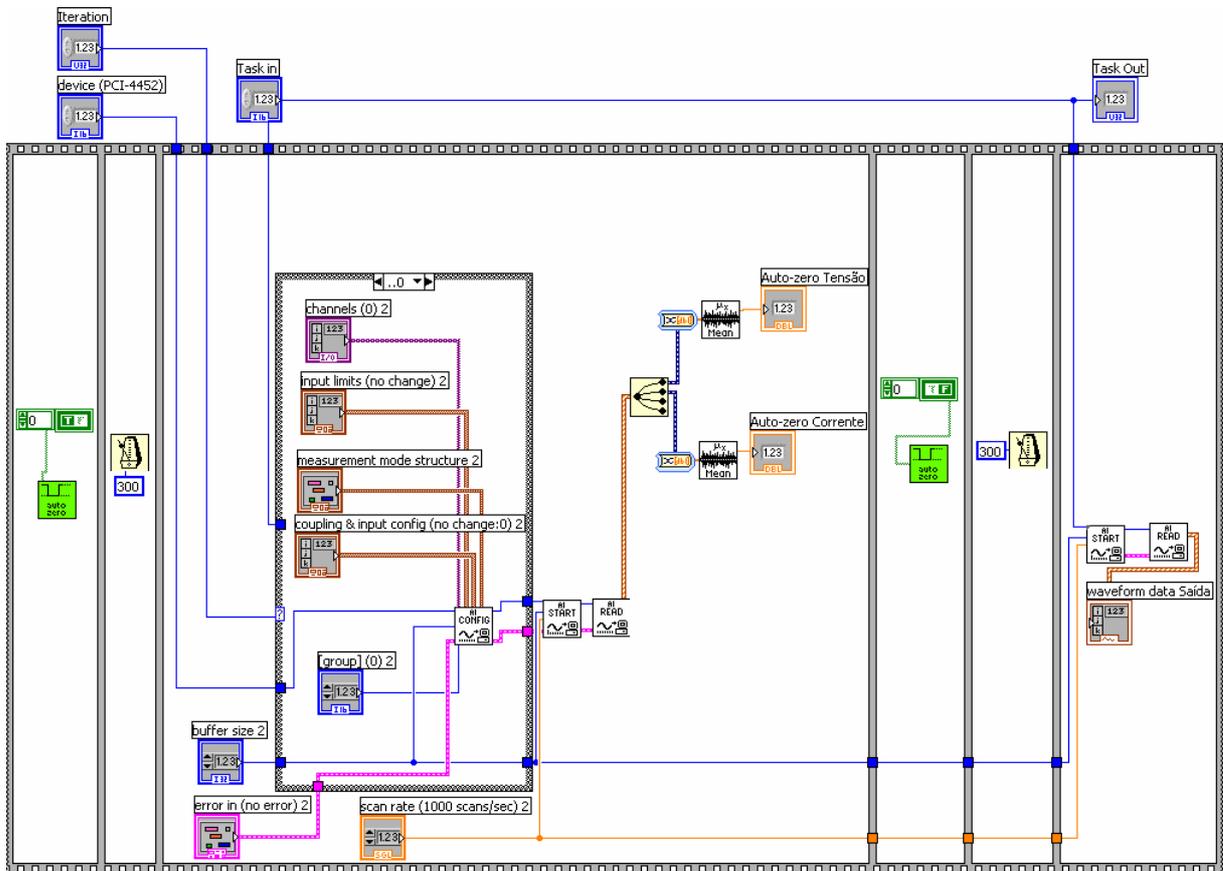


Figura B.3 – Algoritmo de medição de grandezas CA

A etapa 2 do programa principal é responsável pelo tratamento do sinal e pelos resultados. As correções de zero e ganho e os cálculos de potência são realizados nesta etapa.

A figura b.4 mostra o diagrama do bloco da elipse 3 no programa principal mostrado na figura b.2. O programa apresenta os quatro resultados normalmente esperados na medição de potência: potência ativa, potência reativa, potência aparente e fator de potência.

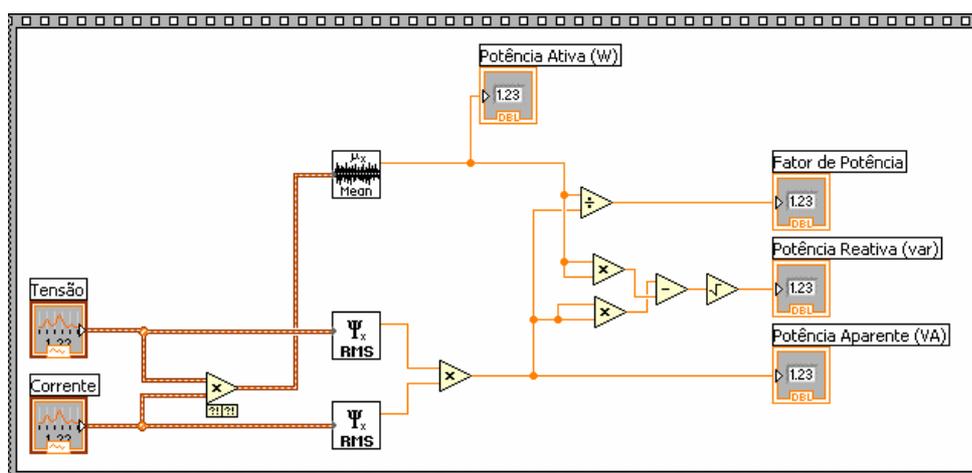


Figura B.4 – Cálculo da potência CA a partir da medição de tensão e corrente

Como a tensão e corrente em compressores nem sempre são senoidais puras, os cálculos das potências e fator de potência também deve abranger também a distorção harmônica. Para isso, os cálculos devem ser feitos utilizando algoritmos true-rms [40], [41].

Muitos autores já escreveram sobre medição de potência em condições não-senoidais [9], [10] e [11]. Estes autores sempre buscam o significado físico para a potência tentando fazer a medição da forma mais fiel possível. A forma como foi programado para se fazer os cálculos foi seguindo a referência [8].

B.2 Medição CC

O painel frontal do medidor de tensão, corrente e potência CC está apresentado na figura b.5. O painel frontal deste programa apresenta três campos principais:

- configuração: para configuração das escalas;
- resultados intermediários: apresentada a tensão medida na saída do sistema desenvolvido;
- medições: apresenta o resultado corrigido das medições.

		<h2>Medição de Tensão, Corrente e Potência DC</h2>																	
<h3>Configuração</h3> <p>Auto escala? <input checked="" type="checkbox"/></p> <p>Faixa de medição de Tensão: 300 V</p> <p>Faixa de medição de Corrente: 5,0 A</p>		<h3>Resultados intermediários</h3> <p>Canal de tensão</p> <p>Auto-zero: 0 Normal: 0</p> <p>Canal de corrente</p> <p>Auto-zero 2: 0 Normal 2: 0</p>		<h3>Medições</h3> <p>Tensão DC: 0,0000</p> <p>Corrente DC: 0,000000</p> <p>Potência DC: 0,0000</p>															
<h3>Error in</h3> <table border="1"> <thead> <tr> <th>status</th> <th>code</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td><input checked="" type="checkbox"/></td> <td>40</td> </tr> <tr> <td colspan="2">source</td> </tr> <tr> <td colspan="2"><input type="text"/></td> </tr> </tbody> </table>		status	code	<input checked="" type="checkbox"/>	40	source		<input type="text"/>		<h3>Error out</h3> <table border="1"> <thead> <tr> <th>status</th> <th>code</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td><input checked="" type="checkbox"/></td> <td>40</td> </tr> <tr> <td colspan="2">source</td> </tr> <tr> <td colspan="2"><input type="text"/></td> </tr> </tbody> </table>		status	code	<input checked="" type="checkbox"/>	40	source		<input type="text"/>	
status	code																		
<input checked="" type="checkbox"/>	40																		
source																			
<input type="text"/>																			
status	code																		
<input checked="" type="checkbox"/>	40																		
source																			
<input type="text"/>																			
		<p>Faixa de medição de Tensão (OUT): 300 V</p> <p>Faixa de medição de Corrente (OUT): 5,0 A</p>																	

Figura B.5 – Painel frontal do programa do medidor de grandezas CC

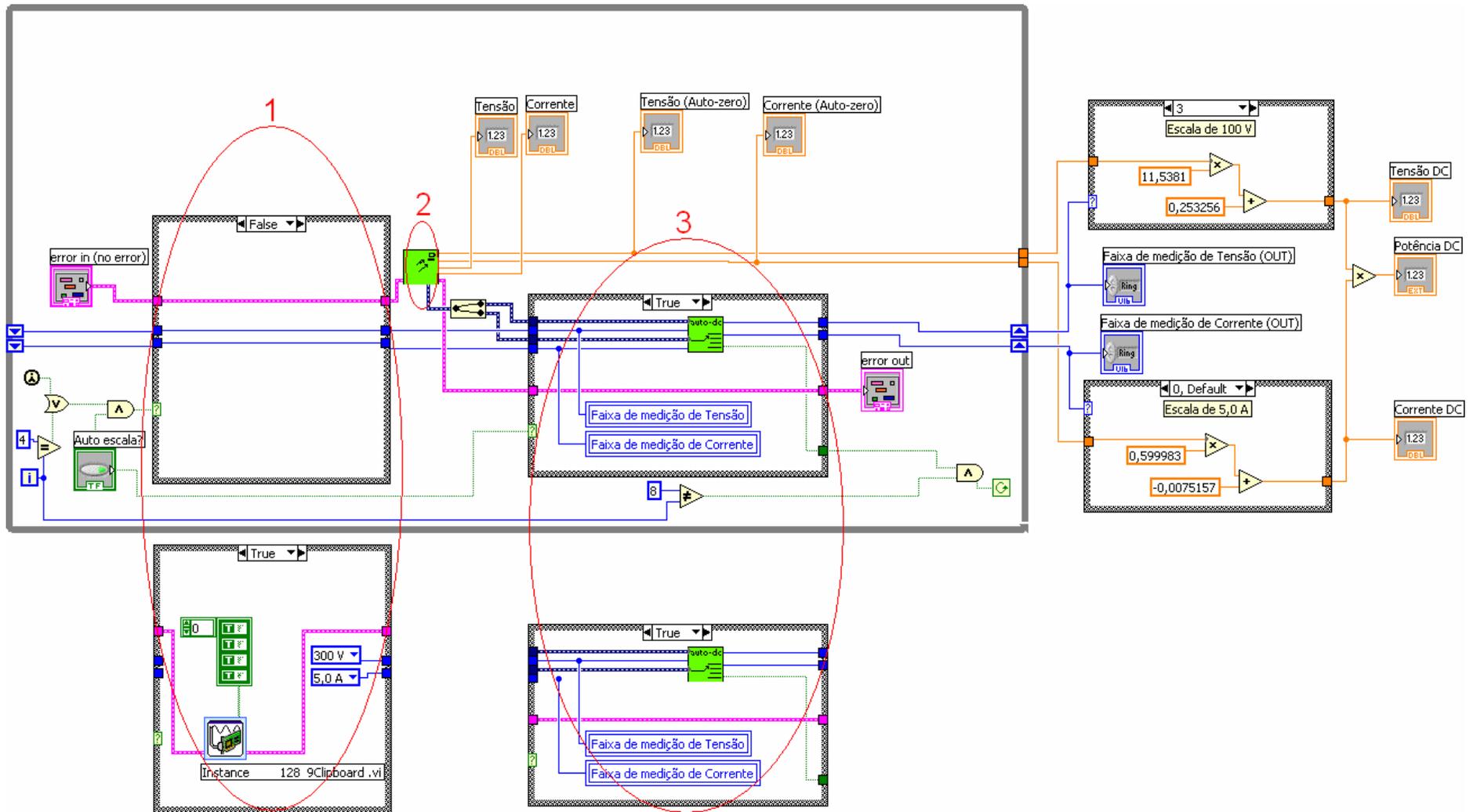


Figura B.6 – Diagrama de blocos do programa de medição de grandezas CC

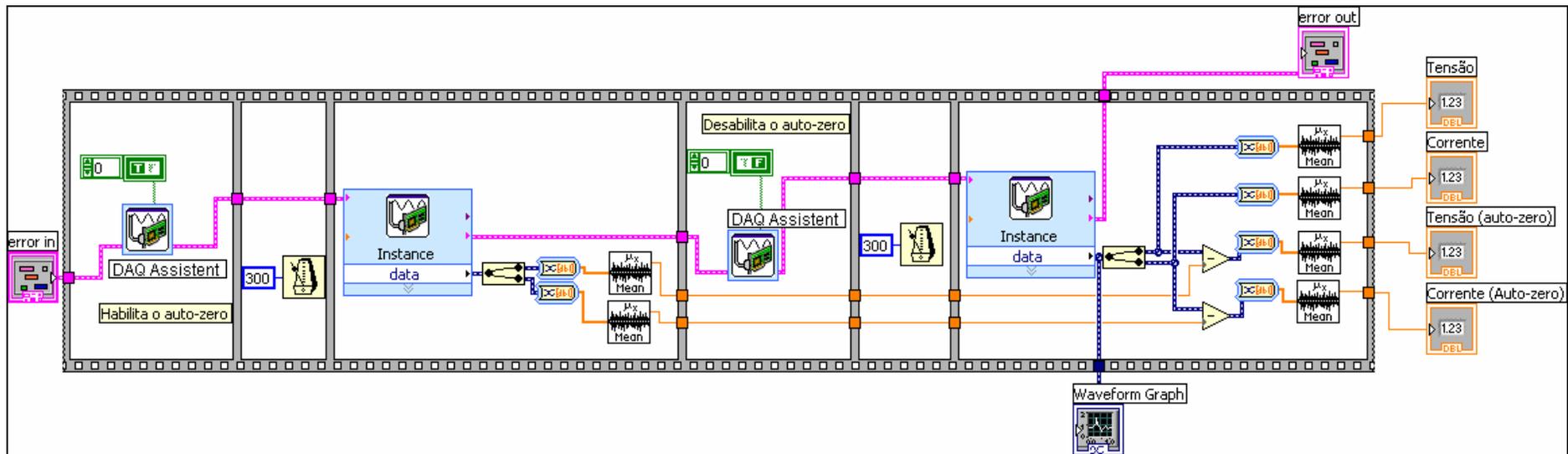


Figura B.7 – Algoritmo de medição de grandezas CC

A figura b.6 mostra o diagrama de blocos do programa de medição de grandezas CC. As elipses 1 e 3 são responsáveis por garantir que a aquisição dos sinais será realizada na faixa de medição com menor incerteza. A elipse 2 mostra o bloco que faz a aquisição do sinal na saída do sistema desenvolvido. A figura b.7 mostra o diagrama deste bloco. Nota-se que o algoritmo de medição CA e CC são semelhantes, primeiro fazendo a zeragem do sistema, logo em seguida fazendo a medição. Com esses dois dados, o software faz a compensação do zero, eliminando a influência do *offset* na incerteza do sistema.

C APÊNDICE 3 – CALIBRAÇÃO DOS SISTEMAS DE MEDIÇÃO

LISTA DE FIGURAS

FIGURA C.1 – GRÁFICO DE ERRO MÁXIMO DO SISTEMA DE MEDIÇÃO DE TENSÃO CA, FAIXA DE 150 V	158
FIGURA C.2 – GRÁFICO DE ERRO MÁXIMO DO SISTEMA DE MEDIÇÃO DE TENSÃO CA, FAIXA DE 150 V, COM AUTO-ZERO	158
FIGURA C.3 – GRÁFICO DE ERRO MÁXIMO DO SISTEMA DE MEDIÇÃO DE TENSÃO CA, FAIXA DE 250 V	159
FIGURA C.4 – GRÁFICO DE ERRO MÁXIMO DO SISTEMA DE MEDIÇÃO DE TENSÃO CA, FAIXA DE 250 V, COM AUTO-ZERO	159
FIGURA C.5 – GRÁFICO DE ERRO MÁXIMO DO SISTEMA DE MEDIÇÃO DE CORRENTE CA, FAIXA DE 0.5 A	160
FIGURA C.6 – GRÁFICO DE ERRO MÁXIMO DO SISTEMA DE MEDIÇÃO DE CORRENTE CA, FAIXA DE 0.5 A, COM AUTO-ZERO	160
FIGURA C.7 – GRÁFICO DE ERRO MÁXIMO DO SISTEMA DE MEDIÇÃO DE CORRENTE CA, FAIXA DE 1.0 A	161
FIGURA C.8 – GRÁFICO DE ERRO MÁXIMO DO SISTEMA DE MEDIÇÃO DE CORRENTE CA, FAIXA DE 1.0 A, COM AUTO-ZERO	161
FIGURA C.9 – GRÁFICO DE ERRO MÁXIMO DO SISTEMA DE MEDIÇÃO DE CORRENTE CA, FAIXA DE 2.5 A	162
FIGURA C.10 – GRÁFICO DE ERRO MÁXIMO DO SISTEMA DE MEDIÇÃO DE CORRENTE CA, FAIXA DE 2.5 A, COM AUTO-ZERO.....	162
FIGURA C.11 – GRÁFICO DE ERRO MÁXIMO DO SISTEMA DE MEDIÇÃO DE TENSÃO CC, FAIXA DE 100 V	163
FIGURA C.12 – GRÁFICO DE ERRO MÁXIMO DO SISTEMA DE MEDIÇÃO DE TENSÃO CC, FAIXA DE 100 V, COM AUTO-ZERO.....	163
FIGURA C.13 – GRÁFICO DE ERRO MÁXIMO DO SISTEMA DESENVOLVIDO DE MEDIÇÃO DE TENSÃO CC, FAIXA DE 150 V	164
FIGURA C.14 – GRÁFICO DE ERRO MÁXIMO DO SISTEMA DESENVOLVIDO DE MEDIÇÃO DE TENSÃO CC, FAIXA DE 150 V, COM AUTO-ZERO.....	164
FIGURA C.15 – GRÁFICO DE ERRO MÁXIMO DO SISTEMA DESENVOLVIDO DE MEDIÇÃO DE TENSÃO CC, FAIXA DE 200 V	165
FIGURA C.16 – GRÁFICO DE ERRO MÁXIMO DO SISTEMA DESENVOLVIDO DE MEDIÇÃO DE TENSÃO CC, FAIXA DE 200 V, COM AUTO-ZERO.....	165

FIGURA C.17 – GRÁFICO DE ERRO MÁXIMO DO SISTEMA DESENVOLVIDO DE MEDIÇÃO DE TENSÃO CC, FAIXA DE 300 V	166
FIGURA C.18 – GRÁFICO DE ERRO MÁXIMO DO SISTEMA DESENVOLVIDO DE MEDIÇÃO DE TENSÃO CC, FAIXA DE 300 V, COM AUTO-ZERO.....	166
FIGURA C.19 – GRÁFICO DE ERRO MÁXIMO DO SISTEMA DESENVOLVIDO DE MEDIÇÃO DE CORRENTE CC, FAIXA DE 0.05 A A 0.45 A	167
FIGURA C.20 – GRÁFICO DE ERRO MÁXIMO DO SISTEMA DESENVOLVIDO DE MEDIÇÃO DE CORRENTE CC, FAIXA DE 0.05 A A 0.45 A, COM AUTO-ZERO	167
FIGURA C.21 – GRÁFICO DE ERRO MÁXIMO DO SISTEMA DESENVOLVIDO DE MEDIÇÃO DE CORRENTE CC, FAIXA DE 0.55 A A 0.95 A	168
FIGURA C.22 – GRÁFICO DE ERRO MÁXIMO DO SISTEMA DESENVOLVIDO DE MEDIÇÃO DE CORRENTE CC, FAIXA DE 0.55 A A 0.95 A, COM AUTO-ZERO	168
FIGURA C.23 – GRÁFICO DE ERRO MÁXIMO DO SISTEMA DESENVOLVIDO DE MEDIÇÃO DE CORRENTE CC, FAIXA DE 1.15 A A 2.35 A	169
FIGURA C.24 – GRÁFICO DE ERRO MÁXIMO DO SISTEMA DESENVOLVIDO DE MEDIÇÃO DE CORRENTE CC, FAIXA DE 1.15 A A 2.35 A, COM AUTO-ZERO	169
FIGURA C.25 – GRÁFICO DE ERRO MÁXIMO DO SISTEMA DESENVOLVIDO DE MEDIÇÃO DE CORRENTE CC, FAIXA DE 2.75 A A 4.75 A	170
FIGURA C.26 – GRÁFICO DE ERRO MÁXIMO DO SISTEMA DESENVOLVIDO DE MEDIÇÃO DE CORRENTE CC, FAIXA DE 2.75 A A 4.75 A, COM AUTO-ZERO	170
FIGURA C.27 – GRÁFICO DE ERRO MÁXIMO NA MEDIÇÃO DE TENSÃO CA DO TRANSDUTOR DA FONTE AGILENT-6812B, FAIXA DE 85 A 145 V.....	171
FIGURA C.28 – GRÁFICO DE ERRO MÁXIMO NA MEDIÇÃO DE TENSÃO CA DO TRANSDUTOR DA FONTE AGILENT-6812B, FAIXA DE 190 A 250 V.....	171
FIGURA C.29 – GRÁFICO DE ERRO MÁXIMO NA MEDIÇÃO DE CORRENTE CA DO TRANSDUTOR DA FONTE AGILENT-6812B, FAIXA DE 0.1 A 0.5 A.....	172
FIGURA C.30 – GRÁFICO DE ERRO MÁXIMO NA MEDIÇÃO DE CORRENTE CA DO TRANSDUTOR DA FONTE AGILENT-6812B, FAIXA DE 0.5 A 1 A	172
FIGURA C.31 – GRÁFICO DE ERRO MÁXIMO NA MEDIÇÃO DE CORRENTE CA DO TRANSDUTOR DA FONTE AGILENT-6812B, FAIXA DE 1.0 A 2.5 A.....	173
FIGURA C.32 – GRÁFICO DE ERRO MÁXIMO NA MEDIÇÃO DE TENSÃO CC DO TRANSDUTOR DA FONTE AGILENT-6812B, FAIXA DE 20 A 100 V.....	173
FIGURA C.33 – GRÁFICO DE ERRO MÁXIMO NA MEDIÇÃO DE TENSÃO CC DO TRANSDUTOR DA FONTE AGILENT-6812B, FAIXA DE 100 A 150 V.....	174
FIGURA C.34 – GRÁFICO DE ERRO MÁXIMO NA MEDIÇÃO DE TENSÃO CC DO TRANSDUTOR DA FONTE AGILENT-6812B, FAIXA DE 150 A 200 V.....	174
FIGURA C.35 – GRÁFICO DE ERRO MÁXIMO NA MEDIÇÃO DE CORRENTE CC DO TRANSDUTOR DA FONTE AGILENT-6812B, FAIXA DE 0.1 A 0.5 A.....	175
FIGURA C.36 – GRÁFICO DE ERRO MÁXIMO NA MEDIÇÃO DE CORRENTE CC DO TRANSDUTOR DA FONTE AGILENT-6812B, FAIXA DE 0.5 A 1.0 A.....	175

FIGURA C.37 – GRÁFICO DE ERRO MÁXIMO NA MEDIÇÃO DE CORRENTE CC DO TRANSDUTOR DA FONTE AGILENT-6812B, FAIXA DE 1.0 A 2.5 A.....	176
FIGURA C.38 – GRÁFICO DE ERRO MÁXIMO NA MEDIÇÃO DE CORRENTE CC DO TRANSDUTOR DA FONTE AGILENT-6812B, FAIXA DE 2.5 A 5.0 A.....	176
FIGURA C.39 – GRÁFICO DE ERRO MÁXIMO NA MEDIÇÃO DE TENSÃO CA DO WT130, FAIXA DE 85 A 145 V	177
FIGURA C.40 – GRÁFICO DE ERRO MÁXIMO NA MEDIÇÃO DE TENSÃO CA DO WT130, FAIXA DE 190 A 250 V	177
FIGURA C.41 – GRÁFICO DE ERRO MÁXIMO NA MEDIÇÃO DE CORRENTE CA DO WT130, FAIXA DE 0.1 A 0.5 A	178
FIGURA C.42 – GRÁFICO DE ERRO MÁXIMO NA MEDIÇÃO DE CORRENTE CA DO WT130, FAIXA DE 0.5 A 1.0 A	178
FIGURA C.43 – GRÁFICO DE ERRO MÁXIMO NA MEDIÇÃO DE CORRENTE CA DO WT130, FAIXA DE 1.0 A 1.75 A	179
FIGURA C.44 – GRÁFICO DE ERRO MÁXIMO NA MEDIÇÃO DE TENSÃO CC DO WT130, FAIXA DE 20 A 100 V	179
FIGURA C.45 – GRÁFICO DE ERRO MÁXIMO NA MEDIÇÃO DE TENSÃO CC DO WT130, FAIXA DE 100 A 150 V	180
FIGURA C.46 – GRÁFICO DE ERRO MÁXIMO NA MEDIÇÃO DE TENSÃO CC DO WT130, FAIXA DE 150 A 200 V	180
FIGURA C.47 – GRÁFICO DE ERRO MÁXIMO NA MEDIÇÃO DE CORRENTE CC DO WT130, FAIXA DE 0.1 A 0.5 A	181
FIGURA C.48 – GRÁFICO DE ERRO MÁXIMO NA MEDIÇÃO DE CORRENTE CC DO WT130, FAIXA DE 0.5 A 1.0 A	181
FIGURA C.49 – GRÁFICO DE ERRO MÁXIMO NA MEDIÇÃO DE CORRENTE CC DO WT130, FAIXA DE 1.0 A 2.5 A	182
FIGURA C.50 – GRÁFICO DE ERRO MÁXIMO NA MEDIÇÃO DE CORRENTE CC DO WT130, FAIXA DE 2.5 A 5.0 A	182
FIGURA C.51 – GRÁFICO DE ERRO MÁXIMO DO WATTÍMETRO 2480E, FAIXA DE 85 A 145 V	183
FIGURA C.52 – GRÁFICO DE ERRO MÁXIMO DO WATTÍMETRO 2480E, FAIXA DE 190 A 250 V	183
FIGURA C.53 – GRÁFICO DE ERRO MÁXIMO NA MEDIÇÃO DE TENSÃO CC DO TRANSDUTOR DA FONTE AGILENT-6030A, FAIXA DE 20 A 100 V.....	184
FIGURA C.54 – GRÁFICO DE ERRO MÁXIMO NA MEDIÇÃO DE TENSÃO CC DO TRANSDUTOR DA FONTE AGILENT-6030A, FAIXA DE 100 A 150 V	184
FIGURA C.55 – GRÁFICO DE ERRO MÁXIMO NA MEDIÇÃO DE TENSÃO CC DO TRANSDUTOR DA FONTE AGILENT-6030A, FAIXA DE 150 A 200 V	185
FIGURA C.56 – GRÁFICO DE ERRO MÁXIMO NA MEDIÇÃO DE CORRENTE CC DO TRANSDUTOR DA FONTE AGILENT-6030A, FAIXA DE 0.1 A 0.5 A.....	185

FIGURA C.57 – GRÁFICO DE ERRO MÁXIMO NA MEDIÇÃO DE CORRENTE CC DO TRANSDUTOR DA FONTE AGILENT-6030A, FAIXA DE 0.5 A 1.0 A.....	186
FIGURA C.58 – GRÁFICO DE ERRO MÁXIMO NA MEDIÇÃO DE CORRENTE CC DO TRANSDUTOR DA FONTE AGILENT-6030A, FAIXA DE 1.0 A 2.5 A.....	186
FIGURA C.59 – GRÁFICO DE ERRO MÁXIMO NA MEDIÇÃO DE CORRENTE CC DO TRANSDUTOR DA FONTE AGILENT-6030A, FAIXA DE 2.5 A 5.0 A.....	187
FIGURA C.60 – GRÁFICO DE ERRO MÁXIMO NA MEDIÇÃO DE TENSÃO CC DO MULTÍMETRO HP-34401A, FAIXA DE 20 A 100 V	188
FIGURA C.61 – GRÁFICO DE ERRO MÁXIMO NA MEDIÇÃO DE TENSÃO CC DO MULTÍMETRO HP-34401A, FAIXA DE 100 A 150 V	188
FIGURA C.62 – GRÁFICO DE ERRO MÁXIMO NA MEDIÇÃO DE TENSÃO CC DO MULTÍMETRO HP-34401A, FAIXA DE 150 A 200 V	189
FIGURA C.63 – GRÁFICO DE ERRO MÁXIMO NA MEDIÇÃO DE CORRENTE CC DO MULTÍMETRO HP-34401A, FAIXA DE 0.1 A 0.5 A.....	189
FIGURA C.64 – GRÁFICO DE ERRO MÁXIMO NA MEDIÇÃO DE CORRENTE CC DO MULTÍMETRO HP-34401A, FAIXA DE 0.5 A 1.0 A.....	190
FIGURA C.65 – GRÁFICO DE ERRO MÁXIMO NA MEDIÇÃO DE CORRENTE CC DO MULTÍMETRO HP-34401A, FAIXA DE 1.0 A 2.5 A.....	190

LISTA DE TABELAS

TABELA C.1 – CALIBRAÇÃO DO SISTEMA DE MEDIÇÃO DE TENSÃO CA, FAIXA DE 150 V	158
TABELA C.2 – CALIBRAÇÃO DO SISTEMA DE MEDIÇÃO DE TENSÃO CA, FAIXA DE 150 V, COM AUTO-ZERO.....	158
TABELA C.3 – CALIBRAÇÃO DO SISTEMA DE MEDIÇÃO DE TENSÃO CA, FAIXA DE 250 V	159
TABELA C.4 CALIBRAÇÃO DO SISTEMA DE MEDIÇÃO DE TENSÃO CA, FAIXA DE 250 V, COM AUTO-ZERO	159
TABELA C.5 – CALIBRAÇÃO DO SISTEMA DE MEDIÇÃO DE CORRENTE CA, FAIXA DE 0.5 A	160
TABELA C.6 – CALIBRAÇÃO DO SISTEMA DE MEDIÇÃO DE CORRENTE CA, FAIXA DE 0.5 A, COM AUTO-ZERO.....	160
TABELA C.7 – CALIBRAÇÃO DO SISTEMA DE MEDIÇÃO DE CORRENTE CA, FAIXA DE 1.0 A	161
TABELA C.8 – CALIBRAÇÃO DO SISTEMA DE MEDIÇÃO DE CORRENTE CA, FAIXA DE 1.0 A, COM AUTO-ZERO.....	161
TABELA C.9 – CALIBRAÇÃO DO SISTEMA DE MEDIÇÃO DE CORRENTE CA, FAIXA DE 2.5 A	162
TABELA C.10 – CALIBRAÇÃO DO SISTEMA DE MEDIÇÃO DE CORRENTE CA, FAIXA DE 2.5 A, COM AUTO-ZERO.....	162
TABELA C.11 – CALIBRAÇÃO DO SISTEMA DE MEDIÇÃO DE TENSÃO CC, FAIXA DE 100 V	163
TABELA C.12 – CALIBRAÇÃO DO SISTEMA DE MEDIÇÃO DE TENSÃO CC, FAIXA DE 100 V, COM AUTO-ZERO.....	163
TABELA C.13 – CALIBRAÇÃO DO SISTEMA DESENVOLVIDO DE MEDIÇÃO DE TENSÃO CC, FAIXA DE 150 V	164
TABELA C.14 – CALIBRAÇÃO DO SISTEMA DESENVOLVIDO DE MEDIÇÃO DE TENSÃO CC, FAIXA DE 150 V, COM AUTO-ZERO.....	164
TABELA C.15 – CALIBRAÇÃO DO SISTEMA DESENVOLVIDO DE MEDIÇÃO DE TENSÃO CC, FAIXA DE 200 V	165
TABELA C.16 – CALIBRAÇÃO DO SISTEMA DESENVOLVIDO DE MEDIÇÃO DE TENSÃO CC, FAIXA DE 200 V, COM AUTO-ZERO.....	165
TABELA C.17 – CALIBRAÇÃO DO SISTEMA DESENVOLVIDO DE MEDIÇÃO DE TENSÃO CC, FAIXA DE 300 V	166
TABELA C.18 – CALIBRAÇÃO DO SISTEMA DESENVOLVIDO DE MEDIÇÃO DE TENSÃO CC, FAIXA DE 300 V, COM AUTO-ZERO.....	166

TABELA C.19 – CALIBRAÇÃO DO SISTEMA DESENVOLVIDO DE MEDIÇÃO DE CORRENTE CC, FAIXA DE 0.05 A A 0.45 A	167
TABELA C.20 – CALIBRAÇÃO DO SISTEMA DESENVOLVIDO DE MEDIÇÃO DE CORRENTE CC, FAIXA DE 0.05 A A 0.45 A, COM AUTO-ZERO.....	167
TABELA C.21 – CALIBRAÇÃO DO SISTEMA DESENVOLVIDO DE MEDIÇÃO DE CORRENTE CC, FAIXA DE 0.55 A A 0.95 A	168
TABELA C.22 – CALIBRAÇÃO DO SISTEMA DESENVOLVIDO DE MEDIÇÃO DE CORRENTE CC, FAIXA DE 0.55 A A 0.95 A, COM AUTO-ZERO.....	168
TABELA C.23 – CALIBRAÇÃO DO SISTEMA DESENVOLVIDO DE MEDIÇÃO DE CORRENTE CC, FAIXA DE 1.15 A A 2.35 A	169
TABELA C.24 – CALIBRAÇÃO DO SISTEMA DESENVOLVIDO DE MEDIÇÃO DE CORRENTE CC, FAIXA DE 1.15 A A 2.35 A, COM AUTO-ZERO.....	169
TABELA C.25 – CALIBRAÇÃO DO SISTEMA DESENVOLVIDO DE MEDIÇÃO DE CORRENTE CC, FAIXA DE 2.75 A A 4.75 A	170
TABELA C.26 – CALIBRAÇÃO DO SISTEMA DESENVOLVIDO DE MEDIÇÃO DE CORRENTE CC, FAIXA DE 2.75 A A 4.75 A, COM AUTO-ZERO.....	170
TABELA C.27 – CALIBRAÇÃO DA MEDIÇÃO DE TENSÃO CA DO TRANSDUTOR DA FONTE AGILENT-6812B, FAIXA DE 85 A 145 V.....	171
TABELA C.28 – CALIBRAÇÃO DA MEDIÇÃO DE TENSÃO CA DO TRANSDUTOR DA FONTE AGILENT-6812B, FAIXA DE 190 A 250 V	171
TABELA C.29 – CALIBRAÇÃO DA MEDIÇÃO DE CORRENTE CA DO TRANSDUTOR DA FONTE AGILENT-6812B, FAIXA DE 0.1 A 0.5 A.....	172
TABELA C.30 – CALIBRAÇÃO DA MEDIÇÃO DE CORRENTE CA DO TRANSDUTOR DA FONTE AGILENT-6812B, FAIXA DE 0.5 A 1.0 A.....	172
TABELA C.31 – CALIBRAÇÃO DA MEDIÇÃO DE CORRENTE CA DO TRANSDUTOR DA FONTE AGILENT-6812B, FAIXA DE 1.0 A 2.5 A.....	173
TABELA C.32 – CALIBRAÇÃO DO TRANSDUTOR DA FONTE AGILENT-6812B EM MEDIÇÕES DE TENSÃO CC, FAIXA DE 20 A 100 V	173
TABELA C.33 – CALIBRAÇÃO DA MEDIÇÃO DE TENSÃO CC DO TRANSDUTOR DA FONTE AGILENT-6812B, FAIXA DE 100 A 150 V	174
TABELA C.34 – CALIBRAÇÃO DA MEDIÇÃO DE TENSÃO CC DO TRANSDUTOR DA FONTE AGILENT-6812B, FAIXA DE 150 A 200 V.....	174
TABELA C.35 – CALIBRAÇÃO DA MEDIÇÃO DE CORRENTE CC DO TRANSDUTOR DA FONTE AGILENT-6812B, FAIXA DE 0.1 A 0.5 A.....	175
TABELA C.36 – CALIBRAÇÃO DA MEDIÇÃO DE CORRENTE CC DO TRANSDUTOR DA FONTE AGILENT-6812B, FAIXA DE 0.5 A 1.0 A.....	175
TABELA C.37 – CALIBRAÇÃO DA MEDIÇÃO DE CORRENTE CC DO TRANSDUTOR DA FONTE AGILENT-6812B, FAIXA DE 1.0 A 2.5 A.....	176
TABELA C.38 – CALIBRAÇÃO DA MEDIÇÃO DE CORRENTE CC DO TRANSDUTOR DA FONTE AGILENT-6812B, FAIXA DE 2.5 A 5.0 A.....	176

TABELA C.39 – CALIBRAÇÃO DA MEDIÇÃO DE TENSÃO CA DO WATTÍMETRO WT130, FAIXA DE 85 A 145 V	177
TABELA C.40 – CALIBRAÇÃO DA MEDIÇÃO DE TENSÃO CA DO WATTÍMETRO WT130, FAIXA DE 190 A 250 V	177
TABELA C.41 – CALIBRAÇÃO DA MEDIÇÃO DE CORRENTE CA DO WATTÍMETRO WT130, FAIXA DE 0.1 A 0.5 A	178
TABELA C.42 – CALIBRAÇÃO DA MEDIÇÃO DE CORRENTE CA DO WATTÍMETRO WT130, FAIXA DE 0.5 A 1.0 A	178
TABELA C.43 – CALIBRAÇÃO DE MEDIÇÃO DE CORRENTE CA DO WATTÍMETRO WT130, FAIXA DE 1.0 A 1.75 A	179
TABELA C.44 – CALIBRAÇÃO DE MEDIÇÃO DE TENSÃO CC DO WATTÍMETRO WT130, FAIXA DE 20 A 100 V	179
TABELA C.45 – CALIBRAÇÃO DE MEDIÇÃO DE TENSÃO CC DO WATTÍMETRO WT130, FAIXA DE 100 A 150 V	180
TABELA C.46 – CALIBRAÇÃO DE MEDIÇÃO DE TENSÃO CC DO WATTÍMETRO WT130, FAIXA DE 150 A 200 V	180
TABELA C.47 – CALIBRAÇÃO DE MEDIÇÃO DE CORRENTE CC DO WATTÍMETRO WT130, FAIXA DE 0.1 A 0.5 A	181
TABELA C.48 – CALIBRAÇÃO DE MEDIÇÃO DE CORRENTE CC DO WATTÍMETRO WT130, FAIXA DE 0.5 A 1.0 A	181
TABELA C.49 – CALIBRAÇÃO DE MEDIÇÃO DE CORRENTE CC DO WATTÍMETRO WT130, FAIXA DE 1.0 A 2.5 A	182
TABELA C.50 – CALIBRAÇÃO DE MEDIÇÃO DE CORRENTE CC DO WATTÍMETRO WT130, FAIXA DE 2.5 A 5.0 A	182
TABELA C.51 – CALIBRAÇÃO DO WATTÍMETRO 2480E, FAIXA DE 85 A 145 V ...	183
TABELA C.52 – CALIBRAÇÃO DO WATTÍMETRO 2480E, FAIXA DE 190 A 250 V .	183
TABELA C.53 – CALIBRAÇÃO DA MEDIÇÃO DE TENSÃO CC DO TRANSDUTOR DA FONTE AGILENT-6030A, FAIXA DE 20 A 100 V.....	184
TABELA C.54 – CALIBRAÇÃO DA MEDIÇÃO DE TENSÃO CC DO TRANSDUTOR DA FONTE AGILENT-6030A, FAIXA DE 100 A 150 V	184
TABELA C.55 – CALIBRAÇÃO DA MEDIÇÃO DE TENSÃO CC DO TRANSDUTOR DA FONTE AGILENT-6030A, FAIXA DE 150 A 200 V	185
TABELA C.56 – CALIBRAÇÃO DA MEDIÇÃO DE CORRENTE CC DO TRANSDUTOR DA FONTE AGILENT-6030A, FAIXA DE 0.1 A 0.5 A.....	185
TABELA C.57 – CALIBRAÇÃO DA MEDIÇÃO DE CORRENTE CC DO TRANSDUTOR DA FONTE AGILENT-6030A, FAIXA DE 0.5 A 1.0 A.....	186
TABELA C.58 – CALIBRAÇÃO DA MEDIÇÃO DE CORRENTE CC DO TRANSDUTOR DA FONTE AGILENT-6030A, FAIXA DE 1.0 A 2.5 A.....	186
TABELA C.59 – CALIBRAÇÃO DA MEDIÇÃO DE CORRENTE CC DO TRANSDUTOR DA FONTE AGILENT-6030A, FAIXA DE 2.5 A 5.0 A.....	187

TABELA C.60 – CALIBRAÇÃO DA MEDIÇÃO DE TENSÃO CC DO MULTÍMETRO HP-34401A, FAIXA DE 20 A 100 V.....	188
TABELA C.61 – CALIBRAÇÃO DA MEDIÇÃO DE TENSÃO CC DO MULTÍMETRO HP-34401A, FAIXA DE 100 A 150 V.....	188
TABELA C.62 – CALIBRAÇÃO DA MEDIÇÃO DE TENSÃO CC DO MULTÍMETRO HP-34401A, FAIXA DE 150 A 200 V.....	189
TABELA C.63 – CALIBRAÇÃO DA MEDIÇÃO DE CORRENTE CC DO MULTÍMETRO HP-34401A, FAIXA DE 0.1 A 0.5 A.....	189
TABELA C.64 – CALIBRAÇÃO DA MEDIÇÃO DE CORRENTE CC DO MULTÍMETRO HP-34401A, FAIXA DE 0.5 A 1.0 A.....	190
TABELA C.65 – CALIBRAÇÃO DA MEDIÇÃO DE CORRENTE CC DO MULTÍMETRO HP-34401A, FAIXA DE 1.0 A 2.5 A.....	190

C.1 Calibração do sistema de medição desenvolvido

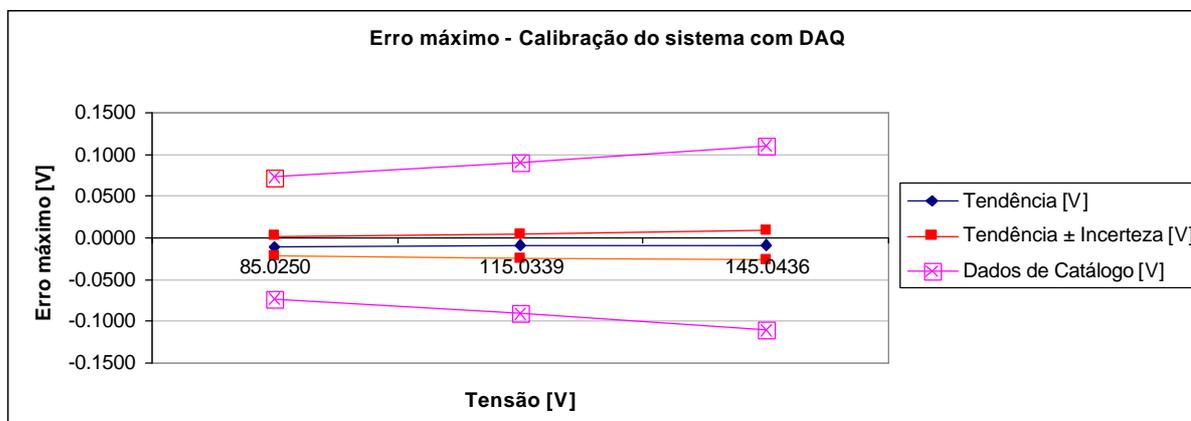


Figura C.1 – Gráfico de erro máximo do sistema de medição de tensão CA, faixa de 150 V

Tabela C.1 – Calibração do sistema de medição de tensão CA, faixa de 150 V

Calibração do sistema com DAQ					
Medição (média)	Padrão (média)	Tendência [V]	Incerteza [V]	Erro máximo [V]	Erro máximo [%]
85,0145	85,0250	-0,0104	0,0125	0,0229	0,027
115,0242	115,0339	-0,0097	0,0146	0,0243	0,021
145,0343	145,0436	-0,0093	0,0174	0,0268	0,018

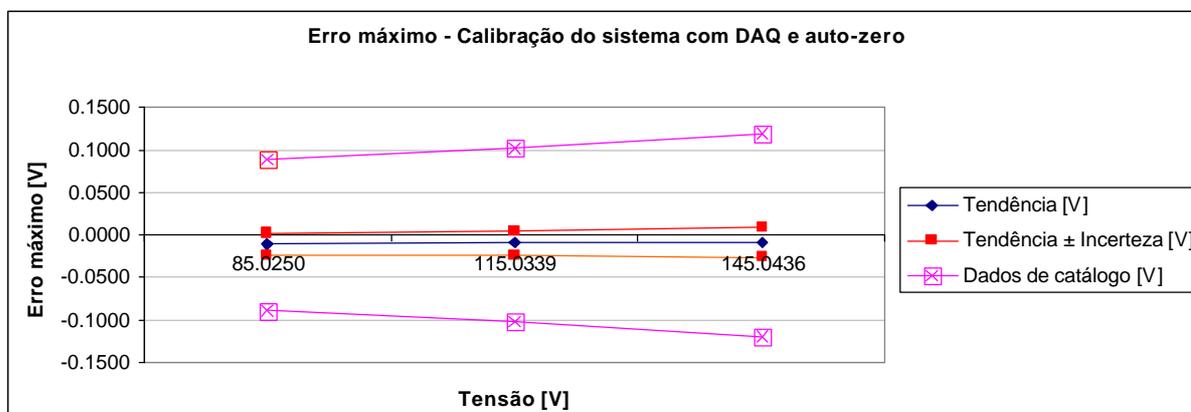


Figura C.2 – Gráfico de erro máximo do sistema de medição de tensão CA, faixa de 150 V, com auto-zero

Tabela C.2 – Calibração do sistema de medição de tensão CA, faixa de 150 V, com auto-zero

Calibração do sistema com DAQ e auto-zero					
Medição (média)	Padrão (média)	Tendência [V]	Incerteza [V]	Erro máximo [V]	Erro máximo [%]
85,0145	85,0250	-0,0105	0,0125	0,0230	0,027
115,0242	115,0339	-0,0097	0,0146	0,0243	0,021
145,0343	145,0436	-0,0093	0,0174	0,0267	0,018

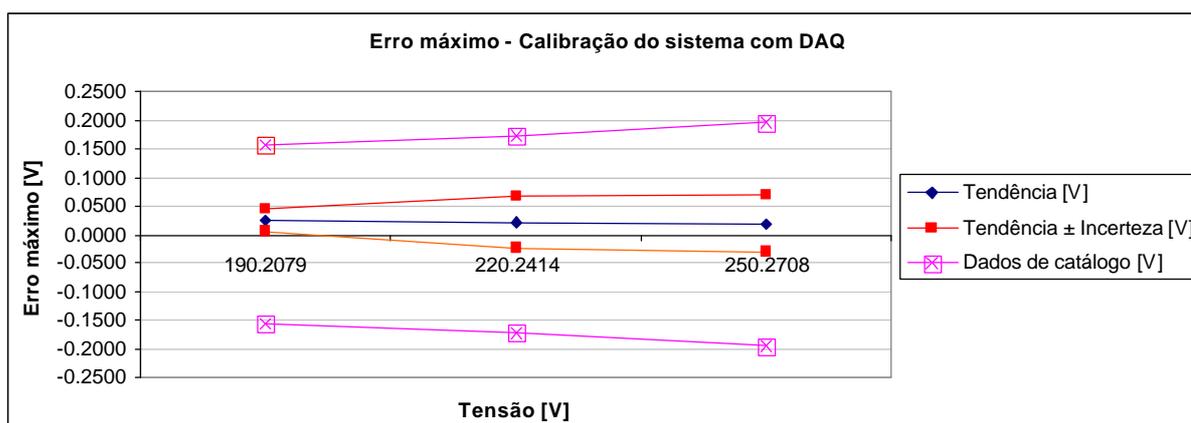


Figura C.3 – Gráfico de erro máximo do sistema de medição de tensão CA, faixa de 250 V

Tabela C.3 – Calibração do sistema de medição de tensão CA, faixa de 250 V

Calibração do sistema com DAQ					
Medição (média)	Padrão (média)	Tendência [V]	Incerteza [V]	Erro máximo [V]	Erro máximo [%]
190,2325	190,2079	0,0245	0,0204	0,0450	0,024
220,2629	220,2414	0,0215	0,0459	0,0675	0,031
250,2900	250,2708	0,0192	0,0494	0,0686	0,027

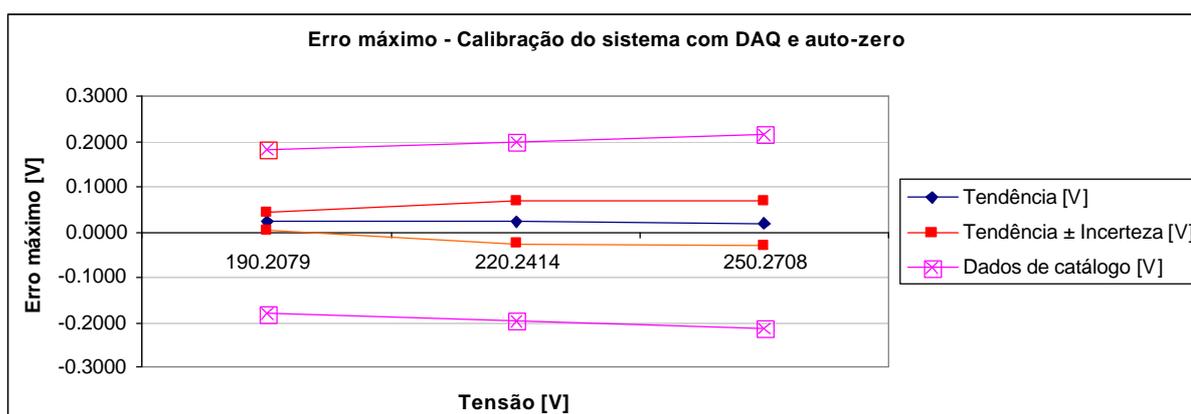


Figura C.4 – Gráfico de erro máximo do sistema de medição de tensão CA, faixa de 250 V, com auto-zero

Tabela C.4 Calibração do sistema de medição de tensão CA, faixa de 250 V, com auto-zero

Calibração do sistema com DAQ e auto-zero					
Medição (média)	Padrão (média)	Tendência [V]	Incerteza [V]	Erro máximo [V]	Erro máximo [%]
190,2323	190,2079	0,0243	0,0204	0,0447	0,024
220,2627	220,2414	0,0213	0,0459	0,0673	0,031
250,2899	250,2708	0,0191	0,0494	0,0684	0,027

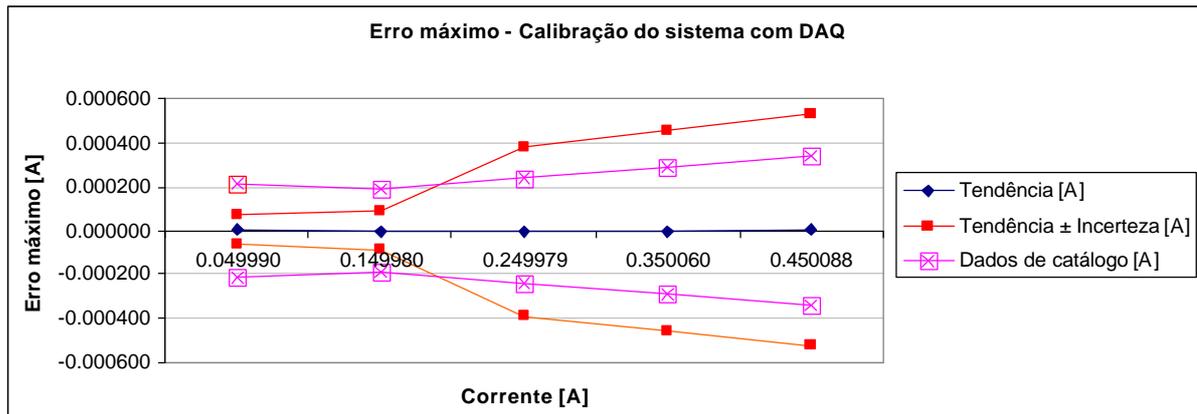


Figura C.5 – Gráfico de erro máximo do sistema de medição de corrente CA, faixa de 0.5 A

Tabela C.5 – Calibração do sistema de medição de corrente CA, faixa de 0.5 A

Calibração do sistema com DAQ					
Medição (média)	Padrão (média)	Tendência [A]	Incerteza [A]	Erro máximo [A]	Erro máximo [%]
0.049993	0.049990	0.000003	0.000068	0.000071	0.142
0.149980	0.149980	0.000000	0.000087	0.000087	0.058
0.249973	0.249979	-0.000007	0.000386	0.000392	0.157
0.350058	0.350060	-0.000002	0.000458	0.000459	0.131
0.450093	0.450088	0.000005	0.000530	0.000535	0.119

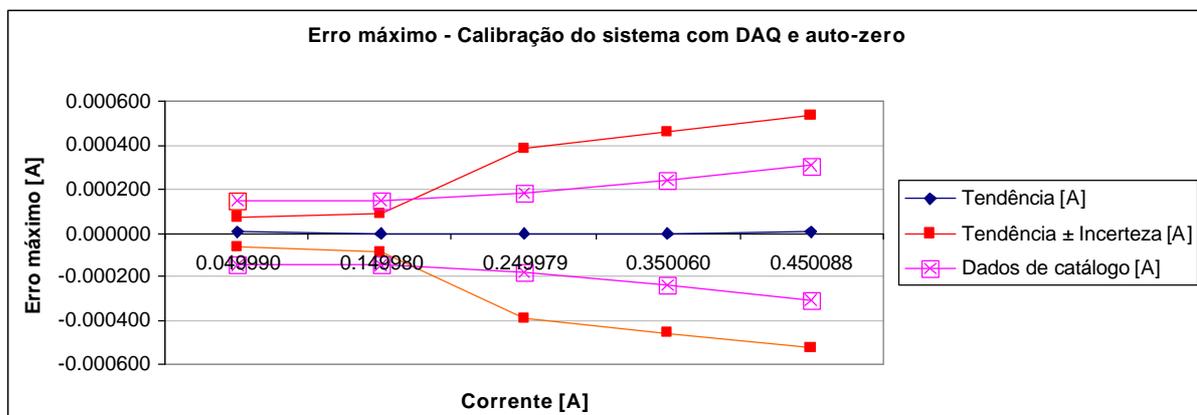


Figura C.6 – Gráfico de erro máximo do sistema de medição de corrente CA, faixa de 0.5 A, com auto-zero

Tabela C.6 – Calibração do sistema de medição de corrente CA, faixa de 0.5 A, com auto-zero

Calibração do sistema com DAQ e auto-zero					
Medição (média)	Padrão (média)	Tendência [A]	Incerteza [A]	Erro máximo [A]	Erro máximo [%]
0.049992	0.049990	0.000002	0.000068	0.000071	0.141
0.149980	0.149980	0.000000	0.000087	0.000087	0.058
0.249973	0.249979	-0.000007	0.000386	0.000392	0.157
0.350058	0.350060	-0.000002	0.000458	0.000459	0.131
0.450093	0.450088	0.000005	0.000530	0.000535	0.119

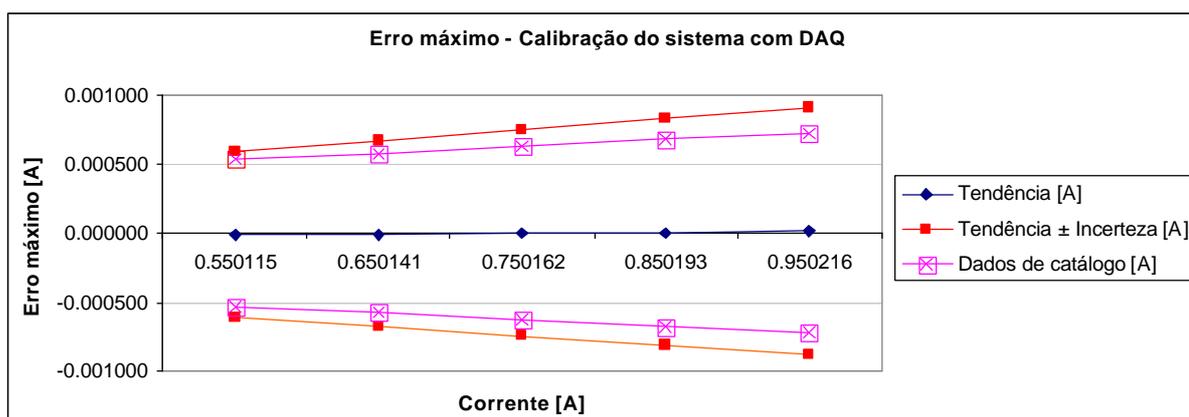


Figura C.7 – Gráfico de erro máximo do sistema de medição de corrente CA, faixa de 1.0 A

Tabela C.7 – Calibração do sistema de medição de corrente CA, faixa de 1.0 A

Calibração do sistema com DAQ					
Medição (média)	Padrão (média)	Tendência [A]	Incerteza [A]	Erro máximo [A]	Erro máximo [%]
0,550103	0,550115	-0,000012	0,000602	0,000614	0,112
0,650130	0,650141	-0,000011	0,000674	0,000685	0,105
0,750160	0,750162	-0,000002	0,000747	0,000749	0,100
0,850194	0,850193	0,000001	0,000819	0,000820	0,096
0,950231	0,950216	0,000015	0,000891	0,000906	0,095

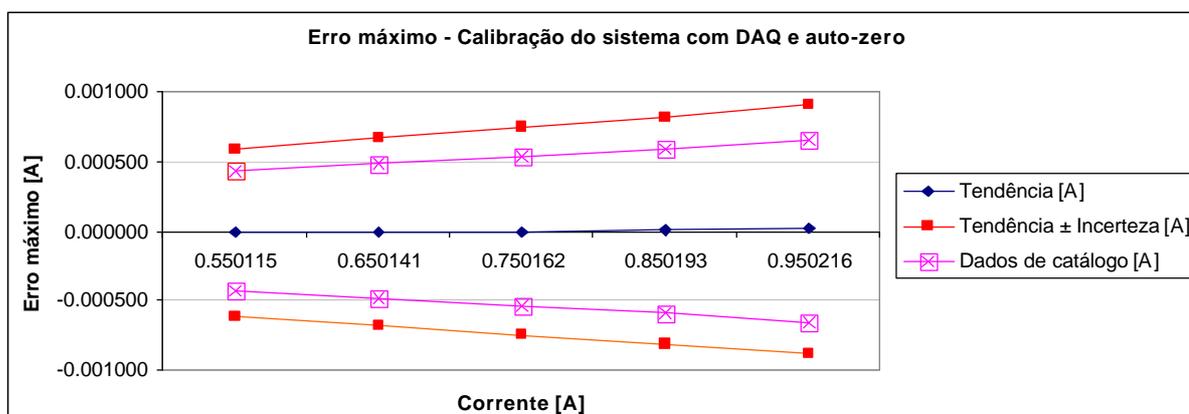


Figura C.8 – Gráfico de erro máximo do sistema de medição de corrente CA, faixa de 1.0 A, com auto-zero

Tabela C.8 – Calibração do sistema de medição de corrente CA, faixa de 1.0 A, com auto-zero

Calibração do sistema com DAQ e auto-zero					
Medição (média)	Padrão (média)	Tendência [A]	Incerteza [A]	Erro máximo [A]	Erro máximo [%]
0,550102	0,550115	-0,000013	0,000602	0,000615	0,112
0,650129	0,650141	-0,000011	0,000674	0,000686	0,105
0,750160	0,750162	-0,000002	0,000747	0,000749	0,100
0,850194	0,850193	0,000001	0,000819	0,000820	0,096
0,950232	0,950216	0,000015	0,000891	0,000907	0,095

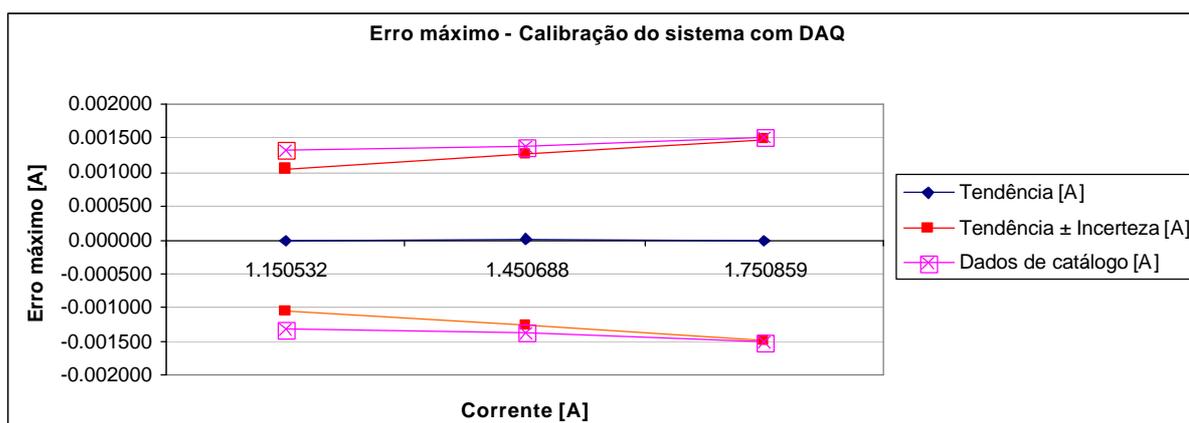


Figura C.9 – Gráfico de erro máximo do sistema de medição de corrente CA, faixa de 2.5 A

Tabela C.9 – Calibração do sistema de medição de corrente CA, faixa de 2.5 A

Calibração do sistema com DAQ					
Medição (média)	Padrão (média)	Tendência [A]	Incerteza [A]	Erro máximo [A]	Erro máximo [%]
1.150531	1.150532	-0.000001	0.001038	0.001039	0.090
1.450689	1.450688	0.000002	0.001255	0.001257	0.087
1.750858	1.750859	-0.000001	0.001472	0.001473	0.084

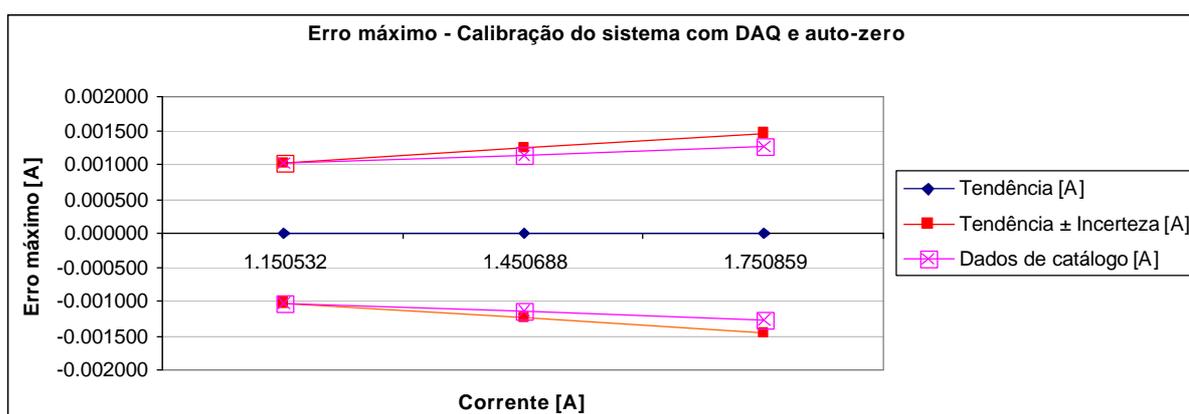


Figura C.10 – Gráfico de erro máximo do sistema de medição de corrente CA, faixa de 2.5 A, com auto-zero

Tabela C.10 – Calibração do sistema de medição de corrente CA, faixa de 2.5 A, com auto-zero

Calibração do sistema com DAQ e auto-zero					
Medição (média)	Padrão (média)	Tendência [A]	Incerteza [A]	Erro máximo [A]	Erro máximo [%]
1.150531	1.150532	-0.000001	0.001038	0.001039	0.090
1.450689	1.450688	0.000002	0.001255	0.001257	0.087
1.750858	1.750859	-0.000001	0.001472	0.001473	0.084

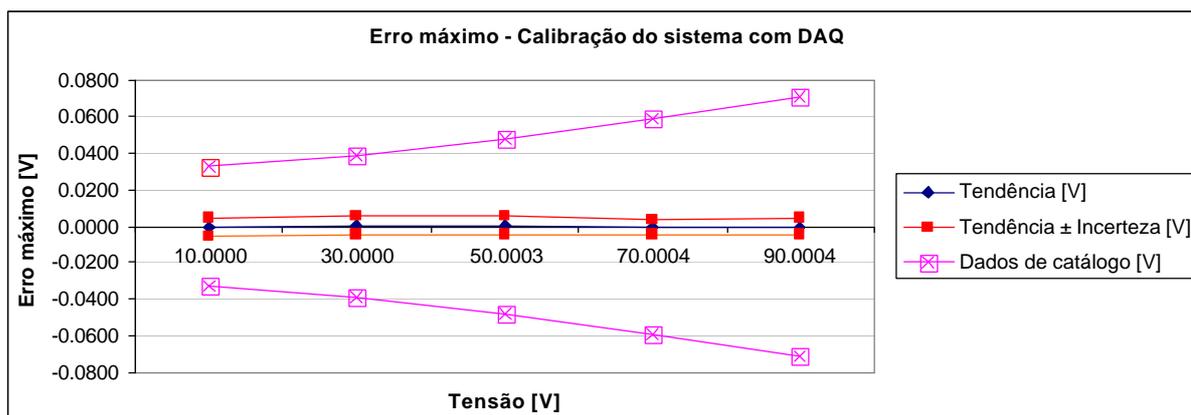


Figura C.11 – Gráfico de erro máximo do sistema de medição de tensão CC, faixa de 100 V

Tabela C.11 – Calibração do sistema de medição de tensão CC, faixa de 100 V

Calibração do sistema desenvolvido com DAQ					
Medição (média)	Padrão (média)	Tendência [V]	Incerteza [V]	Erro máximo [V]	Erro máximo [%]
9.9993	10.0000	-0.0007	0.0051	0.0058	0.058
30.0007	30.0000	0.0007	0.0048	0.0056	0.019
50.0008	50.0003	0.0005	0.0048	0.0053	0.011
70.0000	70.0004	-0.0004	0.0040	0.0044	0.006
90.0003	90.0004	-0.0001	0.0044	0.0045	0.005

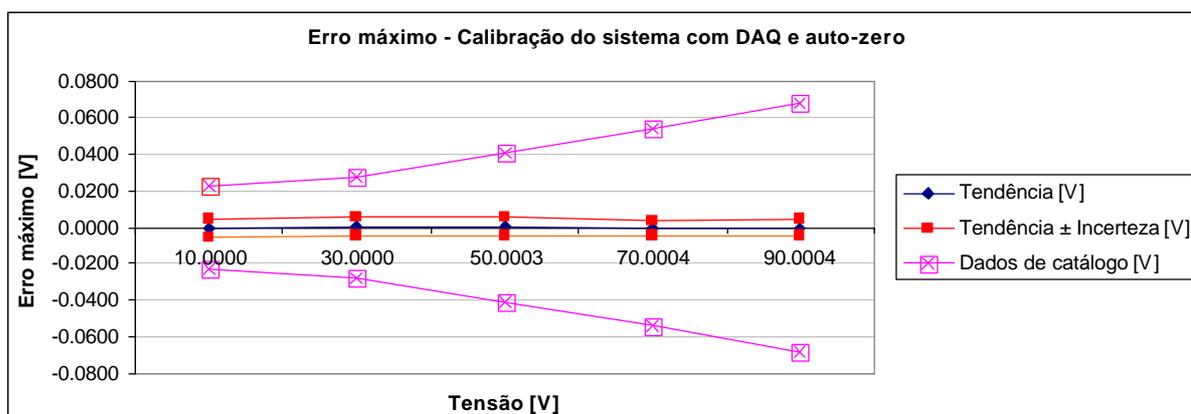


Figura C.12 – Gráfico de erro máximo do sistema de medição de tensão CC, faixa de 100 V, com auto-zero

Tabela C.12 – Calibração do sistema de medição de tensão CC, faixa de 100 V, com auto-zero

Calibração do sistema desenvolvido com DAQ e auto-zero					
Medição (média)	Padrão (média)	Tendência [V]	Incerteza [V]	Erro máximo [V]	Erro máximo [%]
9.9993	10.0000	-0.0007	0.0051	0.0058	0.058
30.0007	30.0000	0.0007	0.0048	0.0056	0.019
50.0008	50.0003	0.0005	0.0048	0.0053	0.011
70.0000	70.0004	-0.0004	0.0040	0.0044	0.006
90.0003	90.0004	-0.0001	0.0044	0.0045	0.005

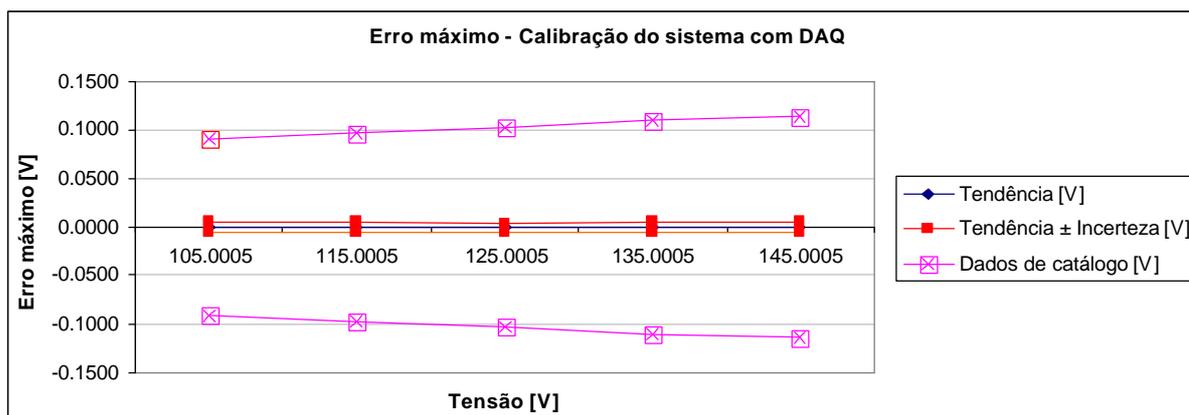


Figura C.13 – Gráfico de erro máximo do sistema desenvolvido de medição de tensão CC, faixa de 150 V

Tabela C.13 – Calibração do sistema desenvolvido de medição de tensão CC, faixa de 150 V

Calibração do sistema com DAQ					
Medição (média)	Padrão (média)	Tendência [V]	Incerteza [V]	Erro máximo [V]	Erro máximo [%]
105.0008	105.0005	0.0003	0.0050	0.0053	0.005
115.0004	115.0005	-0.0001	0.0049	0.0050	0.004
124.9999	125.0005	-0.0006	0.0049	0.0055	0.004
135.0010	135.0005	0.0005	0.0054	0.0059	0.004
145.0005	145.0005	0.0000	0.0063	0.0063	0.004

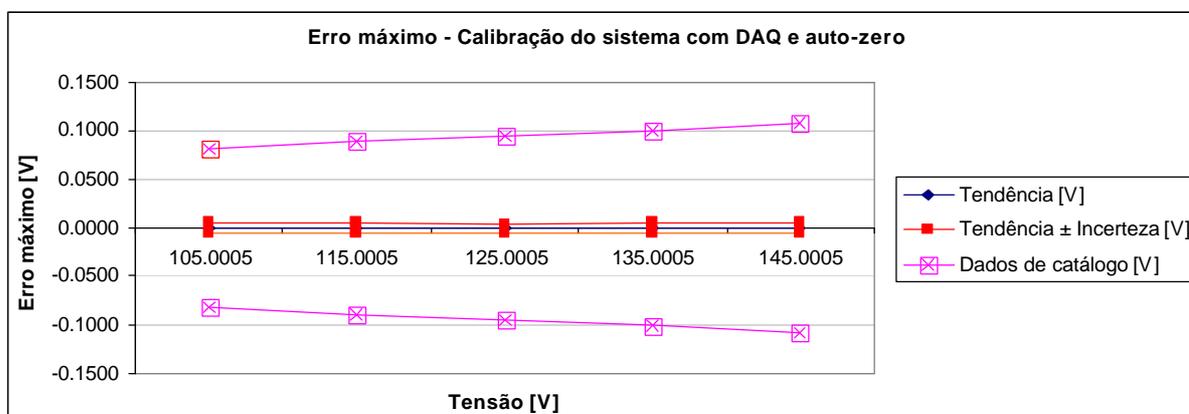


Figura C.14 – Gráfico de erro máximo do sistema desenvolvido de medição de tensão CC, faixa de 150 V, com auto-zero

Tabela C.14 – Calibração do sistema desenvolvido de medição de tensão CC, faixa de 150 V, com auto-zero

Calibração do sistema com DAQ e auto-zero					
Medição (média)	Padrão (média)	Tendência [V]	Incerteza [V]	Erro máximo [V]	Erro máximo [%]
105.0008	105.0005	0.0003	0.0050	0.0053	0.005
115.0004	115.0005	-0.0001	0.0049	0.0050	0.004
124.9999	125.0005	-0.0006	0.0049	0.0055	0.004
135.0010	135.0005	0.0005	0.0054	0.0059	0.004
145.0005	145.0005	0.0000	0.0063	0.0063	0.004

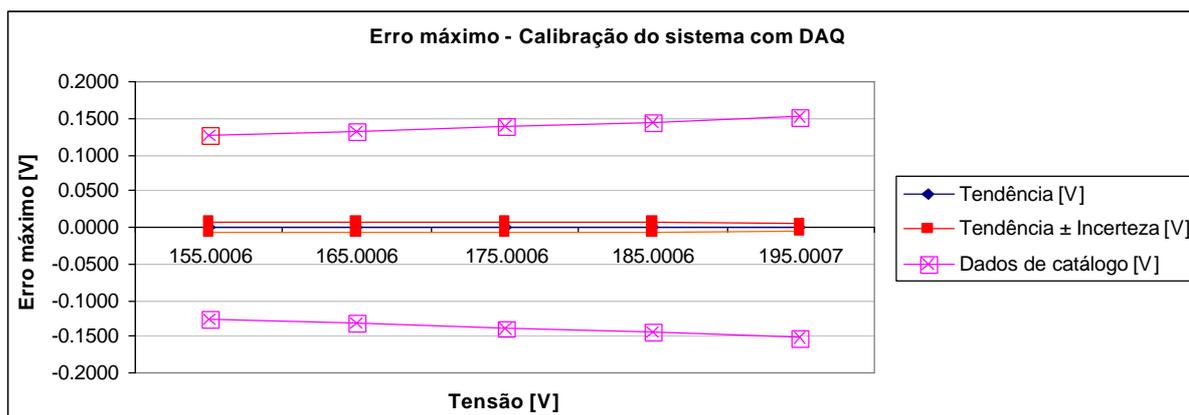


Figura C.15 – Gráfico de erro máximo do sistema desenvolvido de medição de tensão CC, faixa de 200 V

Tabela C.15 – Calibração do sistema desenvolvido de medição de tensão CC, faixa de 200 V

Calibração do sistema com DAQ					
Medição (média)	Padrão (média)	Tendência [V]	Incerteza [V]	Erro máximo [V]	Erro máximo [%]
155.0002	155.0006	-0.0003	0.0075	0.0078	0.005
165.0009	165.0006	0.0003	0.0078	0.0081	0.005
175.0010	175.0006	0.0004	0.0070	0.0074	0.004
185.0002	185.0006	-0.0004	0.0071	0.0076	0.004
195.0007	195.0007	0.0000	0.0063	0.0063	0.003

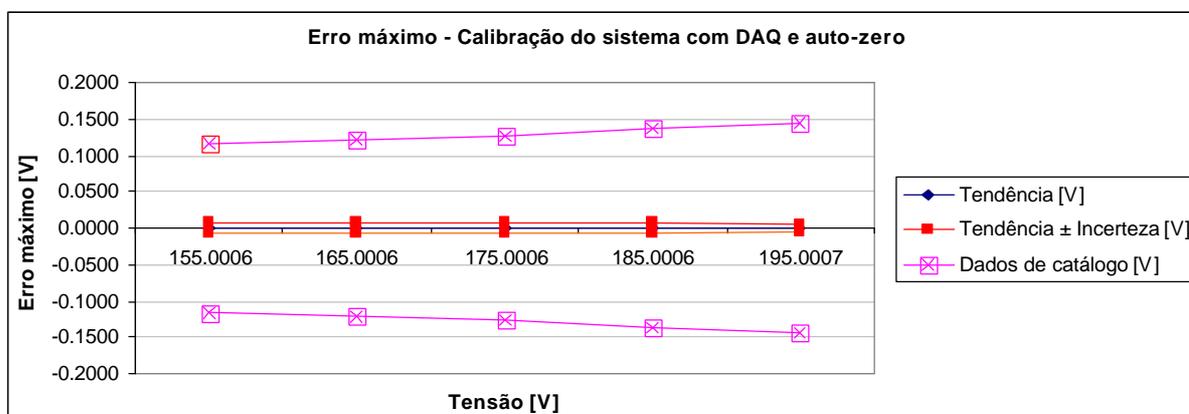


Figura C.16 – Gráfico de erro máximo do sistema desenvolvido de medição de tensão CC, faixa de 200 V, com auto-zero

Tabela C.16 – Calibração do sistema desenvolvido de medição de tensão CC, faixa de 200 V, com auto-zero

Calibração do sistema com DAQ e auto-zero					
Medição (média)	Padrão (média)	Tendência [V]	Incerteza [V]	Erro máximo [V]	Erro máximo [%]
155.0002	155.0006	-0.0003	0.0075	0.0078	0.005
165.0009	165.0006	0.0003	0.0078	0.0081	0.005
175.0010	175.0006	0.0004	0.0070	0.0074	0.004
185.0002	185.0006	-0.0004	0.0071	0.0076	0.004
195.0007	195.0007	0.0000	0.0063	0.0063	0.003

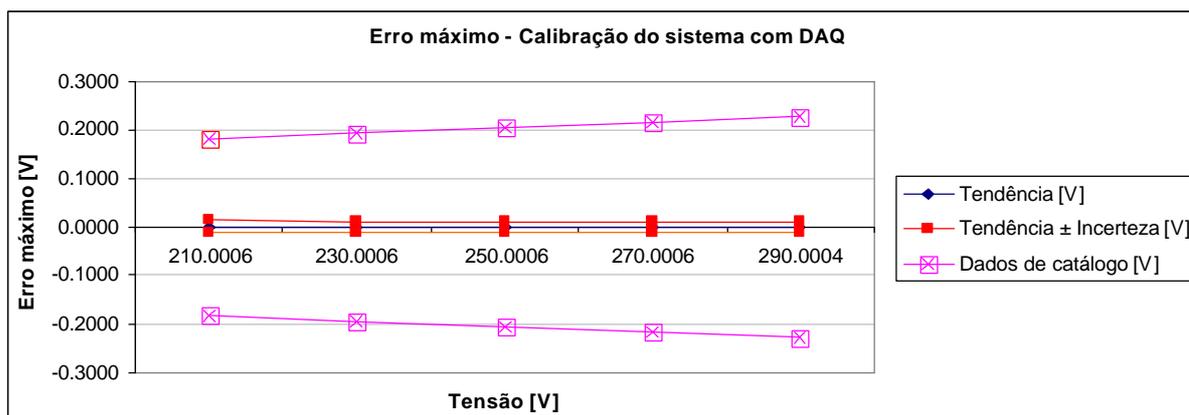


Figura C.17 – Gráfico de erro máximo do sistema desenvolvido de medição de tensão CC, faixa de 300 V

Tabela C.17 – Calibração do sistema desenvolvido de medição de tensão CC, faixa de 300 V

Calibração do sistema com DAQ					
Medição (média)	Padrão (média)	Tendência [V]	Incerteza [V]	Erro máximo [V]	Erro máximo [%]
210.0013	210.0006	0.0006	0.0129	0.0135	0.006
230.0001	230.0006	-0.0005	0.0121	0.0127	0.006
250.0002	250.0006	-0.0004	0.0118	0.0122	0.005
270.0004	270.0006	-0.0002	0.0122	0.0125	0.005
290.0009	290.0004	0.0005	0.0112	0.0117	0.004

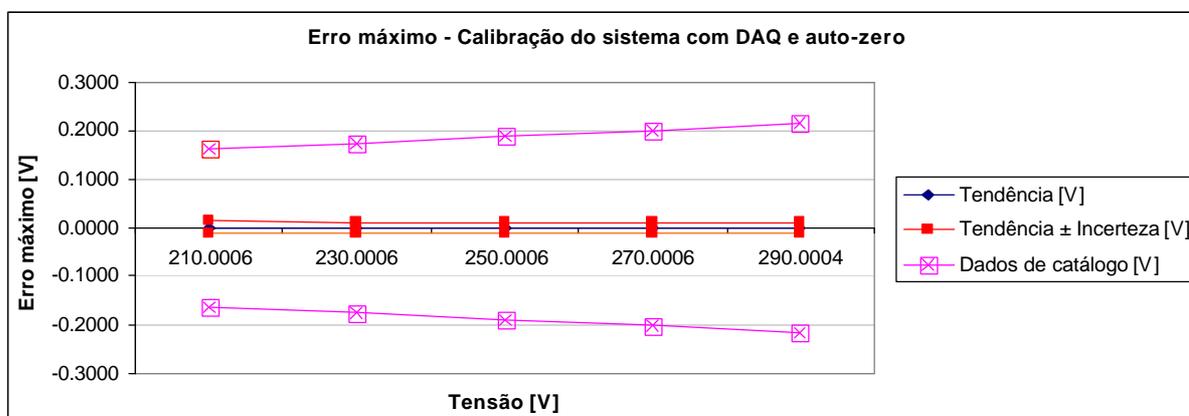


Figura C.18 – Gráfico de erro máximo do sistema desenvolvido de medição de tensão CC, faixa de 300 V, com auto-zero

Tabela C.18 – Calibração do sistema desenvolvido de medição de tensão CC, faixa de 300 V, com auto-zero

Calibração do sistema com DAQ e auto-zero					
Medição (média)	Padrão (média)	Tendência [V]	Incerteza [V]	Erro máximo [V]	Erro máximo [%]
210.0013	210.0006	0.0006	0.0129	0.0135	0.006
230.0001	230.0006	-0.0005	0.0121	0.0127	0.006
250.0002	250.0006	-0.0004	0.0118	0.0122	0.005
270.0004	270.0006	-0.0002	0.0122	0.0125	0.005
290.0009	290.0004	0.0005	0.0112	0.0117	0.004

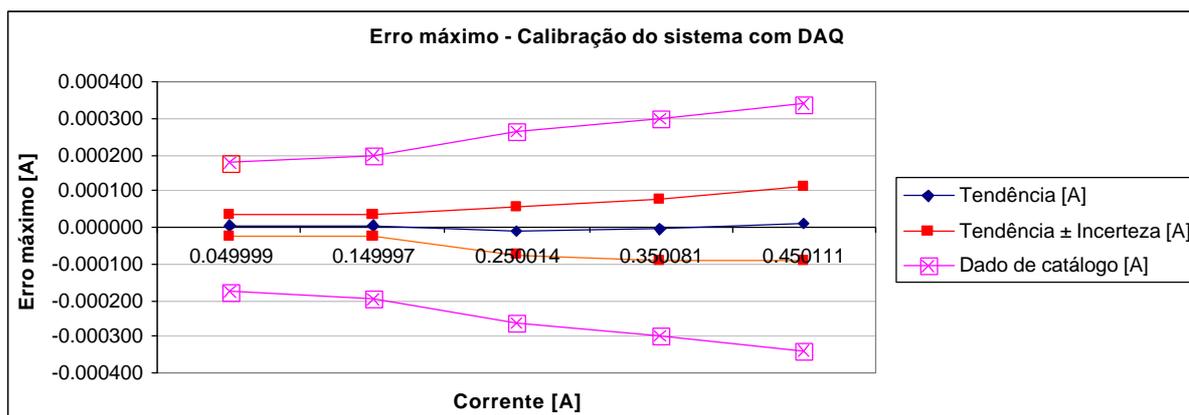


Figura C.19 – Gráfico de erro máximo do sistema desenvolvido de medição de corrente CC, faixa de 0.05 A a 0.45 A

Tabela C.19 – Calibração do sistema desenvolvido de medição de corrente CC, faixa de 0.05 A a 0.45 A

Calibração do sistema com DAQ					
Medição (média)	Padrão (média)	Tendência [A]	Incerteza [A]	Erro máximo [A]	Erro máximo [%]
0.050002	0.049999	0.000003	0.000031	0.000034	0.068
0.150001	0.149997	0.000004	0.000030	0.000034	0.022
0.250004	0.250014	-0.000009	0.000067	0.000076	0.030
0.350075	0.350081	-0.000007	0.000085	0.000091	0.026
0.450120	0.450111	0.000009	0.000102	0.000110	0.024

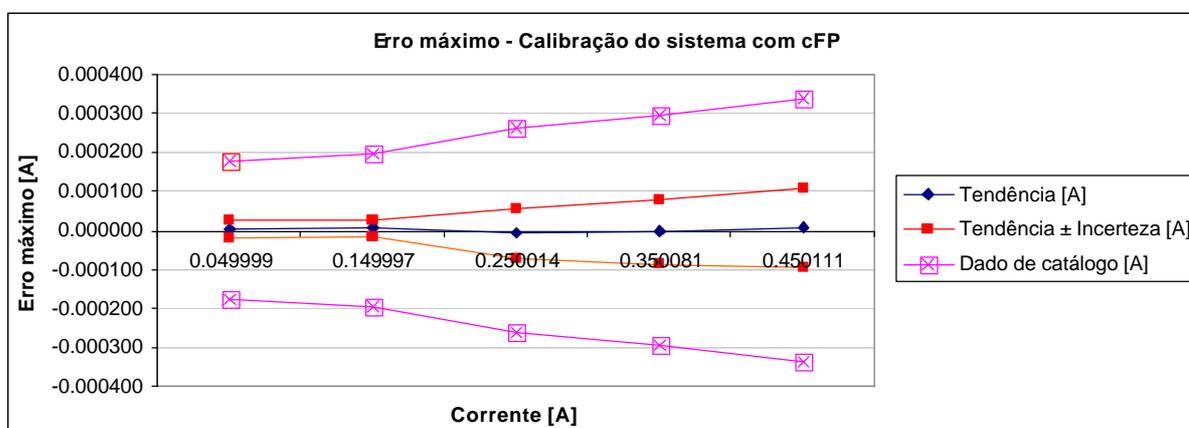


Figura C.20 – Gráfico de erro máximo do sistema desenvolvido de medição de corrente CC, faixa de 0.05 A a 0.45 A, com auto-zero

Tabela C.20 – Calibração do sistema desenvolvido de medição de corrente CC, faixa de 0.05 A a 0.45 A, com auto-zero

Calibração do sistema com DAQ e auto-zero					
Medição (média)	Padrão (média)	Tendência [A]	Incerteza [A]	Erro máximo [A]	Erro máximo [%]
0.050002	0.049999	0.000003	0.000013	0.000016	0.032
0.150001	0.149997	0.000004	0.000015	0.000019	0.013
0.250005	0.250014	-0.000009	0.000064	0.000073	0.029
0.350075	0.350081	-0.000006	0.000082	0.000089	0.025
0.450120	0.450111	0.000008	0.000101	0.000109	0.024

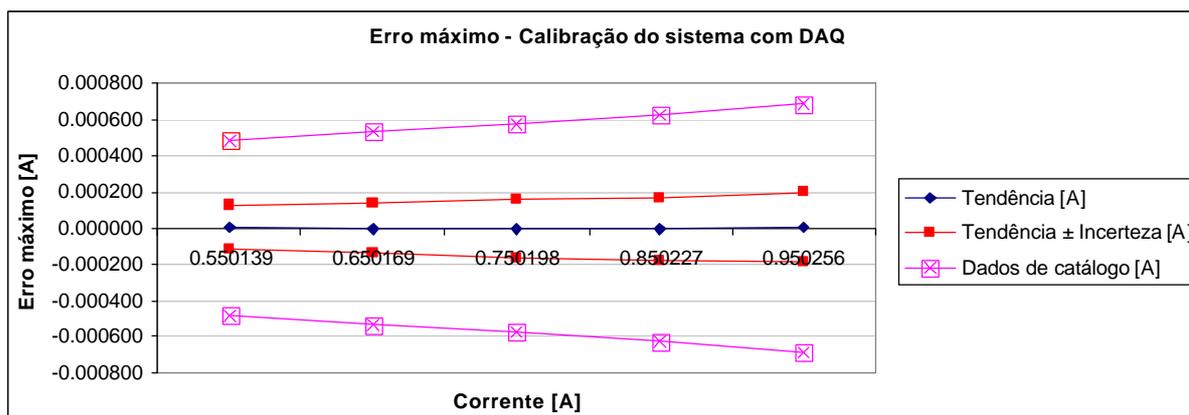


Figura C.21 – Gráfico de erro máximo do sistema desenvolvido de medição de corrente CC, faixa de 0.55 A a 0.95 A

Tabela C.21 – Calibração do sistema desenvolvido de medição de corrente CC, faixa de 0.55 A a 0.95 A

Calibração do sistema com DAQ					
Medição (média)	Padrão (média)	Tendência [A]	Incerteza [A]	Erro máximo [A]	Erro máximo [%]
0.550144	0.550139	0.000005	0.000122	0.000127	0.023
0.650167	0.650169	-0.000001	0.000140	0.000141	0.022
0.750192	0.750198	-0.000005	0.000159	0.000164	0.022
0.850223	0.850227	-0.000005	0.000178	0.000182	0.021
0.950262	0.950256	0.000007	0.000195	0.000202	0.021

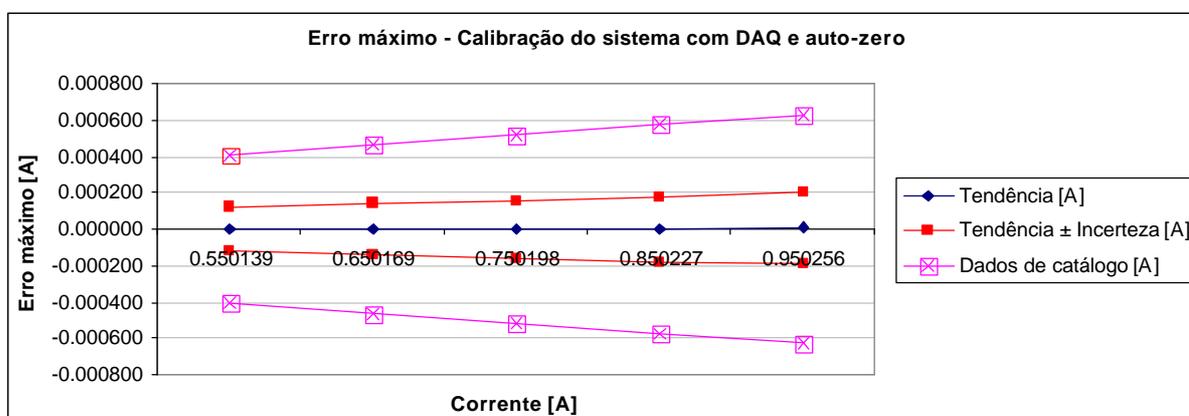


Figura C.22 – Gráfico de erro máximo do sistema desenvolvido de medição de corrente CC, faixa de 0.55 A a 0.95 A, com auto-zero

Tabela C.22 – Calibração do sistema desenvolvido de medição de corrente CC, faixa de 0.55 A a 0.95 A, com auto-zero

Calibração do sistema com DAQ e auto-zero					
Medição (média)	Padrão (média)	Tendência [A]	Incerteza [A]	Erro máximo [A]	Erro máximo [%]
0.550144	0.550139	0.000004	0.000122	0.000126	0.023
0.650167	0.650169	-0.000001	0.000139	0.000140	0.022
0.750193	0.750198	-0.000005	0.000158	0.000163	0.022
0.850223	0.850227	-0.000004	0.000176	0.000181	0.021
0.950261	0.950256	0.000006	0.000194	0.000199	0.021

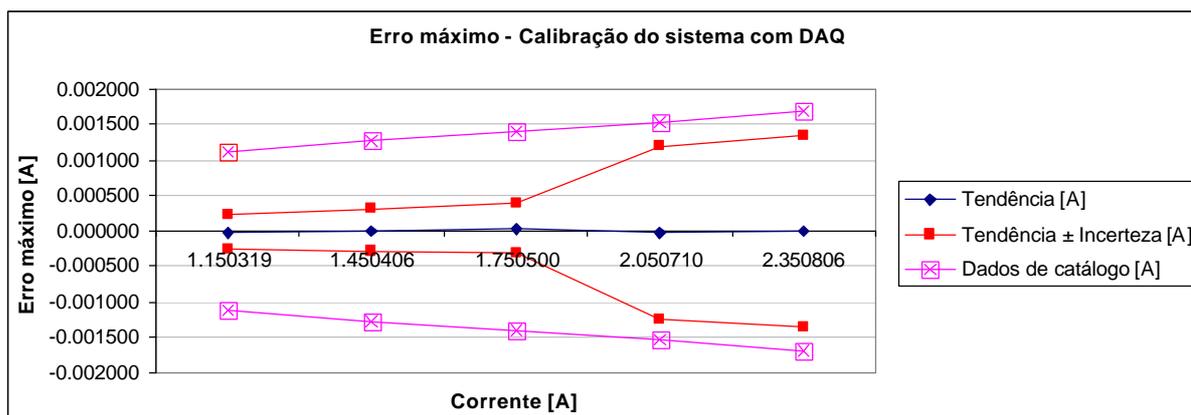


Figura C.23 – Gráfico de erro máximo do sistema desenvolvido de medição de corrente CC, faixa de 1.15 A a 2.35 A

Tabela C.23 – Calibração do sistema desenvolvido de medição de corrente CC, faixa de 1.15 A a 2.35 A

Calibração do sistema com DAQ					
Medição (média)	Padrão (média)	Tendência [A]	Incerteza [A]	Erro máximo [A]	Erro máximo [%]
1.150304	1.150319	-0.000015	0.000241	0.000256	0.022
1.450414	1.450406	0.000008	0.000294	0.000303	0.021
1.750532	1.750500	0.000032	0.000348	0.000380	0.022
2.050682	2.050710	-0.000028	0.001223	0.001251	0.061
2.350809	2.350806	0.000003	0.001343	0.001346	0.057

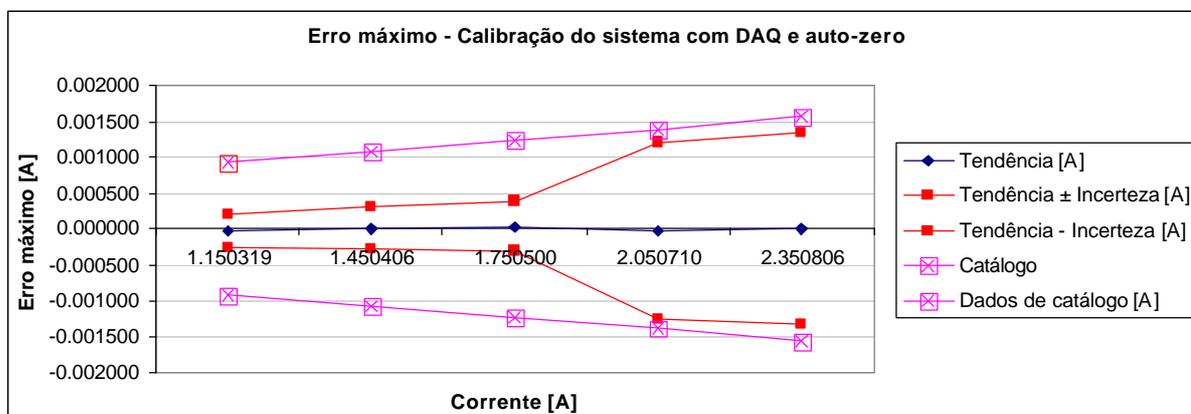


Figura C.24 – Gráfico de erro máximo do sistema desenvolvido de medição de corrente CC, faixa de 1.15 A a 2.35 A, com auto-zero

Tabela C.24 – Calibração do sistema desenvolvido de medição de corrente CC, faixa de 1.15 A a 2.35 A, com auto-zero

Calibração do sistema com DAQ e auto-zero					
Medição (média)	Padrão (média)	Tendência [A]	Incerteza [A]	Erro máximo [A]	Erro máximo [%]
1.150299	1.150319	-0.000019	0.000237	0.000257	0.022
1.450417	1.450406	0.000011	0.000291	0.000302	0.021
1.750536	1.750500	0.000036	0.000345	0.000381	0.022
2.050682	2.050710	-0.000028	0.001222	0.001250	0.061
2.350806	2.350806	0.000000	0.001343	0.001343	0.057

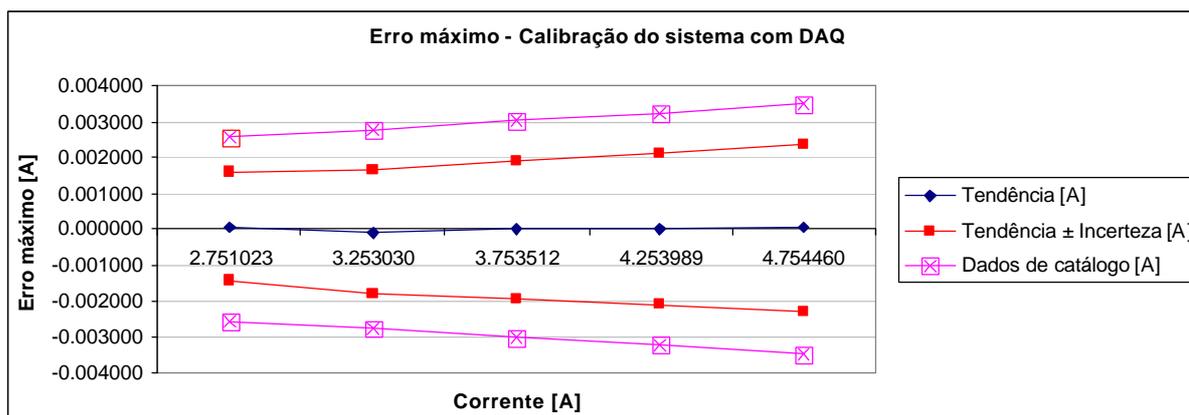


Figura C.25 – Gráfico de erro máximo do sistema desenvolvido de medição de corrente CC, faixa de 2.75 A a 4.75 A

Tabela C.25 – Calibração do sistema desenvolvido de medição de corrente CC, faixa de 2.75 A a 4.75 A

Calibração do sistema com DAQ					
Medição (média)	Padrão (média)	Tendência [A]	Incerteza [A]	Erro máximo [A]	Erro máximo [%]
2.751098	2.751023	0.000075	0.001507	0.001582	0.058
3.252938	3.253030	-0.000092	0.001716	0.001808	0.056
3.753499	3.753512	-0.000014	0.001919	0.001933	0.051
4.253992	4.253989	0.000003	0.002118	0.002121	0.050
4.754487	4.754460	0.000028	0.002317	0.002344	0.049

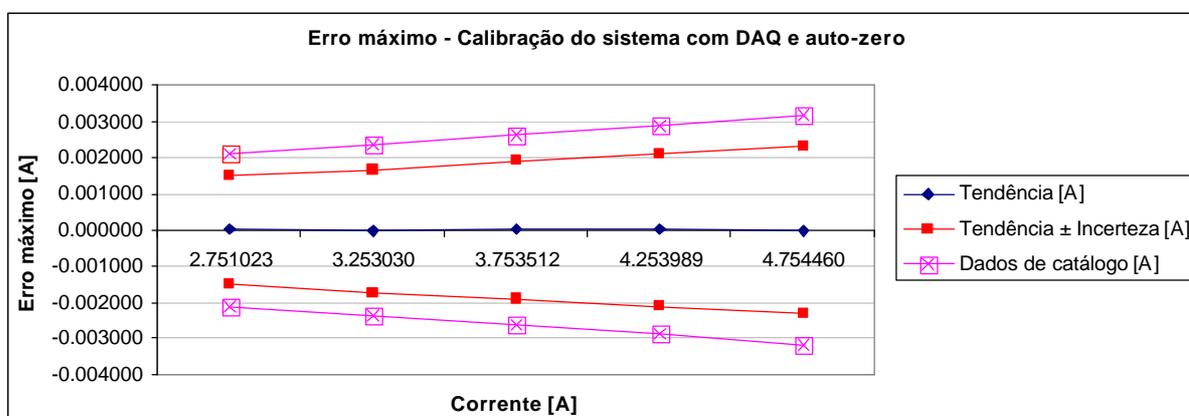


Figura C.26 – Gráfico de erro máximo do sistema desenvolvido de medição de corrente CC, faixa de 2.75 A a 4.75 A, com auto-zero

Tabela C.26 – Calibração do sistema desenvolvido de medição de corrente CC, faixa de 2.75 A a 4.75 A, com auto-zero

Calibração do sistema com DAQ e auto-zero					
Medição (média)	Padrão (média)	Tendência [A]	Incerteza [A]	Erro máximo [A]	Erro máximo [%]
2.751044	2.751023	0.000021	0.001507	0.001527	0.056
3.252989	3.253030	-0.000042	0.001706	0.001748	0.054
3.753532	3.753512	0.000020	0.001911	0.001931	0.051
4.253991	4.253989	0.000002	0.002109	0.002111	0.050
4.754459	4.754460	-0.000001	0.002309	0.002310	0.049

C.2 Calibração do transdutor da fonte Agilent-6812B

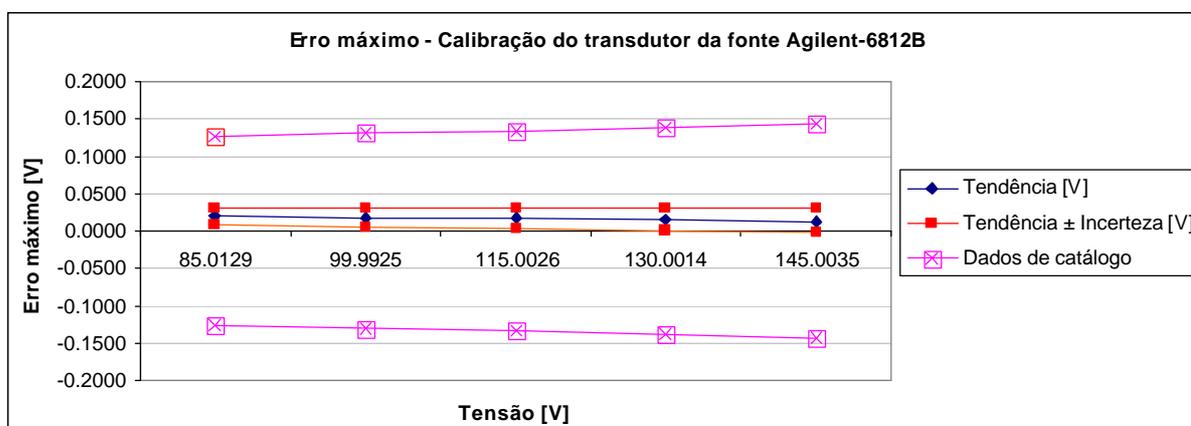


Figura C.27 – Gráfico de erro máximo na medição de tensão CA do transdutor da fonte Agilent-6812B, faixa de 85 a 145 V

Tabela C.27 – Calibração da medição de tensão CA do transdutor da fonte Agilent-6812B, faixa de 85 a 145 V

Calibração do transdutor da fonte Agilent-6812B					
Medição (média)	Padrão (média)	Tendência [V]	Incerteza [V]	Erro máximo [V]	Erro máximo [%]
85.0322	85.0129	0.0193	0.0114	0.0306	0.036
100.0107	99.9925	0.0183	0.0125	0.0308	0.031
115.0195	115.0026	0.0169	0.0138	0.0307	0.027
130.0166	130.0014	0.0152	0.0150	0.0302	0.023
145.0164	145.0035	0.0130	0.0162	0.0292	0.020

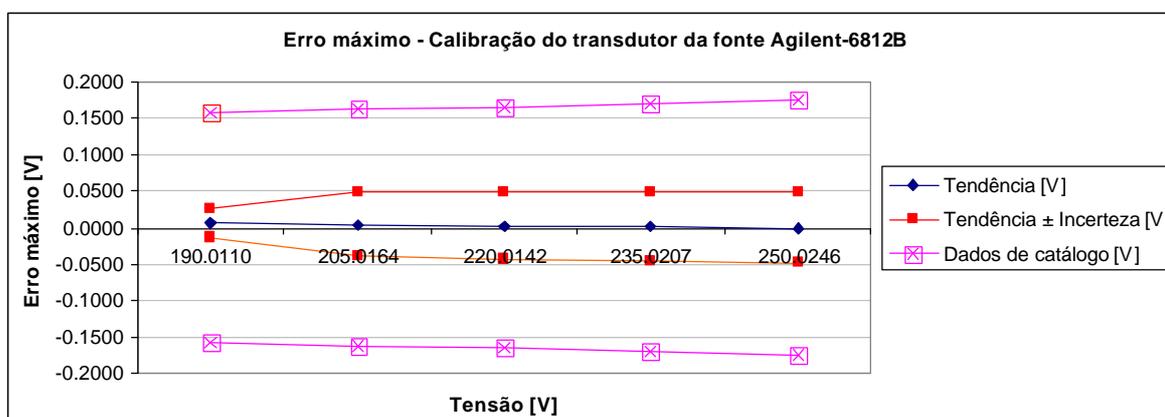


Figura C.28 – Gráfico de erro máximo na medição de tensão CA do transdutor da fonte Agilent-6812B, faixa de 190 a 250 V

Tabela C.28 – Calibração da medição de tensão CA do transdutor da fonte Agilent-6812B, faixa de 190 a 250 V

Calibração do transdutor da fonte Agilent-6812B					
Medição (média)	Padrão (média)	Tendência [V]	Incerteza [V]	Erro máximo [V]	Erro máximo [%]
190.0166	190.0110	0.0057	0.0202	0.0259	0.014
205.0211	205.0164	0.0046	0.0440	0.0486	0.024
220.0166	220.0142	0.0024	0.0457	0.0481	0.022
235.0215	235.0207	0.0008	0.0475	0.0483	0.021
250.0241	250.0246	-0.0004	0.0492	0.0496	0.020

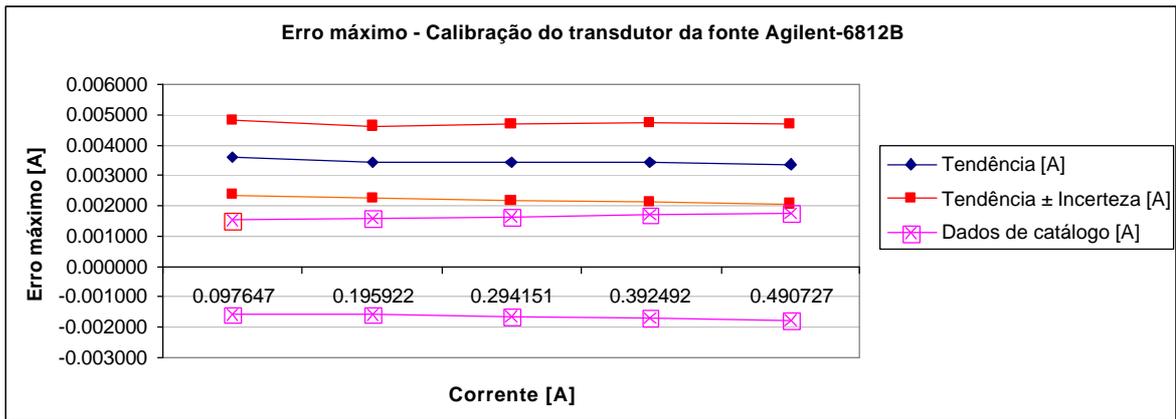


Figura C.29 – Gráfico de erro máximo na medição de corrente CA do transdutor da fonte Agilent-6812B, faixa de 0.1 a 0.5 A

Tabela C.29 – Calibração da medição de corrente CA do transdutor da fonte Agilent-6812B, faixa de 0.1 a 0.5 A

Calibração do transdutor da fonte Agilent-6812B					
Medição (média)	Padrão (média)	Tendência [A]	Incerteza [A]	Erro máximo [A]	Erro máximo [%]
0.101239	0.097647	0.003592	0.001208	0.004800	4.916
0.199365	0.195922	0.003443	0.001177	0.004620	2.358
0.297596	0.294151	0.003445	0.001264	0.004710	1.601
0.395920	0.392492	0.003429	0.001292	0.004721	1.203
0.494095	0.490727	0.003368	0.001325	0.004693	0.956

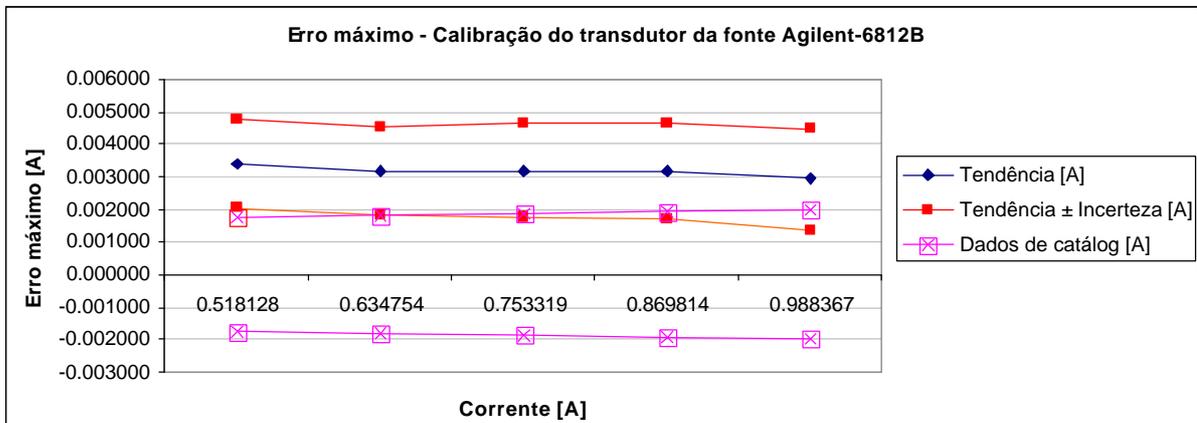


Figura C.30 – Gráfico de erro máximo na medição de corrente CA do transdutor da fonte Agilent-6812B, faixa de 0.5 a 1 A

Tabela C.30 – Calibração da medição de corrente CA do transdutor da fonte Agilent-6812B, faixa de 0.5 a 1.0 A

Calibração do transdutor da fonte Agilent-6812B					
Medição (média)	Padrão (média)	Tendência [A]	Incerteza [A]	Erro máximo [A]	Erro máximo [%]
0.521501	0.518128	0.003373	0.001356	0.004728	0.913
0.637934	0.634754	0.003179	0.001368	0.004547	0.716
0.756494	0.753319	0.003175	0.001445	0.004620	0.613
0.872976	0.869814	0.003162	0.001489	0.004651	0.535
0.991285	0.988367	0.002918	0.001563	0.004481	0.453

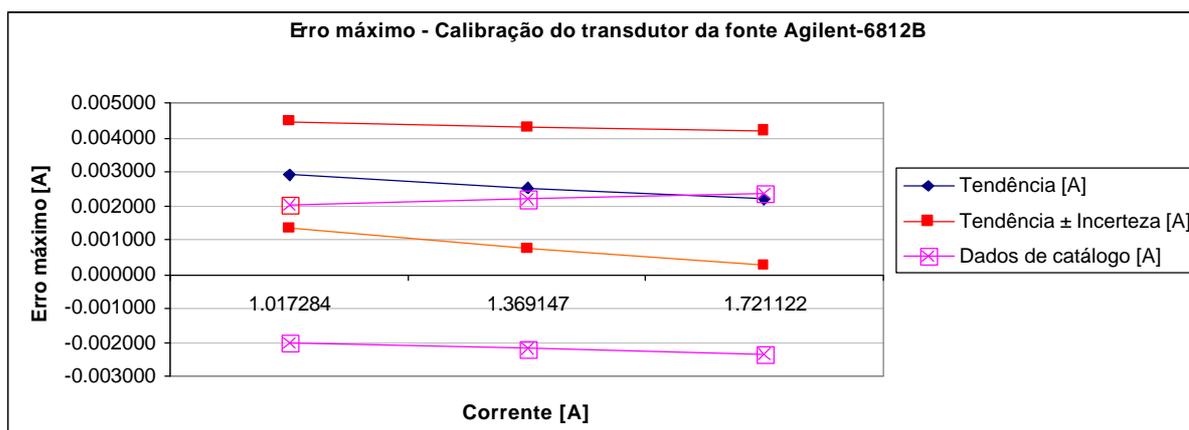


Figura C.31 – Gráfico de erro máximo na medição de corrente CA do transdutor da fonte Agilent-6812B, faixa de 1.0 a 2.5 A

Tabela C.31 – Calibração da medição de corrente CA do transdutor da fonte Agilent-6812B, faixa de 1.0 a 2.5 A

Calibração do transdutor da fonte Agilent-6812B					
Medição (média)	Padrão (média)	Tendência [A]	Incerteza [A]	Erro máximo [A]	Erro máximo [%]
1.020181	1.017284	0.002897	0.001563	0.004459	0.438
1.371662	1.369147	0.002514	0.001773	0.004287	0.313
1.723336	1.721122	0.002213	0.001987	0.004200	0.244

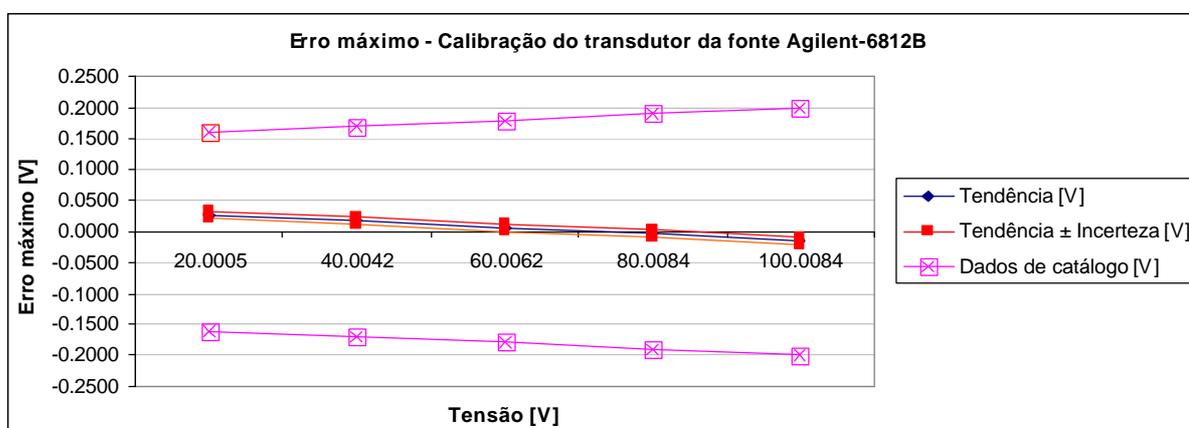


Figura C.32 – Gráfico de erro máximo na medição de tensão CC do transdutor da fonte Agilent-6812B, faixa de 20 a 100 V

Tabela C.32 – Calibração do transdutor da fonte Agilent-6812B em medições de tensão CC, faixa de 20 a 100 V

Calibração do transdutor da fonte Agilent-6812B					
Medição (média)	Padrão (média)	Tendência [V]	Incerteza [V]	Erro máximo [V]	Erro máximo [%]
20.0267	20.0005	0.0262	0.0058	0.0320	0.160
40.0231	40.0042	0.0189	0.0059	0.0248	0.062
60.0132	60.0062	0.0070	0.0059	0.0129	0.021
80.0048	80.0084	-0.0035	0.0058	0.0094	0.012
99.9938	100.0084	-0.0146	0.0058	0.0204	0.020

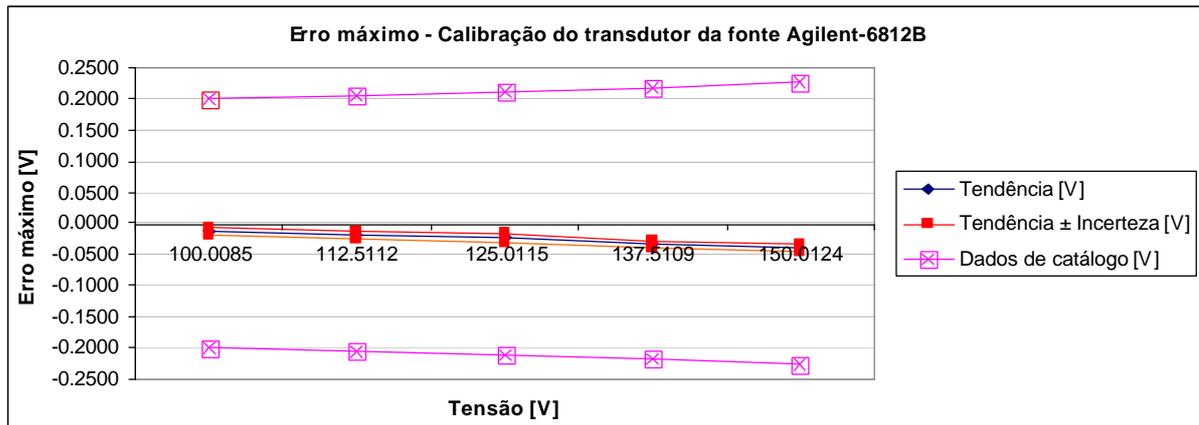


Figura C.33 – Gráfico de erro máximo na medição de tensão CC do transdutor da fonte Agilent-6812B, faixa de 100 a 150 V

Tabela C.33 – Calibração da medição de tensão CC do transdutor da fonte Agilent-6812B, faixa de 100 a 150 V

Calibração do transdutor da fonte Agilent-6812B					
Medição (média)	Padrão (média)	Tendência [V]	Incerteza [V]	Erro máximo [V]	Erro máximo [%]
99.9941	100.0085	-0.0144	0.0060	0.0204	0.020
112.4923	112.5112	-0.0190	0.0060	0.0249	0.022
124.9879	125.0115	-0.0236	0.0060	0.0296	0.024
137.4761	137.5109	-0.0349	0.0060	0.0409	0.030
149.9731	150.0124	-0.0394	0.0060	0.0454	0.030

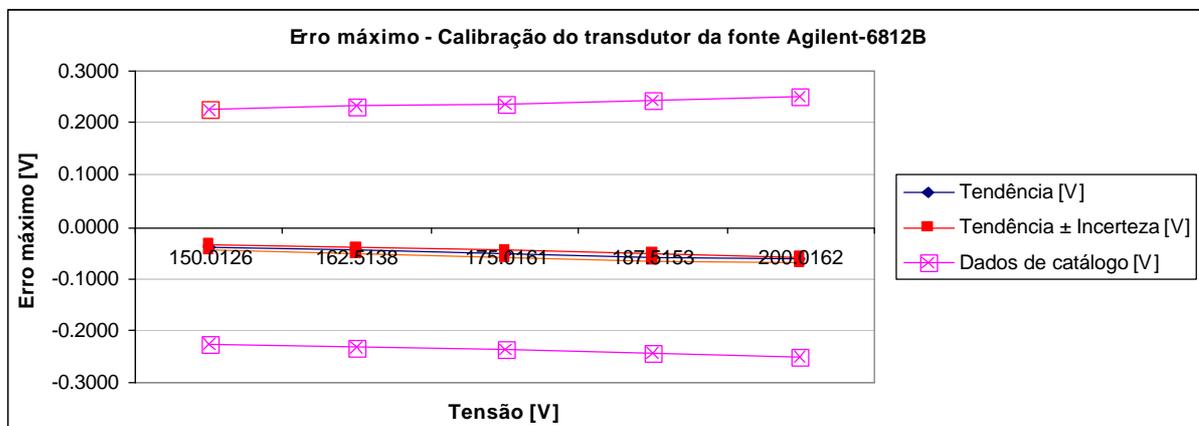


Figura C.34 – Gráfico de erro máximo na medição de tensão CC do transdutor da fonte Agilent-6812B, faixa de 150 a 200 V

Tabela C.34 – Calibração da medição de tensão CC do transdutor da fonte Agilent-6812B, faixa de 150 a 200 V

Calibração do transdutor da fonte Agilent-6812B					
Medição (média)	Padrão (média)	Tendência [V]	Incerteza [V]	Erro máximo [V]	Erro máximo [%]
149.9731	150.0126	-0.0395	0.0062	0.0457	0.030
162.4677	162.5138	-0.0461	0.0061	0.0522	0.032
174.9644	175.0161	-0.0517	0.0062	0.0579	0.033
187.4562	187.5153	-0.0591	0.0061	0.0652	0.035
199.9533	200.0162	-0.0629	0.0061	0.0690	0.034

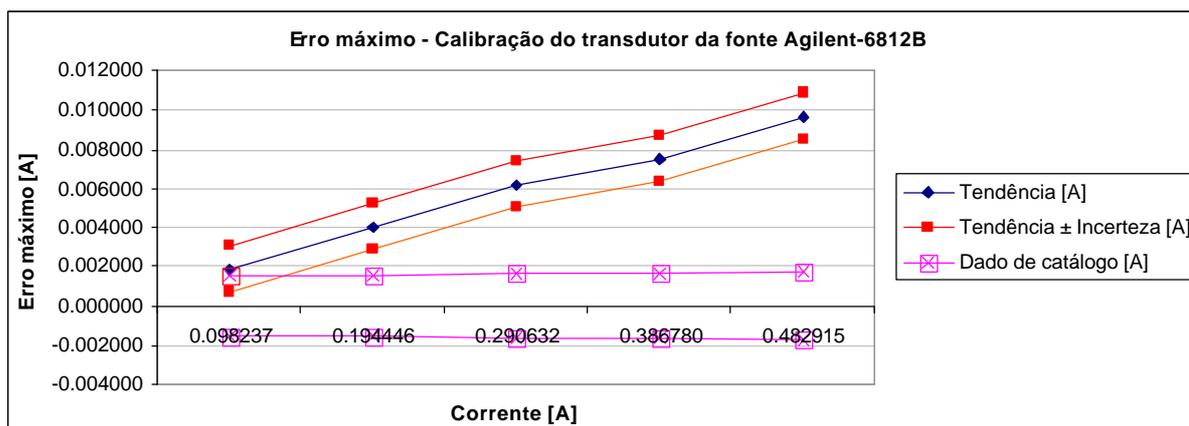


Figura C.35 – Gráfico de erro máximo na medição de corrente CC do transdutor da fonte Agilent-6812B, faixa de 0.1 a 0.5 A

Tabela C.35 – Calibração da medição de corrente CC do transdutor da fonte Agilent-6812B, faixa de 0.1 a 0.5 A

Calibração do transdutor da fonte Agilent-6812B					
Medição (média)	Padrão (média)	Tendência [A]	Incerteza [A]	Erro máximo [A]	Erro máximo [%]
0.100116	0.098237	0.001879	0.001161	0.003040	3.094
0.198490	0.194446	0.004044	0.001165	0.005209	2.679
0.296820	0.290632	0.006188	0.001162	0.007350	2.529
0.394286	0.386780	0.007507	0.001169	0.008676	2.243
0.492576	0.482915	0.009660	0.001166	0.010826	2.242

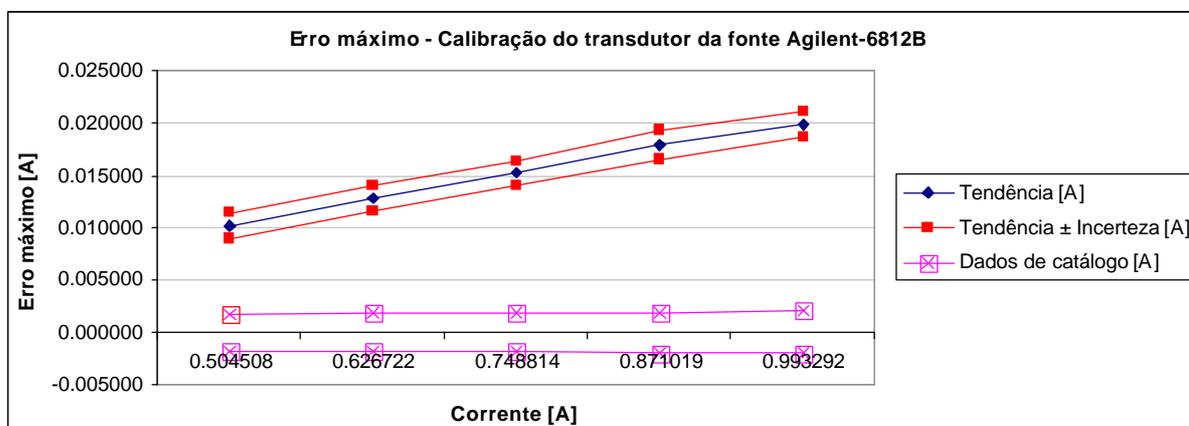


Figura C.36 – Gráfico de erro máximo na medição de corrente CC do transdutor da fonte Agilent-6812B, faixa de 0.5 a 1.0 A

Tabela C.36 – Calibração da medição de corrente CC do transdutor da fonte Agilent-6812B, faixa de 0.5 a 1.0 A

Calibração do transdutor da fonte Agilent-6812B					
Medição (média)	Padrão (média)	Tendência [A]	Incerteza [A]	Erro máximo [A]	Erro máximo [%]
0.514683	0.504508	0.010175	0.001164	0.011339	2.248
0.639540	0.626722	0.012818	0.001179	0.013997	2.233
0.764035	0.748814	0.015221	0.001181	0.016402	2.190
0.888975	0.871019	0.017956	0.001358	0.019315	2.217
1.013166	0.993292	0.019874	0.001184	0.021058	2.120

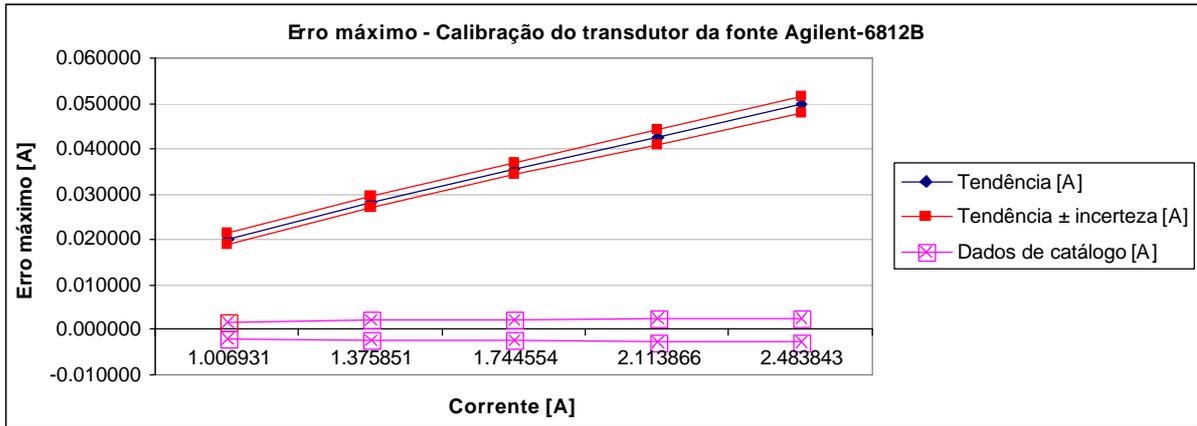


Figura C.37 – Gráfico de erro máximo na medição de corrente CC do transdutor da fonte Agilent-6812B, faixa de 1.0 a 2.5 A

Tabela C.37 – Calibração da medição de corrente CC do transdutor da fonte Agilent-6812B, faixa de 1.0 a 2.5 A

Calibração do transdutor da fonte Agilent-6812B					
Medição (média)	Padrão (média)	Tendência [A]	Incerteza [A]	Erro máximo [A]	Erro máximo [%]
1.027158	1.006931	0.020227	0.001179	0.021406	2.126
1.403960	1.375851	0.028109	0.001196	0.029305	2.130
1.779938	1.744554	0.035384	0.001215	0.036599	2.098
2.156352	2.113866	0.042485	0.001705	0.044191	2.091
2.533611	2.483843	0.049768	0.001858	0.051626	2.078

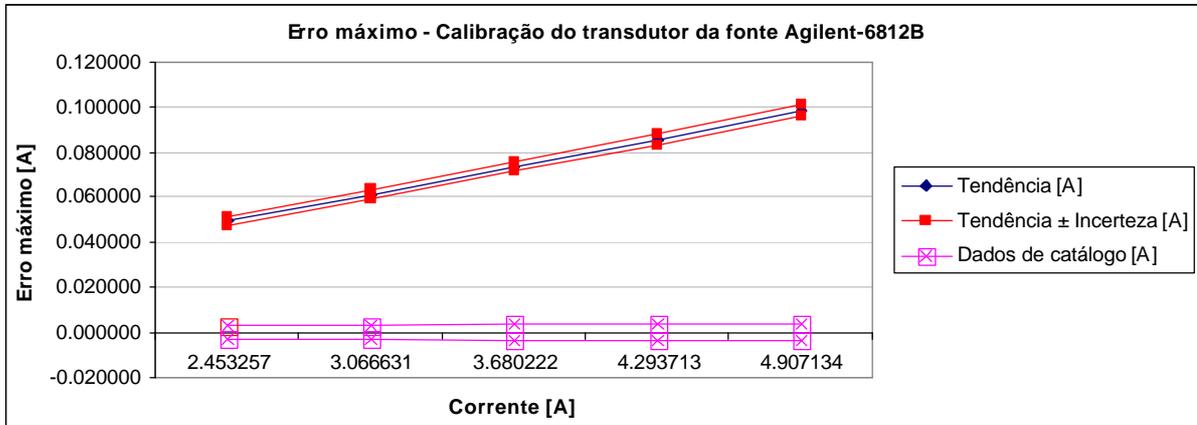


Figura C.38 – Gráfico de erro máximo na medição de corrente CC do transdutor da fonte Agilent-6812B, faixa de 2.5 a 5.0 A

Tabela C.38 – Calibração da medição de corrente CC do transdutor da fonte Agilent-6812B, faixa de 2.5 a 5.0 A

Calibração do transdutor da fonte Agilent-6812B					
Medição (média)	Padrão (média)	Tendência [A]	Incerteza [A]	Erro máximo [A]	Erro máximo [%]
2.502494	2.453257	0.049237	0.001805	0.051042	2.081
3.127713	3.066631	0.061082	0.002030	0.063112	2.058
3.753787	3.680222	0.073564	0.002203	0.075767	2.059
4.379674	4.293713	0.085960	0.002423	0.088383	2.058
5.005655	4.907134	0.098522	0.002660	0.101182	2.062

C.3 Calibração do WT130

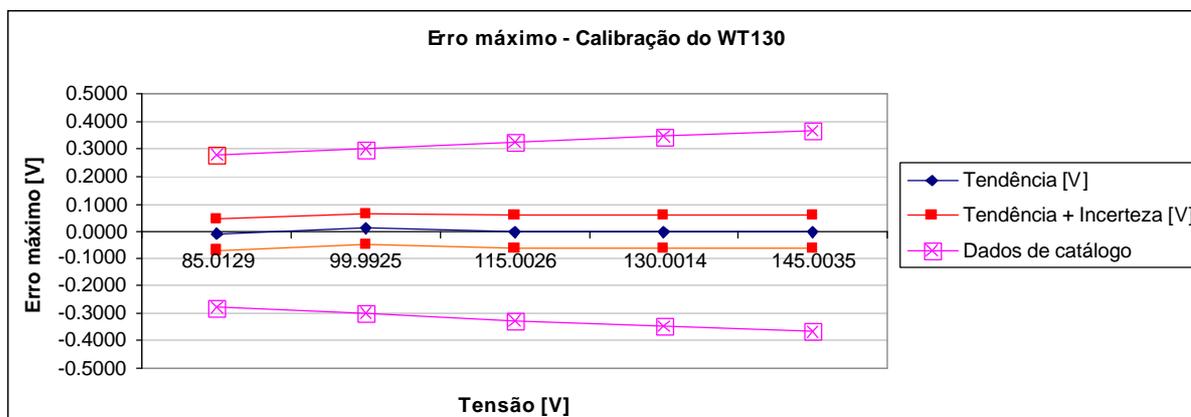


Figura C.39 – Gráfico de erro máximo na medição de tensão CA do WT130, faixa de 85 a 145 V

Tabela C.39 – Calibração da medição de tensão CA do wattímetro WT130, faixa de 85 a 145 V

Calibração do WT130					
Medição (média)	Padrão (média)	Tendência [V]	Incerteza [V]	Erro máximo [V]	Erro máximo [%]
85.0000	85.0129	-0.0129	0.0585	0.0715	0.084
100.0000	99.9925	0.0075	0.0588	0.0663	0.066
115.0000	115.0026	-0.0026	0.0590	0.0617	0.054
130.0000	130.0014	-0.0014	0.0593	0.0608	0.047
145.0000	145.0035	-0.0035	0.0597	0.0632	0.044

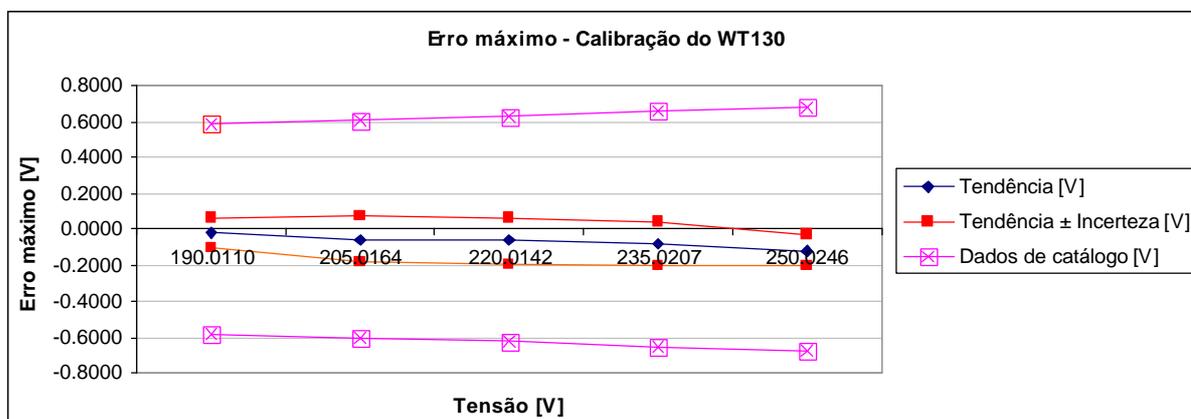


Figura C.40 – Gráfico de erro máximo na medição de tensão CA do WT130, faixa de 190 a 250 V

Tabela C.40 – Calibração da medição de tensão CA do wattímetro WT130, faixa de 190 a 250 V

Calibração do WT130					
Medição (média)	Padrão (média)	Tendência [V]	Incerteza [V]	Erro máximo [V]	Erro máximo [%]
189.9900	190.0110	-0.0209	0.0865	0.1075	0.057
204.9600	205.0164	-0.0565	0.1238	0.1803	0.088
219.9500	220.0142	-0.0642	0.1261	0.1904	0.087
234.9400	235.0207	-0.0807	0.1251	0.2058	0.088
249.9050	250.0246	-0.1196	0.0878	0.2074	0.083

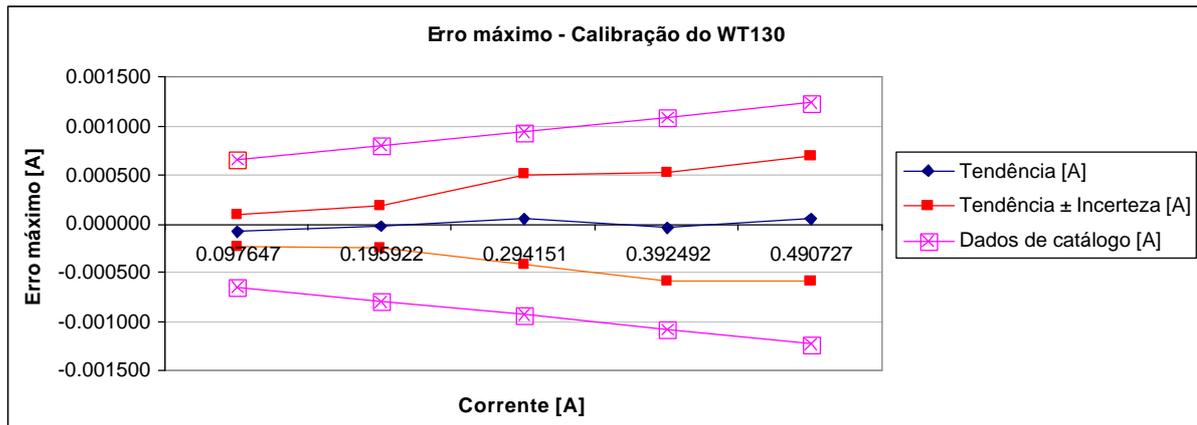


Figura C.41 – Gráfico de erro máximo na medição de corrente CA do WT130, faixa de 0.1 a 0.5 A

Tabela C.41 – Calibração da medição de corrente CA do wattímetro WT130, faixa de 0.1 a 0.5 A

Calibração do WT130					
Medição (média)	Padrão (média)	Tendência [A]	Incerteza [A]	Erro máximo [A]	Erro máximo [%]
0.097571	0.097647	-0.000076	0.000155	0.000231	0.236
0.195886	0.195922	-0.000036	0.000221	0.000256	0.131
0.294193	0.294151	0.000042	0.000459	0.000502	0.171
0.392450	0.392492	-0.000042	0.000560	0.000602	0.153
0.490779	0.490727	0.000052	0.000640	0.000691	0.141

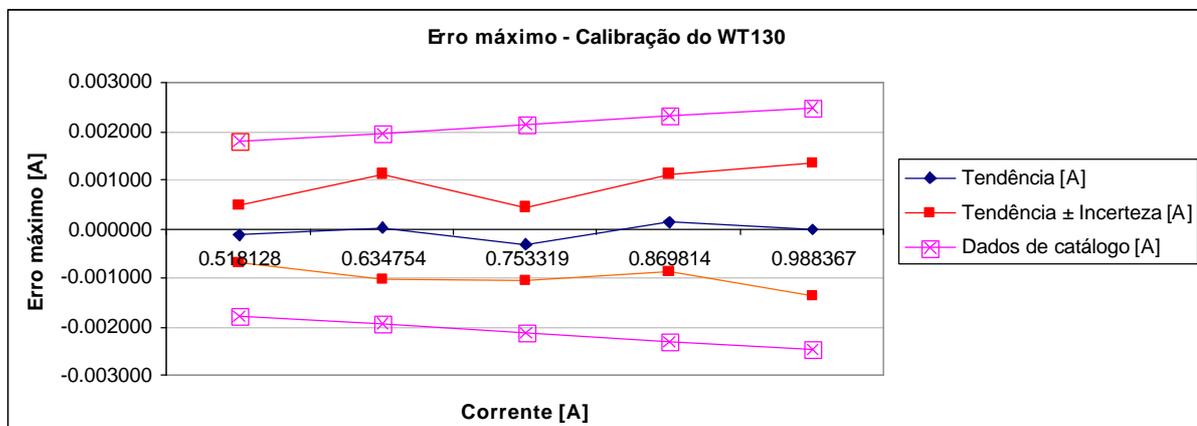


Figura C.42 – Gráfico de erro máximo na medição de corrente CA do WT130, faixa de 0.5 a 1.0 A

Tabela C.42 – Calibração da medição de corrente CA do wattímetro WT130, faixa de 0.5 a 1.0 A

Calibração do WT130					
Medição (média)	Padrão (média)	Tendência [A]	Incerteza [A]	Erro máximo [A]	Erro máximo [%]
0.518000	0.518128	-0.000128	0.000581	0.000709	0.137
0.634786	0.634754	0.000031	0.001081	0.001112	0.175
0.753000	0.753319	-0.000319	0.000751	0.001069	0.142
0.869929	0.869814	0.000114	0.000991	0.001105	0.127
0.988357	0.988367	-0.000010	0.001355	0.001364	0.138

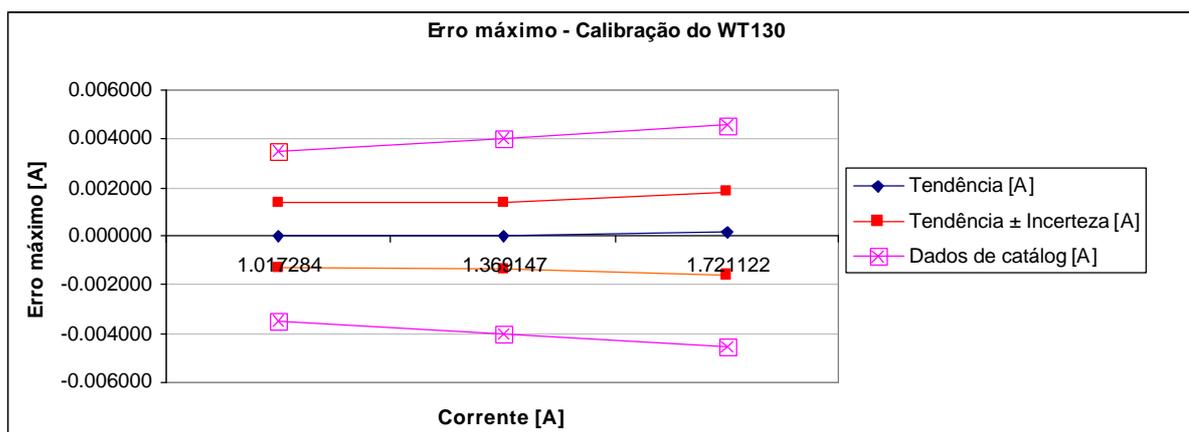


Figura C.43 – Gráfico de erro máximo na medição de corrente CA do WT130, faixa de 1.0 a 1.75 A

Tabela C.43 – Calibração de medição de corrente CA do wattímetro WT130, faixa de 1.0 a 1.75 A

Calibração do WT130					
Medição (média)	Padrão (média)	Tendência [A]	Incerteza [A]	Erro máximo [A]	Erro máximo [%]
1.017300	1.017284	0.000016	0.001330	0.001346	0.132
1.369150	1.369147	0.000003	0.001402	0.001405	0.103
1.721250	1.721122	0.000128	0.001701	0.001828	0.106

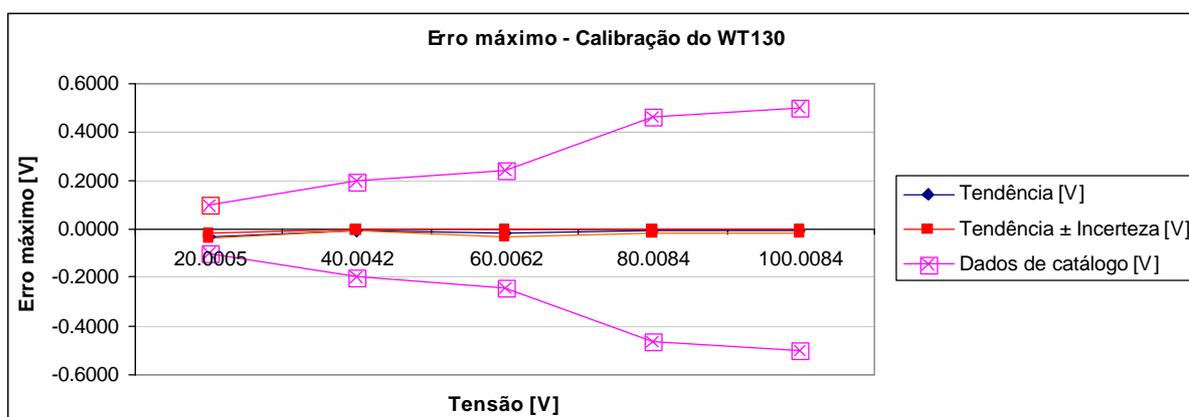


Figura C.44 – Gráfico de erro máximo na medição de tensão CC do WT130, faixa de 20 a 100 V

Tabela C.44 – Calibração de medição de tensão CC do wattímetro WT130, faixa de 20 a 100 V

Calibração do WT130					
Medição (média)	Padrão (média)	Tendência [V]	Incerteza [V]	Erro máximo [V]	Erro máximo [%]
19.9711	20.0005	-0.0294	0.0111	0.0405	0.202
40.0000	40.0042	-0.0042	0.0058	0.0099	0.025
59.9933	60.0062	-0.0129	0.0164	0.0293	0.049
80.0000	80.0084	-0.0084	0.0058	0.0141	0.018
100.0000	100.0084	-0.0084	0.0058	0.0142	0.014

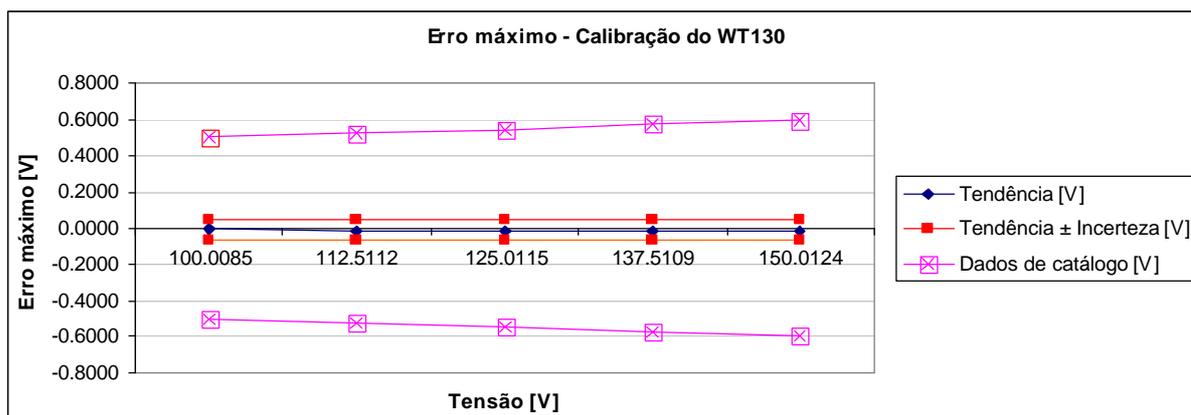


Figura C.45 – Gráfico de erro máximo na medição de tensão CC do WT130, faixa de 100 a 150 V

Tabela C.45 – Calibração de medição de tensão CC do wattímetro WT130, faixa de 100 a 150 V

Calibração do WT130					
Medição (média)	Padrão (média)	Tendência [V]	Incerteza [V]	Erro máximo [V]	Erro máximo [%]
100.0000	100.0085	-0.0085	0.0577	0.0662	0.066
112.5000	112.5112	-0.0112	0.0577	0.0690	0.061
125.0000	125.0115	-0.0115	0.0577	0.0693	0.055
137.5000	137.5109	-0.0109	0.0577	0.0687	0.050
150.0000	150.0124	-0.0124	0.0577	0.0702	0.047

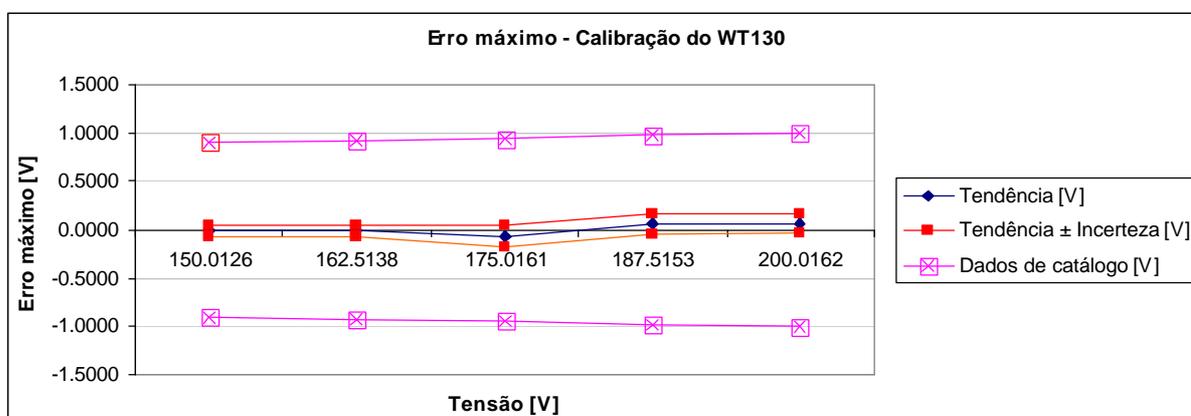


Figura C.46 – Gráfico de erro máximo na medição de tensão CC do WT130, faixa de 150 a 200 V

Tabela C.46 – Calibração de medição de tensão CC do wattímetro WT130, faixa de 150 a 200 V

Calibração do WT130					
Medição (média)	Padrão (média)	Tendência [V]	Incerteza [V]	Erro máximo [V]	Erro máximo [%]
150.0000	150.0126	-0.0126	0.0577	0.0703	0.047
162.5000	162.5138	-0.0138	0.0577	0.0716	0.044
174.9444	175.0161	-0.0717	0.1174	0.1891	0.108
187.5778	187.5153	0.0625	0.1032	0.1657	0.088
200.0833	200.0162	0.0672	0.0960	0.1632	0.082

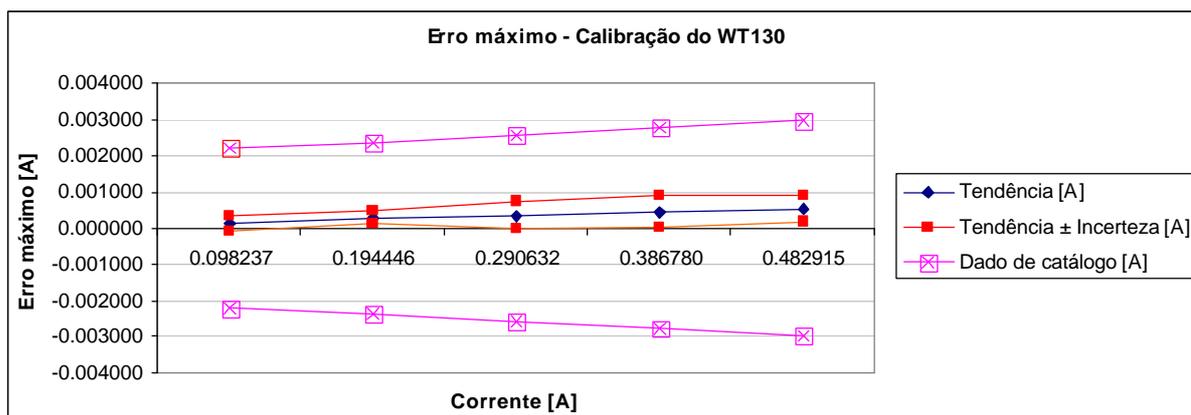


Figura C.47 – Gráfico de erro máximo na medição de corrente CC do WT130, faixa de 0.1 a 0.5 A

Tabela C.47 – Calibração de medição de corrente CC do wattímetro WT130, faixa de 0.1 a 0.5 A

Calibração do WT130					
Medição (média)	Padrão (média)	Tendência [A]	Incerteza [A]	Erro máximo [A]	Erro máximo [%]
0.098378	0.098237	0.000141	0.000197	0.000338	0.344
0.194750	0.194446	0.000304	0.000194	0.000498	0.256
0.290983	0.290632	0.000352	0.000363	0.000715	0.246
0.387233	0.386780	0.000454	0.000436	0.000890	0.230
0.483445	0.482915	0.000529	0.000371	0.000901	0.186

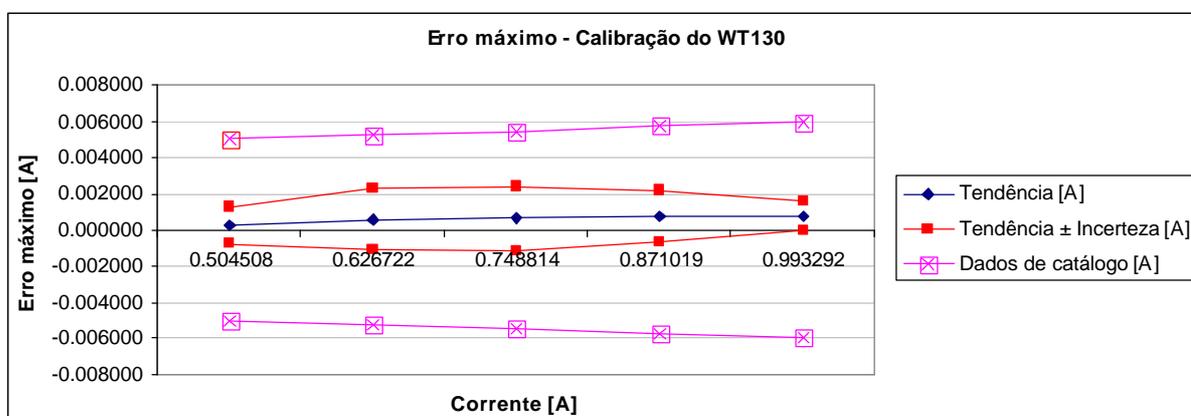


Figura C.48 – Gráfico de erro máximo na medição de corrente CC do WT130, faixa de 0.5 a 1.0 A

Tabela C.48 – Calibração de medição de corrente CC do wattímetro WT130, faixa de 0.5 a 1.0 A

Calibração do WT130					
Medição (média)	Padrão (média)	Tendência [A]	Incerteza [A]	Erro máximo [A]	Erro máximo [%]
0.504778	0.504508	0.000270	0.001038	0.001307	0.259
0.627333	0.626722	0.000611	0.001644	0.002256	0.360
0.749444	0.748814	0.000630	0.001813	0.002443	0.326
0.871778	0.871019	0.000758	0.001428	0.002186	0.251
0.994056	0.993292	0.000764	0.000772	0.001535	0.155

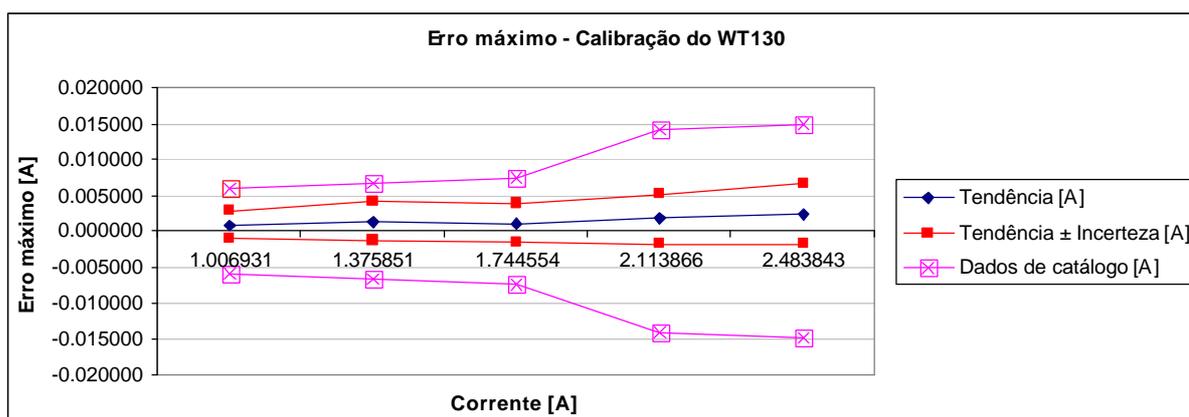


Figura C.49 – Gráfico de erro máximo na medição de corrente CC do WT130, faixa de 1.0 a 2.5 A

Tabela C.49 – Calibração de medição de corrente CC do wattímetro WT130, faixa de 1.0 a 2.5 A

Calibração do WT130					
Medição (média)	Padrão (média)	Tendência [A]	Incerteza [A]	Erro máximo [A]	Erro máximo [%]
1.007778	1.006931	0.000847	0.001860	0.002707	0.269
1.377222	1.375851	0.001371	0.002780	0.004151	0.302
1.745667	1.744554	0.001112	0.002653	0.003765	0.216
2.115611	2.113866	0.001745	0.003440	0.005185	0.245
2.486167	2.483843	0.002324	0.004234	0.006558	0.264

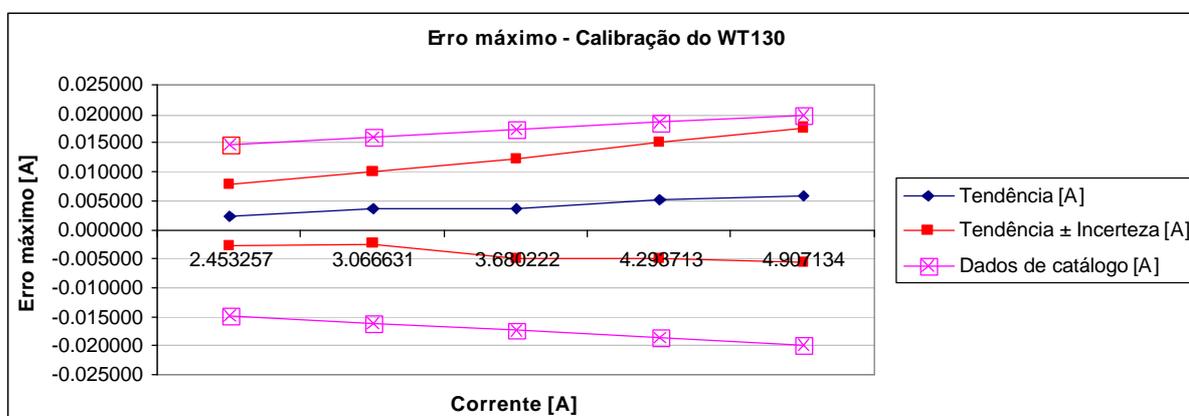


Figura C.50 – Gráfico de erro máximo na medição de corrente CC do WT130, faixa de 2.5 a 5.0 A

Tabela C.50 – Calibração de medição de corrente CC do wattímetro WT130, faixa de 2.5 a 5.0 A

Calibração do WT130					
Medição (média)	Padrão (média)	Tendência [A]	Incerteza [A]	Erro máximo [A]	Erro máximo [%]
2.455778	2.453257	0.002521	0.005148	0.007669	0.313
3.070333	3.066631	0.003703	0.006225	0.009927	0.324
3.684000	3.680222	0.003778	0.008572	0.012350	0.336
4.298833	4.293713	0.005121	0.009929	0.015049	0.350
4.913167	4.907134	0.006033	0.011577	0.017611	0.359

C.4 Calibração do wattímetro 2480E

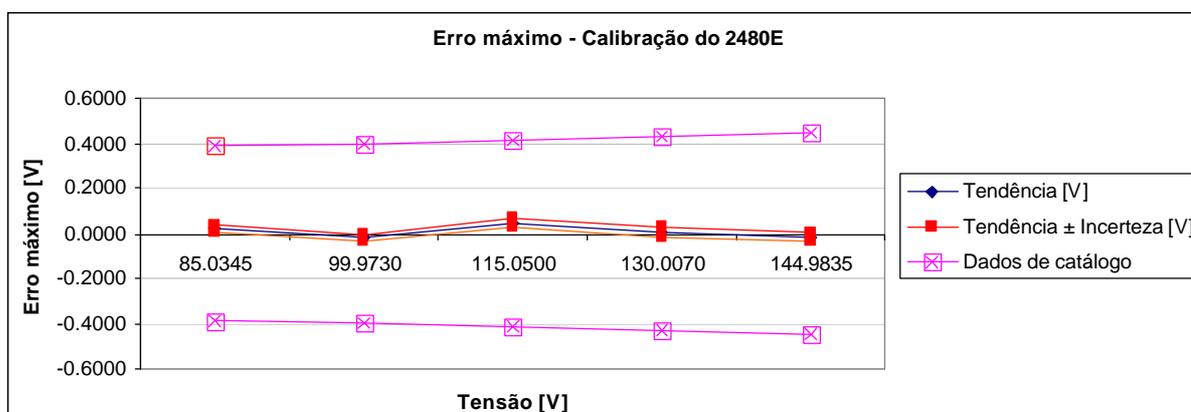


Figura C.51 – Gráfico de erro máximo do wattímetro 2480E, faixa de 85 a 145 V

Tabela C.51 – Calibração do wattímetro 2480E, faixa de 85 a 145 V

Calibração do 2480E					
Medição (média)	Padrão (média)	Tendência [V]	Incerteza [V]	Erro máximo [V]	Erro máximo [%]
85.0345	85.0132	0.0213	0.0177	0.0390	0.046
99.9730	99.9923	-0.0193	0.0192	0.0385	0.039
115.0500	115.0020	0.0480	0.0188	0.0668	0.058
130.0070	130.0005	0.0065	0.0246	0.0311	0.024
144.9835	145.0023	-0.0188	0.0220	0.0407	0.028

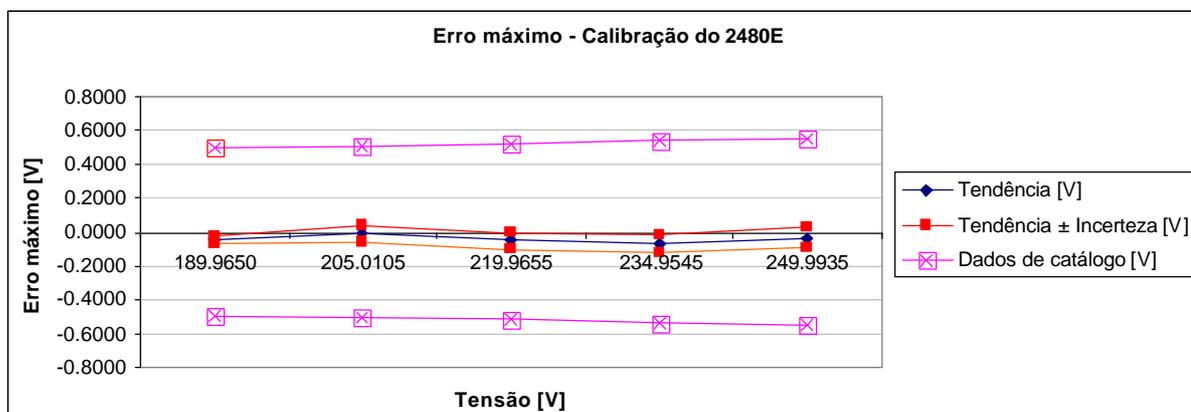


Figura C.52 – Gráfico de erro máximo do wattímetro 2480E, faixa de 190 a 250 V

Tabela C.52 – Calibração do wattímetro 2480E, faixa de 190 a 250 V

Calibração do 2480E					
Medição (média)	Padrão (média)	Tendência [V]	Incerteza [V]	Erro máximo [V]	Erro máximo [%]
189.9650	190.0136	-0.0486	0.0234	0.0720	0.038
205.0105	205.0211	-0.0106	0.0478	0.0584	0.028
219.9655	220.0184	-0.0529	0.0490	0.1019	0.046
234.9545	235.0249	-0.0704	0.0502	0.1206	0.051
249.9935	250.0289	-0.0354	0.0575	0.0928	0.037

C.5 Calibração do transdutor da fonte Agilent-6030A

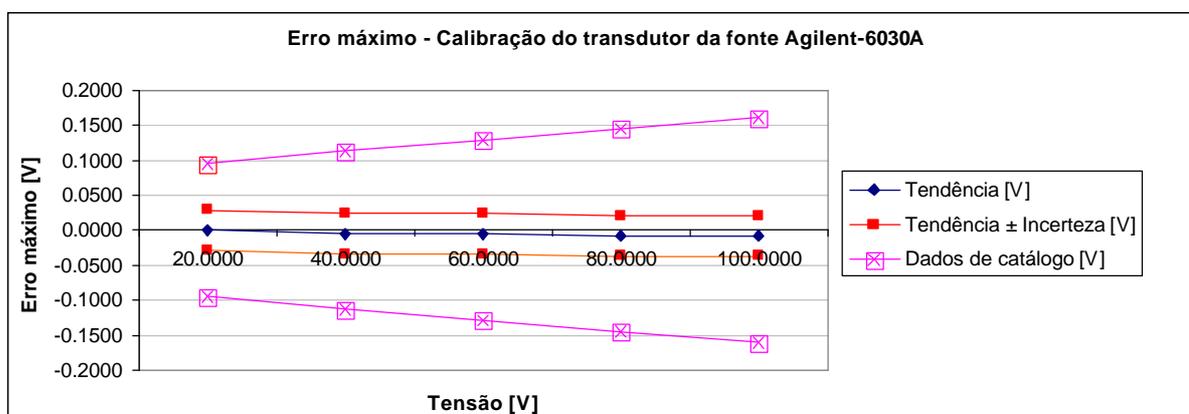


Figura C.53 – Gráfico de erro máximo na medição de tensão CC do transdutor da fonte Agilent-6030A, faixa de 20 a 100 V

Tabela C.53 – Calibração da medição de tensão CC do transdutor da fonte Agilent-6030A, faixa de 20 a 100 V

Calibração do transdutor da fonte Agilent-6030A					
Medição (média)	Padrão (média)	Tendência [V]	Incerteza [V]	Erro máximo [V]	Erro máximo [%]
20.0000	20.0005	-0.0005	0.0289	0.0294	0.147
40.0000	40.0042	-0.0042	0.0289	0.0330	0.083
60.0000	60.0062	-0.0062	0.0289	0.0351	0.058
80.0000	80.0084	-0.0084	0.0289	0.0372	0.047
100.0000	100.0084	-0.0084	0.0289	0.0373	0.037

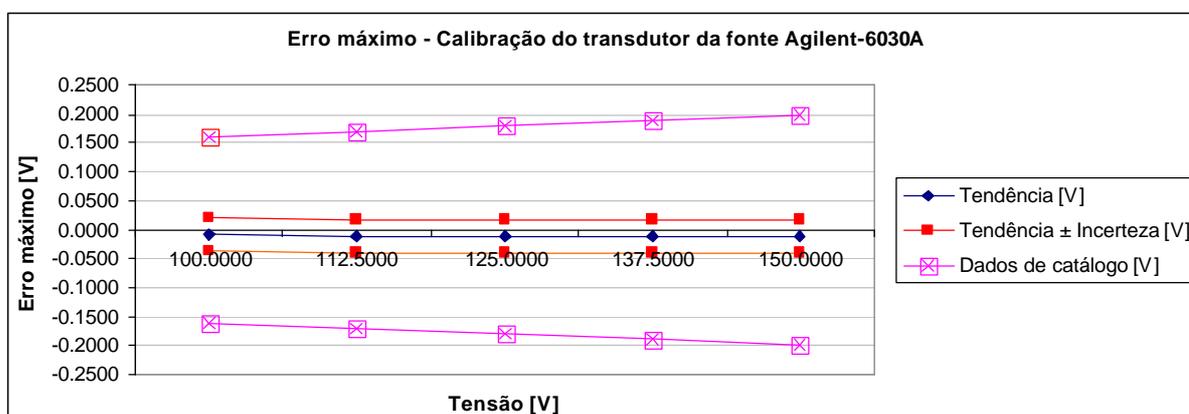


Figura C.54 – Gráfico de erro máximo na medição de tensão CC do transdutor da fonte Agilent-6030A, faixa de 100 a 150 V

Tabela C.54 – Calibração da medição de tensão CC do transdutor da fonte Agilent-6030A, faixa de 100 a 150 V

Calibração do transdutor da fonte Agilent-6030A					
Medição (média)	Padrão (média)	Tendência [V]	Incerteza [V]	Erro máximo [V]	Erro máximo [%]
100.0000	100.0085	-0.0085	0.0289	0.0374	0.037
112.5000	112.5112	-0.0112	0.0289	0.0401	0.036
125.0000	125.0115	-0.0115	0.0289	0.0404	0.032
137.5000	137.5109	-0.0109	0.0289	0.0398	0.029
150.0000	150.0124	-0.0124	0.0289	0.0413	0.028

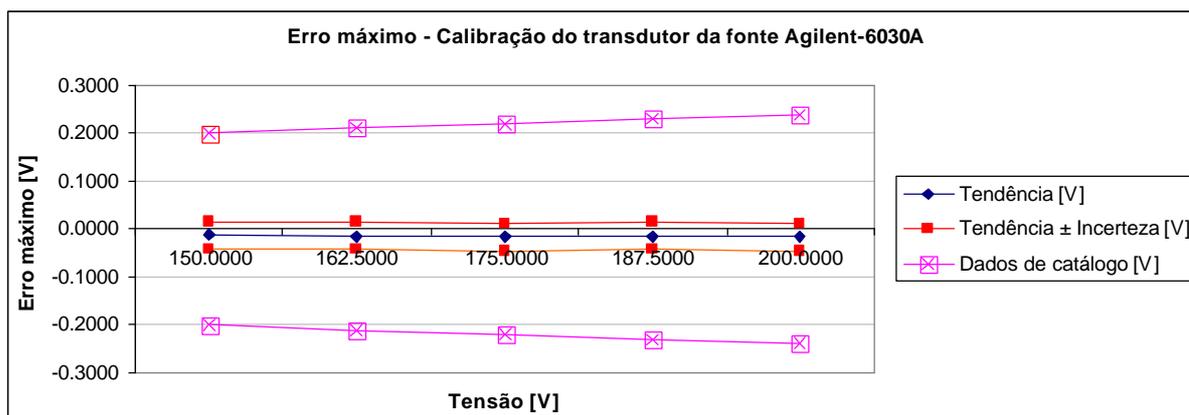


Figura C.55 – Gráfico de erro máximo na medição de tensão CC do transdutor da fonte Agilent-6030A, faixa de 150 a 200 V

Tabela C.55 – Calibração da medição de tensão CC do transdutor da fonte Agilent-6030A, faixa de 150 a 200 V

Calibração do transdutor da fonte Agilent-6030A					
Medição (média)	Padrão (média)	Tendência [V]	Incerteza [V]	Erro máximo [V]	Erro máximo [%]
150.0000	150.0126	-0.0126	0.0289	0.0414	0.028
162.5000	162.5138	-0.0138	0.0289	0.0427	0.026
175.0000	175.0161	-0.0161	0.0289	0.0450	0.026
187.5000	187.5153	-0.0153	0.0289	0.0442	0.024
200.0000	200.0162	-0.0162	0.0289	0.0451	0.023

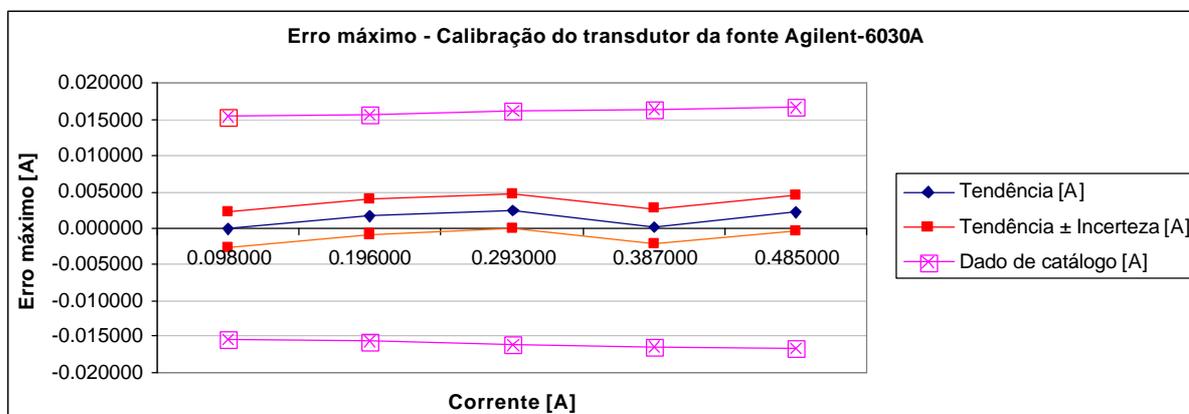


Figura C.56 – Gráfico de erro máximo na medição de corrente CC do transdutor da fonte Agilent-6030A, faixa de 0.1 a 0.5 A

Tabela C.56 – Calibração da medição de corrente CC do transdutor da fonte Agilent-6030A, faixa de 0.1 a 0.5 A

Calibração do transdutor da fonte Agilent-6030A					
Medição (média)	Padrão (média)	Tendência [A]	Incerteza [A]	Erro máximo [A]	Erro máximo [%]
0.098000	0.098237	-0.000237	0.002454	0.002691	2.739
0.196000	0.194446	0.001554	0.002454	0.004008	2.061
0.293000	0.290632	0.002368	0.002455	0.004823	1.659
0.387000	0.386780	0.000221	0.002455	0.002676	0.692
0.485000	0.482915	0.002085	0.002456	0.004541	0.940

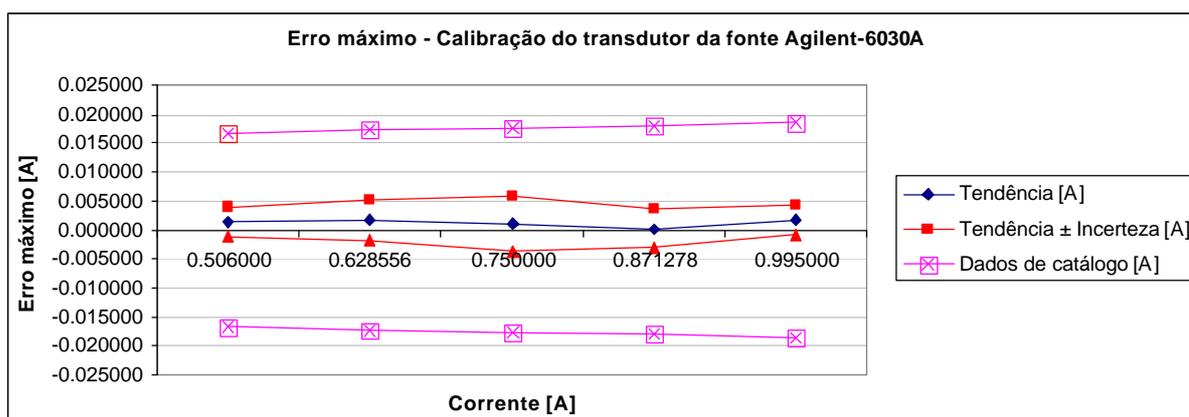


Figura C.57 – Gráfico de erro máximo na medição de corrente CC do transdutor da fonte Agilent-6030A, faixa de 0.5 a 1.0 A

Tabela C.57 – Calibração da medição de corrente CC do transdutor da fonte Agilent-6030A, faixa de 0.5 a 1.0 A

Calibração do transdutor da fonte Agilent-6030A					
Medição (média)	Padrão (média)	Tendência [A]	Incerteza [A]	Erro máximo [A]	Erro máximo [%]
0.506000	0.504508	0.001492	0.002456	0.003948	0.783
0.628556	0.626722	0.001834	0.003568	0.005402	0.862
0.750000	0.748814	0.001186	0.004794	0.005980	0.799
0.871278	0.871019	0.000258	0.003407	0.003665	0.421
0.995000	0.993292	0.001708	0.002462	0.004170	0.420

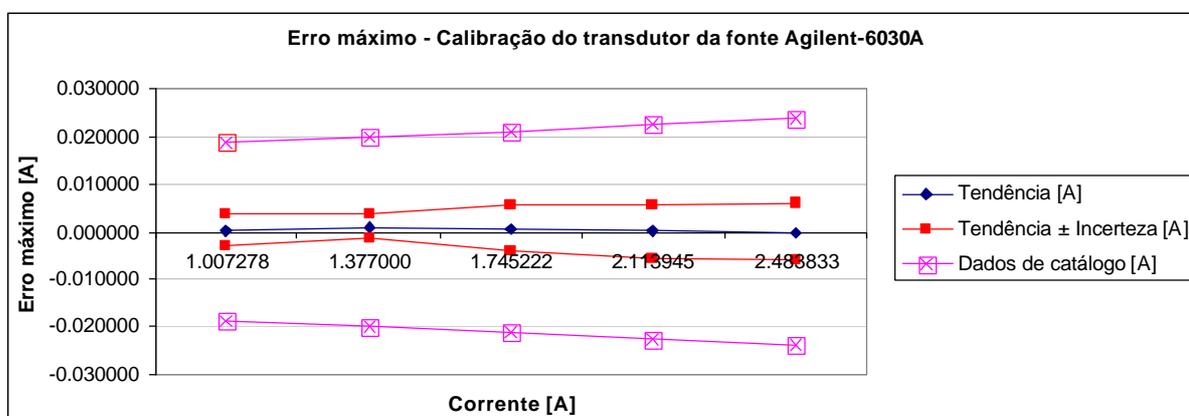


Figura C.58 – Gráfico de erro máximo na medição de corrente CC do transdutor da fonte Agilent-6030A, faixa de 1.0 a 2.5 A

Tabela C.58 – Calibração da medição de corrente CC do transdutor da fonte Agilent-6030A, faixa de 1.0 a 2.5 A

Calibração do transdutor da fonte Agilent-6030A					
Medição (média)	Padrão (média)	Tendência [A]	Incerteza [A]	Erro máximo [A]	Erro máximo [%]
1.007278	1.006931	0.000347	0.003408	0.003756	0.373
1.377000	1.375851	0.001149	0.002469	0.003618	0.263
1.745222	1.744554	0.000668	0.004782	0.005450	0.312
2.113945	2.113866	0.000078	0.005722	0.005800	0.274
2.483833	2.483843	-0.000009	0.005948	0.005957	0.240

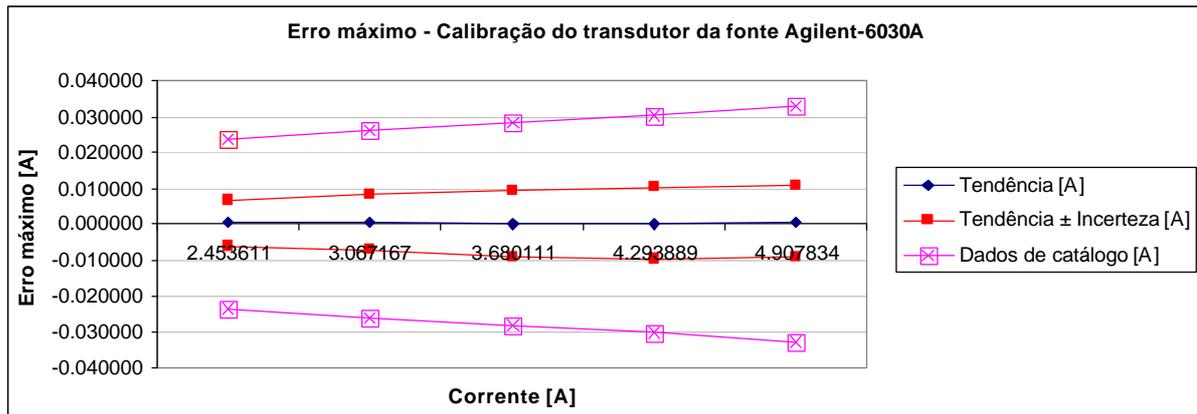


Figura C.59 – Gráfico de erro máximo na medição de corrente CC do transdutor da fonte Agilent-6030A, faixa de 2.5 a 5.0 A

Tabela C.59 – Calibração da medição de corrente CC do transdutor da fonte Agilent-6030A, faixa de 2.5 a 5.0 A

Calibração do transdutor da fonte Agilent-6030A					
Medição (média)	Padrão (média)	Tendência [A]	Incerteza [A]	Erro máximo [A]	Erro máximo [%]
2.453611	2.453257	0.000354	0.006287	0.006641	0.271
3.067167	3.066631	0.000536	0.007660	0.008196	0.267
3.680111	3.680222	-0.000111	0.009130	0.009241	0.251
4.293889	4.293713	0.000176	0.010110	0.010286	0.240
4.907834	4.907134	0.000700	0.009820	0.010520	0.214

C.6 Multímetro digital HP-34401A

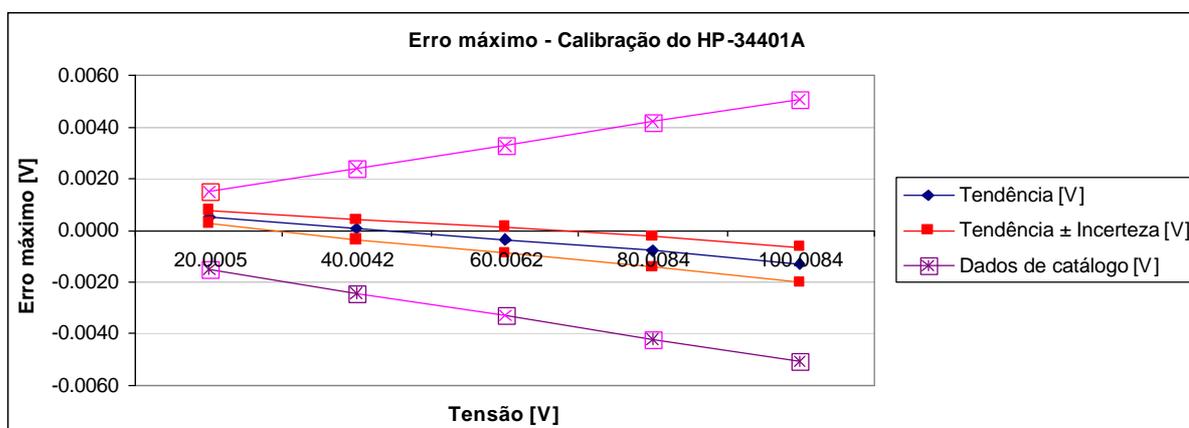


Figura C.60 – Gráfico de erro máximo na medição de tensão CC do multímetro HP-34401A, faixa de 20 a 100 V

Tabela C.60 – Calibração da medição de tensão CC do multímetro HP-34401A, faixa de 20 a 100 V

Calibração do HP-34401A					
Medição (média)	Padrão (média)	Tendência [V]	Incerteza [V]	Erro máximo [V]	Erro máximo [%]
20.0011	20.0005	0.0005	0.0002	0.0008	0.004
40.0042	40.0042	0.0000	0.0004	0.0004	0.001
60.0059	60.0062	-0.0003	0.0005	0.0008	0.001
80.0075	80.0084	-0.0008	0.0006	0.0014	0.002
100.0071	100.0084	-0.0013	0.0007	0.0020	0.002

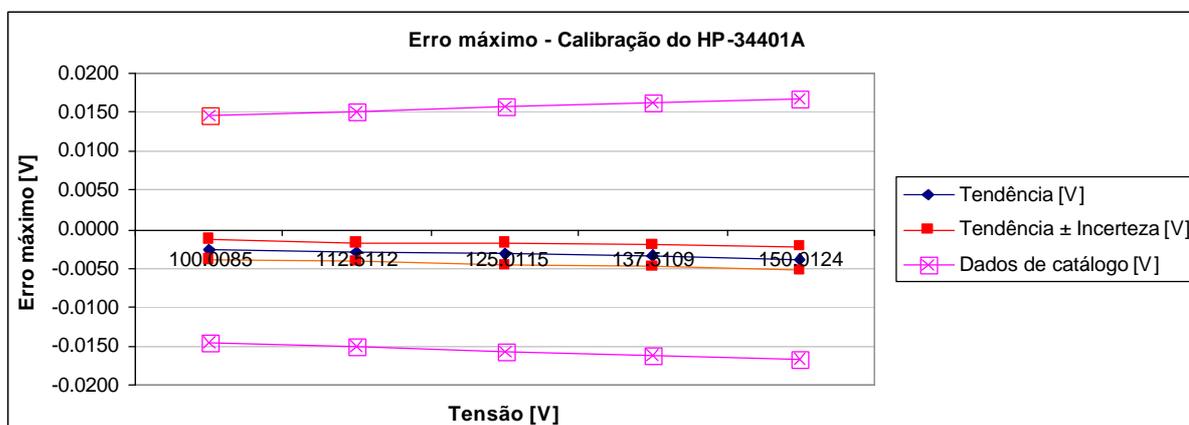


Figura C.61 – Gráfico de erro máximo na medição de tensão CC do multímetro HP-34401A, faixa de 100 a 150 V

Tabela C.61 – Calibração da medição de tensão CC do multímetro HP-34401A, faixa de 100 a 150 V

Calibração do HP-34401A					
Medição (média)	Padrão (média)	Tendência [V]	Incerteza [V]	Erro máximo [V]	Erro máximo [%]
100.0058	100.0085	-0.0027	0.0013	0.0040	0.004
112.5083	112.5112	-0.0029	0.0012	0.0042	0.004
125.0082	125.0115	-0.0033	0.0014	0.0047	0.004
137.5075	137.5109	-0.0034	0.0015	0.0049	0.004
150.0086	150.0124	-0.0038	0.0015	0.0053	0.004

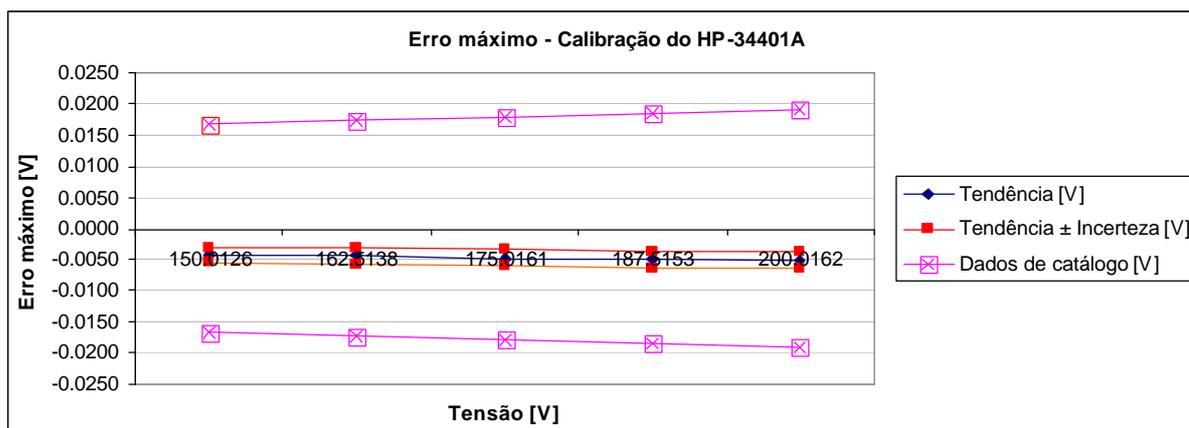


Figura C.62 – Gráfico de erro máximo na medição de tensão CC do multímetro HP-34401A, faixa de 150 a 200 V

Tabela C.62 – Calibração da medição de tensão CC do multímetro HP-34401A, faixa de 150 a 200 V

Calibração do HP-34401A					
Medição (média)	Padrão (média)	Tendência [V]	Incerteza [V]	Erro máximo [V]	Erro máximo [%]
150.0084	150.0126	-0.0042	0.0012	0.0053	0.004
162.5094	162.5138	-0.0044	0.0013	0.0057	0.004
175.0113	175.0161	-0.0048	0.0013	0.0061	0.003
187.5103	187.5153	-0.0050	0.0014	0.0064	0.003
200.0111	200.0162	-0.0050	0.0014	0.0065	0.003

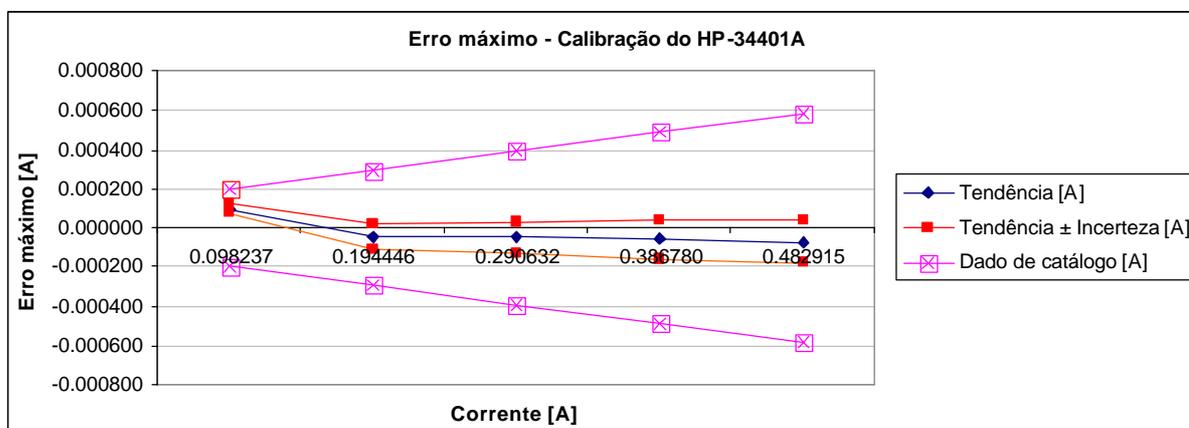


Figura C.63 – Gráfico de erro máximo na medição de corrente CC do multímetro HP-34401A, faixa de 0.1 a 0.5 A

Tabela C.63 – Calibração da medição de corrente CC do multímetro HP-34401A, faixa de 0.1 a 0.5 A

Calibração do HP-34401A					
Medição (média)	Padrão (média)	Tendência [A]	Incerteza [A]	Erro máximo [A]	Erro máximo [%]
0.098336	0.098237	0.000099	0.000023	0.000121	0.123
0.194398	0.194446	-0.000048	0.000063	0.000111	0.057
0.290582	0.290632	-0.000050	0.000082	0.000132	0.045
0.386722	0.386780	-0.000058	0.000098	0.000156	0.040
0.482844	0.482915	-0.000071	0.000111	0.000183	0.038

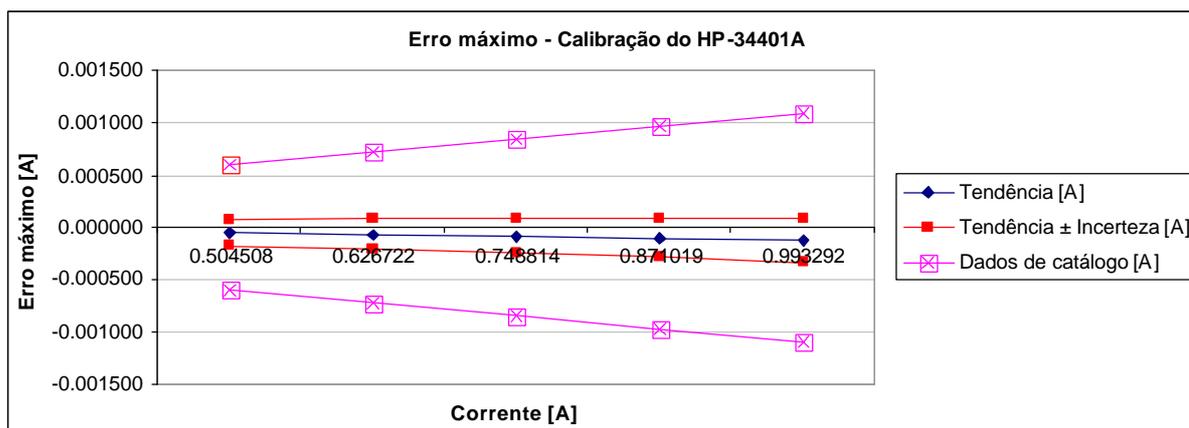


Figura C.64 – Gráfico de erro máximo na medição de corrente CC do multímetro HP-34401A, faixa de 0.5 a 1.0 A

Tabela C.64 – Calibração da medição de corrente CC do multímetro HP-34401A, faixa de 0.5 a 1.0 A

Calibração do HP-34401A					
Medição (média)	Padrão (média)	Tendência [A]	Incerteza [A]	Erro máximo [A]	Erro máximo [%]
0.504456	0.504508	-0.000052	0.000120	0.000173	0.034
0.626656	0.626722	-0.000066	0.000146	0.000212	0.034
0.748732	0.748814	-0.000082	0.000171	0.000253	0.034
0.870917	0.871019	-0.000102	0.000187	0.000290	0.033
0.993169	0.993292	-0.000123	0.000214	0.000337	0.034

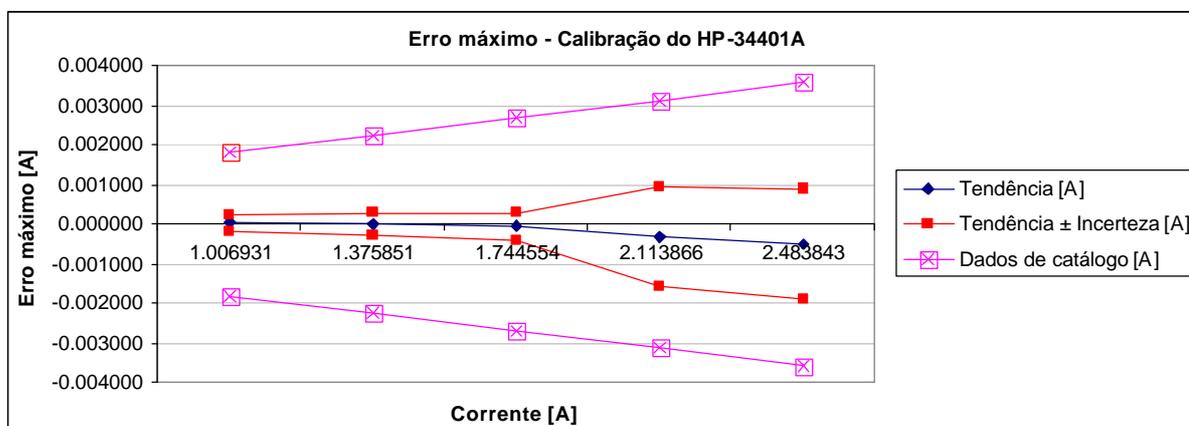


Figura C.65 – Gráfico de erro máximo na medição de corrente CC do multímetro HP-34401A, faixa de 1.0 a 2.5 A

Tabela C.65 – Calibração da medição de corrente CC do multímetro HP-34401A, faixa de 1.0 a 2.5 A

Calibração do HP-34401A					
Medição (média)	Padrão (média)	Tendência [A]	Incerteza [A]	Erro máximo [A]	Erro máximo [%]
1.006964	1.006931	0.000034	0.000207	0.000241	0.024
1.375868	1.375851	0.000017	0.000281	0.000299	0.022
1.744496	1.744554	-0.000058	0.000345	0.000403	0.023
2.113533	2.113866	-0.000333	0.001249	0.001582	0.075
2.483323	2.483843	-0.000520	0.001403	0.001923	0.077