

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
Programa de Pós-Graduação em Metrologia Científica e Industrial

Arthur Nunes Silveira

**DIMINUIÇÃO DO TEMPO DE TRANSITÓRIO EM ENSAIOS
DE DESEMPENHO DE COMPRESSORES UTILIZANDO
INJEÇÃO DE CORRENTE CONTÍNUA**

Florianópolis

2010

Arthur Nunes Silveira

**DIMINUIÇÃO DO TEMPO DE TRANSITÓRIO EM ENSAIOS
DE DESEMPENHO DE COMPRESSORES UTILIZANDO
INJEÇÃO DE CORRENTE CONTÍNUA**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação
em Metrologia Científica e Industrial da Universidade
Federal de Santa Catarina para obtenção de grau de
Mestre em Metrologia

Orientador: Prof. Carlos Alberto Flesch, Dr.Eng.

Florianópolis

2010

Catálogo na fonte pela Biblioteca Universitária
da
Universidade Federal de Santa Catarina

S587d Silveira, Arthur Nunes

Diminuição do tempo de transitório em ensaios de desempenho de compressores utilizando injeção de corrente contínua [dissertação] / Arthur Nunes Silveira ; orientador, Carlos Alberto Flesch. - Florianópolis, SC, 2013.

256 p.: il., grafs., tabs.

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

Inclui referências

1. Metrologia industrial. 2. Medição. 3. Compressores. 4. Correntes contínuas. I. Flesch, Carlos Alberto. II. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Metrologia Científica e Industrial. III. Título.

CDU 537.7

Arthur Nunes Silveira

**DIMINUIÇÃO DO TEMPO DE TRANSITÓRIO EM ENSAIOS
DE DESEMPENHO DE COMPRESSORES UTILIZANDO
INJEÇÃO DE CORRENTE CONTÍNUA**

Esta dissertação foi julgada adequada para a obtenção do título de “MESTRE EM METROLOGIA” e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Metrologia Científica e Industrial

Florianópolis, 19 de agosto de 2010

Prof. Armando Albertazzi Gonçalves Jr., Dr.Eng.
Coordenador do Curso

Banca Examinadora:

Prof. Carlos Alberto Flesch, Dr.Eng.
Orientador
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Marco Antonio Martins Cavaco, Ph.D.
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Arnaldo José Perin, Dr.Ing.
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Saulo Güts, Dr.
Universidade Federal de Santa Catarina

Eng. André Paz Rosa, M.Sc.
Embraco

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer, em especial, ao meu orientador, Prof. Carlos Alberto Flesch por todo o aprendizado proporcionado, não somente técnico, durante o período do mestrado.

À minha namorada Karina pelo amor e paciência nos períodos de ausência.

Ao Prof. Arnaldo Perin, pelo auxílio, tempo e equipamentos disponibilizados.

Aos meus colegas do labmetro, de todas as turmas de mestrado e doutorado, com quem convivi nesses anos de grande satisfação.

Agradeço ao Pacheco, Miguel, Júlio e Rodolfo pelo auxílio nas revisões do documento.

Aos funcionários da Embraco, e amigos, João Paulo, Ronsani, André e Marco Aurélio pelo suporte e direcionamento do trabalho.

RESUMO

Para se manter à frente no mercado, é necessário contar com produtos de qualidade, que sejam eficientes, com custo reduzido e que estejam disponíveis no momento certo. O mesmo ocorre com compressores herméticos de refrigeração. Para que se possa avaliar o desempenho de novos modelos e melhorar os já existentes, os compressores precisam ser exaustivamente testados. Os ensaios responsáveis por medir características importantes de um compressor, como capacidade de refrigeração e consumo, são realizados em bancadas específicas e costumam demandar tempos de até 5 horas. Os resultados – de acordo com normas e procedimentos – devem ser obtidos somente quando as grandezas de interesse atingirem a estabilidade, e assim permanecerem por um determinado período de tempo. Atualmente, a maior parte do tempo de tais ensaios não gera dados relevantes para o resultado, servindo apenas para levar as variáveis de interesse ao regime permanente. O objetivo deste trabalho é diminuir o tempo total dos ensaios de desempenho através da redução do tempo de transitório mediante aquecimento acelerado do compressor, utilizando-se injeção de corrente contínua. O aquecimento acelerado permite que as variáveis mais lentas, dependentes da temperatura do compressor, atinjam os valores de estabilização mais rapidamente. É proposto um método para injetar quantidades variáveis de corrente contínua de acordo com o modelo de compressor ensaiado. Também são apresentados sistemas desenvolvidos com a finalidade de realizar a injeção de corrente contínua com custo reduzido: uma fonte variável e um sistema de medição de resistência. Como resultados, obtiveram-se reduções significativas no tempo de estabilização da temperatura do corpo e também no tempo total do ensaio.

Palavras-chave: metrologia, compressores, instrumentação elétrica, ensaio de desempenho de compressores, redução do tempo de ensaio, medição de resistência de enrolamento, medição de temperatura em enrolamentos energizados.

ABSTRACT

To stay ahead in the market, a company must have quality, efficient and low cost products and they must be available in a timely manner. This standard also applies to hermetic refrigeration compressors. To evaluate the performance of new models and enhance current ones, the compressors must be thoroughly tested. The tests employed for measuring important characteristics of compressors, like refrigerating capacity and power consumption, are made on specific test benches and usually last up to 5 hours. The results – according to standards and procedures – should be measured only when the variables of interest reach stability and remain stable for a certain period of time. Nowadays, most of the duration of such tests does not generate relevant data for the results, its purpose being solely to conduce those variables to steady-state condition. The objective on this thesis is to reduce the total duration of performance tests, thereby decreasing the transitory time through accelerated heating with injection of direct current. The accelerated heating allows the slowest variables, which are relative to the compressor's temperatures, to reach stability values faster. This dissertation proposes a method to inject variable amounts of direct current, according to the compressor's model. Also, the systems developed with the purpose of lowering the costs of direct current injection are presented: a variable power source and a resistance measurement system. The results show significant reduction in the compressor's body temperature stabilization time as well as in the test time.

Key-words: metrology, compressors, electrical instrumentation, compressor performance test, test time reduction, winding resistance measurement, energized windings temperature measurement.

LISTA DE FIGURAS

1.1	Circuito simples de refrigeração, adaptado de (1).	1
1.2	Distribuição das perdas em um compressor hermético comparadas ao rendimento máximo teórico – Carnot; adaptado de (2).	2
1.3	Foto de uma bancada de ensaios de desempenho.	3
2.1	Estágios de compressão em um compressor alternativo. Adaptado de (3)	8
2.2	Foto de um compressor hermético.	9
2.3	Estrutura interna de um compressor alternativo hermético, reproduzido de (1).	10
2.4	Circuito de refrigeração da bancada de ensaio de desempenho.	11
2.5	Componentes elétricos básicos de um motor de indução: (a) estator e (b) rotor, reproduzido de (4).	14
2.6	(a) Diagrama do motor de fase dividida e (b) características típicas de torque-velocidade; reproduzido de (4) apud (5).	15
2.7	(a) Diagrama do motor de fase dividida com capacitor de partida e (b) características típicas de torque-velocidade; reproduzido de (4) apud (5).	16
2.8	(a) Diagrama do motor com capacitor permanente e (b) características típicas de torque-velocidade; reproduzido de (4) apud (5).	16
2.9	(a) Diagrama do motor de fase dividida com dois capacitores e (b) características típicas de torque-velocidade; reproduzido de (4) apud (5).	17
2.10	(a) Princípio de operação normal e (b) frenagem com corrente contínua.	19
2.11	Curva de resistividade do cobre em função da temperatura. Fonte (4), adaptado de (6).	20

2.12	Ilustração da combinação de curvas de temperatura com e sem sobreaquecimento.	22
2.13	Ensaio em compressor com alimentação CC de 55 V sem corrente alternada com compressor em repouso (1).	22
2.14	Ensaio com tensão de alimentação CA de 110 V e tensão CC por 40 minutos de 15 V com compressor em movimento (1).	23
2.15	Perfis das temperaturas internas do compressor <i>D</i> . Ensaio realizado com o compressor a vazio e sem CC.	24
2.16	Perfis das temperaturas internas do compressor <i>D</i> . Ensaio com o compressor a vazio e com injeção CC constante de 20 V.	24
3.1	Fonte Agilent 6812B utilizada em diversos ensaios com injeção de CC.	28
3.2	Interrupção do sinal de tensão da fonte 6812B na comutação do sense interno para externo.	30
3.3	Ensaio realizado com compressor <i>A</i> sem carga.	32
3.4	Circuito de simulação para determinação do modelo do compressor.	32
3.5	Simulação para determinação do modelo do compressor.	33
3.6	Circuito utilizado em ensaio de gradador a TRIAC.	34
3.7	Resultados dos ensaios com diferentes ângulos α de disparo.	35
3.8	Circuito simulado do gradador meia onda com IGBT de roda livre e circuito grampeador.	36
3.9	Simulação do circuito com IGBT de roda livre.	37
3.10	Início do semiciclo positivo, com indicação da corrente de descarga do capacitor.	38
3.11	Início do semiciclo negativo, condução do IGBT de roda livre.	39
3.12	Tempo morto entre as comutações. Carga do capacitor.	40
3.13	Semiciclo negativo. Diminuição da corrente e possível inversão do sentido.	40
3.14	Ensaio realizado com compressor <i>F</i> (220 V / 60 Hz) fora do circuito de refrigeração.	41
3.15	Circuito simulado de inversor simples.	42

3.16	Formas de onda de tensão e de corrente do circuito simulado.	42
3.17	Circuito simulado de fonte CC variável em série com fonte CA.	43
3.18	Corrente no capacitor para diferentes valores de Lc e mesmo ângulo de disparo (30°).	44
3.19	Tensão no capacitor para diferentes valores de Lc e mesmo ângulo de disparo (30°).	44
3.20	Tensões no capacitor para diferentes ângulos de disparo α (30°, 100° e 150°).	45
3.21	Ensaio para determinação dos modelos teóricos de primeira ordem da temperatura da bobina.	48
3.22	Fluxograma da primeira parte do filtro digital.	50
3.23	Influência da injeção de corrente contínua na frequência rotacional para um modelo de compressor.	52
3.24	Aquecimento com controle da temperatura da bobina. <i>Setpoint</i> no valor de estabilização.	54
3.25	Ilustração das três etapas do transitório acelerado de um compressor com temperatura de estabilização da bobina de 70 °C e corpo 51 °C.	56
3.26	Ilustração do tempo perdido pelo aquecimento excessivo do corpo.	59
4.1	Diagrama da fonte CC variável em série com tensão CA.	63
4.2	Tiristor utilizado na ponte retificadora.	64
4.3	Circuito de disparo da fonte de corrente contínua.	64
4.4	Formas de onda para o funcionamento CI TCA785. Adaptado de (7).	66
4.5	Circuito utilizado para simular o efeito do indutor na tensão e corrente geradas pela fonte.	67
4.6	Formas de onda de corrente e tensão resultantes da simulação com ângulos de disparo de 120° e 300°, e indutor com 10 μ H.	68
4.7	Formas de onda de corrente e tensão resultantes da simulação com ângulos de disparo de 30° e 210° e indutor com 10 mH.	68
4.8	Circuito de testes para fonte CC.	70

4.9	7 V de tensão CC aplicado ao compressor <i>G</i> . Corrente eficaz de 1,5 A.	71
4.10	25 V de tensão CC aplicado ao compressor <i>G</i> . Corrente eficaz de 5,8 A.	72
4.11	Tensão no capacitor em série com 220 V da rede elétrica.	73
4.12	Incerteza de T_{out} em função de delta R com a injeção de 4 V de corrente contínua.	76
4.13	Cadeia do sistema de medição de tensão CC.	77
4.14	Circuito simulado.	79
4.15	Atenuação de uma onda senoidal pelo filtro RC de segunda ordem. Em (b), uma aproximação do sinal atenuado.	80
4.16	Resposta ao degrau do filtro RC. Em (b), uma aproximação para visualização do erro em regime.	81
4.17	Tensões sobre os capacitores (a) e corrente nos resistores (b) do filtro.	82
4.18	Divisor resistivo utilizado na medição de tensão (8).	83
4.19	Diagrama de blocos do amplificador de isolamento AD-215 (9).	84
4.20	Variação da tensão devida a uma grandeza de influência: temperatura.	86
4.21	Cadeia de medição da corrente.	87
4.22	Diagrama esquemático da retirada do transdutor de corrente com escala baixa. Em (a) Relé Paralelo conduzindo, em (b) Réle Série conduzindo.	88
4.23	Características do transdutor para a faixa de 5 A (10).	89
4.24	Características do transdutor para a faixa de 18 A (10).	90
4.25	Variação da corrente devida a uma grandeza de influência: temperatura.	90
4.26	Fluxograma do algoritmo para determinar as tensões máxima e mínima injetadas no compressor.	92
4.27	Subprograma (VI) criado em LabVIEW para a aceleração do transitório.	93
5.1	Diagrama elétrico da bancada de testes com compressor.	99
5.2	Conexão elétrica do compressor.	100
5.3	Aquecimento natural do compressor <i>D</i>	102

5.4	Aquecimento forçado no compressor <i>D</i> , estratégia 1: sem sobretemperatura na bobina.	103
5.5	Aquecimento acelerado no compressor <i>D</i> , estratégia 2: com sobretemperatura de 10 °C.	104
5.6	Aquecimento forçado no compressor <i>D</i> , estratégia 3: com sobretemperatura inicial de 15 °C e intermediária de 8 °C.	104
5.7	Diagrama simplificado da bancada de partida e tombamento	107
5.8	Ensaio na bancada de Partida e Tombamento, modelo <i>B</i> com transitório natural.	110
5.9	Ensaio na bancada de Partida e Tombamento, modelo <i>B</i> com transitório acelerado.	111
5.10	Circuito isolado para detecção de fase.	113
5.11	Comparativo das temperaturas do corpo com aquecimento normal e acelerado para o compressor <i>I</i>	114
5.12	Comparativo das temperaturas do corpo com aquecimento normal e acelerado para o compressor <i>K</i>	115
5.13	Pressões de sucção e processo. Comportamento ao fim da injeção de CC, modelo <i>K</i>	116
5.14	Temperaturas de entrada e saída do trocador de calor. Comportamento ao fim da injeção de CC, modelo <i>K</i>	116
5.15	Vazões mássicas, medida através de transdutor e estimada pelo trocador de calor. Comportamento ao fim da injeção de CC, modelo <i>K</i>	117
5.16	Resultado do filtro para a temperatura da bobina medida. Compressor <i>J</i>	117
5.17	Ensaio com e sem transitório acelerado realizados na bancada de ensaios de desempenho. Modelo <i>H</i>	118
5.18	Ensaio com e sem transitório acelerado realizados na bancada de ensaios de desempenho. Modelo <i>I</i>	119
A.1	Figura ilustrativa do <i>Compact Field Point</i> da National Instruments.	147
A.2	Erros para os termopares do tipo J, K, N, T e E. Adaptado de (11)	148

A.3	Pontos calibrados e curva (polinômio) de calibração para cada termopar.	156
B.1	Instrumentos utilizados para calibração do SM de resistência.	162
B.2	Pontos calibrados para o sistema de medição de tensão	165
B.3	Detalhe para o ponto 0 V	165
B.4	Pontos calibrados para o SM de corrente (faixa de 5 A).	168
B.5	Detalhe para o ponto zero (faixa de 5 A).	168
B.6	Pontos calibrados para o SM de corrente (faixa de 18 A).	171
B.7	Detalhe para o ponto zero (faixa de 18 A).	171
B.8	Ilustração do erro proveniente de medição de ciclos não inteiros em uma senóide de valor médio zero. . . .	172
C.1	Transitório natural com compressor a vazio, modelo <i>D</i> – ensaio 1.	176
C.2	Transitório natural com compressor a vazio, modelo <i>D</i> – ensaio 2.	177
C.3	Transitório acelerado com compressor a vazio, modelo <i>D</i> – ensaio 1	179
C.4	Transitório acelerado com compressor a vazio, modelo <i>D</i> – ensaio 2	180
C.5	Transitório acelerado com compressor a vazio., modelo <i>D</i> – ensaio 3	181
C.6	Transitório acelerado com compressor a vazio, modelo <i>D</i> – ensaio 4	182
C.7	Transitório acelerado com compressor a vazio, modelo <i>D</i> – ensaio 5	183
C.8	Transitório acelerado com compressor a vazio, modelo <i>D</i> – ensaio 6	184
D.1	Transitório natural na bancada de partida e tombamento, modelo <i>B</i>	185
D.2	Transitório acelerado na bancada de partida e tombamento, modelo <i>B</i> – ensaio 1.	186
D.3	Transitório acelerado na bancada de partida e tombamento, modelo <i>B</i> – ensaio 2.	186
D.4	Transitório natural na bancada de partida e tombamento, modelo <i>D</i>	187

D.5	Transitório acelerado na bancada de partida e tombamento, modelo <i>D</i> – ensaio 1.	187
D.6	Transitório acelerado na bancada de partida e tombamento, modelo <i>D</i> – ensaio 2.	188
D.7	Transitório natural na bancada de partida e tombamento, modelo <i>G</i>	189
D.8	Transitório acelerado na bancada de partida e tombamento, modelo <i>G</i>	189
E.1	Compressor <i>I</i> com transitório natural e controle da temperatura por termopar - ensaio na bancada de desempenho.	191
E.2	Compressor <i>I</i> com transitório acelerado e controle da temperatura por termopar - ensaio na bancada de desempenho.	192
E.3	Compressor <i>K</i> com transitório natural e controle da temperatura por termopar - ensaio na bancada de desempenho.	192
E.4	Compressor <i>K</i> com transitório acelerado e controle da temperatura por termopar - ensaio na bancada de desempenho.	193
E.5	Compressor <i>I</i> com controle pela medição da resistência; transitório acelerado na bancada de desempenho - ensaio 1.	194
E.6	Compressor <i>I</i> com controle pela medição da resistência; transitório acelerado na bancada de desempenho - ensaio 2.	194
E.7	Compressor <i>K</i> com controle da temperatura pela medição da resistência; transitório acelerado na bancada de desempenho.	195
E.8	Compressor <i>J</i> com controle da temperatura pela medição da resistência; transitório acelerado na bancada de desempenho.	195
E.9	Compressor <i>H</i> com transitório natural após ajustes da bancada de desempenho - ensaio 1.	196
E.10	Compressor <i>H</i> com transitório natural após ajustes da bancada de desempenho - ensaio 2.	196

E.11	Compressor <i>H</i> com transitório acelerado após ajustes da bancada de desempenho - ensaio 1.	197
E.12	Compressor <i>H</i> com transitório acelerado após ajustes da bancada de desempenho - ensaio 2.	197
E.13	Compressor <i>H</i> com transitório acelerado após ajustes da bancada de desempenho - ensaio 3.	198
E.14	Compressor <i>H</i> com transitório acelerado após ajustes da bancada de desempenho - ensaio 4.	198
E.15	Compressor <i>H</i> com transitório acelerado após ajustes da bancada de desempenho - ensaio 5.	199
E.16	Compressor <i>H</i> com transitório acelerado após ajustes da bancada de desempenho - ensaio 6.	199
E.17	Compressor <i>H</i> com transitório acelerado após ajustes da bancada de desempenho - ensaio 7.	200
E.18	Compressor <i>I</i> com transitório natural após ajustes da bancada de desempenho - ensaio 1.	201
E.19	Compressor <i>I</i> com transitório natural após ajustes da bancada de desempenho - ensaio 2.	201
E.20	Compressor <i>I</i> com transitório acelerado após ajustes da bancada de desempenho - ensaio 1.	202
E.21	Compressor <i>I</i> com transitório acelerado após ajustes da bancada de desempenho - ensaio 2.	202
E.22	Compressor <i>I</i> com transitório acelerado após ajustes da bancada de desempenho - ensaio 3.	203
E.23	Compressor <i>I</i> com transitório acelerado após ajustes da bancada de desempenho - ensaio 4.	203
E.24	Compressor <i>I</i> com transitório acelerado após ajustes da bancada de desempenho - ensaio 5.	204
E.25	Compressor <i>I</i> com transitório acelerado após ajustes da bancada de desempenho - ensaio 6.	204
E.26	Compressor <i>I</i> com transitório acelerado após ajustes da bancada de desempenho - ensaio 7.	205
F.1	Compressor <i>D</i> utilizando fonte desenvolvida, transitório natural - 1.	207
F.2	Compressor <i>D</i> utilizando fonte desenvolvida, transitório natural - 2.	208

F.3	Compressor <i>D</i> utilizando fonte desenvolvida, transitório natural - 3.	208
F.4	Compressor <i>D</i> utilizando fonte desenvolvida, transitório acelerado - 1.	209
F.5	Compressor <i>D</i> utilizando fonte desenvolvida, transitório acelerado - 2.	209
F.6	Compressor <i>D</i> utilizando fonte desenvolvida, transitório acelerado - 3.	210
F.7	Compressor <i>D</i> utilizando fonte desenvolvida, transitório acelerado - 4.	210
F.8	Compressor <i>D</i> utilizando fonte desenvolvida, transitório acelerado - 5.	211
F.9	Compressor <i>D</i> utilizando fonte desenvolvida, transitório acelerado - 6.	211
F.10	Compressor <i>F</i> utilizando fonte desenvolvida, transitório natural - 1.	212
F.11	Compressor <i>F</i> utilizando fonte desenvolvida, transitório natural - 2.	212
F.12	Compressor <i>F</i> utilizando fonte desenvolvida, transitório natural - 3.	213
F.13	Compressor <i>F</i> utilizando fonte desenvolvida, transitório acelerado - 1.	214
F.14	Compressor <i>F</i> utilizando fonte desenvolvida, transitório acelerado - 2.	214
F.15	Compressor <i>F</i> utilizando fonte desenvolvida, transitório acelerado - 3.	215
F.16	Compressor <i>F</i> utilizando fonte desenvolvida, transitório acelerado - 4.	215
F.17	Compressor <i>G</i> utilizando fonte desenvolvida, transitório natural - 1.	216
F.18	Compressor <i>G</i> utilizando fonte desenvolvida, transitório natural - 2.	216
F.19	Compressor <i>G</i> utilizando fonte desenvolvida, transitório natural - 3.	217
F.20	Compressor <i>G</i> utilizando fonte desenvolvida, transitório acelerado - 1.	218

F.21	Compressor G utilizando fonte desenvolvida, transitório acelerado - 2.	218
F.22	Compressor G utilizando fonte desenvolvida, transitório acelerado - 3.	219
F.23	Compressor G utilizando fonte desenvolvida, transitório acelerado - 4.	219
F.24	Compressor G utilizando fonte desenvolvida, transitório acelerado - 5.	220
F.25	Compressor G utilizando fonte desenvolvida, transitório acelerado - 6.	220
A.1	Correspondência de funções no tempo e suas transformadas de Laplace (s) e z ; adaptado de (12)	224
A.2	Continuação da tabela A.1; adaptado de (12)	225

LISTA DE TABELAS

2.1	Combinações de métodos permitidos pela ISO917 (13).	12
3.1	Correntes para diversos ângulos de disparo utilizando TRIAC	36
4.1	Características do filtro de saída.	85
5.1	Resultados dos ensaios realizados com a fonte comercial no compressor <i>D</i> a vazio.	105
5.2	Resultados dos ensaios realizados na bancada de partida e tombamento.	109
5.3	Resultados dos ensaios de desempenho após alterações nos controladores (compressores modelo <i>H</i>).	121
5.4	Resultados dos ensaios de desempenho após alterações nos controladores (compressores modelo <i>I</i>).	122
5.5	Características dos modelos de compressores ensaiados com a fonte desenvolvida.	123
5.6	Tempos de estabilização da temperatura do corpo utilizando solução desenvolvida para modelo <i>D</i>	125
5.7	Tempos de estabilização da temperatura do corpo utilizando solução desenvolvida para modelo <i>F</i>	126
5.8	Tempos de estabilização da temperatura do corpo utilizando solução desenvolvida para modelo <i>G</i>	127
A.1	Erro máximo e repetitividade máxima obtidos após a calibração para cada termopar	151
A.2	Pontos de calibração do termopar <i>I</i> (início do rolo) . .	152
A.3	Pontos de calibração do termopar <i>M</i> (meio do rolo) . .	153
A.4	Pontos de calibração do termopar <i>F</i> (fim do rolo) . . .	154
A.5	Pontos de calibração do termopar <i>O</i> (outro rolo) . . .	155
A.6	Erro máximo para o termopar <i>I</i> (início do rolo)	157
A.7	Erro máximo para o termopar <i>M</i> (meio do rolo)	158
A.8	Erro máximo para o termopar <i>F</i> (fim do rolo)	159
A.9	Erro máximo para o termopar <i>O</i> (outro rolo)	160

B.1	Resumo das incertezas para medição de tensão e corrente C.C. nas faixas utilizadas	162
B.2	Resumo dos erros para a calibração do sistema de medição de tensão.	163
B.3	Medições da calibração do SM de tensão.	164
B.4	Resumo dos erros para a calibração do sistema de medição de corrente (faixa de 5 A).	166
B.5	Medições da calibração do SM de corrente (faixa de 5 A).	167
B.6	Resumo dos erros para a calibração do sistema de medição de corrente (faixa de 18 A)	169
B.7	Medições da calibração do SM de tensão(faixa de 18 A).170	
B.8	Erros devidos à aquisição de um período não múltiplo inteiro da frequência fundamental.	173
G.1	Características dos compressores utilizados.	222

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

A/D	Analógico - Digital
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASHRAE	<i>American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers</i>
C	Capacitor
CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
CI	Circuito intergrado
COP	<i>Coefficient of Performance</i>
CSIR	<i>Capacitive Start - Inductive Run</i>
CSR	<i>Capacitive Start and Run</i>
EC	<i>Electronically Controlled</i>
Embraco	Whirlpool S.A. – Unidade Embraco de Compressores e Soluções de Refrigeração
FCEM	Força Contra Eletro Motriz
GPIB	interface de comunicação, do inglês <i>General Purpose Interface Bus</i>
HST	<i>High Starting Torque</i>
IGBT	<i>Insulated Gate Bipolar Transistor</i>
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
L	Indutor
Labmetro	Laboratório de Metrologia e Automatização
LIAE	Laboratório de Instrumentação e Automação de Ensaios Aplicados à Refrigeração
LST	<i>Low Starting Torque</i>
NA	Normalmente Aberto
NBR	Norma Regulamentadora da ABNT
NF	Normalmente fechado
PI	Proporcional – Integral
PID	Proporcional – Integral – Derivativo

NA	Normalmente Aberto
NBR	Norma Regulamentadora da ABNT
NF	Normalmente Fechado
PI	Proporcional - Integral
PID	Proporcional, Integral e Derivativo
PSC	<i>Permanent Split Capacitor</i>
PTC	<i>Positive Temperature Coefficient</i>
PWM	modulação por largura de pulso, do inglês <i>Pulse Width Modulation</i>
R	Resistor
R134a	fluido refrigerante tetrafluoretano
R600a	fluido refrigerante isobutano
RMS	Valor eficaz ou valor quadrático médio, do inglês <i>Root Mean Square</i>
RS-232	padrão de comunicação serial de dados
RSCR	<i>Resistance Start -Capacitive Run</i>
RSIR	<i>Resistance Start - Inductive Run</i>
SCR	<i>Silicon Controlled Rectifier</i>
SM	Sistema de Medição
TRIAC	<i>Triode for Alternating Current</i>
TSD	<i>Time Starting Device</i>
UFSC	Universidade Federal de Santa Catarina
VIM	Vocabulário Internacional de Metrologia

SUMÁRIO

1	Introdução	1
1.1	Contextualização	1
1.2	Objetivo do trabalho	4
1.3	Estrutura da dissertação	5
2	Fundamentação teórica	7
2.1	Compressor hermético	7
2.2	Bancada de ensaios de desempenho de compressores	9
2.3	Motores de indução utilizados em compressores	13
2.3.1	Arranjos elétricos usuais em motores de indução	14
2.3.2	Arranjos elétricos usuais em compressores monofásicos	17
2.4	Injeção de CC em motores CA	18
2.4.1	Frenagem dinâmica	19
2.4.2	Medição de resistência	19
2.4.3	Diminuição do tempo de transitório	21
2.5	Conclusão	25
3	Proposta de método de aceleração de transitório em ensaios de desempenho	27
3.1	Alternativas para injeção de corrente contínua	27
3.1.1	Fonte comercial	28
3.1.2	Desenvolvimento de fonte	31
3.1.3	Solução escolhida	45
3.2	Operacionalização da injeção de CC	46
3.2.1	Limite da temperatura da bobina	46
3.2.2	Controle de temperatura e filtragem do sinal	47
3.2.3	Corrente máxima injetada e tempo de injeção	52
3.3	Procedimento proposto	55
3.3.1	Etapa 1: Determinação da máxima tensão CC injetada	57

3.3.2	Etapa 2: Aquecimento inicial	58
3.3.3	Etapa 3: Aquecimento intermediário	58
3.4	Conclusões	59
4	Sistemas desenvolvidos	61
4.1	Desenvolvimento de dispositivo adicionador de CC	61
4.1.1	Caracterização da fonte	62
4.1.2	Construção da fonte	62
4.1.3	Validação da fonte	69
4.2	Sistema de medição de resistência elétrica	72
4.2.1	Medição de tensão	76
4.2.2	Medição de corrente	85
4.3	Software de controle	91
4.4	Conclusões	94
5	Análise experimental	97
5.1	Introdução	97
5.2	Estratégia adotada	97
5.3	Bancada elétrica para ensaios com compressor a vazio	98
5.4	Fonte comercial alimentando o compressor a vazio	100
5.4.1	Condições dos ensaios	100
5.4.2	Resultados	101
5.5	Fonte comercial alimentando compressor em bancada de partida e tombamento	106
5.5.1	Condições dos ensaios	106
5.5.2	Resultados	107
5.6	Fonte comercial empregada em ensaio de desempenho	111
5.6.1	Condições dos ensaios	112
5.6.2	Resultados	114
5.7	Dispositivo adicionador de CC alimentando compressor a vazio	123
5.7.1	Condições dos ensaios	123
5.7.2	Resultados	123
5.8	Conclusões acerca dos resultados dos ensaios	128
5.8.1	Ensaio com compressor a vazio	128
5.8.2	Ensaio com compressor na bancada de partida e tombamento	129

5.8.3	Ensaaios com compressor na bancada de desempenho	129
5.8.4	Ensaaios utilizando sistemas desenvolvidos	130
6	Conclusões e propostas para trabalhos futuros	131
6.1	Conclusões	131
6.1.1	Acerca do método de aquecimento	132
6.1.2	Acerca dos sistemas desenvolvidos	133
6.2	Propostas para trabalhos futuros	135
	Referências	139
	Apêndice A – Calibração dos termopares	147
	Apêndice B – Calibração do sistema de medição de resistência	161
B.1	SM de tensão	163
B.2	SM de corrente faixa de 5 A	166
B.3	SM de corrente faixa de 18 A	169
B.4	Incertezas devidas ao tempo de aquisição	172
	Apêndice C – Ensaaios com compressor a vazio utilizando fonte comercial	175
C.1	Ensaaios com transitório natural	175
C.2	Ensaaios com transitório acelerado	178
	Apêndice D – Ensaaios com compressores na bancada de partida e tombamento	185
	Apêndice E – Ensaaios com compressores na bancada de desempenho	191
E.1	Antes dos ajustes dos controladores	191
E.2	Com controle pela resistência da bobina	194
E.3	Após ajustes dos controladores	196
	Apêndice F – Ensaaios com compressores a vazio com dispositivo adicionador de CC	207
F.1	Compressor <i>D</i>	207
F.2	Compressor <i>F</i>	212

F.3 Compressor G	216
Apêndice G – Compressores utilizados	221
Anexo A – Tabela de transformadas s e z	223

1 INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização

Um sistema simples de refrigeração é composto basicamente por quatro elementos (figura 1.1): um dispositivo compressor, dois elementos trocadores de calor e um dispositivo de expansão. O dispositivo compressor realiza a compressão de um fluido e, devido à diferença de pressão, faz com ele circule pelo restante do sistema. Um elemento trocador de calor permite que o fluido, comprimido e em alta temperatura, perca calor para o ambiente. O dispositivo de expansão diminui a pressão do fluido, e conseqüentemente, sua temperatura. O segundo elemento trocador de calor é responsável pela remoção de calor do ambiente que se deseja resfriar.

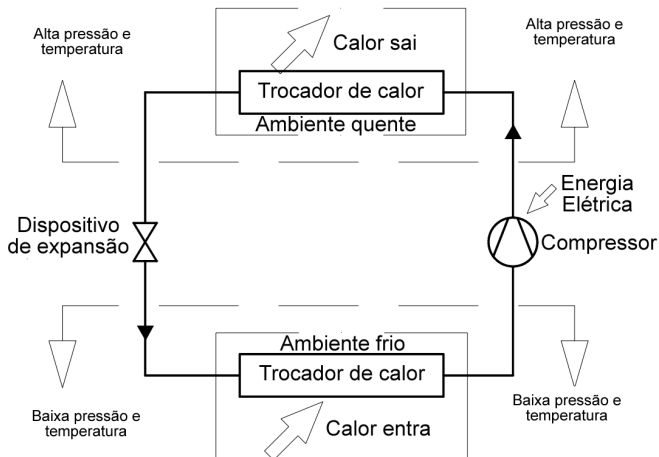


Figura 1.1: Circuito simples de refrigeração, adaptado de (1).

Desses quatro elementos, o compressor é muitas vezes o único dispositivo ativo do circuito, ou seja, que necessita de energia elétrica

para funcionamento.

Aumentar a eficiência de refrigeração de um sistema significa remover mais calor gastando menos energia. O limite teórico desta eficiência esbarra no ciclo de Carnot¹, pois não se pode realizar compressão e expansão sem atrito. Grande parte dos esforços em melhoras nos sistemas de refrigeração está concentrado sobre o compressor, principalmente no que se refere à sua eficiência energética.

Possamai e Todescat (2) apresentam um gráfico mostrando a evolução do COP² de 1980 para 2002 (figura 1.2) para um compressor hermético. O ganho relativo de eficiência durante esse período foi de aproximadamente 60%.

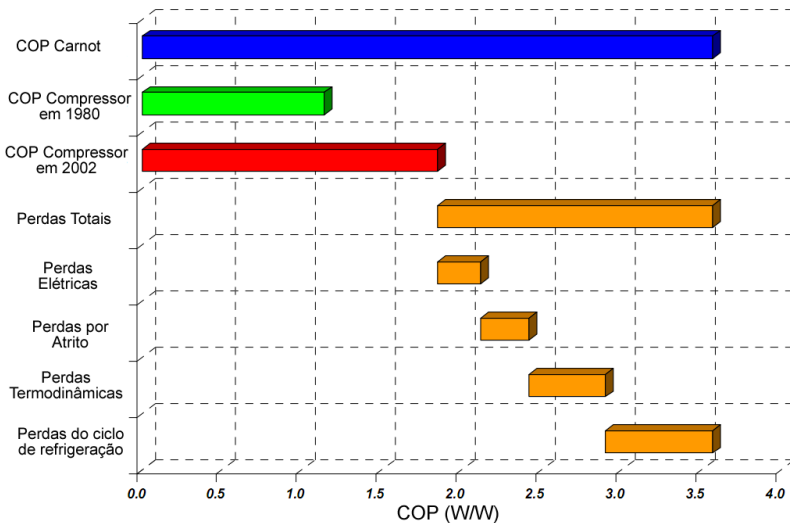


Figura 1.2: Distribuição das perdas em um compressor hermético comparadas ao rendimento máximo teórico – Carnot; adaptado de (2).

Esse aumento de eficiência é a soma de diversos ganhos menores oriundos de alterações realizadas nos compressores nesse período. Cada melhoria proposta provoca uma pequena mudança em desempenho. Para que se possa medir e comprovar tais ganhos, são necessárias

¹Ciclo de refrigeração teórico ideal e reversível.

²Coefficiente de performance, do inglês *Coefficient of Performance*. É a relação entre a capacidade de refrigeração e o consumo de energia elétrica de um compressor.

bancadas de testes com incertezas menores e a possibilidade de replicação de ensaios, a fim de minimizar a parcela aleatória dos erros de medição e da variabilidade dos ensaios.

Os testes para determinação das principais características funcionais de um compressor, como capacidade de refrigeração e consumo elétrico, são realizadas em bancadas específicas para esse fim, denominadas bancadas de ensaios de desempenho. A figura 1.3 mostra a foto de uma bancada automatizada, desenvolvida através da parceria entre a WHIRLPOOL (unidade EMBRACO) e o LIAE³.

Essas bancadas são capazes de medir o desempenho dos compressores, realizando ensaios segundo normas internacionais. A normatização dos ensaios permite às empresas consumidoras de compressores comparar diversos modelos de diferentes fabricantes, analisando quais produtos atendem melhor às suas necessidades.



Figura 1.3: Foto de uma bancada de ensaios de desempenho.

³LIAE: Laboratório de Instrumentação e Automação de Ensaios Aplicados à Refrigeração - Divisão do Laboratório de Metrologia e Automação da UFSC (Labmetro).

Esses ensaios podem ser extremamente demorados, chegando a tempos superiores a cinco horas de duração. A maior parte desse tempo – geralmente mais de 70% – é utilizado para colocar o compressor em condições estáveis para que se inicie o ensaio propriamente dito (1, 14, 15, 16).

De acordo com dados fornecidos pela empresa líder mundial no segmento de compressores de refrigeração, a ocupação do tempo das bancadas de desempenho pode ser resumida como sendo 70% para pesquisa e desenvolvimento internos e 30% para controle de qualidade e atendimento às normas. São realizados ensaios praticamente 24 horas por dia, 7 dias por semana. Apenas no Laboratório de Avaliação da referida empresa existem, atualmente, cerca de 20 bancadas para atender a essa demanda. Considerando os demais laboratórios, inclusive em outros países, essa quantidade ultrapassa 40 bancadas.

Como consequência da redução do tempo, pode-se, indiretamente, obter também diminuição das incertezas de medição, pois mais ensaios poderiam ser realizados em um mesmo intervalo de tempo, diminuindo a incerteza dos valores médios.

A iniciativa de diversos projetos em diferentes frentes de trabalho nos últimos anos (1, 14, 15, 16) é também um importante indicador da necessidade de redução do tempo total dos ensaios de desempenho.

1.2 Objetivo do trabalho

O objetivo deste trabalho é propor e validar um método de diminuição do tempo total dos ensaios de desempenho de compressores através da injeção de corrente contínua. A redução do tempo total é possível com a diminuição do tempo de transitório inicial, tempo este devido, principalmente, ao aquecimento lento do compressor. Como o aquecimento do compressor é de dentro para fora, a temperatura medida externamente ao corpo do compressor é a variável que mais demora para atingir o valor de equilíbrio, e por isso é utilizada como indicativo de que o ensaio se encontra estabilizado.

Scussel (1) propôs, em sua dissertação, diversos métodos para se diminuir o tempo de transitório. Entre esses métodos, a utilização de corrente contínua mostrou-se a mais promissora, de forma que será

o objetivo de estudo desta dissertação.

Esta dissertação é de grande importância devido à possibilidade real de abreviar o tempo dos ensaios de desempenho, reduzindo dessa forma o custo operacional. A redução de tempo traz também maior disponibilidade, diminuindo a necessidade de aquisição de novas bancadas.

Além de validar a injeção de corrente contínua como uma solução eficaz, é proposto um método viável de implantação em um painel de ensaios de desempenho.

Para reduzir o custo total da solução, também é proposta a construção e testes de um circuito eletrônico capaz de injetar uma quantidade variável de corrente contínua com o compressor energizado (com corrente alternada), a fim de substituir a utilização de uma fonte comercial.

1.3 Estrutura da dissertação

Este trabalho é dividido em seis capítulos.

No capítulo 2 é realizado um estudo dos temas considerados relevantes para o entendimento do restante do trabalho, focando no compressor hermético, seus componentes e o ensaio de desempenho.

No capítulo 3 é abordado diretamente o problema e proposta uma solução com base em alguns ensaios e resultados, apresentando diferentes possibilidades de equipamentos capazes de injetar corrente contínua.

O capítulo 4 apresenta os sistemas desenvolvidos para a realização do trabalho, incluindo uma fonte CC variável, um sistema de medição de resistência do enrolamento do compressor, e a estrutura dos softwares de controle necessários para a aplicação na bancada de ensaios de desempenho.

Os resultados obtidos com a utilização da solução proposta são mostrados no capítulo 5, apresentando as diminuições de tempo obtidas sob diversas condições.

Finalmente, no capítulo 6, são apresentadas as conclusões do trabalho bem como propostas de melhorias. Adicionalmente são destacados alguns aspectos que necessitariam de maior investigação, po-

dendo servir de escopo para futuras dissertações.

Os apêndices A e B apresentam os resultados das calibrações dos termopares utilizados e do sistema de medição de resistência desenvolvido.

Os gráficos presentes nos apêndices C até F são os resultados de diversos ensaios realizados para a definição e a validação do procedimento proposto.

O apêndice G contém as principais características dos compressores utilizados em todos os ensaios deste trabalho.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Para auxiliar na compreensão do trabalho, é necessário um estudo geral do contexto do problema. Isso inclui conhecer o funcionamento interno do compressor, o ensaio de desempenho, e os motores presentes na maioria dos compressores herméticos: os motores de indução monofásicos.

Além disso, é preciso conhecer o funcionamento da bancada de ensaios de desempenho, pois é nessa bancada que a injeção de corrente contínua será utilizada.

Por fim, uma explanação sobre as possíveis utilizações de injeção de CC em motores energizados, incluindo o princípio de aquecimento acelerado de compressores.

2.1 Compressor hermético

Os tipos mais comuns de compressores industriais em aplicações de até 1000 kW são os alternativos e os rotativos parafuso (17). O interesse deste trabalho é sobre o primeiro tipo, o alternativo.

Os compressores alternativos possuem uma câmara de compressão, um pistão conectado ao eixo do motor através de uma biela e válvulas que permitem o fluxo de fluido em apenas um sentido. O funcionamento da compressão é ilustrado na figura 2.1.

Na etapa de expansão (B), o movimento do pistão para baixo diminui a pressão da câmara até que a pressão interna se torne inferior à pressão externa. Inicia-se a etapa de sucção (C), na qual a válvula de sucção se abre, permitindo a entrada de fluido até que o pistão atinja seu curso mínimo. Em seguida é iniciada a etapa de compressão (D), com o pistão movimentando-se para cima e comprimindo o fluido. A

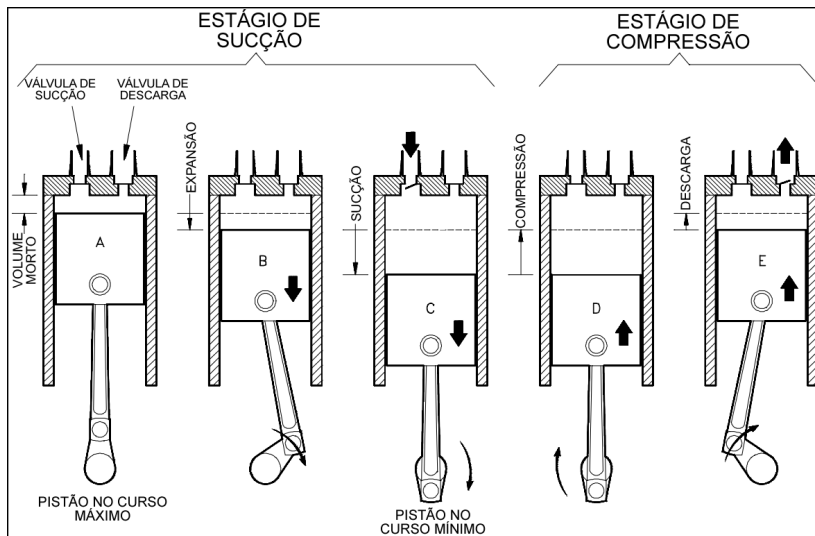


Figura 2.1: Estágios de compressão em um compressor alternativo. Adaptado de (3)

válvula de sucção se fecha e assim permanece enquanto a pressão interna for maior do que a pressão de sucção (evitando o fluxo no sentido contrário). A compressão continua até que a pressão interna atinja um valor ligeiramente maior do que a pressão de descarga. Nesse instante, etapa de descarga (E), a válvula de descarga se abre, permitindo a saída do fluido até que o pistão atinja seu curso máximo (A), iniciando um novo ciclo.

Os compressores alternativos podem ser classificados em três tipos: abertos, semi-herméticos e herméticos. Os compressores abertos possuem um motor externo para o acionamento do(s) pistão(ões), necessitando de vedação para o eixo, enquanto os herméticos e semi-herméticos possuem a unidade compressora (pistões, válvulas etc) e o motor elétrico que o aciona, selados dentro da mesma carcaça. A única diferença entre os herméticos e os semi-herméticos é que os segundos permitem a remoção do cabeçote permitindo acesso às válvulas e aos pistões (17, 18).

No caso dos herméticos, não se tem acesso ao interior do compressor. A interface se dá apenas através das conexões de sucção, processo (por onde normalmente é injetado óleo e fluido refrigerante) e descarga, e através das conexões elétricas do motor (figura 2.2). Não se pode realizar manutenções preventivas ou corretivas. Em contrapartida, pelo fato de o compressor ser hermético, eliminam-se problemas com vazamentos e vedações (17).



Figura 2.2: Foto de um compressor hermético.

A presença do motor elétrico dentro do mesmo ambiente do fluido refrigerante permite trocas de calor entre o motor elétrico, o óleo e o fluido refrigerante. Isso pode provocar perdas de eficiência do compressor, no entanto, garante a vida útil do motor evitando o sobreaquecimento do mesmo. A figura 2.3 apresenta a estrutura de um compressor hermético, apontando seus principais componentes. Além do motor elétrico, outras fontes de calor são o processo de compressão, atrito entre os mancais e atrito da parede do cilindro com o pistão (1).

2.2 Bancada de ensaios de desempenho de compressores

O rendimento de um circuito de refrigeração é definido como sendo a relação entre a capacidade de refrigeração (taxa de calor absorvida pelo evaporador) e a potência elétrica necessária para tal (consumo elétrico do compressor). Esse rendimento é comumente denominado de COP (17).

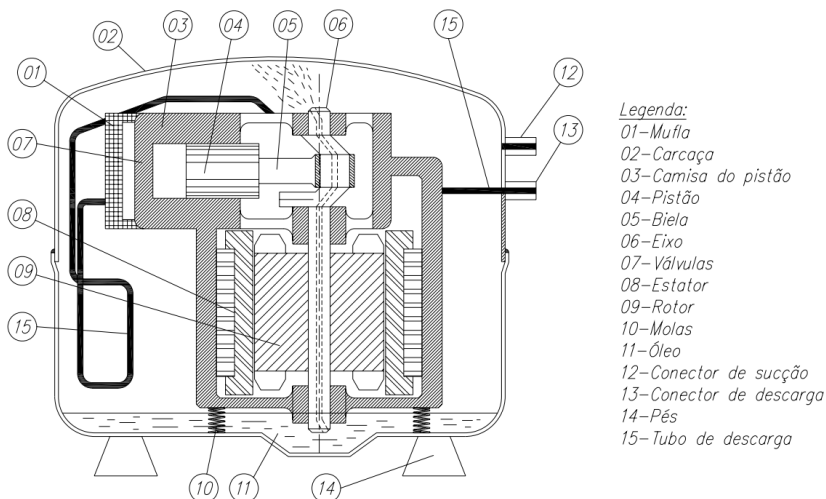


Figura 2.3: Estrutura interna de um compressor alternativo hermético, reproduzido de (1).

Como o COP depende de vários fatores além do compressor (geometria de condensadores e evaporadores, temperaturas de evaporação e condensação, pressões etc.), diversas normas definem padrões de ensaio de modo a analisar o desempenho apenas do compressor, mantendo as demais variáveis do sistema sob controle (13, 19, 20, 21, 22, 23).

Esses ensaios são denominados de ensaios de desempenho de compressores e são realizados em bancadas específicas para esse propósito. De modo resumido, os principais componentes da bancada são, como mostra a figura 2.4: compressor, condensador, medidor de vazão mássica, válvula de expansão, condensador e evaporador (calorímetro). Essa figura apresenta uma configuração onde é possível realizar a medição de capacidade com a utilização de um calorímetro (métodos A, B e C) e de um medidor de vazão mássica na fase líquida do fluido refrigerante (método F).

Além do circuito principal, onde está inserido o compressor em teste, existem dois outros sistemas de refrigeração. Um deles auxilia

no controle da temperatura do ambiente onde permanece o compressor em teste. O outro exerce função semelhante para o ambiente onde está inserido o calorímetro (não mostrado na figura 2.4).

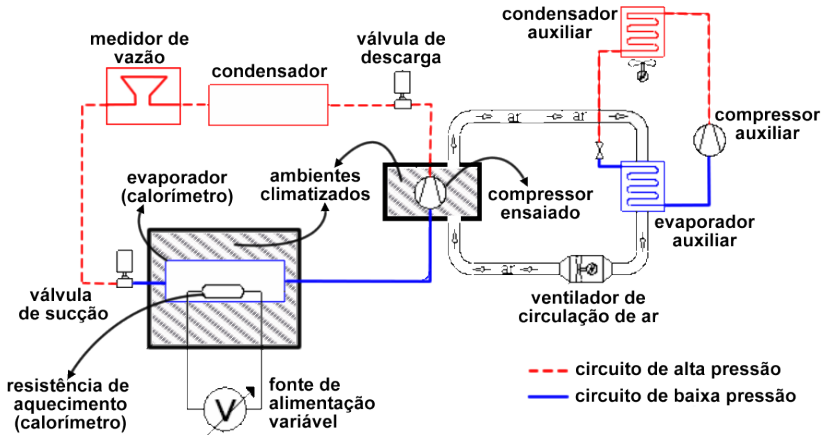


Figura 2.4: Circuito de refrigeração da bancada de ensaio de desempenho.

A norma ISO917 (13) detalha cada um dos métodos que podem ser utilizados, bem como sugere quais pares de método devem ser empregados em conjunto para garantir uma maior confiabilidade dos resultados (tabela 2.1). Scussel (1) identificou, em seu trabalho, vantagens e desvantagens de cada método, principalmente no que se refere ao tempo demandado para a estabilização do ensaio.

A determinação da capacidade deve ser realizada utilizando-se dois métodos distintos simultaneamente. Um deles será o valor oficial adotado para capacidade e outro servirá para confirmação (desde que a diferença entre os valores seja inferior a um desvio máximo) (13).

O valor da capacidade é obtido, de acordo com (13), através da equação 2.1.

$$\phi_0 = q_{mf} \frac{V_{ga}}{V_{gl}(h_{g1} - h_{f1})} \quad (2.1)$$

Onde:

Tabela 2.1: Combinações de métodos permitidos pela ISO917 (13).

Método 1 Utilizado	Métodos 2 Permitidos	Métodos 2 Recomendados
A	D1,D2,F,G,K	F,G,K
B	D1,D2,F,G,K	F,G,K
C	D1,D2,F,G,K	F,G,K
D1	A,B,C,D2,F,G,J,K	F,G,J,K
D2	A,B,C,D1,F,J	F,J
F	A,B,C,D1,D2,J,K	D1,D2,J,K
G	A,B,C,D1,F,J	D1,J
K	A,B,C,D1,F,J	D1,J

ϕ_0 : capacidade do compressor (W);

q_{mf} : fluxo de massa do fluido refrigerante (kg/s);

V_{ga} : volume específico do fluido refrigerante (gás) entrando no compressor, durante o ensaio;

V_{gl} : volume específico do fluido refrigerante (gás) entrando no compressor, estabelecido anteriormente ao ensaio;

h_{g1} : entalpia específica do fluido refrigerante nas condições básicas específicas de ensaio;

h_{f1} : entalpia específica do fluido refrigerante na pressão correspondente a descarga do compressor.

A norma ISO917 (13) descreve diversos métodos para a medição da capacidade. Mas de modo geral, todos os métodos se resumem a apenas dois princípios: utilizando a medição da vazão mássica diretamente; utilizando um calorímetro.

Nos métodos que utilizam transdutores para a medição direta da vazão mássica, é utilizada a equação 2.1 para a determinação da capacidade.

Nos outros, a capacidade de refrigeração é obtida através do princípio de conservação de energia. Em um ambiente fechado e isolado termicamente (calorímetro) uma resistência elétrica transforma energia elétrica em calor. Nesse mesmo ambiente o evaporador do circuito de refrigeração retira o calor injetado pela resistência. As pressões e temperaturas do calorímetro são medidas durante o ensaio.

Como o ensaio leva em consideração apenas os dados obtidos em regime permanente, ou seja, após os transitórios das variáveis, pode-se obter a capacidade de refrigeração como sendo igual à potência elétrica injetada pela fonte que alimenta a resistência do calorímetro.

Ainda de acordo com as normas, devem-se obter os resultados do ensaio de capacidade apenas quando todas as variáveis estiverem em condições de regime, ou seja, estáveis dentro de certos limites. Sendo assim, do tempo total de um ensaio, apenas a última hora¹ é significativa para os resultados. O tempo anterior foi utilizado apenas para estabilizar o sistema. Atualmente, o tempo total médio para um ensaio de capacidade é de aproximadamente 4h30min (24, 16, 15, 1).

2.3 Motores de indução utilizados em compressores

Os motores de indução, por serem robustos e caracteristicamente com menor custo para se construir, são atualmente os motores mais empregados na indústria em geral (25, 26, 27).

Embora existam projetos de compressores utilizando motores EC^2 (28) e motores lineares (29, 30), as características robustez, baixo custo e alimentação monofásica, fazem com que os motores de indução ainda sejam os mais utilizados nessa aplicação.

Os principais componentes de um motor de indução são apresentados na figura 2.5. Existem rotores bobinados ou com barras em formato de gaiola de esquilo.

Para os motores trifásicos, o estator é formado por enrolamentos dispostos de maneira a criar um campo girante. As linhas de campo do estator cortam os condutores do rotor, induzindo assim, uma corrente no rotor. Essa corrente, por sua vez, gera outro campo magnético que tende a seguir o campo girante do estator (27).

Nos motores monofásicos, o campo produzido com apenas um enrolamento de estator não é girante, mas sim pulsante. Dessa forma, o torque inicial (com o motor em repouso) é nulo (31).

A principal diferença entre os motores monofásicos e trifásicos

¹A norma ISO917 (13) exige um período de 1 hora de estabilidade

²Do inglês *Electronic Controlled*, também conhecidos como BLDC (*Brushless DC*) ou motores síncronos a ímãs permanentes.

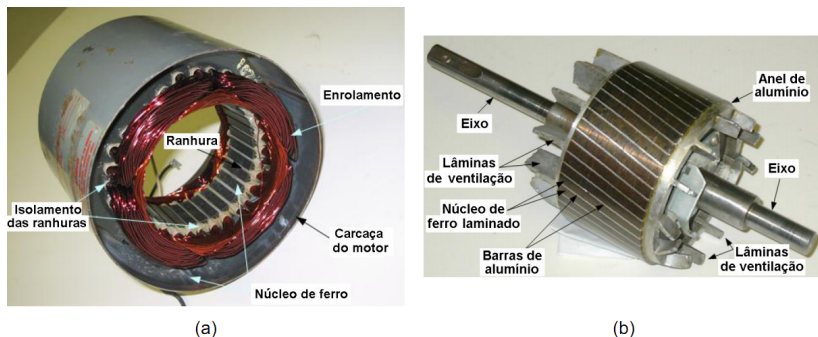


Figura 2.5: Componentes elétricos básicos de um motor de indução: (a) estator e (b) rotor, reproduzido de (4).

está na forma com que o campo girante é obtido. Para o motor trifásico, a própria defasagem entre as fases juntamente com o posicionamento das espiras induz a criação de um campo girante.

Para os motores monofásicos, no entanto, o torque inicial é nulo enquanto o rotor estiver em repouso. Dessa forma, é necessário um meio de se induzir um torque não nulo para sua partida. Isso é realizado, normalmente, com a utilização de um segundo enrolamento, chamado de enrolamento auxiliar.

2.3.1 Arranjos elétricos usuais em motores de indução

Os diversos arranjos elétricos presentes nos motores de indução monofásicos provém das diferentes necessidades de torque para cada aplicação (32), tanto para a carga nominal quanto para a partida.

Como mencionado, é necessário um enrolamento auxiliar para a partida do motor. Pode-se removê-lo do circuito após a partida ou o manter energizado durante a operação.

De acordo com a literatura (32, 31), existem quatro classificações para a partida do motor de indução monofásico, descritas nos itens a seguir (2.3.1.a até 2.3.1.d).

2.3.1.a Motor de fase dividida ou fase auxiliar

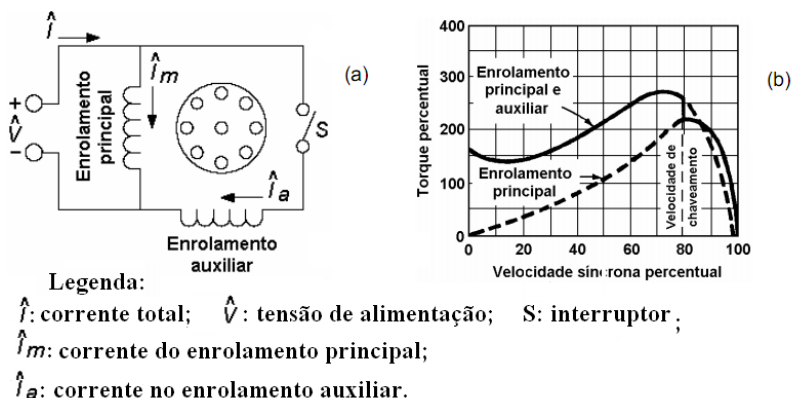


Figura 2.6: (a) Diagrama do motor de fase dividida e (b) características típicas de torque-velocidade; reproduzido de (4) apud (5).

Nesse motor, o enrolamento auxiliar é removido do circuito através do interruptor S , indicado na figura 2.6.a, após a partida do motor. Motores industriais utilizam normalmente interruptores centrífugos, os quais abrem o circuito após o motor atingir certa frequência rotacional (25, 32).

Os motores que utilizam esse arranjo costumam ter conjugado de partida moderado com baixa corrente de partida (figura 2.6.b) (31).

Para compressores, o desligamento é realizado, através de relés, PTC³ ou circuitos eletrônicos utilizando semicondutores (TSD⁴).

2.3.1.b Motor de fase dividida com capacitor de partida

Essa configuração utiliza um capacitor C em série com a bobina auxiliar, como mostra a figura 2.7.a. O capacitor tem como funções o deslocamento de fase no tempo entre as correntes dos dois enrolamentos e melhorar o desempenho de partida. Esses motores são utilizados, normalmente, em cargas com elevado torque e partida difícil (31).

³Do inglês *Positive Temperature Coefficient*.

⁴Do inglês *Time Starting Device*.

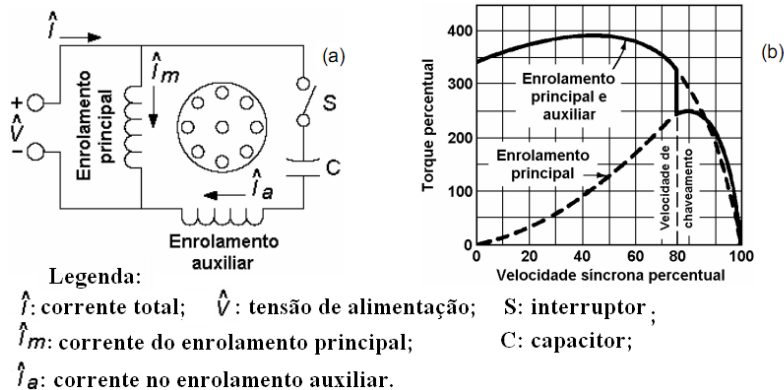


Figura 2.7: (a) Diagrama do motor de fase dividida com capacitor de partida e (b) características típicas de torque-velocidade; reproduzido de (4) apud (5).

2.3.1.c Motor de capacitor permanente

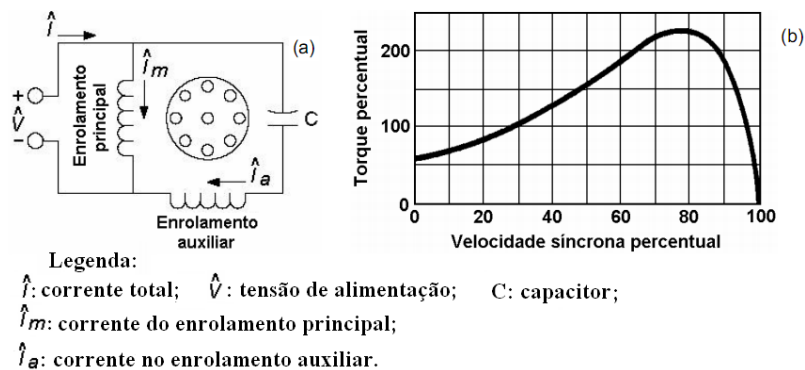


Figura 2.8: (a) Diagrama do motor com capacitor permanente e (b) características típicas de torque-velocidade; reproduzido de (4) apud (5).

Nos motores com capacitor permanente, o capacitor e o enrolamento auxiliar não são desconectados após a partida, o que simplifica a construção pela ausência de interruptores, como apresenta a figura 2.8.a.

A utilização do capacitor durante o funcionamento permite melhorar características como fator de potência, rendimento e pulsações no conjugado, diminuindo as vibrações (31). No entanto, possui torque de partida relativamente pequeno (figura 2.8.b).

2.3.1.d Motor de fase dividida com dois capacitores

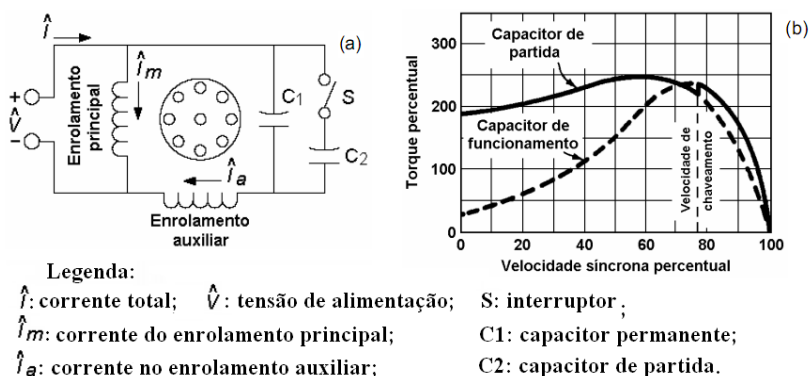


Figura 2.9: (a) Diagrama do motor de fase dividida com dois capacitores e (b) características típicas de torque-velocidade; reproduzido de (4) apud (5).

Essa configuração (figura 2.9.a) associa as características de alto torque de partida do motor com capacitor de partida (figura 2.9.b), e as características de bom rendimento do motor com capacitor permanente (4).

2.3.2 Arranjos elétricos usuais em compressores monofásicos

Os motores utilizados nos compressores da empresa líder mundial do setor são divididos em duas categorias em relação ao torque de partida: LST⁵ e HST⁶. Os compressores LST são empregados em sistemas que utilizam tubo capilar, o qual permite a equalização das pressões de sucção e descarga. Os do tipo HST são utilizados em

⁵Do inglês *Low Starting Torque*

⁶Do inglês *High Starting Torque*

sistemas que usam válvulas de expansão, ou mesmo tubos capilares, mas quando os períodos de parada são muito curtos. Dessa forma não ocorre equalização das pressões (33, 34).

De acordo com (33), esses motores são classificados como:

- RSIR Do inglês *resistance start – inductive run*. São os motores de fase dividida, utilizando um relé ou dispositivo do tipo PTC para desconectar o enrolamento auxiliar após a partida.
- CSIR Do inglês *capacitive start – inductive run*. Equivalem ao motor de fase dividida com capacitor de partida.
- RSCR Do inglês *resistance start – capacitive run*. Uma combinação de motor de fase dividida com capacitor permanente. Partem como um motor de fase dividida (utilizando um PTC) e conectam o capacitor após a partida.
- PSC Do inglês *permanent split capacitor*. Esses motores equivalem à configuração com capacitor permanente.
- CSR Do inglês *capacitive start and run*. Assemelham-se aos motores com capacitor permanente, mas após a partida, o capacitor auxiliar é desconectado, mantendo a bobina de partida no circuito.

2.4 Injeção de CC em motores CA

Em uma rede CA, a presença de uma componente CC é, normalmente, prejudicial pois cargas indutivas, como motores e transformadores, representam uma impedância muito baixa para corrente contínua. Isso aumenta a corrente nominal, provocando sobreaquecimento e saturação nos núcleos ferromagnéticos, por exemplo (35).

No entanto, a inserção de uma componente contínua em motores de corrente alternada pode ser utilizada com algumas finalidades conhecidas na literatura, e são destacadas nos itens 2.4.1 a 2.4.3.

2.4.1 Frenagem dinâmica

Uma tensão CC aplicada ao enrolamento de um motor de indução estabelece um campo magnético estacionário (figura 2.10.b). Assim, as forças eletromagnéticas induzidas no rotor tendem a se alinhar com esse campo estacionário, freando o motor (36, 37). A tensão CC aplicada é variável, bem como o tempo dessa injeção, de acordo com o motor. O valor da tensão determina a intensidade da frenagem. (37).

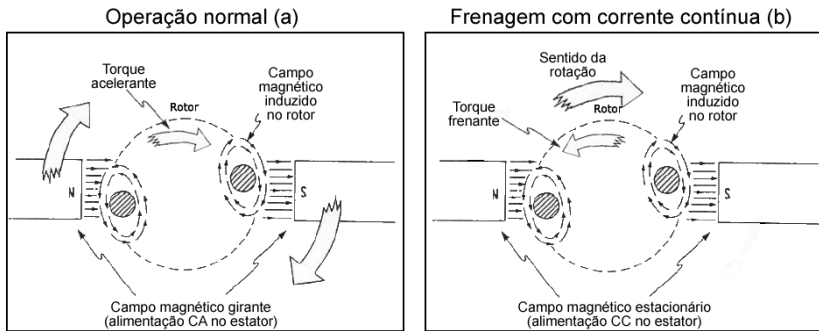


Figura 2.10: (a) Princípio de operação normal e (b) frenagem com corrente contínua.

A utilização de CC para a frenagem pode ser utilizada, principalmente, na ausência de circuitos eletrônicos de potência, os quais permitiriam a realização de uma frenagem regenerativa para o barramento CC ou ainda diretamente para a rede (38).

2.4.2 Medição de resistência

Sabe-se que a resistividade de um condutor de cobre varia de acordo com a temperatura de maneira aproximadamente linear para temperaturas na faixa de (0 a 400) °C, como mostra a figura 2.11 (4, 6).

A resistência de qualquer condutor (R) pode ser calculada através da equação (2.2).

$$R = \rho \cdot \frac{l}{A} \quad (2.2)$$

Onde:

ρ = resistividade;

l = comprimento;

A = área da seção transversal.

Na prática, metais puros, como a platina, o cobre e o níquel, são utilizados como RTD⁷. A platina é a preferida pela estabilidade do coeficiente de resistividade, alta temperatura de fusão (1769 °C) e resistência a corrosão. O cobre é usualmente empregado na medição de temperatura de motores e transformadores, utilizando o próprio enrolamento de cobre como elemento transdutor (39, 40).

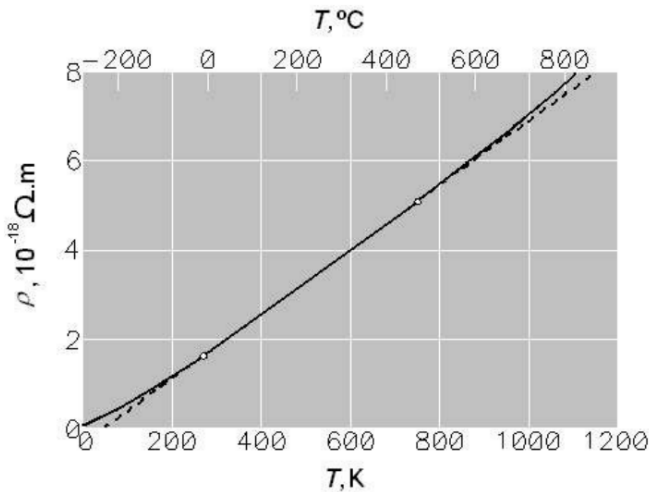


Figura 2.11: Curva de resistividade do cobre em função da temperatura. Fonte (4), adaptado de (6).

De fato, é comum na indústria a utilização da medição da resistência de enrolamento para estimar sua temperatura (33, 41, 25). Normalmente a medição é realizada após o desligamento do compressor, e com base em condições iniciais conhecidas, conforme a equação 2.3 .

$$T_c = \frac{R_c - R_f}{R_f} \cdot (234,5 + T_f) + T_f \quad (2.3)$$

⁷Termorresistor, do inglês *Resistance Thermometer Detectors*.

Onde:

T_c : temperatura desconhecida do enrolamento a quente;

T_f : temperatura de referência do enrolamento medida após estabilização;

R_c : resistência medida na temperatura T_c ;

T_f : resistência medida na temperatura T_f .

A medição após o desligamento provoca erros devido ao resfriamento da bobina. A norma NBR 7094 (41) propõe, entre outros, o método da superposição. Seguindo esse método, Pacheco (4) desenvolveu um sistema capaz de determinar a resistência do enrolamento injetando e medindo correntes contínuas na bobina principal do compressor, permitindo a medição da resistência interna com o compressor energizado.

2.4.3 Diminuição do tempo de transitório

Scussel (1) afirma que os comportamentos das curvas de temperatura do compressor podem ser considerados como típicos de um sistema de primeira ordem com constante de tempo definida. Mesmo com a utilização de uma tensão de alimentação acima da nominal, seja com sobretensão ou injeção de corrente contínua, o tempo de estabilização das temperaturas continua o mesmo, mudando apenas as temperaturas finais de estabilização.

A diminuição do tempo de aquecimento, então, provém da possibilidade de injetar corrente contínua no início do ensaio, para que a curva de aquecimento atinja uma temperatura superior a que seria atingida naturalmente para um mesmo intervalo de tempo. Na seqüência, retornar a alimentação para o valor nominal quando as temperaturas do compressor estiverem próximas do valor de estabilização, como ilustra a figura 2.12.

Os resultados obtidos por Scussel (1) são apresentados nas figuras 2.13 e 2.14, mostrando que a injeção de CC é eficaz com o compressor em movimento (figura 2.14), permitindo a distribuição do calor. A utilização de corrente contínua com o compressor em repouso concentra o calor na bobina do motor, como é apresentado na figura 2.13.

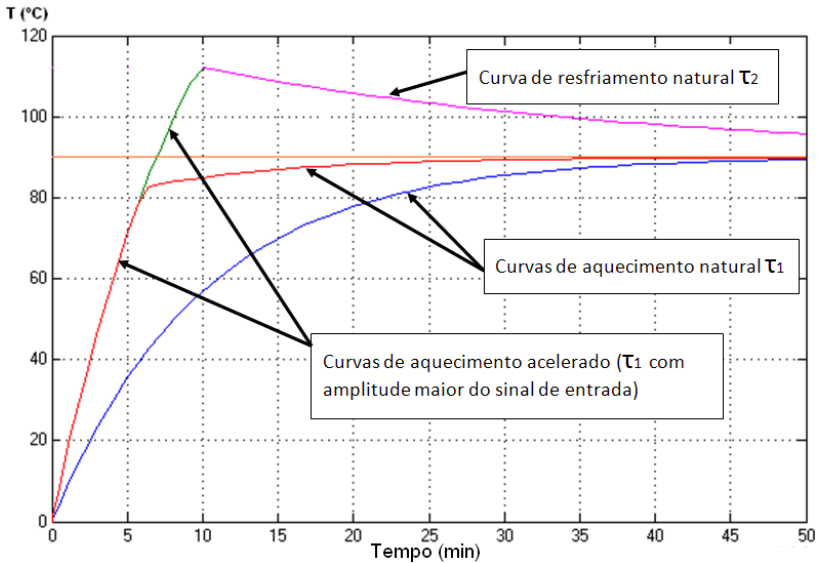


Figura 2.12: Ilustração da combinação de curvas de temperatura com e sem sobreaquecimento.

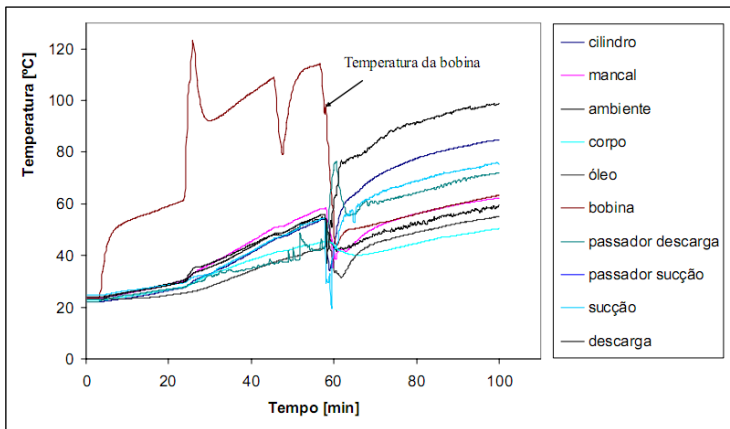


Figura 2.13: Ensaio em compressor com alimentação CC de 55 V sem corrente alternada com compressor em repouso (1).

No âmbito desta dissertação, dois novos ensaios foram realizados em um compressor modelo D^8 , com e sem injeção de corrente

⁸Vide apêndice G.

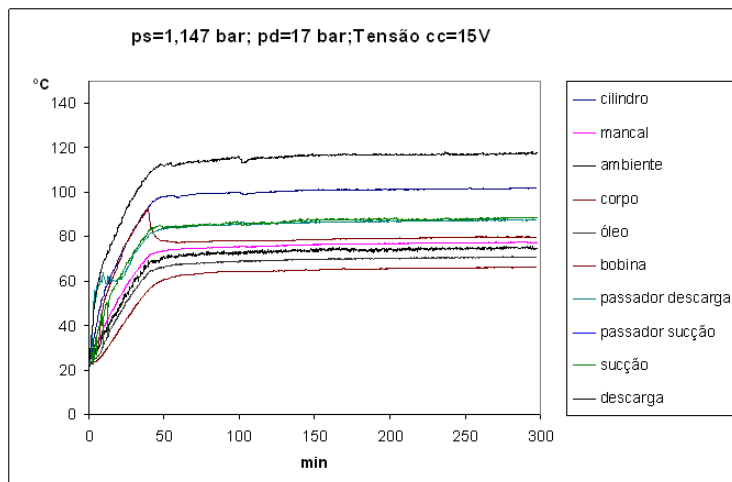


Figura 2.14: Ensaio com tensão de alimentação CA de 110 V e tensão CC por 40 minutos de 15 V com compressor em movimento (1).

contínua. Os resultados foram obtidos com o compressor fora de um sistema de refrigeração. O passador de descarga foi conectado ao processo, a fim de minimizar as perdas de óleo.

O primeiro ensaio, sem adição de corrente contínua, mostra o comportamento das temperaturas internas do compressor medidas em diversos pontos (figura 2.15). O compressor foi alimentado com tensão CA de 220 V. O tempo de estabilização da temperatura do corpo foi de aproximadamente duas horas.

A figura 2.16 apresenta os resultados do segundo ensaio. O compressor permaneceu sob as mesmas condições, porém com injeção de tensão CC de 20 V durante todo o teste. Pode-se visualizar que o comportamento é muito próximo do afirmado por Scussel (1), no qual as constantes de tempo das variáveis quase não mudam, apenas alterou-se o valor final de estabilização. Percebe-se o efeito principalmente sobre a bobina principal do compressor, pois é justamente esse componente que dissipa a energia elétrica adicionada ao sistema transferindo-a para o restante do compressor.

O valor da temperatura de estabilização do corpo mudou de 52 °C, do primeiro ensaio, para 66 °C no segundo. O tempo neces-

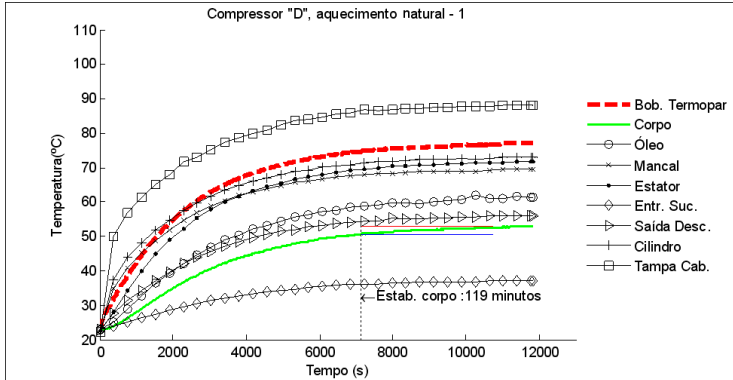


Figura 2.15: Perfis das temperaturas internas do compressor *D*. Ensaio realizado com o compressor a vazio e sem CC.

sário, no ensaio com injeção de CC, para que o corpo do compressor atingisse os 52 °C do ensaio sem CC foi de apenas 50 minutos. Isso representa uma redução de 50% do tempo gasto para se atingir essa temperatura.

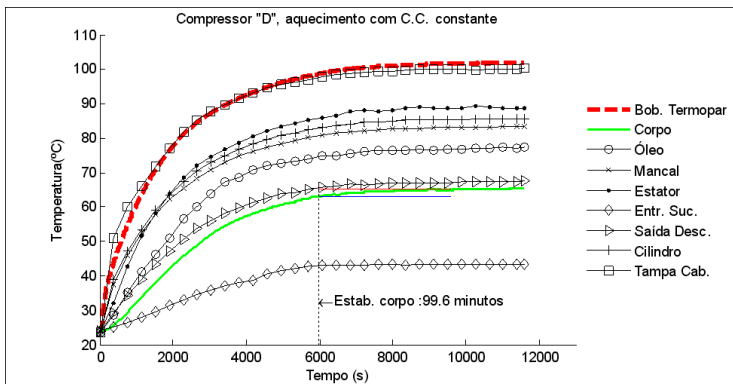


Figura 2.16: Perfis das temperaturas internas do compressor *D*. Ensaio com o compressor a vazio e com injeção CC constante de 20 V.

2.5 Conclusão

Este capítulo permitiu um conhecimento mais aprofundado do escopo dessa dissertação, incluindo a estrutura do compressor com seu motor elétrico e a bancada onde são realizados os ensaios de desempenho. O capítulo 3 apresenta uma proposta de sistematização da injeção de CC para aquecimento acelerado, permitindo a redução do tempo dos ensaios.

3 PROPOSTA DE MÉTODO DE ACELERAÇÃO DE TRANSITÓRIO EM ENSAIOS DE DESEMPENHO

Como discutido na seção 1.2, a injeção de corrente contínua no compressor pode ser utilizada para diminuir o tempo de transitório do ensaio. Scussel (1) indicou que a injeção de corrente contínua somente é eficiente se for utilizada com o compressor em movimento. Em suma, o método consiste em somar uma componente CC à alimentação CA, o que provoca o aumento das perdas elétricas e consequente aquecimento.

A transferência de calor é melhorada durante o funcionamento do compressor pela turbulência interna criada com a movimentação do rotor, do conjunto biela-manivela e do óleo bombeado pelo eixo. O óleo remove calor do interior do rotor, do cabeçote e o entrega ao corpo. (1)

Neste capítulo são mostradas diversas possibilidades de equipamentos capazes de adicionar uma componente contínua à alimentação alternada do compressor. Além disso são apontados alguns problemas devido à corrente contínua (sobretensão da bobina, corrente excessiva e presença do protetor térmico) e possíveis soluções e condições de contorno. Finalmente, é proposto um método para a aplicação da injeção de corrente contínua como forma de diminuição do tempo de transitório nos ensaios de desempenho.

3.1 Alternativas para injeção de corrente contínua

Nesta seção são apontadas algumas configurações elétricas capazes de injetar corrente contínua. É apresentada, inicialmente, a pro-

posta de utilização de fontes comerciais aptas a fornecer tensão contínua e alternada. Em seguida são analisados quatro circuitos para injetar corrente contínua a partir da alimentação alternada da rede. Esses circuitos são: gradador meia onda a tiristor; gradador meia onda com IGBT¹; inversor de frequência; e fonte CC variável em série com CA.

3.1.1 Fonte comercial

Para a verificação dos resultados apresentados em (1) foi utilizada uma fonte Agilent 6812B (figura 3.1), capaz de fornecer alimentação CA e CC. Além disso, foi possível simular as formas de onda geradas pelas soluções propostas. Isso comprovou que a injeção de corrente contínua é eficiente mesmo com formas de ondas distorcidas.



Figura 3.1: Fonte Agilent 6812B utilizada em diversos ensaios com injeção de CC.

A fonte 6812B tem como principais características (42) :

- faixa de tensão CA: (0 a 300) V (RMS);
- faixa de frequência: CC até 1 kHz;
- faixa de tensão CC (-425 a +425) V;
- incerteza na medição de tensão CC 0,05 % valor lido + 100 mV;
- incerteza na medição de corrente 0,05 % valor lido + 5 mA.

Tais características permitem conhecer, com baixas incertezas, os valores de tensão CC e corrente CC inseridas, possibilitando estimar a temperatura do enrolamento principal do compressor. Para se atingir

¹Transistor bipolar de porta isolada. Do inglês *Insulated Gate Bipolar Transistor*.

esses níveis de incertezas, no entanto, faz-se necessário utilizar a opção “*remote sense*” da fonte.

Devido à corrente de partida de vários modelos de compressores ser superior à corrente máxima fornecida pela fonte, é necessário que se dê a partida do compressor utilizando diretamente a rede de alimentação (ou outra fonte com potência suficiente), e, após a partida, comutar a alimentação para a fonte. No entanto, não se pode habilitar a leitura do *sense* externo enquanto o compressor não estiver sendo alimentado pela fonte 6812B. Se isto ocorrer, a fonte tentará fazer a compensação, pois estará medindo um valor diferente do valor desejado, e aumentará ou diminuirá indefinidamente o valor de saída na intenção de diminuir o erro. Isto provoca a atuação do sistema de proteção (de sobretensão) da própria fonte, desligando a saída da mesma.

É necessário, então, que se habilite a função “*external*” somente após a comutação da alimentação do compressor para a fonte 6812B. No entanto um outro problema foi detectado. Ao se habilitar essa opção (quando está desabilitada, é utilizado um “*sense*” interno aos conectores de saída da fonte) a fonte não comuta apenas a origem do sinal de tensão medido, mas também reinicia os valores do controlador interno. Assim, no momento da comutação a tensão de saída é reduzida para 0 V durante aproximadamente 100 ms (quase 5 ciclos de rede a 60 Hz) para então retornar ao valor original, seja 115 V ou 220 V (figura 3.2).

A interrupção temporária na tensão de alimentação pode provocar o “*tombamento*”² de alguns modelos de compressor, o que inviabilizou a utilização da fonte Agilent 6812B como uma solução definitiva para os painéis de ensaio de desempenho, tanto como fonte CA e CC, quanto como sistema de medição de resistência.

No entanto, foi possível utilizá-la para a verificação do método de aquecimento por inserção de CC, usando um sistema externo para medição de tensão e corrente CC, ao invés do uso do “*remote sense*”.

Existem também outros modelos de fonte comerciais capazes de fornecer tensão alternada e contínua simultaneamente. Outra fonte pesquisada foi o modelo FCAM 150–30–15 (43) do fabricante Supplier,

²Expressão utilizada para denominar a situação em que o motor para por não possuir torque suficiente para manter a rotação.

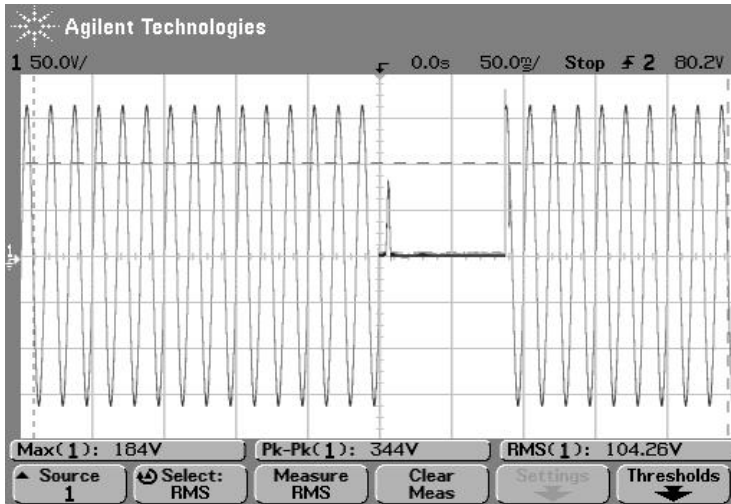


Figura 3.2: Interrupção do sinal de tensão da fonte 6812B na comutação do sense interno para externo.

também capaz de fornecer CA+CC e com as seguintes especificações:

- tensão eficaz de saída: 0 V a 300 V ;
- corrente máxima de saída: 12 A;
- potência máxima de saída: 1,5 kVA;
- frequência de saída: 0 a 150 Hz;
- comunicação serial: RS-232;
- medições de tensão, corrente, potência e fator de potência (sem informação de incertezas).

Obviamente as vantagens de se utilizar fontes comerciais são a praticidade, facilidade de acionamento e manutenção. Praticidade pois não demandam trabalho de desenvolvimento. Facilidade no acionamento, através de comunicação GPIB, RS-232, entre outras, normalmente disponíveis em fontes desse porte. Praticidade relativa na manutenção, pois o próprio fabricante (ou através de empresas autorizadas) presta os serviços de manutenção, isentando o usuário final desse trabalho.

No entanto a grande desvantagem ainda é o custo elevado de

tais equipamentos. A fonte Agilent 6812B possui custo superior a R\$30.000,00 enquanto a do fornecedor Supplier, aproximadamente R\$10.000,00 (valores em 2010). Além disso a própria manutenção da fonte, citada como vantagem, pode se tornar demasiadamente onerosa ou demandar muito tempo, quando há necessidade de envio do equipamento para uma assistência técnica muito remota.

3.1.2 Desenvolvimento de fonte

Dados obtidos da empresa analisada mostram que esta possui 47 bancadas para ensaio de desempenho de compressores. Assim, o custo tem um peso importante na decisão sobre a solução a ser adotada, e a utilização de uma fonte comercial por painel torna-se economicamente desfavorável. Por isso, uma parte deste trabalho dedicou-se a estudar possibilidades de se injetar CA e CC no compressor de uma forma mais simples e com custo reduzido. Nesta seção são apresentadas algumas alternativas que podem ser utilizadas em substituição à fonte comercial, apontando suas características, e possíveis vantagens e desvantagens quando comparadas às demais.

Determinação do modelo

Inicialmente foi necessário gerar um modelo elétrico equivalente do motor de indução, com a finalidade de simular os possíveis circuitos eletrônicos para a injeção de corrente contínua. Um modelo foi criado com base no compressor A³ (220 V / 60 Hz) cuja corrente nominal de catálogo é 1,03 A. A determinação do modelo, no entanto, foi feita utilizando o compressor “em aberto”, ou seja, desacoplado de um sistema de refrigeração. Desse modo, a carga do compressor era menor e a corrente medida foi de aproximadamente 0,85 A, cerca de 20% inferior à corrente nominal (figura 3.3).

O modelo equivalente utilizado foi o R–L–FCEM (resistor, indutor e força contra-eletromotriz), conforme figura 3.4, e o procedimento para determinação dos valores de R, L e FCEM foi:

1. medir a resistência do enrolamento principal (R);

³Vide apêndice G.

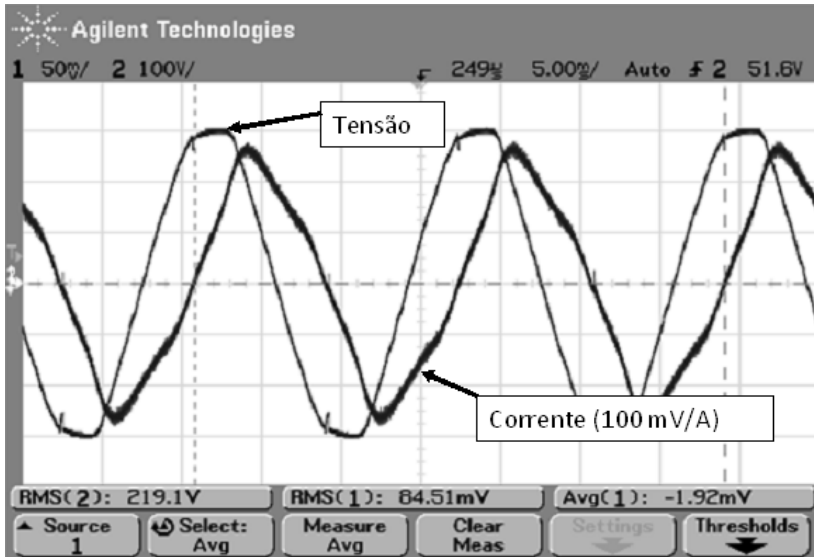


Figura 3.3: Ensaio realizado com compressor A sem carga.

2. medir a indutância do enrolamento principal (L);
3. ligar o compressor e medir a corrente RMS;
4. realizar simulações com o circuito R–L–FCEM, variando o valor de FCEM até que o valor RMS da corrente seja igual ao valor medido no ensaio.

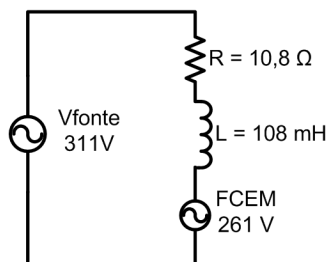


Figura 3.4: Circuito de simulação para determinação do modelo do compressor.

Os resultados apresentados na figura 3.5 mostram o valor da corrente de simulação muito próxima da corrente do ensaio, aproxima-

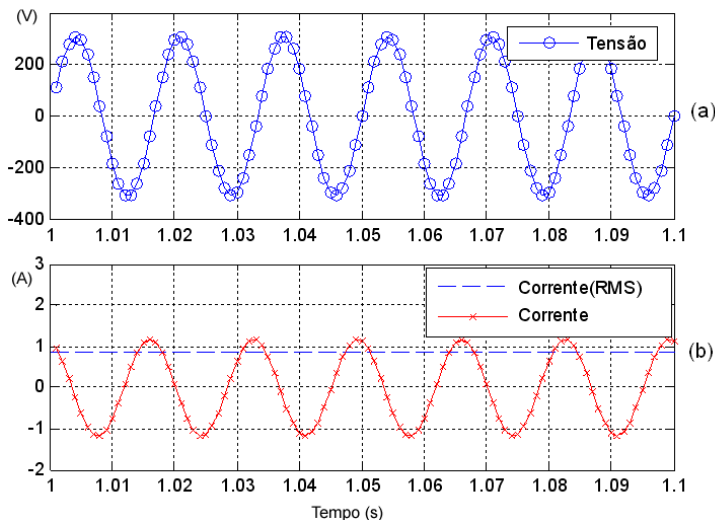


Figura 3.5: Simulação para determinação do modelo do compressor.

damente 0,84 A. Os valores obtidos para o modelo desse compressor foram: $R = 10,8 \Omega$; $L = 108 \text{ mH}$; e $FCEM = 261 \text{ V}$ (amplitude). Com esse modelo elétrico foram simuladas as diversas formas de tensão de alimentação dos possíveis circuitos geradores de CC. Assim foi possível analisar a capacidade de injetar corrente contínua na alimentação do compressor em relação à sua complexidade e custo.

Embora o modelo obtido não tenha sido utilizado nos ensaios com o gradador meia onda a tiristor, ele foi necessário para as simulações realizadas nas demais configurações.

Gradador meia onda a tiristor

Propôs-se criar um circuito gradador semelhante ao utilizado em *dimmers* de iluminação. Esses circuitos permitem alterar o valor eficaz da tensão fornecida à carga em função do ângulo de disparo de tiristores, para potências elevadas, ou de um TRIAC⁴(44). Realizando a “dimerização” em apenas um semiciclo, provoca-se o surgimento de

⁴Do inglês TRIode for Alternate Current. Componente equivalente a dois tiristores em anti-paralelo.

uma componente CC.

Para analisar o comportamento desse gradador não foi realizada nenhuma simulação. Devido a sua simplicidade, o circuito da figura 3.6 foi montado para a aplicação do TRIAC. A geração dos pulsos de disparo foi realizada através de um circuito baseado no integrado TCA 785 (7), necessitando de modificações simples para o disparo em apenas um dos semiciclos. Esse circuito é apresentado com mais detalhes na seção 4.1.2.

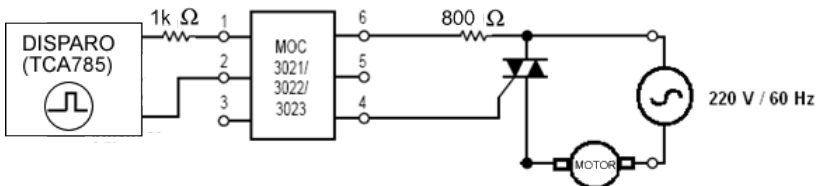


Figura 3.6: Circuito utilizado em ensaio de gradador a TRIAC.

Nas cargas resistivas o corte da tensão é feito no início do semiciclo, pois é quando a tensão se anula e, conseqüentemente, também a corrente. Como a carga do motor é fortemente indutiva (reatância indutiva $X_L \approx 40 \Omega$ e resistência $R \approx 10 \Omega$) a corrente só se anula certo tempo após a tensão (cerca de 75° de defasagem entre tensão e corrente). Assim, o corte da onda de tensão só poderá ser feito após o valor da corrente atingir zero ampère (comportamento dos tiristores) (44, 45, 46).

Como, no momento do corte da onda da rede, a tensão na carga não cai a zero, mas mantém o valor de FCEM, o nível de corrente contínua injetado é muito pequeno e, conseqüentemente, a corrente RMS aumenta muito pouco. Mesmo convertendo certa parte da tensão CA em tensão CC, o resultado obtido no ensaio é aquém do necessário para a aplicação.

As formas de onda resultantes desses ensaios são apresentadas na figura 3.7. A tabela 3.1 apresenta os valores de corrente medidos para os diferentes ângulos de disparo utilizados.

Foi verificada também a possibilidade de se utilizar um tiristor de roda livre para forçar a tensão da carga a permanecer próxima de zero (apenas com a queda de tensão direta do tiristor). Porém, como a corrente não se anula antes do início do próximo semiciclo, seria

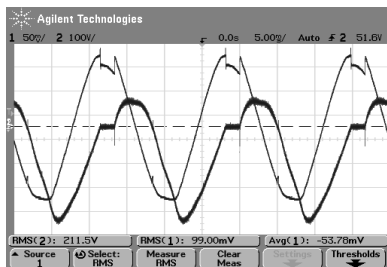
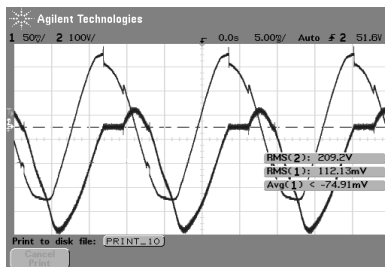
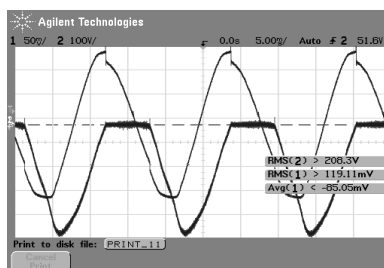
(a) $\alpha = 120^\circ$ e $I_{rms} = 0,99$ A.(b) $\alpha = 135^\circ$ e $I_{rms} = 1,12$ A.(c) $\alpha = 180^\circ$ e $I_{rms} = 1,19$ A.

Figura 3.7: Resultados dos ensaios com diferentes ângulos α de disparo.

provocado um curto circuito na fonte de alimentação quando o TRIAC fosse disparado para alimentar a carga com o próximo semiciclo da rede.

Gradador meia onda com IGBT

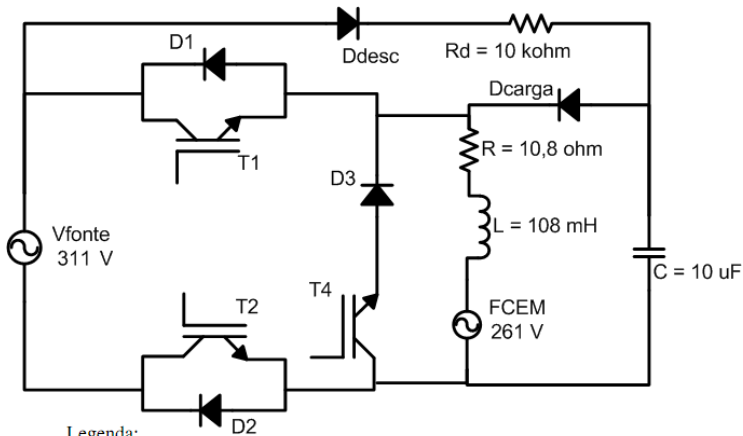
Foi investigada uma solução semelhante ao gradador meia onda a tiristor, porém com o uso de IGBT, pois estes componentes têm a característica de se bloquearem mesmo com corrente não nula (47).

O circuito simulado é apresentado na figura 3.8. A variação do nível de corrente contínua pode ser obtida pela variação do ângulo de comutação entre T4 e T2, ou seja, quanto mais tempo T4 conduzir, maior será o valor médio da tensão aplicada à carga.

O capacitor C foi utilizado para absorver o pico de sobretensão provocado pelo bloqueio do IGBT T4. Esse bloqueio não deixaria ca-

Tabela 3.1: Correntes para diversos ângulos de disparo utilizando TRIAC

Ângulo α de disparo	Corrente RMS
$90^\circ + 0^\circ$	0,84 A
$90^\circ + 30^\circ$	0,99 A
$90^\circ + 45^\circ$	1,12 A
$90^\circ + 90^\circ$	1,19 A



Legenda:

- Vfonte*: Tensão de alimentação
- R*: Resistor do modelo do motor
- L*: Indutor do modelo do motor
- FCEM*: Força contra-eletromotriz do modelo do motor
- T1*: IGBT de funcionamento do semiciclo positivo
- T2*: IGBT de funcionamento do semiciclo negativo
- T4*: IGBT de roda livre
- D1*: Diodo de funcionamento do semiciclo negativo
- D2*: Diodo de funcionamento do semiciclo positivo
- D3*: Diodo de bloqueio de corrente inversa em T4
- Ddesc*: Diodo de descarga do capacitor C
- Rd*: Resistor de descarga do capacitor C
- Dcarga*: Diodo de carga do capacitor C

Figura 3.8: Circuito simulado do gradador meia onda com IGBT de roda livre e circuito grampeador.

minho para a corrente no indutor L fluir provocando, desse modo, o pico de tensão. Como o IGBT $T4$ deve ser bloqueado antes da condução de $T1$ ou $T2$ (tempo morto – caso contrário haveria um curto

circuito na fonte de alimentação), o capacitor foi utilizado como grampeador. Além disso, optou-se por descarregar o capacitor para a fonte de alimentação ao invés de dissipar essa energia diretamente em um resistor. Dessa maneira há menor geração de calor, além de um componente de potência a menos no circuito.

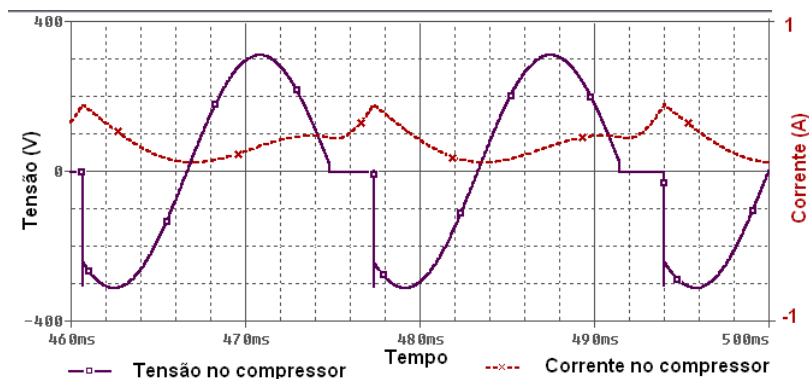


Figura 3.9: Simulação do circuito com IGBT de roda livre.

O circuito mostrou-se robusto, conforme apresentado na figura 3.9, mesmo com valores relativamente pequenos de capacitância ($10 \mu\text{F}$) e grandes valores de R_d ($10 \text{ k}\Omega$ – resistor de descarga do capacitor), pois a energia acumulada no intervalo de tempo entre o bloqueio de T_4 e desbloqueio de T_1 e T_2 é pequena. Até mesmo com intervalos de tempo maiores que $5 \mu\text{s}$ (originalmente foi estipulado um tempo morto – ΔT – dez vezes menor; $0,5 \mu\text{s}$), o capacitor foi capaz de absorver a energia, evitando a sobretensão.

A seqüência ilustra o sentido da corrente, e quais componentes estão conduzindo, nos diferentes tempos de condução.

- Figura 3.10. Primeira etapa: semiciclo positivo. No semiciclo positivo, a corrente passa pela carga através do IGBT T_1 e do diodo D_2 . O IGBT T_4 permanece bloqueado, embora o seu sinal de comando seja habilitado um pouco antes do semiciclo positivo terminar. Com a tensão ainda maior que zero, mesmo com sinal positivo no gate do IGBT T_4 , este ainda não conduz, pois o diodo D_3 bloqueia a passagem da corrente. Desse modo, o IGBT

está pronto a conduzir, mas só passará a conduzir realmente após o bloqueio do IGBT $T1$.

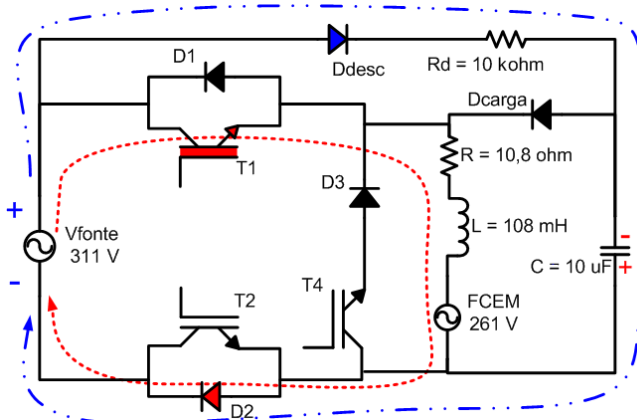


Figura 3.10: Início do semiciclo positivo, com indicação da corrente de descarga do capacitor.

- Figura 3.11. Segunda etapa: início do semiciclo negativo. Período de tempo em que o IGBT de roda livre conduz. Instantes antes de a tensão de alimentação chegar a zero, os IGBT $T1$ e $T2$ são bloqueados. Se $T2$ não estiver bloqueado haverá um curto circuito na fonte quando esta estiver levemente negativa (com tensão suficientemente negativa para polarizar $D3$ e $D1$). Com o bloqueio de $T1$ e $T2$, a corrente que circulava na carga passará a circular pelo IGBT de roda livre $T4$, fazendo com que a tensão na carga seja (idealmente) nula.
- Figura 3.12 Terceira etapa: tempo morto entre as comutações dos IGBT. Da mesma forma que foi necessário bloquear $T2$ e $T1$ antes que $T4$ passasse a conduzir, é necessário bloquear $T4$ antes de habilitar novamente $T1$ e $T2$ para evitar o curto-circuito na fonte de alimentação. No entanto, durante esse intervalo de tempo a corrente em L não teria caminho para circular, o que causaria um bloqueio quase instantâneo na corrente e levaria a

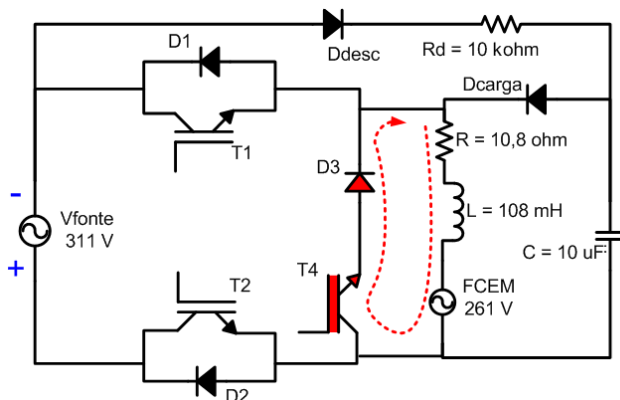


Figura 3.11: Início do semiciclo negativo, condução do IGBT de roda livre.

tensão a níveis muito elevados ($V = L \cdot di/dt$). Para evitar esse pico de sobretensão, foi utilizado um circuito composto por um capacitor (C), dois diodos (D_{desc} e D_{carga}) e um resistor (R_d) para absorver essa energia e grampear a tensão (circuito grampeador). O valor do capacitor varia de acordo com o intervalo de tempo entre o bloqueio de T_4 e desbloqueio de T_2 (tempo morto). Além disso, a descarga do capacitor deverá ser lenta (comparada com o intervalo de carga) para diminuir as correntes, além de evitar ciclos de carga e descarga. Desse modo o capacitor permanecerá sempre carregado (aproximadamente com a tensão de pico da tensão de alimentação), aumentando sua vida útil.

- Figura 3.13. Quarta etapa: Início do semiciclo negativo. Após a comutação habilitando novamente T_1 , a carga é conectada de volta à fonte de alimentação e a corrente na carga passa a diminuir, eventualmente invertendo de sentido. Em algumas simulações, dependendo do valor nominal da corrente da carga e da relação entre tensão CC e tensão CA, a condução é contínua na carga e o sentido da corrente não se inverte.

A solução com IGBT se mostrou promissora. Nas simulações foram obtidas formas de onda em tensão semelhantes a um gradador

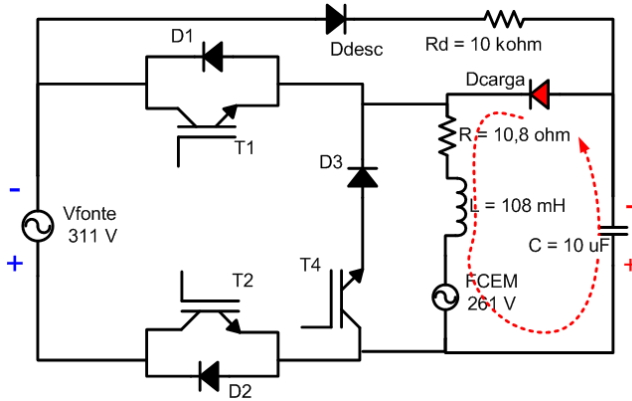


Figura 3.12: Tempo morto entre as comutações. Carga do capacitor.

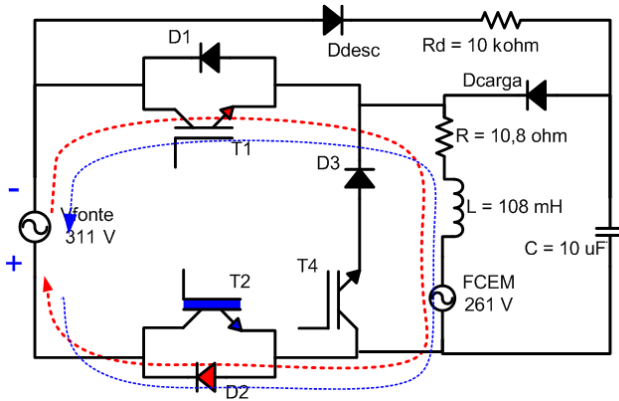


Figura 3.13: Semiciclo negativo. Diminuição da corrente e possível inversão do sentido.

comum com carga resistiva, mesmo utilizando carga indutiva (modelo do motor), e valores de correntes RMS de até 2 A com ângulos de disparo de 45° . Nesse caso, quanto maior o ângulo de disparo, maior a corrente CC injetada. Realizou-se um ensaio em um compressor (modelo F^5) aplicando a forma de onda de tensão obtida através do circuito com a utilização da fonte 6812B. O resultado é apresentado na figura 3.14. Verifica-se que as formas de onda da simulação e do ensaio

⁵Vide apêndice G.

são bastante semelhantes e comprovam o surgimento da componente CC.

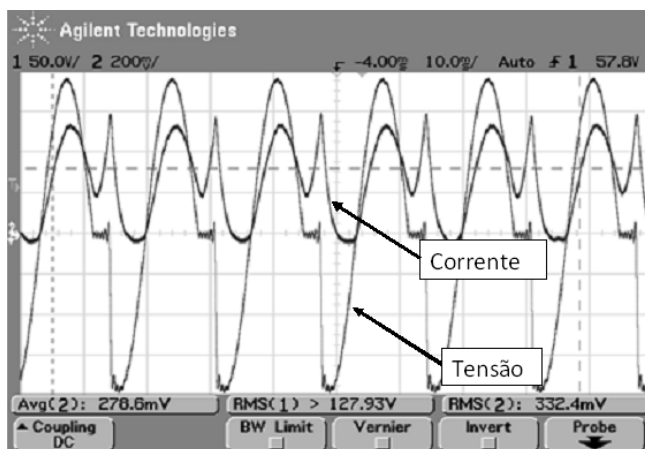


Figura 3.14: Ensaio realizado com compressor F (220 V / 60 Hz) fora do circuito de refrigeração.

Inversor de frequência

Outra alternativa é a construção de um inversor de frequência monofásico. Para que o inversor injete uma componente CC, basta que um dos semiciclos tenha o valor médio maior que o outro.

Foi utilizado o circuito da figura 3.15 para simular um inversor simples. Ao conduzirem, os IGBT $T1$ e $T3$ aplicam a tensão do barramento CC sobre a carga com uma certa polaridade, enquanto $T2$ e $T4$ aplicam a mesma tensão, mas com polaridade invertida. De forma semelhante ao explanado na seção 3.1.2, há a necessidade de um “tempo morto”, no qual nenhum dos IGBT conduz. Durante esse período de tempo, os diodos de roda livre dos IGBT conduzem.

Nessa simulação a carga (motor) foi alimentada com uma tensão com forma de onda quadrada por motivos de simplicidade do circuito de disparo dos IGBT. No circuito final o acionamento pode ser realizado por PWM⁶, com uma tensão de saída próxima de uma senoide.

⁶Modulação por largura de pulso, do Inglês *Pulse Width Modulation*.

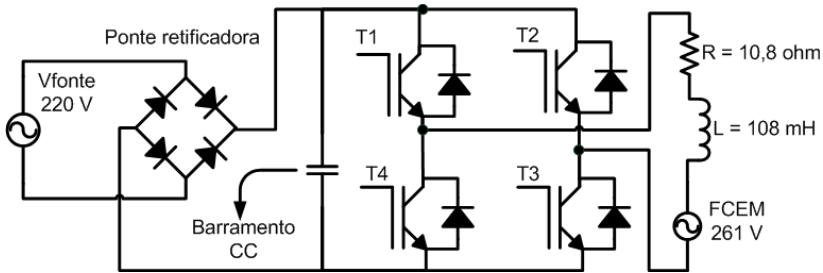


Figura 3.15: Circuito simulado de inversor simples.

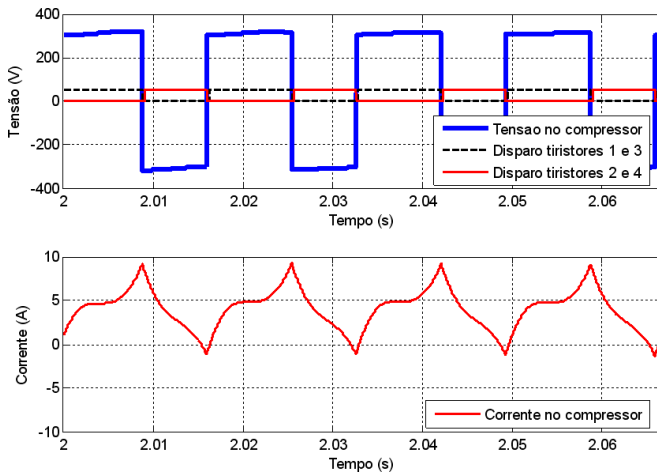


Figura 3.16: Formas de onda de tensão e de corrente do circuito simulado.

Nessa simulação, o semiciclo positivo possui maior duração, e a diferença entre eles é de 30° . Isso resultou em uma tensão CC de aproximadamente 40 V. A corrente no motor obteve valor eficaz de 4,6 A, enquanto a parcela CC foi de 4,0 A.

Fonte CC variável em série com CA

É proposta uma estrutura com o princípio de inserir uma fonte de tensão de corrente contínua em série com a alimentação principal

de corrente alternada. Este circuito consiste em conectar um capacitor em série com o compressor e, paralelamente, carregar o capacitor com tensão contínua através de um transformador isolador e uma ponte retificadora, conforme a figura 3.17.

Para variar o valor da tensão CC, é utilizada uma ponte de tiristores, assim, variando-se o ângulo de disparo altera-se o valor médio da tensão na saída da ponte e, conseqüentemente, no capacitor.

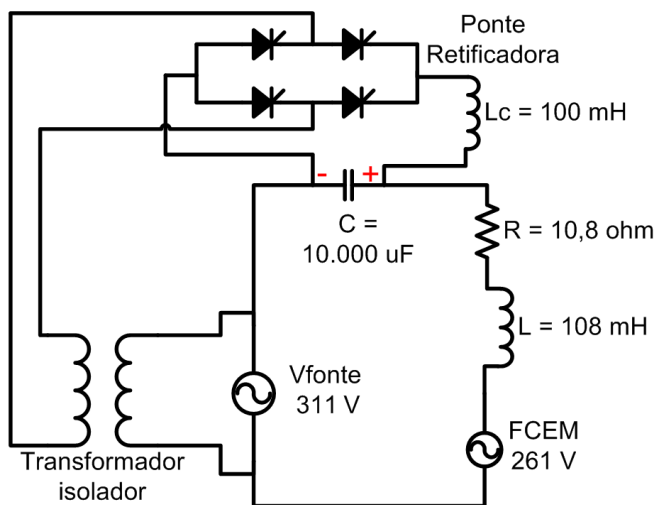


Figura 3.17: Circuito simulado de fonte CC variável em série com fonte CA.

O indutor L_c diminui o pico de corrente no capacitor e na ponte de tiristores, porém o aumento da indutância provoca uma diminuição da tensão média em C . As figuras 3.18 e 3.19 ilustram, respectivamente, as simulações das formas de onda de corrente e de tensão no capacitor C , para valores de indutor L_c de 1 mH, 10 mH e 100 mH. Em todas as simulações o valor da capacitância C foi de $10.000 \mu\text{F}$ e o ângulo de disparo de 30° .

A tensão no capacitor será a tensão CC aplicada à carga. Dessa forma, mesmo necessitando de capacitâncias relativamente elevadas ($10.000 \mu\text{F}$), o tamanho e o custo desse capacitor não são inviáveis, pois se pode utilizar capacitores eletrolíticos.

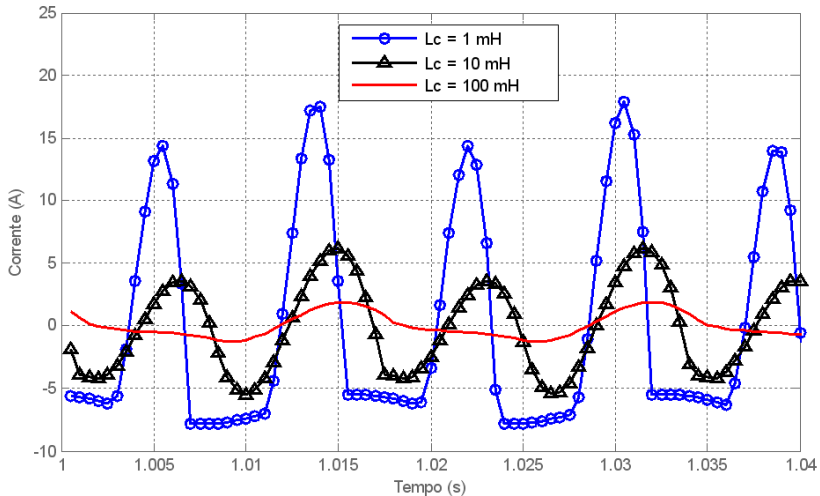


Figura 3.18: Corrente no capacitor para diferentes valores de L_c e mesmo ângulo de disparo (30°).

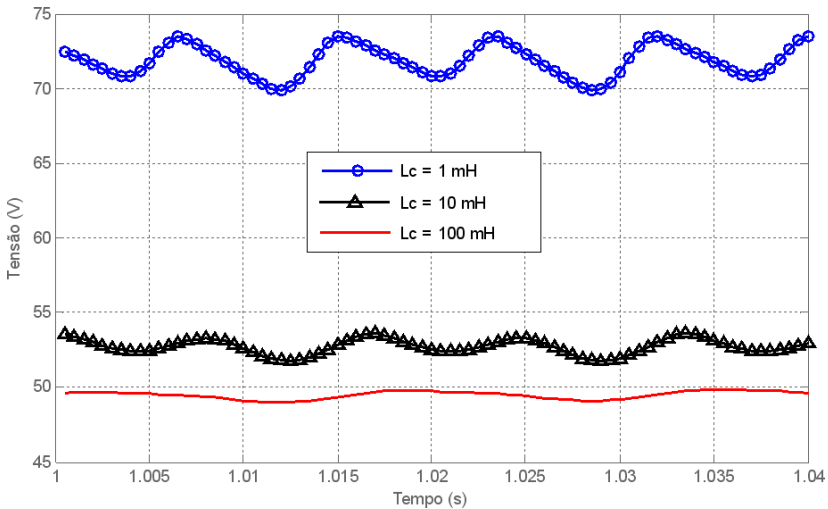


Figura 3.19: Tensão no capacitor para diferentes valores de L_c e mesmo ângulo de disparo (30°).

A figura 3.20 apresenta os resultados de simulação para diferentes ângulos de disparo com o indutor L_c de 10 mH e capacitor C de $10.000 \mu\text{F}$. Observa-se que quanto maior o ângulo de disparo, menor a

tensão média resultante no capacitor, como esperado.

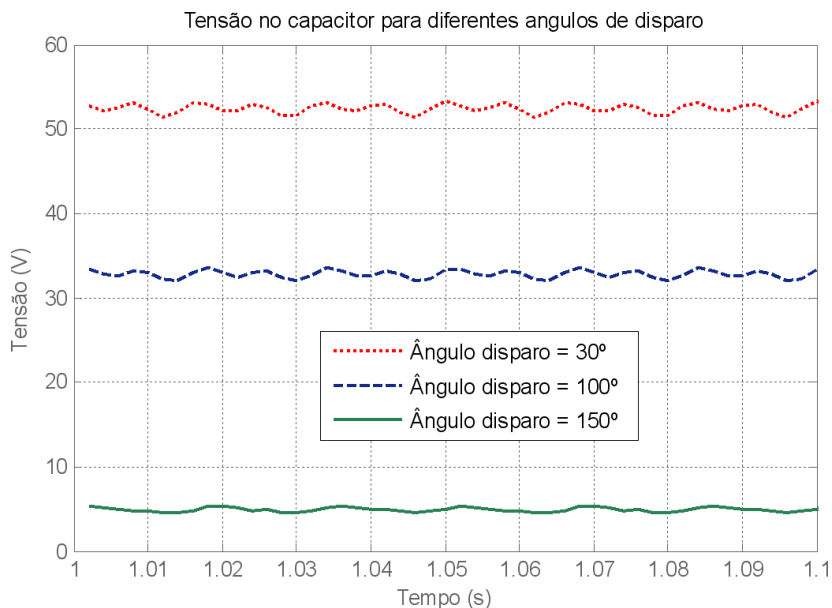


Figura 3.20: Tensões no capacitor para diferentes ângulos de disparo α (30° , 100° e 150°).

3.1.3 Solução escolhida

Após análise de todas as possibilidades, concluiu-se que a fonte CC variável em série com CA, além de simples, possui um diferencial que é a injeção de mais energia no sistema. Essa energia extra é limitada apenas pela potência máxima dos componentes utilizados. As opções de gradador basicamente “trocam” uma parte da energia alternada, transformando-a em contínua, e como a reatância indutiva possui um valor maior se comparado à resistência, a corrente eficaz aumenta. No entanto, esse aumento da corrente eficaz é limitado, pois há um limite máximo de troca de CA para CC.

Adicionalmente, tanto o aumento da corrente CC quanto a diminuição da corrente CA provocam aumento no escorregamento do

motor. Nas soluções gradadoras esses efeitos se somam, enquanto que para a solução escolhida não há diminuição da parcela alternada da tensão. Na opção com inversor de frequência também há um limite máximo de tensão contínua injetável, mas esse limite depende apenas da tensão máxima de entrada, a qual pode ser facilmente elevada com a utilização de transformadores. No entanto, devido à sua simplicidade, a solução escolhida para a construção de um protótipo foi a fonte CC variável em série com CA.

3.2 Operacionalização da injeção de CC

Dado que é possível diminuir o tempo de transitório utilizando corrente contínua (seção 2.4.3) e que também existe a possibilidade de se fazer isso com um equipamento de custo reduzido (seção 3.1.2), é necessário definir um método para tornar essa solução eficiente e robusta, permitindo sua implantação com o menor impacto possível ao resultado do ensaio de desempenho.

É preciso adotar uma estratégia na qual não se ultrapasse a temperatura que seria atingida naturalmente pelo corpo, ou que esse aumento seja o menor possível. Como o resfriamento é lento (convecção natural), corre-se o risco de gastar mais tempo resfriando do que o tempo economizado no aquecimento. Nesta seção é explicada, em detalhes, a solução proposta para permitir a injeção de CC de modo sistemático e eficaz.

3.2.1 Limite da temperatura da bobina

O aquecimento do compressor pela injeção de corrente contínua acontece através das perdas por efeito Joule, principalmente nos enrolamentos do estator. No entanto, o aquecimento excessivo da bobina, acima de 130 °C, pode provocar a degradação do verniz isolante dos condutores e causar um curto-circuito no enrolamento, destruindo, conseqüentemente, o motor elétrico e inutilizando o compressor (33). Desse modo, é necessária uma forma de limitar a temperatura da bobina, para que esta não exceda a temperatura máxima permitida.

Como neste trabalho também é injetada corrente contínua com a finalidade de aquecimento, os valores resultantes de tensão e corrente

CC podem ser medidos e utilizados para determinar a resistência do enrolamento e inferir sobre a temperatura da bobina. Isso permite a medição em tempo real, já que não é possível desligar o compressor durante o ensaio de desempenho.

Além de comprometer a integridade do compressor, uma temperatura excessiva dos enrolamentos durante a obtenção dos resultados do ensaio pode ocasionar uma alteração no consumo. Isso porque o aumento da resistência da bobina causa maiores perdas elétricas. Desse modo, é importante minimizar a sobretemperatura da bobina e analisar se a alteração no consumo do compressor é significativa a ponto de comprometer os resultados.

Propôs-se, neste trabalho, desenvolver um sistema de medição de resistência semelhante ao desenvolvido em (4), adaptando-o de acordo com as correntes utilizadas. Os equipamentos desenvolvidos para medir a tensão e a corrente contínuas serão detalhados no capítulo 4.

3.2.2 Controle de temperatura e filtragem do sinal

Durante os ensaios, percebeu-se que, além de limitar a temperatura da bobina, evitando atingir o limite máximo, a temperatura medida pode ser utilizada como realimentação para um sistema de controle, mantendo-a em um valor desejado. Dessa forma o aquecimento acelerado do corpo do compressor pode ser realizado utilizando diferentes temperaturas de bobina como fonte de aquecimento para distintos modelos de compressor.

Para o ajuste do controlador foram realizados ensaios com três modelos diferentes de compressores, como apresentado na figura 3.21.

Para os ensaios com injeção de CC ilustrados nas figuras 3.21(a), 3.21(b) e 3.21(c) foi utilizada uma tensão contínua de 19,0 V, 18,4 V e 5,7 V respectivamente. Obteve-se, então, os modelos teóricos de comportamento da temperatura da bobina, em função da tensão CC injetada, para cada compressor e, a partir desses, um novo modelo que expressa o comportamento médio. Esse modelo ($P_n(s)$) é apresentado na forma de função de transferência, conforme a equação 3.1.

$$P_n(s) = \frac{1}{900s + 1} \quad (3.1)$$

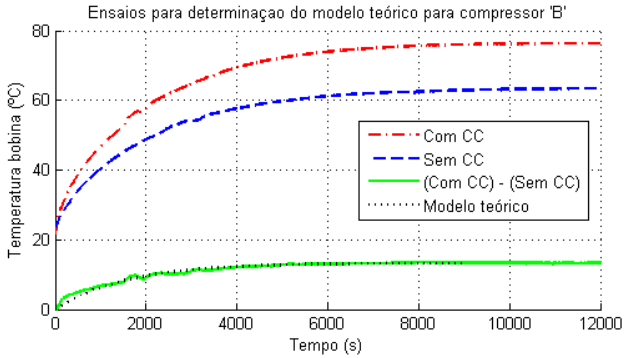
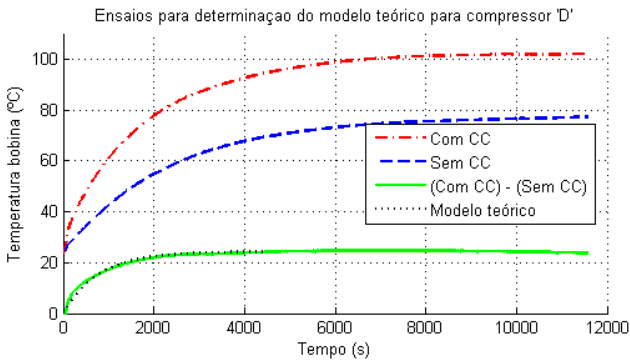
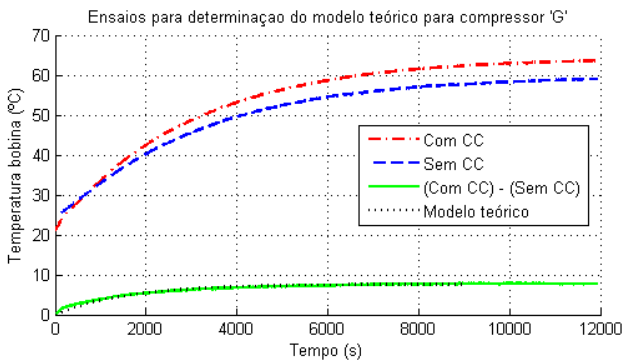
(a) Ensaio com compressor *B*(b) Ensaio com compressor *D*(c) Ensaio com compressor *G*

Figura 3.21: Ensaio para determinação dos modelos teóricos de primeira ordem da temperatura da bobina.

Onde:

$P_n(s)$: função de transferência do modelo médio;

s : variável no domínio da frequência $s = j\omega$;

Essa função de transferência foi utilizada para o ajuste inicial de um controlador Proporcional – Integral (PI) (48). Não foi utilizado um controlador PID devido à característica de ruído do sinal, proveniente das medições de tensão e de corrente.

O controle PI utilizado possui estrutura conforme a equação 3.2. O aumento no valor de T_i permitiu uma ação maior da parcela integral do controlador e menor da parcela proporcional. Desse modo, variações bruscas na entrada do controlador não provocam variações muito bruscas na saída.

$$P_c(s) = \frac{K(s + 1/T_i)}{s} \quad (3.2)$$

Onde:

$P_c(s)$: função transferência do controlador ;

K : ganho proporcional;

s : variável no domínio da frequência $s = j\omega$;

T_i : ganho Integral.

Após essa sintonia inicial houve um ajuste fino dos parâmetro K e T_i com novos ensaios. Os valores que apresentaram bons resultados nesses ensaios são: $K = 0,5$ e $T_i = 0,2$. O aumento no valor de T_i permitiu uma ação maior da parcela integral do controlador. Desse modo, variações bruscas na entrada do controlador não provocam variações muito bruscas na saída.

Foi necessário deixar o controle “lento”, pois a tensão de saída (esforço de controle) altera a tensão CC. Existe um atraso entre a estabilização dos valores de tensão e corrente. Isso se deve à ação do filtro passa baixas utilizado no sistema de medição de tensão (detalhado na seção 4.2.1), ao capacitor da fonte e à própria carga, de característica indutiva. Essa defasagem provoca erros no valor da resistência e, conseqüentemente, na temperatura, toda vez que se altera a tensão CC. Como a função do controlador é reagir às variações do valor medido,

a tensão de saída sofrerá alterações a cada período de amostragem, no sentido de diminuir o erro. Para minimizar esse efeito “bola de neve” foi necessária a utilização de um filtro no sinal de temperatura que realimenta o controlador.

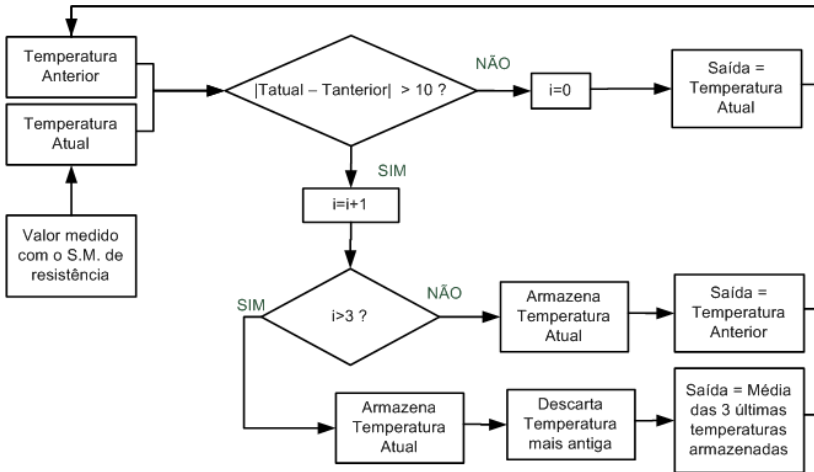


Figura 3.22: Fluxograma da primeira parte do filtro digital.

Foi desenvolvido um filtro digital composto de duas partes. A primeira parte é um algoritmo digital, ilustrado na figura 3.22. A segunda parte consiste de uma função transferência de primeira ordem (passa baixas).

O algoritmo do primeiro estágio do filtro pode ser descrito da seguinte maneira:

- verificar se a diferença, em módulo, entre os valores atual e anterior de temperatura é maior que 10 °C;
- se for inferior a 10 °C, o valor de saída é igual ao valor de entrada;
- se for superior a 10 °C, o valor atual é armazenado e o valor anterior é passado como saída;
- se for superior a 10 °C três vezes consecutivas é passada a média dos três últimos valores armazenados;

- todos os valores de saída são limitados entre +20 °C e +150 °C.

A função dessa etapa do filtro é eliminar valores muito diferentes dos anteriores. Sabe-se que o comportamento térmico tem natureza lenta e dificilmente ocorrerão variações muito bruscas de temperatura. Se a perturbação persistir por muito tempo, normalmente provenientes de erros inerentes à não estabilidade da tensão contínua, é passada a média dos três últimos valores medidos, pois esses valores armazenados na memória podem conter ainda parte da tendência do sinal.

Caso a origem da perturbação cesse antes de três períodos de amostragem, e a temperatura medida for próxima do último valor válido (com erro em relação ao valor anterior menor que 10 °C), essa temperatura é passada diretamente ao controlador. Além disso, a saturação provocada pelo filtro limita os erros que persistem por até três vezes consecutivas e evita valores extremos.

A segunda parte do filtro consiste de uma função transferência de primeira ordem (filtro de primeira ordem) com ganho unitário e frequência de corte de aproximadamente 0,02 Hz. Como o sistema de controle é discreto, o filtro projetado originalmente no domínio s da frequência foi passado para o domínio z . Para essa transformação foi utilizada uma tabela (12, p.106) de transformadas (equações 3.3 e 3.4).

$$F(s) = \frac{1}{10s + 1} \rightarrow fc = 0.02 \text{ Hz} \quad (3.3)$$

Onde:

fc : frequência de corte em Hz.

$$F(z) = \frac{0,22}{z - 0,78} \rightarrow T_s = 2,5 \text{ s} \quad (3.4)$$

Onde:

T_s : período de amostragem.

A segunda parte do filtro permite que, mesmo com a existência de ruídos após três medições consecutivas, o sinal de temperatura informado ao controlador possua uma transição suave (comportamento de primeira ordem). A frequência de corte foi determinada através

de simulações e verificada experimentalmente. Esse valor de f_c faz com que uma perturbação de $10\text{ }^\circ\text{C}$, diferença máxima permitida da primeira parte do filtro, com duração de um período de amostragem (2,5 s) sofra uma atenuação de aproximadamente 80%.

3.2.3 Corrente máxima injetada e tempo de injeção

Além da possibilidade de superaquecimento da bobina, acima da temperatura máxima permitida pelo isolante, outro efeito prejudicial da injeção de corrente contínua é o risco de bloqueio do rotor. Como a corrente contínua aumenta a carga do motor, essa injeção não deverá ultrapassar um valor no qual haja a possibilidade de tombamento.

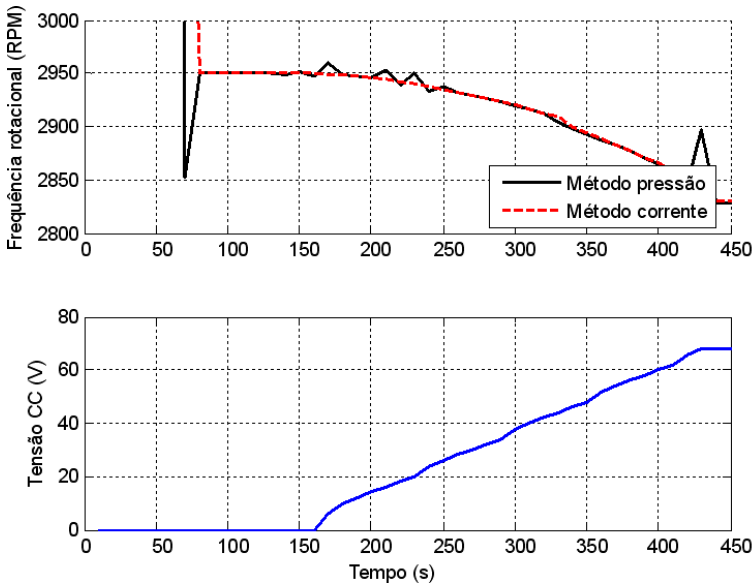


Figura 3.23: Influência da injeção de corrente contínua na frequência rotacional para um modelo de compressor.

Demay (49) desenvolveu sistemas capazes de medir a frequência rotacional do compressor através de diferentes métodos. Alguns desses métodos já foram implantados e testados na bancada de ensaio

de desempenho de compressores. Eles medem a frequência rotacional, indiretamente, através da pulsação da pressão de descarga, e através da forma de onda da corrente de alimentação do compressor.

É possível utilizar o sinal já existente de frequência rotacional para evitar que o nível de corrente contínua injetada provoque uma frenagem exagerada no compressor. De acordo com informações levantadas junto à empresa líder mundial, os motores elétricos presentes nos compressores podem operar com segurança (sem a possibilidade de bloqueio do rotor) com um escorregamento de até 10%. Sendo assim, limitou-se o escorregamento do compressor em 8%, para uma margem ainda maior de segurança.

A figura 3.23 apresenta o comportamento da frequência rotacional em função da variação da tensão CC injetada para um dos ensaios realizados. Diferentes modelos de compressor, no entanto, apresentam maior ou menor sensibilidade na variação da rotação.

É proposto, então, injetar uma quantidade variável de corrente contínua, mantendo constante a temperatura da bobina. A temperatura é levada ao valor de estabilização o mais rapidamente possível e mantida nesse valor até o fim do aquecimento, que é determinado pela proximidade da temperatura do corpo ao seu valor de estabilização. Para a realização desse procedimento, é necessário conhecimento prévio dos valores de estabilização das temperaturas da bobina e do corpo.

Com essa técnica, conseguiu-se redução de até 62% do tempo de aquecimento em relação aos 120 minutos naturalmente gastos para atingir a estabilização (figura 3.24). Os ensaios foram realizados utilizando valores errados de temperatura de estabilização do corpo do compressor de $-4\text{ }^{\circ}\text{C}$ até $+4\text{ }^{\circ}\text{C}$, de forma a simular a incerteza do valor que será obtido do histórico (uma média dos valores de ensaios anteriores para o mesmo modelo sob as mesmas condições).

Mesmo com resultados satisfatórios, a análise das curvas de temperatura indicou que, no início do aquecimento, é possível utilizar um valor maior para a temperatura da bobina (respeitando o limite máximo do isolante) de modo a aumentar a dissipação de energia nessa etapa.

Dessa forma, o aquecimento foi dividido em dois estágios. No primeiro estágio a sobretensão imposta na bobina é de $15\text{ }^{\circ}\text{C}$, no

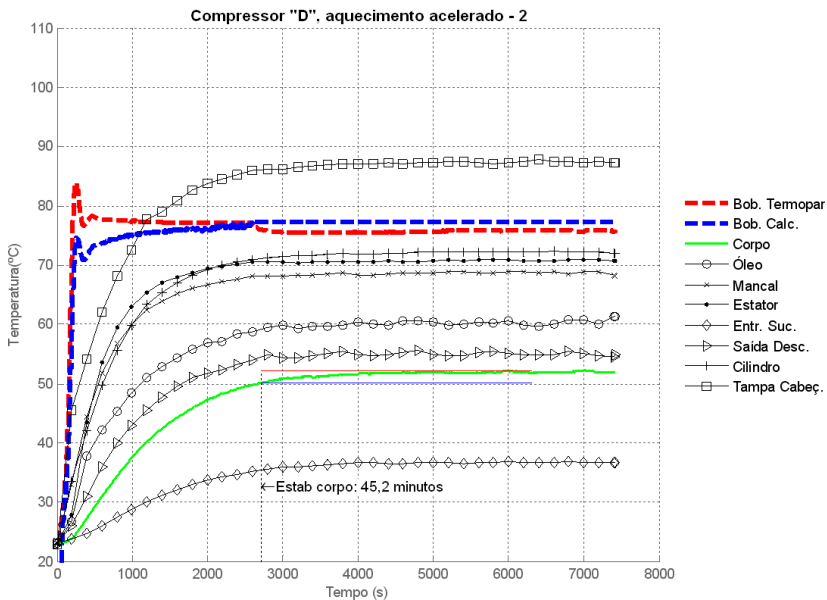


Figura 3.24: Aquecimento com controle da temperatura da bobina. *Setpoint* no valor de estabilização.

segundo estágio a sobretemperatura diminui para 8 °C. O segundo estágio permite uma acomodação melhor da curva de temperatura da bobina, diminuindo o sobreaquecimento do corpo. Utilizando esse procedimento, conseguiu-se tempos entre 25 e 40 minutos de aquecimento do corpo.

Foi realizada uma tentativa de se determinar o valor de estabilização através da extrapolação do transitório inicial pelo ajuste de uma curva exponencial amortecida. Porém, para que se atinja valores suficientemente próximos dos valores reais de estabilização (erros de ± 5 °C), é necessário um tempo de transitório inicial acima de 25 minutos, diminuindo consideravelmente o desempenho do aquecimento. Como na maioria dos ensaios de desempenho de compressores realizados, já se possui os valores de estabilização de temperatura de ensaios anteriores, a estimativa dos valores de estabilização não é obrigatória.

3.3 Procedimento proposto

Dados os fenômenos observados durante os ensaios e as condições de contorno mostradas nos sub-itens 3.2.1 a 3.2.3, o procedimento proposto consiste da solução encontrada durante os ensaios com o menor tempo de estabilização (da temperatura do corpo) em conjunto com uma relativa robustez. A robustez do procedimento consiste em considerar os diferentes modelos de compressores ensaiados e ainda a variabilidade das temperaturas de estabilização de um mesmo modelo de compressor sob as mesmas condições de teste.

Para a realização do procedimento proposto, é necessário obter quatro informações antes do início do ensaio.

1. A temperatura de estabilização do corpo (T_{estab_corpo}) do compressor, obtida do histórico de ensaios anteriores (média dos valores).
2. A temperatura de estabilização da bobina principal (T_{estab_bobina}) do compressor, obtida do histórico de ensaios anteriores (média dos valores).
3. A resistência da bobina principal (R_{frio}) do compressor, medida a uma temperatura conhecida (normalmente à temperatura ambiente).
4. A temperatura na qual foi medida a resistência (T_{frio}).

Através de R_{frio} , T_{frio} e a resistência da bobina principal durante o ensaio (R_{quente}), obtida através do sistema de medição desenvolvido em 4.2, determina-se a temperatura instantânea da bobina durante o ensaio (T_{bob_quente}). Além de T_{bob_quente} , é necessário medir-se também durante todo o aquecimento a temperatura instantânea do corpo (T_{corpo}) e a potência aparente fornecida ao compressor. A informação de escorregamento do compressor, medido através da sua frequência rotacional (equação 3.5) é necessária durante todo o primeiro estágio do aquecimento.

$$Escorregamento(\%) = 100 * \frac{F_s - F_{rot}}{F_s} \quad (3.5)$$

Onde:

F_s = frequência síncrona (frequência da alimentação);
 F_{rot} = frequência de rotação do compressor.

Após a partida do compressor, inicia-se o aquecimento forçado através de injeção de CC, dividido em três etapas, ilustradas no exemplo da figura 3.25 e detalhadas nas seções 3.3.1 a 3.3.3

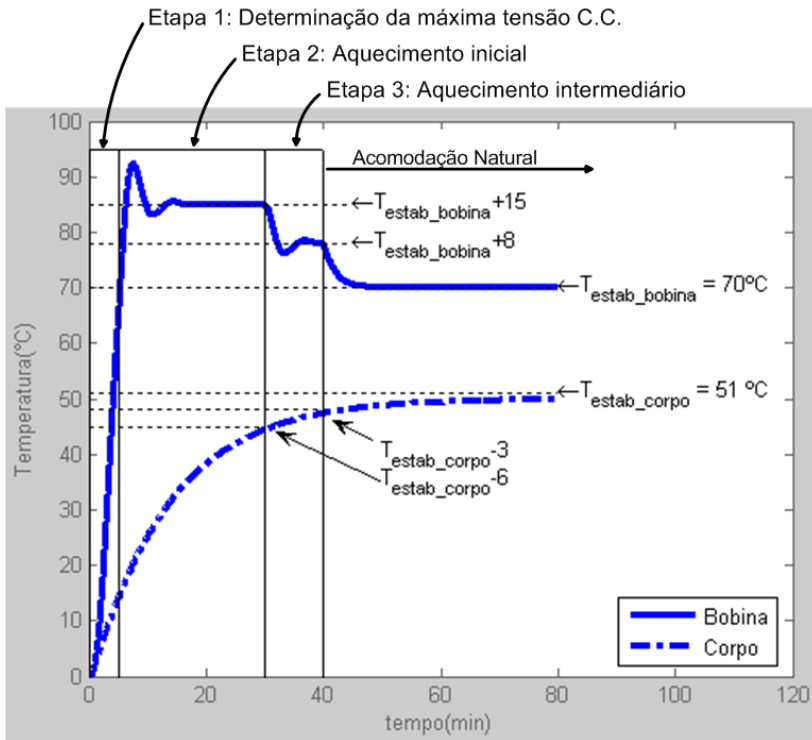


Figura 3.25: Ilustração das três etapas do transitório acelerado de um compressor com temperatura de estabilização da bobina de 70 °C e corpo 51 °C.

Em resumo, o procedimento adotado consiste em se elevar a temperatura da bobina a um valor além da temperatura que atingiria naturalmente, maximizando a dissipação de energia no início. Quando a temperatura do corpo do compressor atingir um valor próximo da sua

temperatura de estabilização, diminiu-se a sobretemperatura da bobina para trazê-la para mais próxima ao valor de estabilização. Quando o corpo atingir uma temperatura ainda mais próxima do valor de estabilização, é encerrado o aquecimento.

3.3.1 Etapa 1: Determinação da máxima tensão CC injetada

Na etapa 1, aumenta-se progressivamente a tensão contínua injetada (incrementos de 2 V para compressores com tensão nominal de 220 V e de 1 V para compressores 115 V) enquanto se verificam as seguintes condições:

- tensão CC maior que 60 V;
- corrente CC maior que 5 A⁷;
- potência aparente maior que 700 VA⁸;
- temperatura da bobina maior que o *set point* (temperatura de estabilização mais a sobretemperatura inicial da bobina);
- temperatura do corpo maior que temperatura de estabilização do corpo;
- escorregamento do motor maior que 8%.

Quando qualquer uma dessas condições for verdadeira, a tensão injetada será admitida como a máxima tensão injetável. Essa tensão será o limite superior da ação de controle da temperatura da bobina. A empresa fabricante do compressor garantiu que com até 10% de escorregamento não há possibilidade de tombamento. O limite foi reduzido ainda mais para garantir que incertezas no sistema de medição de frequência rotacional, bem como flutuações nas pressões de sucção e descarga, não causem um tombamento acidental.

A limitação de 60 V de tensão contínua se deve a um limite experimental. Para todos os ensaios realizados com diversos tipos de compressores, principalmente os de maior resistência de bobina (onde a tensão gera uma corrente menor), essa tensão foi suficiente para uma aceleração de transitório satisfatória. Já as limitações de corrente e

⁷Limitado em 5 A por ser o valor máximo suportado pela fonte comercial, embora a fonte desenvolvida tenha capacidade maior de corrente.

⁸Também foi limitada em função da potência máxima da fonte de 750 VA.

potência se devem às limitações da própria fonte (comercial ou desenvolvida).

Essa etapa do aquecimento dura de 2 a 3 minutos. Essa duração se deve, sobretudo, aos 5 segundos aguardados a cada incremento da tensão CC. Esse tempo de estabilização (maior do que o utilizado para a medição de resistência) é necessário para o correto funcionamento do sistema de medição de frequência rotacional. Com isso evita-se grande parte dos falsos positivos, onde o sistema de medição indica uma frequência rotacional inferior à real.

3.3.2 Etapa 2: Aquecimento inicial

Conforme comentado no item 3.2.3, no início do ensaio o compressor normalmente está frio. Desse modo, a temperatura da bobina pode ser elevada a uma temperatura acima da de estabilização. Quanto maior a temperatura da bobina, maior a transferência de energia para o resto do compressor, e mais rápido será o aquecimento.

Dos ensaios realizados, bons resultados foram obtidos com uma sobretemperatura de 15 °C. Ou seja, nessa etapa de aquecimento inicial, a temperatura da bobina é elevada para $(T_{estab_bobina} + 15)$ °C, permanecendo nesse valor até que a temperatura do corpo atinja $(T_{estab_corpo} - 6)$ °C. Essa diferença de -6 °C também foi obtida através de experimentos, e serve como modo de garantir que não haverá (ou minimizar os impactos caso aconteça) sobreaquecimento do corpo devido à informação errada do valor de T_{estab_corpo} do histórico.

Quando o corpo atinge $(T_{estab_corpo} - 6)$ °C, a etapa de aquecimento inicial termina e se inicia a etapa de aquecimento intermediário.

3.3.3 Etapa 3: Aquecimento intermediário

Se a temperatura do corpo atingir um valor muito próximo do valor de estabilização, a sobretemperatura dos enrolamentos pode provocar um aquecimento excessivo do corpo, devido à energia térmica armazenada tanto na bobina quanto no entreferro, que está em contato direto com os enrolamentos. Esse fenômeno é ilustrado na figura 3.26.

A etapa de aquecimento intermediário foi utilizada com a finalidade de permitir uma transição mais suave da sobretemperatura da

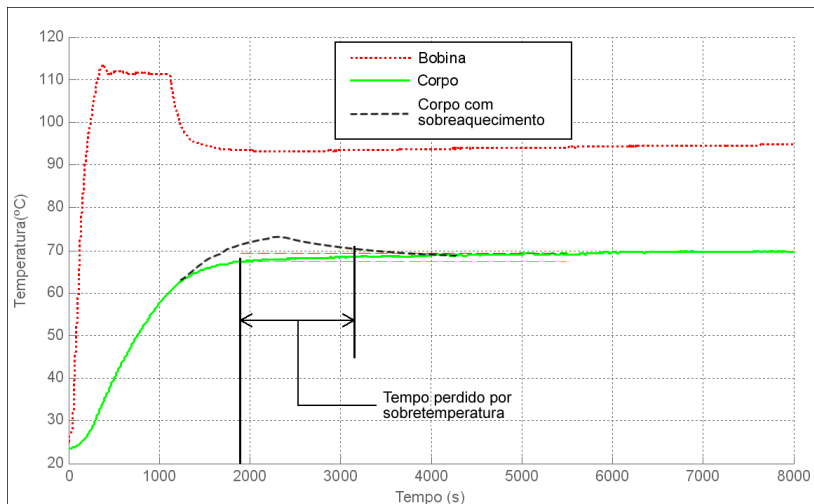


Figura 3.26: Ilustração do tempo perdido pelo aquecimento excessivo do corpo.

bobina para seu valor de estabilização. Nessa etapa, a temperatura da bobina é diminuída de 7 °C, passando de $(T_{estab_bobina} + 15)$ °C para $(T_{estab_bobina} + 8)$ °C enquanto a temperatura do corpo do compressor estiver entre $(T_{estab_corpo} - 6)$ °C e $(T_{estab_corpo} - 3)$ °C. No momento em que a diferença entre a temperatura atual do corpo, e de estabilização for inferior a 3 °C, finaliza-se a etapa 3, bem como todo o processo de injeção de CC. A partir desse instante, a tensão de alimentação retorna ao valor nominal (somente CA) e as temperaturas do compressor estabilizam naturalmente.

3.4 Conclusões

Neste capítulo foram apresentadas algumas possibilidades de se injetar corrente contínua com baixo custo, apontando a que foi considerada como melhor solução: fonte CC variável em série com CA. As vantagens da arquitetura escolhida são a simplicidade e a robustez.

Além disso, foi proposta uma forma de operacionalizar a inje-

ção de corrente contínua de modo automático e robusto. Isso permite a diminuição do tempo de ensaio inclusive na versão automatizada da bancada de ensaios de desempenho, e passível de ser utilizada em diversos modelos de compressores. Para a utilização do procedimento proposto, no entanto, é necessária, também, a medição da temperatura da bobina com o compressor energizado.

Para realizar o controle de temperatura, e sequenciar as etapas do transitório acelerado, é necessário também o desenvolvimento de um software de controle.

Os detalhes do desenvolvimento desses sistemas – fonte, sistema de medição de resistência e software de controle – necessários para a injeção de corrente contínua da forma que se propõe, são apresentados no capítulo 4.

4 SISTEMAS DESENVOLVIDOS

Neste capítulo são apresentados os três sistemas desenvolvidos para possibilitar a aceleração do transitório no ensaio de desempenho através da injeção de CC.

Inicialmente é apresentada uma solução de baixo custo capaz de alimentar o compressor com CA e CC: uma fonte de corrente contínua variável capaz de ser conectada em série a uma fonte de corrente alternada (por exemplo, diretamente à rede de alimentação).

Em seguida é apresentado um sistema que permite estimar a temperatura do enrolamento principal do compressor, através da medição de sua resistência elétrica.

Finalmente, faz-se uma breve descrição do software desenvolvido para efetuar as medições e atuações necessárias para realizar a aceleração do transitório (seção 4.3). Projetado de modo a ser facilmente integrado ao programa principal da bancada de ensaio de desempenho.

4.1 Desenvolvimento de dispositivo adicionador de CC

A estrutura escolhida para ser desenvolvida como dispositivo adicionador de CC foi a fonte CC variável com capacitor em série. As principais vantagens desta estrutura em relação às outras, que motivaram sua escolha, são a simplicidade e a robustez.

Nesta seção são apresentados, em detalhes, os componentes necessários para a construção da fonte e apontadas suas funções e características.

4.1.1 Caracterização da fonte

A fonte deve ser capaz de fornecer tensão e corrente suficientes para o aquecimento dos diversos modelos de compressores que são avaliados nos painéis de ensaios de desempenho.

Para estabelecer as condições de contorno, foi definido que a situação extrema é devida a um compressor de corrente eficaz em torno de 6 A.

No entanto, dos compressores instrumentados disponíveis para testes, o modelo com maior corrente é o G^1 (115 V / 60 Hz), com 1,7 A de corrente nominal. Os ensaios realizados nesse compressor, utilizando uma fonte comercial, obtiveram resultados positivos em redução de tempo de transitório com correntes CC de 5 A.

Dessa forma, propôs-se construir o primeiro protótipo da fonte com potência suficiente para atender todos os compressores instrumentados disponíveis, e também prevendo uma corrente superior para modelos de potência maior. Com isso, foi estabelecida a corrente CC máxima de 10 A para o projeto da fonte.

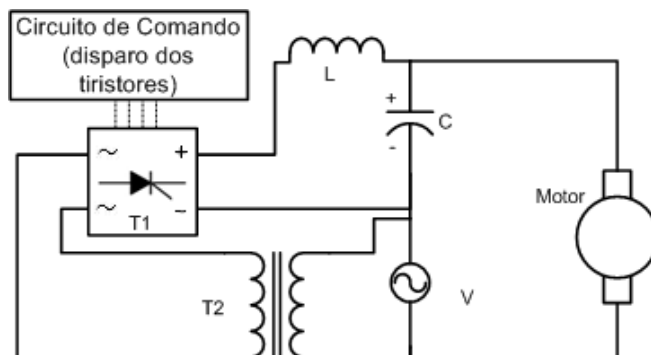
Além da corrente, para determinar qual a tensão máxima fornecida pela fonte, foi necessário um estudo com os compressores de maior resistência no enrolamento principal, pois quanto maior a resistência, maior deverá ser a tensão para se obter a mesma corrente. Os ensaios realizados com os modelos *B* (220 V / 60 Hz) e *D* (220 V / 60 Hz) foram bastante satisfatórios com tensões de até 60 V.

Ficou definido, então, que o protótipo desenvolvido deve ser capaz de fornecer tensão CC de 0 V a 60 V, e até 10 A de corrente contínua.

4.1.2 Construção da fonte

A fonte é constituída dos componentes conforme a figura 4.1. Os componentes são, resumidamente, uma ponte retificadora controlada a tiristor, um circuito de comando para disparo dos tiristores, um capacitor, um indutor e um transformador.

¹Vide apêndice G.



Legenda:

T1: ponte retificadora controlada a tiristor;

T2: transformador isolador;

L: indutor;

C: capacitor eletrolítico;

V: fonte de tensão alternada.

Figura 4.1: Diagrama da fonte CC variável em série com tensão CA.

Tiristores

Tiristores são semicondutores controláveis. São também conhecidos como SCR (do inglês *Silicon Controlled Rectifier*). Ao contrário dos diodos, apenas a polarização direta não é suficiente para o tiristor entrar em condução; é necessário também que circule uma corrente entre os terminais *gate* e catodo. Uma vez em condução, os tiristores somente deixam de conduzir quando a corrente entre anodo e catodo se anula (44, 47, 50).

Os componentes utilizados no projeto são tiristores modelo SKT16 (figura 4.2) do fabricante Semikron, que suportam tensão reversa de até 400 V e corrente eficaz constante de até 20 A a 45 °C (51). É importante salientar que, na configuração proposta, os tiristores conduzem aos pares, fazendo com que a corrente eficaz, por semicondutor, seja a metade daquela fornecida pela fonte. Esses dispositivos foram superdimensionados a fim de se evitar aquecimento excessivo e a necessidade de convecção forçada para resfriamento.



Figura 4.2: Tiristor utilizado na ponte retificadora.

O excesso de temperatura pode provocar não apenas a diminuição na vida útil dos componentes, mas também aumento nos erros do sistema de medição (apresentado na seção 4.2), que deverá ser acondicionado junto com a fonte, em uma mesma estrutura fechada.

Circuito de disparo dos tiristores

O circuito integrado TCA785 (7) gera os pulsos de disparo para os tiristores. Um mesmo sinal pode ser utilizado para controlar dois semicondutores distintos. No entanto, tal configuração só se torna possível com a utilização de trafos de pulso. Esses dispositivos adicionais garantem a isolação elétrica entre os circuitos de controle e potência. A figura 4.3 ilustra o circuito de disparo dos tiristores através de diagrama de blocos.

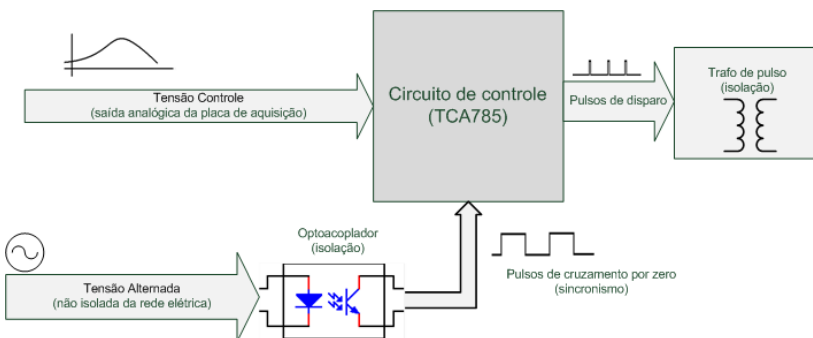


Figura 4.3: Circuito de disparo da fonte de corrente contínua.

O ângulo de disparo é controlado através de duas informações de entrada: sincronismo e referência.

Para o sincronismo é necessária a informação do instante de cruzamento por zero da onda de tensão a ser retificada. O manual do TCA785 apresenta circuitos utilizando um resistor e dois diodos em anti-paralelo a fim de saturar a tensão, gerando uma onda quase quadrada, mas sem isolamento galvânica entre o integrado e o circuito de potência (7).

Com a finalidade de proteger a integridade dos itens de hardware (computador, placa de aquisição, etc.) contra possíveis falhas dos componentes, é importante haver isolamento galvânica entre o circuito de potência e a placa de aquisição. Para se isolar o sinal de sincronismo de cruzamento por zero foi utilizado um acoplador óptico.

O outro sinal de entrada é uma tensão de referência. Essa tensão é comparada a uma onda triangular, tipo dente de serra, gerada internamente no TCA785. Os pulsos de sincronismo de cruzamento por zero provocam a descarga do capacitor utilizado na geração da onda triangular, fazendo o sinal se anular quase instantaneamente e, em seguida, iniciar uma nova rampa de subida. Quando essa rampa atinge um valor maior do que a tensão de referência, o pulso de disparo é gerado. Na figura 4.4 é possível visualizar as formas de onda de funcionamento do TCA785.

A figura 4.3 ilustra o circuito de disparo dos tiristores através de diagrama de blocos.

Desse modo, é possível controlar a tensão de saída da fonte utilizando uma saída analógica de uma placa de aquisição. Variando-se a tensão de saída da placa de aquisição, a tensão de referência para o TCA785 é alterada, mudando o ângulo de disparo e, consequentemente, a tensão gerada pela fonte.

Capacitor

O capacitor serve como acumulador de energia. É ele que transfere a tensão CC gerada pela fonte para o compressor. Embora a fonte tenha sido projetada para tensões de até 60 V, ao ficar sem carga (sem corrente do compressor), as tensões aplicadas ao capacitor podem ser muito próximas de 100 V. Por isso, foi especificado que o capacitor

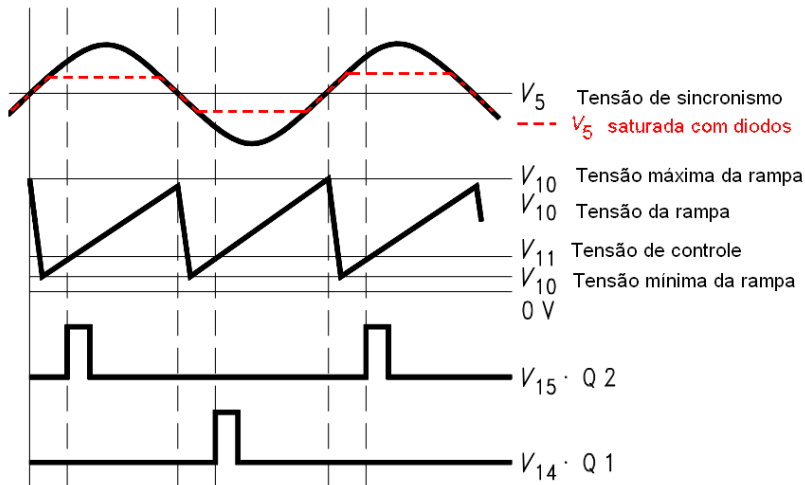


Figura 4.4: Formas de onda para o funcionamento CI TCA785. Adaptado de (7).

deverá suportar tensões de pelo menos 120 V.

Como a capacitância necessária para a diminuição do *ripple* é alta (10.000 μF), foi necessária a utilização de um capacitor eletrolítico, o qual não permite a aplicação de tensões negativas em seus terminais. Desse modo, um diodo foi utilizado em paralelo com o capacitor para evitar a polarização inversa, protegendo-o (52).

Indutor

A presença de um indutor se fez necessária para diminuir os picos de corrente de carga do capacitor no instante de disparo dos tiristores. Esses picos de corrente aumentam a corrente eficaz e, conseqüentemente, a dissipação de energia, diminuindo a vida útil dos componentes (transformador, capacitor e tiristores). Além disso, a diminuição dos picos de corrente também minimizam a interferência eletromagnética gerada pela fonte sobre os demais equipamentos. O valor do indutor atual, 10 mH, foi determinado através de simulação. Para tanto, utilizou-se o circuito ilustrado na figura 4.5.

Quanto maior o valor da indutância, melhor o comportamento

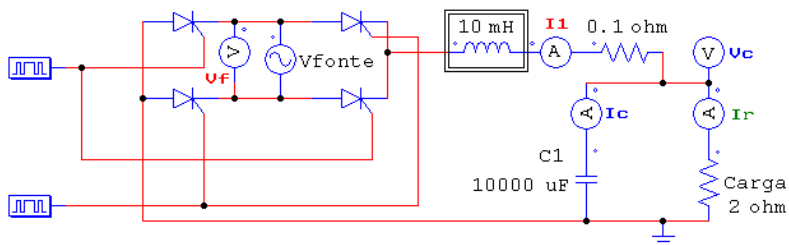


Figura 4.5: Circuito utilizado para simular o efeito do indutor na tensão e corrente geradas pela fonte.

da corrente com menores picos, no entanto, haverá uma menor tensão média sobre o capacitor para um mesmo ângulo de disparo.

Na figura 4.6 são apresentadas as formas de onda de tensão e corrente resultantes da simulação utilizando um indutor de $10 \mu\text{H}$. Os valores medidos foram:

- corrente eficaz de saída da ponte retificadora $I_1 = 55,5 \text{ A}$;
- corrente eficaz no capacitor $I_c = 52,7 \text{ A}$;
- corrente eficaz no resistor(carga) $I_r = 18,2 \text{ A}$;
- tensão média no capacitor $V_c = 36,1 \text{ V}$.

Para estabelecer a comparação, na figura 4.7 estão ilustrados os resultados da simulação utilizando o indutor com valor de 10 mH (valor realmente utilizado no protótipo construído). Embora se tenha necessitado de um ângulo muito menor em relação ao outro valor de indutor, a corrente sobre o capacitor diminuiu drasticamente. O *ripple* da tensão sobre o capacitor também foi reduzido. Os valores medidos com o novo valor de indutor foram:

- corrente eficaz de saída da ponte retificadora $I_1 = 18,7 \text{ A}$;
- corrente eficaz no capacitor $I_c = 3,8 \text{ A}$;
- corrente eficaz no resistor(carga) $I_r = 18,3 \text{ A}$;
- tensão média no capacitor $V_c = 36,7 \text{ V}$.

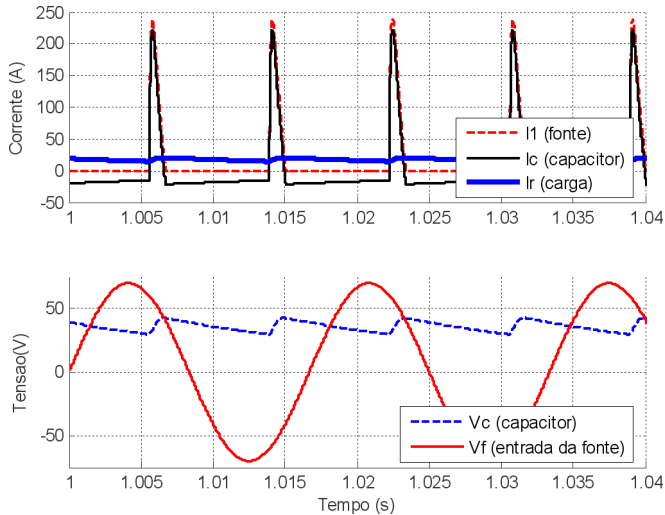


Figura 4.6: Formas de onda de corrente e tensão resultantes da simulação com ângulos de disparo de 120° e 300° , e indutor com $10 \mu\text{H}$.

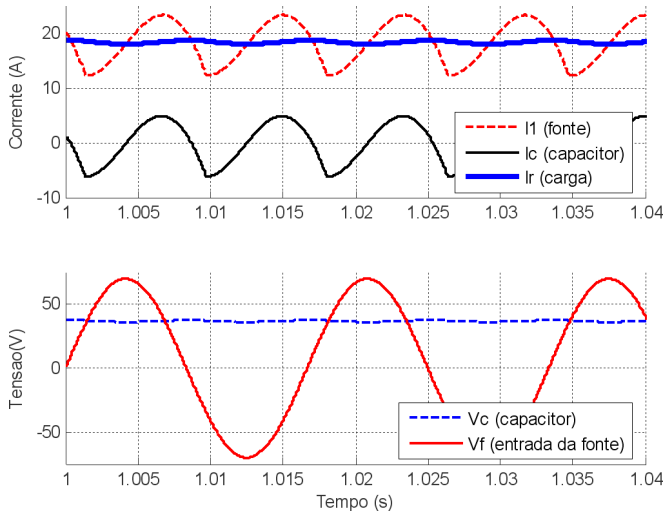


Figura 4.7: Formas de onda de corrente e tensão resultantes da simulação com ângulos de disparo de 30° e 210° e indutor com 10 mH .

Transformador

Um transformador isolador é necessário para isolar eletricamente a fonte CC da rede elétrica, já que as duas serão conectadas em série.

Além disso é utilizado também para diminuir o valor eficaz da tensão.

Seria possível trabalhar com a amplitude de tensão da rede diretamente, apenas isolando a tensão de saída, pois o circuito de ponte dos tiristores reduz o valor eficaz da tensão. No entanto, isso aumentaria a não linearidade da tensão de saída em função do sinal de controle (tensão de referência). Além disso, por questões de segurança, seria necessário um capacitor capaz de suportar tensões mais elevadas, pois com o ângulo de disparo mínimo e sem carga, ou com uma carga pequena, a tensão imposta sobre o capacitor seria igual à tensão de pico da rede, 311 V.

O transformador especificado possui tensão de 70 V no secundário e potência aparente de 700 VA. O indutor presente no circuito da fonte, apesar de ser útil para diminuir a corrente eficaz diminuindo os picos de corrente é também uma impedância no circuito. Desse modo apesar de a fonte ter sido originalmente especificada para tensões CC de até 60 V, a saída do transformador teve que ser um pouco maior para superar a queda de tensão provocada pela impedância do indutor. Como a fonte não é ideal, quanto maior a carga, menor é a tensão fornecida pela fonte para o mesmo ângulo de disparo.

4.1.3 Validação da fonte

Após a montagem da fonte, ensaios foram realizados para verificar o seu correto funcionamento. O circuito foi montado conforme apresentado na figura 4.8. Esses ensaios foram realizados inicialmente inserindo apenas tensão CC e em seguida tensão CC somada à tensão CA da rede elétrica. A tensão foi medida nos terminais do capacitor, e a corrente medida no ponto indicado na figura 4.8.

Os valores de tensão foram medidos utilizando um osciloscópio Agilent 54621A (53). A medição de corrente foi realizada com o mesmo osciloscópio através de uma sonda de corrente Agilent 1146A (54). Esse conjunto apresenta incerteza relativamente elevada. De acordo com o manual do fabricante, a incerteza somente da sonda de corrente para a faixa de 100 mV/A é de $\pm(3\%$ do valor lido + 50 mA), considerando o sinal sem componente contínua (54). Como existe a componente contínua no sinal, a incerteza de medição é ainda maior, mas não é indicada. No entanto, as indicações de corrente servem ape-

nas como referência para validação da potência da fonte desenvolvida.

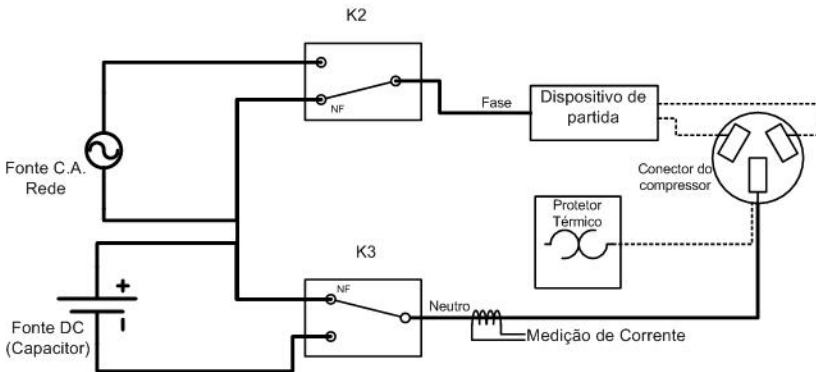


Figura 4.8: Circuito de testes para fonte CC.

A contadora $K2$ permite aplicar a tensão da rede ao compressor quando alterada para a posição normalmente aberto (NA).

A contadora $K3$ conecta a fonte CC ao compressor. Caso $K2$ também esteja habilitada (no contato NA), as duas fontes serão conectadas em série. Se $K2$ estiver no contato normalmente fechado (NF) e $K3$ no contato normalmente aberto, apenas a fonte CC estará alimentando o compressor.

A ligação do neutro da rede (com auxílio de $K3$) ao compressor não se deu através do protetor térmico, mas diretamente ao contato comum do compressor. Isso é necessário para que se possa aplicar uma corrente elevada no compressor sem a atuação do dispositivo de proteção, que interrompe o circuito em casos de sobrecorrente. Com a ausência do protetor térmico no circuito, a temperatura da bobina principal do compressor foi monitorada durante os testes. Em nenhum momento ultrapassou $60\text{ }^{\circ}\text{C}$.

A figura 4.9 ilustra a utilização da fonte para injetar 7 V em um compressor (modelo G^2 com resistência de bobina de $3,8\text{ ohms}$ a $25\text{ }^{\circ}\text{C}$), o que resultou em uma corrente eficaz de aproximadamente $1,5\text{ A}$. Em seguida, a tensão foi aumentada para aproximadamente

²Vide apêndice G.

25 V, originando uma corrente eficaz de 5,8 A, como mostra a figura 4.10. Em ambas as figuras é possível visualizar o *ripple* da fonte. Tal ondulação poderia provocar erros nas leituras de tensão, contaminando a estimativa da temperatura da bobina. No entanto, a atuação do filtro minimiza a influência do *ripple* nas medições.

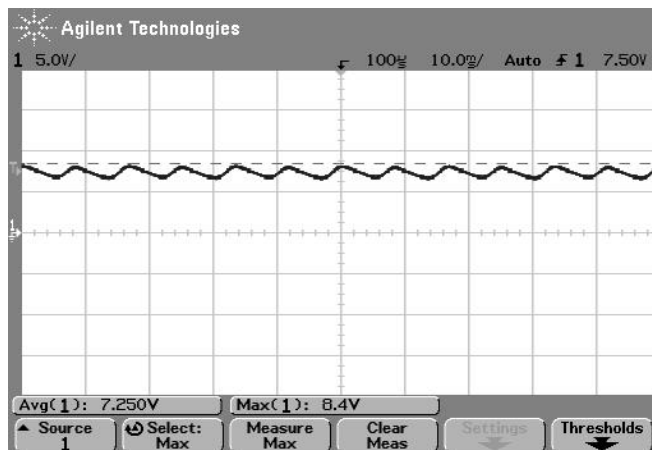


Figura 4.9: 7 V de tensão CC aplicado ao compressor G. Corrente eficaz de 1,5 A.

Os testes anteriores demonstram a capacidade de corrente e tensão que a fonte desenvolvida pode fornecer. No entanto, foi analisado somente a capacidade de injeção de corrente contínua. Foi preciso ainda analisar o comportamento da fonte em série com uma fonte de tensão alternada.

A figura 4.11(a) mostra a tensão no capacitor quando um compressor (modelo F^3 é ligado com tensão alternada (220 V, 60 Hz), e a fonte em série (contatoras K2 e K3 na posição NA), mas sem disparo dos tiristores. Foi possível verificar uma tensão média de 470 mV, devido à presença do diodo em paralelo ao capacitor. A corrente alternada eficaz nesse ensaio foi de 420 mA.

A figura 4.11(b) ilustra o mesmo compressor F alimentado com 220 V, mas agora com o capacitor sendo carregado pela fonte com

³Vide apêndice G.

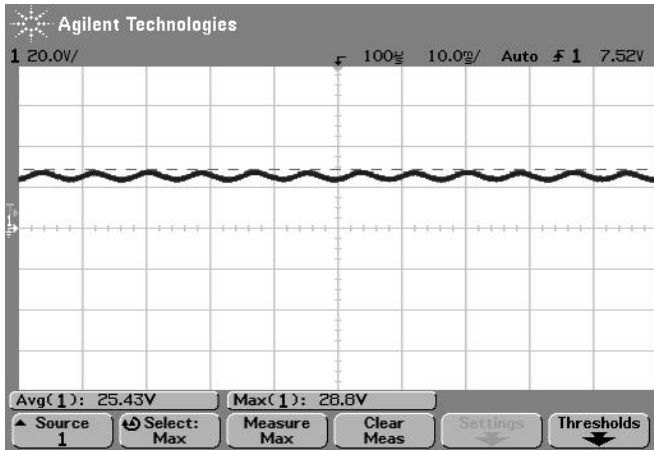


Figura 4.10: 25 V de tensão CC aplicado ao compressor *G*. Corrente eficaz de 5,8 A.

uma tensão média de 45,7 V. O valor médio da corrente medida foi de aproximadamente 9 A.

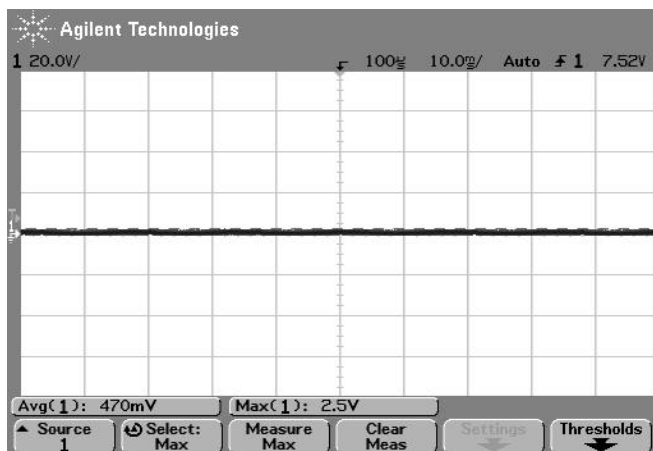
4.2 Sistema de medição de resistência elétrica

Como discutido na seção 3.2.1, existe a necessidade de se conhecer a temperatura da bobina do compressor, tanto com a finalidade de evitar que ela ultrapasse o valor limite do isolamento do cobre, quanto para se obter um melhor desempenho do aquecimento acelerado, mantendo-a próxima de valores definidos.

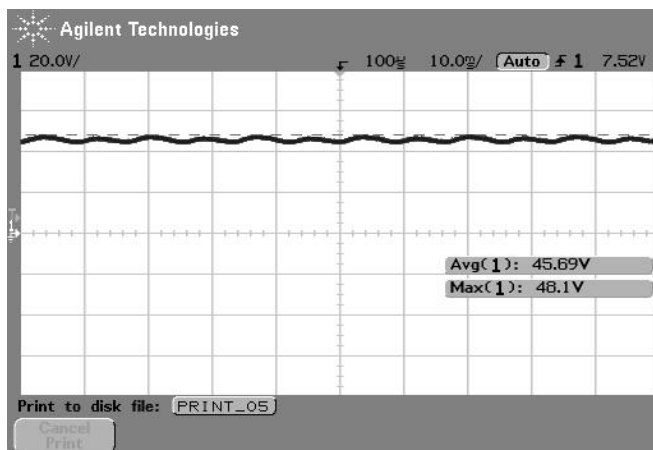
Em (4) são descritos diversos métodos para se determinar a temperatura dos enrolamentos do estator, apontando como mais adequada a sua estimativa através da resistência de enrolamento. Essa resistência pode ser determinada através da medição da tensão e da corrente contínuas injetadas no enrolamento.

Embora (4, 55, 56) tenham utilizado tensões e correntes contínuas de baixa intensidade, pois os objetivos eram medir temperatura com a menor retroação possível, tal efeito é necessário para o aquecimento do compressor.

Para determinar qual a tensão mínima necessária para se medir



(a) Sem tensão CC.



(b) Com 47,5 V de tensão CC.

Figura 4.11: Tensão no capacitor em série com 220 V da rede elétrica.

a temperatura, partiu-se da incerteza máxima admissível pelo projeto: 10°C. A temperatura é calculada de acordo com a equação 4.5 em função das seguintes variáveis:

$$\Delta R = \Delta T \cdot \alpha \cdot R_0 \quad (4.1)$$

$$R = \frac{V_{CC}}{I_{CC}} \quad (4.2)$$

$$\left(\frac{V_{cc}}{I_{cc}} - R_0 \right) = \Delta R \quad (4.3)$$

$$(R - R_0) = (T_{out} - T_0) \cdot \alpha \cdot R_0 \quad (4.4)$$

$$T_{out} = \frac{(V_{cc}/I_{cc}) - R_0}{\alpha \cdot R_0} + T_0 \quad (4.5)$$

T_0 : temperatura conhecida;

R_0 : resistência inicial do enrolamento principal, medida em T_0 ;

α : coeficiente de temperatura do cobre;

V_{cc} : tensão contínua medida com o compressor em movimento;

I_{cc} : corrente contínua medida com o compressor em movimento;

R : resistência do enrolamento principal do compressor em movimento;

T_{out} : temperatura inferida dos enrolamentos do compressor em movimento.

Segundo (57), por derivadas parciais da função de medição (equação 4.5), pode-se determinar o coeficiente de sensibilidade de cada variável. Para simplificar, foi substituída a equação 4.3 na 4.5, obtendo-se 4.6:

$$T_{out} = \frac{\Delta R}{\alpha \cdot R_0} + T_0 \quad (4.6)$$

Então, a incerteza de T_{out} relativa a ΔR ($u_{(T_{out}, \Delta R)}$) é dada pela derivada parcial em ΔR , e como a incerteza de T_0 é inferior a 1°C, medida diretamente através de instrumentos calibrados, pode-se afirmar

que a maior parte da incerteza de T_{out} é função do erro da medição de ΔR , tal como na equação 4.7:

$$u_{(T_{out}, \Delta R)} = \frac{1}{R_0 \cdot \alpha} \cdot u_{(\Delta R)} \quad (4.7)$$

Pelo coeficiente de sensibilidade da equação 4.7, conclui-se que quanto maior ΔR , menor a incerteza de T_{out} . Para as mesmas variações de temperatura, compressores com menor resistência inicial também terão menor ΔR , e conseqüentemente maior coeficiente de sensibilidade.

A incerteza de ΔR é função de I_{cc} , V_{cc} e R_0 dada pela equação 4.8.

$$u_{(\Delta R)} = \sqrt{\left(\frac{1}{I_{CC}} \cdot u_{(V_{CC})}\right)^2 + \left(\frac{V_{CC}}{I_{CC}^2} \cdot u_{(I_{CC})}\right)^2 + (1 \cdot u_{(R_0)})^2} \quad (4.8)$$

A parcela $(1 \cdot u_{(R_0)})^2$ foi considerada desprezível, pois R_0 foi medido diretamente utilizando-se um ohmímetro de seis e meio dígitos a quatro fios. Sua incerteza é de no máximo⁴ 9 m Ω (58) (considerando uma resistência de enrolamento⁵ de 50 Ω), simplificando a equação 4.8 para a equação 4.9 .

$$u_{(\Delta R)} \approx \sqrt{\left(\frac{1}{I_{CC}} \cdot u_{(V_{CC})}\right)^2 + \left(\frac{V_{CC}}{I_{CC}^2} \cdot u_{(I_{CC})}\right)^2} \quad (4.9)$$

Dessa forma, pode-se observar pelo termo $\left(\frac{1}{I_{CC}} \cdot u_{(V_{CC})}\right)^2$ que a incerteza aumenta a medida que I_{CC} diminui. Em outras palavras, maiores incertezas de temperatura ocorrerão em ensaios com correntes menores.

Foi atribuída a tensão mínima de 4 V para manter um mínimo de corrente que se possa medir a resistência com incerteza suficiente. Essa tensão foi obtida partindo-se dos valores de incerteza para I_{cc} e V_{cc} obtidas da calibração (apêndice B):

⁴Considerando valores para até 1 ano após calibração (23 \pm 5) °C.

⁵Das informações de catálogo, as maiores resistências de enrolamento de compressores estão na faixa de 60 Ω .

- incerteza de tensão: ± 10 mV;
- incerteza de corrente (faixa de até 5 A): $\pm 0,5$ mA;
- incerteza de tensão (faixa de até 18 A): ± 5 mA.

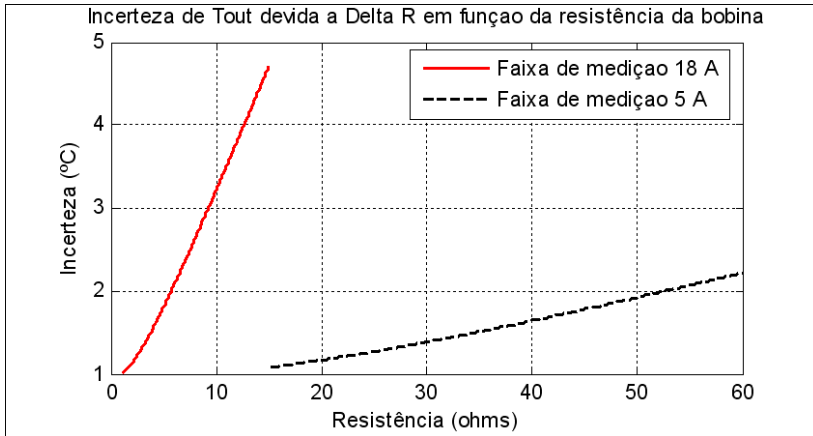


Figura 4.12: Incerteza de T_{out} em função de delta R com a injeção de 4 V de corrente contínua.

A incerteza na medição de temperatura em função da resistência da bobina do compressor com a injeção de 4 V de corrente contínua é mostrado na figura 4.12. Para resistências de até 15Ω foi utilizada a incerteza da faixa de 0 até 18 A (correntes mais elevadas) e acima de 15Ω , a incerteza da faixa de 0 até 5 A.

Assim, para uma melhor análise, o sistema de medição de resistência pode ser dividido em duas partes: medição de tensão e medição de corrente. Os dois sistemas foram calibrados (apêndice B) a fim de se reduzir as parcelas de incerteza devidas aos erros sistemáticos, e são detalhados nas seções 4.2.1 e 4.2.2.

4.2.1 Medição de tensão

O sistema de medição de tensão desenvolvido é composto, conforme mostrado na figura 4.13, pela seguinte cadeia:

- filtro passivo de segunda ordem ($R1$, $C1$, $R2$, $C2$);
- divisor resistivo ($Rd1$, $Rd2$);
- amplificador de instrumentação (INA);
- amplificador de isolamento (ISO);
- filtro passivo de saída ($R3$, $C3$);
- conversor analógico/digital (ADC).

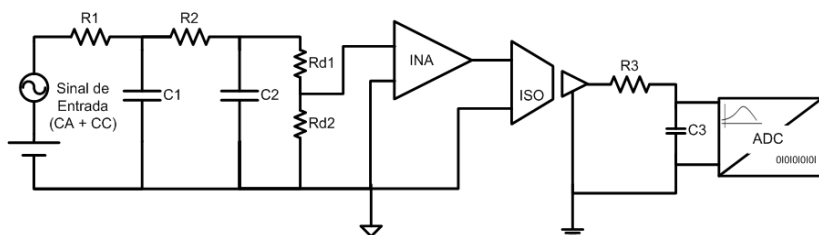


Figura 4.13: Cadeia do sistema de medição de tensão CC.

O filtro passa baixas de segunda ordem, reduz o nível de sinal CA. O sinal é então aplicado a um divisor resistivo. A saída do divisor passa por um amplificador operacional de instrumentação para casamento de impedância. Em seguida o sinal passa por um amplificador de isolamento, para garantir a segurança do conversor A/D (placa de aquisição). Por fim, outro filtro é usado para eliminar possíveis ruídos em alta frequência, injetados pelos amplificadores ou provenientes de interferência externa. O sinal de tensão é, então, lido através do conversor analógico/digital.

Esse sinal é amostrado com uma frequência de aquisição de 50 kHz durante 1 s e, então, calculado seu valor médio. Pacheco (4) mostrou que os erros do valor médio de uma onda senoidal, devido à aquisição de intervalos não múltiplos inteiros da sua frequência, pode ser inferior a 54 nV. Para se obter esse valor foram utilizados 3 s de amostragem (180 ciclos para 60 Hz) e uma senoide de 2 V de amplitude. Considerando-se uma senoide de 10 V de amplitude (em função da atenuação provocada pelo filtro passa baixas utilizado neste trabalho) e reduzindo o tempo de amostragem para 1 s (60 ciclos para

60 Hz), esse erro é aumentado em aproximadamente 15 vezes (apêndice B.4), permanecendo inferior a 1 mV (0,0005 % da faixa de medição de ± 100 V) e considerado desprezível.

Os componentes da cadeia de medição são detalhados nas seções 4.2.1.a até 4.2.1.e.

4.2.1.a Filtro RC entrada

Como o sinal de tensão de interesse pode ser, em alguns casos, da ordem de unidades de volts, o filtro de segunda ordem na entrada do sinal foi utilizado para melhorar a relação sinal/ruído. Isso se fez necessário pois se deseja medir a tensão contínua aplicada ao compressor, que possui também uma parcela de tensão alternada, a qual pode ter valor eficaz de até 220 V.

Embora o filtro auxilie na medição, é necessário que ele não interfira no sinal medido. Durante o tempo de acomodação do sinal, o erro de medição no valor da resistência é elevado e, conseqüentemente, perde-se a informação da temperatura da bobina. Ao se utilizar tempos de laço de controle elevados, corre-se o risco de atingir valores de temperatura além dos permitidos, devido à demora na atuação. Isso poderia causar danos irreversíveis ao isolamento dos condutores.

Testes utilizando o sistema desenvolvido em (4), que utiliza aproximadamente 10 s para a medição de resistência, em uma bancada dinâmica indicaram que esse tempo de medição não foi adequado. A variação das pressões presentes nessa bancada provocam alterações na intensidade da corrente durante o tempo de medição, causando erros no valor medido. Dessa maneira, objetivou-se atingir 1/5 desse tempo. Para isso, é necessário que o tempo de acomodação do filtro (99,9%) seja inferior a 1 s.

Para a determinação dos parâmetros do filtro partiu-se de uma frequência de corte semelhante à utilizada em (4) de 15 Hz. A fim de verificar seu funcionamento, o circuito ilustrado na figura 4.14 foi simulado utilizando-se o software simulador PSIM.

A frequência de corte do primeiro circuito RC foi definida em 16 Hz, com 5 k Ω para R_1 e 2 μF para C_1 (equação 4.10).

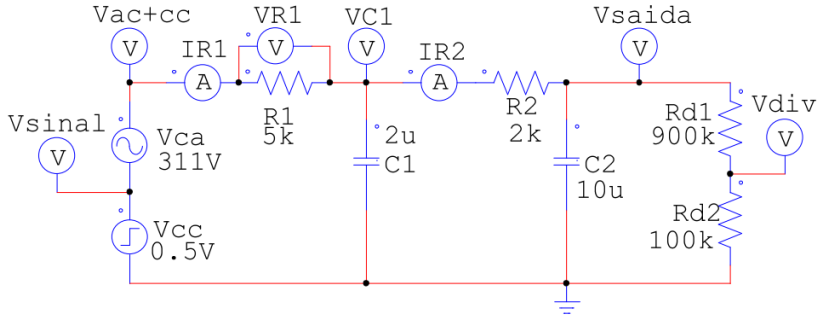


Figura 4.14: Circuito simulado.

$$F_{c1} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot R_1 \cdot C_1} \approx 16 \text{ Hz} \quad (4.10)$$

A segunda parte do circuito apresenta frequência de corte de 8 Hz, com R_2 no valor de 2 k Ω e C_1 com 10 μF (equação 4.11).

$$F_{c2} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot R_2 \cdot C_2} \approx 8 \text{ Hz} \quad (4.11)$$

Essa composição de filtro faz com que uma onda senoidal com 311 V de amplitude tenha menos de 10 V de amplitude na saída do filtro, conforme apresentado na figura 4.15.

Outro ponto importante no projeto do filtro é o erro provocado pelo casamento de impedâncias. Como será mostrado em 4.2.1, a resistência de entrada do divisor é de 1 M Ω , enquanto a resistência de saída do filtro é de 5 k Ω em série com 2 k Ω .

Na figura 4.16 é possível perceber que o erro em regime foi de 0,8%, aproximadamente 4 mV para um degrau de 500 mV de amplitude. Ainda que seja aceitável, esse erro de ganho é compensado com a calibração do sistema de medição. Os únicos erros que não serão compensados são aqueles provenientes das variações dos valores de resistência do filtro e do divisor resistivo em função da temperatura (deriva térmica) e em função do tempo (deriva temporal).

O tempo de resposta (99,9%) desejado para o filtro não deve ser

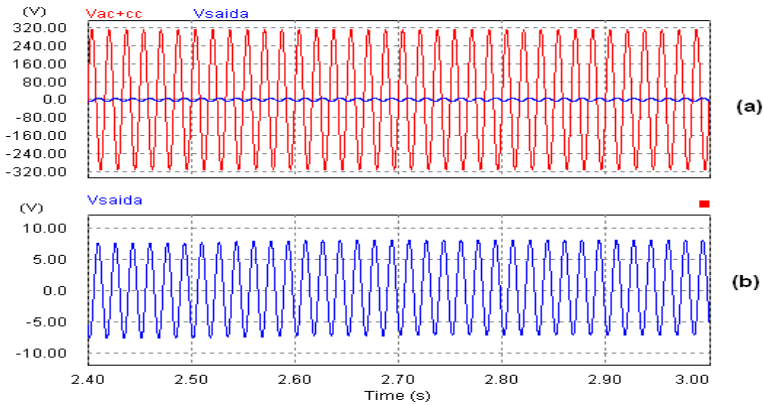


Figura 4.15: Atenuação de uma onda senoidal pelo filtro RC de segunda ordem. Em (b), uma aproximação do sinal atenuado.

maior do que 1,0 segundo. Pode-se visualizar, ainda na figura 4.16, que após 0,6 segundo, o erro do sinal é inferior a 0,5 mV, equivalente a 0,1% do valor de estabilização.

A potência necessária para os resistores do filtro também foi obtida através de simulação, medindo-se a corrente através de R_1 e R_2 . A figura 4.17b apresenta as formas de onda da corrente nos resistores. A onda de maior amplitude corresponde à corrente no resistor R_1 , com valor eficaz de aproximadamente 40 mA. A potência pode ser determinada através da equação 4.12, resultando em uma potência de 8 W para o resistor R_1 . Fazendo o mesmo para o resistor R_2 , cuja corrente eficaz foi de 20 mA, sua potência calculada foi de 0,8 W. Foram adotados, no entanto, os valores comerciais de 10 W para R_1 e 2 W para R_2 .

$$P = i^2 \cdot R \quad (4.12)$$

Uma análise semelhante deve ser feita em relação à tensão máxima aplicada sobre os capacitores. Na figura 4.17b, o gráfico apresenta as tensões às quais são submetidos os capacitores. Novamente a forma de onda com maior amplitude se refere ao primeiro estágio do filtro de segunda ordem, ou seja, a tensão sobre C_1 . O pico da tensão

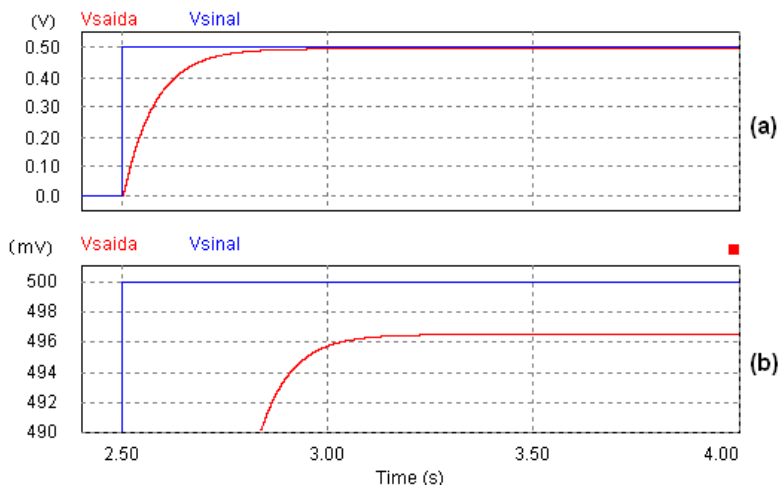


Figura 4.16: Resposta ao degrau do filtro RC. Em (b), uma aproximação para visualização do erro em regime.

é de aproximadamente 60 V, que somados ao maior nível CC injetado (70 V) resultam em uma tensão máxima total de 130 V em C_1 . Por questões de segurança, evitando-se exceder a tensão máxima, é recomendada a utilização de capacitores que suportem pelo menos 150 V.

Com a utilização de apenas um capacitor, a sua falha (abertura) aplicará toda a tensão da rede sobre o sistema de medição. Com a utilização de capacitores em paralelo é necessário que todos falhem para que isso ocorra. Dessa forma, foram utilizados dois capacitores de $1 \mu\text{F}$ em paralelo com tensão nominal de 250 V.

Para C_2 , a tensão CA máxima é de menos de 10 V. De modo semelhante, somando-se os 70 V máximos do sinal CC injetado, a tensão sobre C_2 pode atingir até 80 V. Foram utilizados, também, dois capacitores de $5 \mu\text{F}$ em paralelo.

4.2.1.b Divisor Resistivo

Mesmo que fosse possível reduzir a amplitude da tensão alternada a praticamente zero, ainda assim a tensão contínua injetada no compressor possui um valor muito alto para ser medida diretamente pela placa de aquisição e, por isso, necessita ser reduzida.

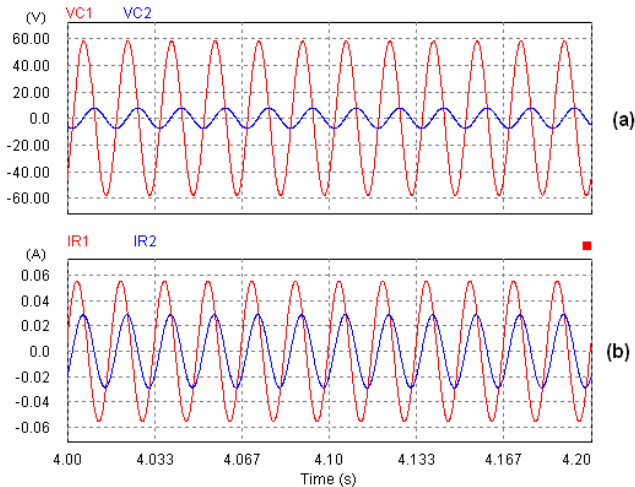


Figura 4.17: Tensões sobre os capacitores (a) e corrente nos resistores (b) do filtro.

A máxima tensão CC injetada será de 70 V. Considerando ainda que a parcela de tensão alternada pode registrar picos de até 10 V, a máxima tensão na saída do filtro será 80 V, bastante superior ao limite de tensão de entrada de ± 10 V da placa de aquisição utilizada (59). Para reduzir a tensão de entrada da placa, optou-se por utilizar um divisor resistivo com atenuação 10:1. Essa proporção foi escolhida pelo fato de existirem diversos divisores comerciais com esse valor.

O modelo utilizado no protótipo foi o caddock 1776–C6815 (8). Ele possui uma resistência total de 10 M Ω e saídas com relações 1:10, 1:100, 1:1.000 e 1:10.000 (figura 4.18).

Quanto maior a resistência total do divisor, menor o erro por casamento de impedância entre ele e o filtro RC. No entanto, observou-se muita interferência com a aplicação de toda a faixa, e resultados muito melhores foram obtidos com a utilização de 1 M Ω como resistência de entrada.

Uma observação importante, é que a utilização do divisor entrando com o sinal em V_{in} causou o aparecimento de muita interferência. A utilização de apenas 1 M Ω como resistência total eliminou essa interferência e não houve erro significativo por casamento de impedân-

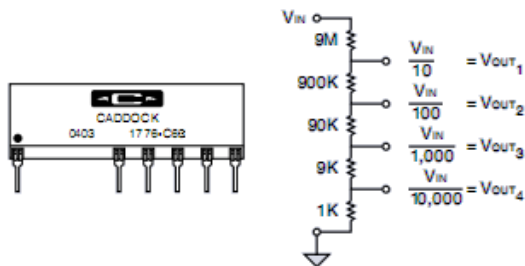


Figura 4.18: Divisor resistivo utilizado na medição de tensão (8).

cia, como já foi apresentado em 4.2.1. Quanto maior a resistência total de entrada, no entanto, menor o erro por casamento de impedância entre o filtro RC e o divisor resistivo.

Foi utilizada, então, a relação de 1:10, aplicando-se o sinal em V_{out_1} ao invés de V_{IN} e medindo-o em V_{out_2} .

4.2.1.c Amplificador de instrumentação

Um amplificador de instrumentação com ganho unitário foi utilizado para realizar o casamento de impedância com sinal de saída do divisor resistivo, pois a impedância de entrada do amplificador de isolamento utilizado é de 16 M Ω . Considerando-se que a impedância de saída do divisor é o paralelo das resistências: 900 k Ω e 100 k Ω , aproximadamente 90 k Ω . Essa relação provocaria um erro superior a 0,5% no valor lido.

Novamente, sabe-se que o erro de casamento de impedância pode ser compensado com a calibração, mas não a sua variação. Diminuindo-se esse erro de ganho diminui-se também o erro devido a sua variação.

O amplificador utilizado foi um INA 101 (60), que, de acordo com o manual, possui impedância de entrada de 10¹⁰ Ω . Com essa relação de resistências entre amplificador e divisor, o erro é inferior a 0,001%.

4.2.1.d Amplificador de Isolação

A fim de se garantir a integridade da placa de aquisição de dados, um amplificador de isolação foi utilizado para isolar galvanicamente o conversor A/D da parte de potência, ligada diretamente à rede elétrica.

O amplificador escolhido para esse fim foi o AD-215 BY da Analog Devices (9). Esse isolador foi utilizado na configuração de ganho unitário. Uma vantagem desse componente é possuir internamente um conversor isolado de tensão (figura 4.19), capaz de fornecer alimentação simétrica para a parte isolada do circuito, eliminando a necessidade de outra fonte de alimentação simétrica isolada.

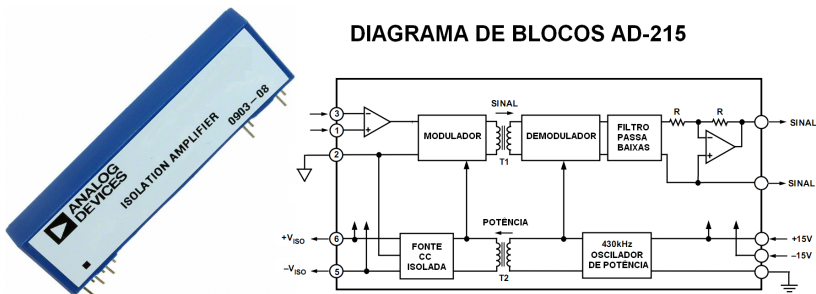


Figura 4.19: Diagrama de blocos do amplificador de isolação AD-215 (9).

Como desvantagem, esse amplificador possui um erro de ganho de até $\pm 2\%$, considerado alto se comparado a outros amplificadores de isolação, como o ISO124, que possui erros de ganho de no máximo $\pm 0,5\%$ (61). No entanto, esse erro é reduzido ao se realizar a calibração do sistema de medição, como está destacado no apêndice B.

4.2.1.e Filtro de saída

O filtro de saída é a última parte da cadeia de medição antes da placa de aquisição e foi utilizado como medida preventiva. Enquanto o filtro de entrada foi projetado para atenuar as frequências nas faixas de 50 Hz e 60 Hz, o de saída foi inserido para eliminar as altas

freqüências. Estas são provenientes de interferências externas e dos amplificadores, principalmente o de isolamento, pois ele possui uma “fonte chaveada” interna (9). Como a impedância de entrada da placa de aquisição (59) é de $10^{12} \Omega$, a resistência do filtro (1 k Ω) provocaria erros de casamento de impedância desprezíveis, da ordem de $10^{-7}\%$.

Tabela 4.1: Características do filtro de saída.

Freq. Corte	1500 Hz
R	1 k Ω
C	100 nF

4.2.1.f Variação devida a uma grandeza de influência

De acordo com o VIM⁶ (62), quando a alteração do sinal de saída de um sistema de medição é causada por outra grandeza, denomina-se esse efeito de “variação devida a uma grandeza de influência”.

Percebe-se a influência da temperatura sobre toda a cadeia de medição devido ao aquecimento após sua energização. Essa estabilização devida à variação da temperatura no tempo é apresentada na figura 4.20. Pode-se concluir que o transitório inicial termina em aproximadamente 45 minutos a partir do instante em que o circuito de medição foi energizado. A partir desse ponto, a variação devida à temperatura é inferior a 0,1%, sendo inferior ao erro aleatório.

4.2.2 Medição de corrente

A medição da corrente é relativamente mais simples se comparada à medição de tensão. Isso devido à utilização de um transdutor do fabricante LEM modelo LA-25. Esse transdutor opera por princípio de efeito Hall em malha fechada, medindo desde corrente contínua até centenas de kHz (10). A faixa de medição desse transdutor pode ser configurada para valores predefinidos. De acordo com a conexão elétrica, faz-se a mesma corrente de entrada circular de 1 até 5 vezes no primário, alterando a sensibilidade do transdutor e, conseqüentemente, sua faixa de medição.

⁶Vocabulário Internacional de Metrologia.

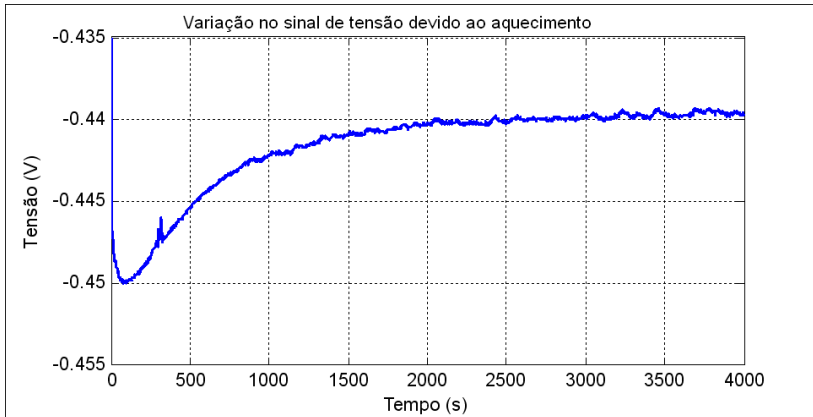


Figura 4.20: Variação da tensão devida a uma grandeza de influência: temperatura.

O sinal de saída do transdutor também é em corrente, o que diminui a incerteza pois não há perda de sinal pela resistência de cabos e trilhas. No entanto, a placa de aquisição utilizada não possui entrada de sinal em corrente, sendo necessário um resistor para converter o sinal em tensão.

A cadeia de medição para o sinal de corrente é apresentada na figura 4.21. Assim como na medição de tensão, utilizou-se um filtro, com frequência de corte de 1.500 Hz para melhorar a imunidade a ruídos e interferências em altas frequências.

Como a relação sinal/ruído é mais adequada, não se fez necessária a utilização de um filtro para diminuir a influência da frequência fundamental sobre o valor médio (50 Hz ou 60 Hz). Tal valor é obtido de forma idêntica ao apresentado na seção 4.2.1, com 1 segundo de tempo de amostragem. A mesma consideração foi feita em relação ao erro devido à aquisição de intervalos não múltiplos inteiros da frequência fundamental.

O resistor utilizado para converter corrente para tensão poderia ser uma fonte de erro considerável, por isso foram utilizados resistores de precisão de 6 faixas (63). As características mais importantes,

nesse caso, são a baixa deriva térmica e baixa deriva temporal. Isso porque será feita a calibração para determinar a sensibilidade de todo o sistema. Assim, mesmo que o resistor tenha um valor diferente do nominal, essa diferença será compensada após a calibração. O mais importante é que esse valor, seja qual for, se mantenha o mais constante possível com o tempo, e sob variações de temperatura. E por essas características, mais do que pela tolerância do valor nominal, esse modelo de resistor foi escolhido.

É importante adequar a faixa de medição de um sistema ao mensurando. Em algumas situações é vantajoso utilizar diferentes sistemas (ou um sistema capaz de variar sua faixa de medição) no lugar de um único sistema com uma ampla faixa de medição (64). Desse modo, objetivando-se diminuir as incertezas, foram utilizadas duas configurações do transdutor de corrente. Uma configuração para medir correntes de até (-5 a +5) A e outra para a faixa de (-18 a +18) A, ambas as configurações detalhadas em 4.2.2.a e 4.2.2.b.

Seria possível utilizar apenas um transdutor e, através de relés, mudar a faixa de operação alterando a configuração dos contatos elétricos. No entanto, a montagem de dois transdutores facilita a construção do sistema de medição, diminuindo a complexidade da placa e o número de componentes.

A estrutura utilizada para alterar a faixa de medição é a apresentada na figura 4.22. Dois relés foram utilizados para desconectar o transdutor com menor capacidade de corrente. Embora apenas um sinal de controle seja capaz de comutar os dois relés, foram empregados

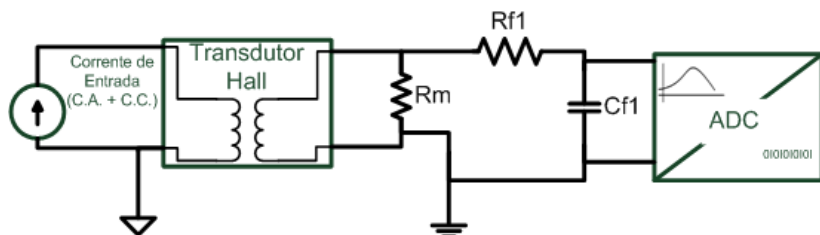


Figura 4.21: Cadeia de medição da corrente.

dois sinais distintos, permitindo que o relé que não estava habilitado a conduzir possa fornecer um caminho para a corrente antes que o relé que já estava conduzindo interrompa a passagem da corrente. Ou seja, entre os estados indicados pelas figuras 4.22.a e 4.22.b, existe um estado intermediário onde os dois relés estão na posição NA, permitindo a passagem de corrente.

Comutando os relés dessa forma, não há a produção de arcs voltaicos nos seus terminais mesmo com carga indutiva, pois em nenhum momento a corrente é interrompida. Com isso pode-se operar os relés com mais robustez, aumentando sua vida útil, sem a necessidade de componentes capazes de suportar correntes elevadas com cargas indutivas (como contadoras externas) para tal fim.

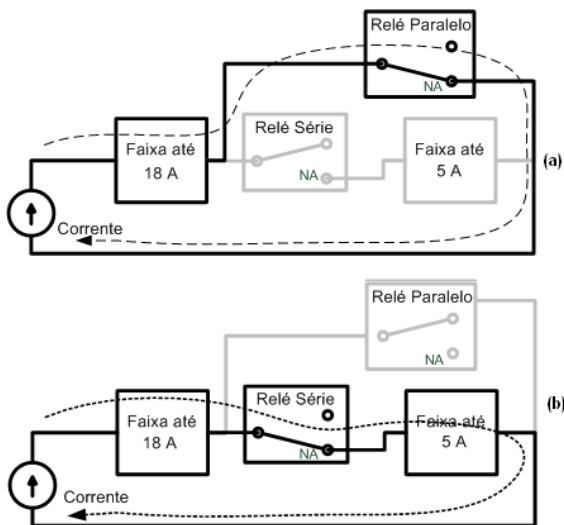


Figura 4.22: Diagrama esquemático da retirada do transdutor de corrente com escala baixa. Em (a) Relé Paralelo conduzindo, em (b) Relé Série conduzindo.

4.2.2.a Faixa de 5 A

De acordo com o fabricante do transdutor de corrente, seu erro combinado (chamado de *accuracy*⁷ no manual) a 25 °C é de 0,5% (10). Como o manual não informa se esse erro é sobre o valor lido, considerou-se 0,5% do valor final da faixa de medição: 25 mA. Se fosse considerado apenas esse erro combinado, isso proporcionaria uma incerteza de 10 Ω no valor da resistência causando um erro de até 64 °C em temperatura⁸. O erro de linearidade apresentado é de no máximo 0,2%, também considerado do valor final da faixa de medição. Esse erro não pode ser compensado pela calibração, mas seu valor pode ser determinado e vir a ser menor do que o especificado.

Número de volts primário	Corrente primário		Corrente nominal saída (mA)	Porporção de volts	Resistência do enrolamento primário (Ω)	Indutância inserida no primário (mH)	CONEXÃO
	Nominal (A)	Máxima (A)					
5	5	7	25	5/1000	6.3	0.58	

Figura 4.23: Características do transdutor para a faixa de 5 A (10).

4.2.2.b Faixa de 18 A

A faixa de medição para a escala de maior corrente foi definida em 12 A nominais, muito embora o transdutor suporte uma corrente máxima de até 18 A. Essa corrente foi determinada também em função do pior caso de corrente citada na seção 4.1. É necessário medir os 10 A de corrente contínua fornecidos pela fonte CC somados aos 6 A de corrente alternada eficaz.

⁷É bastante comum manuais de transdutores em inglês apresentarem o erro combinado como *accuracy*

⁸Considerando um compressor com resistência de 40 Ω de enrolamento alimentado com 4 V CC

Número de volts primário	Corrente primário		Corrente nominal saída (mA)	Porporção de volts	Resistência do enrolamento primário (Ω)	Indutância inserida no primário (mH)	CONEXÃO
	Nominal (A)	Máxima (A)					
2	12	18	24	2/1000	1.1	0.09	

Figura 4.24: Características do transdutor para a faixa de 18 A (10).

4.2.2.c Variação devida a uma grandeza de influência

A variação devida à temperatura da cadeia de medição de corrente, para as duas faixas, é apresentada na figura 4.25. Como os dois transdutores apresentaram comportamento semelhante, apenas a variação para a faixa (0 a 5) A foi mostrada no gráfico. Novamente foi avaliado o efeito do aquecimento da cadeia de medição devido à alimentação do circuito. Considera-se que após uma hora após energizado o circuito, o sistema permanece estável, com erros inferiores a 0,1%.

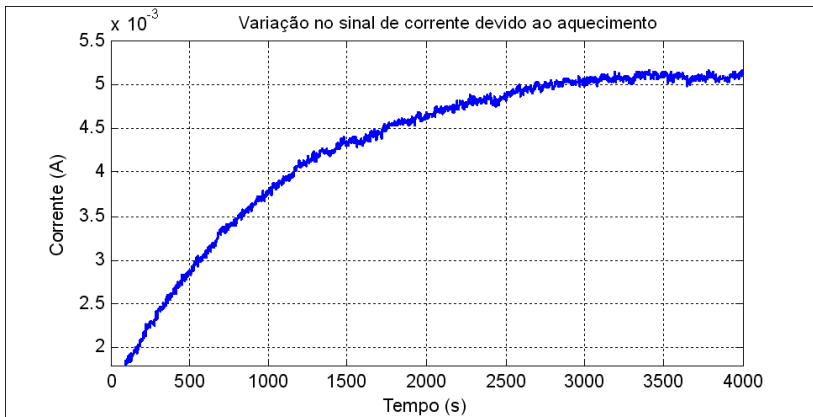


Figura 4.25: Variação da corrente devida a uma grandeza de influência: temperatura.

4.3 Software de controle

Todo o programa de controle da bancada de ensaios de desempenho já está desenvolvido em LabVIEW. Por esse motivo, o software de aceleração do transitório por corrente contínua foi planejado e desenvolvido também nesse ambiente. Isso permitiu ser integrado com facilidade ao *software* original.

Essa ferramenta de desenvolvimento tem como principais características e vantagens, a rapidez e facilidade no desenvolvimento, pois é um ambiente de trabalho visual, em forma de diagrama de blocos (65).

Conforme apresentado na seção 3.2, foi proposto que a injeção de corrente contínua seria feita em três etapas: (i) determinação da tensão CC máxima, (ii) aquecimento inicial e (iii) aquecimento intermediário.

Para determinar a tensão máxima a ser injetada no compressor, o algoritmo ilustrado na figura 4.26 foi utilizado.

Aumenta-se gradativamente a tensão enquanto as seguintes condições são monitoradas:

- tensão contínua maior que 65 V;
- corrente rms maior que 12 A;
- escorregamento maior que 8%;
- temperatura da bobina maior que 105°C;
- temperatura do corpo maior que (Temperatura de estabilização do corpo - 6°C);
- potência aparente maior que 600 VA.

Quando qualquer uma dessas condições for satisfeita, a tensão deixa de ser incrementada e seu valor atual passa a ser a tensão máxima aplicada ao compressor.

De forma parecida, é determinado também a tensão mínima aplicada ao compressor. Definiu-se que a tensão de corrente contínua mínima seria de 4 V, porém, como a tensão de saída da fonte desenvolvida é bastante dependente da carga, um mesmo sinal de controle de tensão gera tensões diferentes na saída da fonte para compressores distintos ou mesmo condições de ensaio diferentes (pressões de sucção e descarga).

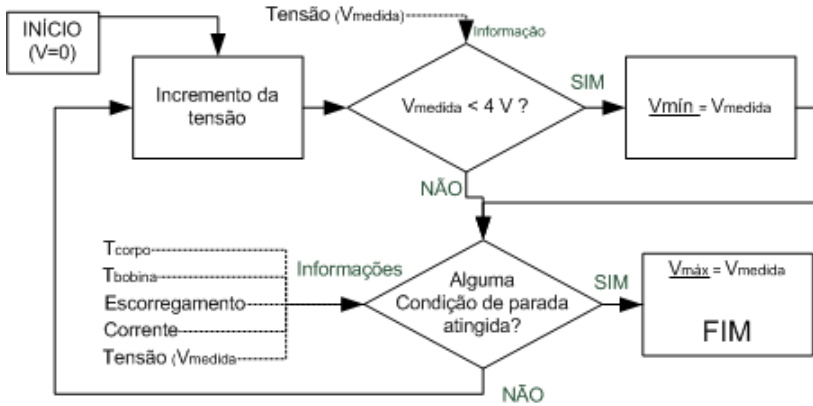


Figura 4.26: Fluxograma do algoritmo para determinar as tensões máxima e mínima injetadas no compressor.

Por isso, para determinar a tensão mínima, armazena-se a tensão CC medida a cada incremento. Enquanto a tensão medida for inferior a 4 V, assume-se o valor atual como tensão mínima. A partir do momento em que a tensão ultrapassar 4 V, o valor mínimo não é mais atualizado. Assim, o último valor de tensão inferior a 4 V é considerado como a mínima tensão a ser aplicada ao compressor. Isso é necessário para que o controlador não aplique 0V como saída, já que sem tensão e sem corrente contínua, não se pode determinar a temperatura da bobina.

Após definidas as tensões máxima e mínima, passa-se para a etapa de aquecimento inicial. Essa etapa consiste de se utilizar um controlador PI com o *setpoint* da temperatura da bobina em $(Testab+15)$ °C. No momento em que a temperatura do corpo atinge $(TestabCorpo - 6)$ °C, é iniciada a etapa de aquecimento intermediário. Diminui-se o *setpoint* da temperatura da bobina em 7 °C. Com essa redução fica evidente a importância do limite mínimo para a tensão. Nessa transição, como o valor de temperatura medido se encontra acima do valor desejado, o controlador poderia diminuir a tensão até 0 V. Se isso ocorrer, perde-se a informação da medição da resistência e a temperatura medida torna-se um valor aleatório, inviabilizando o controle.

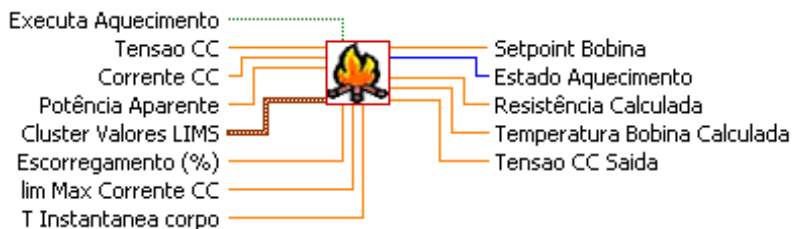


Figura 4.27: Subprograma (VI) criado em LabVIEW para a aceleração do transitório.

Na figura 4.27 é possível visualizar as entradas e saídas do software desenvolvido.

As entradas do bloco são:

Executa Aquecimento: É um sinal booleano, em falso ele reinicializa todas as variáveis internas do programa, permitindo o início de um novo ensaio.

Tensão CC: Tensão CC instantânea medida sobre o enrolamento principal;

Corrente CC: Corrente CC instantânea medida sobre o enrolamento principal;

Potência Aparente: Produto da tensão eficaz e da corrente eficaz instantâneas sobre o compressor;

Cluster Valores LIMS: *Cluster* com 5 elementos: temperatura de referência; resistência do enrolamento medida na temperatura de referência; temperatura de estabilização da bobina do compressor para as condições do ensaio (obtida de ensaios anteriores); temperatura de estabilização do corpo do compressor para as condições do ensaio (obtida de ensaios anteriores) e tensão nominal do compressor (115 V ou 220 V);

Escorregamento(%): Informação do escorregamento instantâneo do compressor;

lim Max Corrente CC: Corrente contínua máxima injetável sobre o compressor (pode depender da fonte ou do dispositivo de partida)

T Instantânea corpo: Temperatura instantânea medida do corpo do compressor.

As saídas são:

Setpoint Bobina: Informação de qual o *setpoint* atual da bobina principal (depende do valor de estabilização da temperatura do histórico e do estado atual do aquecimento);

Estado Aquecimento: Informação de qual o estado atual do aquecimento: **1** = Determinação da tensão CC máxima aplicada; **2** = Aquecimento inicial; **3** = Aquecimento intermediário; **4** = FIM do aquecimento;

Resistência Calculada: Informação da resistência medida da bobina principal;

Temperatura Bobina Calculada: Informação da temperatura instantânea da bobina principal;

Tensão Saída: Tensão CC que deverá ser injetada no compressor (atuação do controlador).

4.4 Conclusões

O estudo realizado no capítulo 3 permitiu a construção de um protótipo de baixo custo de um equipamento capaz de injetar CC. A construção da fonte foi realizada com êxito, atingindo as especificações iniciais de potência de saída.

O valor da tensão de saída da fonte é realizado de forma simples, através de um sinal analógico de tensão proveniente de uma placa de aquisição, e se mostrou bastante estável na faixa para a qual foi projetada, (4 a 60) V.

Com a calibração do sistema de medição (apêndice B.1), obteve-se um erro máximo em tensão de 10 mV para uma faixa de medição de (-100 a +100) V, o que equivale a um erro de 0,005% do valor total da faixa (200 V). Por causa da compensação dos erros sistemáticos de toda a cadeia, o erro máximo ficou abaixo da combinação dos erros de todos os componentes da cadeia de medição, indicados em seus manuais.

Para a medição de corrente (apêndices B.2 e B.3), obteve-se erro máximo de 0,5 mA para a faixa de (-5 a +5) A, equivalente a 0,005%

da faixa de medição, e um erro máximo de 4,8 mA na faixa de (-18 a +18) A, 0,013% da faixa. Valores bastante inferiores aos dados de catálogo.

No entanto, na utilização prática do sistema, acoplado à fonte desenvolvida e ao compressor em funcionamento, percebeu-se um erro maior devido às interferências do restante do sistema e da relativa instabilidade da tensão contínua medida (se comparada à tensão bem estabilizada do padrão utilizado na calibração). Além disso, um erro difícil de ser mensurado é a diferença que se obtém entre a temperatura média do enrolamento, inferida através de sua resistência, e a temperatura pontual, medida através de um termopar.

Recomenda-se, em utilizações futuras, o uso de janelamento de Hanning, conforme apêndice B.4, para garantir que os erros provenientes do período de amostragem não sejam dependentes da fonte utilizada.

Apesar disso, em todos os ensaios realizados no capítulo 5, a diferença entre a temperatura medida com o sistema desenvolvido (utilizando as duas escalas de corrente) e a temperatura obtida através de termopares, foi inferior a 10 °C.

O software de controle desenvolvido permitiu realizar todos os ensaios apresentados no capítulo 5 e nos apêndices C a F. Foi possível implantá-lo com facilidade ao programa principal da bancada de desempenho de uma empresa.

5 ANÁLISE EXPERIMENTAL

5.1 Introdução

O objetivo dos experimentos apresentados neste capítulo é comprovar a capacidade de se diminuir o tempo de aquecimento do corpo do compressor com a injeção de corrente contínua.

É apresentada, inicialmente, a estratégia de ensaios utilizada, em seguida é mostrada com mais detalhes a bancada utilizada em alguns desses ensaios e, finalmente, os resultados obtidos. Ao final deste capítulo, expõe-se uma conclusão a respeito desses resultados.

5.2 Estratégia adotada

Para gerar resultados que permitissem verificar a eficácia do método proposto, foi definido um roteiro de ensaios, destacados na seqüência com seus respectivos objetivos específicos.

1. Compressor a vazio (fora do sistema de refrigeração) utilizando fonte comercial – projeto e otimização do procedimento de injeção de CC (menor influência das demais variáveis); avaliação dos níveis máximo de tensão e corrente (desenvolvimento de fonte CC variável) e aprimoramento do procedimento proposto (sobretemperatura inicial da bobina).
2. Compressor em circuito de refrigeração utilizando fonte comercial – verificação do comportamento do transitório acelerado no compressor inserido em um sistema de refrigeração e aprimoramento do procedimento proposto (ajustes do controlador).
3. Compressor na bancada de ensaio de desempenho utilizando fonte comercial – análise comparativa dos resultados de ensaios

de capacidade com e sem transitório acelerado; avaliação de necessidades de adaptação no esquema elétrico da bancada de ensaios de desempenho; controle da temperatura dos enrolamentos através da sua inferência pela medição de resistência.

4. Compressor a vazio utilizando fonte e sistema de medição desenvolvidos – análise comparativa do transitório acelerado utilizando a fonte desenvolvida e a fonte comercial.

Com essa seqüência de ensaios pretende-se:

Item 1: projetar e otimizar o procedimento de injeção de CC com o mínimo de variáveis; avaliar as necessidades das máximas tensões e correntes necessárias para o projeto da fonte CC desenvolvida; aprimorar o procedimento proposto (sobretensão inicial da bobina).

Item 2: verificar que o aquecimento acelerado ocorre também no compressor inserido em um sistema de refrigeração; aprimorar o procedimento proposto (ajustes do controlador).

Item 3: verificar se há mudança nos resultados do ensaio de capacidade com o transitório acelerado; verificar necessidades de adaptações no esquema elétrico da bancada de ensaios de desempenho; confirmar a possibilidade de controle da temperatura da bobina através da medição de resistência.

Item 4: verificar se os ensaios utilizando a fonte e o sistema de medição desenvolvidos se comportam de maneira semelhante aos ensaios do item 1.

5.3 Bancada elétrica para ensaios com compressor a vazio

Para os ensaio de compressores a vazio, foi constituída uma bancada elétrica. A estrutura básica é a mesma da apresentada na figura 4.8 da seção 4.1.3 incorporando, adicionalmente, o circuito de *bypass* do protetor térmico (figura 5.1).

A contatora *K1* permite a selecionar a fonte de alimentação alternada do compressor. Em repouso (contatos “normalmente fechados”), habilita-se a tensão proveniente da rede elétrica; quando energizada (contatos “normalmente abertos”), *K1* comuta a alimentação para a fonte comercial. A fonte selecionada chega ao compressor através

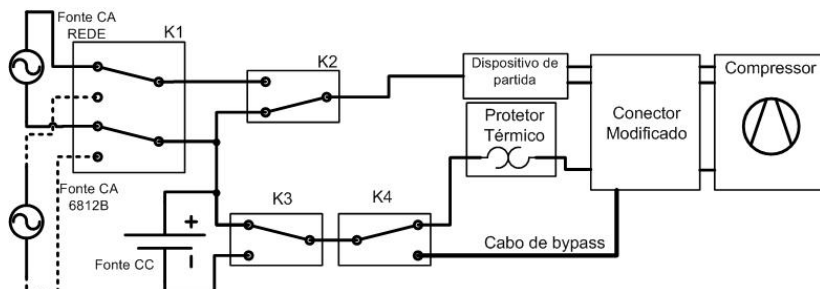


Figura 5.1: Diagrama elétrico da bancada de testes com compressor.

da atuação de $K2$. A contatora $K3$ conecta a fonte CC ao compressor. $K4$, por sua vez, faz o *bypass* do protetor térmico, removendo-o do circuito.

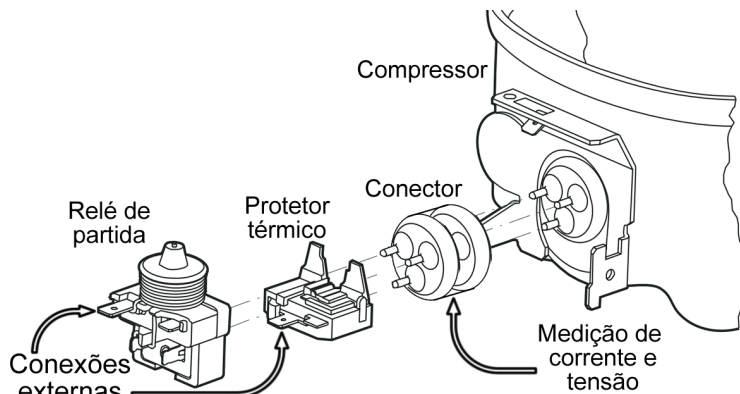
Para simplificar a construção, apenas o *bypass* do neutro foi implementado. Desse modo é necessário o cuidado de sempre conectar o neutro (saída NF da contatora $K4$) ao protetor térmico, pois, no caso de inversão, haveria um curto circuito entre fase e neutro através desse dispositivo.

O conector utilizado para a ligação do compressor é semelhante ao utilizado em (4), pois permite que se faça a medição do sinal de tensão o mais próximo possível dos terminais da bobina principal (após os dispositivos de partida e proteção), e medição da corrente apenas da bobina principal, como mostra a figura 5.2(a).

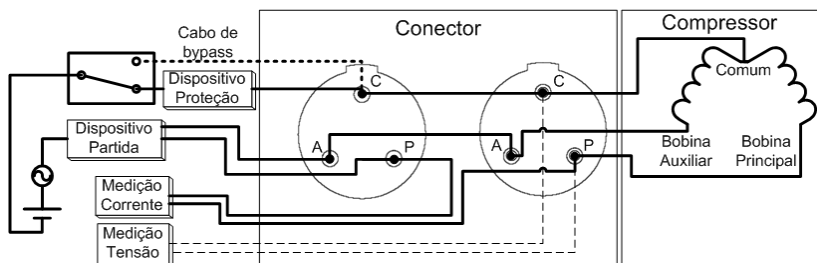
Adicionou-se, então, um cabo a esse conector para que a corrente do compressor flua através dele. Essa estrutura é ilustrada com detalhes na figura 5.2(b).

Não é viável medir tensão diretamente nos contatos dos dispositivos de partida e proteção devido à queda de sinal provocada por esses componentes.

Além disso, a corrente medida nesse ponto seria a soma das correntes das bobinas principal e auxiliar. Apesar de alguns dispositivos de partida, como o relé, removerem completamente a bobina auxiliar do circuito, dispositivos como o PTC, apenas diminuem essa corrente mas não a anulam. Existem, ainda, compressores que operam com ca-



(a) Ilustração da ligação dos dispositivos elétricos ao compressor, adaptado de (66)



(b) Diagrama de ligação utilizando conector modificado.

Figura 5.2: Conexão elétrica do compressor.

pacitores permanentes, ou seja, a bobina auxiliar continua energizada durante o funcionamento do motor.

Essa bancada foi utilizada para a obtenção dos resultados apresentados nos itens 5.4 e 5.7.

5.4 Fonte comercial alimentando o compressor a vazio

5.4.1 Condições dos ensaios

Realizaram-se inicialmente ensaios com os compressores fora de um sistema de refrigeração, pois o objetivo é a análise comparativa

entre os tempos de estabilização da temperatura do corpo com e sem injeção de CC.

Essa abordagem simplificou a avaliação, uma vez que muitas variáveis mantiveram-se com variações mínimas, principalmente as pressões de sucção e descarga. Além disso não há necessidade de outros elementos que fazem parte do restante do circuito de refrigeração. Nessas condições, uma das poucas variáveis capazes de contribuir para alterações nos resultados é a temperatura ambiente. No entanto, no laboratório onde os ensaios foram realizados, seu valor permanece dentro de uma faixa conhecida de $(24 \pm 4)^\circ\text{C}$.

Para estabelecer uma comparação, a temperatura da bobina principal foi inferida através do sistema de medição da fonte 6812B e, também, através de termopares; a última, responsável por realimentar o controle. Para a leitura dos termopares utilizou-se um equipamento do tipo *Compact Field Point* (67) com módulos específicos para esse fim.

O controle da temperatura mostrou-se bastante eficiente devido ao comportamento com pouco ruído do sinal medido. Seria possível a utilização de ciclos de controle inferiores a 1 segundo. No entanto, para uniformizar todos os ensaios permitindo comparações, o controle foi ajustado com ciclos de controle de 2 segundos, tempo necessário para a medição de resistência (1 s para estabilização e 1 s para medição), como discutido na seção 4.2.1.

5.4.2 Resultados

A verificação dos resultados foi baseada apenas nos valores medidos das temperaturas do corpo e da bobina principal. Segundo Scussel (1), quando a corrente contínua é injetada com o compressor em movimento (CA e CC), as variáveis térmicas se comportam de maneira semelhante ao natural, apenas atingindo um valor acima do valor normal sem aquecimento forçado.

No entanto, o apêndice C apresenta os gráficos dos ensaios de forma detalhada, com as demais temperaturas internas do compressor.

A figura 5.3 (mesmo ensaio apresentado na figura C.1) registra os resultados do ensaio realizado com o compressor *D* para verificação do comportamento em aquecimento natural. Para esse ensaio o tempo

de estabilização da temperatura do corpo foi de aproximadamente 120 minutos. Observou-se que a bobina tende a estabilizar em 77 °C.

O valor de 77,0 °C foi utilizado como *setpoint* do controlador para o ensaio apresentado na figura 5.4. Nesse ensaio a bobina foi aquecida rapidamente para o seu valor de estabilização esperado (77,0 °C). É visível a diminuição do tempo de estabilização para 50 minutos. No entanto, a temperatura do corpo estabilizou em 52,5 °C, enquanto o valor esperado era 50,0 °C. O ensaio foi repetido (apêndice C, figura C.4), e a diferença entre o valor esperado e o valor estabilizado foi de apenas 0,5 °C, enquanto o tempo de estabilização foi de 45 minutos. Essa diferença no valor de estabilização se deve, principalmente, à variação da temperatura ambiente.

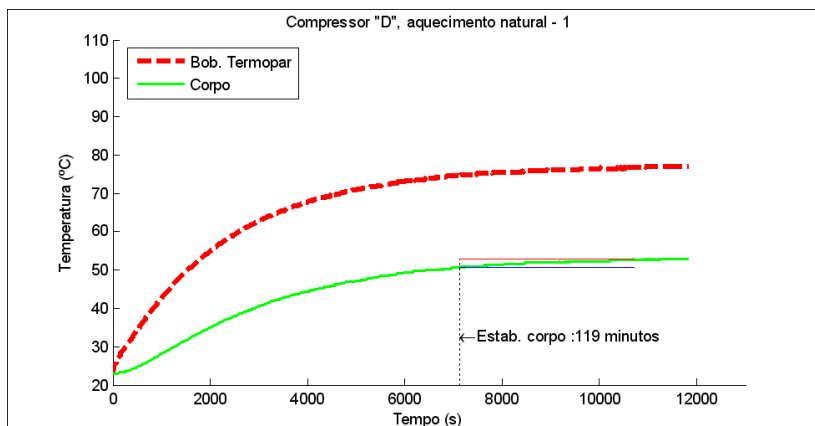


Figura 5.3: Aquecimento natural do compressor *D*.

Analisando os resultados dos primeiros ensaios, percebeu-se que, no início do ensaio, o corpo se encontra normalmente frio (de 23 °C a 30 °C). Desse modo, aplicou-se uma temperatura ainda maior à bobina com a intenção de aumentar a transferência de calor na etapa inicial. O resultado desse ensaio é apresentado na figura 5.5 (mesmo ensaio da figura C.5). O tempo de estabilização do corpo foi reduzido para aproximadamente 35 minutos.

Seguindo a estratégia de superaquecer a bobina no início do en-

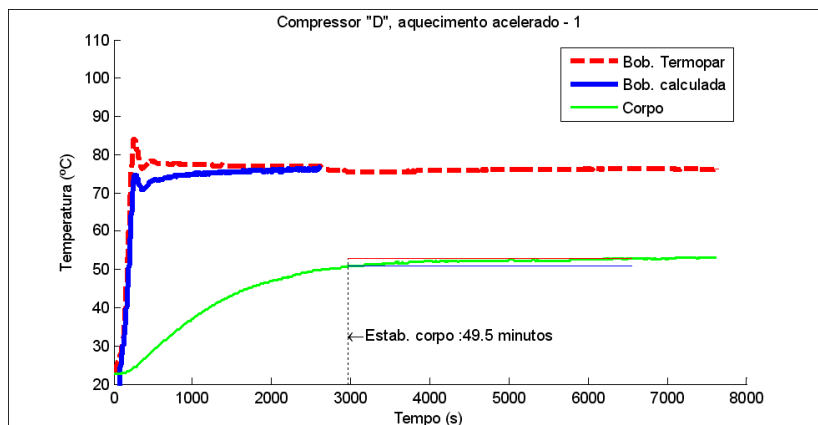


Figura 5.4: Aquecimento forçado no compressor *D*, estratégia 1: sem sobretemperatura na bobina.

saio, aumentou-se ainda mais a temperatura inicial. No entanto, para permitir uma transição suave da temperatura da bobina em direção à estabilização, um valor intermediário foi imposto ao enrolamento quando o corpo se aproxima da sua temperatura de estabilização. O resultado é mostrado na figura 5.6 (mesmo ensaio apresentado com mais detalhes na figura C.8), com tempo de estabilização do corpo em aproximadamente 30 minutos.

Os resultados dos ensaios realizados com o compressor *D* são apresentados de forma resumida na tabela 5.1 e os gráficos visualizados no apêndice C.

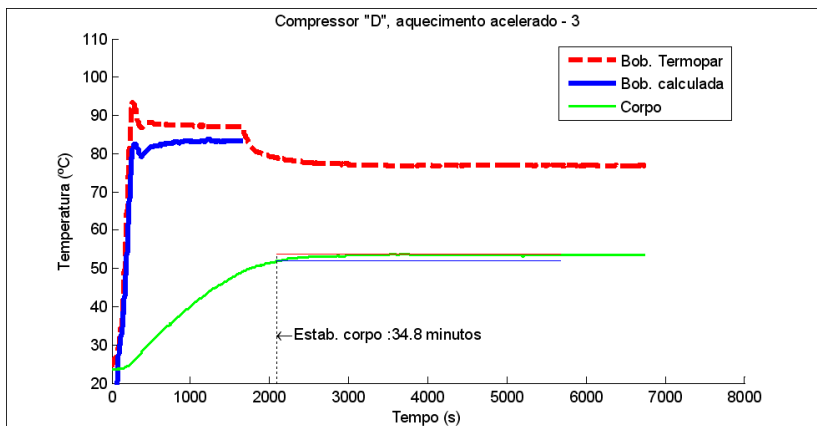


Figura 5.5: Aquecimento acelerado no compressor *D*, estratégia 2: com sobretemperatura de 10 °C.

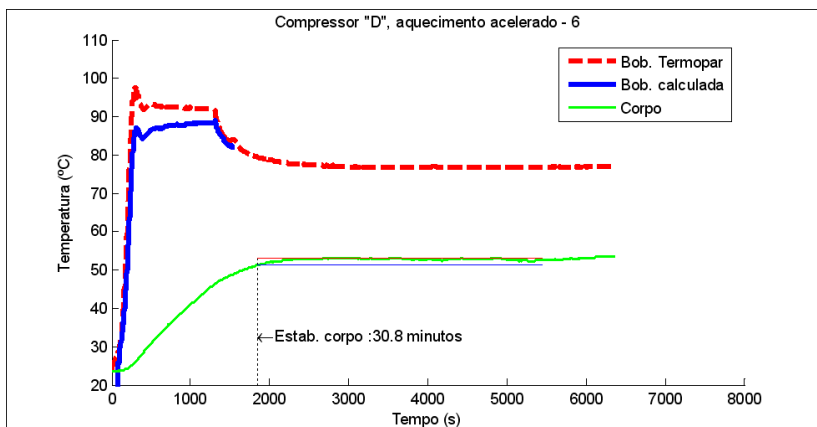


Figura 5.6: Aquecimento forçado no compressor *D*, estratégia 3: com sobretemperatura inicial de 15 °C e intermediária de 8 °C.

Tabela 5.1: Resultados dos ensaios realizados com a fonte comercial no compressor *D* a vazio.

Estratégia. (sobretemp.)	Condição	Tempo estabilid.	T_{esperada} Corpo(°C)	T_{esperada} Bobina°C	T_{corpo} (°C)	T_{bobina} (°C)	Redução Tempo
-	Natural	118,8 min	-	-	55,5	78,5	-
-	Natural	119,1 min	-	-	52,5	77,0	-
1 (+0°C)	Acelerado	49,5 min	52	77	52,5	76,5	58,3%
1 (+0°C)	Acelerado	45,2 min	52	77	52,0	76,0	62,0%
2 (+10°C)	Acelerado	34,8 min	52	77	53,5	77,0	70,7%
2(+10°C)	Acelerado	39,7 min	52	77	53,0	76,5	66,6%
3(+15°C)	Acelerado	39,1 min	50	77	52,0	76,5	67,1%
3(+15°C)	Acelerado	30,8 min	50	77	52,5	77,0	74,1%

5.5 Fonte comercial alimentando compressor em bancada de partida e tombamento

Essa etapa consiste em avaliar os efeitos da inserção de corrente contínua em compressores acoplados a um sistema de refrigeração – bancada de partida e tombamento. Nessa bancada é possível controlar as pressões de sucção e descarga do compressor através da atuação em válvulas proporcionais e da utilização de um compressor auxiliar, conforme figura 5.7. Dessa forma, espera-se um comportamento do compressor semelhante ao da bancada de ensaios de desempenho.

Para a análise de aceleração do transitório, as pressões foram mantidas constantes nos valores da condição conhecida como de *checkpoint*. Nessa condição, a pressão de sucção é mantida em aproximadamente 1,14 bar (pressão cuja temperatura do fluido refrigerante R134a é de -23,3 °C na saturação) e a pressão de descarga em 14,7 bar (pressão cuja temperatura do fluido refrigerante R134a é de +54,4 °C na saturação). Foi utilizado o *checkpoint* pois é uma condição de teste comumente praticada nos ensaios de desempenho de compressores (1, 16, 24).

5.5.1 Condições dos ensaios

Para a utilização dessa bancada, foi necessário acrescentar o software de controle de temperatura da bobina ao software principal. Também foi preciso modificar a parte elétrica referente à alimentação do compressor, permitindo a utilização da fonte 6812B.

Nessa bancada os compressores são conectados ao circuito elétrico sem os dispositivos de partida e proteção. Sendo assim, não houve a necessidade de *bypass* do protetor térmico. A partida é realizada através de contadoras, energizando inicialmente ambos os enrolamentos do compressor e em seguida removendo a alimentação da bobina auxiliar, mantendo corrente apenas na principal, semelhante ao que realiza um dispositivo de partida.

Novamente utilizou-se a temperatura da bobina medida com o termopar para realimentação do controle.

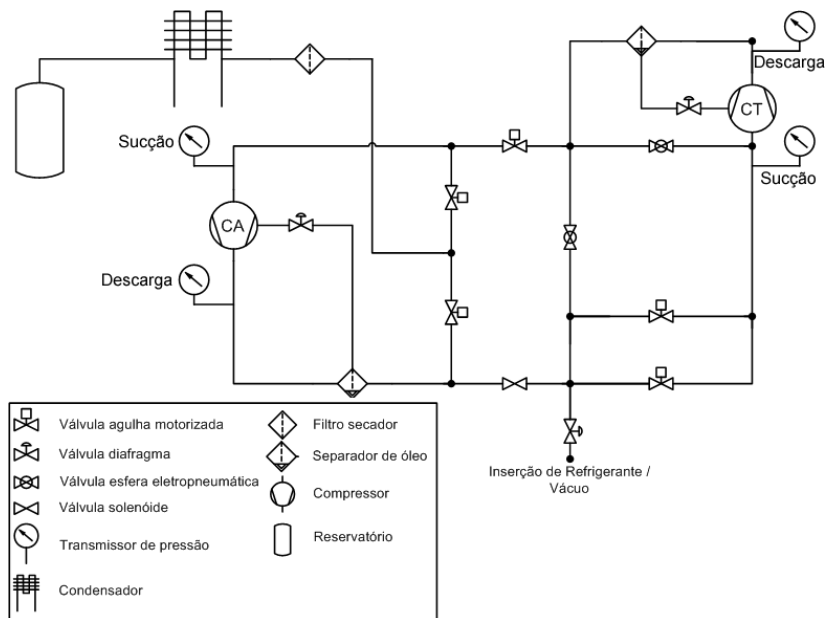


Figura 5.7: Diagrama simplificado da bancada de partida e tombamento

5.5.2 Resultados

Foram ensaiados três modelos diferentes de compressores: B^1 , D e G . Foi realizado um ensaio com cada modelo para determinar o tempo natural de entrada em regime da temperatura do corpo. Esse ensaio também determinou os valores de estabilização para as temperaturas do corpo e da bobina principal. Nesta seção os resultados são exemplificados apenas com os gráficos dos ensaios utilizando o compressor B . Os demais resultados (com os compressores D e G) realizados na bancada de partida e tombamento podem ser visualizados no apêndice D.

Um resumo com os resultados de todos os ensaios é apresentado na tabela 5.2.

¹Vide apêndice G.

O tempo de estabilização é o momento em que, a partir dele, a variação na temperatura do corpo permanece entre um intervalo de ± 1 °C durante uma hora. Devido ao início do ensaio ocorrer de forma manual, partindo-se o compressor e iniciando a rotina de aceleração do transitório, uma diferença de até ± 3 minutos entre os tempos de estabilização deve ser considerada como variabilidade natural dos resultados. A diferença entre os tempos com e sem transitório acelerado (redução de até 85 minutos) confirma a eficácia do método de aceleração proposto.

Os valores de temperatura esperada para o corpo ($T_{esperada}$ Corpo) também são mostrados na tabela 5.2 (4ª coluna). Para os ensaios *B/2* e *D/1*, esses valores foram propositalmente alterados na hora da realização do ensaio. Foi utilizado o método descrito no capítulo 3, com valores de temperatura de estabilização do corpo diferentes dos esperados, a fim de simular a variabilidade real das temperaturas de um mesmo modelo de compressor em ensaios diferentes. Dessa maneira, simulou-se uma diferença entre a informação da temperatura de estabilização do corpo do compressor obtida a partir do histórico de ensaios e o valor “real” de estabilização.

Para o ensaio *B/2* foi inserido um erro de +4 °C, como se a temperatura do compressor devesse atingir um valor maior do que o realmente atingiria, provocando um sobreaquecimento no corpo.

No ensaio *D/1* inseriu-se um erro de -5 °C.

Pode-se perceber que mesmo uma variação de até 5 °C na temperatura esperada não prejudica consideravelmente o tempo de estabilização para os modelos testados. No entanto, percebe-se uma tendência de sobretemperatura no valor final do corpo do compressor quando se superestima a temperatura de estabilização.

Tabela 5.2: Resultados dos ensaios realizados na bancada de partida e tombamento.

Modelo Ensaio	Transitório	Tempo Estabilid.	T_{esperada} Corpo(°C)	T_{corpo} (°C)	T_{bobina} (°C)	Redução Tempo
<i>B</i>	Normal	104,5 min	-	62,3	79,7	
<i>B /1</i>	Acelerado	29,7 min	62	61,9	80,4	71,6%
<i>B /2</i>	Acelerado	25,6 min	66	63,9	82,7	75,5%
<i>D</i>	Normal	113,3 min	-	70,3	97,9	
<i>D /1</i>	Acelerado	31,7 min	64	68,6	93,6	72,0%
<i>D /2</i>	Acelerado	28,2 min	69	68,6	94,8	75,1%
<i>G</i>	Normal	123,0 min	-	69,5	88,5	
<i>G</i>	Acelerado	43,0 min	68	69,3	88,5	65,0%

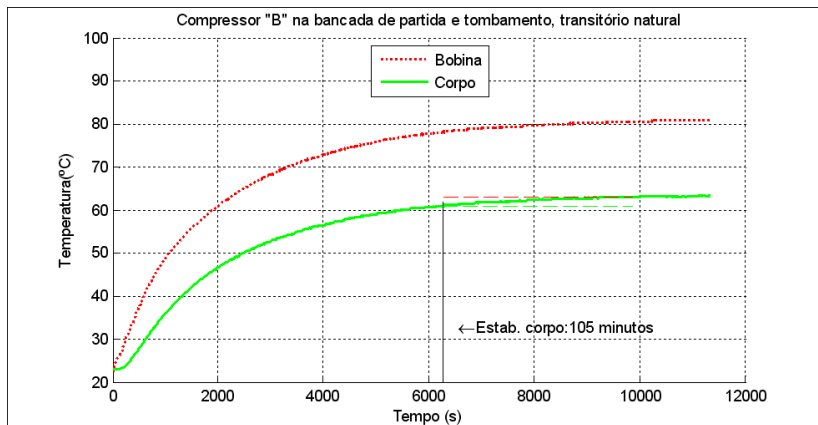


Figura 5.8: Ensaios na bancada de Partida e Tombamento, modelo *B* com transitório natural.

As figuras 5.8 e 5.9 mostram gráficos com as evoluções no tempo das temperaturas do corpo e da bobina para os ensaios do compressor modelo *B*.

Na figura 5.8 é mostrada a evolução natural das temperaturas, com tempo de estabilização de 105 minutos.

Na figura 5.9, com transitório acelerado, visualiza-se que próximo aos 1500 s houve a mudança de *set point* da temperatura da bobina da sobretemperatura inicial para a intermediária.

Como o objetivo dos ensaios deste capítulo é a análise comparativa com e sem injeção de CC, o algoritmo utilizado para detectar o tempo de estabilização para esses ensaios leva apenas em consideração a temperatura do corpo. Contudo, é perceptível no gráfico da figura 5.9 que no momento da entrada em estabilização ainda existe injeção de CC. Na prática (durante o ensaio de desempenho), a estabilidade só pode acontecer após o fim do aquecimento acelerado, pois a injeção de corrente contínua altera o consumo do compressor, aumentando consideravelmente a potência medida.

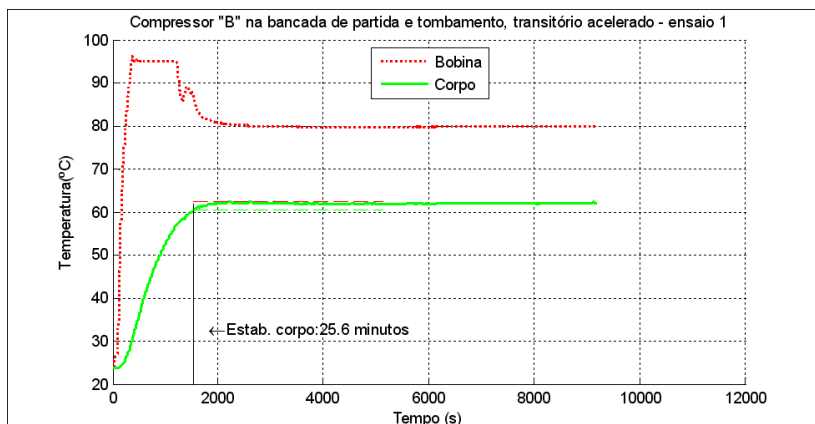


Figura 5.9: Ensaios na bancada de Partida e Tombamento, modelo *B* com transitório acelerado.

5.6 Fonte comercial empregada em ensaio de desempenho

Após os resultados satisfatórios da injeção de corrente contínua no compressor a vazio e na bancada de partida e tombamento, foram realizados testes com o compressor na bancada de ensaios de desempenho de compressores. Esses testes visavam quatro objetivos principais:

1. Verificar a influência da aceleração do transitório no resultado final do ensaio (valores de capacidade e consumo do compressor).
2. Verificar o comportamento do método com o compressor inserido no sistema completo de refrigeração (com diversas variáveis controladas pela bancada).
3. Verificar as necessidades de alteração e adaptação do esquema elétrico da bancada.
4. Averiguar as necessidades de criação e modificação de software para o aquecimento acelerado (filtros, temporizações, disponibilizar informações etc.)

Para os testes, foi utilizada a fonte comercial 6812B. Além dela, também estava disponível um sistema de medição de tensão e corrente desenvolvido em outro projeto (68), o qual foi usado para a medição

da resistência da bobina e a inferência de sua temperatura. Evitou-se, assim, o problema da habilitação do sense externo da fonte (citados na seção 3.1.1) e os testes puderam ser realizados sem grandes alterações na bancada. O sistema instalado era utilizado originalmente para a medição da potência elétrica, através das formas de onda de tensão e corrente. Utilizando os valores médios dessas formas de onda foi possível a obtenção das parcelas contínuas de corrente e tensão.

5.6.1 Condições dos ensaios

Os ensaios na bancada de desempenho foram realizados com compressores instrumentados diferentes dos testados anteriormente: H^2 , I , J e K . Tal mudança deve-se ao fato da bancada da empresa onde foram realizados os testes, ter sido desenvolvida para operação com fluido refrigerante R600a, enquanto os compressores utilizados anteriormente operam apenas com R134a.

Os ensaios deste capítulo foram divididos em duas etapas: antes e depois dos ajustes da bancada.

Na primeira etapa, antes dos ajustes, observou-se a diminuição do tempo de estabilização do corpo do compressor e a possibilidade de controle através da temperatura inferida pela resistência. No entanto, como os controladores das demais variáveis da bancada não estavam devidamente ajustados, pois a bancada estava ainda em fase de ajustes, a redução no tempo de estabilização do corpo do compressor não permitiu a redução no tempo total do ensaio.

Na etapa seguinte, com os controladores devidamente ajustados, houve uma diminuição também no tempo total do ensaio.

Algumas alterações elétricas na bancada foram necessárias para a injeção de corrente contínua no compressor. Como a injeção foi realizada pela fonte já presente no painel e a medição de tensão e corrente CC foi efetuada por um equipamento também instalado, as alterações se limitaram ao circuito necessário para o *bypass* do protetor térmico.

Foi necessária também uma eletrônica externa para determinar se o cabo conectado ao protetor térmico era a fase ou o neutro da tensão de alimentação, pois essa mesma tensão (fase ou neutro) será apli-

²Vide apêndice G.

cada ao cabo adicionado ao conector. Como é possível que o operador inverta as conexões de alimentação, ora conectando a fase, ora conectando o neutro no protetor térmico, realizar o bypass sempre do neutro poderia provocar um curto circuito através do protetor caso as conexões fossem invertidas (semelhante ao exposto na seção 5.3).

Esse circuito desenvolvido, denominado “circuito de detecção de fase”, é mostrado na figura 5.10. Caso a tensão entre o neutro e o condutor ligado ao comum do compressor (cabo de *bypass*) seja maior do que 60 V (alternada ou contínua) a tensão de saída é 0 V. Se essa tensão for inferior a 30 V, a tensão de saída é 12 V (tensão de alimentação CC do circuito).

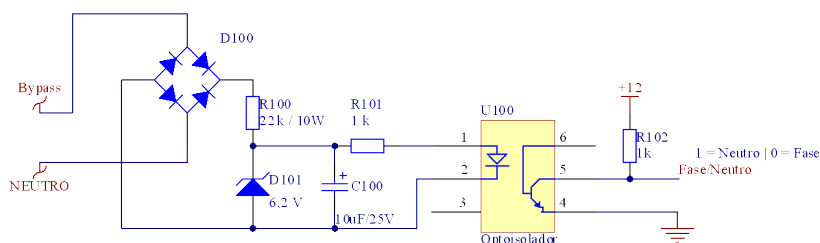


Figura 5.10: Circuito isolado para detecção de fase.

Com essa informação é possível determinar se é necessário aplicar a tensão do neutro ou da fase diretamente ao comum do compressor para remover o protetor térmico do circuito. Além disso, é necessário que o circuito de detecção de fase possa ser habilitado ou desabilitado (desconectado do sistema), porque consome certa potência elétrica. Caso ele permaneça sempre habilitado, essa potência extra será somada ao consumo do compressor, provocando erros no resultado do ensaio. Dessa forma, foram necessárias três saídas digitais e uma entrada digital para permitir o *bypass* do protetor térmico. Uma entrada digital para informar se neutro ou fase foi conectado ao protetor térmico, uma saída digital para habilitar e desabilitar o circuito de detecção de fase, e duas saídas digitais para habilitar o *bypass* do dispositivo de proteção (uma para fase e outra para neutro).

5.6.2 Resultados

Antes dos ajustes da bancada

Após a adequação elétrica da bancada e alterações no software principal, foram realizados ensaios com e sem injeção de CC.

Nas figuras 5.11 e 5.12 são apresentados, no mesmo gráfico, os comportamentos da temperatura do corpo com aquecimento normal e acelerado, respectivamente, para os compressores *I* e *K*. Em ambos os ensaios, ainda se realizou o controle de temperatura da bobina com a realimentação do valor medido, através de termopares.

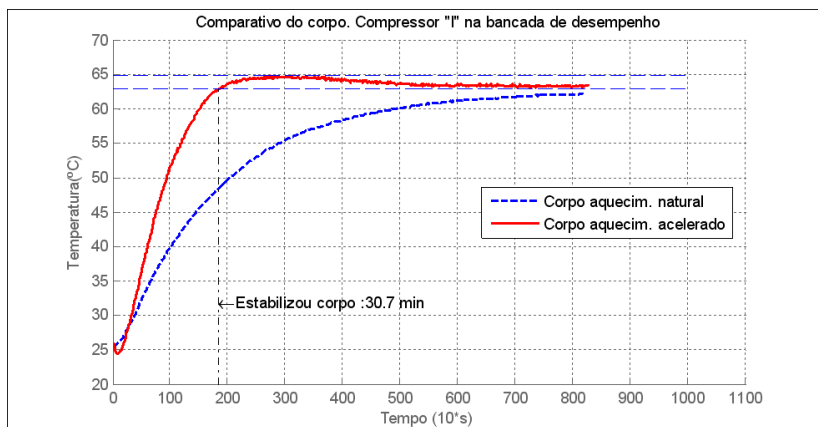


Figura 5.11: Comparativo das temperaturas do corpo com aquecimento normal e acelerado para o compressor *I*.

É visível a diminuição no tempo de estabilização em ambos os modelos. O tempo de estabilização diminuiu de 84 para 31 minutos no ensaio de *I* e, para *K*, de 90 para 29 minutos. Os resultados desses ensaios podem ser visualizados separadamente, incluindo a temperatura da bobina do compressor, no apêndice E.1. O ganho no tempo total do ensaio não pode ser comprovado nesses primeiros testes devido aos ajustes ainda em andamento na bancada.

As figuras 5.13, 5.14 e 5.15 registram o comportamento de algumas variáveis importantes para o ensaio de desempenho do compressor

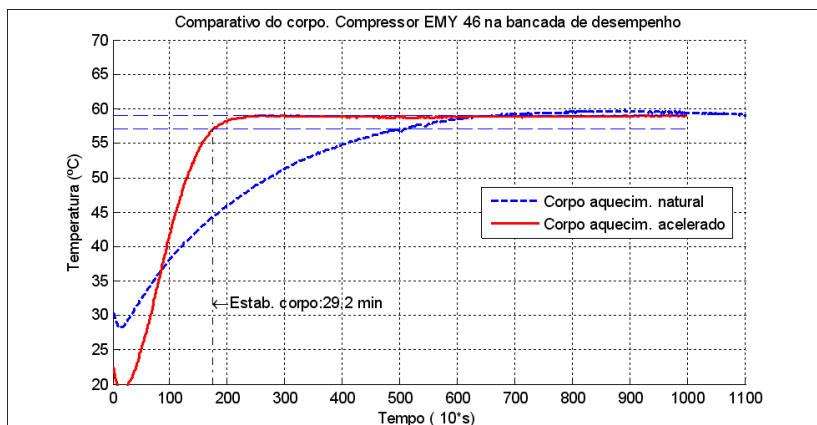


Figura 5.12: Comparativo das temperaturas do corpo com aquecimento normal e acelerado para o compressor K .

K , como pressão de sucção e de processo, temperaturas de entrada e saída do trocador de calor e vazão mássica do compressor.

As pequenas variações apresentadas não foram significativas a ponto de causar um novo transitório no comportamento do sistema como um todo (principalmente no trocador de calor, de comportamento tipicamente lento).

Na seqüência, ainda antes dos ajustes da bancada, novos ensaios foram efetuados com os compressores modelo I , K e J (resultados no apêndice E.2. O controle da temperatura da bobina foi realizado agora com realimentação do valor inferido através do sistema de medição de resistência.

É possível visualizar na figura 5.16 (mesmo ensaio apresentado na figura E.8) que o resultado da medição da temperatura da bobina possui muito ruído. Fica bastante evidente a necessidade do filtro implementado (apresentado no item 3.2.2). Com a utilização desse filtro foi possível um controle suave da temperatura da bobina.

Outra alteração realizada na bancada está relacionada à mudança automática de faixa do sistema de medição de corrente. Essa troca era realizada automaticamente pela comutação de resistores *shunt*. Cada

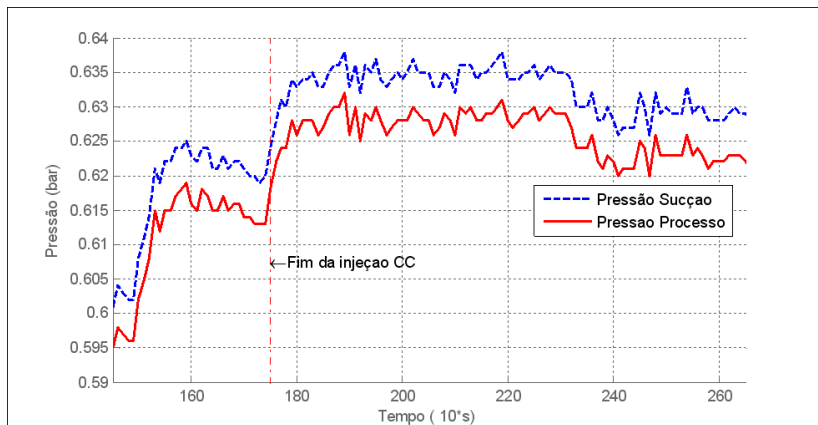


Figura 5.13: Pressões de sucção e processo. Comportamento ao fim da injeção de CC, modelo *K*.

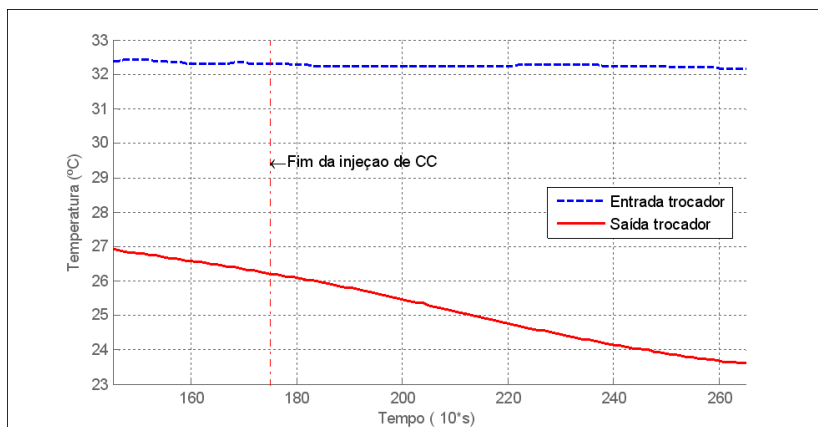


Figura 5.14: Temperaturas de entrada e saída do trocador de calor. Comportamento ao fim da injeção de CC, modelo *K*.

alteração de faixa também provocava picos de ruído. Desse modo, a faixa de medição de corrente foi fixada, durante o aquecimento acelerado, para a escala de maior valor (devido às correntes elevadas), diminuindo a incidência de picos de ruído.

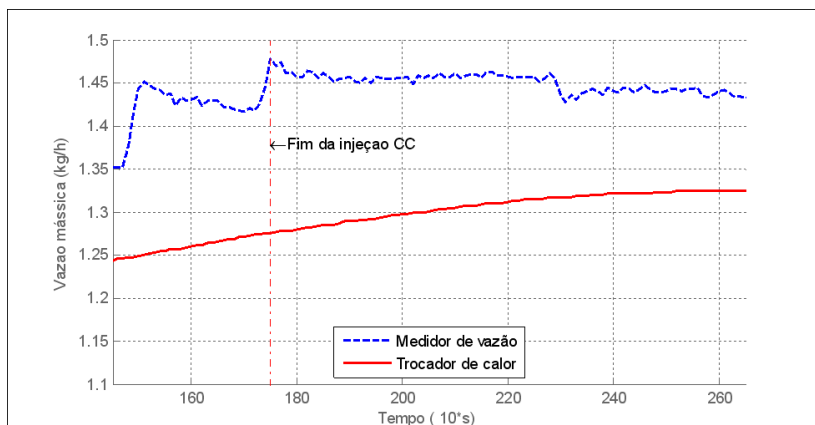


Figura 5.15: Vazões mássicas, medida através de transdutor e estimada pelo trocador de calor. Comportamento ao fim da injeção de CC, modelo *K*.

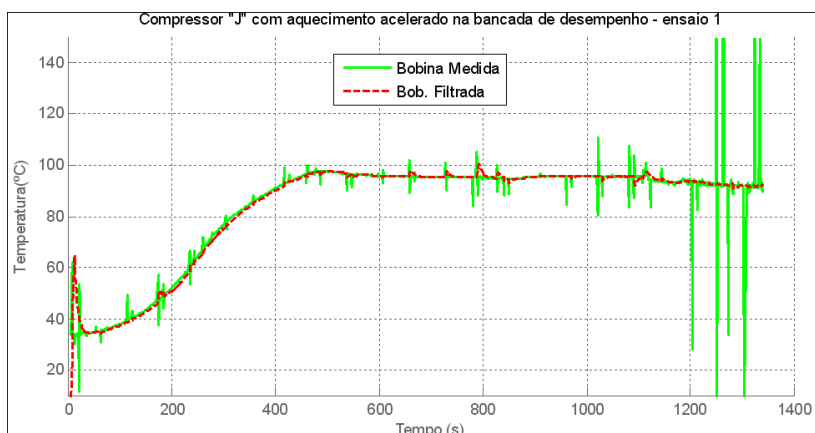


Figura 5.16: Resultado do filtro para a temperatura da bobina medida. Compressor *J*.

Após ajustes da bancada

Após os ajustes dos controladores da bancada, principalmente na otimização do controle das temperaturas do trocador de calor (16), houve ganhos também no tempo total de ensaio. Os ensaios foram realizados pelos operadores do painel com compressores não instrumen-

tados – modelos *H* e *I* – utilizando, inclusive, três unidades diferentes para cada modelo.

Na figura 5.17 é mostrado o comportamento da temperatura do corpo dos compressores ensaiados do modelo *H*. Na figura 5.18, a mesma situação para o modelo *I*. Os resultados desses ensaios são apresentados nas tabelas 5.3 e 5.4.

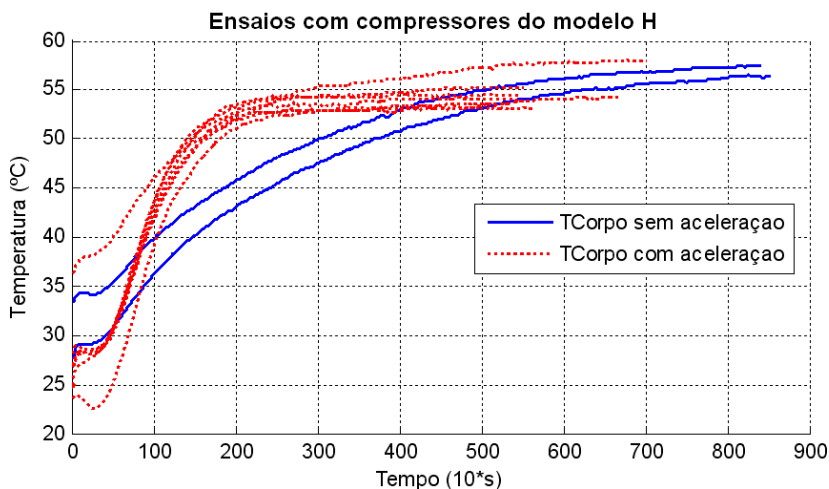


Figura 5.17: Ensaio com e sem transitório acelerado realizados na bancada de ensaios de desempenho. Modelo *H*

É possível perceber uma grande repetitividade dos resultados com transitório acelerado, exceto para um dos ensaios realizados do modelo *H*. Esse é o quinto ensaio acelerado da tabela 5.3 (ensaio isolado na figura E.15 do apêndice E). Houve um fim antecipado do processo de aceleração do transitório, e percebe-se uma forma do aquecimento do corpo bastante diferente das demais. Isso ocorreu devido a um erro no sistema de medição de frequência rotacional apontando um escorregamento acima do valor real, o que limitou a tensão máxima injetada durante a aceleração.

Além disso, para os ensaios do modelo *I*, é possível visualizar um comportamento diferenciado em um dos testes sem injeção de CC: o segundo ensaio com transitório natural (ensaio isolado na figura E.2 do apêndice E). Esse comportamento ocorreu devido ao compressor já

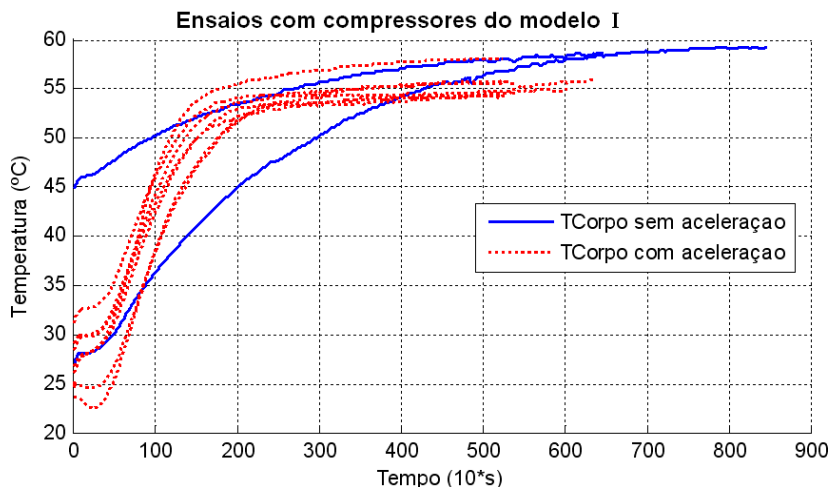


Figura 5.18: Ensaio com e sem transitório acelerado realizados na bancada de ensaio de desempenho. Modelo *I*

estar aquecido, provavelmente de um ensaio anterior. A temperatura inicial do corpo foi de 45 °C.

Embora as curvas de temperatura do corpo com transitório natural para o modelo *I* possuam uma tendência aparente de estabilizar em um valor muito próximo, é normal ocorrer uma variabilidade de até ± 4 °C, ainda que se utilize o mesmo compressor. Isso ocorre devido ao diferente posicionamento do transdutor de temperatura, além de variações naturais de cada ensaio.

No apêndice E.3 são apresentados os gráficos com a evolução da temperatura do corpo do compressor para esses ensaios realizados na bancada de desempenho. Não há informação da temperatura da bobina após o ajuste dos controladores porque, além de não utilizar compressores instrumentados, os valores de tensão e corrente contínuas não foram arquivados³.

Percebe-se, com esses resultados, que houve uma diminuição significativa no tempo total do ensaio, mesmo com o sinal medido de temperatura da bobina relativamente instável, se comparado com os ensaios anteriores utilizando termopares.

³Ensaio realizado na empresa pelos seus próprios técnicos.

De acordo com os operadores da bancada, em todos os ensaios (com aquecimento natural e aquecimento acelerado) a variação dos resultados de *capacidade*, *consumo* e *COP* ficaram dentro da faixa de incerteza do próprio painel e da variabilidade natural dos ensaios.

As tabelas 5.3 e 5.4 apresentam, comparativamente, os resultados obtidos dos ensaios de capacidade realizados com transitório natural e acelerado. Destaca-se que, além das incertezas dos instrumentos de medição – apresentados nas tabelas – existe ainda a variabilidade natural dos resultados entre cada ensaio e também entre os diferentes compressores de um mesmo modelo.

Foi possível confirmar, através desses resultados, que a aceleração do transitório não modificou os valores obtidos do ensaio de desempenho. A diferença entre os valores médios de capacidade, consumo e COP entre os ensaios foi próximo da incerteza apenas dos instrumentos.

Todas as modificações na bancada e no software foram possíveis e relativamente simples de serem realizadas.

Houve redução considerável no tempo de estabilização da temperatura do corpo do compressor e também do ensaio. Obteve-se uma diminuição de até 37% do tempo de ensaio para o modelo *H*. Para o compressor *I* foi um pouco inferior porque a média do tempo com transitório natural foi contaminada por um dos ensaios ter sido iniciado com o compressor preaquecido. Ainda assim a redução foi de até 30% para esse modelo.

Tabela 5.3: Resultados dos ensaios de desempenho após alterações nos controladores (compressores modelo H).

	Tempo ensaio	Capac. (W)	Consumo (W)	COP (W/W)	Corrente (A)	Temp. corpo (C)	Freq. rot. (RPM)	Vazão máss. (kg/h)
Transitório Natural	1	181,58	103,54	1,754	0,473	55,62	2953,03	1,949
	2	181,14	103,93	1,743	0,475	55,11	2951,53	1,944
	3	183,53	104,62	1,754	0,478	56,80	2951,80	1,970
Média	2h23min	182,08	104,03	1,750	0,475	55,84	2952,12	1,954
Transitório Acelerado	1	179,11	103,26	1,734	0,472	54,80	2952,58	1,922
	2	182,93	103,27	1,771	0,472	53,20	2952,80	1,963
	3	181,26	103,47	1,752	0,473	53,90	2951,58	1,945
	4	183,80	104,12	1,765	0,476	53,71	2950,99	1,973
	5	180,19	104,64	1,722	0,478	57,48	2951,77	1,934
	6	181,45	104,55	1,736	0,478	54,36	2951,57	1,947
	7	182,45	104,27	1,750	0,476	53,01	2951,83	1,958
Média	1h38min	181,60	103,94	1,747	0,475	54,35	2951,87	1,949
Incerteza dos instrumentos		0,7% valor lido	0,4% valor lido	1,1% valor lido				

Tabela 5.4: Resultados dos ensaios de desempenho após alterações nos controladores (compressores modelo I).

	Tempo ensaio	Capac. (W)	Consumo (W)	COP (W/W)	Corrente (A)	Temp. corpo (C)	Freq. rot. (RPM)	Vazão máss. (kg/h)
Transitório Natural	1	206,25	116,42	1,772	0,53	58,69	2.943,6	2,213
	2	203,82	116,45	1,750	0,53	57,84	2.944,8	2,187
	2h04min	205,03	116,43	1,761	0,53	58,26	2.944,2	2,200
Transitório Acelerado	1	203,95	115,63	1,764	0,53	54,36	2.943,3	2,189
	2	197,82	113,49	1,743	0,52	53,93	2.945,0	2,123
	3	198,61	113,81	1,745	0,52	55,24	2.944,8	2,132
	4	204,91	115,98	1,767	0,53	54,87	2.944,7	2,199
	5	203,98	115,70	1,763	0,53	57,5	2.945,8	2,189
	6	204,39	115,71	1,766	0,53	55,2	2.945,6	2,194
	7	203,99	115,73	1,763	0,53	53,7	2.945,5	2,189
	1h32min	202,52	115,15	1,759	0,53	54,97	2.944,9	2,174
Incerteza dos instrumentos		0,7% valor lido	0,4% valor lido	1,1% valor lido				

5.7 Dispositivo adicionador de CC alimentando compressor a vazio

Após concluídos os protótipos da fonte de corrente contínua e do sistema de medição, a solução foi novamente testada fora da bancada de ensaios de desempenho. Para a realização dos novos ensaios utilizando a bancada da empresa, seriam necessárias alterações no circuito para a inserção do equipamento. Isso exigiria um tempo para manutenção da bancada que não estava disponível. No entanto, da mesma forma que o método foi testado inicialmente utilizando a fonte comercial com o compressor a vazio, testou-se a mesma estratégia de aquecimento, com a fonte e o sistema de medição apresentados no capítulo 4.

5.7.1 Condições dos ensaios

Os ensaios foram realizados sob condições semelhantes às apresentadas na seção 5.4

Os ensaios foram realizados usando uma bancada elétrica, um computador com placa de aquisição para obtenção das formas de onda de tensão e corrente, e um equipamento *Compact Field Point* (67) para a medição das temperaturas internas do compressor instrumentado.

5.7.2 Resultados

Foram realizados ensaios com três modelos de compressores cujas características são apresentadas na tabela 5.5

Tabela 5.5: Características dos modelos de compressores ensaiados com a fonte desenvolvida.

	Resistência bob. principal	Capacidade (<i>checkpoint</i>)	Tensão nominal	Corrente nominal
Modelo <i>D</i>	20,5 ohm	123 W	220 V 60 Hz	0,9 A
Modelo <i>F</i>	14,1 ohm	176 W	220 V 60 Hz	0,56 A
Modelo <i>G</i>	3,8 ohm	205 W	115 V 60 Hz	1,2 A

Os resultados dos ensaios são mostrados em números nas tabelas

5.6, 5.7 e 5.8 e os gráficos com as temperaturas do corpo e da bobina estão presentes no apêndice F.

Com a utilização do sistema de medição desenvolvido, a ação do filtro não foi necessária e, de certa forma, até um pouco prejudicial pois, provocou atraso no sinal da temperatura e, conseqüentemente, uma maior sobretemperatura da bobina.

A diminuição do tempo de aquecimento do corpo é bastante evidente, com redução média de 75% com o procedimento proposto. O sistema de medição de resistência atendeu às necessidades, apresentando erros inferiores a 10 °C na inferência da temperatura da bobina.

É possível observar em dois ensaios realizados no compressor *G* que houve um comportamento bastante atípico da temperatura da bobina, e provocaram o aumento do tempo médio de estabilização. Isso foi causado por um mau contato entre o dispositivo de partida e o conector utilizado (já detalhado na figura 5.2 da seção 5.3). Com isso, houve um aumento da resistência de contato, o que prejudicou o controle. No entanto, esse erro de medição não comprometeu a integridade dos enrolamentos, pois a ação do controle foi diminuir a tensão CC injetada. Mesmo com esse erro, os tempos de estabilização foram bastante reduzidos.

Tabela 5.6: Tempos de estabilização da temperatura do corpo utilizando solução desenvolvida para modelo D.

Tipo de aquecimento	Natural	Natural	Natural	Acel.	Acel.	Acel.	Acel.	Média Natural	Média Acel.
Tbob esperado (°C)	-	-	-	58,0	58,0	58,0	58,0		
Tcorpo esperado (°C)	-	-	-	45,5	48,0	48,0	48,0		
Tbob estab (°C)	58,0	58,5	59,0	57,0	59,0	60,0	59,0		
Tcorpo estab. (°C)	51,5	48,5	49,0	47,5	49,0	50,0	49,5		
Tempo estab. (minutos)	128,1	120,4	120,1	41,0	25,1	26,8	29,1	122,8	30,5

Tabela 5.7: Tempos de estabilização da temperatura do corpo utilizando solução desenvolvida para modelo *F*.

Tipo de aquecimento	Natural		Acel.		Acel.		Acel.		Média Natural	Média Acel.
	Natural	Natural	Acel.	Acel.	Acel.	Acel.	Acel.	Acel.		
T _{bob} esperado (°C)	-	-	59,0	59,0	59,0	59,0	59,0	59,0		
T _{corpo} esperado(°C)	-	-	47,0	47,0	47,0	47,0	47,0	47,0		
T _{corpo} estab(°C)	47,5	47,0	46,5	48,5	48,0	49,0	48,5	48,5	47,5	48,1
Tempo estab (minutos)	117,9	118,6	28,2	35,4	26,9	31,1	27,3	27,3	126	29,8

Tabela 5.8: Tempos de estabilização da temperatura do corpo utilizando solução desenvolvida para modelo G.

Tipo de aquecimento	Nat.	Nat.	Nat.	Acel.	Acel.	Acel.	Acel.	Acel.	Acel.	Méd. Nat.	Méd. Acel.
Tbob esperado(°C)	-	-	-	74,5	74,5	77,0	77,0	77,0	77,0		
Tcorpo esperado(°C)	-	-	-	53,5	53,5	50,0	50,0	50,0	50,0		
Tcorpo estab(°C)	50,2	53,0	54,0	50,5	50,8	48,0	52,0	52,5	52,0	52,4	51,0
Tempo estab(°C) (minutos)	115	124	128	29,7	28,8	27,8	26,8	29,6	28,8	122	28,6

5.8 Conclusões acerca dos resultados dos ensaios

Os resultados dos ensaios realizados neste capítulo mostram que é possível utilizar a injeção de CC com a finalidade de diminuição do tempo de aquecimento do compressor, implicando diminuição no tempo total do ensaio.

O roteiro de ensaios realizados permitiu analisar diversos aspectos separadamente, culminando na implantação do método proposto na bancada de ensaios de desempenho e o desenvolvimento de equipamentos capazes de realizar a injeção de CC com custo reduzido.

5.8.1 Ensaios com compressor a vazio

Com os ensaios iniciais foi possível propôr o método de aquecimento baseado no controle de temperatura da bobina e analisar o comportamento da corrente CC sobre o compressor em funcionamento. Isso permitiu prever possíveis obstáculos como a remoção do protetor térmico e a possibilidade de tombamento com injeção de níveis excessivos de corrente contínua.

Foi necessário, para o procedimento proposto, utilizar valores das temperaturas atingidas ao final de ensaios (tanto do corpo quanto da bobina principal) obtidos do histórico de testes anteriores. No entanto, esses valores possuem um erro inerente à variabilidade natural desses ensaios.

Percebeu-se uma tendência de que, quanto mais próximo do valor esperado a temperatura do corpo estabilizar, menor será o tempo total de estabilização. Quando ocorre um erro positivo, ou seja, a temperatura de estabilização esperada é maior do que a realmente atingida, há excesso de aquecimento. Dependendo da intensidade desse sobreaquecimento, a estabilidade ocorrerá apenas após um resfriamento. Se o erro for negativo implicará aquecimento insuficiente, e o restante do aquecimento ocorrerá de maneira natural (mais lenta).

Embora o segundo erro (negativo) seja melhor para a eficiência do método (o procedimento proposto finaliza o aquecimento antes que o corpo do compressor atinja a temperatura esperada), quanto maior o erro, mais tempo o compressor demorará para atingir a estabilidade.

Embora a sobretensão da bobina também provoque certo

aquecimento excessivo do corpo, o erro positivo no valor da temperatura de estabilização do próprio corpo é mais relevante para o tempo final do ensaio. Isso ocorre porque a bobina armazena menos energia térmica se comparada à carcaça do compressor. É possível visualizar, nos gráficos onde a temperatura da bobina foi medida através de termopares, que seu resfriamento é relativamente rápido.

5.8.2 Ensaio com compressor na bancada de partida e tombamento

Os resultados do compressor na bancada de partida e tombamento comprovaram que o transitório acelerado também ocorre com o compressor inserido em um sistema de refrigeração. Esses ensaios também permitiram um melhor ajuste nos parâmetros de controle de temperatura da bobina.

5.8.3 Ensaio com compressor na bancada de desempenho

A utilização de uma bancada de ensaios de desempenho proporcionou a verificação de que o transitório acelerado praticamente não altera os resultados desses ensaios. A diferença relativa de capacidade entre o valor médio com transitório natural e os ensaios acelerados foram inferiores a 1,6 % para o modelo *H* e 3,5% para o modelo *I*.

Na maioria dos ensaios obteve-se tempos de estabilização da temperatura do corpo próximos de 30 minutos. Para os ensaios realizados após os ajustes da bancada, tempos totais de 1h30min.

Dos resultados sem transitório acelerado utilizando a bancada de desempenho (figuras E.1 e E.3 do apêndice E.1), é possível visualizar que, durante o tempo considerado estabilizado, ambas as temperaturas ainda variam dentro de certa tolerância. Apesar de essa variação admitida para o corpo ser pequena (± 1 °C), para a bobina principal a mudança foi de mais de 4 °C. Isso provoca uma alteração no valor da resistência, e conseqüentemente afeta o consumo e o COP do compressor.

Essas variações são admitidas como parte da incerteza dos resultados dos ensaios com aquecimento natural. No entanto, com a utilização do transitório acelerado, como proposto, a curva de temperatura da

bobina pode vir a apresentar um comportamento decrescente, ao contrário do aquecimento natural. Com isso, a resistência média durante o período considerado estabilizado pode vir a ser maior para os ensaios acelerados, aumentando o consumo e diminuindo o COP.

Dessa forma, é necessário um volume maior de ensaios com e sem injeção de CC, utilizando uma bancada estável e assegurando as mesmas condições iniciais em todos os testes. Assim, será possível obter dados mais confiáveis que permitam afirmar se existe uma tendência real de diminuição do COP.

5.8.4 Ensaios utilizando sistemas desenvolvidos

Os resultados dos ensaios utilizando a fonte desenvolvida mostraram que a sua utilização obteve desempenho semelhante à fonte comercial. Como as formas de onda da tensão imposta ao compressor são semelhante utilizando ambas as fontes, era de se esperar que o aquecimento proporcionado por elas também o fosse. A única diferença é um pequeno *ripple* devido aos ciclos de carga do capacitor.

Em relação ao sistema de medição, esse conseguiu atender às especificações, medindo a temperatura da bobina com erros de ± 10 °C em relação à medição com o termopar. Mesmo com essa incerteza relativamente alta, foi possível atingir tempos de estabilização reduzidos. Isso porque foi imposta à bobina uma sobretemperatura inicial. Assim, mesmo que a temperatura esteja abaixo da desejada (devido ao erro do sistema de medição), ela ainda será superior à temperatura atingida naturalmente. Caso a temperatura se encontre acima da almejada, o aquecimento ocorrerá ainda mais rápido.

Para assegurar que os enrolamentos do compressor não ultrapassem o limite de 130 °C, ficou definido que a máxima temperatura utilizada como *set point* para o controlador será de 105 °C, mesmo que a temperatura de estabilização do histórico seja superior a 90 °C. Essa limitação foi imposta considerando a combinação do erro de 10 °C do sistema de medição, juntamente com 10% de sobresinal devido ao controle dessa grandeza.

6 CONCLUSÕES E PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS

6.1 Conclusões

O objetivo inicial de redução do tempo de ensaio foi plenamente alcançado. Através da injeção de corrente contínua conseguiu-se que a temperatura do corpo do compressor estabilizasse (± 1 °C) em menos de 30 minutos. Considerando-se que o tempo inicial para a entrada em regime permanente dos ensaios realizados na bancada de desempenho era de aproximadamente 90 minutos, isso equivale a uma redução de 60%. Embora não tenham sido realizados ensaios em modelos mais antigos de bancada, sabe-se que o tempo de estabilização, para essas bancadas, era de 3 horas. Nesse caso a redução seria de 80%.

Em relação ao tempo total de ensaio, obteve-se tempos inferiores a 1h30min com a injeção de CC, representando uma redução de 36% em relação à duração média de 2h20min sem aceleração. Ou seja, é possível realizar três ensaios no intervalo de tempo em que seriam realizados apenas dois.

O método proposto alcançou tempos de transitório inferiores aos previstos em (1) e com a característica de praticamente não provocar perturbações no resto do sistema. O compressor continua operando aproximadamente sob a mesma frequência rotacional (com um escorregamento ligeiramente maior do que o nominal). Isso mantém a vazão mássica constante, e não altera significativamente as temperaturas e pressões de sucção e descarga. Pode-se considerar que, para o resto do sistema, o comportamento do compressor não muda durante o transitório acelerado. Dessa forma, não há outro transitório ao se retornar para as condições normais de operação.

Os resultados indicam que, mesmo com erros nas temperaturas

de estabilização obtidas dos ensaios anteriores, ainda é possível atingir a estabilização em tempos inferiores a 1 hora. Em condições ótimas – sem erros nos valores do histórico – é possível obter tempos inferiores a 30 minutos.

Embora algumas melhorias ainda possam ser realizadas no método de aquecimento e nos equipamentos, com a finalidade de diminuir ainda mais o tempo de aquecimento do compressor, essa redução de tempo pode não ser muito significativa. Isso porque outras variáveis, agora, também são as responsáveis pelo tempo de transitório. Principalmente as variáveis relacionadas à medição de capacidade através de calorímetro, métodos A e C (13).

É preciso analisar as demais variáveis lentas do sistema, pois com a solução proposta, a temperatura do corpo do compressor deixou de ser limitante.

É importante salientar que apenas os ensaios no modelo novo de bancada, desenvolvida pela parceria Embraco Labmetro/LIAE (1, 16, 24, 69), duram aproximadamente 2h30min. Nas bancadas mais antigas, com controles manuais, ou automáticos individuais, esse tempo ainda é elevado, de 4 horas ou mais. A solução proposta permite diminuir o tempo de ensaio nas duas bancadas. No entanto, são necessários alguns ensaios nas bancadas manuais para que se possa estimar qual será o ganho de tempo nessas condições. Implantando o procedimento nas bancadas antigas, que existem em maior número, é possível diminuir a necessidade de novas bancadas e de turnos extras de trabalho.

A redução do tempo total dos ensaios permite também uma diminuição no tempo de um projeto de pesquisa e desenvolvimento, garantindo uma penetração mais ágil de novos produtos no mercado.

6.1.1 Acerca do método de aquecimento

O método se mostrou robusto, abrangendo diversos modelos de compressores. O controle da temperatura da bobina permite um rápido aquecimento inicial com a segurança de não ultrapassar a temperatura limite suportada pela bobina, e uma transição suave da temperatura da bobina em direção ao seu valor de estabilização, evitando um possível sobreaquecimento capaz de tomar mais tempo para ser resfriado do que o tempo ganho no aquecimento acelerado inicial.

Embora haja necessidade de informações de histórico (normalmente disponíveis em banco de dados), isso permite um melhor resultado frente a uma tentativa de estimar os valores de estabilização não conhecidos. Apesar do método proposto não poder ser utilizado em modelos de compressores dos quais não se tem informação (como modelos novos de compressores, por exemplo), após a realização do primeiro ensaio natural, pode-se aplicar a técnica de aquecimento em todos os demais. Como normalmente é necessário mais de um ensaio para comprovar as melhorias proveniente de modificações propostas pelo desenvolvimento de compressores, excetuando-se o primeiro, haverá redução de tempo em todos os ensaios seguintes.

Para evitar os picos de interferência dos sinais de tensão e corrente, um filtro digital foi utilizado, e por causa disso o controle PI ficou relativamente lento. Se eliminadas essas interferências, é possível um ajuste melhor do controle e do tempo de laço a fim de diminuir o sobressinal da temperatura da bobina. Dessa forma pode-se trabalhar com valores maiores de sobretemperatura inicial, diminuindo o tempo de estabilização.

6.1.2 Acerca dos sistemas desenvolvidos

Os sistemas desenvolvidos cumpriram as especificações do início do projeto. A fonte foi capaz de alimentar o compressor com tensão CA e CC, fornecendo a potência necessária para o aquecimento acelerado. O sistema de medição foi capaz de medir a temperatura média da bobina principal do compressor de maneira satisfatória, evitando temperaturas além das suportadas pelo isolamento dos condutores.

O custo estimado dos componentes necessários para a montagem desses sistemas (fonte e medição) é inferior a R\$ 2.000,00, sem considerar a placa de aquisição e o computador utilizados para a medição dos sinais. Dessa forma, o objetivo de um sistema de custo reduzido foi atingido. A melhoria desse sistema, no entanto, permitiria um procedimento mais robusto e eficiente, garantindo, com menor erro, as temperaturas desejadas na bobina principal

Para a integração desses equipamentos à bancada de desempenho foram necessários alguns componentes externos, como contadores e relés, pois tanto os circuitos de potência, quanto os sinais gerados

pelo instrumento (sinais de tensão e corrente) precisaram ser comutados para uma integração em paralelo com outros equipamentos (watímetros, sistemas de medição de tensão, corrente e resistência). Esta integração ocasionou um aumento relativo no tamanho, na complexidade e, com menor intensidade, no custo da solução.

Uma possibilidade de melhoria é sugerida na seção seguinte, como proposta para trabalhos futuros: a utilização de uma estrutura de fonte CC com comutação em alta frequência. Isso permite reduzir o tamanho e custo de alguns componentes externos (capacitor, indutor e transformador).

Outra possibilidade na diminuição de custo seria a existência de bancadas específicas para ensaiar compressores com faixas de capacidade diferentes. A mesma bancada é utilizada para ensaios de compressores com capacidades bastante variadas e, conseqüentemente, correntes nominais e resistências de enrolamento também bastante diferentes. Isto faz com que a fonte projetada tenha que ser capaz de fornecer a potência do pior caso. Se houvesse bancadas separadas por categorias diferentes, as fontes poderiam ser projetadas especificamente para aquela faixa de potência. Essa solução seria viável, mas deve ser contrabalanceada com os problemas de se ter muita variedade de equipamentos, necessidade de componentes para reposição, logísticas de manutenção etc.

O projeto da fonte previu inicialmente que correntes contínuas de até 10 ampères seriam injetadas. Isso porque, de acordo com resultados do início do projeto, viu-se que correntes com valores aproximadamente três vezes maiores do que a nominal seriam suficientes para um aquecimento rápido da bobina do compressor. Entretanto, ensaios realizados com um modelo de compressor com corrente nominal de 1,2 A apresentaram resultados semelhantes – em relação a tempo de estabilização do corpo – tanto com 5 A quanto com 7 A de corrente contínua máxima injetada. Se compressores com correntes nominais acima de 2 A apresentem resultados semelhantes, é possível diminuir a potência máxima da fonte.

6.2 Propostas para trabalhos futuros

Em virtude das dificuldades encontradas, alguns pontos foram observados como sendo possíveis de serem aperfeiçoados. Algumas sugestões para novos trabalhos são apresentadas a seguir.

- Alteração da estrutura para fonte chaveada.

O objetivo seria diminuir os componentes (transformador, indutor e capacitor), reduzindo consideravelmente o tamanho e o custo total do equipamento. Outra vantagem importante é tornar o sinal de tensão mais estável. Na arquitetura atual, um pequeno atraso ou avanço no ângulo de disparo pode provocar uma alteração de até unidades de volt, dependendo do ponto de operação.

- Implantação do sistema na bancada de partida e tombamento.

Os ensaios de partida e de tombamento são testes realizados com compressores e, tal como na bancada de desempenho, existe um transitório inicial de aquecimento. Nos ensaios realizados nessa bancada, um bom controle da temperatura da bobina é essencial, pois existem tolerâncias mais estreitas para esse valor. Viu-se que, com injeção de corrente contínua, pode-se aquecer rapidamente a bobina, o que pode ser utilizado no ensaio de partida. Mas, ainda que seja possível aquecê-la rapidamente, mesmo com o resto do compressor ainda frio, essa temperatura da bobina não se mantém, pois o calor também é perdido rapidamente para os demais componentes. Dessa forma, um aquecimento completo de todo o compressor pode ser utilizado para diminuir a variação da temperatura da bobina.

Um possível desafio nessa bancada é tentar evitar que a dinâmica do sistema (as pressões de sucção e descarga são alteradas continuamente nos ensaios de partida e tombamento) afete o desempenho do sistema de medição utilizado para determinar a temperatura da bobina. Além disso, como a incerteza desejada para a medição da temperatura da bobina é inferior à desenvolvida neste trabalho, serão necessários aperfeiçoamentos no sistema de medição de resistência.

- Unificação do sistema de aceleração do transitório com o sistema de medição de resistência, reunindo-os em apenas um equipamento.

Essa sugestão também implica melhorias no sistema de medição do sistema de aceleração de transitório, de modo a atender às necessidades de incertezas relacionadas à medição de resistência de enrolamento. Pode ser necessária também uma reestruturação da fonte de alimentação, a fim de torná-la mais estável para baixas tensões (até abaixo de 1 V). Isso diminuiria consideravelmente os custos combinados dos dois equipamentos. Principalmente na parte de medição, pois os transdutores utilizados atualmente pelos dois sistemas são redundantes. Além disso, seria economizado espaço facilitando a instalação e a manutenção das bancadas.

- Integração de hardware microcontrolado, com aquisição de dados.

A possibilidade de utilizar um sistema próprio de conversão A/D tornaria o sistema independente de um microcomputador e placa de aquisição, deixando-o mais autônomo. Dessa forma, seria possível a implantação desse sistema em bancadas semi-automatizadas ou de controle manual, as quais não possuem um computador dedicado para seu controle. Existe apenas um computador supervisor monitorando, geralmente, quatro bancadas. Isso permitiria uma redução no custo de implantação para essa configuração.

- Outras técnicas de controle;

Diferentes técnicas de controle poderiam ser utilizadas no controle da temperatura da bobina, como controle *fuzzy*, controle não linear etc. Além disso, pode ser possível a utilização de sistemas especialistas para particularizar o método de aquecimento para diferentes condições. Compressores com capacidades reduzidas, por exemplo, costumam ter variações maiores na temperatura de estabilização do corpo (devido à menor massa). Desse modo a etapa de aquecimento forçado poderia encerrar a uma

“distância” maior da temperatura de estabilização do corpo (-4 °C ao invés de -3 °C proposto pelo método), garantindo mais robustez e possivelmente tempos de estabilização ainda menores.

- Estimar temperaturas de estabilização;

É interessante um estudo mais aprofundado a respeito da determinação dos valores de estabilização das temperaturas da bobina e do corpo. Embora os testes utilizando extrapolação através de ajustes de curvas de primeira e segunda ordens não obtiveram bons resultados, novos estudos poderiam ser realizados com esse propósito. Isso permitiria deixar o sistema independente dos valores obtidos de ensaios anteriores, possibilitando a utilização de aquecimento acelerado em modelos novos de compressores, dos quais não se têm nenhuma informação.

REFERÊNCIAS

- 1 SCUSSEL, J. N. *Propostas de ações para reduzir o tempo demandado por ensaio de desempenho de compressores herméticos*. 153 p. Dissertação (Mestrado) — Programa de Pós-Graduação em Metrologia Científica e Industrial, Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, 2006.
- 2 TODESCAT, M. L.; POSSAMAI, F. C. A review of household compressor energy performance. In: . West Lafayette - IN: Purdue Press, 2004. (C067), p. 1–8.
- 3 U.S. DEPARTMENT OF ENERGY. *DOE Fundamentals Handbook, Mechanical Science, Volume 2 of 2*. Washington D.C., Janeiro 1993. Disponível em: <<http://www.hss.energy.gov/nuclearsafety/ns/techstds/standard/standard.html>>. Acesso em: 20 de jan. 2010.
- 4 PACHECO, A. L. S. *Desenvolvimento de Sistema para Medir a Resistência de Enrolamento em Motores de Compressores Energizados*. 180 p. Dissertação (Mestrado) — Programa de Pós-Graduação em Metrologia Científica e Industrial, Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, 2007.
- 5 MARQUES, G. *Máquinas de indução monofásicas*. Website.
- 6 HALLIDAY, D.; RESNICK, R. *Física 3*. São Paulo: Livros Técnicos e Científicos (LTC), 1984.
- 7 SIEMENS. *TCA785 Datasheet*.
- 8 CADDOCK ELECTRONICS INC. *Type 1776 Precision Decade Resistor Voltage Dividers*. [S.l.], 2004.
- 9 ANALOG DEVICES. *AD215 Datasheet*. Norwood, MA, 1996.
- 10 LEM. *LA-25 Datasheet*. [S.l.].

- 11 NATIONAL INSTRUMENTS CORP. *FieldPoint Operating Instructions (FP-TC-120 and cFP-TC-120)*. [S.l.], Outubro 2002.
- 12 HOUPIS, C. H.; LAMONT, G. B. *Digital control systems: theory, hardware, software*. p.106. segunda edição. New York: McGraw Hill, 1992.
- 13 INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. *ISO 917: Testing of refrigerant compressors*. Switzerland, Sept. 1989. 31 p.
- 14 HENKLEIN, P. *Análise de Ensaios de Desempenho de Compressores Herméticos Durante o Transitório*. Dissertação (Mestrado) — Programa de Pós-Graduação em Metrologia Científica e Industrial, Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, 2006.
- 15 STEINBACH, K. *Identificação do Instante de Entrada em Condições de Regime Permanente em Ensaios de Desempenho de Compressores*. 199 p. Dissertação (Mestrado) — Programa de Pós-Graduação em Metrologia Científica e Industrial, Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, 2008.
- 16 FLESCH, R. C. C. *Estudo e Projeto de Estratégias de Controle para Aplicação em uma Bancada de Ensaio que Apresenta Atraso de Transporte*. Dissertação (Mestrado) — Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Automação e Sistemas, Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, 2008.
- 17 STOECKER, W. J.; JABARDO, J. M. S. *Refrigeração industrial*. 2. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 2002.
- 18 STOECKER, W. *Industrial Refrigeration Handbook*. New York: McGraw-Hill Professional, 2004. 782 p.
- 19 AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS. *ANSI/ASHRAE 23: Methods of testing for rating positive displacement refrigerant compressors and condensing units*. Atlanta, GA, 2005. 14 p.

- 20 AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS. *ANSI/ASHRAE 41.9*: Calorimeter test methods for mass flow measurements of volatile refrigerants. Atlanta, GA, 2000. 22 p.
- 21 AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS. *ANSI/ASHRAE 41.10*: Flowmeter test methods for mass flow measurements of volatile refrigerants. Atlanta, GA, 2003. 21 p.
- 22 ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 11947*: Compressores de refrigeração – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 1979. 31 p.
- 23 ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 13410*: Condições de ensaio para determinação da capacidade de refrigeração nominal de compressores herméticos e semi-herméticos para refrigeração. Rio de Janeiro, jun. 1995. 4 p.
- 24 POLETTO, E. L. *Aprimoramento de uma bancada de ensaios de desempenho de compressores herméticos visando reduzir incertezas de medição*. 107 p. Dissertação (Mestrado) — Programa de Pós-Graduação em Metrologia Científica e Industrial, Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, 2006.
- 25 WEG. *Módulo 1 Comando e Proteção*.
- 26 BIM, E. *MÁQUINAS ELÉTRICAS E ACIONAMENTO*. Primeira edição. Rio de Janeiro: Ed. Campus, 2009. 480 p.
- 27 U.S. DEPARTMENT OF ENERGY. *DOE Fundamentals Handbook, Electrical Science, Volume 4 of 4*. Washington D.C., Junho 1992. Disponível em: <<http://www.hss.energy.gov/nuclearsafety/ns/techstds/standard/standard.html>>. Acesso em: 20 de jan. 2010.
- 28 EMBRACO. *VCC Household Application (2nd generation) for R 134a and R 600a*. Website. Disponível em: <http://www.embraco.com.br/portugue/produtos/informativos_pdf/01021.pdf>. Acesso em: 15 de jul. 2010.

- 29 Y. J. Kang e Y. Jeon. *LINEAR MOTOR FOR LINEAR COMPRESSOR*. 2010. 2010/0084929. Disponível em: <<http://www.freepatentsonline.com/20100084929.pdf>>. Acesso em: 13 de ago. 2010.
- 30 H. Lee. *LINEAR COMPRESSOR*. 2008. US 2008/0226473. Disponível em: <<http://www.freepatentsonline.com/20080226473-.pdf>>. Acesso em: 13 de ago. 2010.
- 31 FITZGERALD, A. E.; JR, C. K.; KUSKO, A. *Máquinas elétricas*. New York: Mc Graw-Hill, 1971.
- 32 TORO, V. del. *Fundamentos de máquinas elétricas*. São Paulo: Livros Técnicos e Científicos (LTC), 1999.
- 33 EMBRACO; ASPERA. *Compressors Handbook*. 04 2000. Disponível em: <http://www.embraco.com.br/portugue/produtos/informativos_pdf/MP01EG.pdf>. Acesso em: 12 abr. 2010.
- 34 MANUAL de Aplicação de Compressores. Disponível em: <http://www.embraco.com.br/portugue/produtos/00004_port.pdf>. Acesso em: 3 de fev. 2010.
- 35 STUMBERGER, G. et al. Prevention of iron core saturation in multi-winding transformers for dc-dc converters. *Magnetics, IEEE Transactions on*, v. 46, n. 2, p. 582 –585, feb. 2010. ISSN 0018-9464.
- 36 SHEMANSKE, R. Electronic motor braking. *Industry Applications, IEEE Transactions on*, IA-19, n. 5, p. 824 –831, sept. 1983. ISSN 0093-9994.
- 37 LUKITSCH, W. Dynamic braking without specialized controls. In: *Textile Industry Technical Conference, 1989., IEEE 1989 Annual*. [S.l.: s.n.], 1989. p. 6/1 –6/4.
- 38 JIANG, J.; HOLTZ, J. An efficient braking method for controlled ac drives with a diode rectifier front end. In: *Industry Applications Conference, 2000. Conference Record of the 2000 IEEE*. [S.l.: s.n.], 2000. v. 3, p. 1446 –1453.

- 39 MICHALSKI, L. et al. *Temperature Measurement*. segunda edição. Chichester: Wiley, 2001.
- 40 CHILDS, P. *Practical Temperature Measurement*. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2000.
- 41 ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 0794*. Rio de Janeiro, 2003. 61 p.
- 42 AGILENT TECHNOLOGIES. *AC Power Source/ Analyzers*. Santa Clara, CA, February 2008.
- 43 SUPPLIER. *SUPPLIER Indústria e Comércio de Eletro-Eletrônicos Ltda website*. Web. Disponível em: <<http://www.supplier.com.br>>. Acesso em: 10 de mai. 2009.
- 44 BARBI, I. *Eletrônica de Potência*. Sexta edição. Florianópolis: Edição do autor, 2006.
- 45 DORF, R. C. *Electrical Engineering Handbook*. Boca Raton: Chapman & Hall/CRCnetBASE, 2000.
- 46 ST. *TRIAC analog control circuits for inductive loads*. setembro 2008. Application Note. Disponível em: <<http://www.st.com/stonline/books/pdf/docs/3566.pdf>>. Acesso em: 5 de jun. 2009.
- 47 BALIGA, B. J. *Fundamentals of Power Semiconductor Devices*. Raleigh, NC: Springer, 2008.
- 48 NORMEY-RICO, J. E. *Sinais e sistemas realimentados - Parte 2*. Apostila.
- 49 DEMAY, M. B. *Desenvolvimento de Sistemas para Medição de Frequência Rotacional em Compressores Herméticos*. 153 p. Dissertação (Mestrado) — Programa de Pós-Graduação em Metrologia Científica e Industrial, Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, 2008.
- 50 SCLATER, N. *Electronics Technology Handbook*. New York: McGraw-Hill, 2004.

- 51 SEMIKRON. *SKT16 Datasheet*.
- 52 EPCOS. *Aluminium Electrolytic Capacitors*. [S.l.], Novembro 2008. Disponível em: <http://www.epcos.com/inf/20/30/db/aec_09-/B41456_B41458.pdf>. Acesso em: 15 de jun. 2009.
- 53 AGILENT. *Agilent 54621A/22A/24A/41A/42A Oscilloscopes and Agilent 54621D/22D/41D/42D Mixed-Signal Oscilloscopes*. Santa Clara, CA, 2002. Disponível em: <<http://cp.literature.agilent.com/litweb/pdf/54622-97036.pdf>>. Acesso em: 11 de ago. 2009.
- 54 AGILENT TECHNOLOGIES. *Agilent Technologies 5000, 6000 and 7000 Series InfiniiVision Oscilloscope Probes and Accessories*. Santa Clara, CA, October 2009.
- 55 MANJESHA; JYOTHI, B. Minimization of heat in the stator windings of a 3 phase induction motor using spwm technique x2014; an experimental study. *Power Electronics Systems and Applications, 2009. PESA 2009. 3rd International Conference on*, p. 1 –2, may 2009.
- 56 LEE, S. B.; HABETLER, T. G. An online stator winding resistance estimation technique for temperature monitoring of line-connected induction machines. *IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRY APPLICATIONS*, v. 39, 2003.
- 57 ABNT; INMETRO. *Guia para a Expressão da Incerteza de Medição*. Rio de Janeiro: [s.n.], 2003.
- 58 AGILENT. *Agilent 34401A 6 1/2 Digit Multimeter User's Guide*. Disponível em: <<http://cp.literature.agilent.com/litweb/pdf/34401-90004.pdf>>. Acesso em: 11 de ago. 2009.
- 59 NATIONAL INSTRUMENTS. *DAQ E Series User Manual*. [S.l.], Fevereiro 2007.
- 60 TEXAS INSTRUMENTS. *INA101 Datasheet*. Dallas, TX.
- 61 BURR-BROWN. *ISO124 Datasheet*. Tucson - AZ, Setembro 1997.

- 62 INMETRO. *Vocabulário Internacional de Metrologia*. dezembro 2008. Versão brasileira da 3a edição do International Vocabulary of Metrology - Basic and general concepts and associated terms". Disponível em: <http://www.inmetro.gov.br/metCientifica/vim/vim_completo.pdf>. Acesso em: 2 de mar. 2010.
- 63 TYCO ELECTRONICS. *Precision Metal Film Fixed Resistors*. [S.l.].
- 64 ALBERTAZZI, A.; SOUZA, A. R. de. *Fundamentos de Metrologia Científica e Industrial*. Barueri: Manole, 2008. 407 p.
- 65 BITTER, R.; MOHIUDDIN, T.; NAWROCKI, M. *LabVIEW advanced programming techniques*. Segunda edição. [S.l.: s.n.], 2007.
- 66 EMBRACO. *Instruções de montagens de componentes elétricos*. outubro 2006. Informativo Técnico. Disponível em: <<http://www.embraco.com.br/portugue/produtos/05006.pdf>>. Acesso em: 3 de fev. 2010.
- 67 NATIONAL INSTRUMENTS CORP. *FieldPoint Operating Instructions (FP-TC-120 and cFP-TC-120)*. [S.l.], Outubro 2002.
- 68 BARBOSA, F. Q. *Redução das incertezas nas medições de grandezas elétricas em uma bancada de ensaios de desempenho de compressores*. 192 p. Dissertação (Mestrado) — Programa de Pós-Graduação em Metrologia Científica e Industrial, Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, 2006.
- 69 PETROVIC, S. A. B. *Proposta de Arquitetura do Sistema de Automação Aplicado a Ensaio de Desempenho de Compressores Herméticos de Refrigeração*. 115 p. Dissertação (Mestrado) — Programa de Pós-Graduação em Metrologia Científica e Industrial, Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, 2007.
- 70 FLUKE. *1560 Black Stack -Thermometer Readout Users Guide*. Rev. 622102. USA.
- 71 FLUKE. *8508A Reference Multimeter Users Manual*. Julho 2002.

APÊNDICE A – CALIBRAÇÃO DOS TERMOPARES

Para os ensaios deste trabalho, foram utilizados cinco compressores instrumentados com termopares do tipo T (Cu-Constantan). Três deles para utilização com fluido refrigerante R134a: compressores *A*, *B*, *D*, *F* e *G*; e quatro para R600a: *H*, *I*, *J* e *K*.



Figura A.1: Figura ilustrativa do *Compact Field Point* da National Instruments.

A aquisição da temperatura medida através dos termopares, em todos os ensaios, foi realizada utilizando o equipamento *Compact Field Point* (figura A.1) da National Instruments com os seguintes módulos:

CFP200 – módulo de controle: Necessário para a comunicação do sistema de medição de temperatura com o software do computador que faz a aquisição dos dados. Uma vantagem desse módulo é a comunicação via TCP-IP através de uma rede local (LAN) comum facilitando a aquisição dos dados, pois não há necessidade de instalação e configuração de placas de aquisição.

CFPTC120 – módulo de leitura de termopar: O módulo TC-120 possui 8 canais e permite a leitura de termopares dos tipos J, K, R, S, T, N, E e B com compensação de junta fria, se utilizado em conjunto com o bloco conector cFP-CB-3 ou cFP-TB-3 (foi utilizado o bloco cFP-CB-3). Possui diversas faixas de medição de entrada, a maior delas (pior caso para a resolução) é de ± 100 mV. O conversor A/D desse módulo é de 16 bits, isso representa medir temperatura para essa faixa com uma resolução de $0,08$ °C (67).

De modo geral, o erro máximo desse equipamento é apresentado no gráfico da figura A.2. É possível visualizar também que o erro típico é inferior a $0,25$ °C para a faixa de 0 a 300 °C.

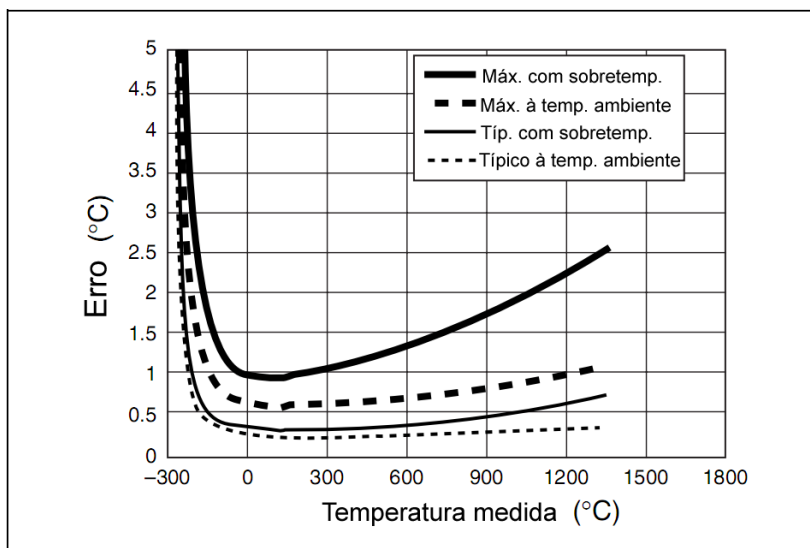


Figura A.2: Erros para os termopares do tipo J, K, N, T e E. Adaptado de (11)

Para garantir confiabilidade nos valores medidos nos ensaios, principalmente no que diz respeito à repetitividade¹, se fez necessária

¹Como os ensaios eram comparativos entre os perfis térmicos com transitório natural e tran-

a calibração dos termopares.

Calibrar individualmente os termopares de cada compressor demandaria muito tempo, pois seria necessário um longo tempo para a estabilização das temperaturas internas para cada ponto calibrado. Devido à essa dificuldade, uma nova abordagem foi proposta para a calibração.

Como os compressores são instrumentados com termopares a partir de um mesmo rolo, decidiu-se calibrar três amostras de termopares desse rolo: uma amostra do início (antes da instrumentação), uma amostra do meio (após a instrumentação de três compressores) e uma amostra do fim (após a instrumentação outros três compressores). Foi calibrada também uma quarta amostra de outro rolo de termopares com o objetivo de verificar a mudança de comportamento dos termopares de um rolo para o outro.

O objetivo da calibração destas amostras era verificar se todos os termopares dentro dos compressores possuem características semelhantes. Caso as amostras obtivessem curvas de calibração aproximadas, supõe-se que todos os termopares utilizados nos compressores também as terão.

A calibração foi realizada utilizando-se um banho termostático como padrão de transferência, e um equipamento *Fluke BlackStack* (70) utilizando um Pt100 como padrão de temperatura. O *BlackStack* também foi utilizado para a medição da tensão *Seeback* gerada pelos termopares sendo calibrados.

Os valores medidos dos pontos calibrados para os 4 termopares são apresentados nas tabelas A.2 a A.5.

O polinômio de segundo grau que melhor representa o comportamento médio dos três termopares do mesmo rolo é apresentado na equação A.1.

$$T = (-0,4518 \cdot (V_{termop})^2) + (25,229 \cdot V_{termop}) + 0,5558 \quad (A.1)$$

Onde:

T = temperatura em °C;

V_{termop} = tensão do termopar em mV.

Os gráficos com os pontos obtidos pela calibração juntamente com o polinômio de segundo grau que melhor representa o comportamento médio dos três termopares do rolo são apresentados na figura A.3.

Erro de aderência à curva Obteve-se a curva de calibração que melhor representa o comportamento médio dos três termopares do mesmo rolo. Para cada termopar, converteu-se o valor médio de tensão lido em cada ponto calibrado para a temperatura correspondente. Considerou-se o erro de aderência como sendo a diferença entre esta temperatura e a temperatura padrão do ponto. A repetitividade de cada ponto foi obtida também convertendo o desvio padrão das tensões lidas dos termopares.

Repetitividade Considerado como sendo o desvio padrão das medições para cada ponto convertidas para °C e expandidas para 95% de confiabilidade. Por exemplo, para o ponto 20 °C, obteve-se uma leitura média de 0,7886 mV e um desvio padrão de 0,0005 mV. Foi calculada a temperatura resultante (através do polinômio de melhor ajuste) para 0,7893 mV e para (0,7886 + 0,0005) mV. A diferença entre estas temperaturas foi expandida com o coeficiente *t* de Student para 3 graus de liberdade e 95% de confiabilidade.

Incerteza do padrão Foi considerada apenas a repetitividade das medições do padrão expandida para 95% de confiabilidade, pois nessa grandeza está embutida a variabilidade do banho termostático (padrão de transferência). Como esse padrão é um conjunto (Pt100 e sistema de medição) calibrado, sua curva de erros é conhecida, e seu erro combinado é de no máximo $\pm 0,007$ °C (70). Desse modo, foi considerado desprezível frente à variabilidade do próprio mensurando.

Foi adotado como erro máximo o maior valor entre as somas algébricas do erro de linearidade e repetitividade, combinado quadraticamente com a incerteza do padrão. A tabela A.1 apresenta apenas os

resultados de erro máximo de cada termopar calibrado. Esses erros são apresentados de modo detalhado nas tabelas A.6 a A.9 para cada termopar calibrado. Para a determinação do erro máximo considerou-se três parcelas de incerteza: erro de linearidade, repetitividade e incerteza do padrão (instabilidade do padrão de transferência).

Tabela A.1: Erro máximo e repetitividade máxima obtidos após a calibração para cada termopar

Termopar	Início (<i>I</i>)	Meio (<i>M</i>)	Fim (<i>F</i>)	Outro rolo (<i>O</i>)
Erro máximo	0,32 °C	0,29 °C	0,41 °C	0,48 °C
Repetitividade máxima	0,13 °C	0,12 °C	0,19 °C	0,18 °C

O erro máximo do termopar *O* (do rolo separado) obteve um valor acima dos demais. Isso se deve principalmente à ausência dos dados da sua calibração na obtenção da melhor curva.

Os erros máximos apresentaram valores da mesma ordem de grandeza, muito próximos uns dos outros, o que comprova a suposição de que não havia a necessidade de calibração individual de cada termopar. A utilização do comportamento médio permitiu as medições de temperatura interna com incerteza pequena o suficiente para atender as necessidades do projeto ($< 0,5$ °C).

Tabela A.2: Pontos de calibração do termopar *I* (início do rolo)

Ponto de calibração (°C)	1ª medição		2ª medição		3ª medição		4ª medição	
	tensão termopar (mV)	temperatura padrão (°C)	tensão termopar (mV)	temperatura padrão (°C)	tensão termopar (mV)	temperatura padrão (°C)	tensão termopar (mV)	temperatura padrão (°C)
15	0,5872	15,1286	0,5875	15,1192	0,5872	15,1158	0,5873	15,1120
20	0,7903	20,1664	0,7900	20,1664	0,7901	20,1654	0,7895	20,1623
30	1,1923	30,0173	1,1930	30,0235	1,1930	30,0289	1,1930	30,0286
40	1,6064	40,0233	1,6065	40,0221	1,6065	40,0190	1,6062	40,0169
50	2,0291	50,0630	2,0289	50,0656	2,0287	50,0677	2,0291	50,0690
60	2,4617	60,0257	2,4643	60,0293	2,4649	60,0309	2,4656	60,0262
70	2,9075	70,0254	2,9065	70,0233	2,9074	70,0149	2,9070	70,0136
80	3,3566	80,0394	3,3569	80,0308	3,3567	80,0428	3,3563	80,0431
90	3,8261	90,2451	3,8244	90,2406	3,8268	90,2493	3,8235	90,2506
100	4,2798	100,1861	4,2839	100,1739	4,2838	100,1750	4,2835	100,1703
110	4,7362	109,8244	4,7392	109,8188	4,7384	109,8098	4,7398	109,7993
125	5,4693	125,0731	5,4691	125,0588	5,4701	125,0617	5,4669	125,0638

Tabela A.3: Pontos de calibração do termopar *M* (meio do rolo)

Ponto de calibração (°C)	1ª medição		2ª medição		3ª medição		4ª medição	
	tensão termopar (mV)	temperatura padrão (°C)	tensão termopar (mV)	temperatura padrão (°C)	tensão termopar (mV)	temperatura padrão (°C)	tensão termopar (mV)	temperatura padrão (°C)
15	0,5877	15,1063	0,5876	15,1040	0,5871	15,1007	0,5871	15,0973
20	0,7893	20,1312	0,7888	20,1178	0,7882	20,1073	0,7882	20,1019
30	1,1951	30,0320	1,1950	30,0374	1,1950	30,0361	1,1945	30,0382
40	1,6074	40,0140	1,6071	40,0151	1,6069	40,0143	1,6070	40,0146
50	2,0303	50,0734	2,0305	50,0729	2,0304	50,0698	2,0300	50,0666
60	2,4684	60,0249	2,4677	60,0228	2,4684	60,0241	2,4682	60,0259
70	2,9087	70,0082	2,9086	70,0118	2,9078	70,0100	2,9075	70,0035
80	3,3591	80,0501	3,3579	80,0339	3,3598	80,0465	3,3597	80,0433
90	3,8274	90,3047	3,8264	90,2997	3,8261	90,3050	3,8235	90,2913
100	4,2774	100,1700	4,2818	100,1716	4,2794	100,1774	4,2800	100,1558
110	4,7339	109,7950	4,7349	109,8048	4,7340	109,8032	4,7359	109,8141
125	5,4656	125,0699	5,4647	125,0567	5,4676	125,0734	5,4665	125,0752

Tabela A.4: Pontos de calibração do termopar *F* (fim do rolo)

Ponto de calibração (°C)	1ª medição		2ª medição		3ª medição		4ª medição	
	tensão termopar (mV)	temperatura padrão (°C)	tensão termopar (mV)	temperatura padrão (°C)	tensão termopar (mV)	temperatura padrão (°C)	tensão termopar (mV)	temperatura padrão (°C)
15	0,5861	15,0945	0,5863	15,0919	0,5863	15,0863	0,5860	15,0768
20	0,7871	20,0980	0,7871	20,0934	0,7868	20,0860	0,7870	20,0798
30	1,1935	30,0395	1,1939	30,0428	1,1940	30,0454	1,1941	30,0469
40	1,6056	40,0122	1,6054	40,0138	1,6055	40,0151	1,6055	40,0115
50	2,0288	50,0770	2,0284	50,0783	2,0280	50,0783	2,0280	50,0739
60	2,4630	60,0225	2,4633	60,0210	2,4624	60,0207	2,4632	60,0205
70	2,9023	69,9820	2,9015	69,9912	2,9025	69,9904	2,9029	69,9862
80	3,3495	80,0177	3,3498	80,0397	3,3483	80,0161	3,3486	80,0166
90	3,8251	90,2748	3,8274	90,2777	3,8239	90,2816	3,8231	90,2861
100	4,2863	100,1592	4,2811	100,1760	4,2799	100,1518	4,2811	100,1368
110	4,7354	109,7863	4,7349	109,7884	4,7299	109,7818	4,7348	109,7551
125	5,4719	125,1055	5,4677	125,1044	5,4662	125,0726	5,4706	125,0556

Tabela A.5: Pontos de calibração do termopar O (outro rolo)

Ponto de calibração (°C)	1ª medição		2ª medição		3ª medição		4ª medição	
	tensão termopar (mV)	temperatura padrão (°C)	tensão termopar (mV)	temperatura padrão (°C)	tensão termopar (mV)	temperatura padrão (°C)	tensão termopar (mV)	temperatura padrão (°C)
15	0,5873	15,0663	0,5876	15,0611	0,5873	15,0599	0,5871	15,0555
20	0,7872	20,0685	0,7871	20,0626	0,7870	20,0595	0,7872	20,0561
30	1,1934	30,0539	1,1934	30,0580	1,1936	30,0580	1,1938	30,0603
40	1,6032	40,0083	1,6033	40,0076	1,6041	40,0130	1,6041	40,0226
50	2,0248	50,0690	2,0243	50,0700	2,0245	50,0705	2,0245	50,0695
60	2,4604	60,0220	2,4602	60,0220	2,4602	60,0249	2,4609	60,0202
70	2,8964	69,9844	2,8969	69,9784	2,8964	69,9753	2,8965	69,9690
80	3,3452	80,0378	3,3448	80,0357	3,3456	80,0478	3,3434	80,0357
90	3,8125	90,2228	3,8183	90,2270	3,8152	90,2517	3,8130	90,2267
100	4,2714	100,1463	4,2704	100,1328	4,2704	100,1162	4,2741	100,0894
110	4,7287	109,7818	4,7272	109,7905	4,7255	109,7845	4,7275	109,7776
125	5,4627	125,0867	5,4592	125,0872	5,4606	125,0851	5,4605	125,0575

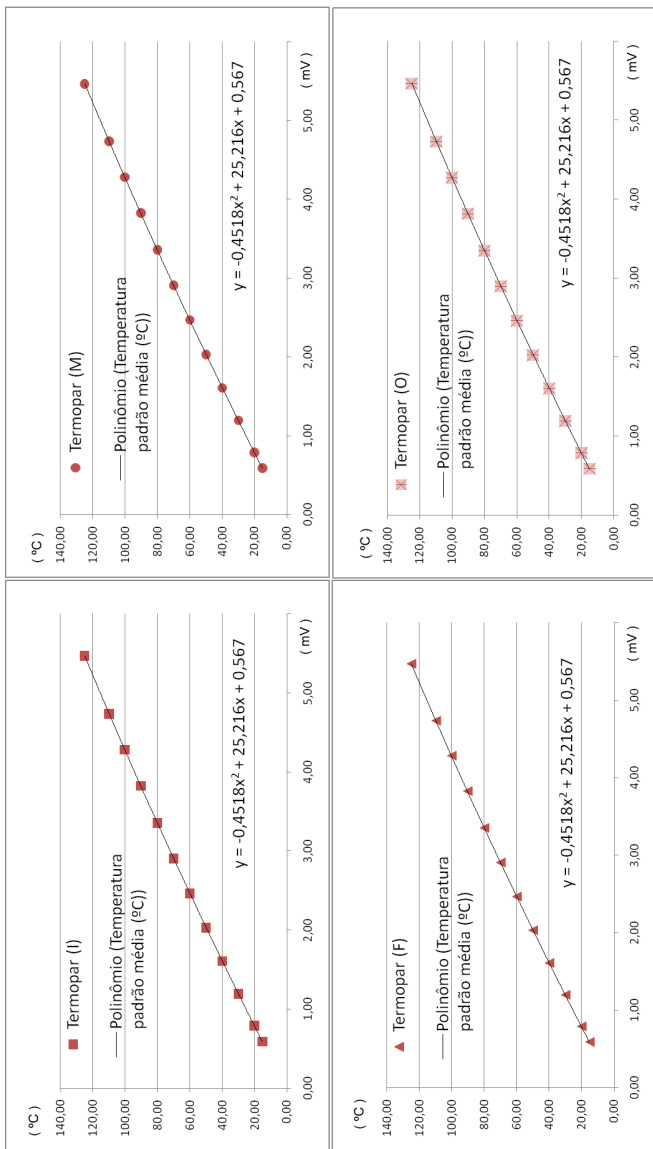


Figura A.3: Pontos calibrados e curva (polinômio) de calibração para cada termopar.

Tabela A.6: Erro máximo para o termopar *I* (início do rolo)

Ponto calibr. (°C)	Temp. padrão média (°C)	Tensão termop. média (mV)	Erro linear. (°C)	Repet. expans. (95%) (°C)	Incerteza do padrão (°C)	Erro máx. (°C)
15	15,12	0,59	0,10	0,01	0,02	0,11
20	20,17	0,79	0,04	0,03	0,01	0,06
30	30,02	1,19	0,02	0,03	0,02	0,05
40	40,02	1,61	0,11	0,01	0,01	0,12
50	50,07	2,03	0,19	0,01	0,01	0,21
60	60,03	2,46	0,06	0,12	0,01	0,19
70	70,02	2,91	0,04	0,03	0,02	0,08
80	80,04	3,36	0,09	0,02	0,02	0,11
90	90,25	3,83	0,17	0,11	0,01	0,28
100	100,18	4,28	0,10	0,13	0,02	0,24
110	109,81	4,74	0,10	0,10	0,03	0,20
125	125,06	5,47	0,11	0,09	0,02	0,20
Máx.			0,19	0,13	0,03	0,28

Tabela A.7: Erro máximo para o termopar M (meio do rolo)

Ponto calibr. (°C)	Temp. padrão média (°C)	Tensão termop. média (mV)	Erro linear. (°C)	Repet. expan. (95%) (°C)	Incerteza do padrão (°C)	Erro máx. (°C)
15	15,10	0,59	0,12	0,03	0,01	0,14
20	20,11	0,79	0,06	0,04	0,04	0,11
30	30,04	1,19	0,02	0,02	0,01	0,04
40	40,01	1,61	0,09	0,02	0,00	0,10
50	50,07	2,03	0,16	0,02	0,01	0,18
60	60,02	2,47	0,04	0,02	0,00	0,06
70	70,01	2,91	0,08	0,04	0,01	0,12
80	80,04	3,36	0,14	0,06	0,02	0,20
90	90,30	3,83	0,13	0,12	0,02	0,25
100	100,17	4,28	0,05	0,12	0,03	0,17
110	109,80	4,73	0,03	0,06	0,02	0,09
125	125,07	5,47	0,17	0,08	0,03	0,25
Máximo			0,17	0,12	0,04	0,25

Tabela A.8: Erro máximo para o termopar F (fim do rolo)

Ponto calibr. (°C)	Temp. padrão média (°C)	Tensão termop. média (mV)	Erro linear. (°C)	Repet. expan. (95%) (°C)	Incerteza do padrão (°C)	Erro máx. (°C)
15	15,09	0,59	0,10	0,01	0,02	0,12
20	20,09	0,79	0,04	0,01	0,03	0,06
30	30,04	1,19	0,01	0,02	0,01	0,04
40	40,01	1,61	0,12	0,01	0,01	0,13
50	50,08	2,03	0,22	0,03	0,01	0,25
60	60,02	2,46	0,08	0,03	0,00	0,11
70	69,99	2,90	0,03	0,04	0,01	0,08
80	80,02	3,35	0,06	0,05	0,04	0,12
90	90,28	3,82	0,13	0,13	0,02	0,26
100	100,16	4,28	0,11	0,19	0,05	0,31
110	109,78	4,73	0,03	0,17	0,05	0,21
125	125,08	5,47	0,13	0,17	0,08	0,30
Máximo			0,22	0,19	0,08	0,31

Tabela A.9: Erro máximo para o termopar *O* (outro rolo)

Ponto calibr. (°C)	Temp. padrão média (°C)	Tensão termop. média (mV)	Erro linear. (°C)	Repet. expans. (95%) (°C)	Incerteza do padrão (°C)	Erro máx. (°C)
15	15,06	0,59	0,16	0,02	0,01	0,17
20	20,06	0,79	0,07	0,01	0,02	0,08
30	30,06	1,19	0,04	0,01	0,01	0,05
40	40,01	1,60	0,17	0,04	0,02	0,20
50	50,07	2,02	0,30	0,02	0,00	0,31
60	60,02	2,46	0,14	0,02	0,01	0,16
70	69,98	2,90	0,15	0,02	0,02	0,17
80	80,04	3,34	0,18	0,07	0,02	0,25
90	90,23	3,81	0,04	0,18	0,04	0,23
100	100,12	4,27	0,08	0,12	0,08	0,21
110	109,78	4,73	0,11	0,09	0,02	0,20
125	125,08	5,46	0,29	0,09	0,05	0,39
Máximo			0,30	0,18	0,08	0,39

APÊNDICE B – CALIBRAÇÃO DO SISTEMA DE MEDIÇÃO DE RESISTÊNCIA

A fim de diminuir as incertezas do sistema de medição de resistência, foi realizada a calibração dos dois subsistemas: medição de tensão e medição de corrente.

Para determinação do erro máximo de cada subsistema, foram realizadas 10 medições em 4 pontos da faixa. Com a média dos valores lidos, foi traçada a melhor reta pelo método dos mínimos quadrados através desses pontos. Considerou-se como erro de linearidade do sistema de medição, a maior distância entre a melhor reta e as médias dos pontos obtidos. Considerou-se como repetitividade, o maior desvio padrão dos pontos medidos, expandido com o coeficiente *t* de Student para 95% de confiança para uma distribuição normal bicaudal com 9 graus de liberdade ($t = 2,26$). Ambos convertidos para a unidade do mensurando. O erro máximo foi determinado como sendo a soma algébrica dos erros de linearidade e repetitividade. Não entraram nos cálculos as incertezas do padrão de calibração por serem insignificantes.

Os padrões de transferência (tensão e corrente) foram gerados utilizando um multicalibrador Fluke 5502A (figura B.1(a)) As medições de tensão foram realizadas utilizando um multímetro Fluke 8505A de 8 e 1/2 dígitos, figura B.1(a).

A tabela B.1 apresenta de forma resumida as incertezas do multímetro 8505A para as faixas utilizadas para medições realizadas em até 1 ano da última calibração e para variações de temperatura de T_{cal} (temperatura em que foi calibrado) ± 5 °C (71).

Tabela B.1: Resumo das incertezas para medição de tensão e corrente C.C. nas faixas utilizadas

Faixa	$\mu\text{V}/\text{V}$ do valor medido	$\mu\text{V}/\text{V}$ da faixa de medição
200 V	5,5	0,2
–	–	–
	$\mu\text{A}/\text{A}$ do valor medido	$\mu\text{A}/\text{A}$ da faixa de medição
2 A	225	8
20 A	500	20



(a) Multímetro Fluke 8505A



(b) Multicalibrador Fluke 5502A

Figura B.1: Instrumentos utilizados para calibração do SM de resistência.

B.1 SM de tensão

A faixa de medição do sistema de medição de tensão é de -100 V a +100 V. Como na prática a tensão C.C. será aplicada no compressor sempre positivamente, a calibração foi realizada assimetricamente. A parcela alternada da tensão possui um pico máximo de 10 V devido à ação do filtro. Então, a tensão lida pelo SM de tensão será predominantemente positiva.

Tabela B.2: Resumo dos erros para a calibração do sistema de medição de tensão.

Ponto Calibr. (V)	Média DAQ (V)	Desv.Pad. DAQ (V)	Erro Linear. (V)	Repet. 95% (V)	Erro máx (Lin.+ Re) (V)
-30	-3,0049	0,0001	0,0054	0,0025	
0	-0,0450	0,0001	0,0071	0,0016	
+30	+2,9170	0,0000	0,0011	0,0008	
+70	+6,8650	0,0000	0,0020	0,0007	
Máx.			0,0071	0,0025	0,0096

A equação da melhor reta para o sinal de tensão é mostrada na equação B.1. Embora o ganho projetado inicialmente fosse de 10, a combinação do valor real do divisor resistivo, do erro de atenuação do divisor, dos erros por casamento de impedância e, principalmente, do erro de ganho do amplificador isolador, o ganho final foi de 10,131.

$$V = (10,131 \cdot V_{daq}) + 0,4485 \quad (\text{B.1})$$

Onde:

V : mensurando (tensão em volt);

V_{daq} : tensão lida na placa de aquisição (em volt).

A tabela B.3 apresenta os pontos medidos para a calibração do sistema de tensão.

Tabela B.3: Medições da calibração do SM de tensão.

Faixa	(-30 V)		(0 V)		(+30V)		(+70 V)	
	Padrao	Tensão DAQ	Padrao	Tensão DAQ	Padrao	Tensão DAQ	Padrao	Tensão DAQ
Ponto 1	-29,99976	-3,00497	0,00000	-0,04500	30,00001	2,91704	70,00026	6,86506
Ponto 2	-29,99975	-3,00486	0,00000	-0,04497	30,00001	2,91705	70,00027	6,86508
Ponto 3	-29,99975	-3,00478	0,00000	-0,04491	30,00000	2,91706	70,00026	6,86510
Ponto 4	-29,99974	-3,00498	0,00000	-0,04499	30,00001	2,91702	70,00024	6,86502
Ponto 5	-29,99975	-3,00490	0,00000	-0,04494	30,00001	2,91709	70,00025	6,86500
Ponto 6	-29,99974	-3,00490	0,00000	-0,04495	30,00001	2,91708	70,00026	6,86505
Ponto 7	-29,99976	-3,00488	0,00000	-0,04491	30,00000	2,91706	70,00025	6,86502
Ponto 8	-29,99977	-3,00501	0,00000	-0,04490	30,00000	2,91696	70,00026	6,86502
Ponto 9	-29,99975	-3,00515	0,00000	-0,04514	30,00001	2,91705	70,00024	6,86505
Ponto 10	-29,99975	-3,00482	0,00000	-0,04500	30,00000	2,91702	70,00025	6,86506
Média	-29,99975	-3,00493	0,00000	-0,04497	30,00001	2,91704	70,00025	6,86505
Desvio	0,00001	0,00011	0,00000	0,00007	0,00001	0,00004	0,00001	0,00003

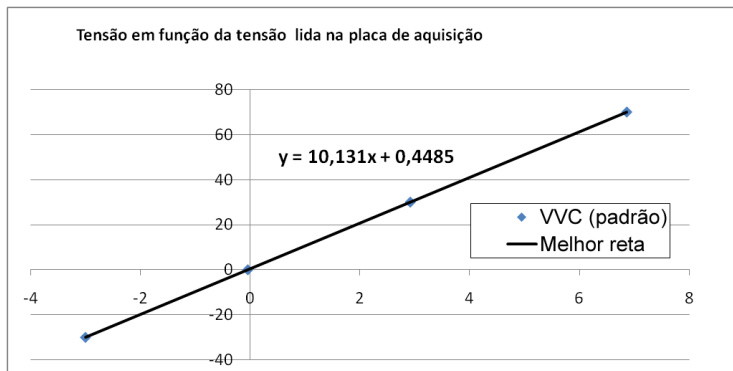


Figura B.2: Pontos calibrados para o sistema de medição de tensão

A figura B.2 apresenta a curva de calibração para o SM de tensão. Na figura B.3 uma aproximação do ponto 0 V que apresenta o maior erro de linearidade juntamente com \pm Repetitividade.

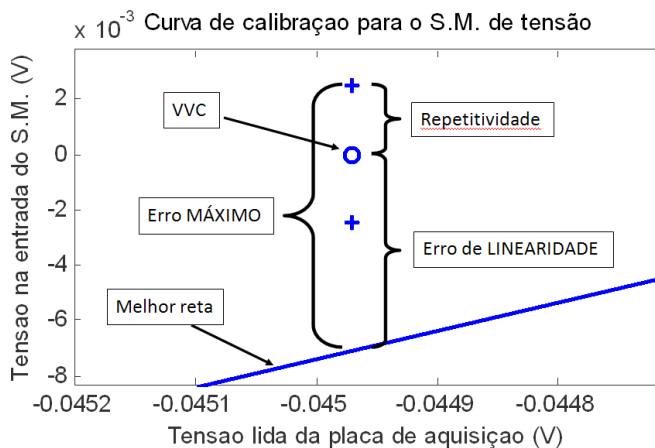


Figura B.3: Detalhe para o ponto 0 V

B.2 SM de corrente faixa de 5 A

A faixa de medição do sistema de medição de corrente é de -5 A a +5 A. Da mesma forma a calibração foi realizada assimetricamente.

Tabela B.4: Resumo dos erros para a calibração do sistema de medição de corrente (faixa de 5 A).

Ponto Calibr. (A)	Média DAQ (V)	Desv.Pad. DAQ (V)	Erro Linear. (A)	Repet. 95% (A)	Erro máx (Lin.+ Re) (A)
-2	-3,96973	0,00000	0,00015	0,00000	
0	+0,01465	0,00000	0,00024	0,00000	
+2	+4,00077	0,00025	0,00018	0,00028	
+4	+7,98855	0,00003	0,00023	0,00003	
Máximo			0,00024	0,00028	0,00052

A equação da melhor reta para o sinal de corrente para essa faixa é mostrada na equação B.2. A combinação do ganho do transdutor, dos erros por casamento de impedância, e do valor nominal do resistor, resultaram no ganho de 0,5021, muito próximo do idealizado.

$$A = (0,5021 \cdot V_{daq}) - 0,0076 \quad (\text{B.2})$$

Onde:

A: mensurando (corrente em ampère);

V_{daq} : tensão lida na placa de aquisição (em volt).

Tabela B.5: Medições da calibração do SM de corrente (faixa de 5 A).

Faixa	(-2 A)		(0 A)		(2 A)		(4 A)	
	Padrao	Tensao DAQ (V)	Padrao	Tensao DAQ (V)	Padrao	Tensao DAQ (V)	Padrao	Tensao DAQ (V)
Ponto 1	-2,000952	-3,969727	0,000000	0,014649	2,000999	4,000352	4,003681	7,988493
Ponto 2	-2,000949	-3,969726	0,000000	0,014650	2,001002	4,000483	4,003682	7,988535
Ponto 3	-2,000973	-3,969726	0,000000	0,014649	2,001012	4,000728	4,003676	7,988509
Ponto 4	-2,000950	-3,969726	0,000000	0,014649	2,001007	4,000886	4,003664	7,988567
Ponto 5	-2,000947	-3,969727	0,000000	0,014651	2,000994	4,000899	4,003669	7,988551
Ponto 6	-2,000949	-3,969726	0,000000	0,014651	2,000995	4,000649	4,003677	7,988538
Ponto 7	-2,000950	-3,969726	0,000000	0,014649	2,000993	4,001128	4,003685	7,988577
Ponto 8	-2,000955	-3,969726	0,000000	0,014649	2,001006	4,000646	4,003682	7,988557
Ponto 9	-2,000955	-3,969726	0,000000	0,014649	2,001010	4,000803	4,003670	7,988555
Ponto 10	-2,000954	-3,969726	0,000000	0,014649	2,001012	4,001080	4,003687	7,988581
Média	-2,000953	-3,969726	0,000000	0,014650	2,001003	4,000765	4,003677	7,988546
Desvio	0,000007	0,000000	0,000000	0,000001	0,000007	0,000246	0,000008	0,000028

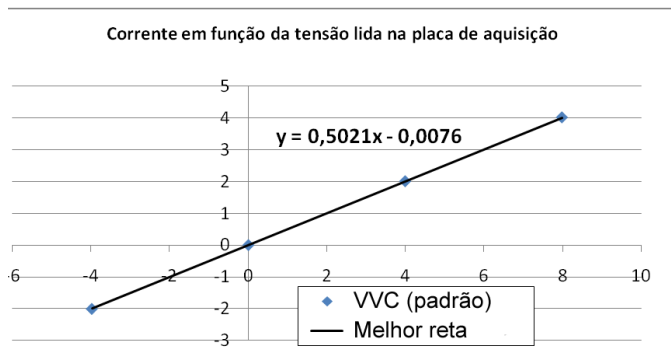


Figura B.4: Pontos calibrados para o SM de corrente (faixa de 5 A).

A figura B.4 apresenta a curva de calibração para o SM de corrente. Na figura B.5 uma aproximação do ponto 0 V que apresenta o maior erro de linearidade juntamente com \pm Repetitividade.

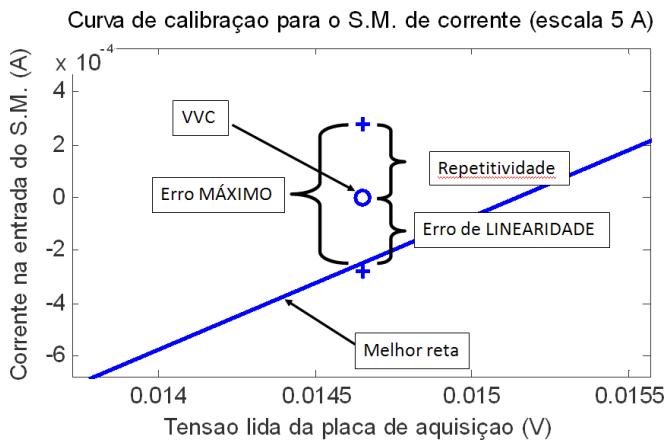


Figura B.5: Detalhe para o ponto zero (faixa de 5 A).

B.3 SM de corrente faixa de 18 A

Tabela B.6: Resumo dos erros para a calibração do sistema de medição de corrente (faixa de 18 A)

Ponto Calibr. (A)	Média DAQ (V)	Desv.Pad. DAQ (V)	Erro Linear. (A)	Repet. 95% (A)	Erro máx (Lin.+ Re) (A)
-5	-2,4854	0,0000	0,0027	0,0000	
0	+0,0051	0,0000	0,0037	0,0002	
+5	+2,5000	0,0000	0,0011	0,0001	
+10	+4,9955	0,0002	0,0022	0,0011	
Máx.			0,0037	0,0011	0,0048

A equação da melhor reta para o sinal de corrente para essa faixa é mostrada na equação B.3.

$$A = (2,007 \cdot V_{daq}) - 0,0139 \quad (\text{B.3})$$

Onde:

A : mensurando (corrente em ampère);

V_{daq} : tensão lida na placa de aquisição (em volt).

A figura B.6 apresenta a curva de calibração para o SM de corrente. Na figura B.7 uma aproximação do ponto 0 V que apresenta o maior erro de linearidade juntamente com \pm Repetitividade.

Tabela B.7: Medições da calibração do SM de tensão(faixa de 18 A).

Faixa	(-5 A)		(0 A)		(0 A)		(+5 A)		(0 A)		(+5 A)		(+10 A)		(+10 A)	
	Padrao	Tensao DAQ (V)	Padrao	Tensao DAQ (V)	Padrao	Tensao DAQ (V)	Padrao	Tensao DAQ (V)	Padrao	Tensao DAQ (V)	Padrao	Tensao DAQ (V)	Padrao	Tensao DAQ (V)	Padrao	Tensao DAQ (V)
Ponto 1	-5,004681	-2,485352	0,000000	0,005071	5,004665	2,499935	10,00984	4,995224	10,00984	4,995224	10,00984	4,995224	10,00984	4,995224	10,00984	4,995224
Ponto 2	-5,004671	-2,485352	0,000000	0,005081	5,004666	2,499962	10,00985	4,995301	10,00985	4,995301	10,00985	4,995301	10,00985	4,995301	10,00985	4,995301
Ponto 3	-5,004673	-2,485352	0,000000	0,005061	5,004652	2,499975	10,00986	4,995310	10,00986	4,995310	10,00986	4,995310	10,00986	4,995310	10,00986	4,995310
Ponto 4	-5,004685	-2,485352	0,000000	0,005152	5,004677	2,499980	10,00987	4,995362	10,00987	4,995362	10,00987	4,995362	10,00987	4,995362	10,00987	4,995362
Ponto 5	-5,004688	-2,485351	0,000000	0,005073	5,004675	2,499989	10,00988	4,995471	10,00988	4,995471	10,00988	4,995471	10,00988	4,995471	10,00988	4,995471
Ponto 6	-5,004691	-2,485352	0,000000	0,005074	5,004669	2,499986	10,00989	4,995501	10,00989	4,995501	10,00989	4,995501	10,00989	4,995501	10,00989	4,995501
Ponto 7	-5,004693	-2,485352	0,000000	0,005094	5,004683	2,499991	10,00991	4,995573	10,00991	4,995573	10,00991	4,995573	10,00991	4,995573	10,00991	4,995573
Ponto 8	-5,004702	-2,485352	0,000000	0,005142	5,004677	2,499993	10,00991	4,995718	10,00991	4,995718	10,00991	4,995718	10,00991	4,995718	10,00991	4,995718
Ponto 9	-5,004713	-2,485352	0,000000	0,005179	5,004669	2,499993	10,00994	4,995821	10,00994	4,995821	10,00994	4,995821	10,00994	4,995821	10,00994	4,995821
Ponto 10	-5,004687	-2,485351	0,000000	0,005137	5,004678	2,499997	10,00994	4,995978	10,00994	4,995978	10,00994	4,995978	10,00994	4,995978	10,00994	4,995978
Média	-5,004688	-2,485352	0,000000	0,005106	5,004671	2,499980	10,00989	4,995526	10,00989	4,995526	10,00989	4,995526	10,00989	4,995526	10,00989	4,995526
Desvio	0,000013	0,000000	0,000000	0,000042	0,000009	0,000019	0,00004	0,000247	0,00004	0,000247	0,00004	0,000247	0,00004	0,000247	0,00004	0,000247

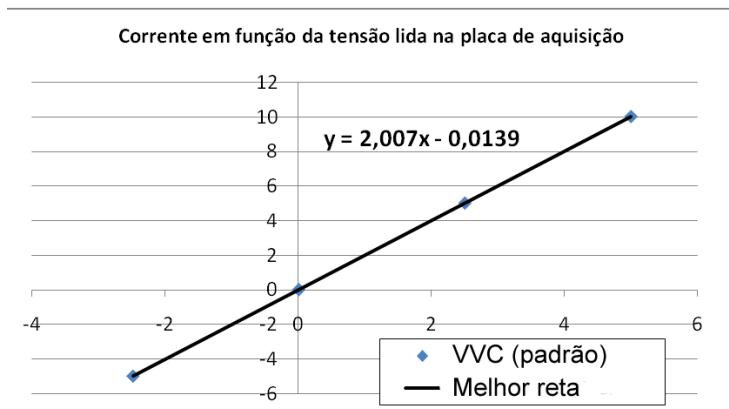


Figura B.6: Pontos calibrados para o SM de corrente (faixa de 18 A).

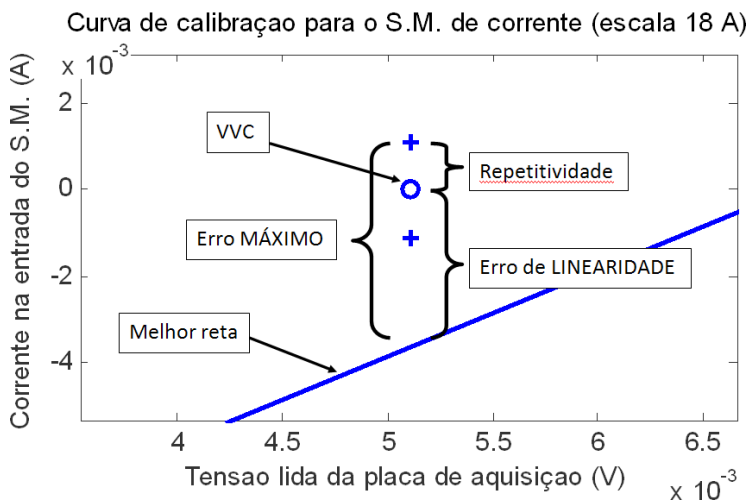


Figura B.7: Detalhe para o ponto zero (faixa de 18 A).

B.4 Incertezas devidas ao tempo de aquisição

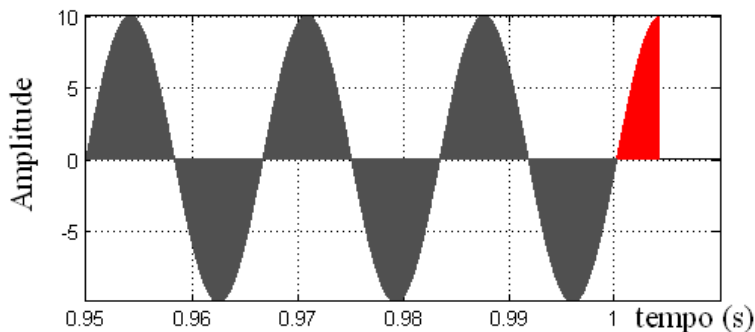


Figura B.8: Ilustração do erro proveniente de medição de ciclos não inteiros em uma senoide de valor médio zero.

A média dos valores descritos por uma senoide é o valor CC associado a ela, quando o intervalo do qual se calculou a média é um múltiplo inteiro do período dessa onda. Para simular o erro proveniente da aquisição de períodos não inteiros (figura B.8), foi utilizada a equação B.4, adaptada de (4).

$$V_{cc} = \frac{2}{N} \cdot \sum_{n=0}^{N-1} \left(10 \operatorname{sen} \left(\frac{n \cdot 360 \cdot \pi}{N} + \frac{n \cdot \pi}{2 \cdot k \cdot N} \right) \cdot 0,5 \cdot \left(1 - \cos \left(\frac{n \cdot 2 \cdot \pi}{N} \right) \right) \right) \quad (\text{B.4})$$

Onde:

V_{cc} : é o erro da média (0 quando o período é múltiplo inteiro)

N : número de pontos do intervalo 50.000 (tempo total de amostragem dividido pela freqüência de amostragem)

n : índice do ponto simulado (0,1,2,3... 49.999)

k : divisor de $\pi/2$ ($k=1 \rightarrow \text{ângulo}=\pi/2$; $k=2 \rightarrow \text{ângulo}=\pi/4$; ...)

Foi considerada uma freqüência de amostragem de 50 kHz e um período amostrado de 1 s. Os resultados são apresentados na tabela B.8. É possível perceber que apenas erros provenientes de ângulos maiores ou iguais a 45° , e com janelamento retangular, possuem

influência considerável. A utilização da técnica de janelamento de Hanning permite que, mesmo com a aquisição de um semiciclo inteiro (180°), o erro resultante não interfira nos resultados.

Tabela B.8: Erros devidos à aquisição de um período não múltiplo inteiro da frequência fundamental.

k	Ângulo do erro de aquisição	Erro janelamento retangular +/- (V)	Erro janelamento Hanning +/- (V)
0,5	180°	1,8E-02	5,4E-07
1	90°	8,7E-03	2,7E-07
2	45°	2,5E-03	8,0E-08
3	30°	1,1E-03	3,6E-08
5	18°	4,0E-04	1,3E-08
10	9°	9,3E-05	3,4E-09
18	5°	2,5E-05	1,0E-09
30	3°	6,9E-06	3,7E-10
45	2°	1,9E-06	1,7E-10

A fonte utilizada para alimentar o compressor (42) possui incerteza na frequência de alimentação de $\pm(0,01\%^1 + 0,01)$ Hz. Para o pior caso (60 Hz) o erro máximo será de 0,016 Hz. Se uma onda senoidal de 60,016 Hz for amostrada durante 1 s, isso significa amostrar 260 μ s do início do período seguinte, equivalente a um ângulo de 6° . Considerando-se, também, a incerteza no tempo total de amostragem provocado pela placa de aquisição como sendo 2 períodos de amostragem (a 50 kHz), obtém-se 40 μ s de erro, equivalente a um ângulo inferior a 1° .

A combinação dessas duas parcelas limitou-se em 7° , representando erros, em tensão, inferiores a 90 μ V (janelamento retangular com 9°). Dessa forma, foi utilizado o janelamento retangular na aquisição de dados neste trabalho.

Realizando análise semelhante para a corrente, os erros seriam ainda inferiores a 90 μ A, pois a amplitude máxima da senóide é de

¹Da frequência utilizada

8,4 A (pior caso).

***APÊNDICE C - ENSAIOS COM COMPRESSOR A VAZIO
UTILIZANDO FONTE COMERCIAL***

C.1 Ensaio com transitório natural

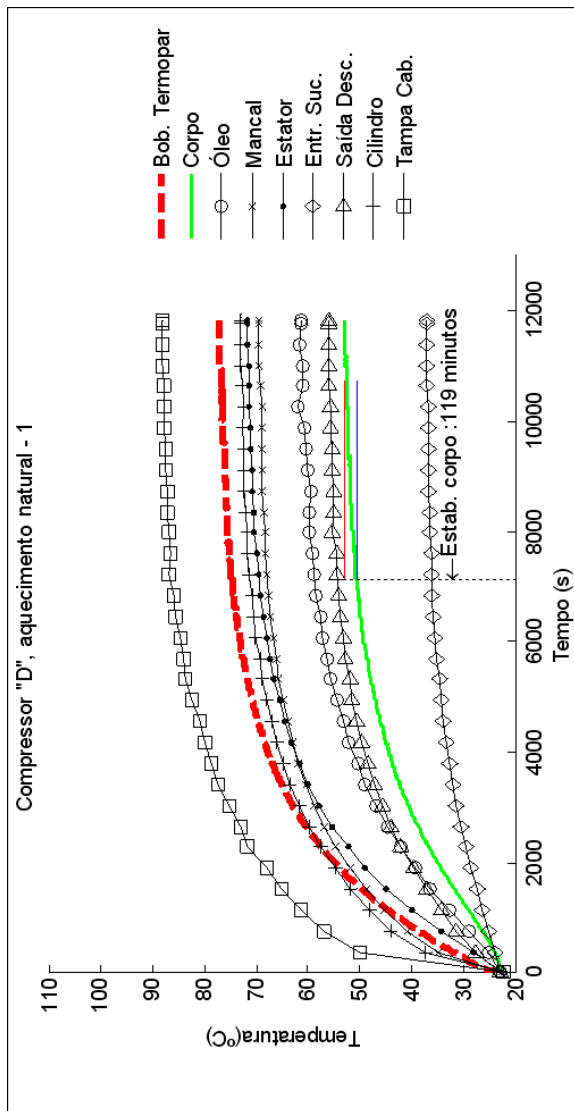


Figura C.1: Transitório natural com compressor a vazio, modelo *D* – ensaio I.

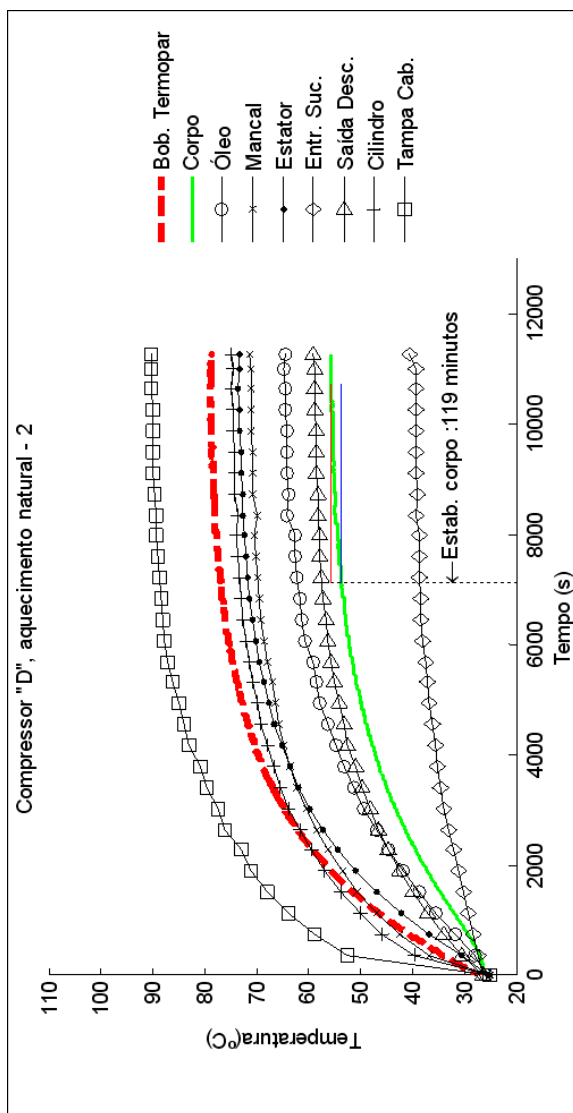


Figura C.2: Transitório natural com compressor a vazio, modelo *D* – ensaio 2.

C.2 Ensaio com transitório acelerado

Nos gráficos das figuras C.3 e C.4, não houve sobretemperatura da bobina, o setpoint inicial foi a própria temperatura esperada de estabilização.

Já nos gráficos das figuras C.5 e C.6 foi determinada uma sobretemperatura de 10 °C na bobina, e não houve etapa de aquecimento intermediário.

Finalmente nos gráficos das figuras C.7 e C.8 foi testado o procedimento com sobretemperatura inicial de +15 °C e sobretemperatura intermediária de +7 °C. Na figura C.7 não há sinal da temperatura da bobina medida pela resistência utilizando o sistema de medição desenvolvido, apenas a temperatura medida pelo termopar.

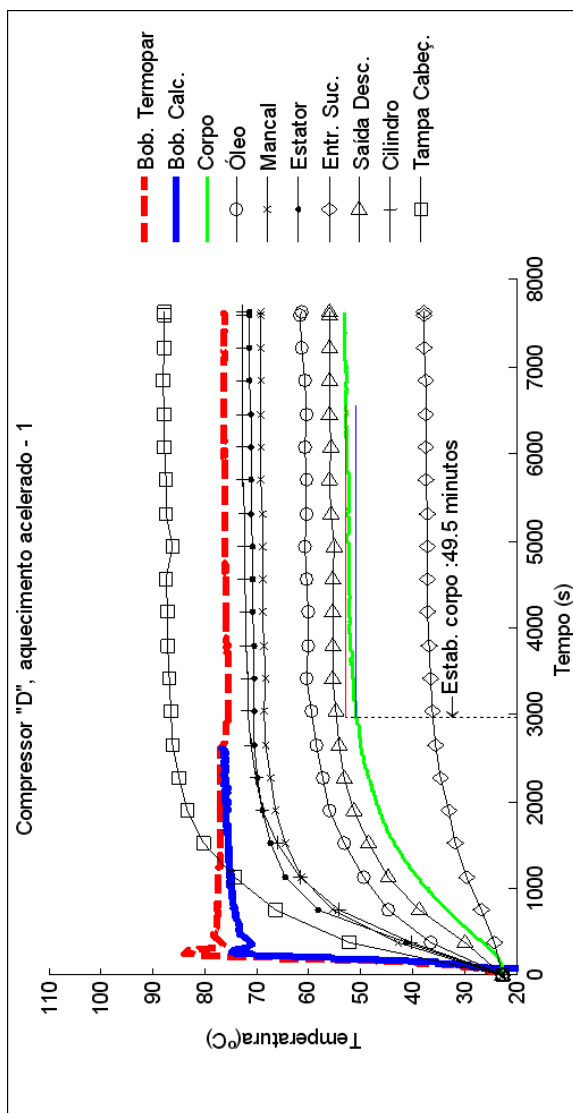


Figura C.3: Transitório acelerado com compressor a vazio, modelo *D* – ensaio 1

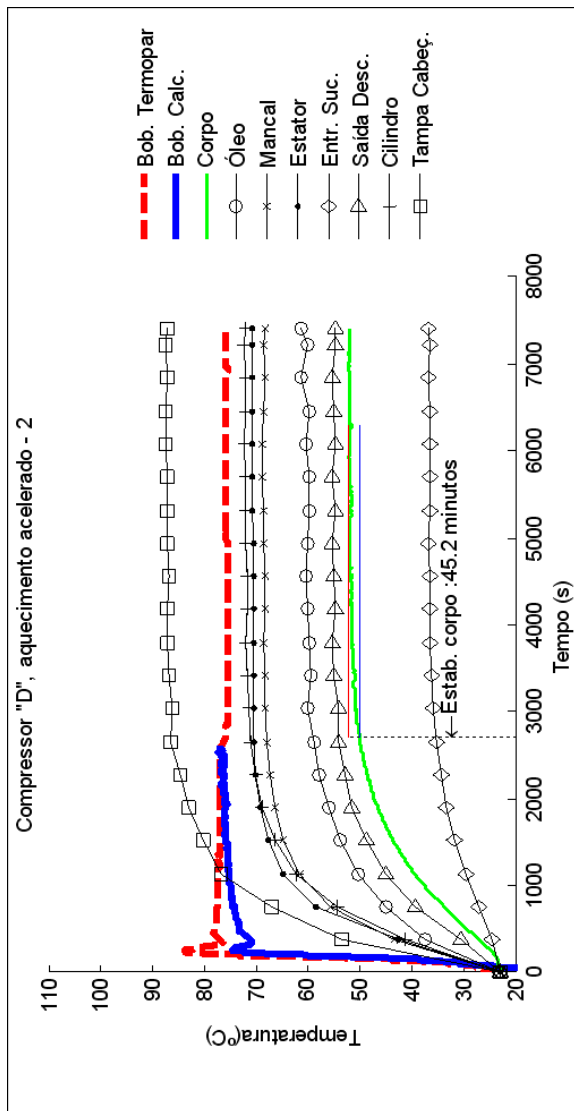


Figura C.4: Transitório acelerado com compressor a vazio, modelo *D* – ensaio 2

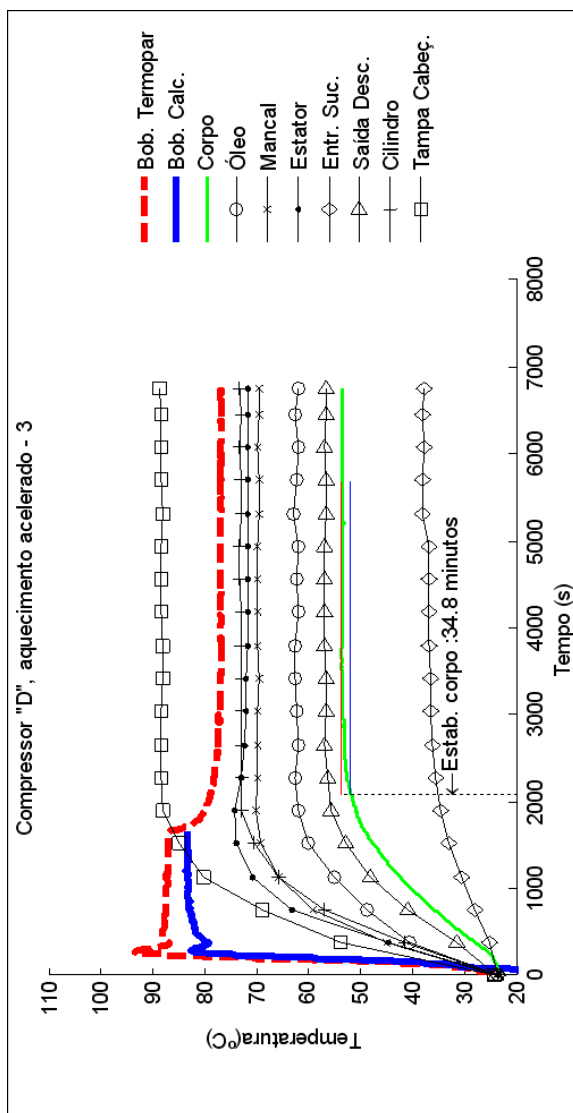


Figura C.5: Transitório acelerado com compressor a vazio., modelo *D* – ensaio 3

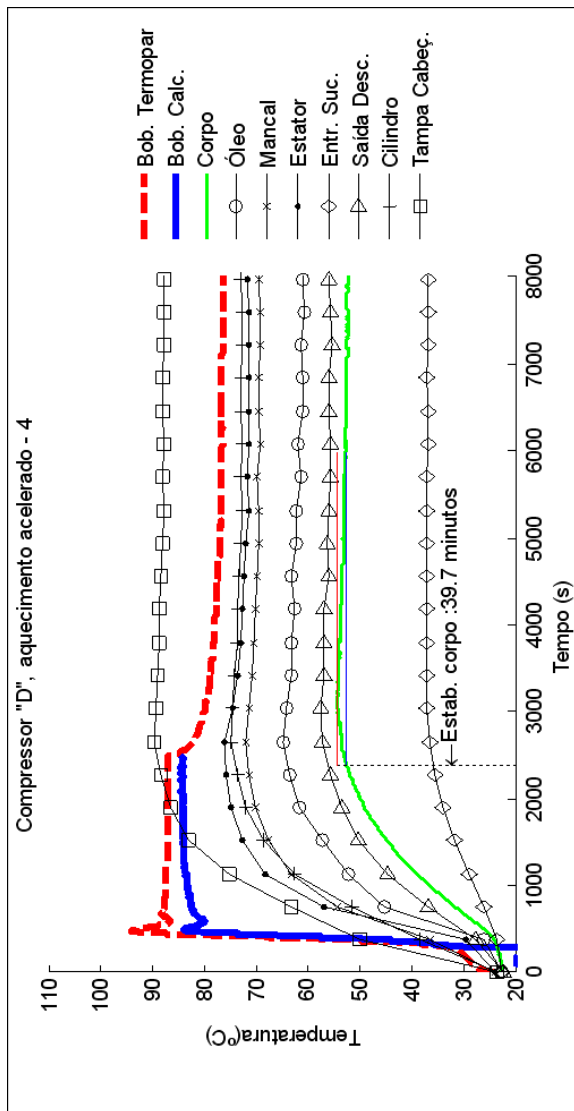


Figura C.6: Transitório acelerado com compressor a vazio, modelo *D* – ensaio 4

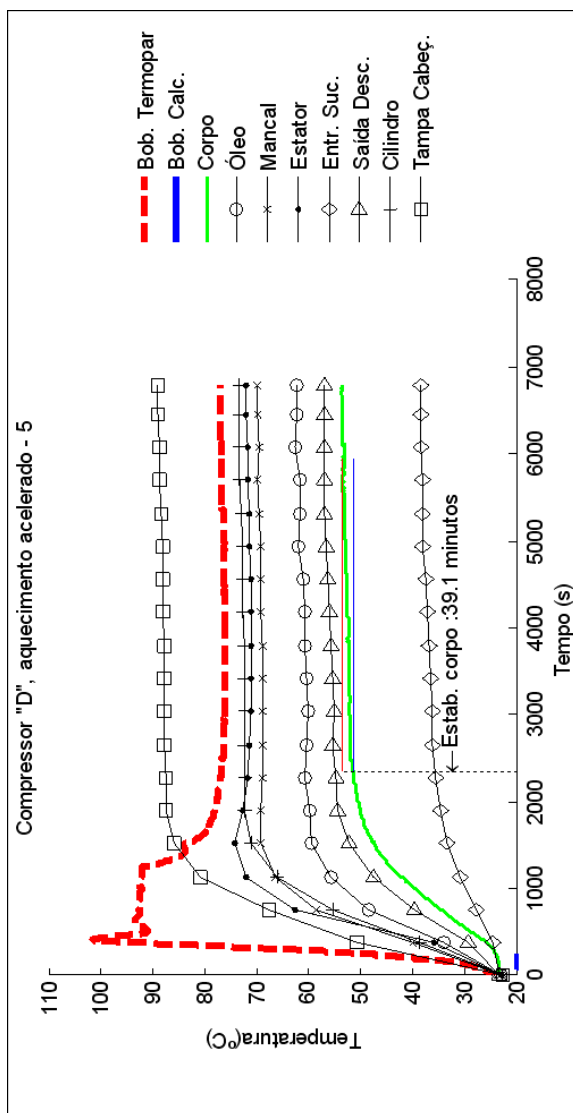


Figura C.7: Transitório acelerado com compressor a vazio, modelo *D* – ensaio 5

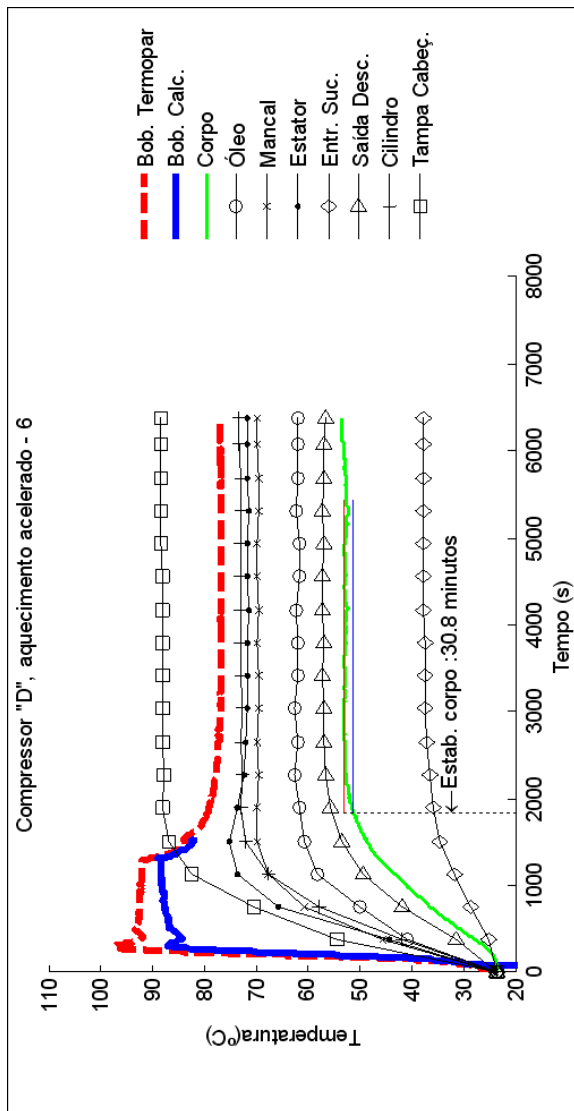


Figura C.8: Transitório acelerado com compressor a vazio, modelo *D* – ensaio 6

APÊNDICE D – ENSAIOS COM COMPRESSORES NA BANCADA DE PARTIDA E TOMBAMENTO

Compressor *B*

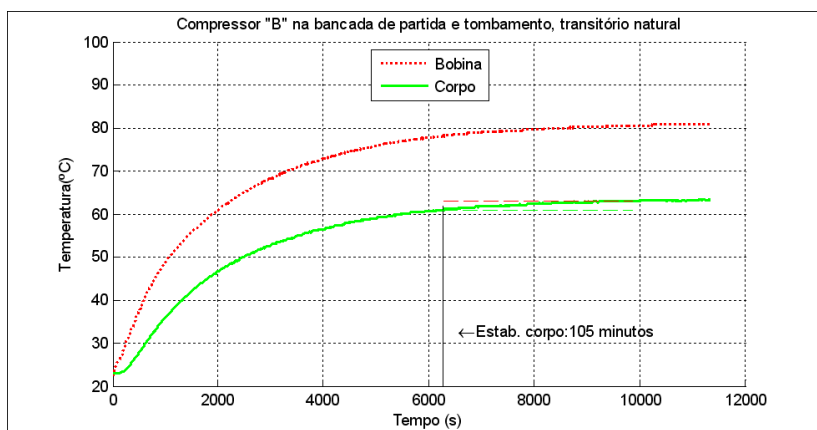


Figura D.1: Transitório natural na bancada de partida e tombamento, modelo *B*.

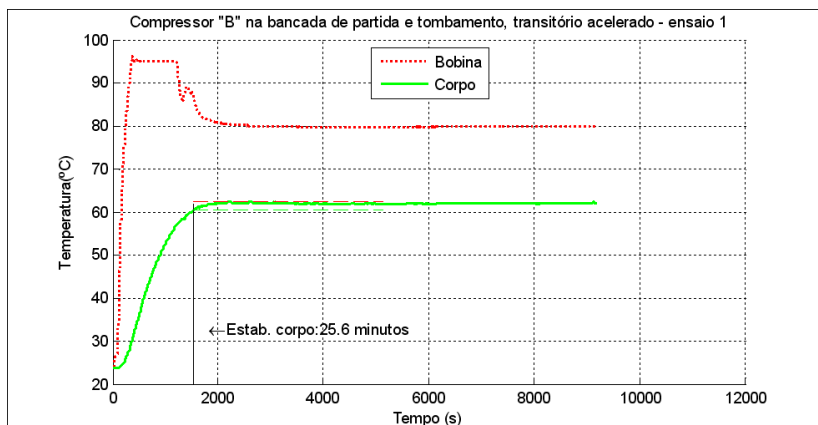


Figura D.2: Transitório acelerado na bancada de partida e tombamento, modelo *B* – ensaio 1.

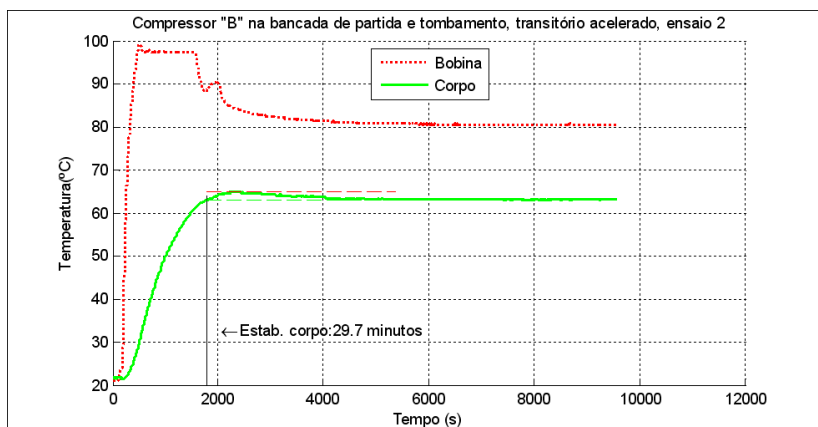


Figura D.3: Transitório acelerado na bancada de partida e tombamento, modelo *B* – ensaio 2.

Compressor *D*

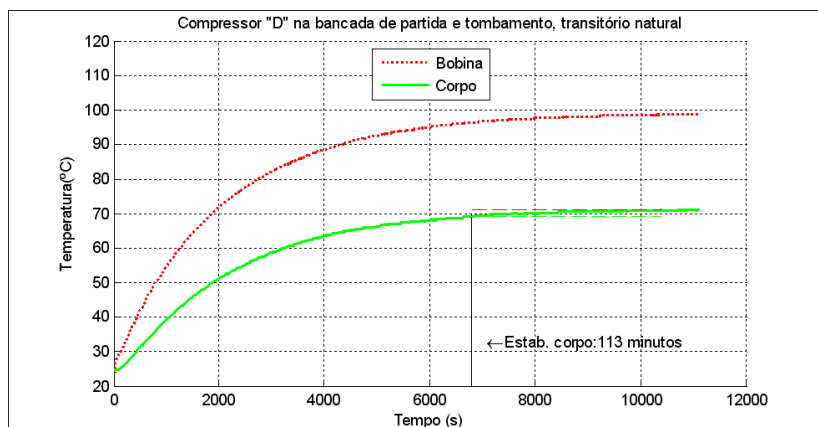


Figura D.4: Transitório natural na bancada de partida e tombamento, modelo *D*.

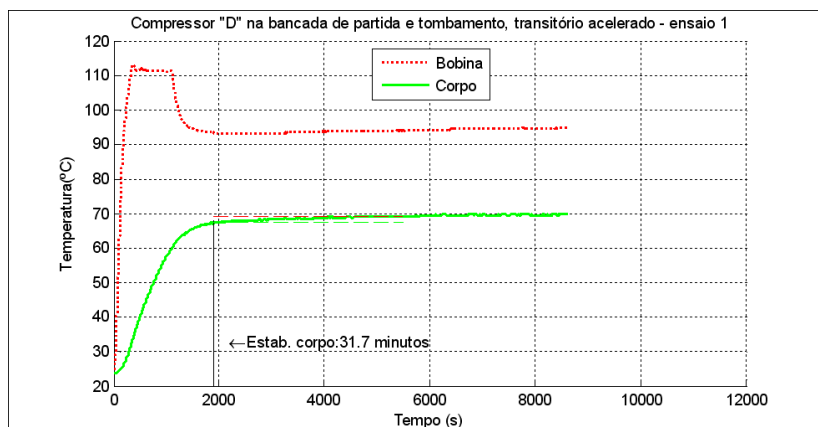


Figura D.5: Transitório acelerado na bancada de partida e tombamento, modelo *D* – ensaio 1.

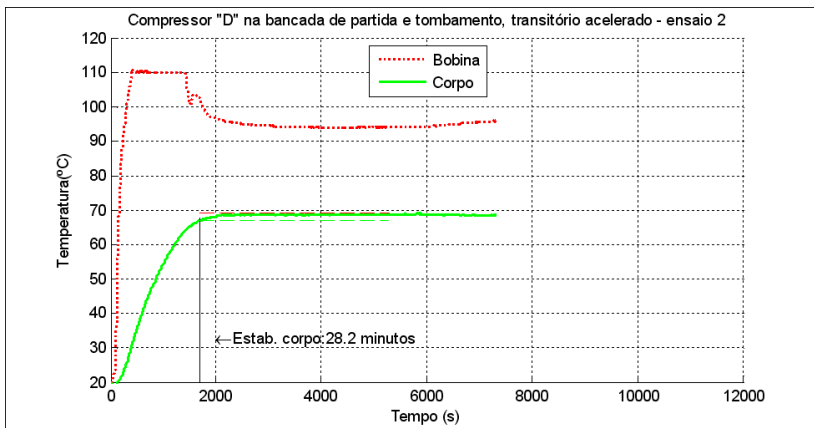


Figura D.6: Transitório acelerado na bancada de partida e tombamento, modelo *D* – ensaio 2.

Compressor G

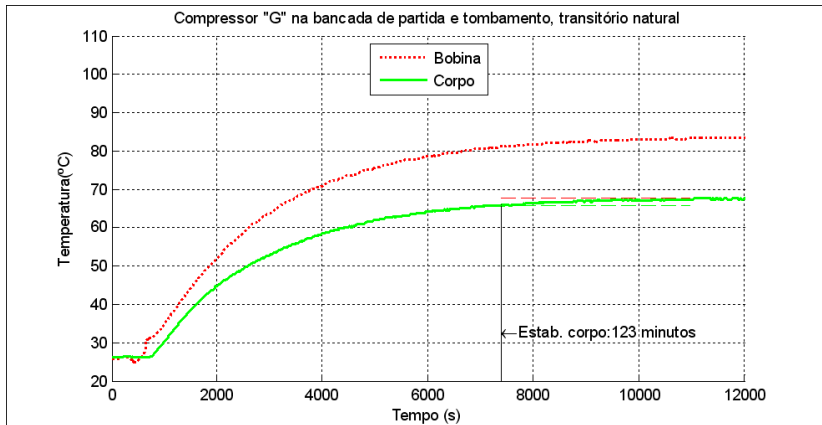


Figura D.7: Transiente natural na bancada de partida e tombamento, modelo G.

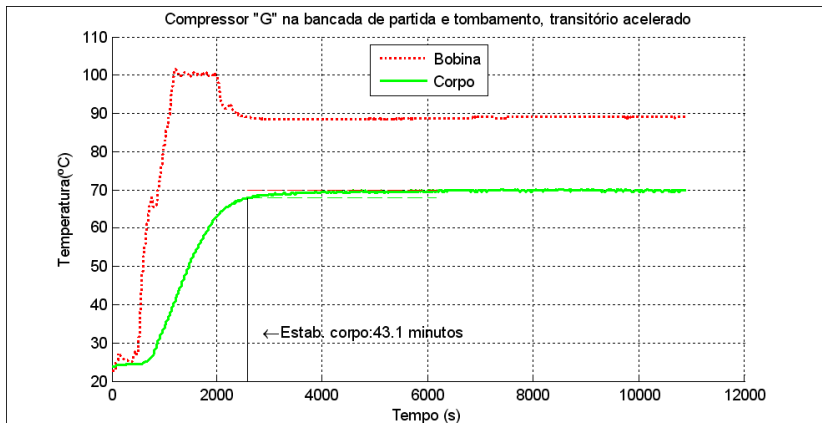


Figura D.8: Transiente acelerado na bancada de partida e tombamento, modelo G.

APÊNDICE E – ENSAIOS COM COMPRESSORES NA BANCADA DE DESEMPENHO

E.1 Antes dos ajustes dos controladores

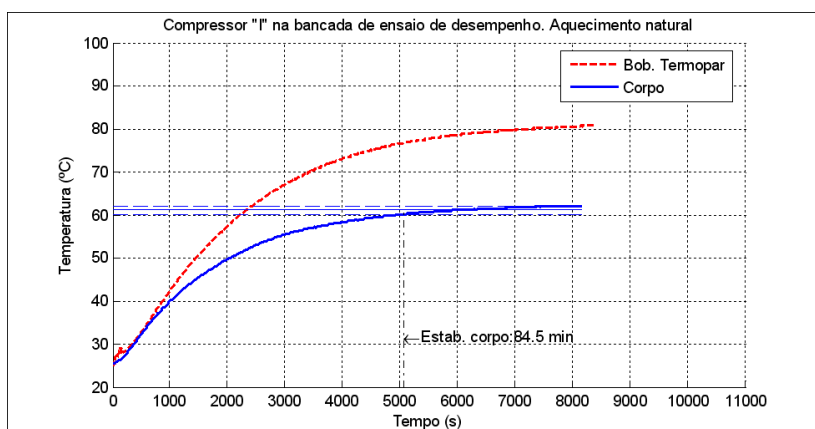


Figura E.1: Compressor *I* com transitório natural e controle da temperatura por termopar - ensaio na bancada de desempenho.

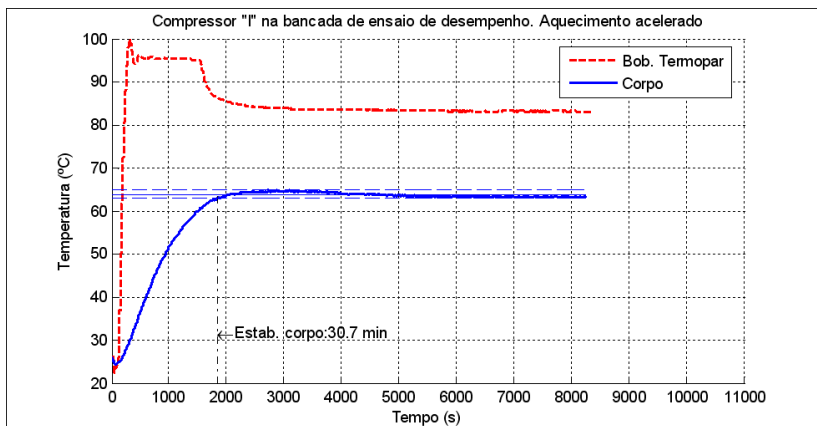


Figura E.2: Compressor *I* com transitório acelerado e controle da temperatura por termopar - ensaio na bancada de desempenho.

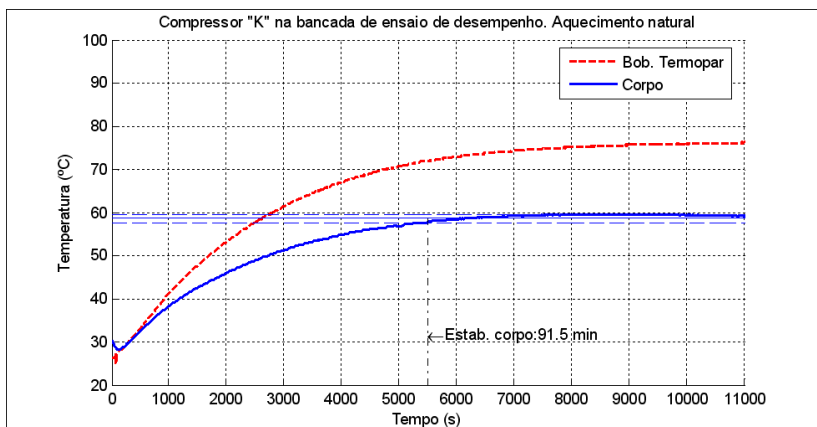


Figura E.3: Compressor *K* com transitório natural e controle da temperatura por termopar - ensaio na bancada de desempenho.

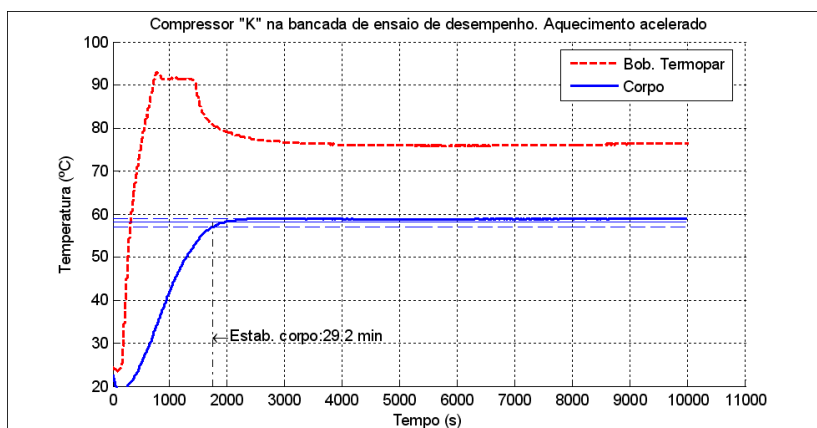


Figura E.4: Compressor *K* com transitório acelerado e controle da temperatura por termopar - ensaio na bancada de desempenho.

E.2 Com controle pela resistência da bobina

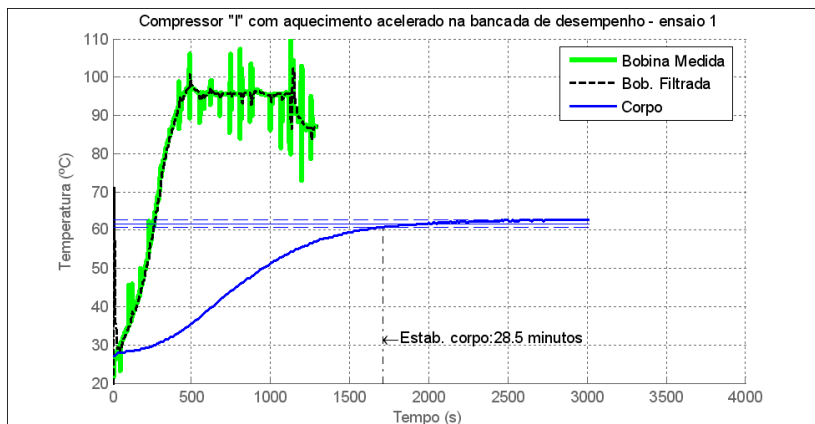


Figura E.5: Compressor *I* com controle pela medição da resistência; transitório acelerado na bancada de desempenho - ensaio 1.

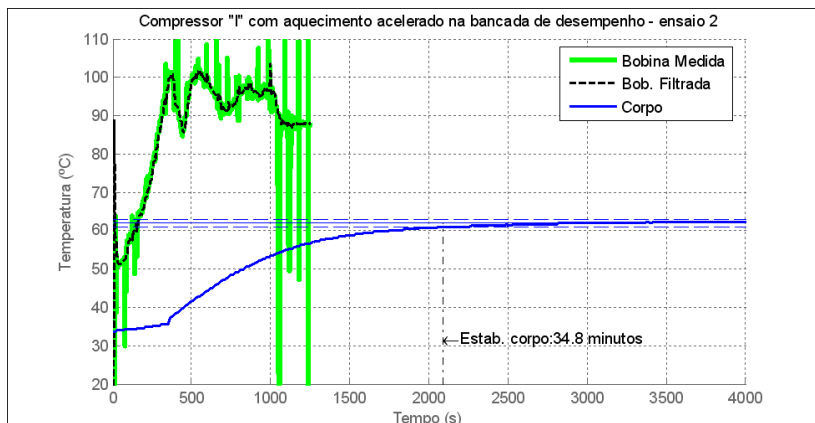


Figura E.6: Compressor *I* com controle pela medição da resistência; transitório acelerado na bancada de desempenho - ensaio 2.

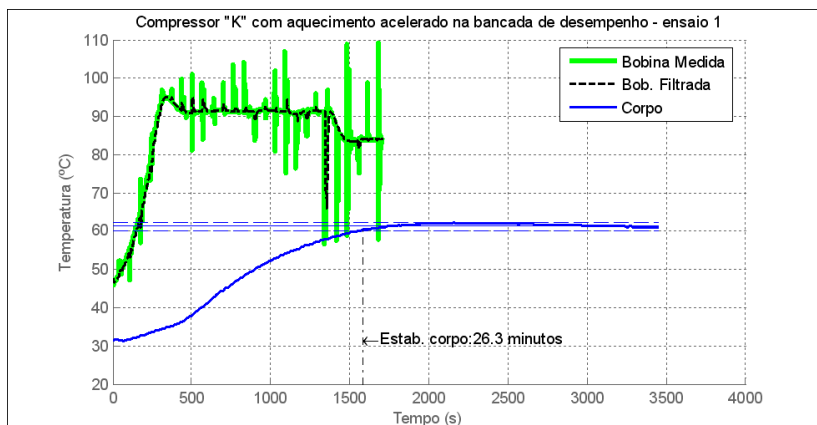


Figura E.7: Compressor *K* com controle da temperatura pela medição da resistência; transitório acelerado na bancada de desempenho.

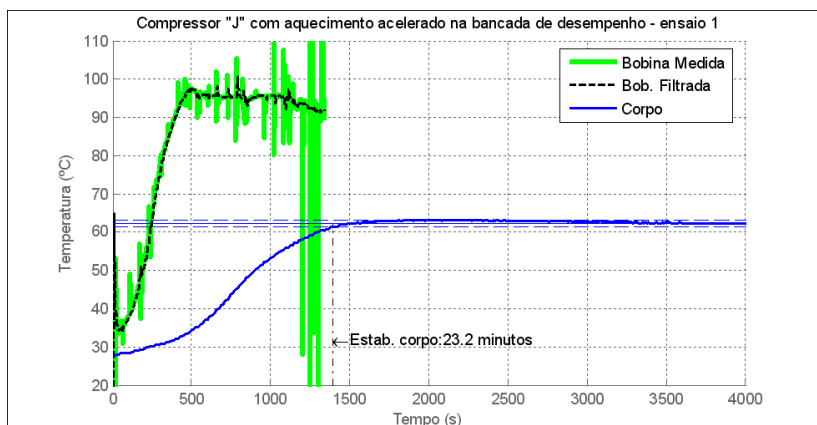


Figura E.8: Compressor *J* com controle da temperatura pela medição da resistência; transitório acelerado na bancada de desempenho.

E.3 Após ajustes dos controladores

Compressor *H* com transitório natural

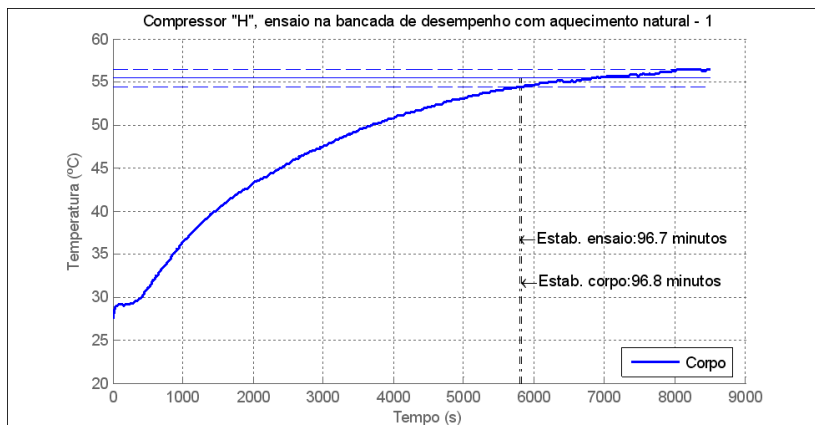


Figura E.9: Compressor *H* com transitório natural após ajustes da bancada de desempenho - ensaio 1.

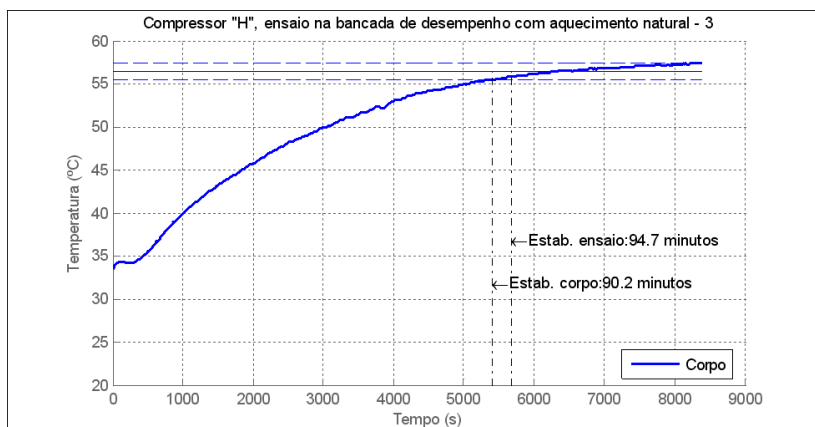


Figura E.10: Compressor *H* com transitório natural após ajustes da bancada de desempenho - ensaio 2.

Compressor *H* com transitório acelerado

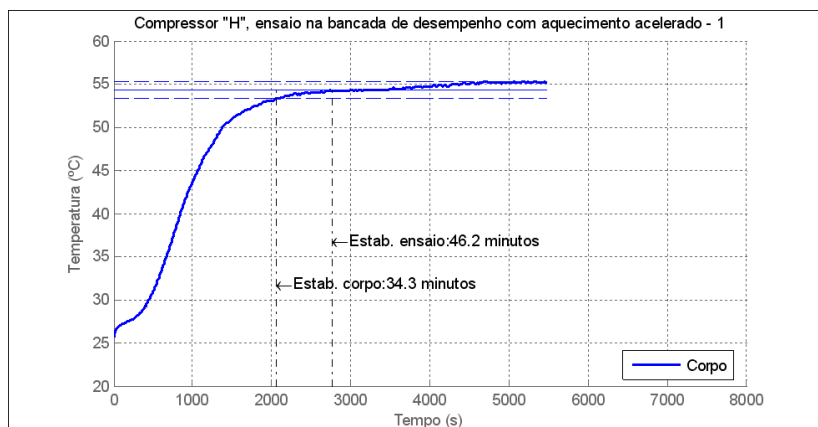


Figura E.11: Compressor *H* com transitório acelerado após ajustes da bancada de desempenho - ensaio 1.

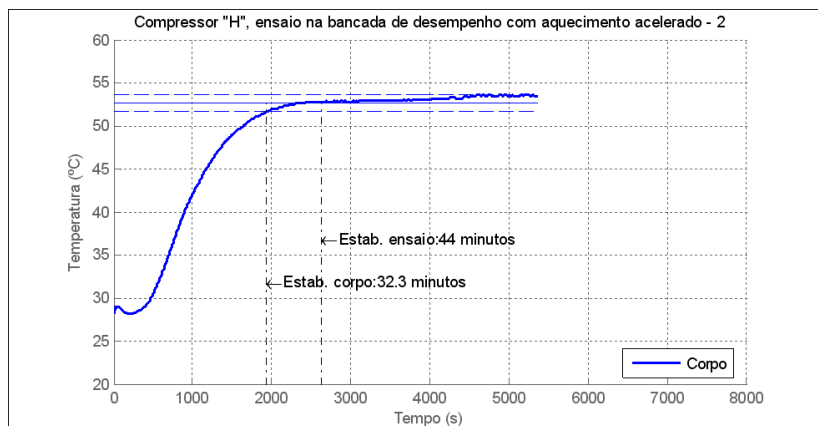


Figura E.12: Compressor *H* com transitório acelerado após ajustes da bancada de desempenho - ensaio 2.

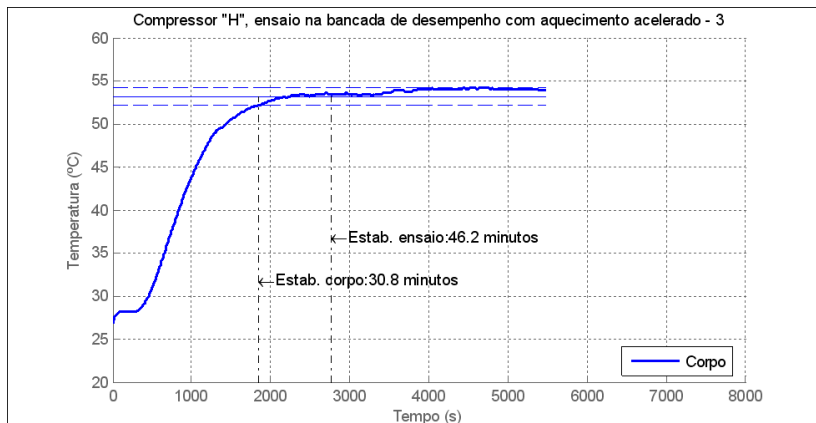


Figura E.13: Compressor *H* com transitório acelerado após ajustes da bancada de desempenho - ensaio 3.

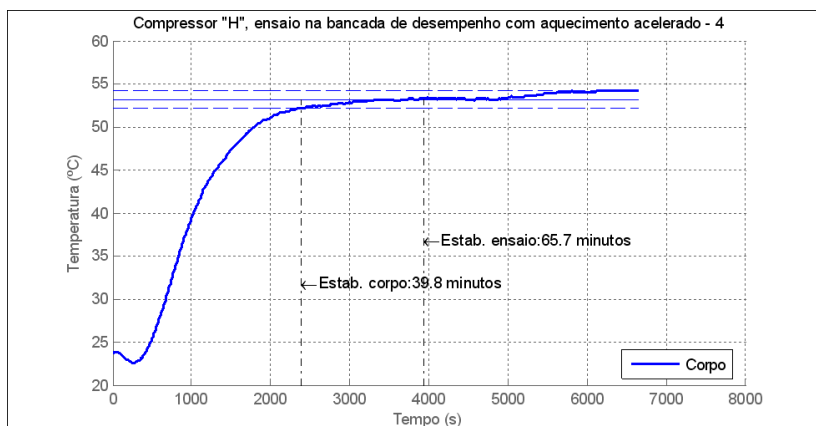


Figura E.14: Compressor *H* com transitório acelerado após ajustes da bancada de desempenho - ensaio 4.

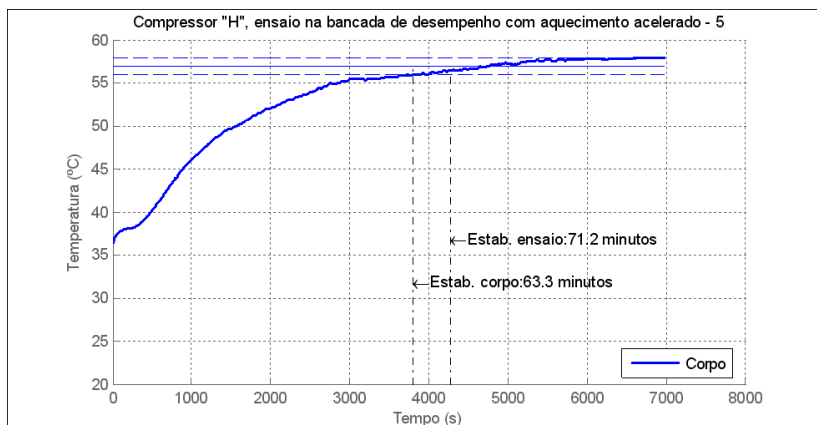


Figura E.15: Compressor *H* com transitório acelerado após ajustes da bancada de desempenho - ensaio 5.

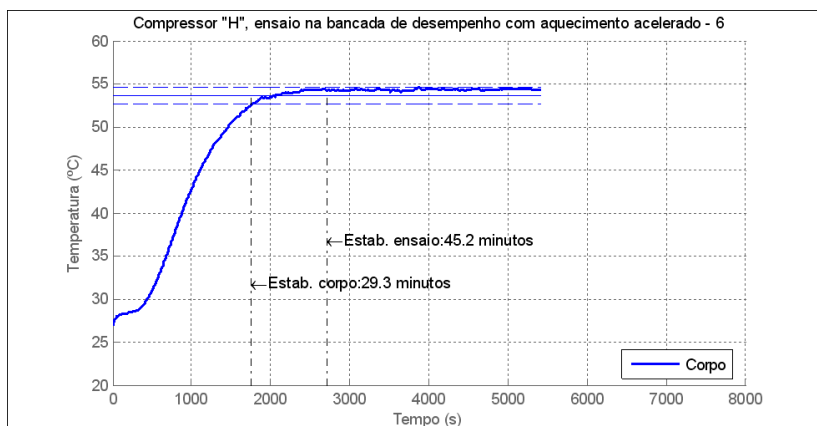


Figura E.16: Compressor *H* com transitório acelerado após ajustes da bancada de desempenho - ensaio 6.

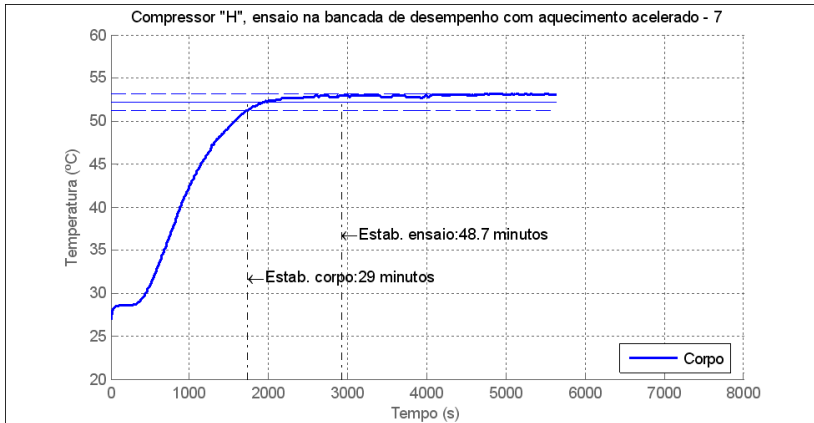


Figura E.17: Compressor *H* com transitório acelerado após ajustes da bancada de desempenho - ensaio 7.

Compressor I com transitório natural

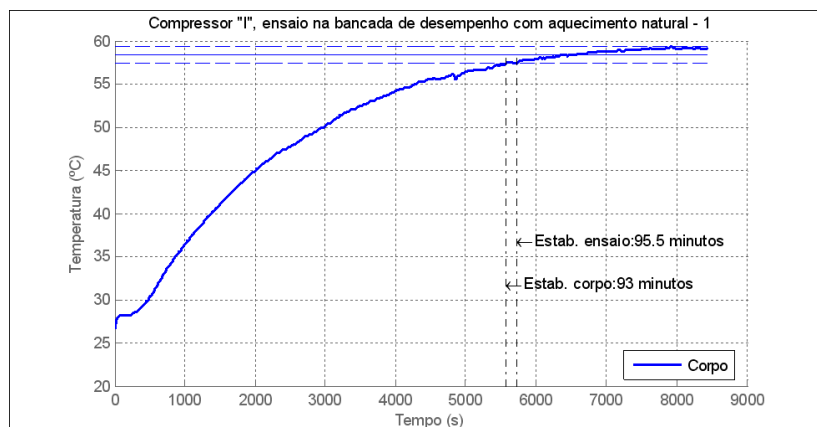


Figura E.18: Compressor I com transitório natural após ajustes da bancada de desempenho - ensaio 1.

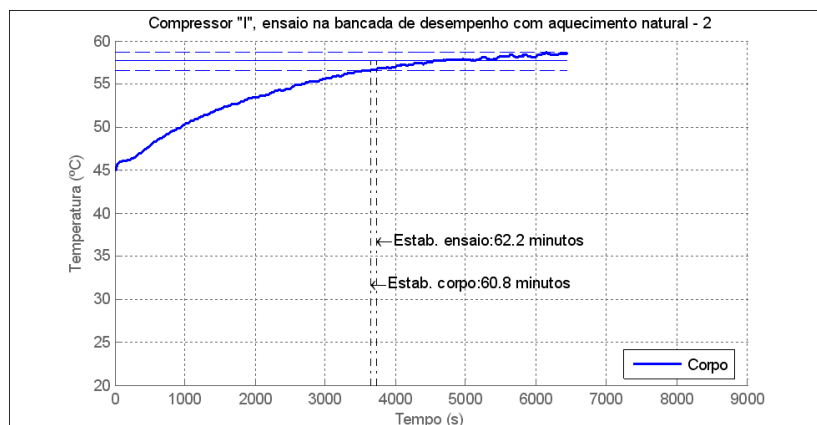


Figura E.19: Compressor I com transitório natural após ajustes da bancada de desempenho - ensaio 2.

Compressor I com transitório acelerado

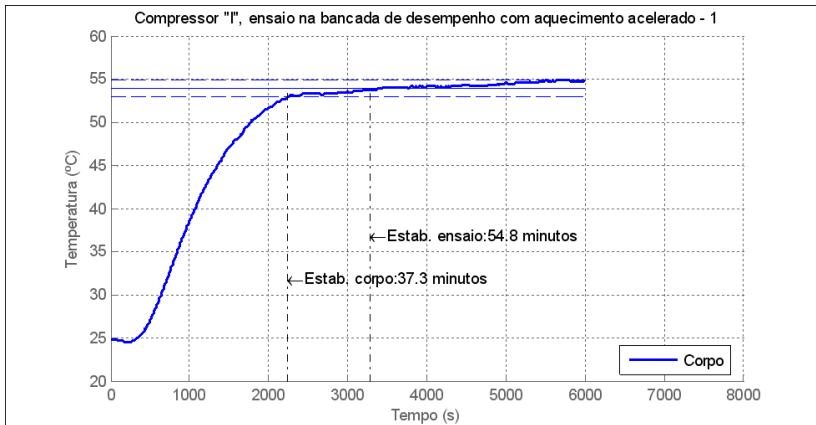


Figura E.20: Compressor I com transitório acelerado após ajustes da bancada de desempenho - ensaio 1.

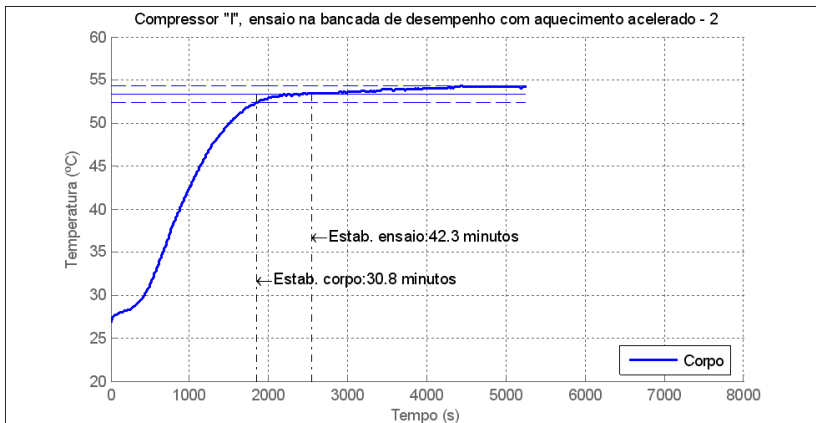


Figura E.21: Compressor I com transitório acelerado após ajustes da bancada de desempenho - ensaio 2.

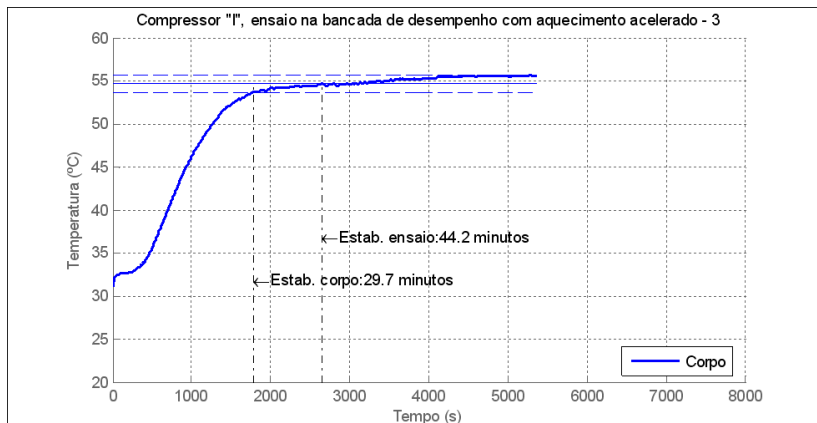


Figura E.22: Compressor *I* com transitório acelerado após ajustes da bancada de desempenho - ensaio 3.

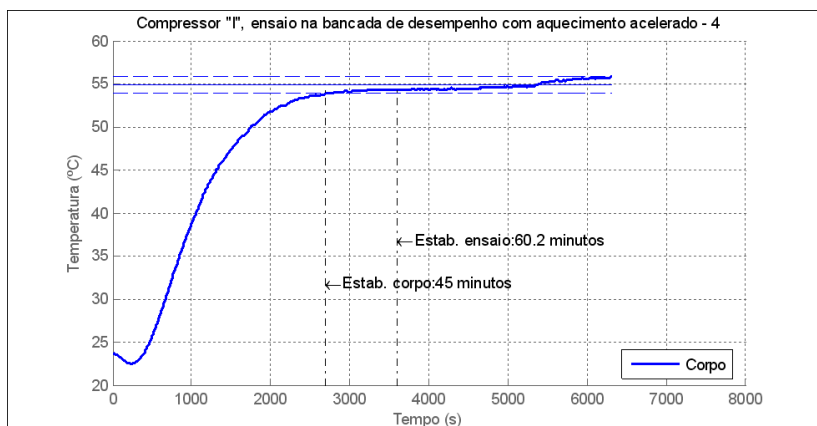


Figura E.23: Compressor *I* com transitório acelerado após ajustes da bancada de desempenho - ensaio 4.

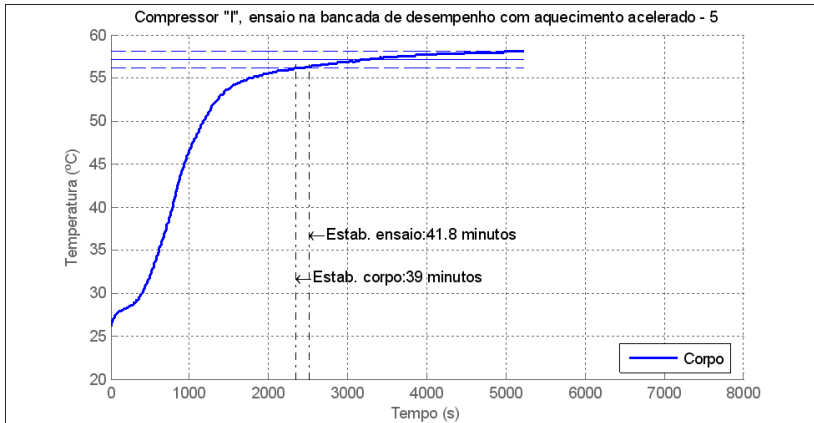


Figura E.24: Compressor *I* com transitório acelerado após ajustes da bancada de desempenho - ensaio 5.

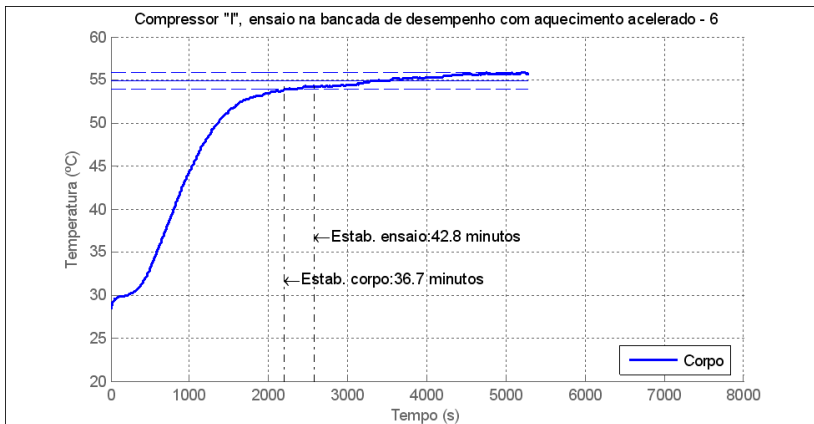


Figura E.25: Compressor *I* com transitório acelerado após ajustes da bancada de desempenho - ensaio 6.

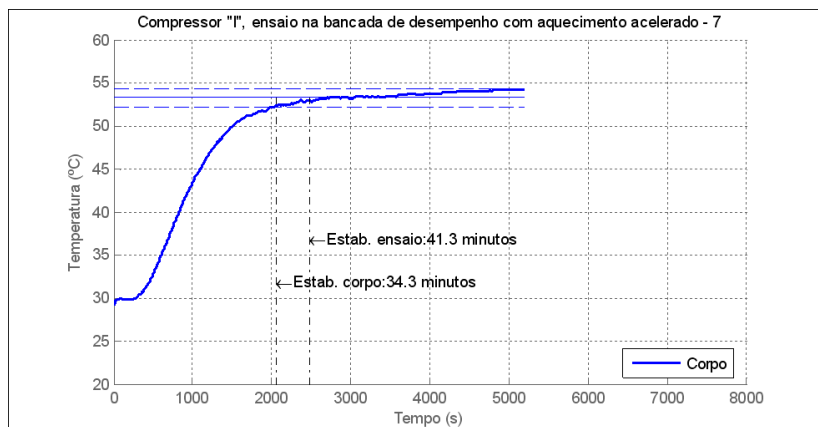


Figura E.26: Compressor *I* com transitório acelerado após ajustes da bancada de desempenho - ensaio 7.

APÊNDICE F – ENSAIOS COM COMPRESSORES A VAZIO COM DISPOSITIVO ADICIONADOR DE CC

Todos os ensaios realizados neste anexo foram realizados com os compressores ligados sem carga e fora de um sistema de refrigeração. Os ensaios de transitório acelerado foram realizados utilizando o dispositivo adicinoador de CC desenvolvido neste trabalho, bem como o sistema de medição de resistência também desenvolvido.

F.1 Compressor *D*

Ensaio com transitório natural

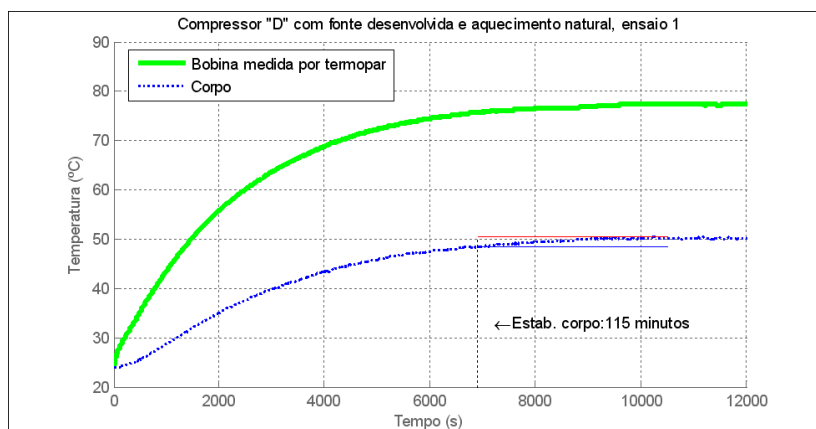


Figura F.1: Compressor *D* utilizando fonte desenvolvida, transitório natural - 1.

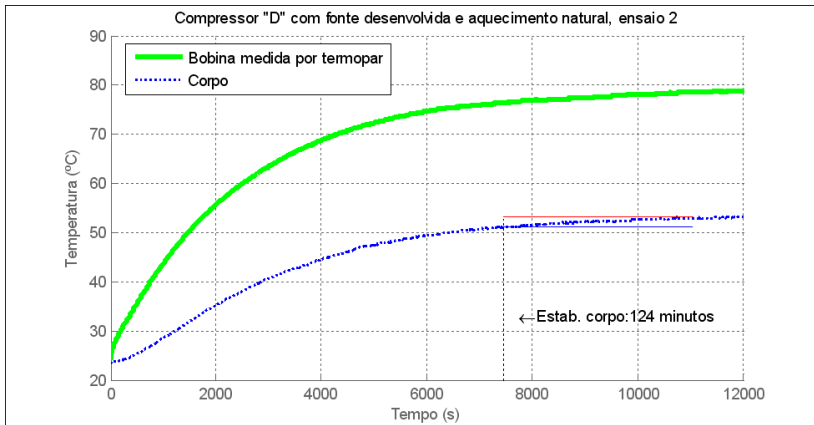


Figura F.2: Compressor *D* utilizando fonte desenvolvida, transitório natural - 2.

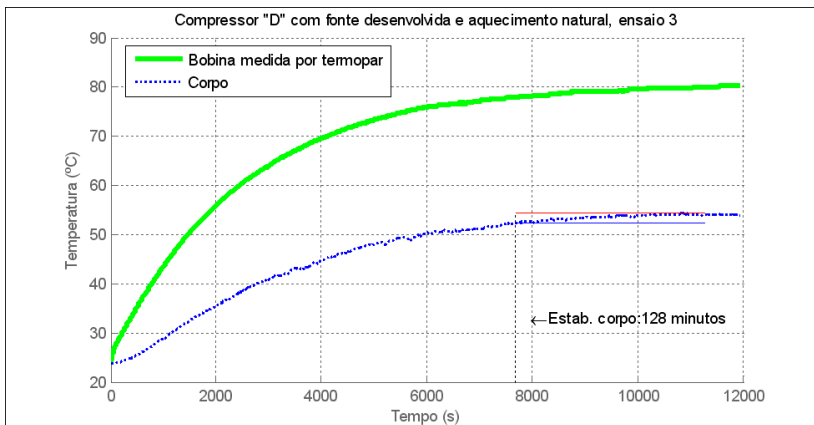


Figura F.3: Compressor *D* utilizando fonte desenvolvida, transitório natural - 3.

Ensaio com transitório acelerado

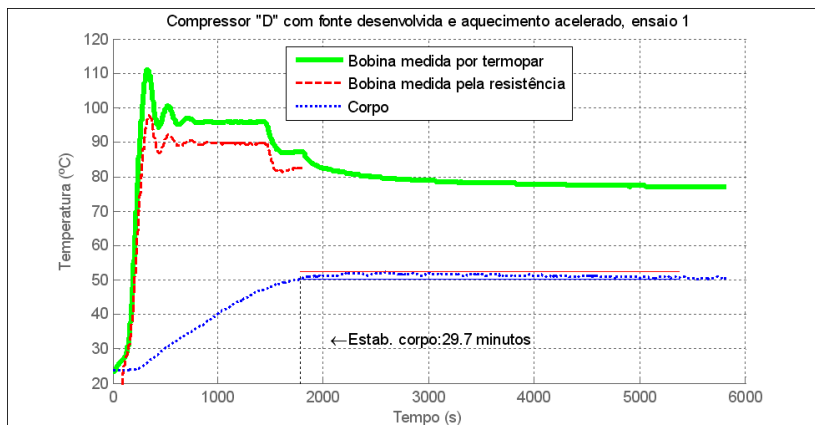


Figura F.4: Compressor *D* utilizando fonte desenvolvida, transitório acelerado - 1.

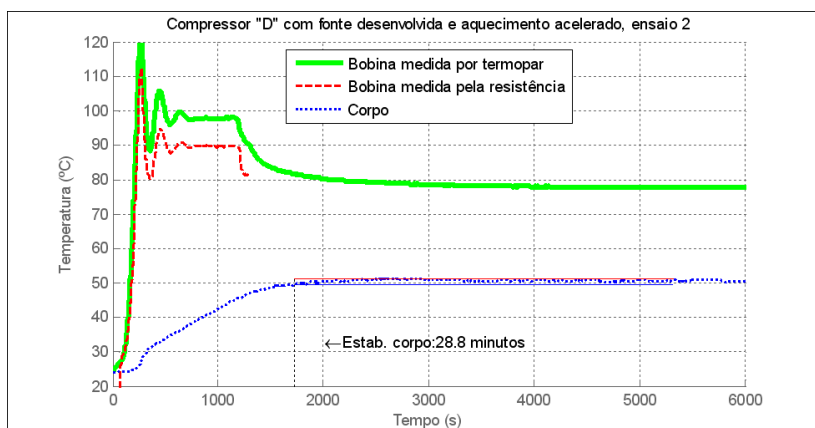


Figura F.5: Compressor *D* utilizando fonte desenvolvida, transitório acelerado - 2.

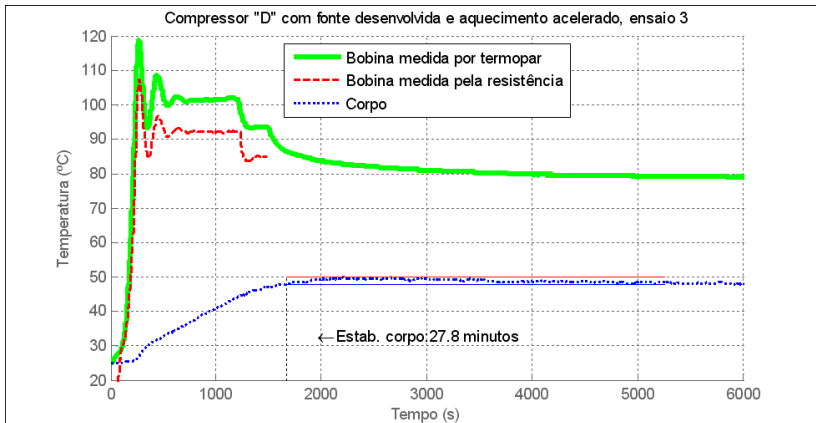


Figura F.6: Compressor *D* utilizando fonte desenvolvida, transitório acelerado - 3.

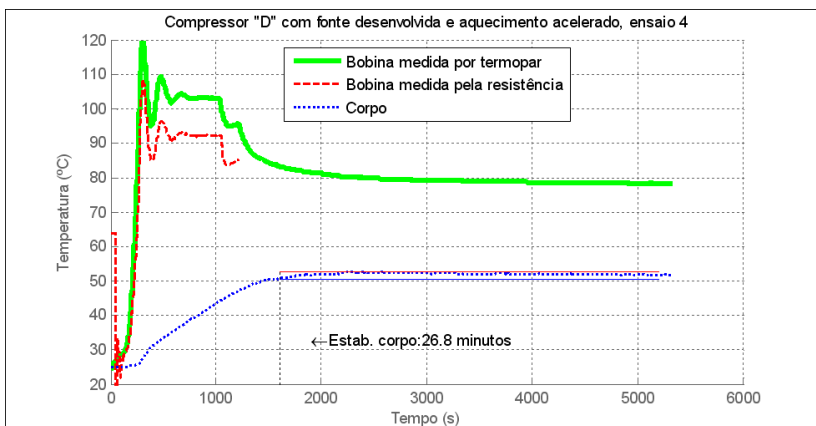


Figura F.7: Compressor *D* utilizando fonte desenvolvida, transitório acelerado - 4.

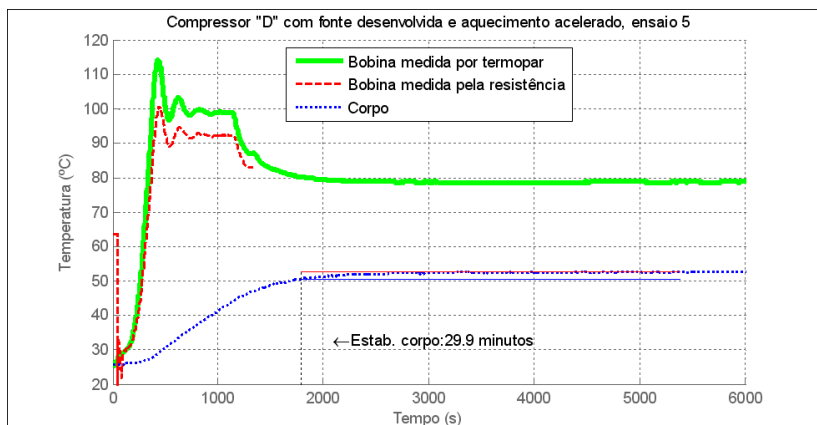


Figura F.8: Compressor *D* utilizando fonte desenvolvida, transiente acelerado - 5.

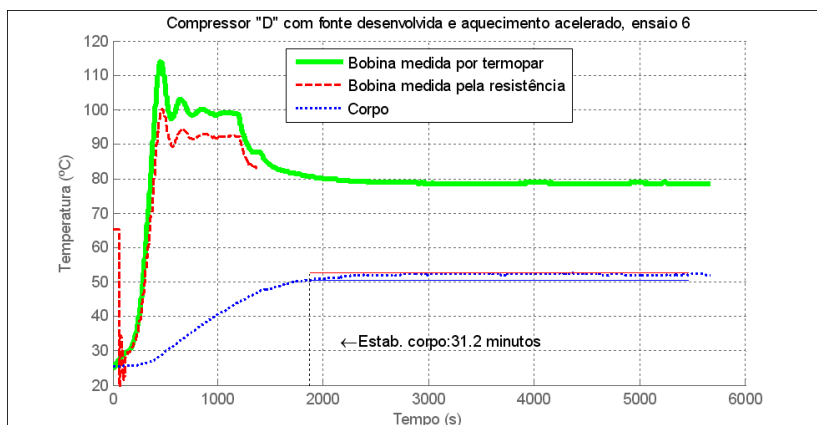


Figura F.9: Compressor *D* utilizando fonte desenvolvida, transiente acelerado - 6.

F.2 Compressor *F*

Ensaio com transitório natural

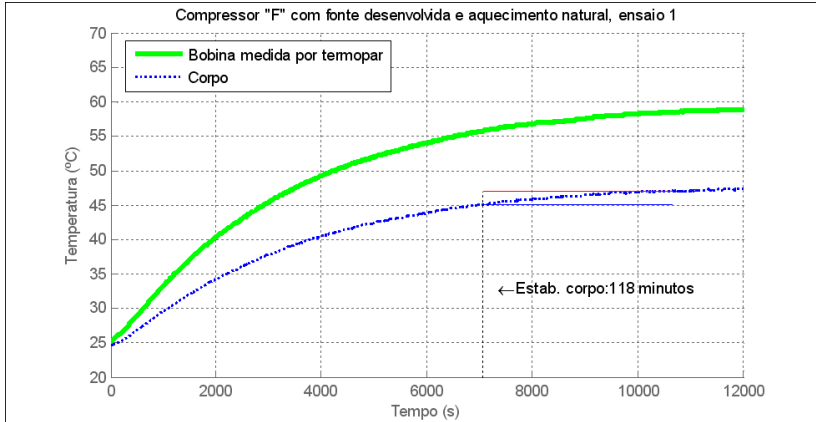


Figura F.10: Compressor *F* utilizando fonte desenvolvida, transitório natural - 1.

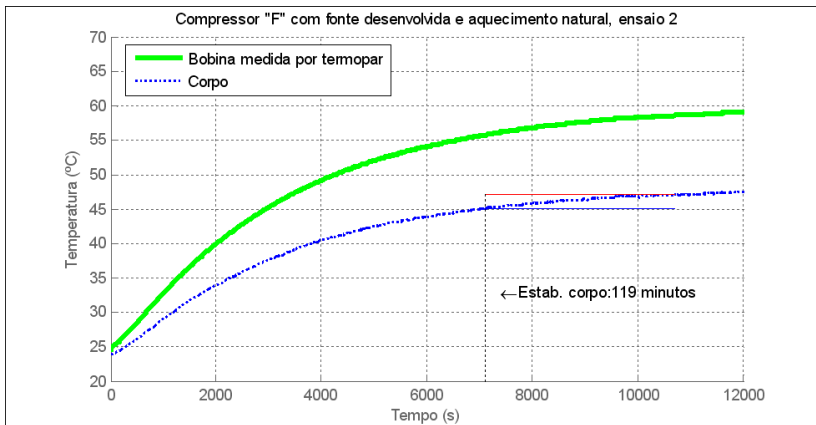


Figura F.11: Compressor *F* utilizando fonte desenvolvida, transitório natural - 2.

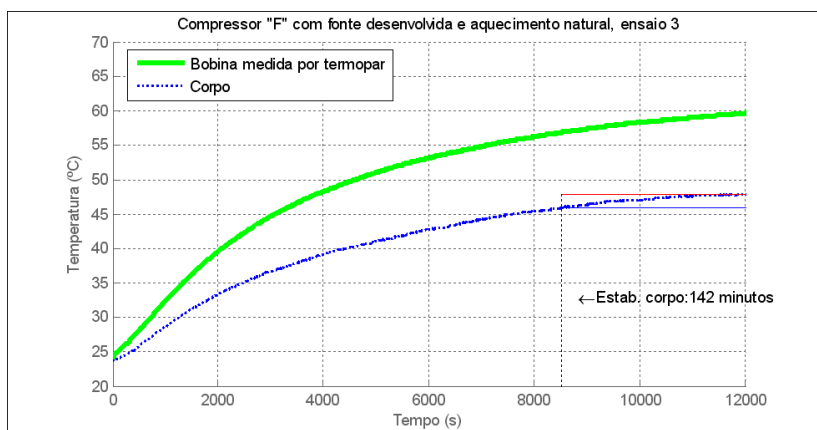


Figura F.12: Compressor F utilizando fonte desenvolvida, transitório natural - 3.

Ensaio com transitório acelerado

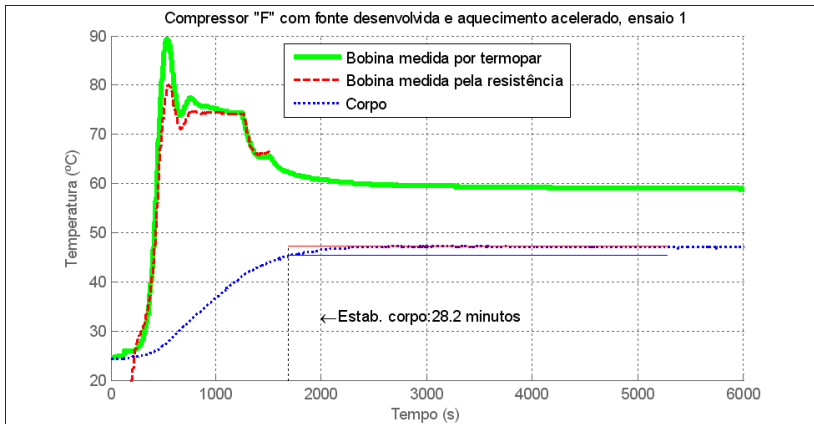


Figura F.13: Compressor F utilizando fonte desenvolvida, transitório acelerado - 1.

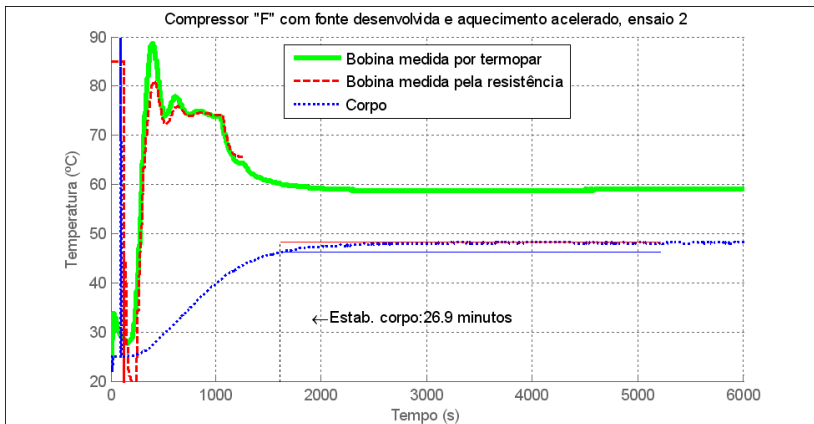


Figura F.14: Compressor F utilizando fonte desenvolvida, transitório acelerado - 2.

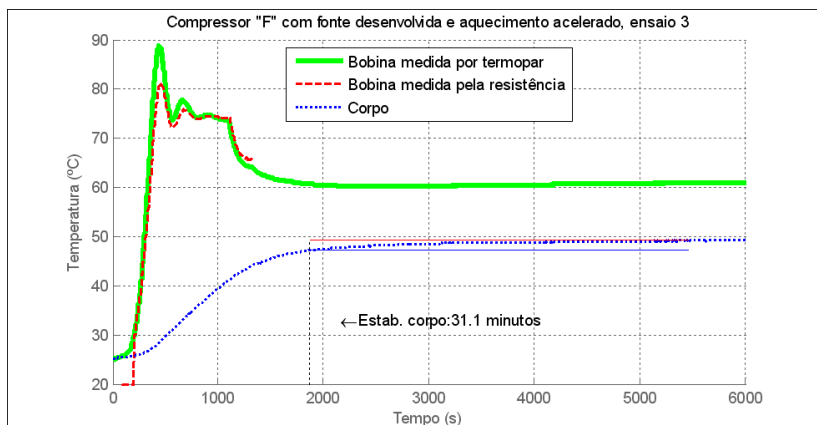


Figura F.15: Compressor F utilizando fonte desenvolvida, transitório acelerado - 3.

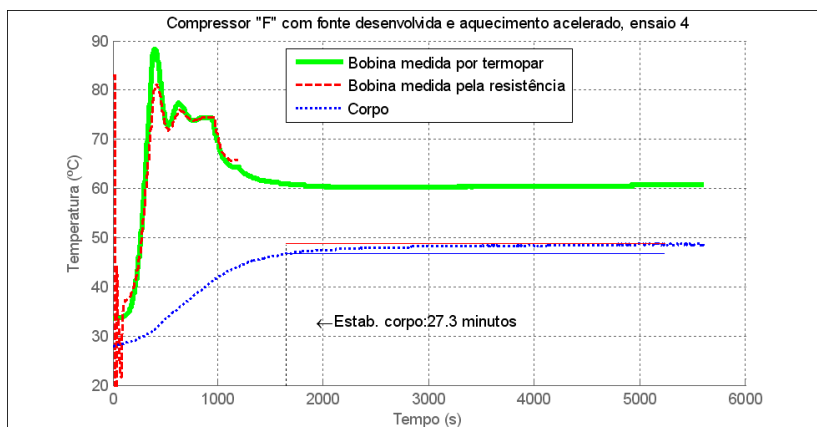


Figura F.16: Compressor F utilizando fonte desenvolvida, transitório acelerado - 4.

F.3 Compressor *G*

Ensaio com transitório natural

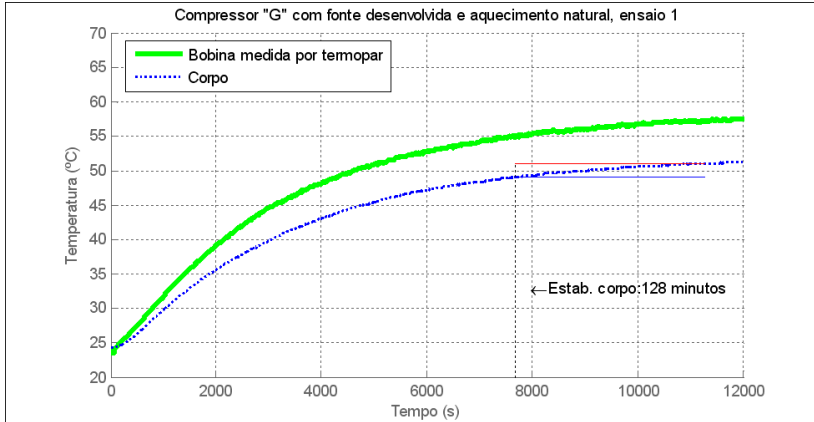


Figura F.17: Compressor *G* utilizando fonte desenvolvida, transitório natural - 1.

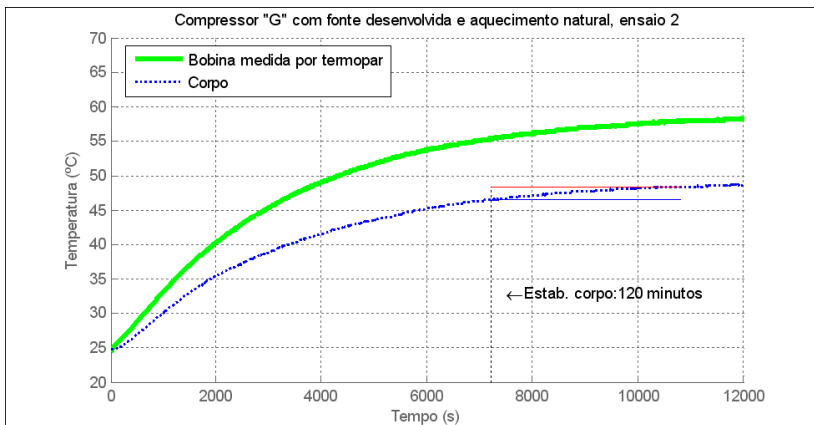


Figura F.18: Compressor *G* utilizando fonte desenvolvida, transitório natural - 2.

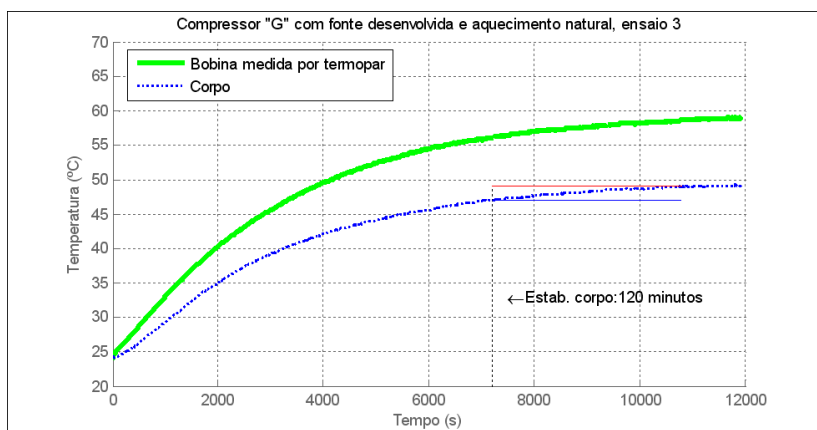


Figura F.19: Compressor *G* utilizando fonte desenvolvida, transitório natural - 3.

Ensaio com transitório acelerado

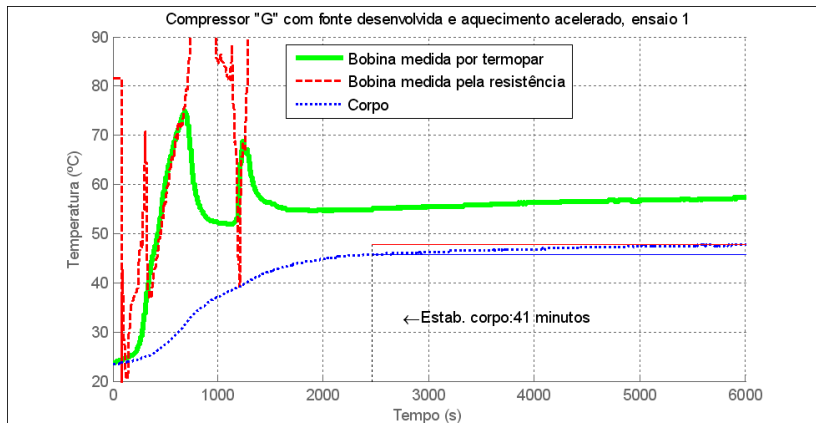


Figura F.20: Compressor G utilizando fonte desenvolvida, transitório acelerado - 1.

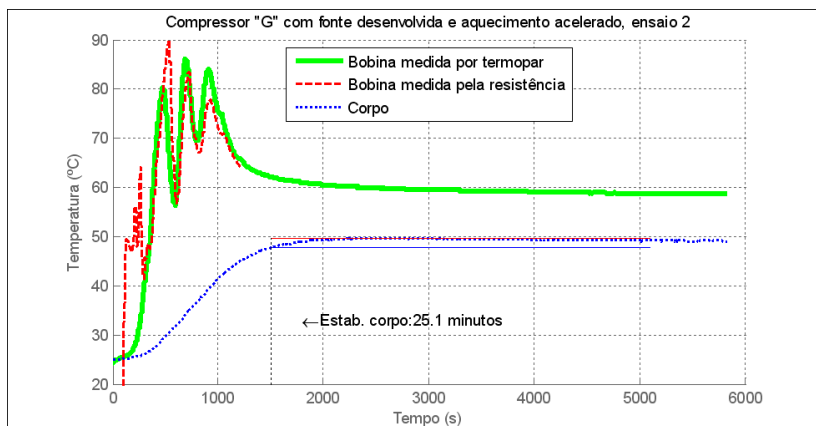


Figura F.21: Compressor G utilizando fonte desenvolvida, transitório acelerado - 2.

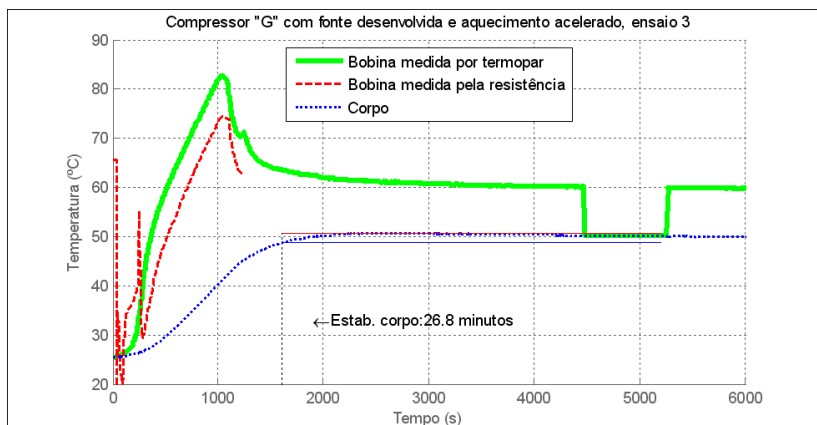


Figura F.22: Compressor *G* utilizando fonte desenvolvida, transitório acelerado - 3.

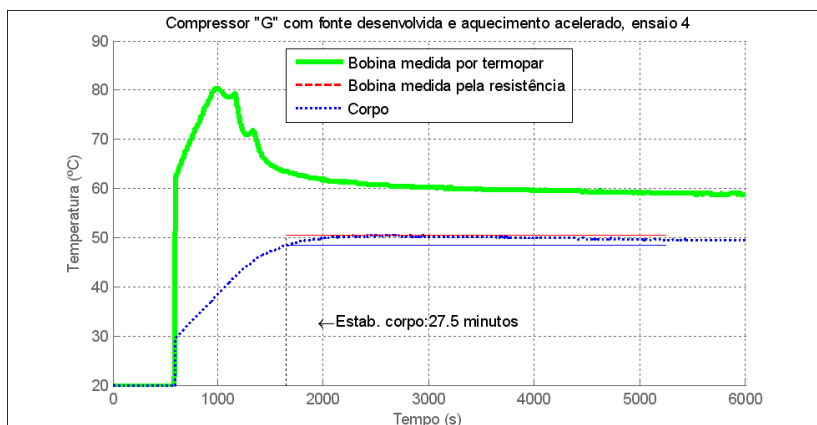


Figura F.23: Compressor *G* utilizando fonte desenvolvida, transitório acelerado - 4.

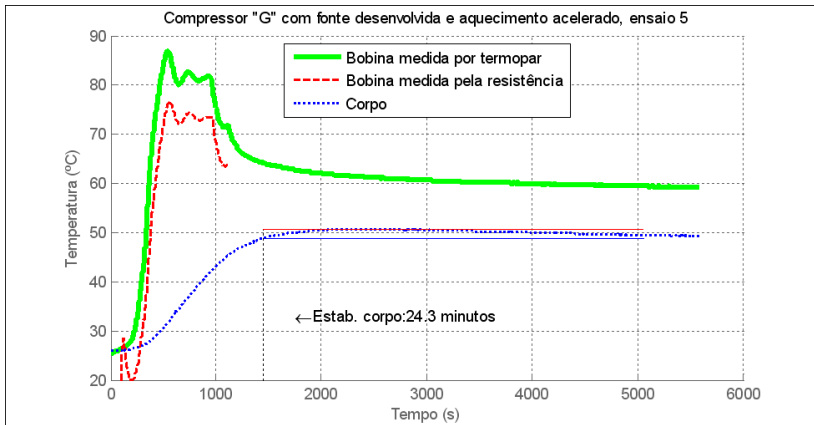


Figura F.24: Compressor *G* utilizando fonte desenvolvida, transitório acelerado - 5.

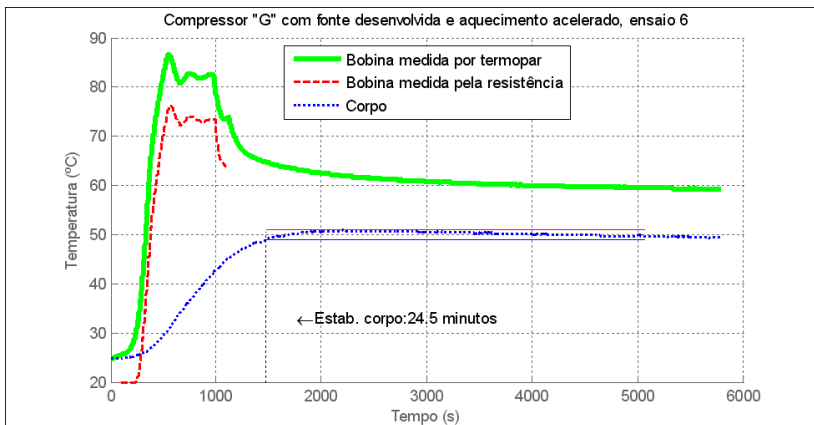


Figura F.25: Compressor *G* utilizando fonte desenvolvida, transitório acelerado - 6.

APÊNDICE G - COMPRESSORES UTILIZADOS

Tabela G.1: Características dos compressores utilizados.

Modelo	Tensão (V)	Corrente (A)	Potência ativa (W)	Resist. bobina princ. (Ω)	Disp. partida	Tipo de Motor	Capacitor	Capacid. refrig. (W)	Tipo fluido
A	220	1,03	153	10,4	RELÉ	RSIR/ CSIR	Part.	224	R134a
B	220	0,49	68	39,1	RELÉ	RSIR	Não	59	R134a
D	220	0,87	100	20,5	RELÉ	RSIR/ CSIR	Part.	97	R134a
F	220	0,56	127	14,1	PTC	RSCR	Func.	176	R134a
G	115	1,19	126	3,8	PTC	RSCR	Func.	205	R134a
H	220	0,47	102	18,35	TSD	RSCR	Func.	152	R600a
I	220	0,51	111	18,35	TSD	RSCR	Func.	164	R600a
J	220	0,45	99	19,6	PTC	RSCR	Func.	127	R600a
K	220	0,38	83	26,85	PTC	RSCR	Func.	102	R600a

ANEXO A - TABELA DE TRANSFORMADAS S E Z

Tabela de transformadas

Função no tempo	Transformada de Laplace	Transformada z	Transformada z modificada
$e(t)$	$E(s)$	$E(z)$	$E(z, m)$
$e(kT)$		$k \geq 0$	$k \geq 1$
$e(0)\delta(t)$	$e(0)$	$e(0)$	0
$e(0)\delta(0)$	$e(0)\delta(0)$		
(Transport lag) $e(t)\delta(t - lT)$, l is any positive l integer	$\epsilon^{-lTs} E(s)$	$z^{-l} E(z)$	$z^{-l-1+m} E(z, m)$
$e(kT)\delta[t - (k + l)T]$			
$u_{-1}(t)$	$\frac{1}{s}$	$\frac{z}{z-1}$	$\frac{1}{z-1}$
$\delta(t - kT)$			
l^{m-1} , m is any positive integer	$\frac{(m-1)!}{s^m}$	$\lim_{b \rightarrow 0} \left[(-1)^{m-1} \frac{z}{\partial b^{m-1}} \right]$	$\lim_{b \rightarrow 0} \left[(-1)^{m-1} \frac{\epsilon^{-bmT}}{\partial b^{m-1}} \right]$
$(kT)^{m-1}$			
ϵ^{-at}	$\frac{1}{s+a}$	$\frac{z}{z - \epsilon^{-aT}} = \frac{z}{z-d}$	$\frac{\epsilon^{-amT}}{z - \epsilon^{-aT}}$
$\epsilon^{-akT} = d^k$			
$\frac{\epsilon^{-bt} - \epsilon^{-at}}{a-b}$	$\frac{1}{(s+a)(s+b)}$	$\frac{1}{a-b} \left(\frac{z}{z - \epsilon^{-bT}} - \frac{z}{z - \epsilon^{-aT}} \right)$	$\frac{1}{a-b} \left(\frac{\epsilon^{-bmT}}{z - \epsilon^{-bT}} - \frac{\epsilon^{-amT}}{z - \epsilon^{-aT}} \right)$
$\frac{\epsilon^{-bkT} - \epsilon^{-akT}}{a-b}$			

Figura A.1: Correspondência de funções no tempo e suas transformadas de Laplace (s) e z; adaptado de (12)

Função no tempo	Transformada de Laplace	Transformada z	Transformada z modificada
7	$\frac{1}{a} [u_{-1}(t) - e^{-at}]$ $\frac{1}{a} (1 - e^{-akT})$	$\frac{1}{a} \frac{(1 - e^{-aT})z}{(z - 1)(z - e^{-aT})}$	$\frac{1}{a} \left(\frac{1}{z - 1} - \frac{e^{-amT}}{z - e^{-aT}} \right)$
8	$\frac{1}{a} \left(t - \frac{1 - e^{-at}}{a} \right)$ $\frac{1}{a} \left(kT - \frac{1 - e^{-akT}}{a} \right)$	$\frac{1}{a} \left[\frac{Tz}{(z - 1)^2} - \frac{(1 - e^{-aT})z}{a(z - 1)(z - e^{-aT})} \right]$	$\frac{1}{a} \left[\frac{T}{(z - 1)^2} + \frac{amT - 1}{a(z - 1)} + \frac{e^{-amT}}{a(z - e^{-aT})} \right]$
9	$\frac{\sin at}{s^2 + a^2}$ $\frac{\sin akT}{s^2 + a^2}$	$\frac{z \sin aT}{z^2 - 2z(\cos aT) + 1}$	$\frac{z \sin(amT) + \sin(1 - m)aT}{z^2 - 2z(\cos aT) + 1}$
10	$\frac{\cos at}{s^2 + a^2}$ $\frac{\cos akT}{s^2 + a^2}$	$\frac{z(z - \cos aT)}{z^2 - 2z(\cos aT) + 1}$	$\frac{z(\cos amT) - \cos(1 - m)aT}{z^2 - 2z(\cos aT) + 1}$
11	$\frac{1}{b} \frac{e^{-at} \sin bt}{(s + a)^2 + b^2}$ $\frac{1}{b} \frac{e^{-akT} \sin bkT}{(s + a)^2 + b^2}$	$\frac{1}{b} \frac{ze^{-aT} \sin bT}{z^2 - 2ze^{-aT}(\cos bT) + e^{-2aT}}$	$\frac{1}{b} \frac{e^{-amT} [z(\sin bmT) + e^{-aT} \sin(1 - m)bT]}{z^2 - 2ze^{-aT}(\cos bT) + e^{-2aT}}$
12	$\frac{e^{-at} \cos bt}{(s + a)^2 + b^2}$ $\frac{e^{-akT} \cos bkT}{(s + a)^2 + b^2}$	$\frac{z^2 - ze^{-aT} \cos bT}{z^2 - 2ze^{-aT}(\cos bT) + e^{-2aT}}$	$\frac{e^{-amT} [z(\cos bmT) - e^{-aT} \sin(1 - m)bT]}{z^2 - 2ze^{-aT}(\cos bT) + e^{-2aT}}$
13	$\frac{te^{-at}}{(s + a)^2}$ $\frac{kT e^{-akT}}{(s + a)^2}$	$\frac{Tze^{-aT}}{(z - e^{-aT})^2}$	$\frac{T e^{-amT} [e^{-aT} + m(z - e^{-aT})]}{(z - e^{-aT})^2}$

Figura A.2: Continuação da tabela A.1; adaptado de (12)