

IARA SIMONI PEREIRA

**MEDIÇÃO DE POTÊNCIA
ELÉTRICA EM MOTORES
BRUSHLESS ACIONADOS POR
CONVERSOR DE FREQUÊNCIA**

FLORIANÓPOLIS

2010

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO
EM METROLOGIA CIENTÍFICA E INDÚSTRIAL**

**MEDIÇÃO DE POTÊNCIA ELÉTRICA EM MOTORES
BRUSHLESS ACIONADOS POR CONVERSOR DE
FREQUÊNCIA**

Dissertação submetida à
Universidade Federal de Santa Catarina
como parte dos requisitos para a
obtenção do grau de Mestre em Metrologia

IARA SIMONI PEREIRA

Orientador: Carlos Alberto Flesch, Dr. Eng.

Florianópolis, outubro de 2010

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

P436m Pereira, Iara Simoni

Medição de potência elétrica em motores brushless acionados por conversor de frequência [dissertação] / Iara Simoni Pereira ; orientador, Carlos Alberto Flesch. - Florianópolis, SC, 2010.

199 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 científica. 2. Medição. 3. Alta voltagem. 4. Motores brushless. I. Flesch, Carlos Alberto. II. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Metrologia Científica e Industrial. III. Título.

CDU 537.7

**MEDIÇÃO DE POTÊNCIA ELÉTRICA EM MOTORES
BRUSHLESS ACIONADOS POR CONVERSOR DE
FREQUÊNCIA**

IARA SIMONI PEREIRA

Esta Dissertação foi julgada adequada para obtenção do Título de Mestre em Metrologia, e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Metrologia Científica e Industrial da Universidade Federal de Santa Catarina.

Carlos Alberto Flesch, Dr. Eng.
Orientador

Armando Albertazzi Gonçalves Jr., Dr. Eng.
Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Metrologia Científica e Industrial.

Banca Examinadora:

Prof. Marco Antônio Martins Cavaco, Ph.D.
Presidente

Prof. Hari Bruno Mohr, Dr. Eng.

Prof. Saulo Güths, Dr. Eng.

Eng. André Paz Rosa, M.Sc.

AGRADECIMENTOS

A Deus por me proporcionar conforto nos momentos difíceis.

Ao meu orientador, Prof. Carlos Alberto Flesch, pela competência, paciência e por ter acreditado na minha capacidade de realizar este trabalho de mestrado.

Aos colegas do Labmetro/LIAE pela ajuda prestada no desenvolvimento desta dissertação. Em especial à Lúnia, ao Benjamim e ao Cesar.

Aos amigos Gabriel, David, Daniel e Kamila, pelo incentivo, compreensão e momentos de descontração.

Aos companheiros da turma 2008, Arthur, Benjamim, Burin, Chico, Edinei, Humberto, João Gabriel, Lúnia, Maks, Rogério, Vladimir e Willian pela parceria no decorrer desta caminhada e pelos laços de coleguismo criados.

Aos professores do Pós-MCI pelos ensinamentos transmitidos.

Aos professores do IF-SC, André Roberto de Sousa e Nelso Gauze Bonacorso por terem me confiado a indicação para participar do processo de seleção do mestrado.

Aos membros da banca por terem aceitado avaliar este trabalho e pelas sugestões propostas.

Aos colaboradores da Embraco, pela orientação técnica e apoio. Em especial ao André, Marco Aurélio e Aleandro.

À Universidade Federal de Santa Catarina, ao Programa de Pós-Graduação em Metrologia Científica e Industrial e ao Laboratório de Metrologia e Automatização, pela oportunidade oferecida.

À CAPES, EMBRACO e FINEP pelos investimentos realizados.

E a todos os colegas e amigos que se preocuparam, interessaram e ajudaram; a quem não posso citar individualmente, mas que não foram, de modo algum, menos importantes para que eu conseguisse vencer mais essa etapa de minha vida.

RESUMO

Hoje em dia há uma tendência quase que generalizada de diminuição de componentes e equipamentos. Com compressores de refrigeração não é diferente. Para que a diminuição da câmara de compressão não implique redução da capacidade de refrigeração, é necessário que se aumente a frequência de operação. Avaliações teóricas e experimentais mostraram que motores de alta rotação do tipo *brushless* podem desempenhar esse papel. No intuito de se avançar no conhecimento tecnológico desses compressores é importante o domínio das inúmeras grandezas que estão envolvidas no processo de desenvolvimento. Rendimento é, sem dúvida, um parâmetro de grande impacto no desenvolvimento do produto. Rendimento é a razão entre a potência mecânica efetivamente transformada em trabalho e a potência elétrica entregue a máquina. Nesse contexto, este trabalho analisou opções e avaliou experimentalmente a medição da potência elétrica, com baixa incerteza, em motores do tipo *brushless* na presença de sinais com elevado conteúdo harmônico. Foi realizado um estudo prévio das características dos motores e seu acionamento, bem como das ferramentas matemáticas e métodos que serviram de suporte para o desenvolvimento do trabalho. Alternativas para a medição de potência elétrica foram estudadas. Um equipamento adequado à medição em alta frequência foi selecionado e testado em bancada automatizada de ensaio de motores. A caracterização dos espectros de frequências para os motores avaliados neste trabalho mostrou que a maior parte da potência elétrica se concentra na frequência fundamental e que as amplitudes harmônicas são quase que insignificantes para o sinal de potência elétrica. Em função disso foi mostrado experimentalmente que em tais aplicações wattímetros para medição de sinais de baixa frequência podem apresentar resultados satisfatórios. Uma comparação entre dois equipamentos comerciais de características metrológicas distintas também foi realizada e observou-se que a medição de ambos é bem próxima, chegando a uma diferença de aproximadamente 3,2% entre os resultados obtidos para os pontos nos quais os motores são ensaiados. A reprodutibilidade do wattímetro WT230 foi analisada e em cinco ciclos de medição o desvio em relação à média foi bastante pequeno, apresentando resultados de até 1,5% de diferença (pior caso) entre ensaios.

ABSTRACT

Nowadays there is a global trend on reducing size of equipments and their parts. The refrigeration compressors are objects of this tendency. Nevertheless, reducing compression chamber's dimensions implies reducing the refrigeration capacity when this is done without the increase of motor speed. Theoretical and experimental evaluations have shown that high speed brushless motors can perform this role. The R&D process related to the refrigeration compressors deals with several quantities and parameters in order to advance in the technological sense. The motor efficiency is one of such parameters because it relates the mechanical power converted into work and electrical power consumed by the compressor. As a contribution on motor efficiency evaluation, this dissertation presents analysis and experimental evaluations carried out on electrical power measurement. The most important characteristic of this measurement process is deal with high harmonic content signals and low measurement uncertainties. In order to achieve the dissertation goals, prior studies were carried out on: motors and drives characteristics; electrical power measurement methods; mathematical tools and methods suitable for data and signal analysis. A suitable device for high frequency measurement was selected and used in an automated motor testing bench. The frequency spectrum of the evaluated motors showed that the electrical power is concentrated in the fundamental frequency and that harmonics amplitudes are almost negligible. Thus, experimental data indicated that low frequency power meters can provide satisfactory results in such applications. Two commercial power meters - designed for distinct metrological performance - had their measurement results compared on typical motor test conditions and presented maximum difference of 3.2%. The reproducibility WT230 power meter was analyzed in five measurement cycles and presented very small deviations (up to 1.5% in worst case) compared to the average.

LISTA DE FIGURAS

2.1	Bancada de ensaio de motores elétricos	31
2.2	Diagrama esquemático da bancada	33
2.3	Motor de corrente contínua	35
2.4	Motor CC sem escovas	36
2.5	Motor Maxon vista explodida	37
2.6	Conversor de frequência Maxon DES 70/10	39
2.7	Esquema de ligação do conversor de frequência Maxon DES 70/10	39
3.1	Método dos dois wattímetros conectado a carga Y ou Δ	52
3.2	Diagrama fasorial com a representação das somas das tensões	53
3.3	Método dos três wattímetros	54
4.1	Diagrama de blocos geral de um analisador de potência	58
4.2	Diagrama de blocos de um analisador de potência comercial	60
4.3	Módulos típicos de um sistema de medição com processamento digital	61
4.4	Circuito <i>shunt</i> com representação da indutância intrínseca	63
4.5	Princípio de funcionamento do sensor por efeito Hall	64
4.6	Circuito do transdutor de efeito Hall sem realimentação	65
4.7	Circuito do transdutor de efeito Hall com realimentação	66
4.8	Bobina de Rogowski	67
4.9	Distribuição do fluxo no transdutor CT	69
4.10	Princípio da distribuição de fluxo na alteração da indutância	70
4.11	Resposta da corrente para um pulso em tensão	71
4.12	Resposta em corrente para o indutor saturável submetido à pulsos de tensão	72
4.13	Estrutura de blocos do transdutor CT da LEM	73
4.14	Divisor resistivo Caddock modelo 1776	73
5.1	Oscilógrafo DL750	80
5.2	Módulos DL750	80
5.3	Sonda de corrente 1146A Agilent	81
5.4	Resistor <i>shunt</i> Riedon	82
5.5	Diagrama de blocos simplificado aquisição DL750 com resistor <i>shunt</i>	85
5.6	Diagrama de blocos simplificado aquisição DL750 com ponteira alicate amperímetro	85
5.7	Tela principal do programa	86
5.8	Forma de onda de tensão na saída do conversor de frequência	87

5.9	Forma de onda de tensão após os indutores	87
5.10	Espectro da tensão POT0000	88
5.11	Espectro da corrente POT0000	88
5.12	Espectro da tensão POT0000	89
5.13	Espectro da tensão POT0000	89
5.14	Espectro da tensão POT0001	90
5.15	Espectro da corrente POT0001	90
5.16	Espectro da tensão POT0013	91
5.17	Espectro da corrente POT0013	91
5.18	Espectro da tensão POT0012	92
5.19	Espectro da corrente POT0012	92
5.20	Forma de onda da simulação realizada	93
5.21	Espectro de frequência em 50 kHz da simulação realizada	93
5.22	Forma de onda de corrente adquirida com a sonda de corrente na condição POT0012	94
5.23	Forma de onda de corrente adquirida com resistor <i>shunt</i> na condição POT0012	94
5.24	Espectro de frequências da aquisição realizada utilizando a sonda de corrente na condição POT0012	95
5.25	Espectro de frequências da aquisição realizada utilizando o resistor <i>shunt</i> na condição POT0012	95
5.26	Espectro de frequência em 50 kHz do sinal de corrente utilizando a sonda de corrente	96
5.27	Espectro de frequência em 50 kHz do sinal de corrente utilizando o resistor <i>shunt</i>	96
6.1	Curvas das faixas de operação dos motores em teste	97
6.2	Corrente solicitada na condição 2500 rpm e 172 mN.m	99
6.3	Gráfico com todos wattímetros	109
6.4	Gráfico para faixas de frequências até 15 kHz	111
6.5	Gráfico para faixas de frequências até 500 kHz	112
6.6	Erro máximo harmônico POT0000	117
6.7	Bancada com os wattímetros WT230 e PZ4000	118
6.8	Esquema elétrico de ligação entre os wattímetros PZ4000 e WT230	119
6.9	Ciclo de medição	120
6.10	Potência elétrica para o motor EC45 medidos com wattímetro PZ4000 e WT230	122
6.11	50 primeiros pontos de potência elétrica para o motor EC45 medidos com wattímetros PZ4000 e WT230	123

6.12	Potência elétrica para o motor EC45 com a diferença percentual entre o resultado dos wattímetros WT230 e PZ4000 . . .	124
6.13	Rendimento para o motor EC45 medidos com os wattímetros PZ4000 e WT230	125
6.14	Potência elétrica para o motor EC45 medidos com os wattímetros PZ4000 e WT230 com a frequência rotacional crescente	126
6.15	Potência elétrica para o motor EC60 medidos com wattímetro PZ4000 e WT230	128
6.16	Potência elétrica para o motor EC60 com a diferença percentual entre o resultado dos wattímetros WT230 e PZ4000 . . .	129
6.17	Rendimento para o motor EC60 medido com os wattímetros WT230 e PZ4000	130
6.18	Comparação através da incerteza de medição entre os wattímetros WT230 e PZ4000	132
6.19	Reprodutibilidade de ensaios para potência elétrica na condição 15000 rpm - 16 mN.m	132
A.1	Espectros de frequência em 50 kHz: condição POT0000 . .	149
A.2	Espectros de frequência em 100 kHz: condição POT0000 . .	149
A.3	Espectros de frequência em 150 kHz: condição POT0000 . .	149
A.4	Espectros de frequência em 200 kHz: condição POT0000 . .	150
A.5	Espectros de frequência em 250 kHz: condição POT0000 . .	150
A.6	Espectros de frequência em 300 kHz: condição POT0000 . .	150
E.1	Reprodutibilidade para o motor EC 45 - 15000 rpm/96 mN.m	185
E.2	Reprodutibilidade para o motor EC 45 - 15000 rpm/80 mN.m	185
E.3	Reprodutibilidade para o motor EC 45 - 15000 rpm/64 mN.m	186
E.4	Reprodutibilidade para o motor EC 45 - 15000 rpm/48 mN.m	186
E.5	Reprodutibilidade para o motor EC 45 - 15000 rpm/32 mN.m	186
E.6	Reprodutibilidade para o motor EC 45 - 15000 rpm/16 mN.m	187
E.7	Reprodutibilidade para o motor EC 45 - 7500 rpm/159 mN.m	187
E.8	Reprodutibilidade para o motor EC 45 - 7500 rpm/134 mN.m	187
E.9	Reprodutibilidade para o motor EC 45 - 7500 rpm/108 mN.m	188
E.10	Reprodutibilidade para o motor EC 45 - 7500 rpm/83 mN.m	188
E.11	Reprodutibilidade para o motor EC 45 - 7500 rpm/57 mN.m	188
E.12	Reprodutibilidade para o motor EC 45 - 7500 rpm/32 mN.m	189
E.13	Reprodutibilidade para o motor EC 45 - 2500 rpm/172 mN.m	189
E.14	Reprodutibilidade para o motor EC 45 - 2500 rpm/153 mN.m	189
E.15	Reprodutibilidade para o motor EC 45 - 2500 rpm/134 mN.m	190
E.16	Reprodutibilidade para o motor EC 45 - 2500 rpm/115 mN.m	190

E.17	Reprodutibilidade para o motor EC 45 - 2500 rpm/96 mN.m	190
E.18	Reprodutibilidade para o motor EC 45 - 2500 rpm/76 mN.m	191
F.1	Reprodutibilidade para o motor EC 60 - 3500 rpm/497 mN.m	193
F.2	Reprodutibilidade para o motor EC 60 - 3500 rpm/415 mN.m	193
F.3	Reprodutibilidade para o motor EC 60 - 3500 rpm/333 mN.m	194
F.4	Reprodutibilidade para o motor EC 60 - 3500 rpm/251 mN.m	194
F.5	Reprodutibilidade para o motor EC 60 - 3500 rpm/169 mN.m	194
F.6	Reprodutibilidade para o motor EC 60 - 3500 rpm/87 mN.m	195
F.7	Reprodutibilidade para o motor EC 60 - 2500 rpm/497 mN.m	195
F.8	Reprodutibilidade para o motor EC 60 - 2500 rpm/420 mN.m	195
F.9	Reprodutibilidade para o motor EC 60 - 2500 rpm/344 mN.m	196
F.10	Reprodutibilidade para o motor EC 60 - 2500 rpm/267 mN.m	196
F.11	Reprodutibilidade para o motor EC 60 - 2500 rpm/191 mN.m	196
F.12	Reprodutibilidade para o motor EC 60 - 2500 rpm/115 mN.m	197
F.13	Reprodutibilidade para o motor EC 60 - 1000 rpm/497 mN.m	197
F.14	Reprodutibilidade para o motor EC 60 - 1000 rpm/420 mN.m	197
F.15	Reprodutibilidade para o motor EC 60 - 1000 rpm/344 mN.m	198
F.16	Reprodutibilidade para o motor EC 60 - 1000 rpm/267 mN.m	198
F.17	Reprodutibilidade para o motor EC 60 - 1000 rpm/191 mN.m	198
F.18	Reprodutibilidade para o motor EC 60 - 1000 rpm/115 mN.m	199

LISTA DE TABELAS

2.1	Principais características dos motores Maxon selecionados	38
2.2	Principais características do conversor de frequência selecionado	40
4.1	Módulos e componentes para medição de potência elétrica	62
5.1	Principais características do resistor <i>shunt</i> Riedon USR 4 – 3425	82
5.2	Pontos de medição Motor EC45	83
5.3	Pontos de medição Motor EC60	84
6.1	Pontos de carga para o motor EC45 para o ensaio RF	98
6.2	Comparação dos equipamentos de medição de potência elétrica	105
6.3	Valores das faixas de tensão e corrente utilizadas na simulação para o wattímetro WT1600	108
6.4	Valores de frequência, amplitude e fase para 2500 rpm/172 mN.m – Motor EC45	113
6.5	Potência ativa nas frequências harmônicas para 2500 rpm/172 mN.m – Motor EC45	114
6.6	Incertezas de medição do wattímetro PZ4000 nas faixas de frequência para a situação POT0000	115
6.7	Erro máximo calculado para o wattímetro PZ4000 na condição POT0000	115
6.8	Pontos de carga para o motor EC60 para o ensaio RF	120
B.1	Incerteza de medição para o wattímetro PZ4000 para situação POT0000	152
B.2	Incerteza de medição para o wattímetro PZ4000 para situação POT0001	152
B.3	Incerteza de medição para o wattímetro PZ4000 para situação POT0002	153
B.4	Incerteza de medição para o wattímetro PZ4000 para situação POT0003	153
B.5	Incerteza de medição para o wattímetro PZ4000 para situação POT0004	154
B.6	Incerteza de medição para o wattímetro PZ4000 para situação POT0005	154
B.7	Incerteza de medição para o wattímetro PZ4000 para situação POT0006	155
B.8	Incerteza de medição para o wattímetro PZ4000 para situação POT0007	155

B.9	Incerteza de medição para o wattímetro PZ4000 para situação POT0008	156
B.10	Incerteza de medição para o wattímetro PZ4000 para situação POT0009	156
B.11	Incerteza de medição para o wattímetro PZ4000 para situação POT0010	157
B.12	Incerteza de medição para o wattímetro PZ4000 para situação POT0011	157
B.13	Incerteza de medição para o wattímetro WT3000 para situação POT0000	159
B.14	Incerteza de medição para o wattímetro WT3000 para situação POT0001	159
B.15	Incerteza de medição para o wattímetro WT3000 para situação POT0002	160
B.16	Incerteza de medição para o wattímetro WT3000 para situação POT0003	160
B.17	Incerteza de medição para o wattímetro WT3000 para situação POT0004	161
B.18	Incerteza de medição para o wattímetro WT3000 para situação POT0005	161
B.19	Incerteza de medição para o wattímetro WT3000 para situação POT0006	162
B.20	Incerteza de medição para o wattímetro WT3000 para situação POT0007	162
B.21	Incerteza de medição para o wattímetro WT3000 para situação POT0008	163
B.22	Incerteza de medição para o wattímetro WT3000 para situação POT0009	163
B.23	Incerteza de medição para o wattímetro WT3000 para situação POT0010	164
B.24	Incerteza de medição para o wattímetro WT3000 para situação POT0011	164
B.25	Incerteza de medição para o wattímetro LMG500 para situação POT0000	166
B.26	Incerteza de medição para o wattímetro LMG500 para situação POT0001	166
B.27	Incerteza de medição para o wattímetro LMG500 para situação POT0002	167

B.28	Incerteza de medição para o wattímetro LMG500 para situação POT0003	167
B.29	Incerteza de medição para o wattímetro LMG500 para situação POT0004	168
B.30	Incerteza de medição para o wattímetro LMG500 para situação POT0005	168
B.31	Incerteza de medição para o wattímetro LMG500 para situação POT0006	169
B.32	Incerteza de medição para o wattímetro LMG500 para situação POT0007	169
B.33	Incerteza de medição para o wattímetro LMG500 para situação POT0008	170
B.34	Incerteza de medição para o wattímetro LMG500 para situação POT0009	170
B.35	Incerteza de medição para o wattímetro LMG500 para situação POT0010	171
B.36	Incerteza de medição para o wattímetro LMG500 para situação POT0011	171
C.1	Tabela com o resumo dos valores calculados de potência ativa total e erros de medição para o motor EC45 para os wattímetros PZ4000, WT3000 e LMG500 para os pontos POT0000 a POT0011	174
C.2	Tabela com o resumo dos valores calculados de potência ativa total e erros de medição para o motor EC60 para os wattímetros PZ4000, WT3000 e LMG500 para os pontos POT0012 a POT0023	175
D.1	Incerteza de medição para o wattímetro WT230 para situação POT0000	178
D.2	Incerteza de medição para o wattímetro WT230 para situação POT0001	178
D.3	Incerteza de medição para o wattímetro WT230 para situação POT0002	179
D.4	Incerteza de medição para o wattímetro WT230 para situação POT0003	179
D.5	Incerteza de medição para o wattímetro WT230 para situação POT0004	180
D.6	Incerteza de medição para o wattímetro WT230 para situação POT0005	180

D.7	Incerteza de medição para o wattímetro WT230 para situação POT0006	181
D.8	Incerteza de medição para o wattímetro WT230 para situação POT0007	181
D.9	Incerteza de medição para o wattímetro WT230 para situação POT0008	182
D.10	Incerteza de medição para o wattímetro WT230 para situação POT0009	182
D.11	Incerteza de medição para o wattímetro WT230 para situação POT0010	183
D.12	Incerteza de medição para o wattímetro WT230 para situação POT0011	183

LISTA DE SIGLAS

A/D	Analógico/Digital.
BEME	Bancada de Ensaio de Motores Elétricos.
CA	Corrente Alternada.
CC	Corrente Contínua.
DC	<i>Direct Current.</i>
DFT	Transformada Discreta de Fourier.
DI	Método de Integração Discreta.
DSP	Processamento Digital de Sinal.
FFT	<i>Fast Fourier Transform.</i>
FPGA	<i>Field Programmable Gate Array.</i>
GPIB	<i>General Purpose Interface Bus.</i>
NCM	Nomenclatura Comum do Mercosul.
PCI	<i>Peripheral Component Interconnect.</i>
PCMCIA	<i>Personal Computer Memory Card International Association.</i>
PF	Potência Fixa.
PWM	<i>Pulse Width Modulation.</i>
RF	Rotação Fixa.
THD	Taxa de Distorção Harmônica.
UPS	<i>Uninterruptible Power Supply.</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	27
1.1	Contextualização	27
1.2	Objetivo do trabalho	28
1.3	Estrutura da dissertação	29
2	BANCADA DE ENSAIO	31
2.1	Descrição da bancada	31
2.2	Caracterização dos corpos de prova	34
2.2.1	Motores de corrente contínua com escovas	34
2.2.2	Motores de corrente contínua sem escovas	36
2.2.3	Conversor de frequência ou unidade de controle dos motores	37
3	DEFINIÇÕES, EQUAÇÕES E MÉTODOS PARA MEDIÇÃO DE POTÊNCIA ELÉTRICA	41
3.1	Distorção harmônica	41
3.2	Potência ativa	42
3.2.1	Potência ativa monofásica	42
3.2.2	Potência ativa trifásica	45
3.3	Fator de potência	48
3.4	Distorção harmônica total	49
3.5	Métodos para medição de potência ativa trifásica	50
3.5.1	Método dos dois wattímetros	51
3.5.2	Método dos três wattímetros	53
3.6	Conclusão acerca das definições e métodos de medição	54
4	ALTERNATIVAS USUAIS PARA MEDIÇÃO DE POTÊNCIA ELÉTRICA	57
4.1	Analisadores de potência baseados em processamento digital de sinais	57
4.2	Análise teórica de transdutores para um sistema proprietário	61
4.2.1	Resistor <i>shunt</i>	62
4.2.2	Transdutor de corrente de efeito Hall	63
4.2.3	Bobina de Rogowski	66
4.2.4	Transdutores de corrente CT	68
4.2.5	Divisor resistivo de tensão	72

4.2.6	Transdutor de tensão CV	74
4.3	Conclusão acerca das alternativas para medição de potência elétrica	74
5	ANÁLISE EXPERIMENTAL DOS ESPECTROS DE FREQUÊNCIA	77
5.1	Objetivo	77
5.2	Avaliação dos equipamentos disponíveis	77
5.2.1	Placa de aquisição	78
5.2.2	Oscilógrafo DL750	79
5.3	Método empregado	81
5.4	Resultados	84
5.4.1	Análise EC45 (shunt) x EC60 (shunt)	87
5.4.2	Análise EC60 (ponteira) x EC60 (shunt)	92
5.5	Conclusões acerca da análise experimental dos espectros de frequências	94
6	ANÁLISE DA MEDIÇÃO DE POTÊNCIA NA BANCADA EM QUESTÃO	97
6.1	Determinação das condições de contorno	97
6.1.1	Determinação dos requisitos	97
6.1.2	Escolha do método de medição	100
6.1.3	Escolha do tipo de instrumento ou sistema de medição	100
6.2	Alternativas comerciais de wattímetros eletrônicos	102
6.2.1	Wattímetro WT1600	103
6.2.2	Wattímetro WT3000	103
6.2.3	Wattímetro PZ4000	104
6.2.4	Analizador de potência LMG500	104
6.3	Análise da incerteza de medição através de simulação	107
6.3.1	Simulação sem conteúdo harmônico	107
6.3.2	Simulação com conteúdo harmônico	112
6.4	Comparação experimental entre dois wattímetros	117
6.5	Conclusão acerca da medição da potência elétrica	131
7	CONSIDERAÇÕES FINAIS	135
7.1	Conclusões	135
7.2	Sugestões para trabalhos futuros	138
	REFERÊNCIAS	141
	Apêndice A – Espectro nas frequências harmônicas	149

Apêndice B – Tabelas com cálculo da potência ativa e erro de medição . .	151
B.1 Tabelas com cálculos para wattímetro PZ4000	151
B.2 Tabelas com cálculos para wattímetro WT3000	158
B.3 Tabelas com cálculos para wattímetro LMG500	165
Apêndice C – Tabela com os resumos das simulações	173
Apêndice D – Tabelas com cálculo da potência ativa e erro de medição .	177
Apêndice E – Reprodutibilidade para motor EC45	185
Apêndice F – Reprodutibilidade para motor EC60	193

1 INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização

A grande maioria dos compressores herméticos de refrigeração é constituído de um sistema mecânico alternativo, biela manivela, um motor elétrico rotativo, e um sistema de proteção contra sobrecarga. Os motores de indução ainda são os mais amplamente utilizados na tarefa de acionar o compressor. No entanto, nas últimas décadas cresceu a utilização de outras máquinas, como as que utilizam ímãs permanentes de alta energia. Um dos fatores que contribui para a utilização desses ímãs é que nos últimos tempos eles passaram a apresentar um custo mais acessível. O fornecimento em escala industrial de aço elétrico também ajudou na disseminação na demanda por esses motores [1]. Outro fator que tornou esses motores promissores foi o desenvolvimento tecnológico da eletrônica de potência, onde se popularizou a utilização de circuitos eletrônicos no acionamento dessas máquinas [2]. Com a possibilidade de acionamento a partir desses circuitos de potência, há uma diminuição no consumo de energia dos compressores já que há a possibilidade do controle de rotação do motor e, conseqüentemente, da capacidade de refrigeração. A economia de energia pode chegar a 40% em comparação a um sistema convencional [3].

O conjunto máquina de ímã permanente e unidade de controle, faz com que esses motores possam ser projetados para alcançarem altas rotações e altos rendimentos, permitindo também a redução no consumo de energia. Além de possibilitarem um menor consumo, essas máquinas tornam possível uma diminuição dos custos, decorrendo do fato de que em altas rotações o motor elétrico e, conseqüentemente, o dispositivo que o aciona se tornam menores para uma mesma potência, resultando em um menor volume de matéria-prima necessário para a sua produção.

Para o desenvolvimento de tais máquinas, há a necessidade do conhecimento, da caracterização e da determinação de inúmeras grandezas bem como do parâmetro rendimento, sendo esse último de grande relevância na avaliação de máquinas elétricas. O rendimento auxilia tanto os especialistas desenvolvedores na determinação das características de projeto, quanto os fabricantes na determinação dos dados técnicos que serão apresentadas nos manuais, e também os consumidores finais que levarão em conta essas características na avaliação para sua aplicação.

Nesse contexto, este trabalho vem agregar na pesquisa da medição da grandeza potência elétrica – necessária para a determinação do rendimento de

tais motores.

Assim, no âmbito de projeto de pesquisa, financiado pela FINEP e apoiado pela empresa líder mundial no mercado de refrigeração para compressores de refrigeração, foi contemplado o desenvolvimento de uma bancada para ensaios de motores de alta rotação e baixo torque. Em dissertação anterior, Souza Neto [4] realizou o desenvolvimento dessa bancada (especificação do hardware e desenvolvimento do software de controle e automação do ensaio), bem como garantiu a medição da potência mecânica com baixos níveis de incerteza, na ordem de 0,34% da faixa de medição, considerado um excelente resultado. Para completar os requisitos do projeto, a investigação acerca da medição de potência elétrica é o objeto de estudo deste trabalho.

1.2 Objetivo do trabalho

O objetivo geral deste trabalho é a caracterização e a medição do sinal de potência elétrica, com baixa incerteza, em motores do tipo *brushless*, para avaliação do rendimento.

Sabe-se que esse sinal possui um elevado conteúdo harmônico devido ao chaveamento característico do acionamento realizado pelo conversor de frequência. No entanto, se desconhece as características com que essas harmônicas ocorrem. Como por exemplo, se são significativas na avaliação da potência elétrica, quais suas amplitudes, em quais frequências essas harmônicas são significativas e as parcelas de influência que essas harmônicas exercem no sinal de tensão e no sinal de corrente.

Para alcançar o objetivo geral deste trabalho definiu-se os seguintes objetivos específicos:

- estudar as características dos motores a serem testados;
- analisar o espectro de frequência dos sinais de tensão e corrente;
- realizar análise das possibilidades existentes no mercado para medição de potência elétrica;
- avaliar a viabilidade de utilização de transdutores de corrente e tensão para medição da potência;
- especificar e adquirir sistema de medição de potência elétrica;
- realizar avaliação metrológica utilizando o sistema de medição especificado.

1.3 Estrutura da dissertação

Esta dissertação está estruturada em 7 capítulos, divididos conforme segue.

O capítulo 2 apresenta uma breve descrição da bancada de ensaio onde foram realizadas as medições inerentes a esta dissertação, além de apresentar o resultado do estudo dos corpos de prova e da unidade de controle dos motores.

No capítulo 3 são colocadas as definições, equações e métodos de medição de potência elétrica necessárias para o desenvolvimento deste trabalho.

Já no capítulo 4 é realizado o levantamento das alternativas usuais para realização desta medição dentro de um universo que atenda à necessidade de medição da bancada.

A análise experimental do espectro de frequência de tensão e corrente está relatada no capítulo 5, onde é descrito o objetivo da realização de tal análise, o equipamento utilizado, o método empregado e os resultados alcançados.

O capítulo 6 apresenta o levantamento das condições de contorno, como a determinação dos requisitos, a escolha do método e do instrumento ou sistema de medição, além da análise das alternativas comerciais de wattímetros comerciais adequados para a aplicação. Em seguida é apresentada a seleção da alternativa mais adequada e a análise metrológica através de simulação do sistema proposto, além da comparação experimental entre dois sistemas comerciais para medição de potência elétrica.

Encerando, no capítulo 7 são expostas as conclusões destacando as principais dificuldades e vantagens relacionadas ao desenvolvimento deste trabalho e a relevância dos resultados alcançados. Por fim são apresentadas as propostas para trabalhos futuros.

2 BANCADA DE ENSAIO PARA DETERMINAÇÃO DO RENDIMENTO EM MOTORES DO TIPO *BRUSHLESS*

Para o desenvolvimento deste trabalho, que tem por objetivo a determinação da potência elétrica, foi utilizado a Bancada de Ensaio de Motores Elétricos (BEME) (figura 2.1) desenvolvida no próprio LIAE¹.

A BEME tem por função a aquisição dos sinais de torque e rotação para a determinação da potência mecânica e a aquisição dos sinais de tensão e corrente para a medição da potência elétrica. Sendo assim, capaz de determinar o rendimento dos motores em teste.

Nas próximas seções serão apresentados os principais instrumentos e equipamentos que fazem parte da bancada.

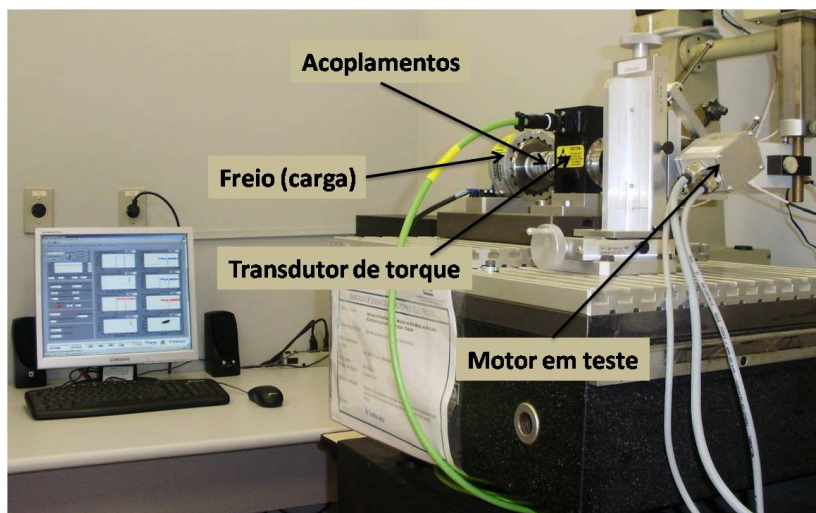


Figura 2.1: Bancada de ensaio de motores elétricos

2.1 Descrição da bancada

O diagrama de blocos da figura 2.2 apresenta, de maneira esquemática, todos os sistemas de medição e acionamentos utilizados na BEME.

¹Laboratório de Instrumentação e Automação de Ensaios Aplicados à Refrigeração - Divisão do Laboratório de Metrologia e Automação da UFSC (Labmetro)

Basicamente fazem parte da bancada um sistema *in-line* constituído do motor em teste, transdutor de torque e freio de histerese conectados por acoplamentos de alto desempenho. Para o acionamento do motor se tem o conversor de frequência e, para alimentação dos equipamentos, as fontes de alimentação. A BEME conta também com um sistema de medição de temperatura, unidade de aquisição de processamento de sinais (placas de aquisição e computador de mesa) e um sistema de medição de potência elétrica trifásica, objeto de estudo deste trabalho. Mais detalhes dos instrumentos e equipamentos são apresentados a seguir.

Na medição de torque é utilizado um transdutor de torque *in-line* de princípio indutivo capaz de medir essa grandeza sem contato mecânico, apresentando ainda alta resposta dinâmica, que é um requisito imprescindível. Para medição da rotação, a bancada possui um encoder digital encapsulado junto ao transdutor de torque que produz 60 pulsos por revolução. Na medição de rotação, com o trabalho desenvolvido na dissertação anterior [4], chegou-se ao estado da arte na medição dessa grandeza sendo que a incerteza de medição está na ordem de 0,0000022% da faixa de medição. Como carga mecânica é utilizado um freio magnético de histerese alimentado por uma fonte de corrente de alta resolução para um melhor controle da carga aplicada ao sistema. Os seguintes componentes: motor em teste, transdutor de torque e carga mecânica encontram-se alinhados e são ligados por acoplamentos do tipo *double flex* [5] que são capazes de admitir desalinhamentos angulares, axiais e radial, dentro do que o fabricante especifica, absorvendo assim possíveis vibrações. A BEME conta ainda com um sistema de medição de temperatura utilizando transdutores do tipo Pt100 e um sistema de condicionamento de sinal baseado no princípio desenvolvido por Karl Anderson [6], [7]. Para aquisição dos dados e controle do sistema, é utilizada uma placa de aquisição (PCI) da *National Instruments* baseada na tecnologia (FPGA), que são dispositivos com portas lógicas desconectadas o que permite gravar as rotinas de aquisição e condicionamento de sinal em hardware. Essa placa de aquisição realiza a aquisição de dados em modo simultâneo e possui um contador na ordem de 100 MHz. Para o controle das fontes de alimentação da carga mecânica e do conversor de frequência e para a transferência e controle de dados do wattímetro foi utilizada uma placa PCI, também da *National Instruments*, responsável pela interface de comunicação (GPIB) entre esses equipamentos.

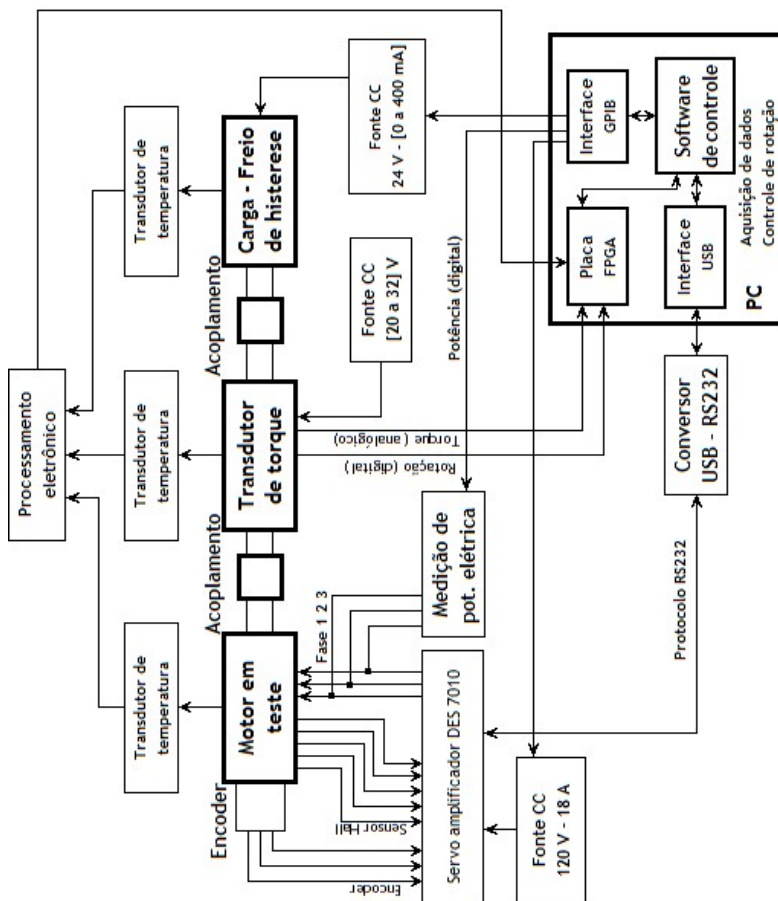


Figura 2.2: Diagrama esquemático da bancada

As características do motor em teste, assim como da unidade de controle, que são os objetos de estudo deste trabalho, serão detalhadamente exploradas nas próximas seções. Já as análises correspondentes ao wattímetro são feitas em capítulos posteriores.

2.2 Caracterização dos corpos de prova

O entendimento do princípio de funcionamento, das características de acionamento e do comportamento das máquinas em teste é essencial para o desenvolvimento deste trabalho.

Muita confusão existe sobre a classificação desses motores, já que são chamados de máquinas (CC) pelo fabricante, e no entanto, são alimentados por uma corrente senoidal trifásica defasadas 120° elétricos. A denominação motores sem escovas ou motores CC sem escovas é utilizada frequentemente para se referir a uma máquina síncrona (CA) de ímã permanente devido à similaridade entre as características de rotação *versus* conjugado e também devido a esses motores serem um motor CC virado as avessas, em que o enrolamento de campo está no rotor e a armadura comutada eletronicamente pelo sensor de posição e por interruptores conectados aos seus enrolamentos [8].

Devido às semelhanças com uma máquina CC cabe dizer então, segundo [9] que há dois tipos principais de motores de corrente contínua; os motores CC com escovas – *brushed (DC)* e os motores CC sem escovas – *brushless DC* e serão apresentados a seguir.

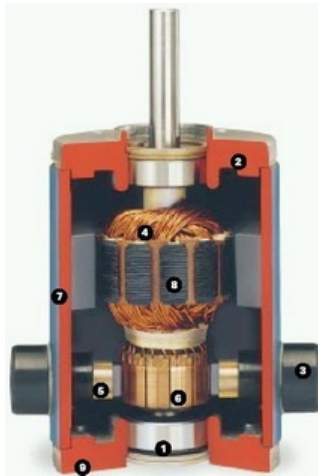
2.2.1 Motores de corrente contínua com escovas

Os motores CC com escovas apresentados em [8], [10], [11] têm quatro partes principais: estator ou enrolamento de campo; rotor ou enrolamento da armadura; anel comutador; e escovas, como pode ser observado na figura 2.3.

O estator (7) pode ser constituído de um ímã permanente ou de um enrolamento envolto em um material ferromagnético. Esse tem por função produzir um campo magnético fixo que irá interagir com o campo da armadura.

O rotor (8) ou armadura é a parte girante montada sobre o eixo da máquina, constituído de um material ferromagnético envolto por um enrolamento (enrolamento da armadura).

O anel comutador (6), construído de um material condutor e segmentado por um material isolante, também fixo ao eixo da máquina é responsável



Legenda:

- 1 – rolamento
- 2 – tampa frontal
- 3 – acesso a troca das escovas
- 4 – enrolamento do rotor
- 5 – escova
- 6 – anel comutador
- 7 – estator
- 8 – rotor
- 9 – tampa traseira

Figura 2.3: Motor de corrente contínua [12]

por realizar a inversão do sentido das correntes fechando o circuito entre cada uma das bobinas do enrolamento da armadura e as escovas no momento adequado.

As escovas (5) são peças de carvão responsáveis por transmitir a energia de alimentação ao enrolamento do rotor.

O princípio básico de funcionamento do motor CC com escovas se dá pela aplicação de uma tensão elétrica tanto aos enrolamentos de campo (quando este não é constituído por ímãs permanentes) quanto aos enrolamentos da armadura. Ao se aplicar uma tensão ao enrolamento da armadura, através do anel comutador, uma corrente irá circular por esse enrolamento o que conseqüentemente produzirá um campo magnético no rotor. Da mesma forma no enrolamento do estator haverá uma intensificação do campo magnético devido a essa tensão aplicada, porém esse campo permanece fixo em todo o instante de funcionamento da máquina, e assim produzindo pólos magnéticos – norte e sul – por toda e extensão do estator. Sendo aplicada uma tensão elétrica simultaneamente nos enrolamentos da armadura e de campo quando a máquina está parada, haverá uma interação entre os campos magnéticos produzidos e os pólos sul do rotor tentarão se alinhar aos pólos norte do estator e, caso não estejam alinhados, surgirá um binário de forças que produzirá um torque no eixo, fazendo girar o eixo do motor. No entanto, ao girar o eixo, o anel comutador gira junto e inverte a tensão nos

enrolamentos da armadura invertendo o sentido da corrente e consequentemente mudando o sentido do campo magnético produzido e como o campo do estator continua fixo, aparecerá novamente um binário de força fazendo o eixo girar e mantendo assim o movimento da máquina.

2.2.2 Motores de corrente contínua sem escovas

O motor de corrente contínua sem escovas é semelhante ao motor CC com escovas descrito acima. Uma das diferenças é que, no caso do motor utilizado na bancada, o ímã permanente encontra-se no rotor como pode ser observado na figura 2.4. Já no motor CC com escovas o ímã permanente é construído no estator. Outra diferença é que o comutador mecânico e as escovas são substituídos por um circuito eletronicamente comutado.

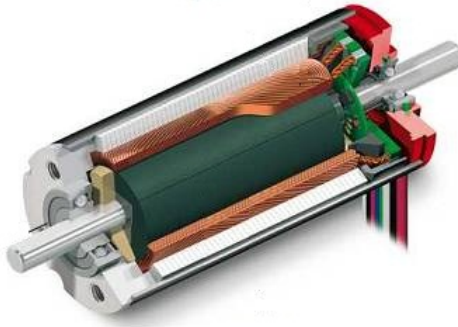


Figura 2.4: Motor CC sem escovas [13]

Por apresentarem o mesmo princípio de funcionamento dos protótipos que irão ser ensaiados na BEME, dois motores do fabricante Maxon foram selecionados. Esses motores são constituídos por um rotor onde sobre o eixo é fixado o ímã permanente de neodímio com um par de pólos como está indicado na figura 2.5. O campo magnético do rotor interage com o campo magnético do estator criado através das correntes que circulam pelas bobinas, assim gerando torque. Há para esses motores três modos de comutação: comutação em bloco, comutação sem sensor e comutação senoidal.

Na **comutação em bloco**, sensores de efeito Hall (figura 2.5) estão dispostos com uma defasagem de 120° uns dos outros fazendo com que a forma de onda da corrente e da tensão tenha um formato de blocos. Nesse modo de comutação há *ripple* de torque, que chega a ser de 14%.

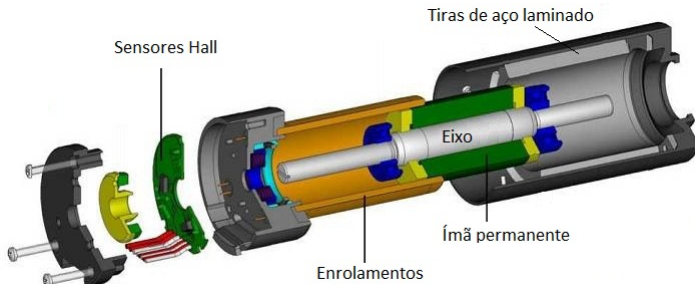


Figura 2.5: Motor Maxon vista explodida. Adaptado de [13]

A **comutação sem sensor** ou *sensorless* utiliza a progressão da tensão induzida para determinar a posição do rotor. O cruzamento por zero da tensão induzida é avaliado por um circuito eletrônico e só depois de uma velocidade, dependente de uma pausa, (30° depois da tensão induzida passar por zero) é comutada a corrente do motor. Como na comutação em bloco, o *ripple* de torque pode ser de 14%, com a vantagem do custo ser reduzido pela ausência de sensores neste modo.

Através da utilização de um encoder digital a **comutação senoidal** possibilita um acionamento suave, mesmo em baixas rotações, pelo fato de se obter uma resolução muito maior que utilizando os sensores Hall, por exemplo. Nesse modo de comutação, segundo o fabricante [14], não há *ripple* perceptível de torque. Como deseja-se que o acionamento seja feito de maneira suave e com o mínimo *ripple* de torque possível foi acoplado um encoder digital da própria Maxon ao eixo dos motores.

Para abranger toda a faixa de operação desejada para a BEME, foram adquiridos dois motores *brushless* do fabricante Maxon (modelo EC60 e modelo EC45), cujo as principais características são apresentadas na tabela 2.1.

2.2.3 Conversor de frequência ou unidade de controle dos motores

A unidade de controle, ou também conversor de frequência, é o equipamento que utiliza a eletrônica de potência para acionar os motores da BEME de acordo com um sinal de referência fornecido pelos sensores do motor.

A nomenclatura utilizada para denominar o circuito eletrônico que realiza o controle da frequência rotacional e torque dos motores *brushless* é bastante diversificada. Na indústria normalmente esses dispositivos são cha-

Tabela 2.1: Principais características dos motores Maxon selecionados

Parâmetros	Maxon EC60	Maxon EC45
Tensão nominal [V]	48	24
Corrente nominal [A]	5,85	8,45
Corrente de partida [A]	46,4	78
Potência nominal [W]	400	150
Constante de torque [mN.m/A]	147	21,4
Máxima frequência rotacional [rpm]	7000	15000
Máxima temperatura de bobina [°C]	+ 125	+ 125
Número de par de pólos	1	1
Número de fases	3	3

mados de inversores de frequência, dado a tradução do inglês para as palavras *frequency inverters*. Outras denominações também são utilizadas, como por exemplo, servo amplificador, servo conversor ou servoacionamento. No entanto, pelo fato do nome inversor de frequência estar estreitamente relacionado ao circuito eletrônico utilizado no acionamento de motores de indução e as outras denominações não serem tão comuns, neste trabalho utilizou-se conversor de frequência para se referir ao circuito eletrônico de acionamento dos motores *brushless*. Este termo é o adotado pela Nomenclatura Comum do Mercosul (NCM) [15].

Assim, o conversor de frequência utilizado é do fabricante Maxon, modelo DES 70/10 (figura 2.6). Este conversor de frequência é de comutação senoidal com entradas para sensores Hall e encoder. Os sensores Hall são utilizados na detecção da posição angular do rotor na partida do motor, já o encoder para se ter uma comutação suave (com *ripple* de torque reduzido) devido a alta resolução do mesmo. O esquema de ligação pode ser visto na figura 2.7, onde o objetivo é a visualização das conexões necessárias para o funcionamento do motor.

O primeiro passo para seleção de um conversor de frequência é a observação da potência solicitada pelos motores. Os conversores de frequência tipicamente apresentam os dados da corrente nominal e da corrente de partida como pode ser visto na tabela 2.2. A corrente máxima ou de pico é solicitada nas acelerações e desacelerações ou nos transientes de carga, não mais que alguns segundos. A tensão e a corrente nominais são determinadas a partir da tensão máxima exigida pelo motor, da corrente máxima e



Figura 2.6: Conversor de frequência Maxon DES 70/10 [16]

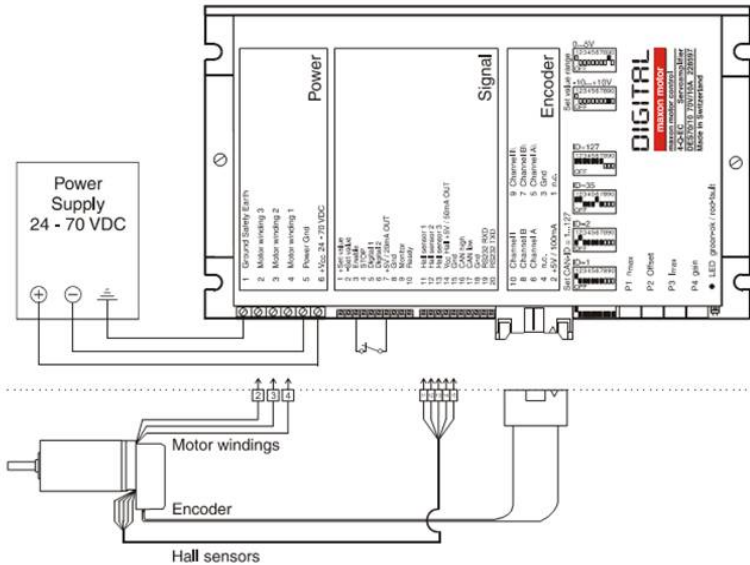


Figura 2.7: Esquema de ligação do conversor de frequência Maxon DES 70/10 [16]

da corrente nominal. No entanto, ainda assim é recomendado selecionar um conversor de frequência com uma tensão nominal, ao menos 20% superior à máxima tensão exigida pela carga a fim de evitar que oscilações na tensão de alimentação influenciem na alimentação da carga [9].

Apesar da corrente de partida dos motores selecionados ser bastante elevada (tabela 2.1), ultrapassando a corrente máxima fornecida pelo conversor de frequência, devido a característica do acionamento em rampa, a corrente de partida não será exigida, já que somente se o motor partir à tensão nominal e com carga máxima que essa corrente será solicitada.

Outro dado que requer atenção é quanto a frequência de chaveamento que é da ordem de 50 kHz, produzindo assim harmônicas de tensão e corrente em frequências elevadas.

Tabela 2.2: Principais características do conversor de frequência selecionado

Parâmetros	Maxon DES 70/10
Tensão de operação (CC)	(24 a 70) V
Máxima tensão de saída	$0,9 \times V_{aliment.}$
Máxima corrente de saída	30 A
Corrente de saída nominal	10 A
Máxima potência de saída	700 W
Frequência de chaveamento	50 kHz
Máximo rendimento	92%
Máxima rotação	25000 rpm
Reatância por fase do motor	mínima indutância 400 μ H

Apresentada a BEME e as características dos motores e do conversor de frequência selecionados, será apresentado no próximo capítulo o equacionamento necessário para a compreensão e desenvolvimento das soluções para o problema da medição da potência elétrica. Essa medição é dificultada pela alta distorção harmônica [17] em ambos os sinais, tensão e corrente e, como visto anteriormente nas especificações do conversor de frequência, mais crítica ainda por apresentar distorções em frequências bastante elevadas, acima de 50 kHz.

3 DEFINIÇÕES, EQUAÇÕES E MÉTODOS PARA MEDIÇÃO DE POTÊNCIA ELÉTRICA

Com a análise das características elétricas do conversor de frequência selecionado como objeto de estudo, especial atenção deve ser dada ao fato de que estão envolvidos na medição sinais com elevado nível de distorção harmônica.

Para o desenvolvimento da solução para medição das grandezas envolvidas neste trabalho, o conhecimento teórico correspondente aos conceitos, equacionamento e métodos devem estar bem consolidado. Assim, neste capítulo estão apresentados os conceitos e equações acerca da distorção harmônica, potência ativa monofásica e trifásica, fator de potência e distorção harmônica total. Os métodos de medição para um sistema trifásico também são descritos neste capítulo.

3.1 Distorção harmônica

O termo harmônica, tem origem na acústica, onde é relacionada a vibração de um cordão ou uma coluna de ar à uma certa frequência múltipla da frequência de base [18]. Em um sistema CA, uma componente harmônica é definida como a componente senoidal de uma forma de onda periódica que possui frequência igual a um inteiro múltiplo da frequência fundamental. Assim:

$$f_h = (h) \times (\text{frequência fundamental})$$

Da mesma forma uma onda distorcida pode ser representada como a superposição de uma frequência fundamental com outras formas de onda de diferentes frequências harmônicas e amplitudes.

Até algumas décadas atrás as cargas eram apenas lineares, ou seja, cargas que consumiam apenas sinais de corrente e tensão senoidais. Como exemplo de cargas lineares têm-se os motores elétricos, lâmpadas incandescentes, aquecedores elétricos entre outras e para essas cargas, as equações de potência média, reativa e aparente, supriam todas as necessidades. No entanto, com o surgimento da eletrônica de potência, tornou-se comum a utilização de circuitos eletrônicos no acionamento e controle de máquinas, como os retificadores e inversores de frequência, as fontes chaveadas, lâmpadas fluorescentes, (UPS) ou *no breaks*, entre outras. Essas cargas não lineares introduziram nos sistemas de potência distorções nas formas de onda de tensão e corrente [19].

No lado da rede de energia as distorções são causadas pelo retificador que insere descontinuidades na corrente exigida. Já do lado do motor, a tensão CC chaveada apresenta elevado conteúdo harmônico pela ação do (PWM) [20], assim sendo necessária a reformulação das equações que consideravam apenas formas de onda senoidais. Tais equações e considerações estão descritas a seguir.

3.2 Potência ativa

A potência ativa, ou real, é assim chamada por ser a potência que realiza trabalho sendo, no caso deste trabalho, a energia elétrica entregue ao motor onde é transformada em energia mecânica.

Quando trata-se de sinais que apresentam distorções, o termo potência ativa total vem sendo usado para se referir ao que anteriormente se chamava apenas de potência ativa [21]. Esse termo, segundo o IEEE Standard Definition 1459-2000 [22] define que além da potência ativa fundamental existe a potência ativa harmônica, que seria o somatório de todas as potências distorcidas [21].

A carga a ser medida na BEME são motores *brushless* trifásicos. No entanto, para preservar a sequência lógica do desenvolvimento das equações para o cálculo de potência elétrica, é apresentado o desenvolvimento das equações para um sistema monofásico e em seguida as definições para um sistema trifásico.

3.2.1 Potência ativa monofásica

Iniciando o desenvolvimento do equacionamento, tem-se que um sinal de tensão e corrente puramente senoidais em função do tempo podem ser expressado como sendo [23]:

$$v = V_m \cos(\omega t + \theta_v)$$

$$i = I_m \cos(\omega t + \theta_i)$$

onde:

V_m : é o valor da amplitude da tensão[V];

I_m : é o valor da amplitude da corrente[A];

ω : é a frequência angular $2\pi f$ [rad/s];

f : é a frequência [Hz];
 θ_v : é o ângulo de fase da tensão [rad];
 θ_i : é o ângulo de fase da corrente [rad];
 t : é o tempo [s].

Já a potência instantânea, em watts [W], é definida como sendo [23]:

$$p = vi \quad (3.1)$$

onde:

v e i são a tensão e a corrente instantânea, respectivamente.

Quando substituídos os valores de v e i na equação 3.1 tem-se [23]:

$$p = V_m I_m \cos(\omega t + \theta_v - \theta_i) \cos \omega t \quad (3.2)$$

Se utilizadas as identidades trigonométricas

$$\cos \alpha \cos \beta = \frac{1}{2} \cos(\alpha - \beta) + \frac{1}{2} \cos(\alpha + \beta)$$

$$\cos(\alpha + \beta) = \cos \alpha \cos \beta - \text{sen} \alpha \text{sen} \beta$$

tem-se:

$$\begin{aligned}
 p = \frac{V_m I_m}{2} \cdot \cos(\theta_v - \theta_i) + \frac{V_m I_m}{2} \cdot \cos(\theta_v - \theta_i) \cos 2\omega t - \\
 - \frac{V_m I_m}{2} \cdot \text{sen}(\theta_v - \theta_i) \text{sen} 2\omega t
 \end{aligned} \quad (3.3)$$

Também se pode escrever a equação 3.3 da seguinte forma [23]:

$$p = P + P \cos 2\omega t - Q \text{sen} 2\omega t \quad (3.4)$$

onde:

$$P = \frac{V_m I_m}{2} \cdot \cos(\theta_v - \theta_i), \quad (3.5)$$

$$Q = \frac{V_m I_m}{2} \cdot \text{sen}(\theta_v - \theta_i) \quad (3.6)$$

Em que:

P : potência ativa;

Q : potência reativa.

Como o valor potência média não depende do fato de a tensão estar atrasada ou adiantada em relação à corrente, pois $\cos(-\alpha) = \cos \alpha$, se pode fazer θ igual a $|\theta_v - \theta_i|$, ou seja, se pode reescrever a equação 3.5 [23] como sendo:

$$P = \frac{V_m I_m}{2} \cdot \cos \theta \quad (3.7)$$

Pode-se também expressar a potência média ou potência real considerando que a média de uma função senoidal é a média do valor instantâneo para um período completo dividida pelo valor do período. Assim, a integral para kT períodos pode ser representada conforme a equação 3.8 [23], onde k é um número inteiro, contanto que o resultado seja dividido por kT :

$$P = \frac{1}{kT} \int_t^{t+kT} p \, dt \quad (3.8)$$

onde:

T : igual a $1/f$ períodos de medição da potência [s];

t : instante inicial da medição [s];

p : potência instantânea [W].

Como já foi dito acima, as equações expostas contemplam apenas os cálculos para sinais senoidais. Para sinais que apresentam distorções, segundo o IEEE 1459-2000 [22], a potência ativa total é calculada como a soma

da potência ativa fundamental P_1 [W] e da potência ativa harmônica P_H [W]:

$$P_T = P_1 + P_H \quad (3.9)$$

Onde a potência ativa fundamental é dada por:

$$P_1 = V_{ef,1} \cdot I_{ef,1} \cdot \cos \theta_1 \quad (3.10)$$

onde:

P_1 : potência ativa fundamental;
 $V_{ef,1}$: valor eficaz da tensão fundamental;
 $I_{ef,1}$: valor eficaz da corrente fundamental;
 θ_1 : ângulo de fase entre tensão e corrente fundamental.

e a potência ativa harmônica como sendo:

$$P_H = \sum_{h \neq 1}^{\infty} V_{ef,h} \cdot I_{ef,h} \cdot \cos \theta_h \quad (3.11)$$

onde:

P_H : potência ativa harmônica;
 $V_{ef,h}$: valor eficaz da tensão harmônica;
 $I_{ef,h}$: valor eficaz da corrente harmônica;
 θ_h : ângulo de fase harmônico.

Para um sistema trifásico, as equações são apresentadas a seguir.

3.2.2 Potência ativa trifásica

Para um sistema trifásico equilibrado, a potência ativa é definida também pela IEEE 1459-2000 como sendo:

$$P = 3 \cdot V_{ln} \cdot I \cdot \cos \theta_\phi = \sqrt{3} \cdot V_{ll} \cdot I \cdot \cos \theta_\phi \quad (3.12)$$

em que:

V_{ln} : tensão fase-neutro ou tensão de fase;

V_{ll} : tensão fase-fase ou tensão de linha;
 θ_ϕ : ângulo de fase entre a tensão e corrente de fase.

Considerando que somente em condições de laboratório é possível a geração de um sinal trifásico equilibrado, ou seja, com uma distorção de $THD_V < 0,1\%$ a mesma IEEE 1459-2000 traz que a potência ativa em um sistema desequilibrado pode ser calculado utilizando a seguinte equação:

$$P = P_a + P_b + P_c \tag{3.13}$$

em que:

$$P_a = \frac{1}{kT} \int_t^{t+kT} v_a \cdot i_a dt = V_{aln} \cdot I \cdot \cos \theta_a \quad ; \quad \theta_a = \alpha_a + \beta_a$$

$$P_b = \frac{1}{kT} \int_t^{t+kT} v_b \cdot i_b dt = V_{bln} \cdot I \cdot \cos \theta_b \quad ; \quad \theta_b = \alpha_b + \beta_b$$

$$P_c = \frac{1}{kT} \int_t^{t+kT} v_c \cdot i_c dt = V_{cln} \cdot I \cdot \cos \theta_c \quad ; \quad \theta_c = \alpha_c + \beta_c$$

em que:

P : potência ativa em um sistema trifásico desequilibrado;
 P_a : potência ativa da fase a;
 P_b : potência ativa da fase b;
 P_c : potência ativa da fase c;

v_a : tensão instantânea da fase a;
 i_a : corrente instantânea da fase a;
 V_{aln} : valor eficaz da tensão de fase a;
 I : valor eficaz da corrente de linha;
 θ_a : ângulo de fase entre tensão e corrente da fase a;

v_b : tensão instantânea da fase b;

i_b : corrente instantânea da fase b;
 V_{bln} : valor eficaz da tensão de fase b;
 I : valor eficaz da corrente de linha;
 θ_b : ângulo de fase entre tensão e corrente da fase b;

v_c : tensão instantânea da fase c;
 i_c : corrente instantânea da fase c;
 V_{cln} : valor eficaz da tensão de fase c;
 I : valor eficaz da corrente de linha;
 θ_c : ângulo de fase entre tensão e corrente da fase c.

Da equação 3.13, se vê que as equações são definidas para um sistema a quatro fios, mas para o caso de um sistema a três fios, em nota, o documento IEEE 1459-2000 descreve que: a tensão fase-neutro é definida assumindo um nó artificial que pode ser conseguido com a ajuda de três resistências idênticas conectadas em Y (estrela).

Sendo sinais distorcidos, a potência elétrica média pode ser calculada por meio da decomposição dos sinais de tensão e corrente, desde que periódicos, em uma série infinita de ondas senoidais chamada de série de Fourier [24]. Usando a série de Fourier, a tensão e a corrente nos terminais de um circuito em regime estacionário pode ser representada pelas equações 3.14 e 3.15 [23]:

$$v(t) = [V_{ef,1}\text{sen}\omega_1 t + \sum_{h=2}^{\infty} V_{ef,h}\text{sen}(h\omega_1 t + \alpha_h)] \quad (3.14)$$

$$i(t) = [I_{ef,1}\text{sen}\omega_1 t + \sum_{h=2}^{\infty} I_{ef,h}\text{sen}(h\omega_1 t + \theta_h)] \quad (3.15)$$

Em que:

$V_{ef,1}$: valor eficaz da tensão fundamental;
 $I_{ef,1}$: valor eficaz da corrente fundamental;
 $V_{ef,h}$: valor eficaz da tensão harmônica de ordem h;
 $I_{ef,h}$: valor eficaz da corrente harmônica de ordem h;
 α_h : ângulo de fase da tensão para harmônica de ordem h;
 θ_h : ângulo de fase da corrente para harmônica de ordem h;
 ω_1 é a frequência angular da fundamental.

3.3 Fator de potência

Segundo a IEEE 519-1992 [25] o fator de potência é definido de duas formas: o fator de potência de deslocamento, ou o fator de potência fundamental e o fator de potência total.

O fator de deslocamento é definido como a relação entre a potência ativa ou média e a potência aparente da carga na frequência fundamental.

$$FPD = \frac{P_1}{|S_1|} = \cos \theta_1 \quad (3.16)$$

Em que:

FPD : fator de potência de deslocamento;

P_1 : potência ativa da fundamental;

S_1 : potência aparente fundamental.

Já o fator de potência total leva em consideração a relação entre a potência ativa total e a potência aparente total entregue à carga. O fator de potência total retrata a real influência da distorção harmônica sobre as potências ativa e aparente.

$$FP = \frac{\sum_{h=1}^{\infty} V_{ef,h} \cdot I_{ef,h} \cdot \cos \theta_h}{\sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} V_{ef,h}^2} \cdot \sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} I_{ef,h}^2}} \quad (3.17)$$

Em que:

FP : fator de potência total;

$V_{ef,h}$: valor eficaz da tensão harmônica;

$I_{ef,h}$: valor eficaz da corrente harmônica;

θ_h : ângulo de fase entre a tensão e corrente harmônica.

Em nota a IEEE 1459-2000 [22], documento da IEEE recente em relação a IEEE 519-1992 [25], destaca que há ainda uma grande dificuldade na correta medição de componentes harmônicos de mais alta ordem devido à falta de equipamentos projetados para esse fim. Nessa mesma nota, no item 4, faz-se uma exceção à equação 3.17, ou seja, quando $THD_V < 5\%$ e

$THD_I > 40\%$ é conveniente se utilizar a seguinte equação:

$$FP \approx \frac{1}{\sqrt{1 + THD_I^2}} \cdot F_{P1} \quad (3.18)$$

Em que:

FP : fator de potência total;

THD_I : taxa de distorção harmônica de corrente;

F_{P1} : fator de potência fundamental.

3.4 Distorção harmônica total

Um índice muito utilizado na indústria para avaliar a distorção em sistemas elétricos é a taxa de distorção harmônica ou (THD). A IEEE 519-1992 utiliza o índice THD para delimitar a máxima distorção que um consumidor que possui muitas cargas não lineares pode causar, estabelecendo, por exemplo, que para uma rede de baixa tensão o máximo valor de distorção na tensão admitido seja de 10%.

A mesma IEEE 519-1992 define o fator, ou índice de distorção harmônica como sendo a razão entre a raiz quadrada do conteúdo harmônico e a raiz quadrada do valor da fundamental do sinal em questão, expresso em porcentagem do valor da fundamental. Como o valor rms de $v(t)$ e $i(t)$ se relacionam com os valores rms das tensões e correntes para cada harmônica da seguinte forma:

$$I^2 = I_1^2 + I_2^2 + I_3^2 + \dots \quad (3.19)$$

A taxa de distorção harmônica de tensão THD_V é usualmente expressa como:

$$THD_V\% = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} V_{ef,h}^2}}{V_1} \times 100 \quad (3.20)$$

Em que:

THD_V : taxa de distorção harmônica de tensão;

$V_{ef,h}$: valor da tensão eficaz harmônica;

V_1 : valor eficaz da tensão fundamental.

e, a taxa de distorção harmônica de corrente THD_I como:

$$THD_I\% = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_{ef,h}^2}}{I_1} \times 100 \quad (3.21)$$

Em que:

THD_I : taxa de distorção harmônica de corrente;

$I_{ef,h}$: valor da corrente eficaz harmônica;

I_1 : valor eficaz da corrente fundamental.

3.5 Métodos para medição de potência ativa trifásica

A potência elétrica ativa de um circuito é medida através dos sinais de tensão e corrente, pois como foi dito na seção 3.2, a potência instantânea é dada pelo produto da tensão e corrente, conforme equação 3.1.

O instrumento utilizado para medição de potência elétrica é o wattímetro, que na sua forma mais simples apresenta internamente um voltímetro para medição de tensão e um amperímetro para medição de corrente.

Ainda utilizado, porém tornando-se obsoleto, o wattímetro analógico por muitos anos foi o instrumento mais empregado para a medição da potência elétrica [26]. Esse instrumento é constituído de uma bobina de corrente (BC) e uma bobina de tensão ou de potencial (BT) que ligadas em série e paralelo, respectivamente, apresentam o valor da potência elétrica através da deflexão de um ponteiro no seu mostrador [27]. Já era possível a escolha de faixas de tensão por meio de diferentes terminais na entrada do instrumento e os terminais de corrente eram maiores por razões de segurança e também para permitir conexão mais firmes [27].

O wattímetro, assim como outros instrumentos de medição de grandezas elétricas, evoluiu muito com o avanço da eletrônica, surgindo então, os wattímetros digitais. Esses são mais sofisticados que os analógicos por incorporar novos princípios de transdução e apresentar grande potencial de processamento e armazenamento na forma digital [27]. Em geral podem operar com formas de onda não senoidais fornecendo valores de potência total, reativa e aparente, ângulos de fase e fator de potência além de possuírem outros recursos matemáticos [27].

Em se tratando de um sistema trifásico, existem dois métodos que podem ser empregados para medição da potência elétrica utilizando o wattímetro. Os dois métodos de medição descritos a seguir se baseiam no wattímetro analógico. No entanto, o método pode ser empregado de modo geral para medição de potência elétrica em sistemas trifásicos com wattímetros digitais ou mesmo em um sistema proprietário desenvolvido para uma determinada aplicação.

3.5.1 Método dos dois wattímetros

Este método é aplicável a circuitos trifásicos a três fios Y ou Δ , equilibrados ou não, sendo os três fios de fase [26]. Pode ser aplicado em circuitos a quatro fios, no entanto, esse deve ser equilibrado, o que significa que não pode haver circulação de corrente no neutro [26]. Sendo o circuito conectado corretamente e as leituras interpretadas de maneira correta, apenas com dois wattímetros é possível inferir sobre a potência ativa trifásica total [27].

Em circuitos trifásicos a três fios, duas condições são sempre satisfeitas, ou seja [26]:

1. A soma das correntes de linha é sempre zero:

$$i_1 + i_2 + i_3 = 0 \Rightarrow i_3 = -i_1 - i_2$$

2. A soma das três tensões compostas é sempre zero:

$$v_{12} + v_{23} + v_{31} = 0$$

Onde:

$$v_{13} = v_1 - v_3 \rightarrow \text{é a tensão composta entre as fases 1 e 3;}$$

$$v_{23} = v_2 - v_3 \rightarrow \text{é a tensão composta entre as fases 2 e 3.}$$

Assim, tem-se que a expressão da potência instantânea trifásica pode ser escrita como [26]:

$$p = v_1 i_1 + v_2 i_2 - v_3 (i_1 + i_2)$$

ou como sendo:

$$p = (v_1 - v_3) i_1 + (v_2 - v_3) i_2$$

ou ainda:

$$p = v_{13} i_1 + v_{23} i_2 \tag{3.22}$$

A figura 3.1 indica a montagem a ser realizada com os dois wattímetros para obtenção de P, onde a bobina de tensão ou de potencial está em paralelo com a carga e bobina de corrente em série com cada uma das fases. Considerando o somatório vetorial entre as fases do sinal de tensão, figura 3.2, cada wattímetro indicará [26]:

$$W_1 = V_{13}I_1 \cos(30^\circ - \theta) \tag{3.23}$$

$$W_2 = V_{23}I_2 \cos(30^\circ + \theta) \tag{3.24}$$

A potência total ativa para o método dos dois wattímetros é:

$$P = W_1 + W_2 \tag{3.25}$$

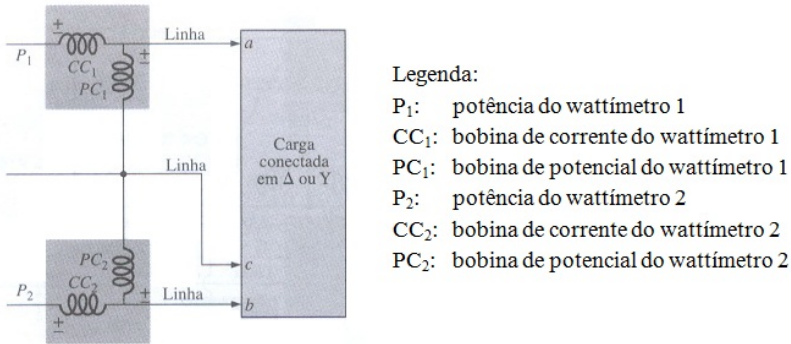


Figura 3.1: Método dos dois wattímetros conectado a carga Y ou Δ [27]

Sobre as equações 3.23 e 3.24, tem-se que [27]:

1. Se o fator de potência for maior que 0,5, as leituras dos dois wattímetros serão positivas;
2. Se o fator de potência for igual a 0,5, a leitura de um dos wattímetros será zero;
3. Se o fator de potência for menor que 0,5, a leitura de um dos wattímetros será negativa;

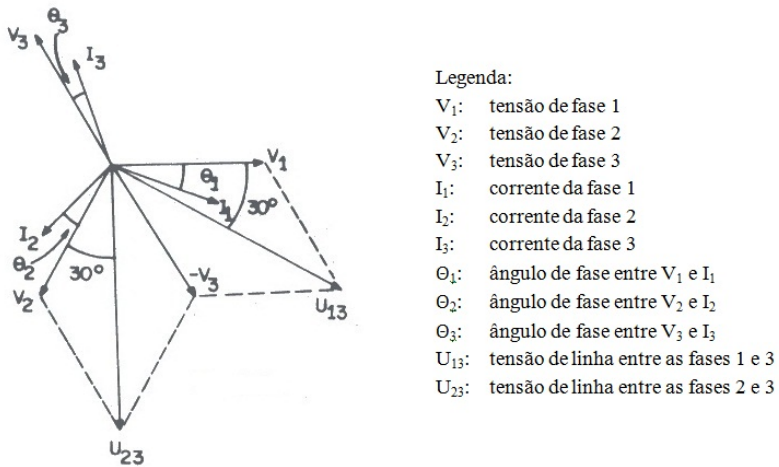


Figura 3.2: Diagrama fasorial com a representação das somas das tensões [26]

4. Se a seqüência de fases for invertida, as leituras dos dois wattímetros também serão invertidas.

Os dois wattímetros sempre darão indicações diferentes entre si, a não ser para o caso $\theta = 0$ onde se tenha $W_1 = W_2$.

3.5.2 Método dos três wattímetros

O método dos três wattímetros pode ser utilizado em cargas conectadas em Y, ou seja, circuitos trifásicos a quatro fios, equilibrado ou não.

Como definido no capítulo 3, equação 3.13, aplicando o método dos três wattímetros, como mostra a figura 3.3, tem-se que a soma das suas indicações respectivas representa a potência ativa total absorvida pela carga [26]. Cada wattímetro mede a potência fornecida a uma das fases, sendo que as bobinas de tensão estão conectadas em paralelo e as bobinas de corrente em série [27].

As indicações dos wattímetros serão:

$$W_1 = V_1 I_1 \cos \theta_1;$$

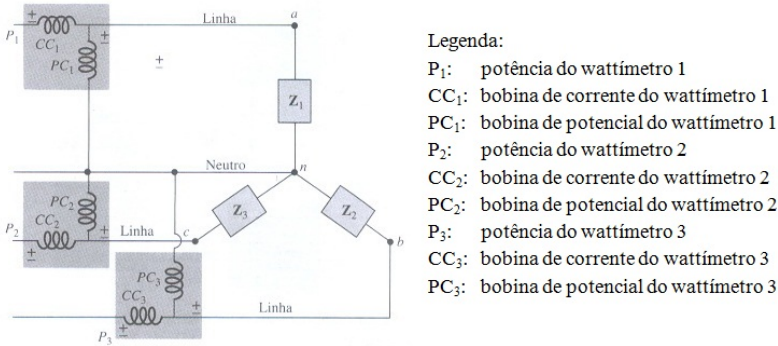


Figura 3.3: Método dos três wattímetros [27]

$$W_2 = V_2 I_2 \cos \theta_2;$$

$$W_3 = V_3 I_3 \cos \theta_3.$$

Assim, a indicação total será $W = W_1 + W_2 + W_3$, e a potência ativa total $P = W$. Se o circuito é equilibrado, como apresentado no capítulo 3, equação 3.12, pode-se empregar apenas um wattímetro e multiplicar a sua indicação por 3 para se obter a potência ativa total [26].

3.6 Conclusão acerca das definições, equações e métodos de medição de potência elétrica

O desenvolvimento das equações apresentadas é de fundamental importância para saber-se as ferramentas matemáticas necessárias para a expressão da potência elétrica em sistemas em que possa haver desbalanceamento de fase e distorções harmônicas. Para tanto foram apresentadas as definições e equações para a potência ativa em sistemas monofásico e trifásico, fator de potência e distorção harmônica total tanto da tensão quanto da corrente.

Outro ponto discutido neste capítulo foram os métodos de medição utilizando-se dois ou três wattímetros. Dependendo da forma como a carga é ligada e do equilíbrio do sistema pode-se avaliar a potência elétrica de um sistema trifásico apenas com dois wattímetros.

Na sequência, são analisadas as alternativas de medição para satisfa-

zer a necessidade de medição para solucionar o desafio proposto para este trabalho.

4 ALTERNATIVAS USUAIS PARA MEDIÇÃO DE POTÊNCIA ELÉTRICA

O resultado da medição da potência elétrica se dá pela medição dos sinais de corrente e tensão do sistema que se deseja analisar. Na sua forma mais simples, a medição pode ser feita por meio de um equipamento analógico para a medição de potência elétrica chamado wattímetro (eletrodinâmico ou térmico). Com a evolução da eletrônica, os wattímetros digitais ou analisadores de potência passaram a substituir os equipamentos analógicos pelas vantagens de processamento e diminuição dos erros de medição. No entanto, dependendo da aplicação, o desenvolvimento de um sistema específico pode ser uma opção interessante pois, pode apresentar custo final reduzido, incertezas nas faixas de medição menores, além do domínio tecnológico sobre a solução empregada [19].

Os wattímetros analógicos, depois de uma análise prévia, não são indicados para a medição dos sinais em questão por não apresentarem a capacidade de medição de sinais com conteúdo harmônico. Assim, no decorrer deste capítulo será apresentado o princípio de funcionamento do wattímetro baseado em processamento digital de sinal e também a análise de transdutores que podem ser utilizados no desenvolvimento de um sistema de medição de potência elétrica proprietário, pois esses sistemas apresentam características compatíveis com a medição a ser realizada.

4.1 Analisadores de potência baseados em processamento digital de sinais

Analisadores de potência são instrumentos projetados para medir grandezas elétricas e seus respectivos conteúdos harmônicos, além de outros parâmetros de qualidade, relacionados à energia elétrica. Em geral são coletadas amostras dos sinais de tensão e corrente para, depois de digitalizadas, serem processadas de forma discreta, sendo resultado o valor instantâneo dos sinais amostrados. O diferencial dos analisadores de potência digital está na capacidade que esses instrumentos têm de medir individualmente cada componente harmônica de um sinal. Isso os faz versáteis e de uso geral, pois além das grandezas que podem ser calculadas, os analisadores podem ser utilizados como mostradores de formas de onda, se a interface gráfica permitir.

As técnicas de processamento via amostragem digital evoluíram significativamente nos últimos anos e muito dos equipamentos hoje em dia se

baseiam nesse princípio [28]. Esse crescimento veio com a solução dos problemas relacionados às baixas velocidades e grandes incertezas de medição dos conversores analógico-digitais e da velocidade de processamento requerida para os cálculos. Esses aspectos foram contornados com o avanço tecnológico dos conversores e com as altas capacidades de processamento dos computadores existentes hoje no mercado. O processamento digital permite que cálculos complexos possam ser executados já que depois dos dados discretizados, esses ficam disponíveis para serem tratados de diferentes formas como, por exemplo, na resolução de algoritmos para análise harmônica utilizando a Transformada Discreta de Fourier (DFT) ou ainda o Método de Integração Discreta (DI) [29].

Um esquema básico de um analisador de potência pode ser visto na figura 4.1. Tal diagrama é basicamente composto de:

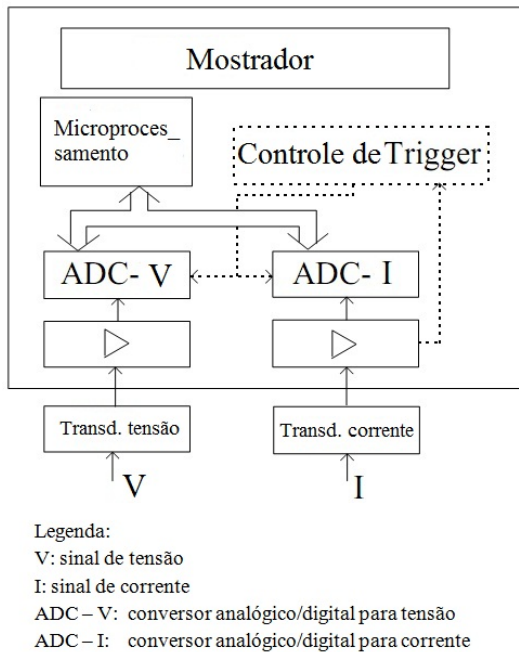


Figura 4.1: Diagrama de blocos geral de um analisador de potência. Adaptado de [29]

- Transdutor de tensão: que pode ser resistivo, capacitivo ou indutivo, usado geralmente em sinais de baixa tensão ($V < 600 V$);
- Transdutor de corrente: em geral é utilizado um resistor *shunt*, no entanto, podem ser utilizadas pontas de prova, como sondas de corrente, sendo essas pontas de prova conectadas à uma entrada externa em tensão;
- Circuitos amplificadores: utilizados no condicionamento dos sinais para mantê-los em uma faixa adequada para os conversores analógico-digital;
- Conversores analógico-digitais: tipicamente são conversores de 12 bits ou mais, sendo sua contribuição para a incerteza de medição geralmente insignificante frente às outras fontes de incerteza do equipamento quando a frequência de aquisição é maior que 20 vezes a menor frequência presente no sinal [30];
- Circuito de controle de *trigger*: responsável por manter o sincronismo entre a taxa de amostragem e a frequência do sinal a ser medido, garantindo que a razão entre o número de amostras e o número de períodos de medição seja um número inteiro;
- Microprocessamento: circuito eletrônico que tem por função o processamento dos dados depois de convertidos para a forma digital, executando cálculos e resolvendo funções matemáticas cujo resultados serão mostrados em um *display*.

O diagrama de blocos da figura 4.2 é de um equipamento comercial [31] em que observa-se basicamente os mesmos blocos do analisador da figura 4.1.

Observando o diagrama de blocos da figura 4.2, tem-se dois circuitos de medição distintos. Na parte superior, a medição do sinal de tensão e na parte inferior, a medição de corrente.

O sinal de tensão é diretamente aplicado ao terminal de tensão denominado (U, \pm) que é normalizado e amplificado pelo divisor resistivo e pelo amplificador operacional (OP AMP). Este sinal amplificado serve de entrada para o conversor A/D e para o circuito detector de cruzamento por zero.

O sinal de corrente pode ser conectado de dois modos diferentes, ou seja, diretamente na entrada denominada (I, \pm) de 5 ou 20 A, ou na entrada externa de tensão (*Current Sensor*), cujo sinal é a saída de um sensor de corrente externo. Na entrada do sensor de corrente externo, o sinal de tensão é

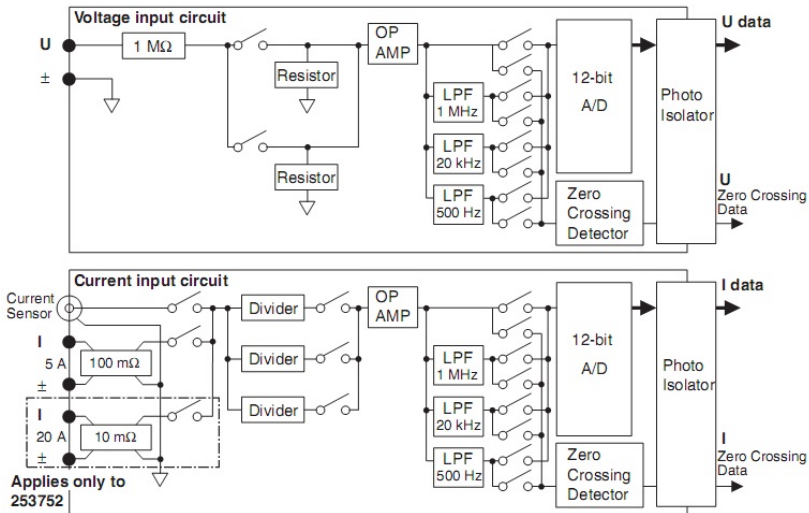


Figura 4.2: Diagrama de blocos de um analisador de potência comercial [31]

normalizado e amplificado utilizando-se um divisor de tensão e um amplificador operacional. Já na entrada direta, o fabricante [31] destaca que o sinal é convertido em tensão ao passar por um divisor de corrente para então ser normalizado como na entrada do sensor externo. A tensão normalizada é a entrada do conversor A/D e do detector de cruzamento por zero como no caso da entrada do sinal de tensão descrito anteriormente.

O conversor A/D é então responsável pela conversão dos dados amostrados de tensão e de corrente utilizando um *clock* interno. A taxa de amostragem é fixa em 5 MSa/s para o modo de medição chamado de normal e de múltiplas integrações da fonte PLL¹ para o modo de medição de harmônicas. O *clock* também pode vir de uma fonte externa sendo aplicado na entrada apropriada. No circuito ainda há um foto-isolador além de filtros passa-baixa (LPF) para condicionamento do sinal.

Outra alternativa para medição da potência elétrica é a construção de um sistema proprietário desenvolvido para atender as necessidades específicas de uma operação. Na seção seguinte, será apresentada uma análise

¹Phase Locked Loop é um modo de sincronização onde o sistema de controle gera o sinal de saída em função da fase do sinal de entrada.

teórica de transdutores de corrente e tensão que poderiam ser utilizados para a medição da grandeza em questão.

4.2 Análise teórica de transdutores de corrente e tensão para medição de potência elétrica em um sistema proprietário

Um sistema de medição, segundo o VIM [32] é um “conjunto de instrumentos de medição e outros equipamentos acoplados para executar uma medição específica”. Pode ser composto por vários módulos, como pode ser visto na figura 4.3, com funções diferentes como: transdutor, sistema de tratamento ou condicionamento de sinais, conversor A/D e o módulo de processamento de sinais.

O transdutor é o componente cujo sensor está diretamente em contato com a grandeza a ser medida. O sistema de tratamento ou condicionamento de sinais geralmente apresenta um circuito eletrônico capaz de filtrar e amplificar o sinal da grandeza medida. O conversor A/D converte o sinal da forma analógica para a forma digital, para que por último, possa ser processado e mostrado.

Em sistemas de automação de medição, muitas vezes uma parte das funções citadas está localizado em módulos de interfaceamento entre processo e computador. Nesse caso é usual que, o sistema de tratamento de sinais, além do filtro e do amplificador seja tipicamente composto também por uma unidade de isolamento elétrico de sinais, que protege a entrada do sistema de aquisição.



Figura 4.3: Módulos típicos de um sistema de medição com processamento digital [33]

Uma arquitetura bastante utilizada como solução para a medição de potência pode ser simplificada em três módulos básicos, ou seja: transdutor, unidade de condicionamento de sinais e placa de aquisição [19]. De acordo com o transdutor especificado, o sistema de condicionamento de sinal deve conter mais ou menos recursos para tornar o sinal apropriado para ser transmitido e posteriormente processado. De acordo com a estrutura da tabela 4.1, alternativas para a medição de tensão e corrente serão apresentados a seguir.

Tabela 4.1: Módulos e componentes para medição de potência elétrica

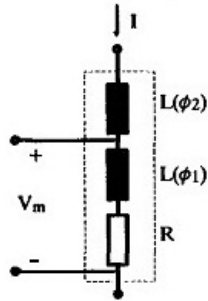
Transdutores de corrente - Resistor <i>shunt</i> - Transdutor de efeito Hall - Bobina de Rogowski - Transdutores de corrente CT	Condicionamento de sinal - Filtro - Amplificador - Isolador	Placa de aquisição
Transdutores de tensão - Divisor resistivo - Transdutores de tensão CV		

4.2.1 Resistor *shunt*

Resistores *shunts* ou derivadores resistivos, são resistores diferenciados especialmente desenvolvidos para medir corrente elétrica. Esses resistores podem ser utilizados para medir correntes CC, CA e pulsadas (transientes) que podem ir de alguns poucos ampères até milhares de ampères [34]. Seu princípio de funcionamento baseia-se na Lei de Ohm na qual através da queda de tensão em seu elemento resistivo série obtém-se um valor de corrente que é proporcional à corrente que circula no circuito principal [35]. Apesar de apresentar um excelente custo-benefício, comparado a outros transdutores de corrente [36], alguns fatores devem ser considerados na seleção desse transdutor. Um desses fatores é quanto à isolação, já que os derivadores resistivos não contam com isolação galvânica, como os transdutores de efeito Hall, por exemplo. No entanto, há na literatura relatos de técnicas adicionais para proteger o sistema quando se utilizam os resistores *shunts* [35].

Em relação à incerteza de medição quatro fatores ou fontes de incertezas devem ser consideradas e são elas: ruído térmico, deriva térmica, deriva temporal e tensão termoelétrica [19]. Outro fator que afeta a medição quando utiliza-se resistores *shunts* é a amplitude da tensão induzida devido ao fluxo acoplado ϕ_1 entre os conectores dos contatos [36]. Como a resistência do *shunt* é bastante pequena, cerca de miliohms, às vezes essa tensão induzida chega a ser comparado à queda de tensão sobre o *shunt* introduzindo ruído na medição. Na figura 4.4 está representado o circuito esquemático com a indutância intrínseca, associada ao fluxo ϕ_1 , e que está acoplado à medição, afetando a exatidão do resultado. A frequência de corte, quando a resistência

é igual à reatância é dada pela equação 4.1 [36]:



Legenda:

$L(\phi_2)$: indutância associada ao fluxo ϕ_2 fora do *loop* de medição

$L(\phi_1)$: indutância associada ao fluxo ϕ_1 pertencente ao *loop* de medição

R: resistência *shunt*

V_m : tensão medida

I: corrente principal

Figura 4.4: Circuito *shunt* com representação da indutância intrínseca [36]

$$f_c = \frac{R_{shunt}}{2\pi L(\phi_1)} \quad (4.1)$$

Onde:

f_c : é a frequência de corte;

R_{shunt} : resistência nominal do *shunt*;

$L \phi_1$: indutância intrínseca.

Assim, quanto menor a indutância intrínseca, maior a frequência de corte.

4.2.2 Transdutor de corrente de efeito Hall

Transdutores que utilizam o princípio do efeito Hall são capazes de medir diversas grandezas, como tensão, temperatura, pressão, corrente elétrica etc. Utilizando-os como sensores de corrente, esses medem tanto sinais CC quanto CA. Podem ser encontrados transdutores comerciais para

medir correntes da ordem de 4000 A. Uma das grandes vantagens desses transdutores é que eles possuem isolamento galvânica do circuito principal.

Seu princípio de funcionamento se baseia em um material condutor ou semicondutor que percorrido por uma corrente elétrica e submetido a um campo magnético transversal a essa corrente exerce uma força Lorentz sobre a mesma. Essa força ocasiona um distúrbio na distribuição da corrente no condutor, resultando em uma diferença de potencial (tensão Hall) perpendicular à ambos (corrente e campo), figura 4.5. Este princípio é conhecido como efeito Hall e foi descoberto pelo Dr. Edwin Hall em 1879 [37].

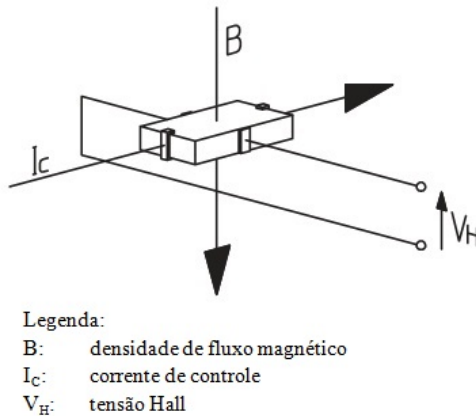


Figura 4.5: Princípio de funcionamento do sensor por efeito Hall [38]

A tensão Hall é proporcional ao produto da corrente pela densidade do fluxo magnético e inversamente proporcional à espessura da placa [38], conforme equação 4.2.

$$V_H = K \cdot \frac{B \cdot I_a}{d} \quad (4.2)$$

Onde:

V_H : tensão Hall;

K : constante do material ou coeficiente Hall;

B : densidade do fluxo magnético;

I_a : corrente que flui pela placa;
 d : espessura da placa.

Há dois tipos principais de transdutores de efeito Hall: os sem realimentação, ou *open-loop*, e os com realimentação, ou *closed-loop*.

O transdutor de efeito Hall sem realimentação pode ser visto na figura 4.6. A densidade de fluxo magnético B é gerado pela corrente primária I_p (corrente a ser medida). A corrente de controle I_c , transversal ao campo magnético, é fornecida por uma fonte de corrente constante, necessária ao funcionamento do transdutor. O toróide concentra o campo magnético sobre o elemento Hall, cuja tensão de saída é amplificada [38].

A limitação dessa configuração está na não linearidade da saída devido à saturação do núcleo toroidal, melhorando dependendo do material do núcleo e da qualidade do sensor Hall.

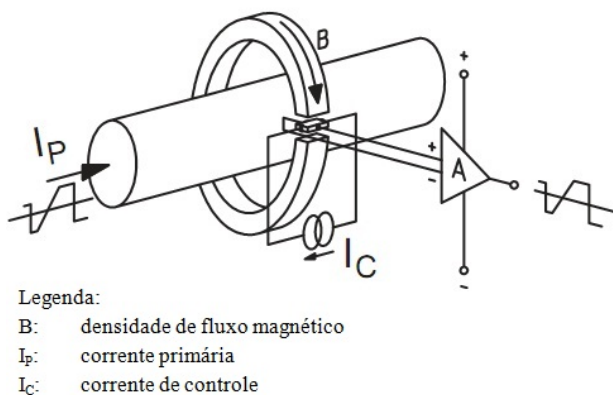


Figura 4.6: Circuito do transdutor de efeito Hall sem realimentação [38]

Na configuração com realimentação, a saída do transdutor (já amplificada) passa a ser enrolada no próprio toróide, de forma a produzir um campo magnético igual em módulo, porém oposto ao original, como pode ser visto na figura 4.7. A saída desse transdutor é um sinal de corrente de saída (I_s) proporcional a corrente primária (I_p), mas que pode ser facilmente convertido para uma saída em tensão através de um resistor de carga R_M .

Essa configuração garante que o fluxo através do toróide seja sempre próximo de zero (na prática há um pequeno fluxo de dispersão), permitindo que esse transdutor tenha uma excelente linearidade numa ampla faixa de

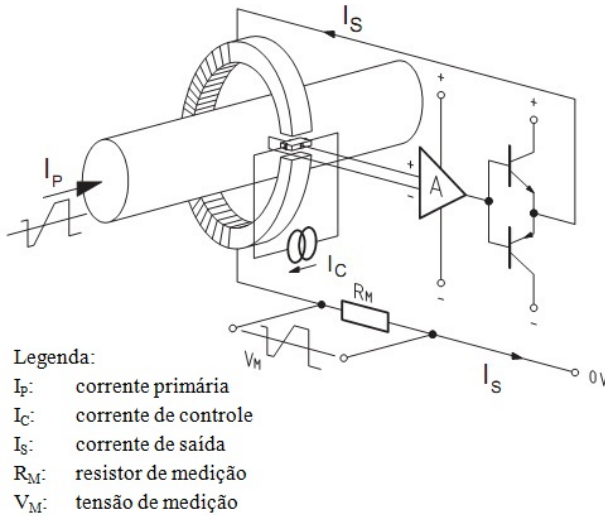


Figura 4.7: Circuito do transdutor de efeito Hall com realimentação [38]

medição.

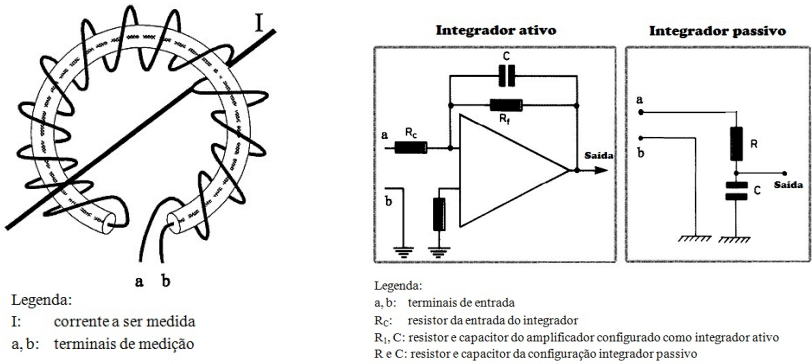
4.2.3 Bobina de Rogowski

A bobina de Rogowski é utilizada para medir corrente CA ou transientes e tem seu princípio de funcionamento baseado na aplicação da Lei de Faraday-Lenz em que por meio de uma variação do fluxo devido a corrente elétrica tem-se como resultado uma tensão induzida como saída.

Sendo composta de um núcleo toroidal não magnético, a sua saída é um sinal de tensão proporcional a variação da corrente elétrica que se deseja medir e cujo condutor está colocado no centro desse núcleo toroidal, figura 4.8(a). O campo magnético produzido pela corrente do condutor induz uma tensão $e(t)$ na bobina, que é função da indutância mútua M , produzida pela interação entre os campos magnéticos criados, e da taxa de variação da corrente di/dt que flui pelo condutor, conforme equação 4.3 [40] [41].

$$e(t) = M \frac{di(t)}{dt} \quad (4.3)$$

Onde:



(a) Modelo da bobina de Rogowski [39]

(b) Circuitos integradores [40]

Figura 4.8: Bobina de Rogowski

$e(t)$: tensão induzida;
 M : indutância mútua;
 $i(t)$: corrente no interior da bobina.

Consequentemente, a corrente é obtida através da integração do sinal de tensão, conforme equação:

$$i(t) = \int \frac{di(t)}{dt} = \frac{1}{M} \int e(t) dt \quad (4.4)$$

Assim, para se obter a corrente elétrica de saída é necessário um integrador, que por ser ativo (um circuito integrado, por exemplo) ou passivo, (um resistor e um capacitor), figura 4.8(b), ou ainda através da integração numérica em um programa de computador após a digitalização da tensão de saída [41].

Muitas das características da bobina de Rogowski resultam da sua linearidade, pois como não há um núcleo magnético, não há saturação nem o efeito da histerese. Dentre as principais características pode-se destacar [35]:

- rapidez na resposta dinâmica, ou seja, apresentam boa exatidão na medição de transientes;

- isolamento entre o circuito principal e de medição;
- medição não intrusiva, pois não há necessidade de se interromper o circuito para medição;
- calibração facilitada por ser bastante linear, podendo ser calibrada em correntes de médio valor e responder de forma confiável para valores mais elevados da faixa de medição;
- dimensões flexíveis, o que permite medir correntes em áreas restritas, onde outros dispositivos não poderiam ser utilizados;
- o custo de produção geralmente é bastante inferior aos demais transdutores de corrente.

Uma desvantagem é a dificuldade em se alcançar uma ampla faixa de frequências, pois há um conflito de restrições operacionais para utilização da mesma bobina para frequências muito baixas e também bastante elevadas. No entanto, uma combinação de integradores ativos para valores mais baixos da faixa e integradores passivos para frequências mais elevadas é sugerida como solução para o problema [42].

4.2.4 Transdutores de corrente CT

Os transdutores CT são produtos desenvolvidos e comercializados pela empresa LEM que é referência no mercado de transdutores para medição de grandezas elétricas. Da sua linha de produtos destacam-se os transdutores de corrente da série *C*, cujo tecnologia foi desenvolvida em parceria com a Universidade de Auckland – Nova Zelândia [38]. A série de transdutores *C* é baseada na tecnologia *Fluxgate*, na qual a passagem da corrente no indutor saturável é controlado pelo nível de saturação do núcleo, como será apresentado a seguir.

O princípio de funcionamento dessa tecnologia se assemelha muito à tecnologia Hall. A diferença está na maneira como o campo magnético é detectado, que no caso do transdutor de efeito Hall é utilizada uma célula Hall, e no transdutor LEM, um indutor saturável.

O indutor saturável é feito de um pequeno e fino núcleo magnético onde é enrolada uma bobina. Assim como em um indutor, o valor de sua indutância depende da permeabilidade magnética do núcleo. Quando a densidade do fluxo magnético é alta, o núcleo torna-se saturado, a sua permeabilidade diminui e a indutância decai. Se a densidade de fluxo diminuir, a

indutância aumenta seu valor, de acordo com a equação 4.5 [27]. Especialmente projetado para detectar qualquer mudança de campo magnético, este se torna sensível ao campo externo criado pela corrente I_p (a ser medida). Outro fator que altera o valor da indutância é o fluxo provocado pela corrente I_{si} , injetada no indutor saturável, conforme figura 4.9.

$$L = \frac{N^2 \cdot \mu \cdot A}{l} \quad (4.5)$$

Onde:

L : valor da indutância em henries, H;

N : número de espiras;

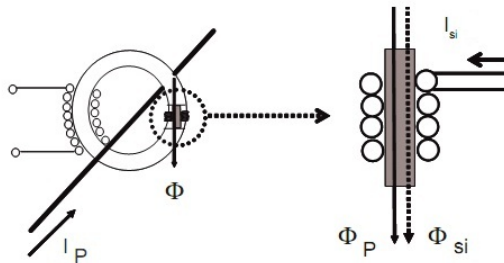
μ : permeabilidade magnética do núcleo onde $\mu = B/H$;

B : densidade magnética do núcleo;

H : força magnetizante;

A : área da seção reta do núcleo;

l : comprimento do núcleo.



Legenda:

I_p : corrente principal

ϕ : fluxo magnético

I_{si} : corrente do secundário injetada

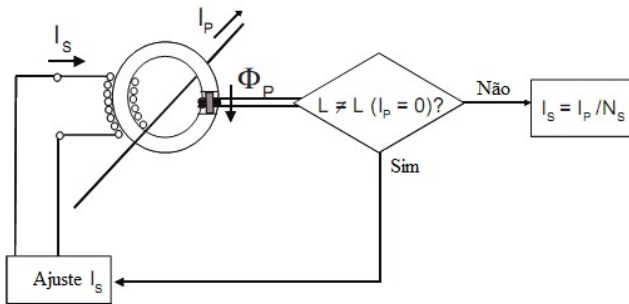
ϕ_p : fluxo provocado pela corrente I_p

ϕ_{si} : fluxo provocado pela corrente I_{si}

Figura 4.9: Distribuição do fluxo no transdutor CT [38]

A soma dos dois fluxos, mostrados na figura 4.9, cria uma sobre saturação no núcleo do indutor saturável e a indutância cai. No entanto, se a polaridade de I_{si} é reversa, os fluxos são subtraídos, resultando em um fluxo

total de baixa intensidade quando Φ_{si} é menor que Φ_p , em um fluxo total nulo quando Φ_{si} for igual a Φ_p e um fluxo total reverso se Φ_{si} for maior. O indutor saturável foi projetado para proporcionar uma alta indutância perto do fluxo total nulo e uma baixa indutância quando o núcleo está saturado. Assim, mudanças na intensidade do campo magnético levam à uma variação na indutância que pode ser detectada pelo processamento eletrônico. Como pode ser visto na figura 4.10, o princípio da realimentação é utilizado em que variações na corrente do primário I_p podem ser detectadas e compensadas pela alimentação de uma corrente I_s (de mesma intensidade e direção oposta) no secundário do transdutor, fazendo com que o fluxo total torne-se nulo e a indutância retorne ao valor de referência onde a corrente a ser medida poderá ser facilmente calculada pela relação de transformação $I_s = I_p/N_s$.



Legenda:

- I_p : corrente principal
- I_s : corrente do secundário
- Φ_p : fluxo provocado pela corrente I_p
- N_s : número de voltas do secundário
- L: indutor saturável

Figura 4.10: Princípio da distribuição de fluxo na alteração da indutância. Adaptado de [38]

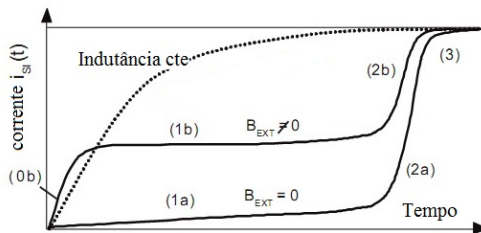
Na figura 4.11 se pode observar o comportamento da corrente do indutor saturável quando submetido a um degrau de tensão, tomando como parâmetro comparativo a influência de um campo externo devido à corrente I_p .

Quando não há corrente circulando no condutor, ou seja, $B_{EXT} = 0$, no estágio (1a) a variação da corrente é lenta, pois o indutor saturável apre-

senta uma elevada indutância quando não saturado. No estágio (2a), quando a corrente excede um nível pré-determinado, a variação torna-se bastante acentuada devido à queda no valor da indutância; já no estágio (3) a corrente alcança o nível assintótico. No entanto, quando há circulação de corrente no condutor principal, ou $B_{EXT} \neq 0$, se tem no primeiro instante (0b) uma predominância do campo externo e uma saturação do núcleo, fazendo com que o valor da indutância caia e ocorra uma rápida variação da corrente. No segundo instante (1b) a corrente I_{Si} cresce e o campo B_{Si} se iguala em amplitude e em direção oposta ao campo B_{EXT} ; o nível de saturação cai, a indutância aumenta e a variação da corrente se torna mais lenta. No instante (2b) a corrente I_{Si} continua crescendo e o campo B_{Si} se torna dominante e o núcleo entra em saturação novamente, resultando na queda da indutância e na rápida variação da corrente. No último instante, (3) a corrente alcança novamente o nível assintótico.

O comportamento das curvas, observado na figura 4.11, é semelhante ao observado nas figuras 4.12(a) e 4.12(b). No entanto, o indutor saturável está agora sendo submetido à uma forma de onda de tensão quadrada, sendo que a figura 4.11 representa meio período dessa forma de onda.

Na figura 4.12(a), o indutor saturável não está submetido a uma corrente externa I_p e na figura 4.12(b) a corrente I_p é diferente de zero. Tem-se então que na figura 4.12(b) o valor médio sofre um aumento, sendo então possível a detecção do valor da variação da indutância.



Legenda:

B_{EXT} : densidade de fluxo magnético provocado pelo campo externo devido à corrente I_p

Figura 4.11: Resposta da corrente para um pulso em tensão [38]

Os transdutores CT , CD e CV são derivados da série C e utilizam a tecnologia *Fluxgate* descrita acima.

Os transdutores CT apresentam características desejáveis para a

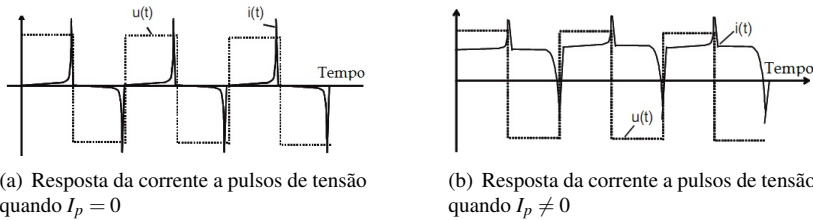


Figura 4.12: Resposta em corrente para o indutor saturável submetido à pulsos de tensão [38]

utilização neste trabalho já que medem tanto sinais CC, CA, quanto sinais pulsados, além de possuírem isolamento galvânica. Sua faixa de operação se estende até centenas de ampères apresentando uma incerteza de medição típica de 0,1% da faixa de medição. Outra característica importante é a sua ampla resposta em frequência, medindo sinais com frequências de até 500 kHz. Esses transdutores apresentam tal resposta em frequência pois são montados sobre dois núcleos magnéticos idênticos, onde cada secundário tem o mesmo número de espiras N_s , e o primário, comum para ambos os núcleos, apresenta um número de espiras N_p (figura 4.13). Os enrolamentos secundários são enrolados em série e a derivação central é conectada à um circuito eletrônico, como pode ser visto na figura 4.13. O núcleo T1 usa o princípio do *Fluxgate* para medir corrente de baixa frequência, enquanto o núcleo T2 age como um transformador de corrente para altas frequências e ambos operam compensando o fluxo magnético, assegurando que o transdutor funcione realimentado. A corrente “*Fluxgate*”, chamada de I_μ é gerada também pelo circuito eletrônico, que ainda é responsável pela ampla faixa de operação, pois o circuito eletrônico é especialmente projetado para compensar automaticamente *offsets* provenientes da eletrônica, eliminando a necessidade de ajustes.

4.2.5 Divisor resistivo de tensão

O divisor resistivo para medição de tensão, assim como o *shunt*, é um resistor especialmente desenvolvido para medição e hoje em dia é amplamente utilizado pela simplicidade de funcionamento, versatilidade e baixas incertezas de medição especificadas [43]. Mede tanto sinais CC quanto CA e de acordo com sua maneira construtiva, pode ser utilizado em uma am-

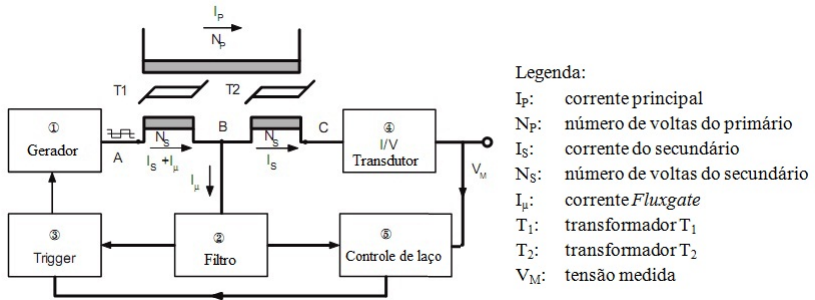
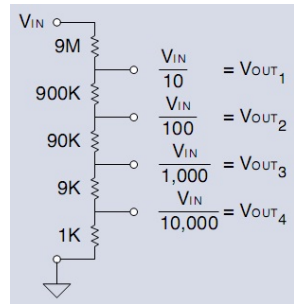


Figura 4.13: Estrutura de blocos do transdutor CT da LEM [38]

pla faixa de medição, como por exemplo, os resistores do fabricante Caddock [44], figura 4.14(a). Esse permite que se obtenha na saída do divisor até quatro valores distintos de tensão, como pode ser visto na figura 4.14(b) [43].



(a) Componente



(b) Configuração interna

Figura 4.14: Divisor resistivo Caddock modelo 1776 [44]

Comparados a transdutores de princípio magnético, os divisores resistivos não possuem saturação devido ao núcleo, nem o efeito de histerese, o que torna a sua resposta bastante linear. São compactos, em relação à elevada tensão que podem medir e possuem baixo custo em relação ao nível de incerteza associado.

Apesar de poder ser utilizado em medições de sinais alternados, o divisor resistivo apresenta, em alta frequência, problemas decorrente do casamento de impedâncias, que deve ser observado com mais atenção, pois capa-

citâncias (cabos, conexões e entradas de outros circuitos) em paralelo com a resistência do divisor podem ocasionar erros de medição bastante significativos [19].

4.2.6 Transdutor de tensão CV

Os transdutores de tensão CV – 3 da LEM possuem uma ampla banda de frequência, podendo amostrar sinais de até 800 kHz. Esses transdutores apresentam o mesmo princípio de funcionamento da série C fazendo uso da tecnologia *Fluxgate*, apresentada em 4.2.4. Para medição de tensão, uma pequena corrente é drenada da linha de tensão a ser medida. Apresentam ainda uma ampla faixa de medição, indo de 85 a 1400 V. Possuem uma baixa deriva térmica, baixo consumo, imunidade contra campos magnéticos externos e contra variações da tensão de modo comum. São geralmente empregados na medição de potência de inversores industriais, medição de tensão entre fases de ciclo-conversores e em laboratórios de medição onde há necessidade de medição de tensão isolada, medição de potência de inversores de frequência e interface entre o mensurando e o instrumento de medição.

4.3 Conclusão acerca das alternativas para medição de potência elétrica

Foram analisados, quanto ao princípio de funcionamento e adequação a aplicação, os wattímetros baseados em processamento digital de sinais e eventuais transdutores que poderiam ser utilizados em um sistema de medição proprietário.

Pelos princípios de funcionamento dos transdutores de corrente e tensão apresentados, todas as tecnologias são em potencial aptas para serem utilizadas como solução para alcançar os objetivos deste trabalho. No entanto, algumas tecnologias se destacam, como é o caso do transdutor de corrente CT e o transdutor de tensão CV. Se o transdutor de corrente CT for comparado ao resistor *shunt*, o primeiro apresenta a vantagem de isolamento elétrico e também toda eletrônica embarcada que permite que o transdutor seja utilizado para medir sinais de frequência elevada, em torno de 500 kHz. No entanto, o custo dos transdutores CT e CV é elevado frente às outras tecnologias, além de necessitar de fonte de alimentação externa simétrica e estável para operação. De acordo com a literatura pesquisada, a bobina de Rogowski é amplamente aplicada para a medição de transitórios. Seu campo de aplicação abrange monitoramento de fornos a arco elétrico,

sistemas de proteção, medição de correntes de curto-circuito e medição de energia elétrica em alta e média tensão [40] sendo que não foi encontrado exemplo de aplicação para a medição de saída em conversores de frequência ou mesmo de inversores de frequência. Os transdutores de efeito Hall por terem um núcleo ferromagnético, apresentam o fenômeno da saturação do núcleo e da histerese. Outro ponto relevante dos transdutores de efeito Hall é a sensibilidade a campos magnéticos externos, que faz com que sejam inseridos erros de medição devido a interferências externas. Os divisores resistivos de tensão, comparados aos transdutores de núcleo ferromagnético, não apresentam os efeitos relativos à histerese e saturação, no entanto, assim como os *shunts*, necessitam de um circuito amplificador e, dependendo da aplicação, um circuito isolador.

Das alternativas apresentadas, os wattímetros baseados no processamento digital de sinais possuem vantagens em comparação ao desenvolvimento de um sistema proprietário. Uma das principais vantagens é a faixa de medição, que nesses equipamentos é bastante ampla. Outro ponto bastante relevante é a possibilidade da medição de sinais distorcidos e a facilidade da utilização de ferramentas matemáticas disponíveis nesses equipamentos. A aquisição em alta frequência também é um ponto chave a ser considerado nessa análise. Se for um equipamento comercial, esse tem a relevância de ter sido adequadamente projetado para a medição de grandezas elétricas, prevendo casamento de impedâncias, imunidade à interferências externas e ruídos ocasionados pelo próprio sistema de medição. No entanto, um ponto que se converte em desvantagem é o custo da solução, que se torna elevado por ser um equipamento importado e de alto valor tecnológico agregado.

No próximo capítulo é realizada a análise experimental para a estimativa do espectro de frequências dos sinais de tensão e corrente. Um dos objetivos dessa análise é verificar a influência dos transdutores na aquisição dos sinais. Já no capítulo 6 são apresentadas outras considerações sobre os sistemas apresentados no presente capítulo, além da seleção propriamente dita do sistema de medição para ser utilizado na BEME.

5 ANÁLISE EXPERIMENTAL PARA ESTIMATIVA DOS ESPECTROS DE FREQUÊNCIA DE TENSÃO E CORRENTE

5.1 Objetivo

As equações para o cálculo da potência ativa para sinais periódicos distorcidos através da decomposição dos sinais de tensão e corrente na série de Fourier foram apresentadas no capítulo 3, equações 3.14 e 3.15.

Outra forma de analisar um sinal periódico é através da utilização da Transformada de Fourier ou (FFT) - *Fast Fourier Transform*. A transformada de Fourier é uma eficiente técnica matemática para representar uma função periódica no domínio da frequência e que resulta também na representação do sinal no espectro da frequência [45].

De acordo com ensaios anteriormente realizados, observou-se que nos motores de indução alimentados por um inversor de frequência ¹ pela modulação do sinal de tensão, uma parcela de ruído era medido no sinal de corrente em virtude do transdutor utilizado ser passível de sofrer os efeitos desse ruído.

Assim, foi estabelecido como objetivos a amostragem dos sinais de tensão e corrente em alta frequência de aquisição para que posteriormente pudesse ser aplicado o algoritmo de cálculo das amplitudes e frequências das ondas que constituem ambos os sinais, além da aplicação de transdutores com princípios físicos diferentes para avaliar a influência desses na caracterização da potência elétrica.

5.2 Avaliação dos equipamentos disponíveis

Segundo a teoria de amostragem de sinais, quanto maior a frequência de aquisição, mais fiel será a representação do sinal real. Sinais adquiridos com frequência baixa podem sofrer *aliasing*, que é a reconstrução de um sinal amostrado com frequência diferente do sinal original, introduzindo erros de medição [33]. De acordo com a Teoria da Amostragem toda informação em um sinal é preservada se a frequência de amostragem é duas vezes maior que a maior frequência presente no sinal a ser amostrado [45]. No entanto, para garantir a amplitude do sinal amostrado pode-se utilizar a equação 5.1 para

¹Que não é o caso deste trabalho, pois estamos analisando o comportamento dos motores *brushless*, mas que tende a ter um comportamento as vezes semelhante em alguns aspectos.

que o erro não seja maior que 1/2 LSB [46].

$$f_{max} = \frac{1}{(2^n + 1) \cdot \pi \cdot T_{CONV}} \quad (5.1)$$

Em que:

f_{max} : máxima frequência de amostragem [Hz];

N : número de bits do conversor A/D;

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

Além da alta frequência de aquisição, outros pontos a serem considerados como pré-requisitos são:

- capacidade de armazenamento dos dados da aquisição;
- resolução do conversor analógico/digital;
- entradas isoladas;
- interface de comunicação para transmissão dos dados adquiridos.

A partir desses pré-requisitos foram verificados quais instrumentos disponíveis poderiam ser utilizados para a aquisição dos dados.

Dos instrumentos levantados, dois deles foram selecionados como aptos para realizar o experimento. A descrição dos instrumentos será apresentada a seguir.

5.2.1 Placa de aquisição

Um dos sistemas analisados capaz de realizar a aquisição é constituído basicamente por uma placa de aquisição, um transdutor de corrente e por um computador pessoal. Como a aquisição deveria ter uma alta frequência de amostragem, a placa de aquisição da National Instruments PCI-6133 [47] foi cogitada para tal aquisição.

As principais características dessa placa são:

- 8 canais de entradas analógicas diferenciais de aquisição simultânea;
- taxa de amostragem de até 3 MSa/s por canal;
- resolução equivalente a 14 bits;
- memória interna para 32 milhões de amostras;

- 8 entradas/saídas digitais;
- 2 contadores/temporizadores de 24 bits;
- *trigger* digital e analógico.

No entanto, esta placa de aquisição tem a sua entrada de tensão limitada à uma tensão de ± 10 V que impede que os sinais de tensão de alimentação do motor sejam colocados diretamente sobre as entradas da placa. O mesmo aconteceria para o sinal de corrente, contornado pela utilização de uma sonda de corrente ². Devido à grande faixa de valores de tensão de alimentação, seriam necessários diversos transdutores de tensão ³ e conseqüentemente um sistema de multiplexação desses transdutores, além de, eventualmente, um sistema para tratamento desse sinal.

Assim, apesar de ser um sistema de grande potencial para essa aplicação, este foi descartado pelos pontos apresentados acima.

5.2.2 Oscilógrafo DL750

O Oscilógrafo da Yokogawa DL750 [48], figura 5.1, oferece como grande vantagem a alta frequência de amostragem, e além disso, uma grande capacidade de armazenamento de dados capturados. Este equipamento é bastante versátil já que suas entradas são constituídas de módulos individuais, como pode ser visto na figura 5.2 (com dois canais cada módulo), podendo o usuário optar pela melhor configuração para sua aplicação. Assim pode-se ter no mesmo equipamento um módulo de alta velocidade isolado de 10 MSa/s e 12 bits de resolução e ainda outro módulo de alta velocidade de 1 MSa/s e 16 bits de resolução, ou módulo específico para medição de tensões mais elevadas (850 V (CC + Cápico)), temperatura, deformação, aceleração ou velocidade.

As principais características do oscilógrafo DL750 são:

- 16 canais analógicos de entrada;
- máxima capacidade de armazenamento de dados de 1 GigaWord;
- taxa de amostragem de até 10 MSa/s;
- resolução do conversor A/D de 12 bits;

²Apesar de não ser o transdutor ideal, pois, apresenta uma frequência de corte de 100 kHz, este transdutor é apropriado para tal ensaio.

³Para que seja mantida uma baixa incerteza de medição.

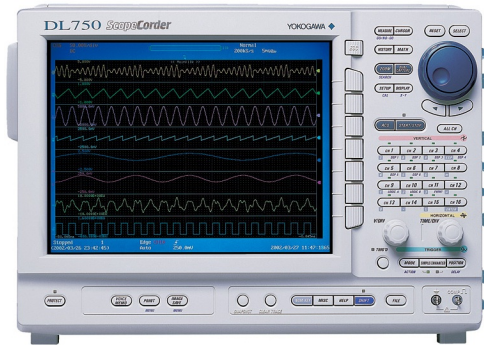


Figura 5.1: Oscilógrafo DL750 [49]



Figura 5.2: Módulos DL750 [49]

- conexão com PC via USB, Ethernet, GP-IB ou RS232.

Além das características acima citadas, este instrumento oferece seis canais com processamento digital de sinal (DSP), o que permite ao usuário o processamento de operações matemáticas e de filtragem do sinal em tempo real, isto é, enquanto as formas de onda estão sendo adquiridas. Apresenta ainda a função de *zoom* da janela principal, de dupla captura, ou seja, simultaneamente é adquirido o sinal numa taxa não muito elevada, no entanto, quando acontece algum transiente em alta frequência, através do *trigger*, o fenômeno não é perdido. Diversas opções de *trigger* também fazem desse equipamento um diferencial. Parâmetros das formas de onda, como frequência, período, valor máximo, mínimo, médio, rms são calculados instantaneamente para cada ciclo podendo ser mostrado na tela de *zoom*. Operações matemáticas (adição, subtração, multiplicação e divisão), análise FFT e deslocamento de fase entre canais são operações que fazem parte das funções básicas. Podem ainda ser definidas mais oito fórmulas diferentes utilizando as funções de integração, diferenciação, filtro digital, ou sete funções FFT diferentes e o resultado pode ser usado como parâmetro em ou-

tra equação.

5.3 Método empregado

Devido as características apresentadas na seção 5.2.2, o oscilógrafo DL 750 da Yokogawa foi selecionado para a aquisição dos sinais de tensão e corrente sendo para tanto utilizado o módulo 701255 de 12 bits de resolução e 10 MSa/s.

Dois modelos de motores *brushless* foram selecionados como corpos de prova. São eles os motores Maxon EC45 e Maxon EC60, cujo características foram previamente apresentadas no capítulo 2, seção 2.2.2. Ambos trifásicos e alimentados por um conversor de frequência de modulação PWM. O dispositivo eletrônico que aciona os mesmos é o conversor de frequência DES 70/10 também da Maxon comentado na seção 2.2.3, alimentado por uma fonte CC com uma tensão nominal de 50 V para o motor EC45 e 70 V para o motor EC60.

Para avaliar a influência do transdutor na aquisição dos dados, foram realizadas medições com dois transdutores de princípios físicos diferentes: sonda de corrente *Agilent 1146A* e resistor *shunt Riedon USR 4 – 3425*.

A sonda de corrente 1146A da Agilent [50] figura 5.3 mede correntes de 100 mA a 100 A eficazes, CC a 100 kHz sem a necessidade de abrir o circuito que se deseja avaliar a corrente. Essa sonda de corrente utiliza a tecnologia do efeito Hall como princípio de medição e pode ser conectada diretamente a um osciloscópio ou outro instrumento através de um cabo coaxial com conector BNC isolado.



Figura 5.3: Sonda de corrente 1146A Agilent [51]

O outro transdutor utilizado nessa avaliação foi o resistor *shunt* Riedon USR 4-3425 [52], figura 5.4. Em se tratando de um resistor, esse apresenta a característica de ter uma resposta bastante linear em relação ao sinal de entrada sendo que suas maiores restrições são quanto às derivas térmicas. A

tabela 5.1 apresenta as principais características do resistor *shunt* utilizado.



Figura 5.4: Resistor *shunt* Riedon [52]

Tabela 5.1: Principais características do resistor *shunt* Riedon USB 4 – 3425

Parâmetros	Valores
Resistência	0,5 Ω
Tolerância	0,1%
Corrente máx.	15 A
Potência dissipada (c/ dissipador de calor)	30 W
Faixa de temperatura de operação	(-55 a +155 °C)
Estabilidade	0,01%
Coefficiente de temperatura	máx. ± 5 ppm/K (-55 a +155 °C) típ. ± 3 ppm/K (-55 a +125 °C)
Shelf Life Stability	25 ppm/ ΔR ; depois de 1 ano 50 ppm/ ΔR ; depois de 3 anos
Termal EMF	$< 0,1 \mu V/K$

Em todos os testes foram ensaiados dois pontos de carga para cada um dos seis pontos de rotação⁴. Tais pontos têm a característica de apresentarem a maior e menor carga para uma determinada rotação, assim podendo ser observado duas situações extremas: o motor praticamente a vazio e no seu ponto de máximo torque.

Na comparação entre dois motores (EC45 e EC60) de potências diferentes, utilizou-se o mesmo transdutor de corrente (resistor *shunt*). O di-

⁴Os pontos de carga foram previamente definidos no trabalho de mestrado realizado anteriormente por [4] com seis pontos de carga para cada rotação.

agrama simplificado de como foi realizada a aquisição está representado na figura 5.5 e os pontos de carga ensaiados conforme as tabelas 5.2 e 5.3.

Tabela 5.2: Pontos de medição Motor EC45

Ponto	Rotação [rpm]	Carga [mN.m]	Identificação
1	2500	172	POT0000
		76	POT0001
2	5000	162	POT0002
		67	POT0003
3	7500	159	POT0004
		32	POT0005
4	10000	143	POT0006
		24	POT0007
5	12500	115	POT0008
		19	POT0009
6	15000	96	POT0010
		16	POT0011

Para verificação da influência do transdutor de corrente foi ensaiado o motor EC60 (de maior potência) tanto com o resistor *shunt* como com a sonda de corrente. O diagrama de blocos simplificado com a inserção da ponteira alicate amperímetro está representada na figura 5.6. Os pontos de carga são os mesmos apresentados na tabela 5.3.

Para representação dos sinais de tensão e corrente no domínio da frequência foi desenvolvido um software no ambiente de programação LabVIEW da *National Instruments*. Esse software realiza os cálculos no modo *offline*, ou seja, depois de realizada a aquisição. Em seguida, o formato dos arquivos gerados pelo oscilógrafo são convertidos para uma extensão reconhecida pelo LabVIEW e só então é aplicado o algoritmo para o cálculo da FFT.

Todos os ensaios foram realizados medindo-se as fases que alimentam o motor após os indutores, pois é a forma de onda que realmente está sendo aplicada à carga.

As análises foram realizadas utilizando três períodos da forma de onda levando em consideração a velocidade síncrona. Ou seja:

$$n_s = \frac{120 \cdot f}{2 \cdot p} [rpm] \quad (5.2)$$

Tabela 5.3: Pontos de medição Motor EC60

Ponto	Rotação [rpm]	Carga [mN.m]	Identificação
1	1000	115	POT0012
		497	POT0013
2	1500	96	POT0014
		478	POT0015
3	2000	115	POT0016
		497	POT0017
4	2500	115	POT0018
		497	POT0019
5	3000	99	POT0020
		497	POT0021
6	3500	87	POT0022
		497	POT0023

A velocidade síncrona (n_s) é definida pela velocidade de rotação do campo girante, a qual depende do número de par de pólos ($2p$) do motor e da frequência de alimentação (f) em hertz, que no caso é a frequência angular da fundamental imposta pelo conversor de frequência.

5.4 Resultados

Na tela principal do programa, figura 5.7, são apresentados os gráficos das formas de onda de tensão e corrente além dos espectros no domínio da frequência.

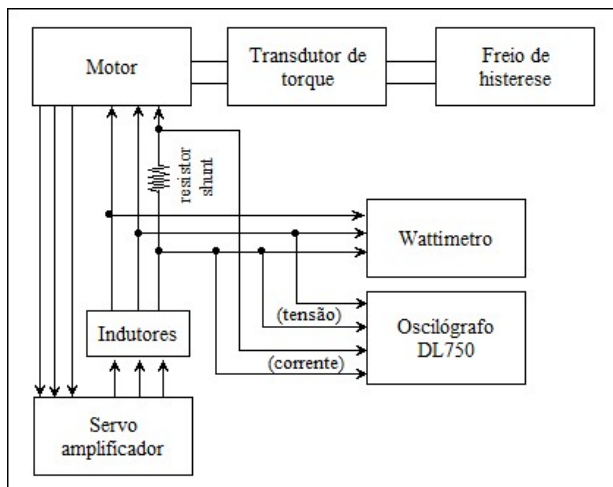


Figura 5.5: Diagrama de blocos simplificado aquisição DL750 com resistor shunt

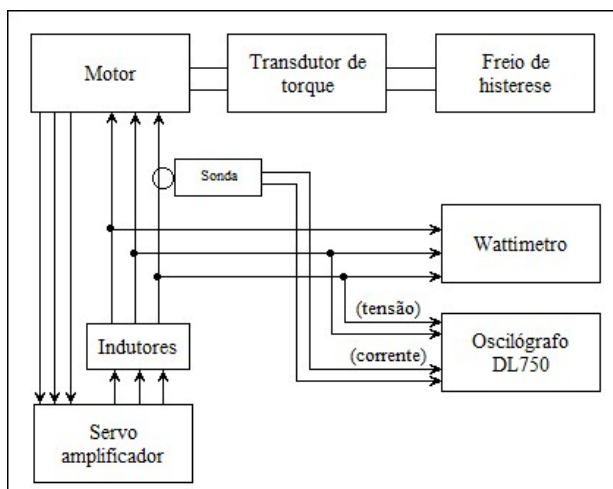


Figura 5.6: Diagrama de blocos simplificado aquisição DL750 com ponteira alicate amperímetro

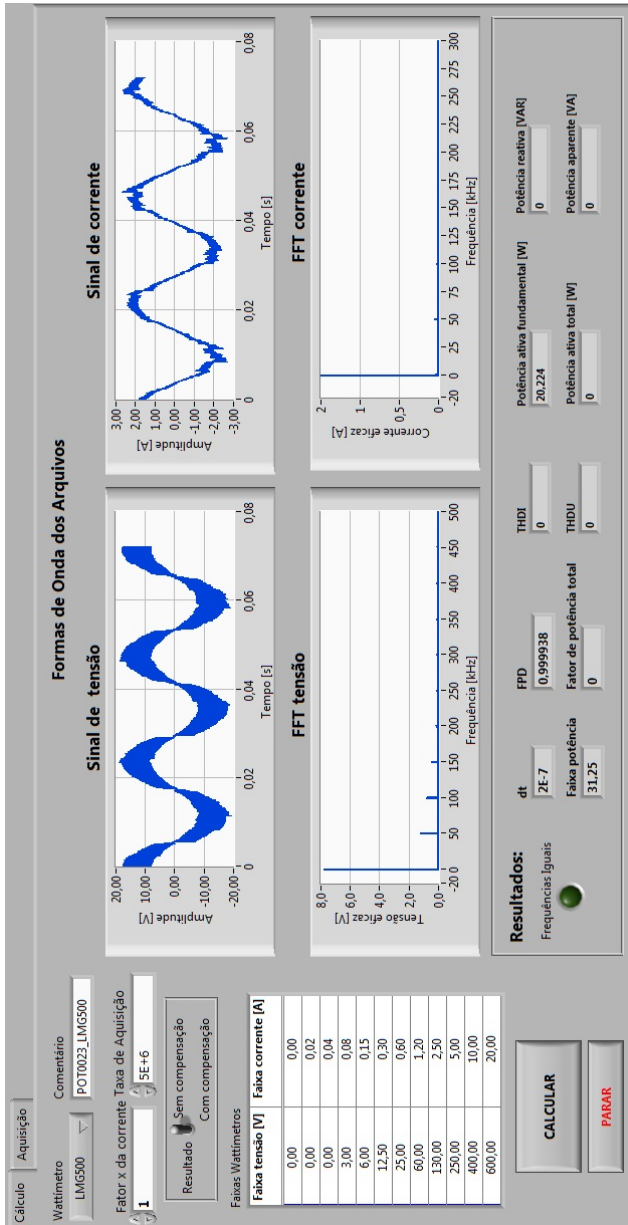


Figura 5.7: Tela principal do programa

Embora as aquisições tenham sido realizadas após os indutores, em uma visita do representante do fabricante do oscilógrafo ao LIAE, foi possível realizar um ensaio onde foi impressa em papel através da impressora embutida no próprio equipamento a forma de onda adquirida antes dos indutores. Na figura 5.8 observa-se o sinal de tensão como uma onda quadrada modulado em alta frequência. Já na figura 5.9 a forma quadrada do sinal de tensão passa a ser mais suave pela presença dos indutores que atuam como filtros.

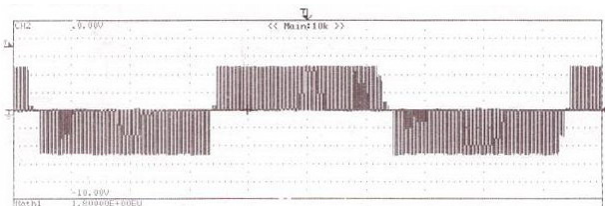


Figura 5.8: Forma de onda de tensão na saída do conversor de frequência

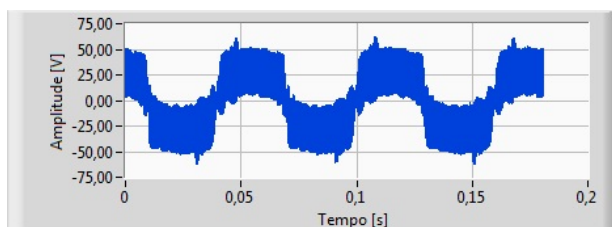


Figura 5.9: Forma de onda de tensão após os indutores

5.4.1 Análise EC45 (shunt) x EC60 (shunt)

Os espectros de frequência dos sinais de tensão e corrente do motor EC45 de 150 W para a condição POT0000 (2500 rpm e 172 mN.m) podem ser vistas nas figuras 5.10 e 5.11, respectivamente. Das figuras observa-se que o sinal de tensão apresenta um espectro de frequências mais vasto que o do sinal de corrente pelo fato do sinal de corrente ter sido filtrado pela impedância do motor. Observa-se também que a maior parte da energia está na frequência fundamental, ou seja, na frequência síncrona do motor, como pode ser observado nas figuras 5.12 e 5.13. Em análise realizada, a taxa de

distorção harmônica de tensão – THD_V – chega a mais de 23% e a parcela de energia presente na frequência síncrona do sinal de tensão chega a mais de 65% da energia total contida no sinal. O restante da energia concentra-se nas frequências harmônicas do chaveamento, ou seja, 50, 100 e 150 kHz etc. Já no sinal de corrente, a taxa de distorção harmônica de corrente – THD_I – é de aproximadamente 3,7%, bem inferior à THD_V e a energia presente na frequência fundamental é de mais de 90% sendo o restante dividido nas frequências harmônicas e mais significativamente nas frequências de 50 e 100 kHz etc

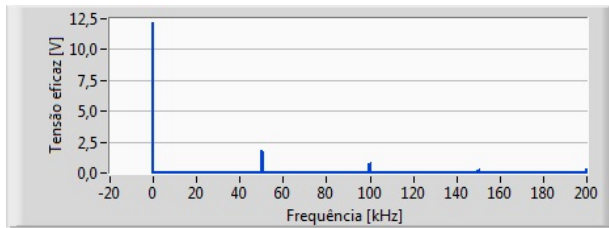


Figura 5.10: Espectro da tensão POT0000

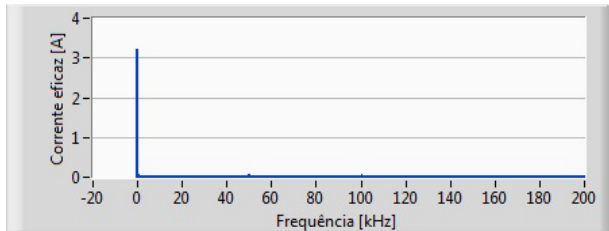


Figura 5.11: Espectro da corrente POT0000

Os espectros de frequência de tensão e corrente para o motor EC45 na condição POT0001 (2500 rpm e 76 mN.m), menor potência ensaiada para esta rotação, estão apresentados nas figuras 5.14, sinal de tensão e 5.15, sinal de corrente. Observa-se que os espectros têm distribuição bem próximas às apresentadas nos espectros das figuras 5.10 e 5.11, mudando apenas as amplitudes harmônicas.

Os espectros de frequências para o motor de maior potência EC60 de 400 W, na condição POT0013 (1000 rpm e 497 mN.m), podem ser obser-

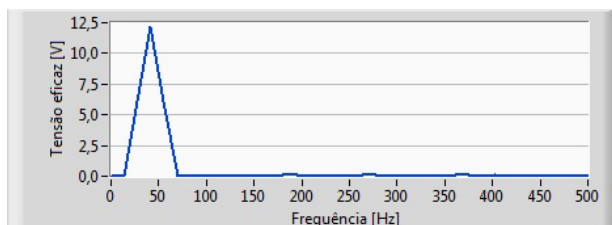


Figura 5.12: Espectro da tensão POT0000

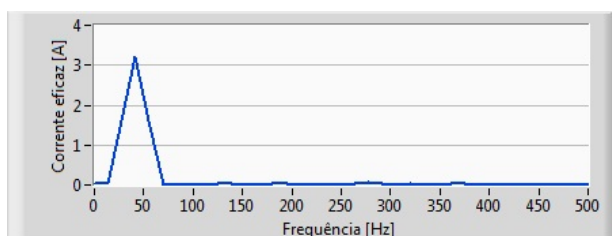


Figura 5.13: Espectro da tensão POT0000

vados nas figuras 5.16 e 5.17. Novamente percebe-se a grande parcela de energia presente na frequência fundamental do motor, sendo que no sinal de tensão, as frequências harmônicas apresentam-se em uma ordem mais elevada, comparado ao motor EC45. Já no sinal de corrente, estas são de menor ordem mas ainda significativas até 100 kHz e na frequência fundamental está cerca de 70% da energia total do sinal. No entanto há uma distribuição maior da energia em relação ao que foi observado no motor EC45, sendo que no sinal de tensão a frequência da fundamental apresenta energia equivalente à um pouco mais de 36% e o restante dividido entre as frequências harmônicas, que são significativas até a ordem de 500 kHz.

O motor EC60 na condição POT0012 (1000 rpm e 115 mN.m), menor potência para esta rotação, apresenta os espectros de frequência conforme figura 5.18 e 5.19. Novamente os espectros de frequência se assemelham bastante com a condição POT0013 mesmo com a carga no motor tendo sido bastante reduzida.

Apesar dos espectros de tensão apresentados terem amplitudes bastante significativas nas frequências harmônicas do chaveamento, pelo fato da maior parte da energia do sinal de corrente estar na frequência fundamental,

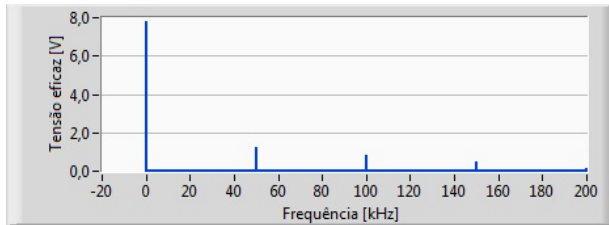


Figura 5.14: Espectro da tensão POT0001

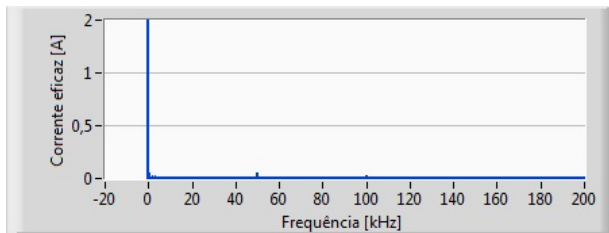


Figura 5.15: Espectro da corrente POT0001

é esperado que no cálculo da potência as frequências harmônicas não sejam significativas, justamente pelo fato da potência ser o produto dos valores de tensão e corrente.

Os espectros de frequências dos sinais de tensão e corrente para as demais condições expostas nas tabelas 5.2 e 5.3 são muito semelhantes aos apresentados, sendo que as análises realizadas anteriormente valem para as demais condições.

Além das características apresentadas acima, quando nos aproximamos das frequências harmônicas, podemos observar que nas frequências múltiplas do chaveamento destacam-se os *sidebands*, que são frequências que aparecem acima e abaixo da frequência portadora, ou no nosso caso, das frequências harmônicas do chaveamento do conversor de frequência. Essa característica é típica de sinais modulados. No apêndice A são apresentados os espectros de frequências nas frequências harmônicas. Nas figuras A.1(a) e A.1(b) são apresentados os espectros da frequência harmônica próxima de 50 kHz para os sinais de tensão e corrente do motor EC45 na condição POT0000. Podemos ver pelas figuras A.2(a) e A.2(b) que na frequência harmônica de 100 kHz, temos uma semelhança quanto a forma do espec-

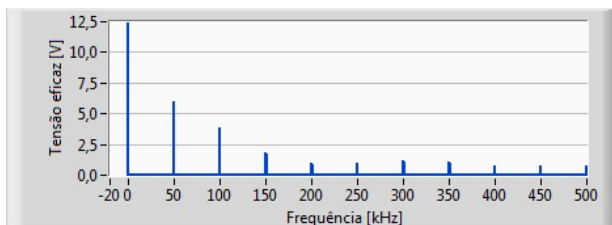


Figura 5.16: Espectro da tensão POT0013

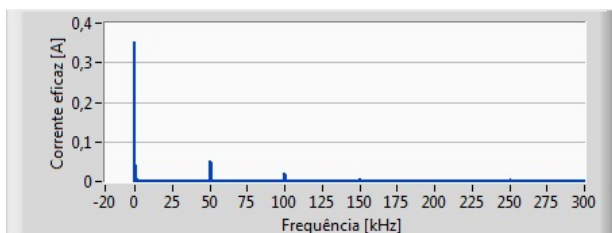


Figura 5.17: Espectro da corrente POT0013

tro na frequência de 50 kHz. Já nas frequências harmônicas superiores, observou-se um espalhamento desse espectro, como pode ser visto da figura A.3(a) a A.6(b).

Como comentado no início deste capítulo, para uma fiel reprodução do sinal adquirido, a taxa com que essa aquisição deve ser realizada é, no mínimo, segundo Nyquist, duas vezes maior que a maior frequência presente no sinal, evitando assim *aliasing*. Uma maneira de se detectar o *aliasing* é por meio do espectro de frequências pelo surgimento de frequências múltiplas da frequência original do sinal que se deseja reconstruir. Para verificar se o espalhamento nos espectros comentados acima é proveniente do *aliasing*, foi simulado em LabVIEW uma senoide com as mesmas características de modulação presente no sinal chaveado produzido pelo conversor de frequência, figura 5.20. Em seguida, o algoritmo simula a resposta de um sistema RL a partir da sua função de transferência sendo possível avaliar a influência do filtro sobre as frequências de mais alta ordem.

Da simulação observou-se que apesar da taxa de aquisição ser bastante elevada (5 MSA/s), o motor mostrou-se como um filtro incapaz de atenuar totalmente as frequências mais elevadas, de acordo com o espectro de

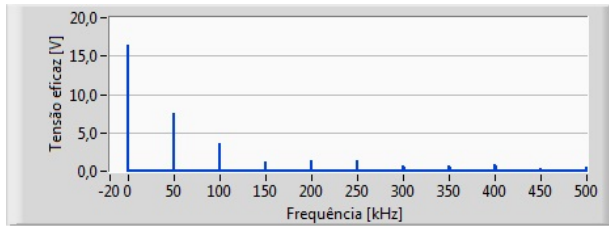


Figura 5.18: Espectro da tensão POT0012

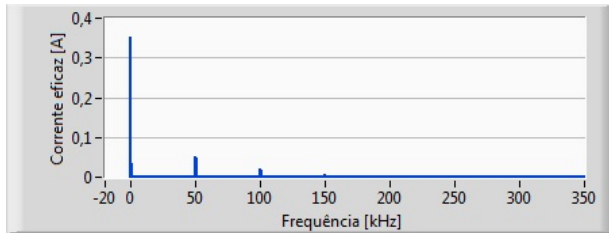


Figura 5.19: Espectro da corrente POT0012

frequência da simulação realizada, figura 5.21.

Sendo que o sinal proveniente do conversor de frequência, em alguns casos apresenta harmônicas de amplitude significativa em 350 kHz, seria necessário uma taxa de aquisição bem mais elevada do que a que foi utilizada no ensaio proposto. No entanto não é invalidada a análise até aqui, pois, o principal objetivo, que era a identificação das frequências harmônicas, foi atingido.

5.4.2 Análise EC60 (ponteira) x EC60 (shunt)

Uma outra abordagem a ser ensaiada é quanto a influência exercida pelo transdutor de corrente na qualidade do sinal adquirido. Para a mesma potência mecânica, ou seja, o mesmo ponto de rotação e torque (1000 rpm e 497 mN.m), foram testados dois transdutores de corrente diferentes. Nas figuras 5.22 e 5.23 estão as formas de onda de corrente adquiridas utilizando-se a sonda de corrente e o resistor *shunt*, respectivamente.

Das figuras observa-se nitidamente a influência do transdutor no sinal de corrente, sendo que o sinal adquirido com a sonda de corrente é composto

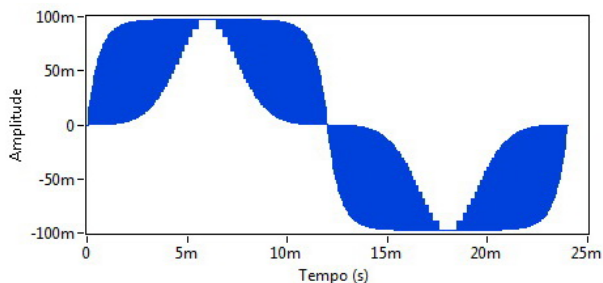


Figura 5.20: Forma de onda da simulação realizada

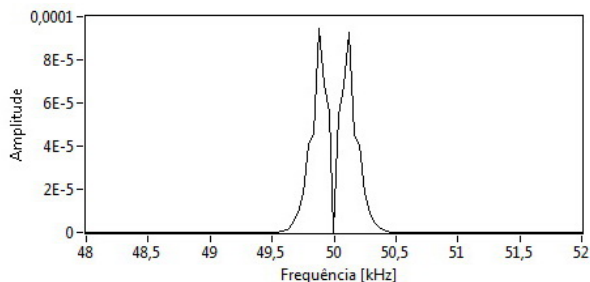


Figura 5.21: Espectro de frequência em 50 kHz da simulação realizada

de frequências cuja fonte podem ser provenientes de interferências. Essa interferência pode ser observada também pelos espectros de frequências. Nas figuras 5.24 e 5.25 se tem os espectros, respectivamente, do sinal de corrente adquirido com a sonda de corrente e com o resistor *shunt*. Analisando em particular o espectro em cada frequência harmônica, tem-se que os *sidebands* deixam de existir quando o sinal é adquirido com a sonda de corrente, figuras 5.26 e 5.27.

Com o que foi exposto anteriormente, pode-se concluir que a sonda de corrente não é um transdutor apropriado para aquisições que exijam uma amostragem com maior fidelidade de sinais em alta frequência.

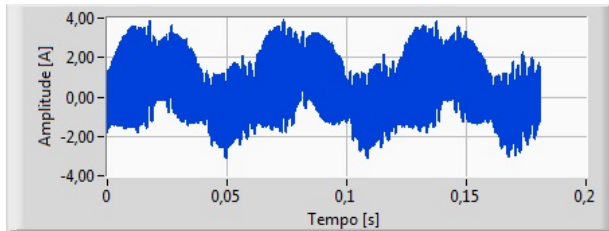


Figura 5.22: Forma de onda de corrente adquirida com a sonda de corrente na condição POT0012

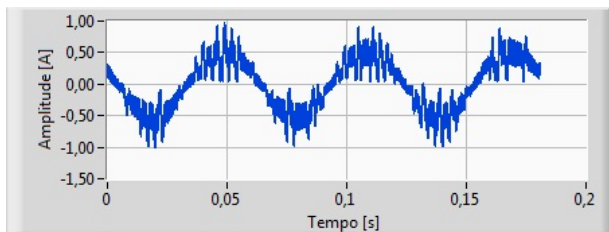


Figura 5.23: Forma de onda de corrente adquirida com resistor *shunt* na condição POT0012

5.5 Conclusões acerca da análise experimental para estimativa dos espectros de frequência

Para representação de um sinal periódico no domínio da frequência uma técnica matemática bastante utilizada é a Transformada de Fourier. No entanto, para que a Transformada pudesse ser aplicada, os sinais de tensão e corrente deveriam ser adquiridos de forma que fossem preservadas a frequência e a amplitude do sinal real. Para tanto, um oscilógrafo de alta taxa de amostragem foi utilizado para adquirir os sinais de tensão e corrente.

Uma das entradas do oscilógrafo foi utilizada, sem a necessidade de transdutor, para adquirir o sinal de tensão e uma outra entrada do mesmo módulo para o sinal de corrente, porém sendo utilizados um resistor *shunt* e uma sonda de corrente como transdutores, pois não tinha-se uma entrada em corrente no equipamento.

O método proposto comparou dois motores de potências diferentes e um mesmo motor com dois transdutores de corrente diferentes, sendo

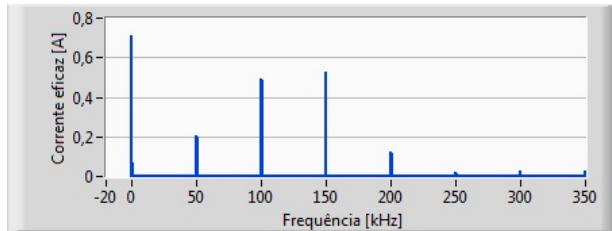


Figura 5.24: Espectro de frequências da aquisição realizada utilizando a sonda de corrente na condição POT0012

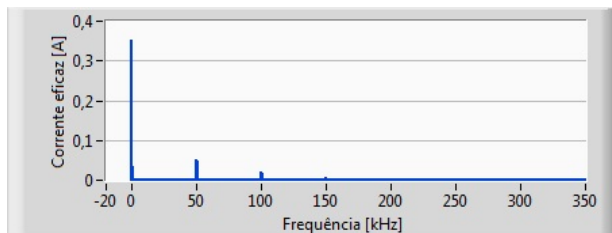


Figura 5.25: Espectro de frequências da aquisição realizada utilizando o resistor *shunt* na condição POT0012

que se tinha como objetivo a avaliação do comportamento do espectros das frequências para uma faixa ampla de potências, e também a influência dos transdutores de corrente na aquisição proposta.

Pode-se assim chegar a conclusão de que a maior parte da energia, tanto do sinal de tensão quanto de corrente, está na frequência fundamental, o que é esperado. Observou-se também a formação dos *sidebands* em torno das frequências harmônicas do chaveamento, bem definidas com a aquisição realizada com o resistor *shunt* e pouco definida na aquisição com a sonda de corrente. Constatou-se ainda que a maior distorção harmônica acontece no sinal de tensão e que no sinal de corrente a distorção harmônica é crítica quando o motor tem sua carga reduzida, ou seja, quando está praticamente a vazio. Com isso, espera-se que o sinal de potência não tenha uma influência muito acentuada das harmônicas do chaveamento, pois, como a potência é a multiplicação dos sinais de tensão e corrente, a parcela relativa à corrente tenderia a minimizar os efeitos das harmônicas. Por último, tem-se da análise entre os transdutores, que a sonda de corrente apresentou um comportamento

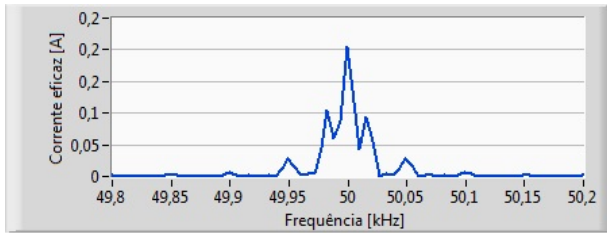


Figura 5.26: Espectro de frequência em 50 kHz do sinal de corrente utilizando a sonda de corrente

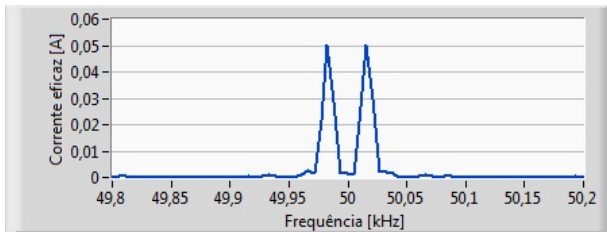


Figura 5.27: Espectro de frequência em 50 kHz do sinal de corrente utilizando o resistor *shunt*

extremamente ruidoso em relação ao resistor *shunt*, mesmo que não quantificado através de valores, e sim somente da observação dos espectros de frequências.

6 ANÁLISE DA MEDIÇÃO DE POTÊNCIA NA BANCADA EM QUESTÃO

6.1 Determinação das condições de contorno

6.1.1 Determinação dos requisitos

A correta especificação de um sistema de medição exige atendimento dos requisitos estabelecidos. Para sistematizar o processo de levantamento dos principais requisitos Albertazzi e Sousa (2008) [53] sugeriram 12 itens que devem ser observados, colocando-os como sendo os “parâmetros que caracterizam a tarefa de medição”. Desses parâmetros, pode-se destacar a descrição da faixa, a incerteza e a taxa de medição, o nível de automação e onde essas medições serão realizadas, já que esses são os principais itens a serem atendidos, no caso desta dissertação.

A faixa de medição é um requisito que pode ser determinado observando-se o tipo de ensaio a ser realizado. Em dissertação anterior, Souza Neto (2009) [4] determinou os pontos de carga dos motores, conforme os gráficos fornecidos pelo fabricante. Na figura 6.1, são apresentados os gráficos com as faixas de operação dos mesmos.

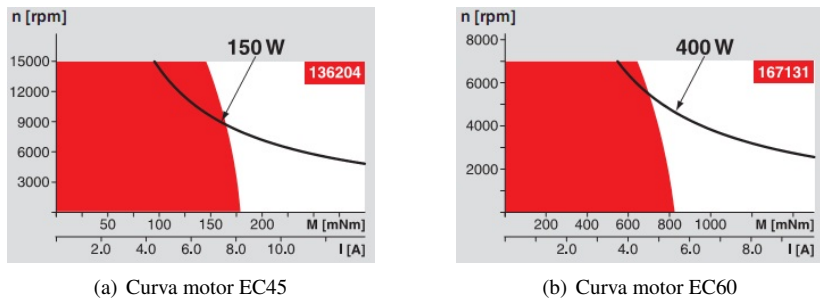


Figura 6.1: Curvas das faixas de operação dos motores em teste [54], [55]

Sendo que o ensaio deveria ser realizado de maneira dinâmica e abranger a maior faixa de operação dos motores sem que se ultrapassassem os limites de operação do motor¹, foram definidos dos gráficos dois tipos de ensaio:

¹Nos gráficos da figura 6.1 está indicado em vermelho a faixa nominal de operação do motor. Já em branco, a área de curto tempo de operação, sendo que não é desejável permanecer nesta área, pois pode causar danos ao motor.

rotação fixa (RF) e potência fixa (PF).

No ensaio definido como RF, a frequência rotacional a qual é submetido o motor, é fixada em um determinado ponto e então varia-se a carga aplicada ao sistema. Já definindo o ensaio como PF, para cada ponto fixo de potência são estabelecidos os pontos de carga. Assim, observando os gráficos das figuras 6.1(a) e 6.1(b) foram especificados os pontos de carga para os dois tipos de ensaio RF e PF anteriormente descritos. Na tabela 6.1 estão os pontos de frequência rotacional e torque utilizados para o ensaio RF para um dos motores.

Tabela 6.1: Pontos de carga para o motor EC45 para o ensaio RF

	Frequência rotacional [rpm]					
	15000	12500	10000	7500	5000	2500
Torque [mN.m]	96	115	143	159	162	172
	80	96	119	134	143	153
	64	76	96	108	124	134
	48	57	72	83	105	115
	32	38	48	57	86	96
	16	19	24	32	67	76

Determinados os pontos de frequência rotacional e carga, foram destacados dos gráficos das faixas de operação, a faixa de corrente de operação. A partir da determinação da área do gráfico que se deseja trabalhar, serão especificados os limites das entradas de corrente dos transdutores ou do equipamento de medição. Como exemplo destaca-se o ponto de maior carga para o motor EC45 no ensaio rotação fixa, onde da tabela 6.1 se tem o motor a 2500 rpm e 172 mN.m de torque. Nesse ponto, de acordo com a curva de operação do motor se tem uma corrente de mais de 6 A, como pode ser visto na figura 6.2.

A tensão de alimentação dos motores também torna-se um requisito já que há necessidade do conhecimento dos limites dessa tensão para correta especificação do transdutor ou do equipamento a ser utilizado. No capítulo 2, tabela 2.1 se vê que as tensões nominais de operação dos motores são de 24 V para o motor EC45 e de 48 V para o motor EC60. Segundo fabricante esses valores podem ser ultrapassados quando deseja-se alcançar potências mais elevadas.

A incerteza de medição é um tanto complexa de ser estipulada neste caso, pois existem muitas frequências envolvidas. É usual no controle de

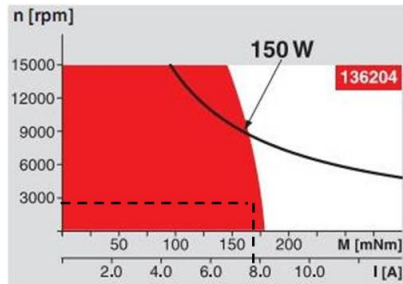


Figura 6.2: Corrente solicitada na condição 2500 rpm e 172 mN.m

qualidade adotar-se incerteza de medição resultante da ordem de um décimo do intervalo de tolerância 6.1 [53].

$$IM = \frac{IT}{10} \quad (6.1)$$

Em que:

IM: Incerteza de Medição;

IT: Intervalo de Tolerância.

Em aplicações não destinadas ao controle de qualidade, a incerteza pode ser fixada em função de requisitos técnicos ou com base em normas e recomendações técnicas. Para tanto, adotou-se que a incerteza de medição para a potência elétrica deveria ser da ordem da incerteza de medição alcançada no trabalho anteriormente realizado por Souza Neto (2009) [4]. A máxima incerteza para a o sistema de medição de potência mecânica alcançada foi de 0,34% da faixa de medição, sendo considerado um excelente resultado, assim almejado para a medição da potência elétrica.

A taxa ou frequência de aquisição é outro requisito de fundamental importância e já discutido anteriormente no capítulo 5, seção 5.2.

Quanto ao grau de automação, especificou-se que o ensaio deveria ser total ou parcialmente automatizado, ou seja, depois de instalado o motor na bancada, todo o sistema deveria ser controlado remotamente, desde as configurações das fontes de alimentação, do conversor de frequência, dos instrumentos de medição até a realização do ensaio propriamente dito com a seleção automática dos pontos de rotação e carga e geração de relatórios. Essa automatização implica seleção automática da faixa de medição da tensão

e da corrente, já que no ensaio as tensões e a correntes variam em uma faixa bastante ampla entre zero e os valores nominais.

Para o local de medição especificou-se que os ensaios deveriam ser realizados em um laboratório, sendo que a bancada é hoje em dia ainda utilizada apenas para o setor de pesquisa e desenvolvimento, eliminando a preocupação de mobilidade do sistema, fontes externas de interferências elétricas ou magnéticas, adequação da rede de alimentação, entre outras.

6.1.2 Escolha do método de medição

Como se trata de um sistema trifásico, há necessidade de um número mínimo de entradas do sistema de medição de tensão e corrente, ou seja, duas entradas para a medição de tensão e duas entradas para a medição de corrente, pois conforme o que foi exposto no capítulo 3, seção 3.5.1, para um sistema trifásico a três fios, há necessidade apenas de dois wattímetros para realizar a medição da potência ativa.

Essa informação torna-se interessante pois haveria uma diminuição dos custos evitando a aquisição de mais transdutores, no entanto, impossibilitaria a bancada de realizar a medição de rendimento em um sistema a quatro fios ou mesmo a três fios se o sistema for equilibrado, tornando-a menos versátil.

6.1.3 Escolha do tipo de instrumento ou sistema de medição

No capítulo 4, foram sugeridas alternativas para medição de potência trifásica, sendo que foram apresentados dois equipamentos ou sistemas para medição. Um dos equipamento sugeridos foi o analisador de potência baseado em processamento digital de sinais e o outro um sistema proprietário (composto pelos transdutores comentados). Nesta seção apresentar-se-a uma discussão acerca da seleção do tipo de instrumento ou sistema de medição que melhor atende aos requisitos expostos no começo deste capítulo.

Instrumentos projetados para aplicações específicas são mais baratos e apresentam menores incertezas de medição [19]. No entanto, alguns fatores fazem com que os essa afirmação não seja tão bem vista neste trabalho. Um dos fatores é a ampla faixa de frequências aqui exigida. Para sinais CC e em 60 Hz, em dissertação anterior, foram alcançados excelentes resultados [19]. No entanto, problemas com capacitâncias parasitas exigiriam nesta aplicação cuidados especiais ao projeto do sistema. Outro fator é que a faixa de medição de tensão e corrente é bastante extensa, sendo necessário, por exemplo, para a medição de corrente um transdutor que medisse desde alguns miliampères até

aproximadamente uma dezena de ampères com baixo nível de incerteza. Instrumentos com uma faixa de medição única não são uma boa opção quando se deseja trabalhar em uma faixa de medição extensa, já que o erro máximo é geralmente especificado de forma relativa, tendo como valor fiducial o valor final da faixa de medição e não o valor medido [19]. No entanto a incerteza de medição poderia ser minimizada se a faixa de medição fosse dividida em faixas menores, de forma que o valor medido estaria mais próximo do valor final de faixa de medição. Porém, seria necessária a multiplexação dos transdutores, o que insere mais uma fonte de erro no sistema de medição e aumenta a complexidade do circuito. Os transdutores da série C da LEM seriam os mais cotados para a solução proposta, pois são transdutores cuja banda de frequência é bastante ampla. Da ordem de 500 kHz para o transdutor de corrente com incerteza de medição da ordem de 0,1% do valor nominal o transdutor modelo CT 25-T se destaca [56]. Entretanto esses transdutores apresentam custo elevado, cerca de 750 dólares americanos, além de necessitarem uma fonte de alimentação simétrica de ± 15 V. Como esses transdutores também apresentam a incerteza de medição relativa ao final da faixa de medição, como sugerido, seria necessária a multiplexação dos transdutores para se ter valores medidos mais próximos do valor nominal, diminuindo a incerteza de medição, mas aumentando o custo final do sistema.

Outro ponto é quanto à isolação do sistema. Ao ser utilizado um resistor *shunt* para medição de corrente ou um divisor resistivo para medição de tensão, haveria a necessidade de isolação entre o sistema de medição e de aquisição. Um circuito isolador que poderia ser utilizado é o que foi proposto pelo autor [19], entretanto, esse circuito integrado utiliza um fonte que gera um sinal modulado de 50 kHz, que insere ruído na mesma frequência do sinal que se deseja medir, sendo assim, descartado para o propósito deste trabalho. Transdutores como a bobina de Rogowski e o transdutor de efeito Hall possuem isolação galvânica, no entanto apresentam problemas como incompatibilidade para a faixa de medição. É o caso especial da bobina de Rogowski, cujas principais aplicações estão na ordem de centenas de ampères [35], o que faz com que sinais de corrente de menor amplitude seja limitada pelo ruído ao qual a bobina está exposta. Já o transdutor de efeito Hall apresenta limitação quanto a sua banda de frequência pelo fato de empregar um circuito eletrônico que limita o processamento em alta frequência. Outro fator é que a tensão Hall de saída é de baixa amplitude, da ordem de (20 a 30) μ V para uma medição magnética de 1 gauss (100 μ T) requerendo um amplificador de baixo ruído, alta impedância de entrada e ganho considerável, o que torna a medição muito suscetível a erros [35], além da sensibilidade a campos

magnéticos externos como também é o caso da bobina de Rogowski.

Os instrumentos comerciais apresentam então, na presente aplicação, vantagens quando comparados ao sistema proprietário, pois esses são projetados para abranger diversas aplicações. Esses instrumentos apresentam características como ampla faixa de medição, isolamento elétrica e contra interferências e ruídos, elevada taxa de aquisição, interface de comunicação e processamento dedicado dos sinais, permitindo que sejam realizados desde cálculos simples até funções complexas. O elevado custo é o principal ponto questionável dos instrumentos comerciais; no entanto, como dito anteriormente, nem sempre um sistema proprietário apresenta as soluções para que possa ser realizada a medição dentro de limites aceitáveis de confiabilidade.

Assim, optou-se por realizar uma pesquisa de mercado para identificar qual instrumento comercial para medição de potência elétrica poderia ser utilizado na bancada em questão.

6.2 Alternativas comerciais de wattímetros eletrônicos

A pesquisa foi direcionada às alternativas comerciais que mais se mostraram adequadas aos requisitos apresentados, na seção 6.1.1, sendo que a característica de maior relevância é, sem dúvida a taxa de aquisição, já que o sinal a ser medido é composto por frequências bastante elevadas. A seguir, serão explorados fabricantes e detalhes de cada tecnologia e ao final será apresentada a seleção mais viável dentre as alternativas propostas.

A pesquisa realizada concentrou-se nos wattímetros eletrônicos dos fabricantes Yokogawa e Zes Zimmer, pois são os que, previamente, melhor atendem aos requisitos apresentados.

A Yokogawa exhibe uma gama bastante extensa de produtos para a medição de potência elétrica, em comparação com outros fabricantes de analisadores de potência ou wattímetros. A Yokogawa apresenta duas séries de equipamentos com soluções para a medição de potência elétrica que são os wattímetros da série WT e PZ. Dessas séries, os equipamentos que destacam-se na medição de potência com elevados índices harmônicos são os wattímetros WT1600, WT3000 e PZ4000.

A Zes Zimmer, empresa alemã, apresenta uma linha de equipamentos dedicados à medição e análise de potência. São quatro os wattímetros que compõe a série de equipamentos destinados a esse fim sendo esta série é denominada LMG. Dentre os instrumentos, um apresenta como diferencial a elevada banda de frequência que é da ordem de 10 MHz, o que o torna um equipamento em potencial para ser utilizado neste trabalho.

As características dos instrumentos da Yokogawa bem como da Zes Zimmer são apresentadas a seguir.

6.2.1 *Wattímetro WT1600*

O diferencial deste equipamento [57], segundo seu fabricante, é o projeto para realizar medições de correntes de amplitudes bastante baixas, da ordem de 10 mA e também de correntes elevadas, ou seja, até 50 A sendo que os dois módulos podem ser instalados juntos no equipamento. Outro ponto interessante é que no equipamento podem ser utilizados até seis módulos, sendo possível a medição de dois sistemas trifásicos. A incerteza para a frequência de base ² é de: $\pm (0,1\% \text{ da leitura} + 0,05\% \text{ da faixa})$ para potência elétrica. A largura da faixa de frequência vai desde sinais CC e CA de 0,5 Hz até 1 MHz. Possui interface de comunicação GPIB ou RS 232 como padrão.

6.2.2 *Wattímetro WT3000*

Este wattímetro [58] apresenta como principal característica a baixa incerteza de medição para a frequência de base ³: $\pm (0,02\% \text{ da leitura} + 0,04\% \text{ da faixa})$ para potência elétrica. Realiza medições tanto CC quanto CA, sendo que para sinais alternados a faixa de frequências vai desde 0,1 Hz até 1 MHz. A faixa de medição de tensão deste instrumento é de (15 a 1000) V e de corrente de (5 a 30) A. É modular como os demais wattímetros dessa série podendo então realizar medições a quatro fios, pois podem ser instalados até quatro módulos para medição de tensão e corrente. Possui uma memória interna de 30 MB armazenada em um PCCard ⁴ e um conversor (A/D) de 16 bits. Como interface de comunicação, tem-se por padrão o GPIB. Outras interfaces como RS-232, ethernet ou USB são itens opcionais. Outros itens opcionais, o que é maioria neste equipamento, é a medição de frequência, análise harmônica, cálculo de fase através da função delta, além da avaliação da potência mecânica por meio de um módulo de medição de rotação e torque.

²A incerteza base é a incerteza de medição para a frequência da rede, ou seja, para este wattímetro é de 45 a 66 Hz.

³Frequência base: 45 a 66 Hz

⁴PCCard é um padrão de barramento desenvolvido pela (PCMCIA) que pode ser utilizado como memória, placas de fax modem ou discos de armazenamento e outros dispositivos de interfaces variadas.

6.2.3 *Wattímetro PZ4000*

Em comparação aos wattímetros apresentados anteriormente, este [31] é o que possui a maior banda de frequência, realizando medições em sinais alternados de até 2 MHz. Outra característica é a sua alta taxa de aquisição que é de até 5 MSA/s, o que faz com que a forma de onda de alta frequência seja mais fielmente reconstruída. Apresenta ainda como padrão funções para análise harmônica e FFT, além de funções variadas para análise de forma de onda. A incerteza base desse equipamento estende-se de 45 até 1 kHz e é de $\pm (0,1\% \text{ da leitura} + 0,025\% \text{ da faixa})$ para potência elétrica. Possui também 4 módulos para medição de tensão e corrente, sendo que pode ser utilizado duas faixas distintas de 5 A ou 20 A, o que melhora a incerteza de medição por ter transdutores apropriados para cada faixa. Como os demais instrumentos também tem um módulo para avaliação do rendimento, já que possui entradas para medição de rotação e torque, no entanto, é um item opcional como nos demais equipamentos. As interfaces de comunicação GPIB e RS232 são padrão neste equipamento.

6.2.4 *Analizador de potência LMG500*

Este analisador [59] possui oito canais para medição dos sinais de tensão e corrente. Sua incerteza para potência na frequência base ⁵ é de $\pm (0,015\% \text{ da leitura} + 0,01\% \text{ da faixa})$. Apresenta uma elevada taxa de aquisição, na ordem de até 3 MSA/s para cada canal, além de uma banda de frequência que mede tanto sinais CC quanto CA de 0,05 Hz até 10 MHz. Este equipamento conta com funções para análise harmônica e de interharmônicas e medição de transientes de frequência bastante elevada como *flickers* e *gaps*. Possui interface de comunicação RS232 como padrão mas podem ser adquiridos outros padrões de interfaces como GPIB, Ethernet ou USB.

A tabela 6.2 resume as principais características dos wattímetros pesquisados.

⁵Faixa de frequência para a incerteza base para esse equipamento é de 45 a 65 Hz.

Tabela 6.2: Comparação dos equipamentos de medição de potência elétrica

	Yokogawa/WT1600	Yokogawa/WT3000
Fabricante/Modelo	sim	sim
Medição de potência CA	sim	sim
Medição de harmônicas	sim	sim (opcional)
Erro máximo (AC)	0,1% VI + 0,05% FFM	0,02% VI + 0,04% FFM
Temperatura de validade do erro máximo	23 ± 3°C	23 ± 3°C
Validade das especificações	3 meses	6 meses
Faixa de medição da tensão	1..5/3/6/10/15/30/60/100/150/300/600/1000 [V] (FC=3)	15/30/60/100/150/300/600/1000 [V] (FC=3)
	0,75/1,5/3/5/7,5/15/30/50/75/150/300/500 [V] (FC = 6)	7,5/15/30/50/75/150/300/500 [V] (FC = 6)
Faixa de medição da corrente	Transdutor 5 A 10/20/50/100/200/500 [mA] 1/2/5 [A] (FC = 3) 5/10/25/50/100/250/500 [mA] 1/2,5 [A] (FC= 6)	Transdutor 2 A 5/10/20/50/100/200/500 [mA] 1/2 [A] (FC= 3) 2,5/5/10/25/50/100/250/500 [mA] 1 [A] (FC = 6)
	Transdutor 50 A 1/2/5/10/20/50 [A] (FC = 3) 0,5/1/2,5/5/10/25 [A] (FC = 6)	Transdutor 30 A 0,5/1/2,5/10/20/30 [A] (FC=3) 250/500 [mA] 1/2/5/10/20/30 [A] (FC = 6)
Faixa de frequência	CC (0,5 Hz a 1 MHz)	CC (0,1 Hz a 1 MHz)
Taxa de aquisição	Não especificado	Não especificado
Resolução e tempo de conversão do conversor A/D	16 bits, aproximadamente 5 μ s	16 bits, aproximadamente 5 μ s
Interface de comunicação	GPiB ou RS232	GPiB (padrão) RS232, USB ou Ethernet (opcionais)
Número de canais	6	4
Isolação	sim	sim

CONTINUAÇÃO	
Fabricante/Modelo	Zes Zimmer LMG500
Medição de potência CA	sim
Medição de harmônicas	sim
Erro máximo (AC)	0,015% VI + 0,01% FEM
Temperatura de validade do erro máximo	23 ± 3 °C
Validade das especificações	12 meses
Faixa de medição da tensão	3/6/12,5/25/60/130/250/400/600/1000 [V]
Faixa de medição da corrente	Transdutor 5 A 100/200/400 [mA] /1/2/4/10 [A] pico
	Transdutor 20 A 1/2/4/10/20/40/100 [A] pico
Faixa de frequência	CC (0,05 Hz a 10 MHz)
Taxa de aquisição	até 3 MSa/s
Resolução e tempo de conversão do conversor A/D	Não especificado
Interface de comunicação	RS232 (padrão), GPIB, USB e Ethernet (opcional)
Número de canais	8
Isolação	sim

6.3 Análise da incerteza de medição através de simulação

A descrição dos equipamentos comerciais e a tabela 6.2 mostra a grande semelhança existente entre os modelos apresentados, sendo que numa primeira análise, todos os equipamentos atenderiam ao objetivo proposto.

No entanto, a comparação acima destacou as características gerais dos equipamentos, mesmo se observada a incerteza de medição, pois como o sinal a ser medido, tanto de tensão quanto de corrente, contém harmônicos que não estão compreendidos somente na faixa de incerteza de medição base, ou seja, entre (45 e 65) Hz. Para que o objetivo do trabalho seja alcançado, existe a necessidade de medição com baixos níveis de incerteza. Assim, analisou-se os equipamentos apresentados acima quanto à incerteza de medição para diferentes faixas de frequências de acordo com os manuais dos fabricantes.

6.3.1 Simulação sem conteúdo harmônico

A incerteza de medição apresentada nos catálogos dos fabricantes obedece, em sua grande maioria, um padrão, em que esta é composta de uma parcela do valor lido ou medido e outra parcela do valor da faixa de medição. Ou seja, a incerteza é dada como: $\pm(\% \text{ da leitura} + \% \text{ da faixa})$, e que também depende da faixa de frequência em que se encontra o sinal a ser medido. Como os analisadores apresentados são equipamentos que medem tensão e corrente, é a partir desses valores discretizados que se torna possível o cálculo da potência ativa, reativa, aparente, $\cos\phi$. Os valores de incerteza de medição em termos relativos, em geral, são os mesmo para os sinais de tensão e corrente; já para a potência são dados valores diferentes. Então, para avaliação da incerteza de medição é necessário que se tenha o valor medido da potência, bem como o valor da faixa de medição, que é a multiplicação das faixas de medição dos valores de tensão e corrente, pois os fabricantes não disponibilizam uma faixa de potência propriamente dita.

Para a simulação foram estabelecidos valores de potência arbitrários dentro de uma faixa em que: o valor nominal da tensão de alimentação do motor determinasse a faixa de medição da tensão e, a faixa de medição da corrente fosse uma função dos valores de potência e tensão.

Por exemplo, o motor EC45 tem uma tensão de alimentação nominal de 24 V e supondo que o valor de potência medido seja de 10 W, o valor da faixa de corrente seria determinado pela equação 6.2 [27]:

$$I = \frac{P}{V} = \frac{10}{24} = 0,416A \quad (6.2)$$

em que o resultado indica qual a faixa deve ser selecionada. No caso deste exemplo, para medir uma corrente de 0,416 A com o wattímetro WT1600, a faixa de corrente adequada seria de 500 mA. Já para medir uma tensão de 24 V, a faixa de tensão de 30 V seria adequada. Dessa forma, o valor da incerteza de medição, de acordo com o proposto estabelecido neste trabalho, pode ser calculado da seguinte maneira utilizando os valores do exemplo:

$$\pm(\% \text{ do valor medido} + \%(\text{faixa de tensão} \cdot \text{faixa de corrente}))$$

ou;

$$\pm(\% \text{ de } 10 \text{ W} + \%(30 \text{ V} \cdot 0,5 \text{ A}))$$

$$\pm(\% 10 \text{ W} + \% 15 \text{ W})$$

Uma ampla faixa de medição de potência foi selecionada para a simulação com o objetivo de se analisar o comportamento da incerteza de catálogo em um número maior de valores possíveis, sendo que foram escolhidos valores de potência entre (10 e 720) W. A tabela 6.3, apresenta uma parte da tabela total, ou seja, apenas seis pontos de medição de potência elétrica e suas respectivas faixas de corrente e tensão.

Tabela 6.3: Valores das faixas de tensão e corrente utilizadas na simulação para o wattímetro WT1600

Tensão nominal: 24 V – Valor da faixa de tensão: 30 V		
Potência medida	Corrente calculada	Faixa de corrente
10	0,42	0,5
20	0,83	1,0
30	1,25	2,0
40	1,67	2,0
50	2,08	5,0
60	2,50	5,0

Da tabela completa, foram construídos os gráficos de comparação. Na figura 6.3 se vê a simulação para os quatro wattímetros apresentados na seção 6.2.

O gráfico apresenta dois eixos: no círculo externo, são apresentados

os valores simulados de potência medida e no eixo central, são apresentados os valores de incerteza de medição em percentuais relativo ao valor medido. Cada wattímetro é representado por uma cor sendo que para um mesmo wattímetro tem-se as faixas de frequências nas quais são definidas as incertezas de medição. Se pode observar ainda que nas linhas mais externas, para cada wattímetro, estão representadas as maiores frequências e nas mais internas as frequências menores.

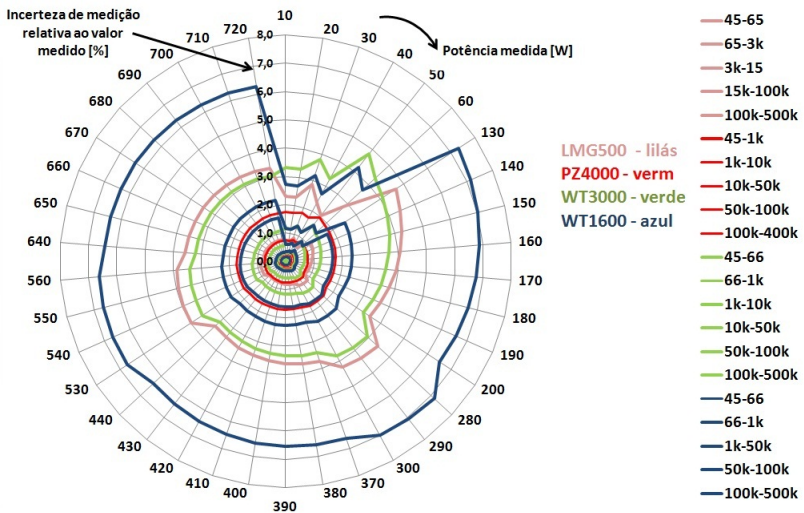


Figura 6.3: Gráfico com todos wattímetros

Analisando o gráfico da figura 6.3 pode-se observar que:

- os wattímetros apresentam comportamento semelhante quanto a incerteza de medição quando há uma mudança na faixa do valor medido. Para o wattímetro WT1600, por exemplo, observa-se que há um aumento da incerteza de medição quando a potência medida passa de 60 W para 130 W para a faixa de frequência entre (100 e 500) kHz;
- o aumento da incerteza de medição se dá também nas mudanças de faixa do valor medido pelo fato dos saltos na faixa de corrente. No wattímetro LMG500 por exemplo, quando o valor da faixa de corrente passa de 5 A para 10 A, ou quando há mudanças bruscas nos valores medidos de potência, de 200 W para 280 W, por exemplo, mesmo

estando na mesma faixa de corrente, ou seja, 20 A;

- o wattímetro WT1600 apresenta as maiores incertezas de medição em praticamente todas as faixas de frequências, comparado aos outros instrumentos;
- quando a frequência do sinal medido é elevada, a incerteza de medição é bastante significativa, apresentando valores percentuais acima dos 7% do valor medido no caso do wattímetro WT1600 e acima dos 4% do valor medido para os wattímetros LMG500 e WT3000 para valores de frequência compreendidos entre (100 e 500) kHz;
- o wattímetro PZ4000 apresenta os melhores resultados para frequências mais elevadas, pois como pode ser visto, na faixa de frequência de (100 a 400) kHz a incerteza de medição é inferior a 2% do valor medido (apesar desse valor de incerteza não ser um valor considerado ideal).

Desta análise preliminar, observou-se que o wattímetro WT1600 não é recomendado para medição de potência elétrica em altas frequências se levado em consideração a incerteza de medição. Como os valores de incerteza para as faixas elevadas de frequência é bastante alta, torna-se difícil quantificar no gráfico da figura 6.3 os valores de incerteza abaixo de 1% do valor medido. Para facilitar a análise, no gráfico da figura 6.4 estão representadas as faixas de frequências consideradas baixas, isto é, as faixas cujos valores compreendem a frequência base (45 a 66) Hz até 15 kHz para o wattímetro LMG500 e até 10 kHz para o wattímetros PZ4000 e WT3000. O wattímetro WT1600 não foi considerado pelo fato de estar fora dos níveis considerados aceitáveis para realização da medição.

Da figura 6.4, observa-se que:

- o wattímetro LMG500 apresenta os menores valores de incerteza de medição para as faixas de frequência base (45 a 65) Hz, sendo superior aos outros wattímetros no quesito incerteza de medição também na faixa de frequência até 3 kHz;
- o segundo melhor wattímetro na frequência base é o WT3000, que na faixa de frequência base (45 a 66) Hz apresentou incertezas de medição inferiores a 0,15% do valor medido;
- o wattímetro PZ4000 apresentou os piores resultados nesta comparação para as frequências de base, no entanto, apresenta os melhores resultados para a faixa mais elevada de frequência, isto é, de (1 a 10) kHz.

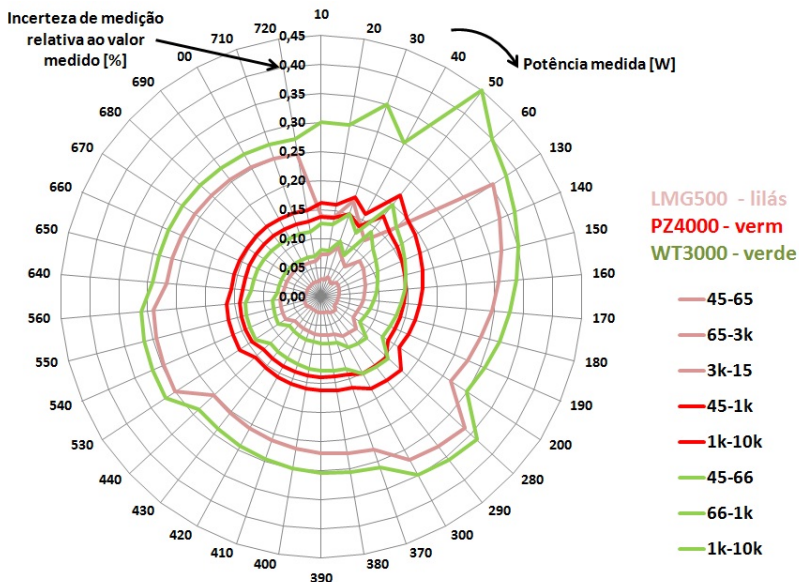


Figura 6.4: Gráfico para faixas de frequências até 15 kHz

Como a medição a ser realizada tem presente no sinal um elevado conteúdo harmônico, na figura 6.5 a análise é estendida para faixa de frequências mais elevadas, ou seja, frequências acima das que foram apresentadas no gráfico da figura 6.4. Para os wattímetros LMG500 e WT3000 foram analisadas as faixas até 500 kHz e para o wattímetro PZ4000 até a frequência de 400 kHz, que é praticamente dez vezes a frequência de chaveamento do conversor de frequência.

Com a representação das incertezas de medição para faixas de frequências mais elevadas, observou-se que:

- o wattímetro PZ4000 apresentou os melhores resultados mesmo para a faixa mais elevada de frequência (100 a 400) kHz onde a incerteza de medição ficou inferior a 2% do valor medido, além do melhor resultado para a faixa de (10 a 50) kHz, onde obteve-se incertezas inferiores a 0,5% do valor medido;
- mesmo o wattímetro LMG500 não apresentando valores intermediários de faixas de frequências, em que o menor intervalo da faixa de

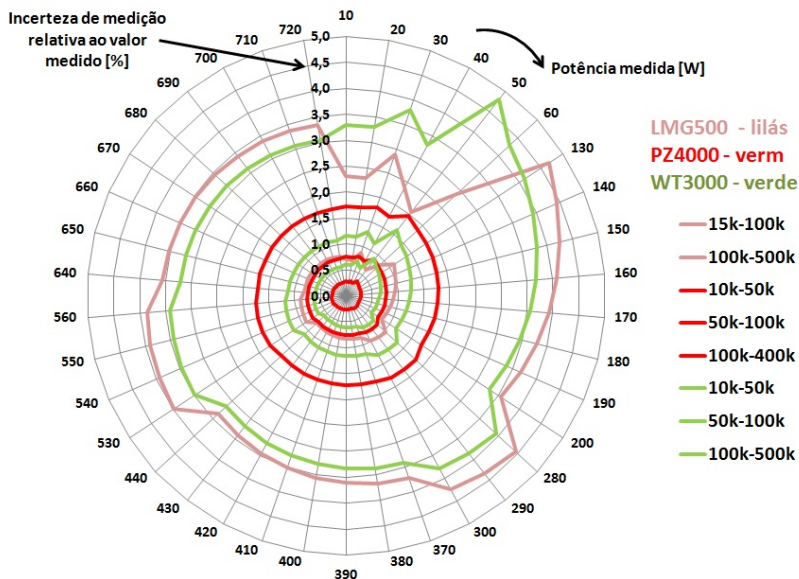


Figura 6.5: Gráfico para faixas de frequências até 500 kHz

frequência estende-se até 100 kHz, este ainda apresentou melhores resultados em relação ao wattímetro WT3000, onde a incerteza de medição para a faixa de (50 a 100) kHz é superior a 1,5% do valor medido.

No entanto, os sinais considerados nesta análise não apresentavam conteúdo harmônico, ou seja, foram considerados sinais senoidais puros nas faixas de frequências propostas pelos fabricantes. Para se ter uma análise mais realística do comportamento da incerteza de medição utilizou-se os dados da aquisição realizada com o oscilógrafo DL750 como foi descrito no capítulo 5, seção 5.3.

6.3.2 Simulação com conteúdo harmônico

Os dados da aquisição realizada no levantamento do conteúdo harmônico relatada no capítulo 5 apresentam o real comportamento das formas de onda de tensão e corrente aplicadas aos motores EC45 e EC60.

E para realizar a simulação aqui proposta, foram utilizados os mesmos dados do capítulo 5. Assim, depois de adquiridos os dados, estes foram tratados utilizando um algoritmo desenvolvido em LabVIEW no âmbito desta dissertação, cuja função era identificar amplitude, frequência e fase das frequências fundamental e harmônicas dos sinais de tensão e corrente. Depois de identificados os parâmetro acima, pode-se executar o cálculo para determinar a potência elétrica consumida, além da análise da incerteza de medição, já que se dispunha de cada amplitude harmônica contida nos sinais adquiridos.

Para a condição 2500 rpm e 172 mN.m (POT0000) os dados de frequência, amplitude e fase nas frequências harmônicas dos sinais de corrente e tensão para o motor EC45 estão apresentados na tabela 6.4:

Tabela 6.4: Valores de frequência, amplitude e fase para 2500 rpm/172 mN.m – Motor EC45

POT0000 – 2500 rpm/172 mN.m					
Corrente			Tensão		
Freq [Hz]	Amp [A]	Fase [°]	Freq [Hz]	Amp [V]	Fase [°]
41,65	4,553	178,31	41,64	17,203	149,24
49958,17	0,115	-66,40	49958,19	2,572	15,78
50041,51	0,116	101,23	50041,50	2,575	136,95
99958,10	0,031	-63,81	99958,10	1,051	28,14
100041,48	0,031	115,54	100041,49	1,054	148,77

A partir dos dados da tabela 6.4 pode-se calcular as potências harmônicas e também o valor da potência ativa total, em que se assumiu um sistema equilibrado, portanto, multiplicando-se o valor da potência medida de uma das fases pelo fator $\sqrt{3}$, de acordo com a equação 3.12.

Uma observação importante a ser destacada neste instante é que na frequência fundamental, tanto da corrente quanto da tensão (primeira linha de dados da tabela), é onde está concentrada a maior parte da energia do sinal. Assim, a análise a ser realizada levará em consideração essa distribuição de energia dos sinais e tanto a potência quanto o erro ⁶ calculados serão ponderados, ou seja, o valor da potência de cada harmônica e o valor do erro

⁶Neste trabalho arbitrou-se chamar de incerteza de medição os dados fornecidos pelos fabricantes dos equipamentos. Já erro de medição é o valor calculado com base nas especificações, no caso, com base nas incertezas de medição.

harmônico serão calculados de acordo com o valor percentual em relação à potência ativa total, como será mostrado a seguir.

Desta forma, a potência ponderada foi calculada de acordo com a relação existente entre a potência harmônica e a potência ativa total, conforme equação 6.3. A tabela 6.5 apresenta os valores de potência para as frequências harmônicas além dos valores de potência percentual e ponderada.

$$P\% = \frac{P_{harm}}{P_{total}} \times 100 \quad (6.3)$$

Em que:

$P\%$: potência percentual;

P_{harm} : potência harmônica;

P_{total} : potência ativa total.

Tabela 6.5: Potência ativa nas frequências harmônicas para 2500 rpm/172 mN.m – Motor EC45

2500 rpm/172 mN.m		
Potências harmônicas [W]	Potência %	Potência ponderada
67,823	99,661	9,97E-01
0,097	0,143	1,43E-03
0,106	0,156	1,56E-03
0,015	0,022	2,18E-04
0,013	0,019	1,86E-04
$P_{total} = 68,05$		

Com os valores das potências harmônicas pode-se calcular, para cada faixa de frequência a incerteza de medição, levando em conta as especificações dos fabricantes dos wattímetros. Na tabela 6.6, se tem as especificações de incerteza de medição para a potência elétrica do wattímetro PZ4000 somente nas faixas das frequências harmônicas compreendidas pelo ensaio realizado na situação 2500 rpm/172 mN.m (POT0000).

Como dito anteriormente na seção 6.3.1 e também como pode ser observado na tabela 6.6, a incerteza de medição é uma função tanto do valor lido, quanto da faixa de medição de potência, além da faixa em que a frequência

Tabela 6.6: Incertezas de medição do wattímetro PZ4000 nas faixas de frequência para a situação POT0000

Frequências	Incerteza para potência
$10 \text{ Hz} \leq f < 45 \text{ Hz}$	$\pm(0,2\% \text{ of rdg}^* + 0,025\% \text{ of rng}^{**})$
$10 \text{ kHz} < f \leq 50 \text{ kHz}$	$\pm(0,2\% \text{ of rdg} + 0,05\% \text{ of rng})$
$50 \text{ kHz} < f \leq 100 \text{ kHz}$	$\pm(0,6\% \text{ of rdg} + 0,1\% \text{ of rng})$
$100 \text{ kHz} < f \leq 200 \text{ kHz}$	$\pm(1,5\% \text{ of rdg} + 0,15\% \text{ of rng})$

*reading: leitura

**range: faixa de medição

harmônica se encontra. Assim, para o cálculo da incerteza de medição o valor lido é dado pela amplitude do sinal na frequência harmônica e a faixa de medição é dada pela multiplicação das faixas dos sinais de tensão e corrente. A tabela 6.7 apresenta os valores de erro máximo e erro máximo ponderado. O erro máximo ponderado foi calculado conforme equação 6.4:

$$E_{max_{pond}} = E_{max_{harm}} \cdot P_{harm_{pond}} \quad (6.4)$$

Em que:

 $E_{max_{pond}}$: erro máximo ponderado; $E_{max_{harm}}$: erro máximo harmônico; $P_{harm_{pond}}$: potência harmônica ponderada.

Tabela 6.7: Erro máximo calculado para o wattímetro PZ4000 na condição POT0000

Erro máximo [W]	Erro máximo ponderado [W]
0,211	2,10E-01
0,150	2,14E-04
0,301	4,70E-04
0,300	6,53E-05
0,450	8,38E-05
	$E_{max_{total}} = 0,21 \text{ W}$

No apêndice B, se tem as tabelas com os valores de frequência, amplitude e fase para os sinais de tensão e corrente, além dos valores calculados de potência harmônica e ponderada e ainda os erros máximos harmônicos e erros máximos harmônicos ponderados para os wattímetros PZ4000, WT3000 e LMG500 para os ensaios realizados com o motor EC45 nos pontos definidos anteriormente no capítulo 5, tabela 5.2.

As tabelas C.1 e C.2 no apêndice C trazem o resumo dos resultados, ou seja, a potência ativa total, o erro máximo total e o erro máximo percentual da simulação realizada para toda a faixa de medição de potência em que foi realizado o ensaio com o motor EC45 e EC60.

Na tabela 6.4 e nas tabelas do apêndice B observa-se que está concentrada na frequência fundamental a maior parte da potência do sinal. Por exemplo, para a situação 2500 rpm e 172 mN.m (POT0000), tem-se na fundamental 99,7% da potência total do sinal. Quando observa-se a tabela 6.7 na coluna “Erro máximo [W]” se vê que o erro torna-se maior quanto maior for a faixa de frequência (figura 6.6), pois nas frequências mais elevadas as especificações são piores que nas faixas iniciais fazendo com que o erro torne-se bastante elevado nos fins de faixa. No entanto, essa avaliação não leva em consideração que a amplitude da potência do sinal nas faixas mais elevadas de frequência é bastante diminuída em relação à amplitude da potência encontrada na frequência fundamental. Assim o real comportamento da incerteza de medição não seria retratado, pois não se estaria levando em consideração que as amplitudes harmônicas são bastante reduzidas, em comparação a fundamental, para as outras faixas de frequência. Por essa razão o erro máximo total não é o somatório dos valores dos erros harmônicos, e sim dos erros harmônicos ponderados, pois como a maior parte da potência do sinal está na fundamental os erros devem ser atenuados devido as amplitudes das frequências mais elevadas serem menores.

Como consequência deste comportamento, quanto melhor as especificações do wattímetro nas faixas mais baixas, ou seja, aquelas especificações próximas da frequência base, melhor será o resultado da medição, como pode ser visto no apêndice C na tabela C.1 em que o wattímetro LMG500 apresenta os melhores resultados em comparação aos wattímetros PZ4000 e WT3000, mesmo quando a frequência da fundamental está em aproximadamente 250 Hz.

No entanto, devido as excelentes características do wattímetro PZ4000 para frequências elevadas o LIAE adquiriu tal instrumento já que trata-se de um equipamento único e de grande relevância quando se fala em medição de potência elétrica em alta frequência.

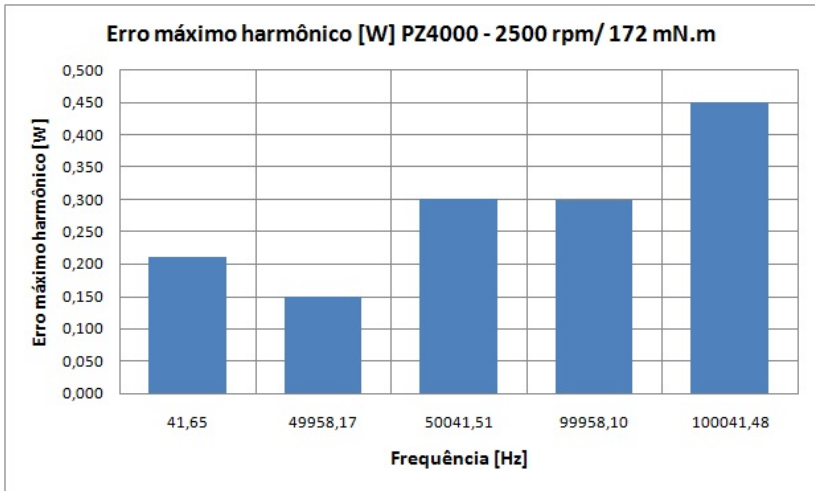


Figura 6.6: Erro máximo harmônico POT0000

6.4 Comparação experimental entre dois wattímetros

Além dos wattímetros apresentados na seção anterior, outro instrumento que é bastante conhecido e amplamente difundido na comunidade metrológica que trata de medição de potência elétrica é o wattímetro da Yokogawa WT210/230 [60]. O wattímetro WT210 realiza medições monofásicas e o modelo WT230 atende as necessidades de medição de um sistema trifásico. Pode-se dizer que este é um equipamento bem mais simples que os demais apresentados, pois suas especificações de incerteza de medição abrangem sinais que vão somente até a ordem de 100 kHz, que é bastante inferior em comparação com os outros instrumentos. Além disso não apresenta uma tela tão sofisticada quanto as demais que são capazes de mostrar as formas de onda dos sinais que estão sendo medidos. Opções de interface de comunicação, assim como algumas funções matemáticas também são mais escassas, assim como também o número de canais de medição e faixas de tensão e corrente de entrada.

Porém, como havia a disponibilidade de medição com ambos wattímetros, foi realizada uma comparação experimental entre as medições realizadas com os wattímetros WT230 e PZ4000 (figura 6.7).

A ligação elétrica de cada wattímetro em separado é realizada con-

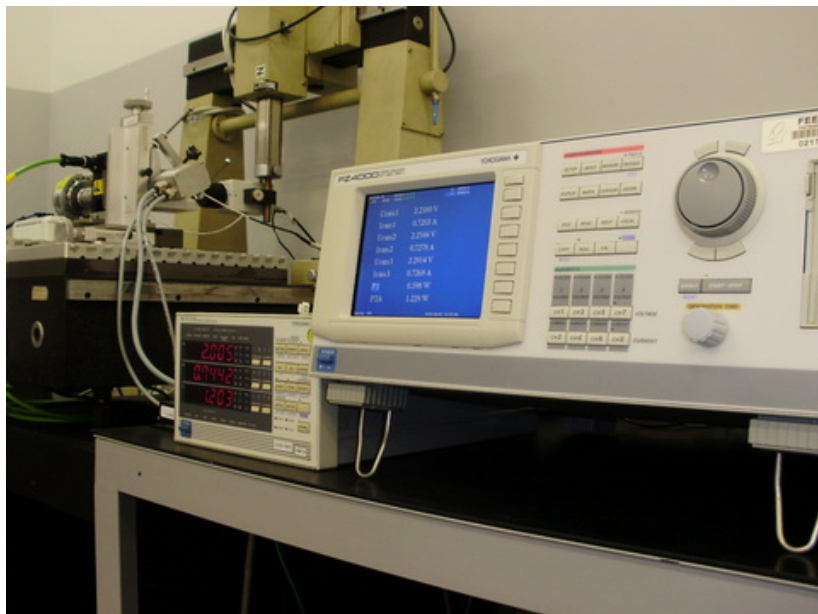


Figura 6.7: Bancada com os wattímetros WT230 e PZ4000

forme indicação do fabricante de acordo com o manual do usuário. Mas como é desejado que o ensaio seja realizado simultaneamente entre os dois equipamentos, a ligação elétrica entre os dois wattímetros foi realizada conforme a figura 6.8 em que os amperímetros dos dois equipamentos estavam em série e os voltmímetros em paralelo. Os amperímetros do wattímetro WT230 estão indicados pela letra “A” e os voltmímetros pela letra “V”, já os amperímetros do PZ4000 estão indicados pela letra “I” e os voltmímetros pela letra “U”. Observa-se também que os amperímetros dos dois equipamentos foram ligados antes dos voltmímetros, pois as impedâncias de entrada dos voltmímetros poderiam inserir erros de medição, já que por ter maior impedância, a queda de tensão sobre essas entradas poderia ser significativa.

Já com a ligação elétrica providenciada, foi necessário inserir no software de configuração e controle da bancada a parte de configuração e aquisição correspondente ao wattímetro PZ4000. Além disso, foram inseridos no software os dados medidos para que no relatório final fosse mantido o padrão de apresentação dos resultados definido no trabalho de mestrado [4]

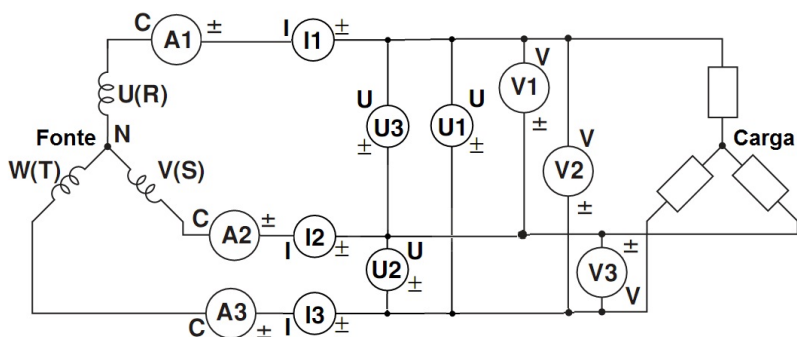


Figura 6.8: Esquema elétrico de ligação entre os wattímetros PZ4000 e WT230. Adaptado de [31] e [60]

anteriormente realizado na mesma bancada.

Os pontos de medição em que os ensaios foram realizados são os mesmos apresentados na tabela 6.1 para o motor EC45 e conforme a tabela 6.8 para o motor EC60, sendo que todos os ensaios foram realizados no modo RF. Para cada ponto de carga foram adquiridas 10 amostras, sendo que cada amostra era composta de 1000 pontos a uma taxa de aquisição 1 kSa com um intervalo de 500 ms entre cada amostra, conforme figura 6.9. O procedimento de medição utilizado foi descrito anteriormente por Souza Neto (2009) [4] que também especifica a temperatura externa do motor. Essa temperatura deve ser condicionada a um valor específico que depende do modelo do mesmo, pois tem-se como objetivo submeter o motor sempre às mesmas condições térmicas para o início do ensaio.

A figura 6.10 apresenta o resultado de um ensaio completo para potência elétrica para medição realizada com os wattímetros WT230 e PZ4000 para os pontos de carga da tabela 6.1 do motor EC45. Do gráfico pode-se observar que o resultado de ambos wattímetros são muito próximos, sendo que os resultados praticamente sobrepõem-se durante todo o ensaio. Na figura 6.11, tem-se amostrados apenas os cinquenta primeiros pontos de medição, onde percebe-se que a leitura dos dois equipamentos de medição são bem próximas. Já na figura 6.12 são apresentados os resultados do ensaio completo com a curva da diferença percentual da potência elétrica medida entre os dois wattímetros.

Tabela 6.8: Pontos de carga para o motor EC60 para o ensaio RF

	Frequência rotacional [rpm]					
	3500	3000	2500	2000	1500	1000
Torque [mN.m]	497	497	497	497	478	497
	415	417	420	420	401	420
	333	337	344	344	325	344
	251	258	267	267	248	267
	169	178	191	191	172	191
	87	99	115	115	96	115

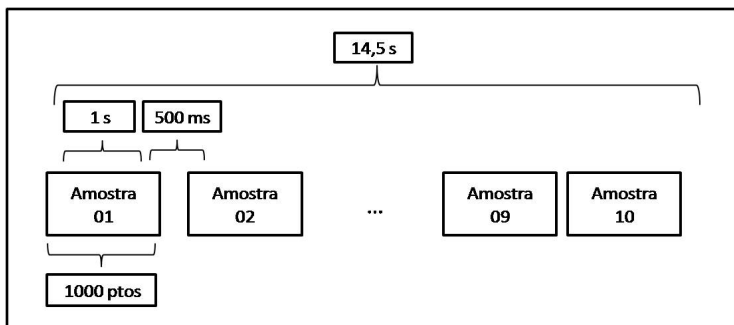


Figura 6.9: Ciclo de medição

Da figura 6.10 pode-se observar o que foi discutido anteriormente quando comentado sobre a influência da potência presente na frequência fundamental em relação à potência das demais frequências harmônicas. Mesmo o wattímetro WT230 não apresentando uma banda de frequência para aquisições em alta frequência, este fator não se torna predominante pois a amplitude das demais frequências harmônicas são praticamente inexpressivas frente à amplitude da frequência fundamental.

A mesma diferença percentual reflete-se no gráfico do rendimento, figura 6.13, para o motor EC45 medido com os wattímetros WT230 e PZ4000. Percebe-se que a diferença percentual para o rendimento medido com os dois wattímetros é um pouco mais acentuada se comparada somente à análise realizada para a potência elétrica, já que o rendimento conta ainda com a influência do valor da potência mecânica.

Na figura 6.12 tem-se que a diferença entre os resultados acentuam-se

depois da metade do ensaio, chegando a aproximadamente 3% no final do mesmo. A princípio tinha-se a expectativa de que essa diferença mais acentuada no final do ensaio estivesse relacionada à temperatura do motor, pois do início até o fim do ensaio existe uma variação de temperatura. Mesmo se o ensaio for iniciado na temperatura estabelecida no procedimento, pelo fato de não haver um controle atuando sobre essa grandeza, a temperatura do motor tende a sofrer uma variação. Para tanto, um ensaio foi realizado de maneira inversa, ou seja, os pontos do final do ensaio foram trocados pelos pontos iniciais, para verificar se a diferença medida na potência elétrica ocorreria se a temperatura do motor estivesse mais próxima daquela estabelecida no procedimento de ensaio como temperatura inicial para os pontos de menor potência elétrica. Na figura 6.14 são apresentados os resultados do ensaio com a diferença percentual quando a ordem dos pontos de medição do ensaio foram trocados.

Observou-se da figura 6.14 que a diferença percentual se manteve nos dois ensaios, tanto com a frequência rotacional iniciando em 15000 rpm quanto com a frequência rotacional iniciando em 2500 rpm. Assim, o comportamento observado pode ser devido à diminuição da carga durante o ensaio, pois quanto menor a carga, mais longe do ponto ótimo de operação do motor e assim, maior serão as perdas e variações devido as impedâncias. Outra parcela dessa variação é também devido as perdas mecânicas que foram observadas na variação do torque como relato por Souza Neto (2009) [4].

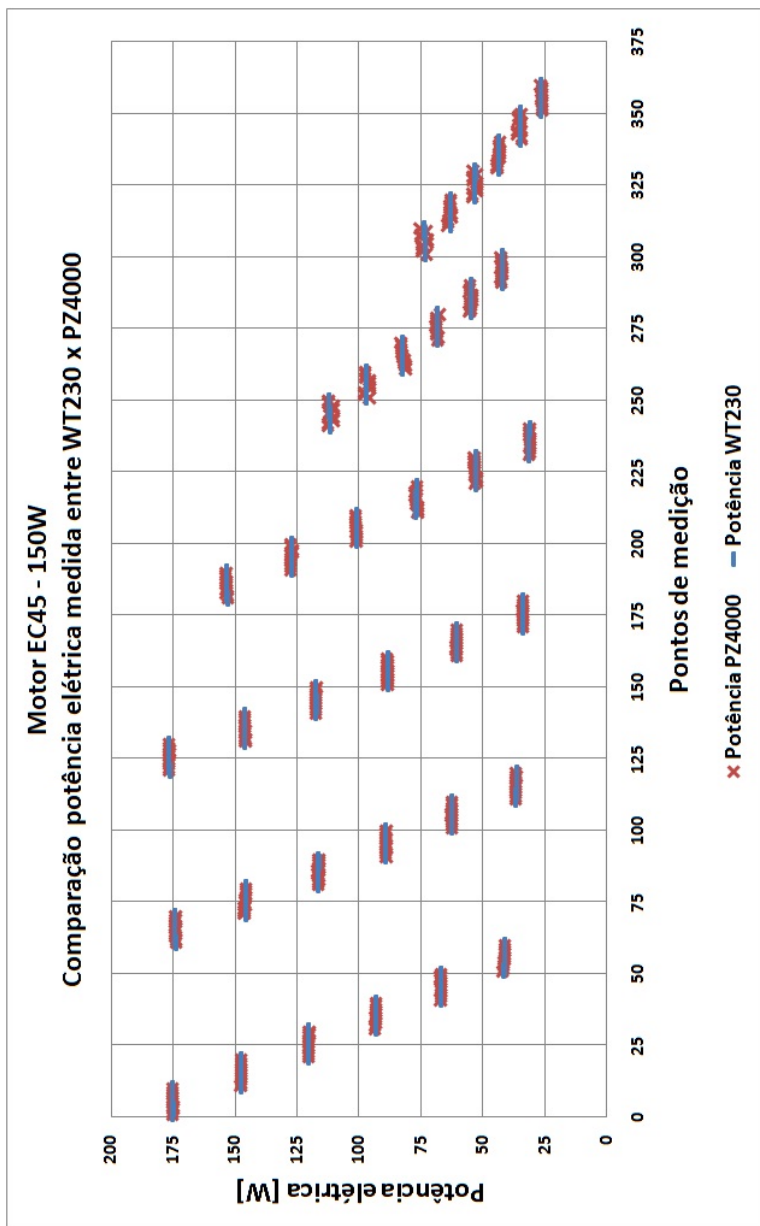


Figura 6.10: Potência elétrica para o motor EC45 medidos com wattímetro PZ4000 e WT230

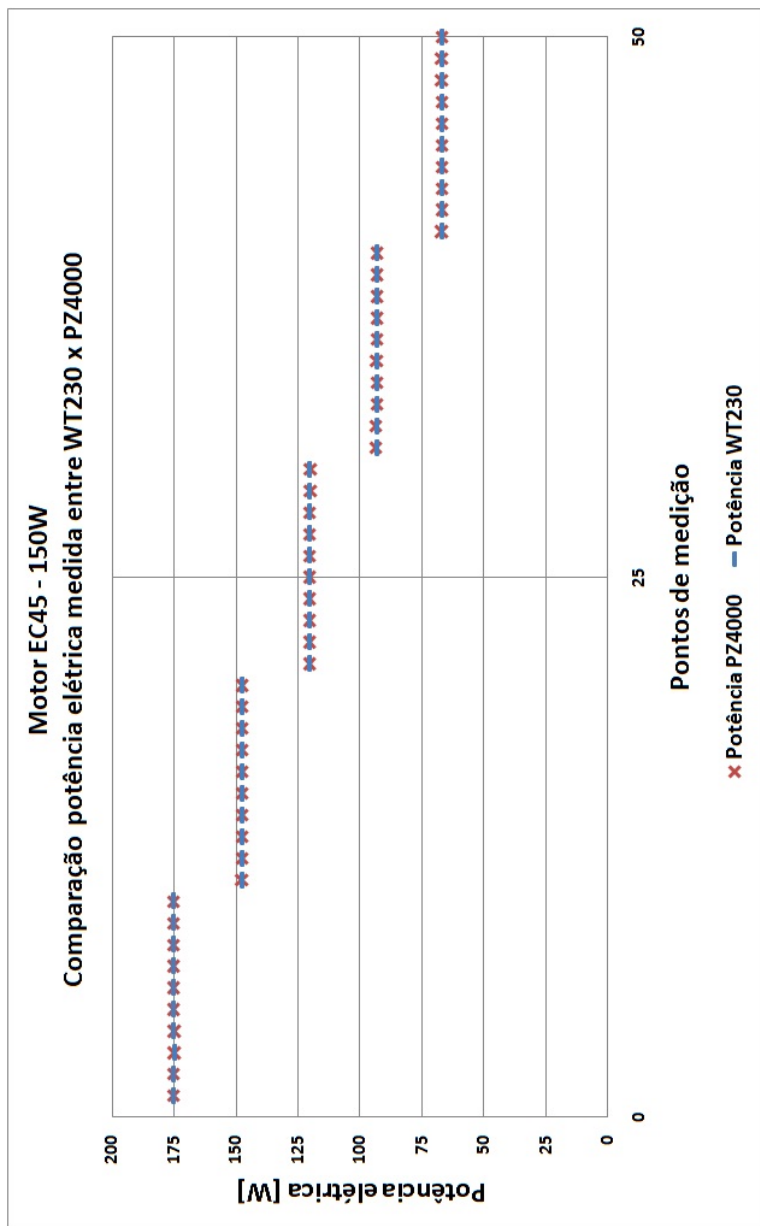


Figura 6.11: 50 primeiros pontos de potência elétrica para o motor EC45 medidos com wattímetros PZ4000 e WT230

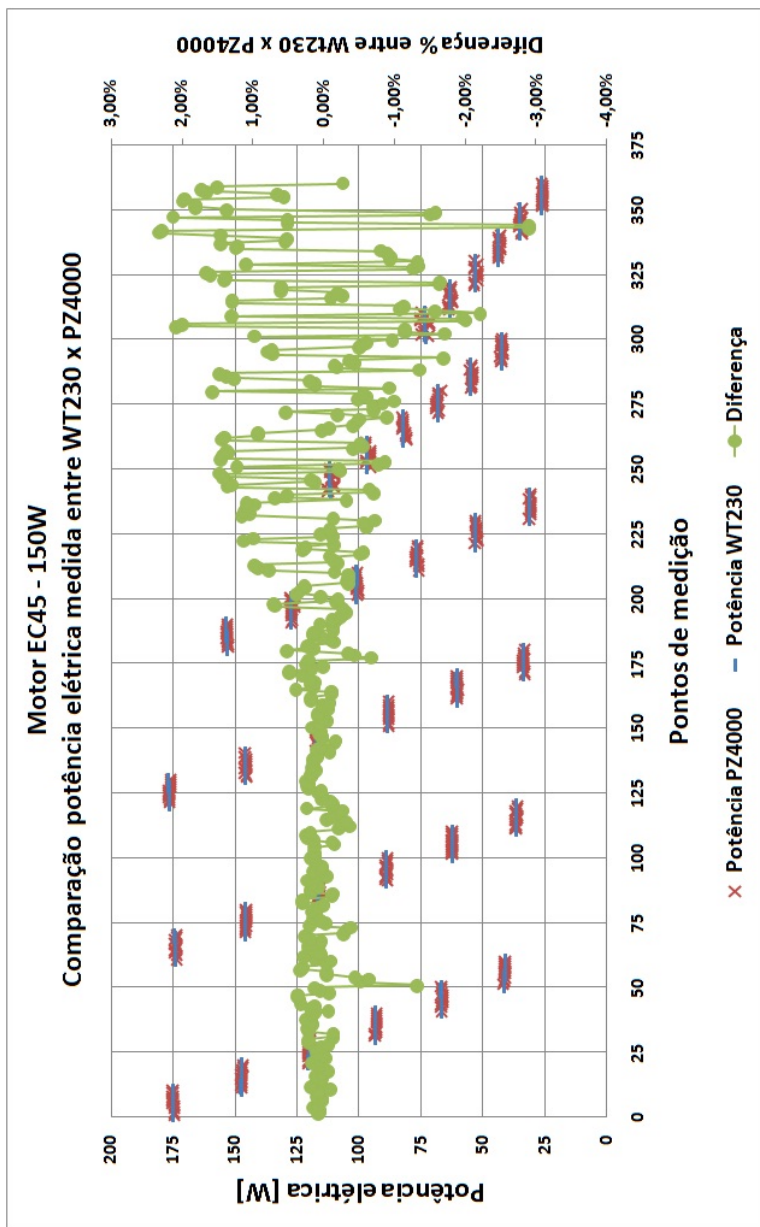


Figura 6.12: Potência elétrica para o motor EC45 com a diferença percentual entre o resultado dos wattímetros WT230 e PZ4000

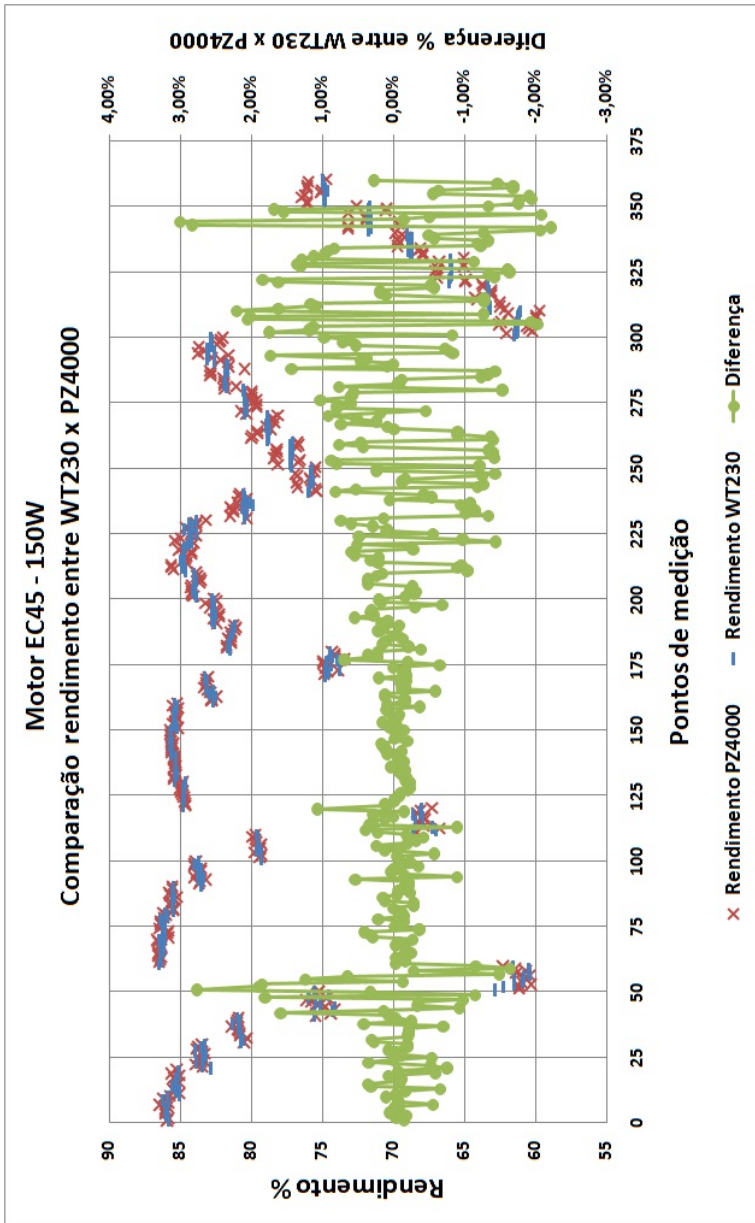


Figura 6.13: Rendimento para o motor EC45 medidos com os wattímetros PZ4000 e WT230

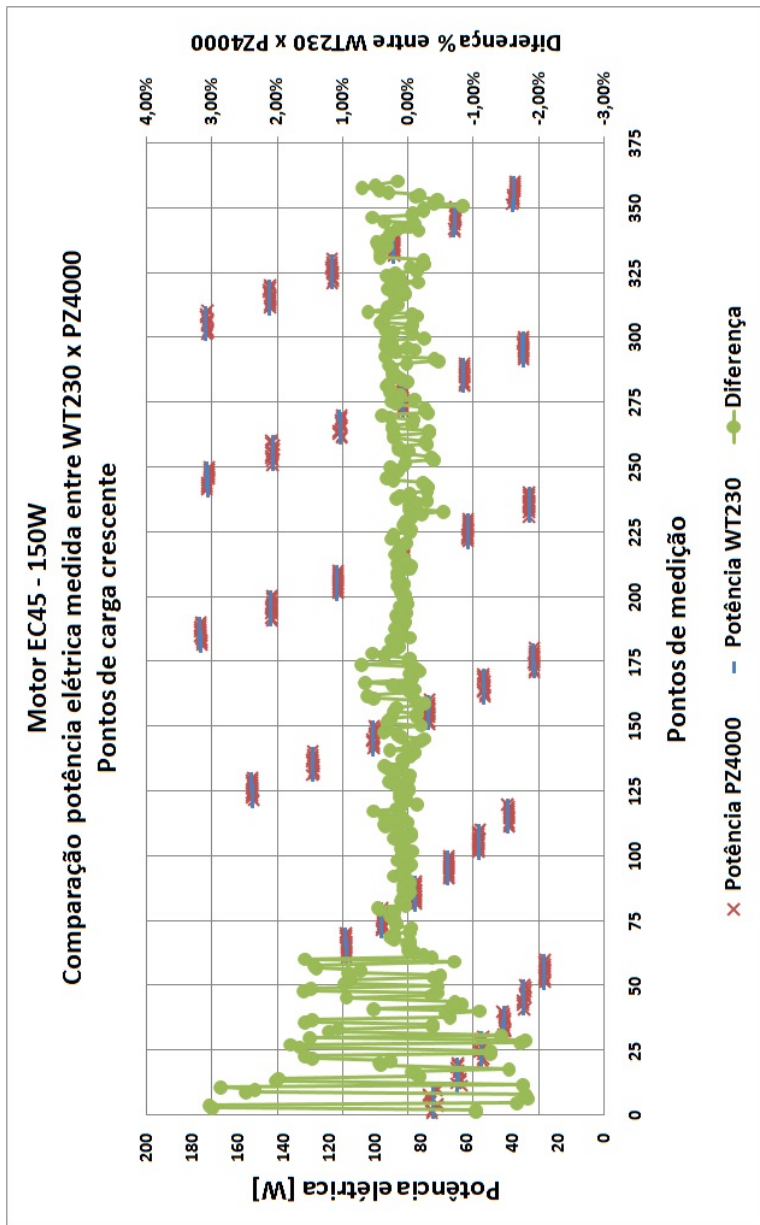


Figura 6.14: Potência elétrica para o motor EC45 medidos com os wattímetros PZ4000 e WT230 com a frequência rotacional crescente

A mesma análise pode ser feita para o motor EC60, pois os valores de potência sobrepõem-se ao longo do ensaio, como pode ser observado na figura 6.15. No entanto, existe uma diferença entre os resultados como pode ser visto no gráfico da figura 6.16, que também pode ser atribuída à diminuição da carga no motor, como comentado para o motor EC45. Essa diferença também pode ser observada no gráfico da figura 6.17 onde está apresentado o resultado para o rendimento medido com os dois wattímetros, WT230 e PZ4000.

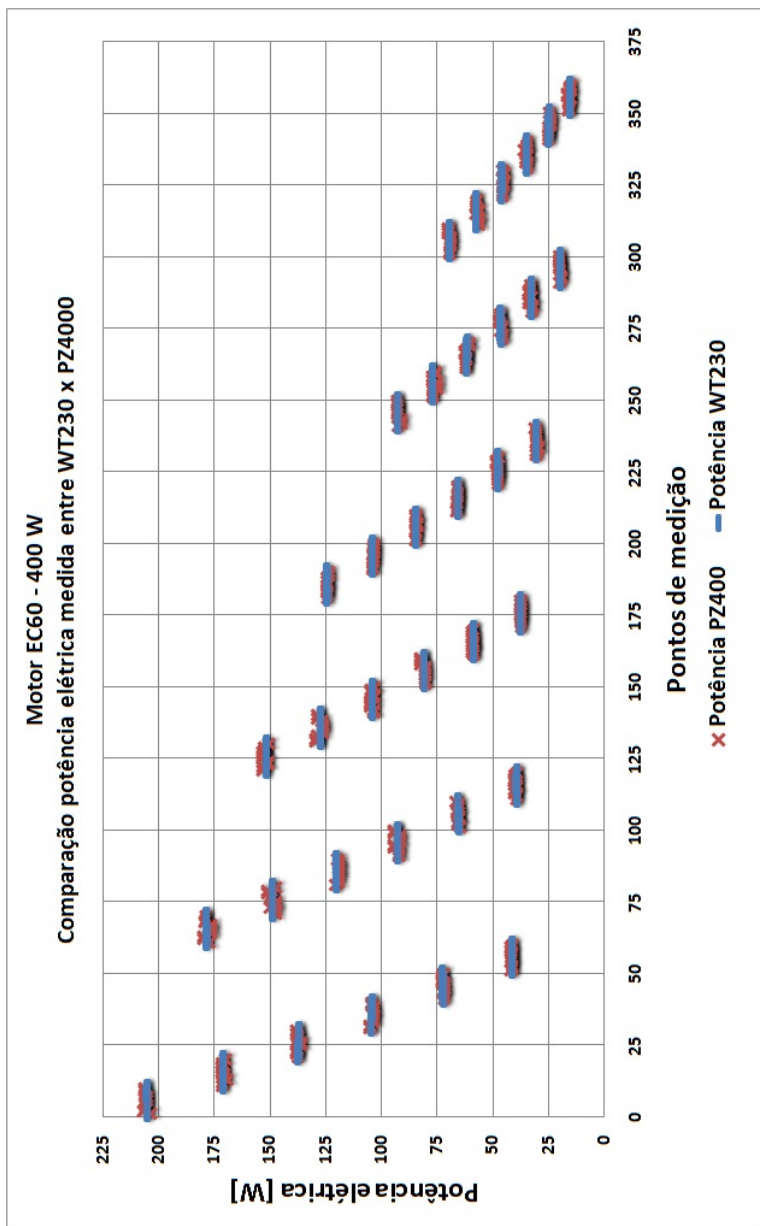


Figura 6.15: Potência elétrica para o motor EC60 medidos com wattímetro PZ4000 e WT230

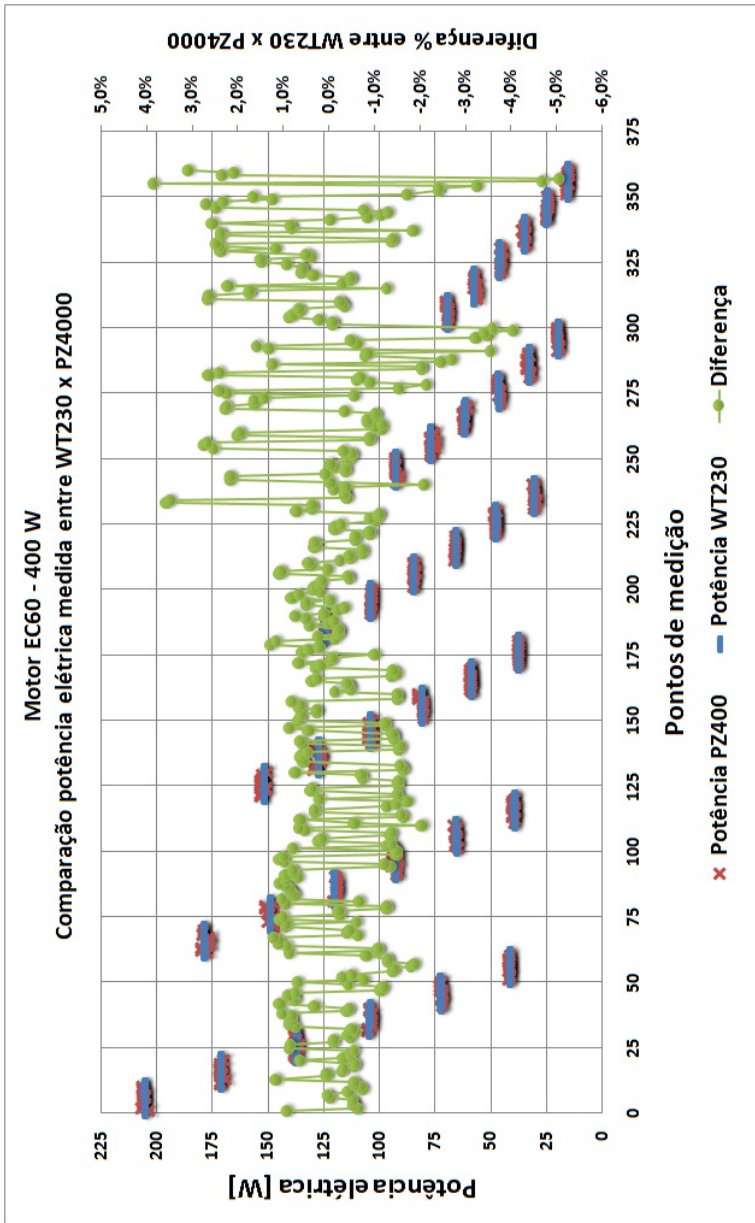


Figura 6.16: Potência elétrica para o motor EC60 com a diferença percentual entre o resultado dos wattímetros WT230 e PZ4000

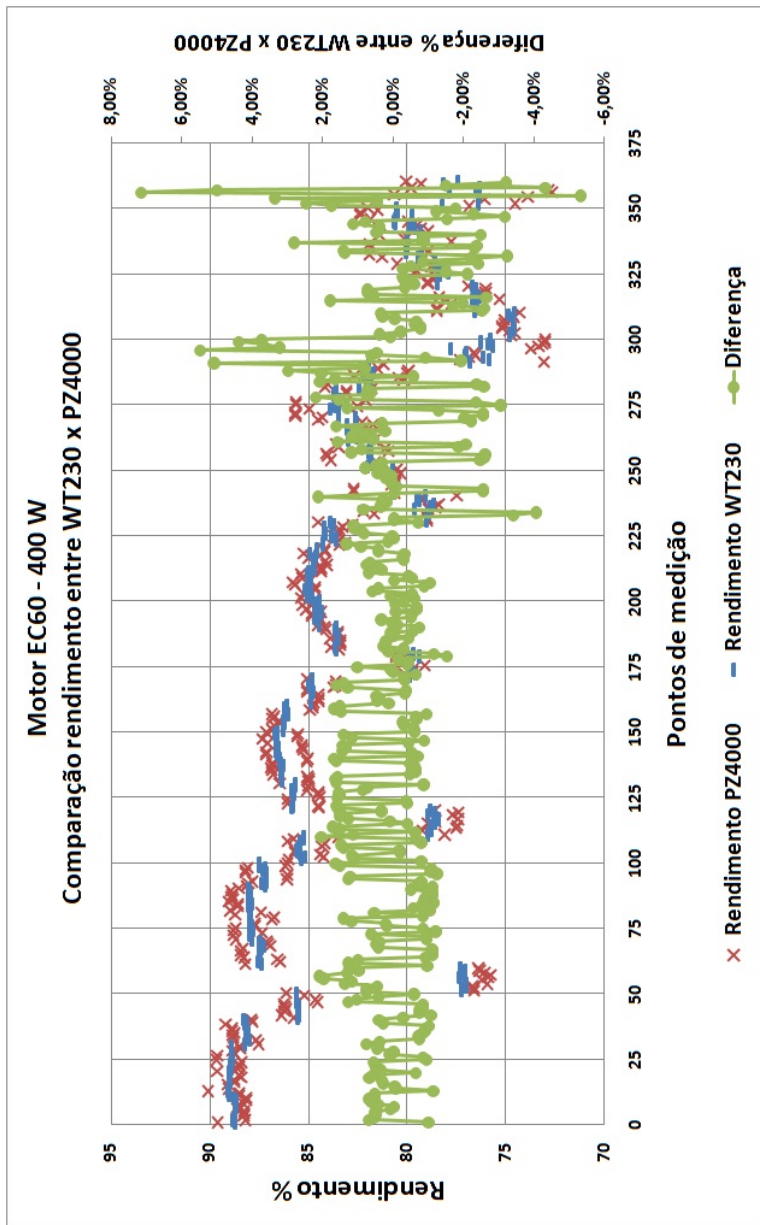


Figura 6.17: Rendimento para o motor EC60 medido com os wattímetros WT230 e PZ4000

Apesar dos resultados apresentados acima serem muito próximos para os dois wattímetros, quando faz-se a análise da incerteza de medição é que o wattímetro PZ4000 se destaca.

A mesma simulação acerca da incerteza de medição realizada anteriormente para os wattímetros WT3000, LMG500 e PZ4000 também foi realizada para o wattímetro WT230. Os dados da simulação estão apresentados no apêndice D.

Dos dados apresentados no apêndice D pode-se construir o gráfico da figura 6.18 que mostra uma comparação das simulações realizadas entre os wattímetros WT230 e PZ4000 levando em consideração as incertezas de medição especificadas pelos fabricantes.

Do gráfico comparativo da figura 6.18 pode-se ver que o wattímetro WT230 apresenta os maiores erros de medição quando comparado ao wattímetro PZ4000, chegando a mais de 6 W de diferença na situação 10000 rpm/143 mN.m (POT0006). Esta diferença se dá devido às especificações dada pelo fabricante dos equipamentos nas frequências próximas à frequência base, já que é onde as especificações tem maior peso. Outro ponto que deve ser destacado é que o wattímetro WT230 não apresenta especificações para potência nas frequências acima de 100 kHz. Assim, foi decidido que o erro máximo seria o valor da amplitude na frequência harmônica, já que, ao atuar como filtro passa baixas, na pior das hipóteses ele mediria zero em tais frequências.

No entanto, o wattímetro WT230 pode ser utilizado se o objetivo for a reprodutibilidade, já que os resultados são sempre bastante próximos entre ensaios. Em geral o wattímetro WT230 tem um desvio percentual em relação à média bastante razoável, pois como pode ser observado na figura 6.19, de cinco ensaios realizados com o motor EC45, um desvio de menos de 1% foi observado para a condição 15000 rpm/16 mN.m.

Os demais gráficos de reprodutibilidade para os motores EC45 e EC60 estão nos apêndices E e F. Dos gráficos, pode-se observar que a diferença percentual em relação à média está entre 0,2% e 0,3% para o motor EC45 e de até 1,5% para o motor EC60, concluindo-se que o equipamento reproduz bem os resultados em diferentes condições.

6.5 Conclusão acerca da medição da potência elétrica

Depois das condições de contorno estabelecidas, partiu-se para a especificação de um equipamento que pudesse suprir as necessidades de medição de potência elétrica da bancada em questão.

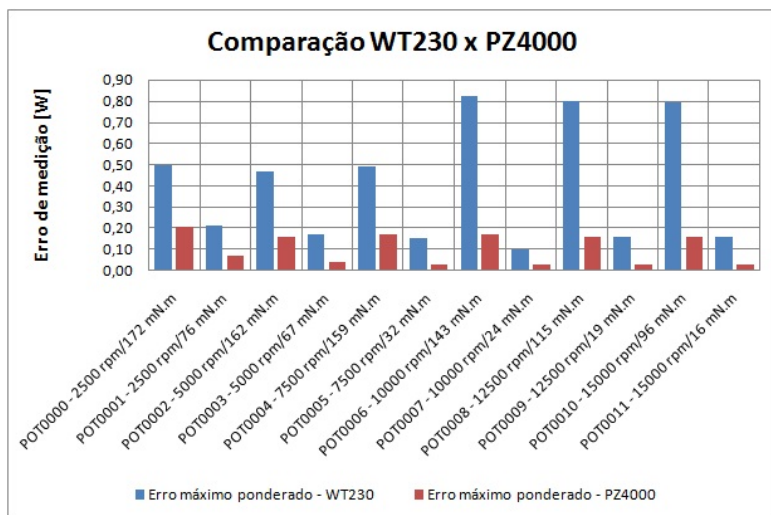


Figura 6.18: Comparação através da incerteza de medição entre os wattímetros WT230 e PZ4000

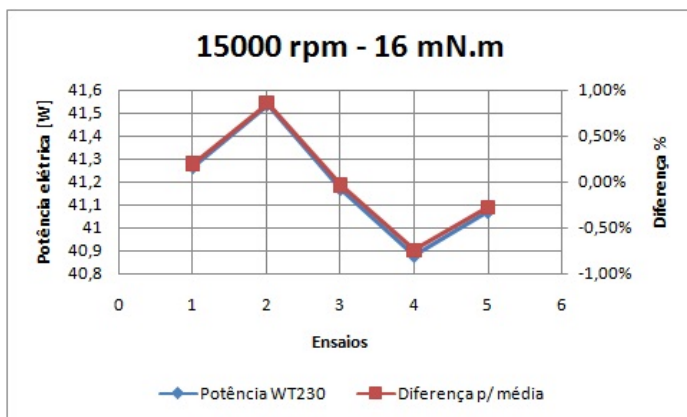


Figura 6.19: Reprodutibilidade de ensaios para potência elétrica na condição 15000 rpm - 16 mN.m

Dentre as opções citadas na seção 6.1.3, escolheu-se um wattímetro baseado em processamento digital de sinais. Das alternativas comerciais de wattímetros analisados, optou-se pelo wattímetro PZ4000 do fabricante Yokogawa. Para tanto, analisou-se criteriosamente as características metroológicas dos equipamentos levantados. Foram realizadas duas análises quanto à incerteza de medição. Primeiramente foi analisada a incerteza de medição para sinais em alta frequência puramente senoidais e em seguida, uma simulação com dados reais de medição. Da primeira análise, concluiu-se que o equipamento que garante a melhor incerteza de medição para sinais em alta frequência seria o wattímetro PZ4000. Já analisando a potência ativa total e o erro de medição com dados reais de medição, concluiu-se que pelo fato da maior amplitude do espectro estar na fundamental, os wattímetros que apresentaram menor incerteza de medição foram os que possuíam as melhores especificações para a frequência base, como por exemplo o wattímetro LMG500 da empresa Zes Zimmer.

Comparou-se ainda os resultados de medição de dois wattímetros instalados na BEME. Um deles é o wattímetro PZ4000, especificado por este trabalho e o outro, o wattímetro WT230. Apesar do wattímetro WT230 não ser um equipamento indicado para medição em alta frequência, pois possui uma banda de frequência de apenas 100 kHz, esse equipamento apresentou valores indicados muito próximos aos valores indicados pelo PZ4000. Essa constatação vem novamente da análise do espectro de frequências, pois, como é a frequência fundamental que contém a maior parte da energia presente no sinal, quando utilizado o WT230 são atenuadas as frequências harmônicas de alta ordem que pouco interferem na medição da potência total. Analisando a reprodutibilidade do WT230, percebe-se que o equipamento apresenta uma variação bastante pequena entre ensaios, ou seja, para a maior parte das condições de potência, a diferença percentual em relação a um valor médio de cinco ensaios se manteve entre 0,2% e 0,3% para o motor EC45 e de até 1,5% para o motor EC60.

Por fim, conclui-se que amplo conhecimento acerca da medição de potência elétrica em sinais de elevado conteúdo harmônico foi concretizado. Além desse fato, de agora em diante está disponível para futuras pesquisas um equipamento de grande relevância na medição de sinais com as características apresentada ao longo deste trabalho.

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

7.1 Conclusões

Para a determinação do rendimento de uma máquina elétrica é necessário o conhecimento da quantidade de energia que essa máquina consome e a quantidade de energia que esta consegue transformar efetivamente em trabalho. Em outras palavras, tem-se que o rendimento é a razão entre a potência mecânica disponibilizada no eixo da máquina e a potência elétrica consumida. O conhecimento dessas grandezas auxilia tanto os pesquisadores no desenvolvimento e determinação das características de projeto e os fabricantes no estabelecimento dos dados técnicos dos manuais, quanto os consumidores finais que levarão em conta os dados especificados para avaliá-los na sua aplicação. Nesse sentido, foram realizados esforços neste trabalho para a caracterização e medição do sinal de potência elétrica, com baixos níveis de incerteza, em motores do tipo *brushless*.

Um dos pontos que dificulta a medição de sinais na saída de conversores de frequência que acionam os motores *brushless* são os altos níveis de distorção harmônica. Essas distorções na saída ocorrem pela ação da modulação as quais as tensões e correntes são submetidas.

No início desta jornada não se tinha o conhecimento nem de como e nem de quanto era a distorção harmônica nos sinais de tensão e corrente. Assim, iniciou-se um estudo acerca das características dos motores e do conversor de frequência que serviram de objeto de estudo para este trabalho, bem como uma pesquisa de normas existentes que regulamentassem ensaios a serem realizados nesses motores. Ao final da pesquisa, constatou-se a ausência de normas, o que dificultou mais ainda o trabalho, já que nenhum procedimento de ensaio era conhecido previamente.

Como o objetivo deste trabalho é a determinação da potência elétrica de uma carga trifásica, foi necessário também um estudo das definições e equações para um sistema trifásico a três fios, possivelmente desbalanceado e como distorção harmônica. Além disso, foram apresentados dois métodos de medição de potência elétrica para um sistema trifásico, sendo que chegou-se à conclusão que com apenas dois wattímetros se pode realizar a medição. Nos wattímetros comerciais há possibilidade de ligação das três fases da carga, no entanto, internamente somente duas fases são consideradas, ou seja, a potência de uma das fases é nula e a potência ativa total é a soma da potência de apenas duas fases. Para o desenvolvimento de um sistema proprietário, tem-se que com dois wattímetros ou dois pares de transdutores de corrente

e tensão a medição pode ser realizada, economizando-se um par de transdutores, resultando em menos ligações elétricas e conseqüentemente menos pontos de interferências e ruídos.

Ao se falar em medição de potência elétrica vem logo à mente que o problema se resolve com a utilização de um equipamento de medição próprio para este fim, ou seja, um wattímetro. No entanto, é de conhecimento que dependendo da aplicação, o desenvolvimento de um sistema proprietário apresenta vantagens. Para tanto, foram pesquisados, além dos analisadores de potência baseados em processamento digital de sinais, transdutores de tensão e corrente de diferentes princípios de funcionamento que poderiam ser utilizados como alternativa para a medição. Dos transdutores analisados, os CT e CV do fabricante LEM foram os que mais se destacaram, pela inovação na utilização da tecnologia *Fluxgate*, e pelo potencial de medição em alta frequência.

Avaliar o espectro de frequências foi definido como tarefa de suma importância para as tomadas de decisões relativas à escolha do equipamento. Como se tratava da definição das condições de contorno, tinha-se de conhecer de quais frequências o sinal é composto para poder definir o sistema de medição. Para a caracterização dos sinais, realizou-se um ensaio em que foram adquiridos os sinais de tensão e corrente com um equipamento com alta taxa de amostragem, na ordem de cinco milhões de amostras por segundo. Como transdutores de corrente foram utilizados um resistor *shunt* e uma sonda de corrente, pois era também um dos objetivos a avaliação do comportamento do espectro de frequências utilizando dois transdutores de corrente de princípios físico diferentes. Da comparação entre motores de potência diferentes com o mesmo transdutor observou-se que a maior parte da energia, tanto do sinal de tensão quanto de corrente está presente na frequência da fundamental. Para o motor de maior potência (EC60 - 400 W), o sinal de tensão tende a ter um espectro de frequência distribuído de forma mais homogênea por todo o eixo das frequências. Para o motor de menor potência (EC45 - 150 W) a maior parte da energia do sinal de tensão se concentra na frequência fundamental com uma pequena distribuição do restante da energia nas demais frequências harmônicas. No entanto, para ambos motores, o sinal de corrente é bastante parecido, ou seja, a maior parte da energia está concentrada somente na frequência fundamental. Apesar do espectro de tensão ter amplitudes bastante significativas nas frequências harmônicas do chaveamento, pelo fato da maior parte da energia do sinal de corrente estar na frequência fundamental, é esperado que no espectro de potência as frequências harmônicas não sejam significativas, justamente pelo fato da potência corresponder ao

produto entre a tensão e corrente. Quanto à análise dos diferentes transdutores, conclui-se que a sonda de corrente baseada no princípio do efeito Hall não é apropriada para medição de sinais com modulação em alta frequência. A utilização da sonda de corrente torna o sistema susceptível a ruídos, já que características como ausência dos *sideband* e espalhamento anômalo das amplitudes nas frequências harmônicas foram observados.

Assim, a partir das condições de contorno estabelecidas, isto é: faixa, incerteza e taxa de medição, nível de automação e local das medições – foram traçados os parâmetros para seleção de um sistema de medição que pudesse ser utilizado para solucionar a demanda da bancada. Entre as opções de desenvolvimento de um sistema proprietário e a aquisição de um equipamento comercial, decidiu-se pela segunda. Em se tratando de um sistema proprietário, este se tornaria oneroso no sentido de que seriam necessários mais de um transdutor para cobrir toda a faixa de medição sem que se aumentasse a incerteza final do equipamento. Outro fator são as altas frequências harmônicas envolvidas e que trazem problemas como capacitâncias parasitas que inserem erros de medição. A calibração de um sistema proprietário também é inviável, já que a geração de um sinal de tensão e corrente em alta frequência com incerteza de medição menor que a medida pelo sistema desenvolvido é considerada de extrema dificuldade. Dentre um universo restrito de equipamentos comerciais para medição de potência elétrica, quatro foram analisados quanto às suas características técnicas. Os quatro equipamentos apresentaram muitas semelhanças quanto às suas funções e capacidade de processamento, no entanto uma criteriosa análise da incerteza de medição foi realizada entre os quatro equipamentos. Numa primeira análise, foram simulados valores de medição dentro da faixa compreendida pelos valores reais de alimentação dos motores. Concluiu-se que o equipamento mais indicado para medição de sinais de até 400 kHz é o wattímetro PZ4000. Porém, essa primeira análise levou em consideração sinais de tensão e corrente puramente senoidais em alta frequência, o que não é verdade quando se trata de sinais na saída de conversores de frequência. Desse modo foi realizada outra análise, onde se tem por base dados reais de medição adquiridos nas condições em que os motores são ensaiados. Assim, através de um algoritmo desenvolvido em LabVIEW foi possível a detecção da amplitude, fase e frequência da fundamental e harmônicas e com isso a sugestão para analisar a incerteza de medição por meio das especificações dos dados de catálogos dos fabricantes. A partir daí foi proposta a análise através do cálculo da potência e consequentemente do erro ponderado. A potência ponderada dá um peso diferente para a potência de cada frequência harmônica, de acordo com o valor da am-

plitude da harmônica e o valor da potência total. Assim, o erro de medição se torna menor, já que a amplitude das harmônicas diminui drasticamente quando as frequências são mais altas. Como as especificações dos fabricantes são mais críticas a medida que as frequências aumentam, se não fosse considerada essa ponderação, o valor da incerteza de medição seria absurdo. Dessa análise, concluiu-se que o melhor equipamento para medição seria aquele que apresentasse a melhor especificação de incerteza na frequência de base, pois a maior parte da potência se concentra na frequência fundamental. Apesar do wattímetro LMG500 apresentar as melhores incertezas de medição para quase toda a faixa de frequências fundamentais proposta por este trabalho, optou-se pela aquisição de um equipamento comercial de medição da Yokogawa, modelo PZ4000. Este equipamento possui elevada taxa de aquisição além das melhores incertezas de medição para altas frequências se comparado aos outros equipamentos analisados, além de representar um equipamento de grande relevância no conhecimento de medição de potência elétrica que envolvam altas frequências. A partir desse equipamento foram realizados ensaios para determinação da potência elétrica, bem como do rendimento dos motores que serviram como objeto de estudo. Outra avaliação realizada foi a comparação experimental entre dois wattímetros, o WT230 e o PZ4000. Dessa comparação constatou-se que para medições de sinais de baixa frequência, wattímetros com menor banda de frequência podem apresentar resultados satisfatórios, além disso, o wattímetro WT230 apresentou excelentes resultados quanto à reprodutibilidade.

Por fim, conclui-se que neste trabalho foi feita a caracterização e a medição do sinal de potência elétrica. A caracterização do sinal foi possível através da análise experimental realizada com um oscilógrafo de elevada taxa de aquisição e a medição da potência por meio do equipamento, especificado neste trabalho, de altíssimo desempenho metrológico em altas frequências. Destaca-se que a expressão da incerteza de medição de potência elétrica só poderá ser executada da forma como foi sugerida neste trabalho se forem adquiridas as formas de onda de ambos sinais, corrente e tensão, para avaliação dos respectivos espectros de frequências.

7.2 Sugestões para trabalhos futuros

A medição de potência elétrica em sinais distorcidos ainda é tema de pesquisa, sendo que o assunto ainda é bastante discutido no âmbito acadêmico. No sentido de contribuir para a continuidade da investigação sobre este tema, algumas sugestões são propostas.

No presente trabalho foi utilizado um oscilógrafo de alta taxa de amostragem para a caracterização dos sinais, no entanto, em artigos do gênero, a utilização do multímetro HP 3458A é amplamente utilizado pela alta resolução (8 1/2 dígitos) e excelentes qualidades metrológicas [61]. O oscilógrafo utilizado é um excelente equipamento para capturar as formas de onda mas não garante grande confiabilidade quanto aos dados amostrados, já que suas incertezas de medição são bastante elevadas. Dessa forma, a análise da incerteza de medição poderia seguir os passos de Pogliano (2004) [62] que propõe um método para avaliar a incerteza de medição através da amostragem assíncrona a partir da incerteza de uma única amostra informada pelo fabricante do equipamento.

Outra melhoria seria através da utilização do próprio PZ4000 com módulos com maior capacidade de memória. Os módulos de memória padrão do PZ4000 possuem apenas cem mil posições. Essa constatação se reflete no período de observação, sendo que para se ter uma elevada taxa de aquisição o período de amostragem torna-se muito pequeno, pois o período é inversamente proporcional à frequência da fundamental. Esse fato exige um tempo de observação maior, quanto menor for a frequência da fundamental do sinal. Se a aquisição fosse feita com um módulo de quatro milhões de posições, poderia-se medir com uma taxa de cinco milhões de amostras por segundo uma frequência de 2,5 Hz, ou seja, um período bastante grande poderia ser amostrado com alta fidelidade.

A realização da avaliação metrológica do rendimento também é uma sugestão para trabalhos futuros, pois nos modelos atuais, essa análise não é possível devido ao fato de não se ter a amostragem do sinal adquirido e sim somente o valor eficaz informado pelo wattímetro.

Outras melhorias vêm no sentido do desenvolvimento tecnológico da bancada onde foram realizados os ensaios. A bancada hoje em dia utiliza a estrutura da carcaça do motor e conseqüentemente rolamentos como elementos girantes. Já é uma frente de trabalho a análise de outros tipos de mancalização, pois os atualmente utilizados inserem perdas consideráveis devido ao não deslizamento ideal dos elementos rolantes.

Por fim, questões relativas às temperaturas de ensaio também são críticas. Segundo o procedimento elaborado, os motores devem ser ensaiados quando alcançaram uma temperatura preestabelecida, já que os motores se encontram confinados nos compressores e devem operar em temperaturas elevadas. Assim, o ensaio deve simular as condições reais de operação e realizado o mais próximo possível dessas condições. Alcançar essas temperaturas na bancada atual é complicado pois não existe um sistema para controle de

temperatura.

REFERÊNCIAS

- [1] RAHMAN, M. A.; CHIBA, A.; FUKAO, T. Super high speed electrical machines - summary. **IEEE Power Engineering Society General Meeting**, v. 2, p. 1272–1275, June 2004.
- [2] SAWA, T.; KUME, T. Motor drive technology - history and visions for the future. **IEEE Power Electronics Specialists Conference**, v. 1, p. 2–9, June 2004.
- [3] GIESEL, T. **Estudo e projeto de motores de alta velocidade para aplicação em compressores herméticos**. 2007. Dissertação (Mestrado) — Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2007.
- [4] SOUZA NETO, B. M. de. **Desenvolvimento de uma bancada para medição automatizada de potência mecânica em motores elétricos de alta rotação e baixo torque**. 2009. Dissertação (Mestrado) — Programa de Pós-Graduação em Metrologia Científica e Industrial, Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2009.
- [5] MAGTROL. **BSD series - miniature couplings**. Disponível em: <www.magtrol.com/datasheets/bsd.pdf>. Acesso em: 17 nov. 2009.
- [6] ANDERSON, K. F. The new current loop: an instrumentation and measurement circuit topology. **Instrumentation and Measurement**, v. 46, n. 5, p. 1061–1067, Oct. 1997.
- [7] ANDERSON, K. F. The anderson loop: NASA's successor to the wheatstone bridge. **ISATech - The International Society of Automation**, Anaheim, CA, Oct. 1997.
- [8] FITZGERALD, A. E.; CHARLES, K. J.; UMANS, S. D. **Máquinas Elétricas: com introdução à eletrônica de potência**. 6. ed. São Paulo, SP: Bookman, 2008.
- [9] YOO, J. G. **Actuator performance envelope through nonlinear test bed**. Dec. 2004. Tese (Doutorado) — The University of Texas at Austin, Dec. 2004.

- [10] TORO, V. D. **Fundamentos de máquinas elétricas**. Rio de Janeiro, RJ: LTC, 1999.
- [11] HONDA, F. **Motores de corrente contínua: um guia rápido para especificação precisa**. Siemens. Disponível em: <http://www.siemens.com.br/medias/FILES/2910_20060505141908.pdf>. Acesso em: 25 fev. 2009.
- [12] LESSON. **Features from the manufacture**. Disponível em: <<http://scienceshareware.com/articles/byo-stand/images/leeson-M1120046-dc-pm-motor-generator.jpg>>. Acesso em: 25 jul. 2009.
- [13] MAXON. **Maxon EC Motor: An introduction to brushless DC motors**. Disponível em: <http://shop.maxonmotor.com/maxon/assets_external/Katalog_neu/eshop/Downloads/CMS_Downloads/maxon_academy/Professors_Desk/maxonECmotor_Notes.pdf>. Acesso em: 17 fev. 2009.
- [14] MAXON. **Maxon EC Motor Ironless Winding Technology: short and to the point**. Disponível em: <https://shop.maxonmotor.com/maxon/assets_external/Katalog_neu/eshop/Downloads/allgemeine_informationen/Technik_kurz_und_buendig/newpdf_09/EC-Technik-kurz-und-buendig_09_EN_026-27.pdf>. Acesso em: 22 fev. 2009.
- [15] ACIEL - ACIONAMENTOS ELÉTRICOS. **Dúvidas frequentes**. Disponível em: <<http://www.acionamentoseletricos.com.br/index.php/suporte/faq/duvidas-frequentes.html>>. Acesso em: 8 oct. 2010.
- [16] MAXON. **Maxon motor control: operating instructions**. Disponível em: <https://downloads.maxonmotor.com/.../maxon_motor_control/...Operating_Instructions/228597_DES_70-10_OperatingInstructions_En.pdf>. Acesso em: 25 fev. 2009.
- [17] CRISTALDI, L.; FERRERO, A.; OTTOBONI, R. A measuring equipment for the measurement of the electric quantities at the terminals of an inverter-fed induction motor. In: **Integrating Intelligent Instrumentation and Control**. Montreal, Que: IEEE, 1995. v. 45, n. 2, p. 450.
- [18] ROSA, F. C. de la. **Harmonics and power systems**. Boca Raton, FL: CRC Press and Taylor & Francis Group, 2006.

- [19] BARBOSA, F. Q. **Redução das incertezas nas medições de grandezas elétricas em uma bancada de ensaios de desempenho de compressores**. 2006. 192 f. Dissertação (Mestrado) — Programa de Pós-Graduação em Metrologia Científica e Industrial, Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2006.
- [20] CZARKOWSKI, D. Power measurements in adjustable speed drives. **Proceedings of the 40th Midwest Symposium on Circuits and Systems**, v. 1, p. 110–113, Aug. 1997.
- [21] DURANTE, L.; GHOSH, P. Active power measurement in nonsinusoidal environments. **IEEE Transactions on Power Systems**, v. 15, n. 3, p. 1142–1147, Aug. 2000.
- [22] INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS. **IEEE 1459-2000 Trial-use standard definitions for the measurement of electric power quantities under sinusoidal, non-sinusoidal, balanced, or unbalanced conditions**. 2000.
- [23] NILSSON, J. W.; RIEDEL, S. A. **Circuitos elétricos**. 6. ed. Rio de Janeiro, RJ: LTC, 2003.
- [24] BRITO, C. M. C.; LEAO, R. P. S. Desempenho de um motor de indução trifásico submetido a distorções harmônicas na tensão de alimentação. **Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos**, Campina Grande, PB, p. 1–6, July 2006.
- [25] INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS. **IEEE 519-1992 Recommended practices and requirements for harmonic control in electrical power systems**. 1992.
- [26] MEDEIROS FILHO, S. de. **Medição de energia elétrica**. 4. ed. Rio de Janeiro, RJ: LTC, 1997.
- [27] BOYLESTAD, R. L. **Introdução à análise de circuitos**. 10. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2004.
- [28] POGLIANO, U. Traceability of electrical quantities obtained by sampling. **International Measurement Confederation**, v. 42, n. 10, p. 1439–1442, 2009.
- [29] SVENSSON, S. **Power measurement techniques for non-sinusoidal conditions: the significance of harmonics for de measurement of**

- power and other AC quantities**. 1999. Tese (Doutorado) — Chalmers University of Technology Göteborg Sweden, 1999.
- [30] FLESCH, C. A. **Nota de aula de automação da medição**. 2008.
- [31] YOKOGAWA. **PZ4000: power analyzer - user's manual**. Disponível em: <<http://tmi.yokogawa.com/products/digital-power-analyzers/digital-power-analyzers/pz4000-power-analyzer/>>. Acesso em: 31 mar. 2009.
- [32] INMETRO. **Vocabulário internacional de termos fundamentais e gerais de metrologia**. 5. ed. Rio de Janeiro, RJ: Senai, 2000.
- [33] PETROVIC, S. A. B. **Proposta de arquitetura do sistema de automação aplicado a ensaios de desempenho de compressores herméticos de refrigeração**. 2007. Dissertação (Mestrado) — Programa de Pós-Graduação em Metrologia Científica e Industrial, Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2007.
- [34] DESTEFAN, D.; STANT, R.; RAMBOZ, J. AC and DC shunts - can you believe their specs? **IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference**, v. 2, p. 1577–1582, May. 2003.
- [35] XIAO, C. *et al.* An overview of integratable current sensor technologies. **IEEE Industry Applications Conference**, v. 2, p. 1251–1258, Oct. 2003.
- [36] FERREIRA, J. A.; CRONJE, W. A.; RELIHAN, W. A. Integration of high frequency current shunts in power electronic circuits. **IEEE Transactions on Power Electronics**, v. 10, n. 1, p. 32–37, Jan. 1995.
- [37] HONEYWELL. **Hall effect sensing and application**. Disponível em: <<http://www.honeywell.com>>. Acesso em: 25 set. 2009.
- [38] LEM. **Isolated current and voltage transducers: characteristics - applications - calculations**. Disponível em: <www.lyr-ing.com/DocumentosLyR/.../Applications_of_LEMTransducers.pdf>. Acesso em: 19 sep. 2009.
- [39] ARCEGA, F. J.; ARTERO, J. A. Current sensor based on Rogowski coil. **International conference on renewable energies and power quality**, Mar. - Apr. 2004.

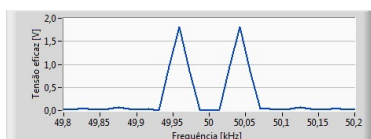
- [40] WARD, D. A.; EXON, J. L. T. Using rogowski coils for transient current measurement. **Engineering Science and Education Journal**, June 1993.
- [41] RAMBOZ, J. Machinable rogowski coil, design and calibration. In: **Proceedings of the Integrating Intelligent Instrumentation and Control**. Waltham, MA: IEEE, 1995. p. 329.
- [42] RAY, W. F.; HEWSON, C. R. High performance Rogowski current transducers. In: **IEEE Industry Applications Record Conference**. [S.l.: s.n.], 2000. v. 5, p. 3083–3090.
- [43] MACHADO, F. L. B. **Desenvolvimento de padrões de verificação para medições de tensão e corrente aplicadas ao controle da operação de sistemas de transmissão de energia elétrica**. 2009. Dissertação (Mestrado) — Programa de Pós-Graduação em Metrologia Científica e Industrial, Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2009.
- [44] CADDOCK. **Type 1776 precision decade resistor voltage dividers**. Disponível em: <http://www.caddock.com/Online_catalog-/Mrktg_Lit/Type1776.pdf>. Acesso em: 16 ago. 2009.
- [45] WITTE, R. A. **Electronic Test Instruments: Analog and digital measurements**. 2. ed. [S.l.]: Prentice Hall, 2002.
- [46] IFEACHOR, E. C.; JERVIS, B. W. **Digital signal processing: a practical approach**. 2. ed. [S.l.]: Prentice Hall, 2001.
- [47] NATIONAL INSTRUMENTS. **Datasheet NI 6123, NI6122, NI6133, NI6132**. Outubro 2009. Disponível em: <<http://www.ni.com/pdf/products/us/043918301101dlr.pdf>>. Acesso em: 07 mar. 2010.
- [48] YOKOGAWA. **Scope Corder DL750 Specification**. Disponível em: <<http://tmi.yokogawa.com/products/oscilloscopes/scopecorders-oscillographic-recorders/dl750dl750p-scopecorder/>>. Acesso em: 17 abr. 2009.
- [49] YOKOGAWA. **DL750/DL750P SCOPECORDER**. 2010. Disponível em: <<http://tmi.yokogawa.com/products/data-acquisition-equipment/scopecorders-oscillographic-recorders/dl750dl750p-scopecorder/>>. Acesso em: 09 jan. 2010.

- [50] AGILENT. **Agilent 1146A AC/DC Oscilloscope Current Probe - User's Guide**. [S.l.]. Disponível em: <<http://cp.literature.agilent.com/litweb/pdf/01146-92003.pdf>>. Acesso em: 14 sep. 2009.
- [51] AGILENT. **Agilent technologies 5000, 6000 and 7000 series infiniVision oscilloscopes probes and accessories - selection guide data sheet**. Disponível em: <<http://cp.literature.agilent.com/litweb/pdf/5968-8153EN.pdf>>. Acesso em: 16 sep. 2009.
- [52] RIEDON. **USR UNR 4-3425 3825 3825H 4020. Precision shunt resistors specification**. Disponível em: <http://www.riedon.com/us/images/stories%20-%20pdf/USRUNR4-3425_3825_4020.pdf>. Acesso em: 21 may. 2009.
- [53] GONCALVES Jr., A. A.; SOUSA, A. R. d. **Fundamentos de metrologia científica e industrial**. 1. ed. Barueri, SP: Manole, 2008.
- [54] MAXON. **Maxon EC motor - brushless - 150 W**. Disponível em: <https://downloads.maxonmotor.com/Katalog_neu/eshop/Downloads/Katalog_PDF/maxon_ec_motor/EC-programm/new/newpdf_10-EC-45-136202_10_EN_155.pdf>. Acesso em: 25 oct. 2008.
- [55] MAXON. **Maxon EC motor - bruschless - 400 W**. Disponível em: <http://test.maxonmotor.com/docsx/Download%20-%20catalog_2005/Pdf/05_165_e.pdf>. Acesso em: 25 oct. 2008.
- [56] LEM. **Current transducer CT 25-T**. Disponível em: <http://www.lem.com/docs/products/ct20520_2025-t20e.pdf>. Acesso em: 23 aug. 2009.
- [57] YOKOGAWA. **WT1600: digital power meter - user's manual**. Disponível em: <<http://tmi.yokogawa.com/products/digital-power-analyzers/digital-power-analyzers/wt1600-digital-power-meter/>>. Acesso em: 25 mar. 2009.
- [58] YOKOGAWA. **WT3000: precision power analyzer - user's manual**. Disponível em: <<http://tmi.yokogawa.com/products/digital-power-analyzers/digital-power-analyzers/wt3000-precision-power-analyzer/>>. Acesso em: 01 apr. 2009.
- [59] ZIMMER, Z. **Zes Zimmer electronic systems: 1 to 8 channel precision power meter LMG500**. Disponível em: <http://www.zes.com/download/products/zes_lmg500_datasheet_e.pdf>. Acesso em: 14 apr. 2009.

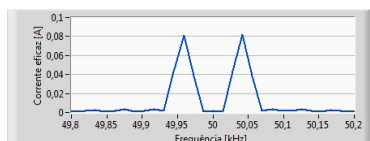
- [60] YOKOGAWA. **WT210/230: digital power meter - user's manual**. Disponível em: <<http://tmi.yokogawa.com/products/digital-power-analyzers/digital-power-analyzers/wt210wt230-digital-power-meters/>>. Acesso em: 18 mar. 2009.
- [61] LIMA, L. C. A. de. **Controle da alimentação elétrica para redução do tempo demandado por ensaio de desempenho de compressores e avaliação da influência da qualidade da energia elétrica nos resultados dos ensaios**. 2010. Dissertação (Mestrado) — Programa de Pós-Graduação em Metrologia Científica e Industrial, Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2010.
- [62] POGLIANO, U. Evaluation of the uncertainties in the measurement of distorted power by means of the ien sampling system. **Instrumentation and Measurement Technology Conference**, v. 3, p. 1748–1751, May 2004.

APÊNDICE A – ESPECTROS NAS FREQUÊNCIAS HARMÔNICAS NA CONDIÇÃO POT0000

Espectros de tensão e corrente para o motor EC45 na condição POT0000 com *zoom* nas frequências de chameamento.

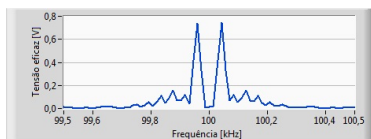


(a) Espectro da tensão

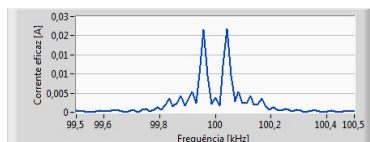


(b) Espectro da corrente

Figura A.1: Espectros de frequência em 50 kHz: condição POT0000

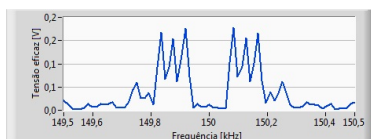


(a) Espectro da tensão

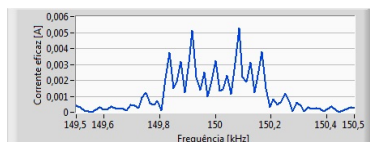


(b) Espectro da corrente

Figura A.2: Espectros de frequência em 100 kHz: condição POT0000

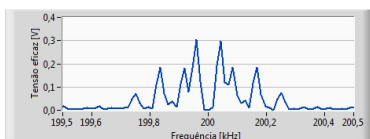


(a) Espectro da tensão

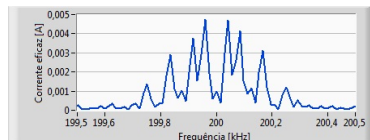


(b) Espectro da corrente

Figura A.3: Espectros de frequência em 150 kHz: condição POT0000

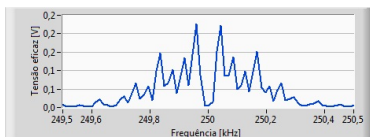


(a) Espectro da tensão

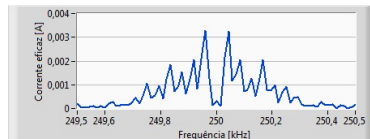


(b) Espectro da corrente

Figura A.4: Espectros de frequência em 200 kHz: condição POT0000

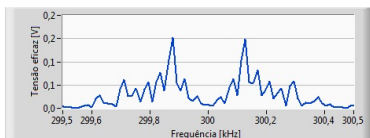


(a) Espectro da tensão

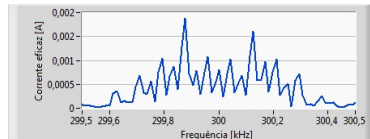


(b) Espectro da corrente

Figura A.5: Espectros de frequência em 250 kHz: condição POT0000



(a) Espectro da tensão



(b) Espectro da corrente

Figura A.6: Espectros de frequência em 300 kHz: condição POT0000

APÊNDICE B – TABELAS COM OS CÁLCULOS DE POTÊNCIA ATIVA TOTAL E ERRO DE MEDIÇÃO PARA OS WATTÍMETROS ANALISADOS UTILIZANDO O MOTOR EC45

B.1 Tabelas com os cálculos de potência ativa total e erro de medição para o wattímetro PZ4000

As tabelas B.1 à B.12 apresentam os valores da simulação para erro de medição a partir das especificações do wattímetro PZ4000 para ensaios realizados com o motor EC45 nas situações POT0000 a POT0011.

Tabela B.1: Incerteza de medição para o wattímetro PZ4000 para situação POT0000

POT0000 - 2500 rpm/172 mN.m											
Corrente			Tensão				Potência			Incertezas	
Freq [Hz]	Amp [A]	Fase [°]	Freq [Hz]	Amp [V]	Fase [°]	Pot. ativa [W]	Pot. %	Pot. pond.	Erro máximo [W]	E. máx pond. [W]	
Fundamental	41,65	4,553	178,31	41,64	17,203	149,24	67,823	99,661	9,97E-01	0,211	2,10E-01
50 kHz sideband	49958,17	0,115	-66,40	49958,19	2,572	15,78	0,097	0,143	1,43E-03	0,150	2,14E-04
	50041,51	0,116	101,23	50041,50	2,575	136,95	0,106	0,156	1,56E-03	0,301	4,70E-04
100 kHz sideband	99958,10	0,031	-63,81	99958,10	1,051	28,14	0,015	0,022	2,18E-04	0,300	6,53E-05
	100041,48	0,031	115,54	100041,49	1,054	148,77	0,013	0,019	1,86E-04	0,450	8,38E-05
										Pot. ativa total =	68,05 W
										Erro máx total =	0,21 W
										Erro máx % =	0,31%

Tabela B.2: Incerteza de medição para o wattímetro PZ4000 para situação POT0001

POT0001 - 2500 rpm/76 mN.m											
Corrente			Tensão				Potência			Incertezas	
Freq [Hz]	Amp [A]	Fase [°]	Freq [Hz]	Amp [V]	Fase [°]	Pot. ativa [W]	Pot. %	Pot. pond.	Erro máximo [W]	E. máx pond. [W]	
Fundamental	41,69	2,115	128,52	41,67	11,031	99,43	20,204	99,343	9,99E-01	0,070	6,99E-02
50 kHz sideband	49958,08	0,079	-1,10	49958,09	1,746	82,24	0,047	0,233	2,33E-03	0,060	1,40E-04
	50041,44	0,080	68,68	50041,43	1,748	103,21	0,052	0,255	2,55E-03	0,120	3,07E-04
100 kHz sideband	99957,98	0,032	22,48	99957,96	1,133	111,27	0,015	0,075	7,47E-04	0,120	8,97E-05
	100041,34	0,032	95,19	100041,28	1,136	132,83	0,012	0,059	5,93E-04	0,180	1,07E-04
										Pot. ativa total =	20,33 W
										Erro máx total =	0,07 W
										Erro máx % =	0,35%

Tabela B.3: Incerteza de medição para o wattímetro PZ4000 para situação POT0002

POT0002 - 5000 rpm/162 mN.m												
	Corrente			Tensão			Potência			Incertezas		
	Freq [Hz]	Amp [A]	Fase [°]	Freq [Hz]	Amp [V]	Fase [°]	Pot. ativa [W]	Pot. %	Pot. pond.	Erro máximo [W]	E. máx pond. [W]	
Fundamental	83,23	4,288	-62,19	83,32	22,465	268,01	83,421	99,628	9,96E-01	0,158	1,58E-01	
50 kHz sideband	49916,35	0,129	81,83	49916,51	2,861	166,15	0,132	0,158	1,58E-03	0,150	2,37E-04	
	50082,50	0,130	137,87	50083,05	2,870	167,09	0,166	0,198	1,98E-03	0,301	5,95E-04	
100 kHz sideband	99916,43	0,016	-17,73	99916,67	0,455	82,52	0,004	0,005	4,76E-05	0,300	1,43E-05	
	100083,00	0,016	70,06	100082,54	0,461	95,52	0,004	0,004	4,28E-05	0,450	1,93E-05	
150 kHz sideband	149916,19	0,012	113,55	149915,81	0,618	197,27	0,003	0,003	2,99E-05	0,450	1,35E-05	
	150082,58	0,012	144,07	150082,65	0,613	190,73	0,001	0,002	1,70E-05	0,450	7,70E-06	
200 kHz sideband	199915,89	0,007	16,45	199916,16	0,395	113,79	0,001	0,002	1,72E-05	0,450	7,70E-06	
	200082,60	0,007	80,74	200082,08	0,394	115,51	0,001	0,001	1,22E-05	0,450	5,50E-06	
										Pot. ativa total =	83,73 W	
										Erro máx total =	0,16 W	
										Erro máx % =	0,19%	

Tabela B.4: Incerteza de medição para o wattímetro PZ4000 para situação POT0003

POT0003 - 5000 rpm/67 mN.m												
	Corrente			Tensão			Potência			Incertezas		
	Freq [Hz]	Amp [A]	Fase [°]	Freq [Hz]	Amp [V]	Fase [°]	Pot. ativa [W]	Pot. %	Pot. pond.	Erro máximo [W]	E. máx pond. [W]	
Fundamental	83,59	1,884	95,99	83,40	16,349	67,81	26,666	99,141	9,91E-01	0,042	4,13E-02	
50 kHz sideband	49916,73	0,106	252,24	49916,55	2,303	-20,36	0,097	0,362	3,62E-03	0,090	1,09E-04	
	50083,07	0,107	267,47	50083,35	2,310	-62,28	0,106	0,394	3,94E-03	0,061	2,39E-04	
100 kHz sideband	99916,52	0,031	143,17	99916,50	1,049	235,30	0,015	0,055	5,51E-04	0,060	3,31E-05	
	100082,85	0,031	163,90	100082,85	1,059	196,93	0,013	0,048	4,79E-04	0,090	4,32E-05	
										Pot. ativa total =	26,9 W	
										Erro máx total =	0,04 W	
										Erro máx % =	0,16%	

Tabela B.5: Incerteza de medição para o wattímetro PZ4000 para situação POT0004

POT0004 - 7500 rpm/159 mN.m											
	Corrente			Tensão			Potência			Incertezas	
	Freq [Hz]	Amp [A]	Fase [°]	Freq [Hz]	Amp [V]	Fase [°]	Pot. ativa [W]	Pot. %	Pot. pond.	Ero máximo [W]	E. máx pond. [W]
Fundamental	125,63	4,019	-26,71	125,18	27,696	-55,37	96,376	99,675	9,97E-01	0,171	1,71E-01
50 kHz sideband	49874,75	0,130	225,43	49874,69	2,815	-46,80	0,148	0,153	1,53E-03	0,150	2,30E-04
	50124,96	0,131	-1,56	50124,96	2,836	29,22	0,157	0,163	1,63E-03	0,301	4,90E-04
100 kHz sideband	99871,14	0,008	206,29	99873,18	0,331	263,23	0,000	0,000	1,30E-06	0,300	4,00E-07
	100127,79	0,007	228,14	100126,27	0,315	-62,71	0,000	0,000	3,20E-06	0,450	1,50E-06
150 kHz sideband	149874,47	0,015	253,39	149874,28	0,699	-10,99	0,005	0,005	5,44E-05	0,450	2,45E-05
	150125,07	0,015	28,45	150125,00	0,692	62,60	0,004	0,004	4,00E-05	0,450	1,80E-05
										Pot. ativa total =	96,69 W
										Ero máx total =	0,17 W
										Erro máx % =	0,18%

Tabela B.6: Incerteza de medição para o wattímetro PZ4000 para situação POT0005

POT0005 - 7500 rpm/32 mN.m											
	Corrente			Tensão			Potência			Incertezas	
	Freq [Hz]	Amp [A]	Fase [°]	Freq [Hz]	Amp [V]	Fase [°]	Pot. ativa [W]	Pot. %	Pot. pond.	Ero máximo [W]	E. máx pond. [W]
Fundamental	124,00	1,004	103,37	124,79	19,818	68,46	17,162	98,474	9,85E-01	0,032	3,17E-02
50 kHz sideband	49874,79	0,117	-76,31	49874,82	2,506	11,45	0,118	0,677	6,77E-03	0,030	2,05E-04
	50124,77	0,118	-61,77	50124,72	2,521	-31,51	0,128	0,733	7,33E-03	0,061	4,45E-04
100 kHz sideband	99874,75	0,022	204,56	99874,84	0,768	-62,20	0,008	0,046	4,63E-04	0,060	2,78E-05
	100124,86	0,023	222,79	100125,21	0,786	252,54	0,008	0,045	4,47E-04	0,090	4,03E-05
150 kHz sideband	149873,43	0,006	-38,06	149873,25	0,293	49,90	0,001	0,004	4,26E-05	0,090	3,80E-06
	150124,23	0,009	239,46	150124,71	0,495	-27,85	0,002	0,012	1,16E-04	0,090	1,04E-05
200 kHz sideband	200124,23	0,008	250,89	200124,71	0,495	-76,11	0,002	0,009	9,43E-05	0,090	8,50E-06
										Pot. ativa total =	17,43 W
										Ero máx total =	0,03 W
										Erro máx % =	0,19%

Tabela B.7: Incerteza de medição para o wattímetro PZ4000 para situação POT0006

POT0006 - 10000 rpm/143 mN.m													
	Corrente			Tensão			Potência			Incertezas			
	Freq [Hz]	Amp [A]	Fase [°]	Freq [Hz]	Amp [V]	Fase [°]	Pot. ativa [W]	Pot. %	Pot. pond.	Erro máximo [W]	E. máx pond. [W]		
Fundamental	166,69	3,881	173,75	166,69	32,991	144,92	110,857	99,755	9,98E-01	0,171	1,70E-01		
50 kHz sideband	49833,12	0,116	205,22	49833,16	2,482	-65,30	0,123	0,111	1,11E-03	0,120	1,33E-04		
	50166,44	0,118	20,91	50166,51	2,515	49,39	0,135	0,121	1,21E-03	0,241	2,92E-04		
100 kHz sideband	99832,83	0,026	-38,06	99832,63	0,949	46,46	0,009	0,008	7,94E-05	0,240	1,91E-05		
	100166,43	0,025	115,65	100165,83	0,929	159,52	0,006	0,005	5,05E-05	0,360	1,82E-05		
										Pot. ativa total =	111,13 W		
										Erro máx total =	0,17 W		
										Erro máx % =	0,15%		

Tabela B.8: Incerteza de medição para o wattímetro PZ4000 para situação POT0007

POT0007 - 10000 rpm/24 mN.m													
	Corrente			Tensão			Potência			Incertezas			
	Freq [Hz]	Amp [A]	Fase [°]	Freq [Hz]	Amp [V]	Fase [°]	Pot. rms [W]	Pot. %	Pot. pond.	Erro máximo [W]	E. máx pond. [W]		
Fundamental	165,78	0,879	72,97	166,68	25,295	42,12	19,250	98,513	9,85E-01	0,027	2,64E-02		
50 kHz sideband	49833,17	0,124	-15,04	49833,24	2,659	73,24	0,135	0,690	6,90E-03	0,015	1,05E-04		
	50166,49	0,125	-50,93	50166,40	2,688	-21,20	0,147	0,753	7,53E-03	0,031	2,33E-04		
100 kHz sideband	149833,04	0,015	86,76	149832,69	0,699	180,73	0,005	0,026	2,59E-04	0,045	1,17E-05		
	150166,19	0,015	47,80	150165,67	0,683	84,20	0,003	0,018	1,77E-04	0,045	8,00E-06		
										Pot. ativa total =	19,54 W		
										Erro máx total =	0,03 W		
										Erro máx % =	0,14%		

Tabela B.9: Incerteza de medição para o wattímetro PZ4000 para situação POT0008

POT0007 - 10000 rpm/24 mN.m											
Corrente			Tensão			Potência			Incertezas		
Freq [Hz]	Amp [A]	Fase [°]	Freq [Hz]	Amp [V]	Fase [°]	Pot. rms [W]	Pot. %	Pot. pond.	Erro máximo [W]	E. máx pond. [W]	
Fundamental	165,78	0,879	72,97	166,68	25,295	42,12	19,250	98,513	9,85E-01	0,027	2,64E-02
50 kHz sideband	49833,17	0,124	-15,04	49833,24	2,659	73,24	0,135	0,690	6,90E-03	0,015	1,05E-04
	50166,49	0,125	-50,93	50166,40	2,688	-21,20	0,147	0,753	7,53E-03	0,031	2,33E-04
100 kHz sideband	149833,04	0,015	86,76	149832,69	0,699	180,73	0,005	0,026	2,59E-04	0,045	1,17E-05
	150166,19	0,015	47,80	150165,67	0,683	84,20	0,003	0,018	1,77E-04	0,045	8,00E-06
Pot. ativa total =									19,54 W		
Erro máx total =									0,03 W		
Erro máx % =									0,14%		

Tabela B.10: Incerteza de medição para o wattímetro PZ4000 para situação POT0009

POT0009 - 12500 rpm/19 mN.m											
Corrente			Tensão			Potência			Incertezas		
Freq [Hz]	Amp [A]	Fase [°]	Freq [Hz]	Amp [V]	Fase [°]	Pot. ativa [W]	Pot. %	Pot. pond.	Erro máximo [W]	E. máx pond. [W]	
Fundamental	204,96	0,745	91,52	208,22	30,686	52,73	19,573	98,577	9,86E-01	0,035	3,41E-02
50 kHz sideband	49791,64	0,119	77,26	49791,63	2,542	166,11	0,127	0,639	6,39E-03	0,030	1,93E-04
	50207,64	0,122	65,07	50207,78	2,592	93,84	0,142	0,716	7,16E-03	0,061	4,36E-04
100 kHz sideband	99792,74	0,018	-38,66	99791,80	0,614	53,39	0,005	0,026	2,55E-04	0,060	1,53E-05
	100207,41	0,017	-54,42	100206,87	0,575	-17,65	0,003	0,017	1,65E-04	0,090	1,49E-05
150 kHz sideband	149792,41	0,012	20,06	149793,17	0,517	113,96	0,003	0,015	1,47E-04	0,090	1,33E-05
	150205,22	0,012	20,81	150203,99	0,502	55,92	0,002	0,011	1,06E-04	0,090	9,60E-06
Pot. ativa total =									19,86 W		
Erro máx total =									0,03 W		
Erro máx % =									0,18%		

Tabela B.11: Incerteza de medição para o wattímetro PZ4000 para situação POT0010

POT0010 - 15000 rpm/96 mN.m											
	Corrente			Tensão			Potência			Incertezas	
	Freq [Hz]	Amp [A]	Fase [°]	Freq [Hz]	Amp [V]	Fase [°]	Pot. ativa [W]	Pot. %	Pot. pond.	Erro máximo [W]	E. máx pond. [W]
Fundamental	249,11	2,684	137,88	249,91	40,943	104,46	94,990	99,851	9,99E-01	0,155	1,55E-01
50 kHz sideband	49748,81	0,076	124,65	49749,94	1,583	212,59	0,049	0,051	5,11E-04	0,120	6,13E-05
	50250,79	0,079	218,83	50250,54	1,646	247,25	0,059	0,062	6,18E-04	0,240	1,49E-04
100 kHz sideband	100250,15	0,032	200,62	99747,56	0,034	116,32	99749,69	1,184	204,41	0,016	0,240
	149753,97	0,010	86,82	100249,27	1,152	235,26	0,014	0,015	1,46E-04	0,360	5,26E-05
150 kHz sideband				149751,03	0,473	183,89	0,002	0,002	2,47E-05	0,360	8,90E-06
	150243,35	0,010	200,22	150246,19	0,490	231,56	0,002	0,002	2,10E-05	0,360	7,60E-06
										Pot. ativa total =	95,13 W
										Erro máx total =	0,16 W
										Erro máx % =	0,16%

Tabela B.12: Incerteza de medição para o wattímetro PZ4000 para situação POT0011

POT0011 - 15000 rpm/16 mN.m											
	Corrente			Tensão			Potência			Incertezas	
	Freq [Hz]	Amp [A]	Fase [°]	Freq [Hz]	Amp [V]	Fase [°]	Pot. ativa [W]	Pot. %	Pot. pond.	Erro máximo [W]	E. máx pond. [W]
Fundamental	252,65	0,641	153,50	250,10	35,982	135,16	19,558	98,822	9,88E-01	0,035	3,42E-02
50 kHz sideband	49749,57	0,103	233,00	49749,15	2,186	-36,93	0,098	0,493	4,93E-03	0,030	1,49E-04
	50249,47	0,106	26,14	50249,64	2,246	54,46	0,108	0,547	5,47E-03	0,061	3,31E-04
100 kHz sideband	99750,00	0,032	-3,23	99750,27	1,111	87,07	0,015	0,078	7,81E-04	0,060	4,69E-05
	100250,19	0,030	143,74	100249,71	1,068	178,63	0,012	0,060	6,04E-04	0,090	5,45E-05
										Pot. ativa total =	19,79 W
										Erro máx total =	0,03 W
										Erro máx % =	0,18%

B.2 Tabelas com os cálculos de potência ativa total e erro de medição para o wattímetro WT3000

As tabelas B.13 à B.24 apresentam os valores da simulação para erro de medição a partir das especificações do wattímetro WT3000 para ensaios realizados com o motor EC45 nas situações POT0000 a POT0011.

Tabela B.13: Incerteza de medição para o wattímetro WT3000 para situação POT0000

POT0000 - 2500 rpm/172 mN.m											
	Corrente			Tensão			Potência			Incertezas	
	Freq [Hz]	Amp [A]	Fase [°]	Freq [Hz]	Amp [V]	Fase [°]	Pot. ativa [W]	Pot. %	Pot. pond.	Erro máximo [W]	E. máx pond. [W]
Fundamental	41,65	4,553	178,30	41,64	17,203	149,24	67,823	99,661	9,97E-01	0,109	1,09E-01
50 kHz sideband	49958,17	0,115	-66,40	49958,19	2,572	15,78	0,097	0,143	1,43E-03	0,300	4,28E-04
	50041,51	0,116	101,23	50041,50	2,575	136,95	0,106	0,156	1,56E-03	0,451	7,05E-04
100 kHz sideband	99958,10	0,031	-63,77	99958,10	1,051	28,14	0,015	0,022	2,17E-04	0,450	9,78E-05
	100041,49	0,031	115,41	100041,49	1,054	148,77	0,013	0,019	1,85E-04	1,500	2,78E-04
										Pot. ativa total =	68,05 W
										Erro máx total =	0,11 W
										Erro máx % =	0,16%

Tabela B.14: Incerteza de medição para o wattímetro WT3000 para situação POT0001

POT0001 - 2500 rpm/76 mN.m											
	Corrente			Tensão			Potência			Incertezas	
	Freq [Hz]	Amp [A]	Fase [°]	Freq [Hz]	Amp [V]	Fase [°]	Pot. ativa [W]	Pot. %	Pot. pond.	Erro máximo [W]	E. máx pond. [W]
Fundamental	41,69	2,115	128,59	41,67	11,031	99,43	20,203	99,378	9,94E-01	0,048	4,73E-02
50 kHz sideband	49958,08	0,079	-1,10	49958,09	1,746	82,24	0,047	0,233	2,33E-03	0,150	3,50E-04
	50041,44	0,080	68,68	50041,43	1,748	103,21	0,052	0,255	2,55E-03	0,225	5,75E-04
100 kHz sideband	99957,98	0,032	22,48	99957,96	1,133	111,27	0,015	0,075	7,47E-04	0,225	1,68E-04
	100041,34	0,032	95,19	100041,28	1,136	132,83	0,012	0,059	5,93E-04	0,750	4,45E-04
										Pot. ativa total =	20,33 W
										Erro máx total =	0,05 W
										Erro máx % =	0,24%

Tabela B.15: Incerteza de medição para o wattímetro WT3000 para situação POT0002

POT0002 - 5000 rpm/162 mN.m											
	Corrente			Tensão			Fase [°]	Pot. ativa [W]	Potência		Incertezas
	Freq [Hz]	Amp [A]	Fase [°]	Freq [Hz]	Amp [V]	Fase [°]			Pot. %	Pot. pond.	
Fundamental	83,23	4,288	-62,19	83,32	22,465	268,01	83,421	9,9628	9,96E-01	0,117	1,16E-01
50 kHz sideband	49916,35	0,129	81,83	49916,51	2,861	166,15	0,132	0,158	1,58E-03	0,300	4,73E-04
	50083,50	0,130	137,87	50083,05	2,870	167,09	0,166	0,198	1,98E-03	0,451	8,92E-04
100 kHz sideband	99916,43	0,016	-17,73	99916,67	0,455	82,52	0,004	0,005	4,76E-05	0,450	2,14E-05
	100083,00	0,016	70,06	100082,54	0,461	95,52	0,004	0,004	4,28E-05	1,500	6,42E-05
150 kHz sideband	149916,19	0,012	113,55	149915,81	0,618	197,27	0,003	0,003	2,99E-05	1,500	4,49E-05
	150082,58	0,012	144,07	150082,65	0,613	190,73	0,001	0,002	1,70E-05	1,500	2,55E-05
200 kHz sideband	199915,89	0,007	16,45	199916,16	0,395	113,79	0,001	0,002	1,72E-05	1,500	2,57E-05
	200082,60	0,007	80,74	200082,08	0,394	115,51	0,001	0,001	1,22E-05	1,500	1,83E-05
Pot. ativa total = 83,73 W											
Erro máx total = 0,12 W											
Erro máx % = 0,14%											

Tabela B.16: Incerteza de medição para o wattímetro WT3000 para situação POT0003

POT0003 - 5000 rpm/67 mN.m											
	Corrente			Tensão			Fase [°]	Pot. ativa [W]	Potência		Incertezas
	Freq [Hz]	Amp [A]	Fase [°]	Freq [Hz]	Amp [V]	Fase [°]			Pot. %	Pot. pond.	
Fundamental	83,59	1,884	95,99	83,40	16,349	67,81	26,666	99,141	9,91E-01	0,043	4,30E-02
50 kHz sideband	49916,73	0,106	252,24	49916,55	2,303	-20,36	0,097	0,362	3,62E-03	0,120	4,36E-04
	50083,07	0,107	267,47	50083,35	2,310	-62,28	0,106	0,394	3,94E-03	0,181	7,13E-04
100 kHz sideband	99916,52	0,031	143,17	99916,50	1,049	235,30	0,015	0,055	5,51E-04	0,180	9,92E-05
	100082,85	0,031	163,90	100082,85	1,059	196,93	0,013	0,048	4,79E-04	0,600	2,88E-04
Pot. ativa total = 26,9 W											
Erro máx total = 0,04 W											
Erro máx % = 0,17%											

Tabela B.17: Incerteza de medição para o wattímetro WT3000 para situação POT0004

POT0004 - 7500 rpm/159 mN.m											
Corrente			Tensão			Potência			Incertezas		
Freq [Hz]	Amp [A]	Fase [°]	Freq [Hz]	Amp [V]	Fase [°]	Pot. ativa [W]	Pot. %	Pot. pond.	Erro máximo [W]	E. máx pond. [W]	
Fundamental	125,63	4,019	-26,71	125,18	27,696	-55,37	96,376	99,675	9,97E-01	0,123	1,23E-01
50 kHz sideband	49874,75	0,130	225,43	49874,69	2,815	-46,80	0,148	0,153	1,53E-03	0,300	4,59E-04
	50124,96	0,131	-1,56	50124,96	2,836	29,22	0,157	0,163	1,63E-03	0,451	7,35E-04
100 kHz sideband	99871,14	0,008	206,29	99873,18	0,331	263,23	0,000	0,000	1,30E-06	0,450	6,00E-07
	100127,79	0,007	228,14	100126,27	0,315	-62,71	0,000	0,000	3,20E-06	1,500	4,90E-06
150 kHz sideband	149874,47	0,015	253,39	149874,28	0,699	-10,99	0,005	0,005	5,44E-05	1,500	8,16E-05
	150125,07	0,015	28,45	150125,00	0,692	62,60	0,004	0,004	4,00E-05	1,500	6,01E-05
										Pot. ativa total =	96,69 W
										Erro máx total =	0,12 W
										Erro máx % =	0,13%

Tabela B.18: Incerteza de medição para o wattímetro WT3000 para situação POT0005

POT0005 - 7500 rpm/32 mN.m											
Corrente			Tensão			Potência			Incertezas		
Freq [Hz]	Amp [A]	Fase [°]	Freq [Hz]	Amp [V]	Fase [°]	Pot. ativa [W]	Pot. %	Pot. pond.	Erro máximo [W]	E. máx pond. [W]	
Fundamental	124,00	1,004	103,37	124,79	19,818	68,46	17,162	98,474	9,85E-01	0,039	3,80E-02
50 kHz sideband	49874,79	0,117	-76,31	49874,82	2,506	11,45	0,118	0,677	6,77E-03	0,120	8,15E-04
	50124,77	0,118	-61,77	50124,72	2,521	-31,51	0,128	0,733	7,33E-03	0,181	1,33E-03
100 kHz sideband	99874,75	0,022	204,56	99874,84	0,768	-62,20	0,008	0,046	4,63E-04	0,180	8,33E-05
	100124,86	0,023	222,79	100125,21	0,786	252,54	0,008	0,045	4,47E-04	0,600	2,68E-04
150 kHz sideband	149873,43	0,006	-38,06	149873,25	0,293	49,90	0,001	0,004	4,28E-05	0,600	2,56E-05
	199873,71	0,009	239,46	199873,97	0,500	-27,85	0,002	0,012	1,16E-04	0,600	6,96E-05
200 kHz sideband	200124,23	0,008	250,89	200124,71	0,495	-76,11	0,002	0,009	9,43E-05	0,600	5,66E-05
										Pot. ativa total =	17,43 W
										Erro máx total =	0,04 W
										Erro máx % =	0,23%

Tabela B.19: Incerteza de medição para o wattímetro WT3000 para situação POT0006

POT0006 - 10000 rpm/143 mN.m											
Corrente			Tensão				Potência			Incertezas	
Freq [Hz]	Amp [A]	Fase [°]	Freq [Hz]	Amp [V]	Fase [°]	Pot. ativa [W]	Pot. %	Pot. pond.	Erro máximo [W]	E. máx pond. [W]	
Fundamental	166,69	3,881	173,75	166,69	32,991	144,32	110,857	9,98E-01	0,205	2,05E-01	
50 kHz sideband	49833,12	0,116	205,22	49833,16	2,482	-65,30	0,123	1,11E-03	0,600	6,65E-04	
	50166,44	0,118	20,91	50166,51	2,515	49,39	0,135	1,21E-03	0,901	1,09E-03	
100 kHz sideband	99832,83	0,026	-38,06	99832,63	0,949	46,46	0,009	7,94E-05	0,900	7,15E-05	
	100166,43	0,025	115,65	100165,83	0,929	159,52	0,006	5,05E-05	3,000	1,51E-04	
Pot. ativa total =										111,13 W	
Erro máx total =										0,21 W	
Erro máx % =										0,19%	

Tabela B.20: Incerteza de medição para o wattímetro WT3000 para situação POT0007

POT0007 - 10000 rpm/24 mN.m											
Corrente			Tensão				Potência			Incertezas	
Freq [Hz]	Amp [A]	Fase [°]	Freq [Hz]	Amp [V]	Fase [°]	Pot. rms [W]	Pot. %	Pot. pond.	Erro máximo [W]	E. máx pond. [W]	
Fundamental	165,78	0,879	72,97	166,68	25,295	42,12	19,250	9,85E-01	0,025	2,43E-02	
50 kHz sideband	49833,17	0,124	-15,04	49833,24	2,659	73,24	0,135	6,90E-03	0,060	4,17E-04	
	50166,49	0,125	-50,93	50166,40	2,688	-21,20	0,147	7,53E-03	0,091	6,86E-04	
100 kHz sideband	149833,04	0,015	86,76	149832,69	0,699	180,73	0,005	2,59E-04	0,300	7,78E-05	
	150166,19	0,015	47,80	150165,67	0,683	84,20	0,003	1,77E-04	0,300	5,31E-05	
Pot. ativa total =										19,54 W	
Erro máx total =										0,03 W	
Erro máx % =										0,13%	

Tabela B.21: Incerteza de medição para o wattímetro WT3000 para situação POT0008

POT0008 - 12500 rpm/115 mN.m												
Corrente			Tensão				Potência			Incertezas		
Freq [Hz]	Amp [A]	Fase [°]	Freq [Hz]	Amp [V]	Fase [°]	Pot. ativa [W]	Pot. %	Pot. pond.	Erro máximo [W]	E. máx pond. [W]		
Fundamental	208,58	3,102	200,79	36,544	169,74	98,169	99,774	9,98E-01	0,199	1,99E-01		
50 kHz sideband	49791,59	0,101	-79,79	49791,53	2,128	9,98	0,094	9,41E-04	0,600	5,65E-04		
	50206,12	0,104	147,90	50207,86	2,175	177,22	0,100	1,01E-03	0,901	9,11E-04		
100 kHz sideband	99791,12	0,033	133,17	99791,07	1,169	223,92	0,017	1,74E-04	0,900	1,56E-04		
	100207,68	0,032	-8,97	100207,11	1,142	27,13	0,013	1,31E-04	3,000	3,93E-04		
Pot. ativa total =									98,39 W			
Erro máx total =									0,2 W			
Erro máx % =									0,20%			

Tabela B.22: Incerteza de medição para o wattímetro WT3000 para situação POT0009

POT0009 - 12500 rpm/19 mN.m												
Corrente			Tensão				Potência			Incertezas		
Freq [Hz]	Amp [A]	Fase [°]	Freq [Hz]	Amp [V]	Fase [°]	Pot. ativa [W]	Pot. %	Pot. pond.	Erro máximo [W]	E. máx pond. [W]		
Fundamental	204,96	0,745	91,52	208,22	30,686	52,73	19,573	9,86E-01	0,040	3,92E-02		
50 kHz sideband	49791,64	0,119	77,26	49791,63	2,542	166,11	0,127	6,39E-03	0,120	7,69E-04		
	50207,64	0,122	65,07	50207,78	2,592	93,84	0,142	7,16E-03	0,181	1,30E-03		
100 kHz sideband	99792,74	0,018	-38,67	99791,80	0,614	53,39	0,005	2,55E-04	0,180	4,59E-05		
	100207,41	0,017	-54,42	100206,87	0,575	-17,65	0,003	1,65E-04	0,600	9,93E-05		
150 kHz sideband	149792,41	0,012	20,06	149793,17	0,517	113,96	0,003	1,47E-04	0,600	8,84E-05		
	150205,22	0,012	20,81	150203,99	0,502	55,92	0,002	1,08E-04	0,600	6,37E-05		
Pot. ativa total =									19,86 W			
Erro máx total =									0,04 W			
Erro máx % =									0,21%			

Tabela B.23: Incerteza de medição para o wattímetro WT3000 para situação POT0010

POT0010 - 15000 rpm/96 mN.m											
	Corrente			Tensão			Potência			Incertezas	
	Freq [Hz]	Amp [A]	Fase [°]	Freq [Hz]	Amp [V]	Fase [°]	Pot. ativa [W]	Pot. %	Pot. pond.		Erro máximo [W]
Fundamental	249,11	2,684	137,88	249,91	40,943	104,46	94,990	99,851	9,99E-01	0,197	1,87E-01
50 kHz sideband	49748,81	0,076	124,65	49749,94	1,583	212,59	0,049	0,051	5,11E-04	0,600	3,07E-04
	50250,79	0,079	218,83	50250,54	1,646	247,25	0,059	0,062	6,18E-04	0,900	5,57E-04
100 kHz sideband	99747,56	0,034	116,32	99749,69	1,184	204,41	0,016	0,017	1,70E-04	0,900	1,53E-04
	100250,15	0,032	200,62	100249,27	1,152	235,26	0,014	0,015	1,46E-04	3,000	4,38E-04
150 kHz sideband	149753,97	0,010	86,82	149751,03	0,473	183,89	0,002	0,002	2,47E-05	3,000	7,41E-05
	150243,35	0,010	200,22	150246,19	0,490	231,56	0,002	0,002	2,10E-05	3,000	6,29E-05
										Pot. ativa total =	95,13 W
										Erro máx total =	0,2 W
										Erro máx % =	0,21%

Tabela B.24: Incerteza de medição para o wattímetro WT3000 para situação POT0011

POT0011 - 15000 rpm/16 mN.m											
	Corrente			Tensão			Potência			Incertezas	
	Freq [Hz]	Amp [A]	Fase [°]	Freq [Hz]	Amp [V]	Fase [°]	Pot. ativa [W]	Pot. %	Pot. pond.		Erro máximo [W]
Fundamental	252,65	0,641	153,50	250,10	35,982	135,16	19,558	98,822	9,88E-01	0,040	3,93E-02
50 kHz sideband	49749,57	0,103	233,00	49749,15	2,186	-36,93	0,098	0,493	4,93E-03	0,120	5,93E-04
	50249,47	0,106	26,14	50249,64	2,246	54,46	0,108	0,547	5,47E-03	0,181	9,88E-04
100 kHz sideband	99750,00	0,032	-3,23	99750,27	1,111	87,07	0,015	0,078	7,81E-04	0,180	1,41E-04
	100250,19	0,030	143,74	100249,71	1,068	178,63	0,012	0,060	6,04E-04	0,600	3,63E-04
										Pot. ativa total =	19,79 W
										Erro máx total =	0,04 W
										Erro máx % =	0,21%

B.3 Tabelas com os cálculos de potência ativa total e erro de medição para o wattímetro LMG500

As tabelas B.25 à B.36 apresentam os valores da simulação para erro de medição a partir das especificações do wattímetro LMG500 para ensaios realizados com o motor EC45 nas situações POT0000 a POT0011.

Tabela B.25: Incerteza de medição para o wattímetro LMG500 para situação POT0000

		POT0000 - 2500 rpm/172 mN.m						Potência		Incertezas	
		Corrente		Tensão		Pot. ativa [W]		Pot. %	Pot. pond.	Erro máximo [W]	E. máx pond. [W]
Freq [Hz]	Amp [A]	Fase [°]	Freq [Hz]	Amp [V]	Fase [°]	Pot. ativa [W]	Pot. %	Pot. pond.	Erro máximo [W]	E. máx pond. [W]	
Fundamental	41,65	4,553	178,30	41,64	17,203	67,823	99,661	9,97E-01	0,056	5,63E-02	
50 kHz sideband	49958,17	0,115	-66,40	49958,19	2,572	0,097	0,143	1,48E-03	0,375	5,35E-04	
100 kHz sideband	50041,51	0,116	101,23	50041,50	2,575	0,106	0,156	1,56E-03	0,375	5,87E-04	
	99958,10	0,031	-63,77	99958,10	1,051	0,015	0,022	2,17E-04	0,375	8,15E-05	
	100041,49	0,031	115,41	100041,49	1,054	0,013	0,019	1,85E-04	1,250	2,32E-04	
Pot. ativa total =										66,05 W	
Erro máx total =										0,06 W	
Erro máx % =										0,08%	

Tabela B.26: Incerteza de medição para o wattímetro LMG500 para situação POT0001

		POT0001 - 2500 rpm/76 mN.m						Potência		Incertezas	
		Corrente		Tensão		Pot. ativa [W]		Pot. %	Pot. pond.	Erro máximo [W]	E. máx pond. [W]
Freq [Hz]	Amp [A]	Fase [°]	Freq [Hz]	Amp [V]	Fase [°]	Pot. ativa [W]	Pot. %	Pot. pond.	Erro máximo [W]	E. máx pond. [W]	
Fundamental	41,69	2,115	128,59	41,67	11,031	99,43	99,378	9,94E-01	0,015	1,49E-02	
50 kHz sideband	49958,08	0,079	-1,10	49958,09	1,746	0,047	0,233	2,33E-03	0,094	2,19E-04	
100 kHz sideband	50041,44	0,080	68,68	50041,43	1,748	0,052	0,255	2,55E-03	0,094	2,39E-04	
	99957,98	0,032	22,48	99957,96	1,133	0,015	0,075	7,47E-04	0,094	7,01E-05	
	100041,34	0,032	95,19	100041,28	1,136	0,012	0,059	5,99E-04	0,313	1,86E-04	
Pot. ativa total =										20,33 W	
Erro máx total =										0,02 W	
Erro máx % =										0,08%	

Tabela B.27: Incerteza de medição para o wattímetro LMG500 para situação POT0002

POT0002 - 5000 rpm/162 mN.m														
		Corrente		Tensão		Fase [°]		Freq [Hz]		Potência		Incertezas		
	Freq [Hz]	Amp [A]	Amp [A]	Amp [V]	Amp [V]	Fase [°]	Fase [°]	Freq [Hz]	Freq [Hz]	Pot. ativa [W]	Pot. %	Pot. pond.	Erro máximo [W]	E. máx pond. [W]
Fundamental	83,23	4,288	-62,19	83,32	22,465	268,01	268,01	83,421	83,421	99,628	99,628	9,98E-01	0,061	6,06E-02
50 kHz sideband	49916,35	0,129	81,83	49916,51	2,861	166,15	166,15	0,132	0,132	0,158	0,158	1,59E-03	0,375	5,91E-04
100 kHz sideband	50082,50	0,130	137,87	50083,05	2,870	167,09	167,09	0,166	0,166	0,198	0,198	1,98E-03	0,375	7,42E-04
	99916,43	0,016	-17,73	99916,67	0,455	82,52	82,52	0,004	0,004	0,005	0,005	4,78E-05	0,375	1,78E-05
	100083,00	0,016	70,06	100082,54	0,461	95,52	95,52	0,003	0,003	0,004	0,004	4,28E-05	1,250	5,35E-05
	149916,19	0,012	113,55	149915,81	0,618	197,27	197,27	0,003	0,003	0,002	0,002	2,99E-05	1,250	3,74E-05
	150082,58	0,012	144,07	150082,65	0,613	190,73	190,73	0,001	0,001	0,002	0,002	1,70E-05	1,250	2,13E-05
	199915,89	0,007	16,45	199916,16	0,395	113,79	113,79	0,001	0,001	0,002	0,002	1,72E-05	1,250	2,14E-05
	200082,60	0,007	80,74	200082,08	0,394	115,51	115,51	0,001	0,001	0,001	0,001	1,22E-05	1,250	1,53E-05
													Pot. ativa total =	83,73 W
													Erro máx total =	0,06 W
													Erro máx % =	0,07%

Tabela B.28: Incerteza de medição para o wattímetro LMG500 para situação POT0003

POT0003 - 5000 rpm/67 mN.m														
		Corrente		Tensão		Fase [°]		Freq [Hz]		Potência		Incertezas		
	Freq [Hz]	Amp [A]	Amp [A]	Amp [V]	Amp [V]	Fase [°]	Fase [°]	Freq [Hz]	Freq [Hz]	Pot. ativa [W]	Pot. %	Pot. pond.	Erro máximo [W]	E. máx pond. [W]
Fundamental	83,59	1,884	95,99	83,40	16,349	67,81	67,81	26,666	26,666	99,141	99,141	9,91E-01	0,026	2,60E-02
50 kHz sideband	49916,73	0,106	252,24	49916,55	2,303	-20,36	-20,36	0,097	0,097	0,362	0,362	3,62E-03	0,188	6,80E-04
100 kHz sideband	50083,07	0,107	267,47	50083,35	2,310	-62,28	-62,28	0,106	0,106	0,394	0,394	3,94E-03	0,188	7,41E-04
	99916,52	0,031	143,17	99916,50	1,049	235,30	235,30	0,015	0,015	0,055	0,055	5,51E-04	0,188	1,03E-04
	100082,85	0,031	163,90	100082,85	1,059	196,93	196,93	0,013	0,013	0,048	0,048	4,79E-04	0,625	3,00E-04
													Pot. ativa total =	26,9 W
													Erro máx total =	0,03 W
													Erro máx % =	0,10%

Tabela B.29: Incerteza de medição para o wattímetro LMG500 para situação POT0004

POT0004 - 7500 rpm/159 mN.m											
Corrente			Tensão			Potência			Incertezas		
Freq [Hz]	Amp [A]	Fase [°]	Freq [Hz]	Amp [V]	Fase [°]	Pot. ativa [W]	Pot. %	Pot. pond.	Erro máximo [W]	E. máx pond. [W]	
Fundamental	125,63	4,019	-26,71	125,18	27,696	-55,37	96,376	99,675	9,97E-01	0,117	1,17E-01
50 kHz sideband	49874,75	0,130	225,43	49874,69	2,815	-46,80	0,148	0,153	1,53E-03	0,900	1,37E-03
	50124,96	0,131	-1,56	50124,96	2,836	29,22	0,157	0,163	1,63E-03	0,900	1,47E-03
100 kHz sideband	99871,14	0,008	206,29	99875,18	0,331	263,23	0,000	0,000	1,30E-06	0,900	1,10E-06
	100127,79	0,007	228,14	100126,27	0,315	-62,71	0,000	0,000	3,20E-06	0,900	9,70E-06
150 kHz sideband	149874,47	0,015	253,39	149874,28	0,699	-10,99	0,005	0,005	5,44E-05	3,000	1,63E-04
	150125,07	0,015	28,45	150125,00	0,692	62,60	0,004	0,004	4,00E-05	3,000	1,20E-04
Pot. ativa total =										96,69 W	
Erro máx total =										0,12 W	
Erro máx % =										0,12%	

Tabela B.30: Incerteza de medição para o wattímetro LMG500 para situação POT0005

POT0005 - 7500 rpm/32 mN.m											
Corrente			Tensão			Potência			Incertezas		
Freq [Hz]	Amp [A]	Fase [°]	Freq [Hz]	Amp [V]	Fase [°]	Pot. ativa [W]	Pot. %	Pot. pond.	Erro máximo [W]	E. máx pond. [W]	
Fundamental	124,00	1,004	103,37	124,79	19,818	68,46	17,162	98,474	9,85E-01	0,014	1,36E-02
50 kHz sideband	49874,79	0,117	-76,31	49874,82	2,506	11,45	0,118	0,677	6,77E-03	0,090	6,11E-04
	50124,77	0,118	-61,77	50124,72	2,521	-31,51	0,128	0,733	7,33E-03	0,090	6,62E-04
100 kHz sideband	99874,75	0,022	204,56	99874,84	0,768	-62,20	0,008	0,046	4,63E-04	0,090	4,17E-05
	100124,86	0,023	222,79	100125,21	0,786	252,54	0,008	0,045	4,47E-04	0,300	1,34E-04
150 kHz sideband	149873,43	0,006	-38,06	149873,25	0,293	49,90	0,001	0,004	4,28E-05	0,300	1,28E-05
	150124,71	0,009	239,46	150124,97	0,500	-27,85	0,002	0,012	1,16E-04	0,300	3,48E-05
200 kHz sideband	200124,23	0,008	250,89	200124,71	0,495	-76,11	0,002	0,009	9,43E-05	0,300	2,83E-05
Pot. ativa total =										17,43 W	
Erro máx total =										0,02 W	
Erro máx % =										0,09%	

Tabela B.31: Incerteza de medição para o wattímetro LMG500 para situação POT0006

POT0006 - 10000 rpm/143 mN.m											
Corrente			Tensão			Potência			Incertezas		
Freq [Hz]	Amp [A]	Fase [°]	Freq [Hz]	Amp [V]	Fase [°]	Pot. ativa [W]	Pot. %	Pot. pond.	Erro máximo [W]	E. máx pond. [W]	
Fundamental	166,69	3,881	173,75	32,991	144,92	110,857	98,755	9,98E-01	0,121	1,21E-01	
50 kHz sideband	49833,12	0,116	205,22	49833,16	-65,30	0,123	0,111	1,11E-03	0,900	9,97E-04	
	50166,44	0,118	20,91	50166,51	2,515	0,135	0,121	1,21E-03	0,900	1,09E-03	
100 kHz sideband	99832,83	0,026	-38,06	99832,63	0,949	46,46	0,009	7,94E-05	0,900	7,15E-05	
	100166,43	0,025	115,65	100165,83	0,929	159,52	0,006	5,05E-05	3,000	1,51E-04	
									Pot. ativa total =	111,13 W	
									Erro máx total =	0,12 W	
									Erro máx % =	0,11%	

Tabela B.32: Incerteza de medição para o wattímetro LMG500 para situação POT0007

POT0007 - 10000 rpm/24 mN.m											
Corrente			Tensão			Potência			Incertezas		
Freq [Hz]	Amp [A]	Fase [°]	Freq [Hz]	Amp [V]	Fase [°]	Pot. rms [W]	Pot. %	Pot. pond.	Erro máximo [W]	E. máx pond. [W]	
Fundamental	165,78	0,879	72,97	25,295	42,12	19,250	98,513	9,85E-01	0,027	2,66E-02	
50 kHz sideband	49833,17	0,124	-15,04	49833,24	2,659	0,135	0,690	6,90E-03	0,216	1,49E-03	
	50166,49	0,125	-50,93	50166,40	2,688	-21,20	0,147	7,53E-03	0,216	1,63E-03	
100 kHz sideband	149833,04	0,015	86,76	149832,69	0,699	180,73	0,005	2,59E-04	0,720	1,87E-04	
	150166,19	0,015	47,80	150165,67	0,683	84,20	0,003	1,77E-04	0,720	1,27E-04	
									Pot. ativa total =	19,54 W	
									Erro máx total =	0,03 W	
									Erro máx % =	0,15%	

Tabela B.33: Incerteza de medição para o wattímetro LMG500 para situação POT0008

POT0008 - 12500 rpm/115 mN.m											
Corrente			Tensão			Potência			Incertezas		
Freq [Hz]	Amp [A]	Fase [°]	Freq [Hz]	Amp [V]	Fase [°]	Pot. ativa [W]	Pot. %	Pot. pond.	Erro máximo [W]	E. máx pond. [W]	
Fundamental	208,58	3,102	200,79	208,37	169,74	98,169	99,774	9,98E-01	0,117	1,17E-01	
50 kHz sideband	49791,59	0,101	-79,79	49791,53	2,128	0,093	0,094	9,41E-04	0,900	8,47E-04	
	50208,12	0,104	147,90	50207,86	2,175	0,100	0,101	1,01E-03	0,900	9,11E-04	
100 kHz sideband	99791,12	0,033	133,17	99791,07	1,169	223,92	0,017	1,74E-04	0,900	1,56E-04	
	100207,68	0,032	-8,97	100207,11	1,142	27,13	0,013	1,31E-04	3,000	3,93E-04	
									Pot. ativa total =	98,39 W	
									Erro máx total =	0,12 W	
									Erro máx % =	0,12%	

Tabela B.34: Incerteza de medição para o wattímetro LMG500 para situação POT0009

POT0009 - 12500 rpm/19 mN.m											
Corrente			Tensão			Potência			Incertezas		
Freq [Hz]	Amp [A]	Fase [°]	Freq [Hz]	Amp [V]	Fase [°]	Pot. ativa [W]	Pot. %	Pot. pond.	Erro máximo [W]	E. máx pond. [W]	
Fundamental	204,96	0,745	91,52	208,22	30,686	52,73	19,573	98,577	0,027	2,67E-02	
50 kHz sideband	49791,64	0,119	77,26	49791,63	2,542	166,11	0,127	0,639	0,216	1,38E-03	
	50207,64	0,122	65,07	50207,78	2,592	93,84	0,142	0,716	0,216	1,55E-03	
100 kHz sideband	99792,74	0,018	-38,67	99791,80	0,614	53,39	0,005	0,026	0,216	5,51E-05	
	100207,41	0,017	-54,42	100206,87	0,575	-17,65	0,003	0,017	0,720	1,19E-04	
150 kHz sideband	149792,41	0,012	20,06	149793,17	0,517	113,96	0,003	0,015	0,720	1,06E-04	
	150205,22	0,012	20,81	150203,99	0,502	55,92	0,002	0,011	1,06E-04	7,64E-05	
									Pot. ativa total =	19,86 W	
									Erro máx total =	0,06 W	
									Erro máx % =	0,15%	

Tabela B.35: Incerteza de medição para o wattímetro LMG500 para situação POT0010

	POT0010 - 15000 rpm/96 mN.m					POT0010 - 15000 rpm/96 mN.m				
	Corrente		Tensão		Fase [°]	Potência		Potência		Incertezas
	Freq [Hz]	Amp [A]	Freq [Hz]	Amp [V]	Fase [°]	Pot. ativa [W]	Pot. %	Pot. pond.	Erro máximo [W]	E. máx pond. [W]
Fundamental	249,11	2,684	249,91	40,943	104,46	94,990	99,851	9,99E-01	0,117	1,16E-01
50 kHz sideband	49748,81	0,076	49749,94	1,583	212,59	0,049	0,051	5,11E-04	0,900	4,60E-04
	50250,79	0,079	50250,54	1,646	247,25	0,059	0,062	6,18E-04	0,900	5,57E-04
100 kHz sideband	99747,56	0,034	99749,69	1,184	204,41	0,016	0,017	1,70E-04	0,900	1,53E-04
	100250,15	0,032	100249,27	1,152	235,26	0,014	0,015	1,46E-04	3,000	4,38E-04
150 kHz sideband	149753,97	0,010	149751,03	0,473	183,89	0,002	0,002	2,47E-05	3,000	7,41E-05
	150243,35	0,010	150246,19	0,490	231,56	0,002	0,002	2,10E-05	3,000	6,29E-05
									Pot. ativa total =	95,13 W
									Erro máx total =	0,12 W
									Erro máx % =	0,12%

Tabela B.36: Incerteza de medição para o wattímetro LMG500 para situação POT0011

	POT0011 - 15000 rpm/16 mN.m					POT0011 - 15000 rpm/16 mN.m				
	Corrente		Tensão		Fase [°]	Potência		Potência		Incertezas
	Freq [Hz]	Amp [A]	Freq [Hz]	Amp [V]	Fase [°]	Pot. ativa [W]	Pot. %	Pot. pond.	Erro máximo [W]	E. máx pond. [W]
Fundamental	252,65	0,641	250,10	35,982	135,16	19,558	96,822	9,88E-01	0,027	2,68E-02
50 kHz sideband	49749,57	0,103	49749,15	2,186	-36,93	0,098	0,493	4,93E-03	0,216	1,07E-03
	50249,47	0,106	50249,64	2,246	54,46	0,108	0,547	5,47E-03	0,216	1,18E-03
100 kHz sideband	99750,00	0,032	99750,27	1,111	87,07	0,015	0,078	7,81E-04	0,216	1,69E-04
	100250,19	0,030	100249,71	1,068	178,63	0,012	0,060	6,04E-04	0,720	4,35E-04
									Pot. ativa total =	19,79 W
									Erro máx total =	0,03 W
									Erro máx % =	0,15%

APÊNDICE C – TABELAS COM O RESUMO DA SIMULAÇÃO DOS ERROS DE MEDIÇÃO PARA OS WATTÍMETROS PZ4000, WT3000 E LMG500

Este apêndice traz a tabela com o resumo do que foi apresentado no apêndice B e o resumo dos valores calculados para o motor EC60. Com os dados resumidos na tabela C.1 e C.2, se pode comparar mais facilmente os resultados das medições para os três wattímetros analisados.

As tabelas apresentam a condição de rotação e carga em que o motor está sendo testado, a potência ativa total para aquela condição, além da frequência aproximada em que se encontra a frequência fundamental. Como resultados têm-se os valores do erro máximo total e o erro máximo percentual.

Conforme o que foi concluído na seção 6.3.2, o wattímetro LMG500 da Zes Zimmer foi o que apresentou menor incerteza de medição para praticamente todo o ensaio realizado.

Tabela C.1: Tabela com o resumo dos valores calculados de potência ativa total e erros de medição para o motor EC45 para os wattímetros PZ4000, WT3000 e LMG500 para os pontos POT0000 a POT0011

PZ4000		WT3000	LMG500
POT0000 - 2500 rpm/172 mN.m			
P _{ativa total}	68,05 W	Frequencia fund ≈	42 Hz
Erro máx total	0,21 W	0,11 W	0,06 W
Erro máx %	0,31%	0,16%	0,08%
POT0001 - 2500 rpm/76 mN.m			
P _{ativa total}	20,33 W	Frequencia fund ≈	42 Hz
Erro máx total	0,07 W	0,05 W	0,02 W
Erro máx %	0,35%	0,24%	0,08%
POT0002 - 5000 rpm/162 mN.m			
P _{ativa total}	83,73 W	Frequencia fund ≈	84 Hz
Erro máx total	0,16 W	0,12 W	0,06 W
Erro máx %	0,19%	0,14%	0,07%
POT0003 - 5000 rpm/67 mN.m			
P _{ativa total}	26,9 W	Frequencia fund ≈	84 Hz
Erro máx total	0,04 W	0,04 W	0,03 W
Erro máx %	0,16%	0,17%	0,10%
POT0004 - 7500 rpm/159 mN.m			
P _{ativa total}	96,69 W	Frequencia fund ≈	125 Hz
Erro máx total	0,17 W	0,12 W	0,12 W
Erro máx %	0,18%	0,13%	0,12%
POT0005 - 7500 rpm/32 mN.m			
P _{ativa total}	17,43 W	Frequencia fund ≈	125 Hz
Erro máx total	0,03 W	0,04 W	0,02 W
Erro máx %	0,19%	0,23%	0,09%
PZ4000		WT3000	LMG500
POT0006 - 10000 rpm/143 mN.m			
P _{ativa total}	111,13 W	Frequencia fund ≈	166 Hz
Erro máx total	0,17 W	0,21 W	0,12 W
Erro máx %	0,15%	0,19%	0,11%
POT0007 - 10000 rpm/24 mN.m			
P _{ativa total}	19,54 W	Frequencia fund ≈	166 Hz
Erro máx total	0,03 W	0,03 W	0,03 W
Erro máx %	0,14%	0,13%	0,15%
POT0008 - 12500 rpm/115 mN.m			
P _{ativa total}	98,39 W	Frequencia fund ≈	208 Hz
Erro máx total	0,16 W	0,2 W	0,12 W
Erro máx %	0,16%	0,20%	0,12%
POT0009 - 12500 rpm/19 mN.m			
P _{ativa total}	19,86 W	Frequencia fund ≈	208 Hz
Erro máx total	0,03 W	0,04 W	0,06 W
Erro máx %	0,18%	0,21%	0,15%
POT0010 - 15000 rpm/96 mN.m			
P _{ativa total}	95,13 W	Frequencia fund ≈	250 Hz
Erro máx total	0,16 W	0,2 W	0,12 W
Erro máx %	0,16%	0,21%	0,12%
POT0011 - 15000 rpm/16 mN.m			
P _{ativa total}	19,79 W	Frequencia fund ≈	250 Hz
Erro máx total	0,03 W	0,04 W	0,03 W
Erro máx %	0,18%	0,21%	0,15%

Tabela C.2: Tabela com o resumo dos valores calculados de potência ativa total e erros de medição para o motor EC60 para os wattímetros PZ4000, WT3000 e LMG500 para os pontos POT0012 a POT0023

		PZ4000	WT3000	LMG500
POT0012				
P _{ativa total} [W]		40,47	Frequência fund [Hz] ≈	17
Erro máx total [W]		0,09	0,26	0,03
Erro máx %		0,23%	0,64%	0,08%
POT0013				
P _{ativa total} [W]		8,23	Frequência fund [Hz] ≈	17
Erro máx total [W]		0,02	0,06	0,01
Erro máx %		0,28%	0,72%	0,13%
POT0014				
P _{ativa total} [W]		10,24	Frequência fund [Hz] ≈	25
Erro máx total [W]		0,03	0,06	0,02
Erro máx %		0,25%	0,60%	0,23%
POT0015				
P _{ativa total} [W]		51,63	Frequência fund [Hz] ≈	25
Erro máx total [W]		0,13	0,46	0,07
Erro máx %		0,25%	0,89%	0,13%
POT0016				
P _{ativa total} [W]		15,66	Frequência fund [Hz] ≈	33
Erro máx total [W]		0,04	0,05	0,02
Erro máx %		0,28%	0,30%	0,14%
POT0017				
P _{ativa total} [W]		67,38	Frequência fund [Hz] ≈	33
Erro máx total [W]		0,16	0,10	0,07
Erro máx %		0,24%	0,14%	0,11%
POT0018				
P _{ativa total} [W]		19,43	Frequência fund [Hz] ≈	42
Erro máx total [W]		0,05	0,05	0,02
Erro máx %		0,26%	0,24%	0,11%
POT0019				
P _{ativa total} [W]		81,34	Frequência fund [Hz] ≈	42
Erro máx total [W]		0,19	0,10	0,07
Erro máx %		0,23%	0,13%	0,09%
POT0020				
P _{ativa total} [W]		20,09	Frequência fund [Hz] ≈	50
Erro máx total [W]		0,03	0,02	0,01
Erro máx %		0,17%	0,10%	0,06%
POT0021				
P _{ativa total} [W]		94,29	Frequência fund [Hz] ≈	50
Erro máx total [W]		0,12	0,07	0,03
Erro máx %		0,13%	0,07%	0,04%
POT0022				
P _{ativa total} [W]		20,66	Frequência fund [Hz] ≈	59
Erro máx total [W]		0,04	0,02	0,01
Erro máx %		0,17%	0,09%	0,05%
POT0023				
P _{ativa total} [W]		106,26	Frequência fund [Hz] ≈	59
Erro máx total [W]		0,17	0,10	0,05
Erro máx %		0,16%	0,10%	0,05%

**APÊNDICE D – TABELAS COM OS CÁLCULOS DE POTÊNCIA
ATIVA TOTAL E ERRO DE MEDIÇÃO PARA O
WATTÍMETRO WT230 UTILIZANDO O MOTOR
EC45**

As tabelas D.1 à D.12 apresentam os valores da simulação para erro de medição a partir das especificações do wattímetro WT230 para ensaios realizados com o motor EC45 nas situações POT0000 a POT0011.

Tabela D.1: Incerteza de medição para o wattímetro WT230 para situação POT0000

POT0000 - 2500 rpm/172 mN.m											
Corrente			Tensão			Potência			Incertezas		
Freq [Hz]	Amp [A]	Fase [°]	Freq [Hz]	Amp [V]	Fase [°]	Pot. ativa [W]	Pot. %	Pot. pond.	Erro máximo [W]	E. máx pond. [W]	
Fundamental	41,65	4,553	178,31	41,64	17,203	149,24	67,823	99,661	9,97E-01	0,503	5,02E-01
50 kHz sideband	49958,17	0,115	-66,40	49958,19	2,572	15,78	0,097	0,143	1,43E-03	0,752	1,07E-03
100 kHz sideband	50041,51	0,116	101,23	50041,50	2,575	136,95	0,106	0,156	1,56E-03	0,752	1,18E-03
	99958,10	0,031	-63,81	99958,10	1,051	28,14	0,015	0,022	2,18E-04	0,751	1,64E-04
	100041,48	0,031	115,54	100041,49	1,054	148,77	0,013	0,019	1,86E-04	0,013	2,40E-06
Pot. ativa total =										68,05 W	
Erro máx total =										0,5 W	
Erro máx % =										0,74%	

Tabela D.2: Incerteza de medição para o wattímetro WT230 para situação POT0001

POT0001 - 2500 rpm/76 mN.m											
Corrente			Tensão			Potência			Incertezas		
Freq [Hz]	Amp [A]	Fase [°]	Freq [Hz]	Amp [V]	Fase [°]	Pot. ativa [W]	Pot. %	Pot. pond.	Erro máximo [W]	E. máx pond. [W]	
Fundamental	41,69	2,115	128,52	41,67	11,031	99,43	20,204	99,343	9,93E-01	0,211	2,09E-01
50 kHz sideband	49958,08	0,079	-1,10	49958,09	1,746	82,24	0,047	0,233	2,33E-03	0,376	8,77E-04
100 kHz sideband	50041,44	0,080	68,68	50041,43	1,748	103,21	0,052	0,255	2,55E-03	0,376	9,59E-04
	99957,98	0,032	22,48	99957,96	1,133	111,27	0,015	0,075	7,47E-04	0,376	2,81E-04
	100041,34	0,032	95,19	100041,28	1,136	132,83	0,012	0,059	5,93E-04	0,012	7,20E-06
Pot. ativa total =										20,33 W	
Erro máx total =										0,21 W	
Erro máx % =										1,04%	

Tabela D.3: Incerteza de medição para o wattímetro WT230 para situação POT0002

		POT0002 - 5000 rpm/162 mN.m											
		Corrente				Tensão				Potência			
Freq [Hz]	Amp [A]	Fase [°]	Freq [Hz]	Amp [V]	Fase [°]	Pot. ativa [W]	Pot. %	Pot. pond.	Erro máximo [W]	E. máx pond. [W]			
Fundamental	83,23	4,288	-62,19	83,32	22,465	268,01	83,421	99,630	9,96E-01	0,467	4,65E-01		
50 kHz sideband	49916,35	0,129	81,83	49916,51	2,861	166,15	0,132	0,158	1,58E-03	0,753	1,19E-03		
	50082,50	0,130	137,87	50083,05	2,870	167,09	0,166	0,198	1,98E-03	0,754	1,49E-03		
100 kHz sideband	99916,43	0,016	-17,73	99916,67	0,455	82,52	0,004	0,005	4,76E-05	0,750	3,57E-05		
	100083,00	0,016	70,06	100082,54	0,461	95,52	0,004	0,004	4,28E-05	0,004	2,00E-07		
150 kHz sideband	149916,19	0,012	113,55	149915,81	0,618	197,27	0,003	0,003	2,99E-05	0,003	1,00E-07		
	150082,58	0,012	144,07	150082,65	0,613	190,73	0,001	0,002	1,70E-05	0,001	0,00E+00		
200 kHz sideband	200082,31	0,007	82,49	200082,08	0,394	115,51	0,001	0,001	1,29E-05	0,001	0,00E+00		
										Pot. ativa total =	83,73 W		
										Erro máx total =	0,47 W		
										Erro máx % =	0,56%		

Tabela D.4: Incerteza de medição para o wattímetro WT230 para situação POT0003

		POT0003 - 5000 rpm/67 mN.m											
		Corrente				Tensão				Potência			
Freq [Hz]	Amp [A]	Fase [°]	Freq [Hz]	Amp [V]	Fase [°]	Pot. ativa [W]	Pot. %	Pot. pond.	Erro máximo [W]	E. máx pond. [W]			
Fundamental	83,59	1,884	95,99	83,40	16,349	67,81	26,666	99,141	9,91E-01	0,173	1,72E-01		
50 kHz sideband	49916,73	0,106	252,24	49916,55	2,303	-20,36	0,097	0,362	3,62E-03	0,302	1,09E-03		
	50083,07	0,107	267,47	50083,35	2,310	-62,28	0,106	0,394	3,94E-03	0,302	1,19E-03		
100 kHz sideband	99916,52	0,031	143,17	99916,50	1,049	235,30	0,015	0,055	5,51E-04	0,301	1,66E-04		
	100082,85	0,031	163,90	100082,85	1,059	196,93	0,013	0,048	4,79E-04	0,013	6,20E-06		
										Pot. ativa total =	26,9 W		
										Erro máx total =	0,17 W		
										Erro máx % =	0,65%		

Tabela D.5: Incerteza de medição para o wattímetro WT230 para situação POT0004

POT0004 - 7500 rpm/159 mN.m												
		Corrente			Tensão			Potência			Incertezas	
	Freq [Hz]	Amp [A]	Fase [°]	Freq [Hz]	Amp [V]	Fase [°]	Pot. ativa [W]	Pot. %	Pot. pond.	Erro máximo [W]	E. máx pond. [W]	
Fundamental	125,63	4,019	-26,71	125,18	27,696	-55,37	96,376	99,675	9,97E-01	0,493	4,91E-01	
50 kHz sideband	49874,75	0,130	225,43	49874,69	2,815	-46,80	0,148	0,153	1,53E-03	0,756	1,15E-03	
	50124,96	0,131	-1,56	50124,96	2,836	29,22	0,157	0,163	1,63E-03	0,756	1,23E-03	
100 kHz sideband	99871,14	0,008	206,30	99873,18	0,331	263,23	0,000	0,000	1,30E-06	0,750	9,00E-07	
	100127,79	0,007	228,15	100126,27	0,315	-62,71	0,000	0,000	3,20E-06	0,000	0,00E+00	
150 kHz sideband	149874,46	0,015	253,39	149874,28	0,699	-10,99	0,005	0,005	5,44E-05	0,005	3,00E-07	
	150125,07	0,015	28,44	150125,00	0,692	62,60	0,004	0,004	4,00E-05	0,004	2,00E-07	
										Pot. ativa total =	96,69 W	
										Erro máx total =	0,49 W	
										Erro máx % =	0,51%	

Tabela D.6: Incerteza de medição para o wattímetro WT230 para situação POT0005

POT0005 - 7500 rpm/32 mN.m												
		Corrente			Tensão			Potência			Incertezas	
	Freq [Hz]	Amp [A]	Fase [°]	Freq [Hz]	Amp [V]	Fase [°]	Pot. ativa [W]	Pot. %	Pot. pond.	Erro máximo [W]	E. máx pond. [W]	
Fundamental	124,00	1,004	103,37	124,79	19,818	68,46	17,162	98,478	9,85E-01	0,154	1,52E-01	
50 kHz sideband	49874,79	0,117	-76,31	49874,82	2,506	11,45	0,118	0,677	6,77E-03	0,303	2,05E-03	
	50124,77	0,118	-61,77	50124,72	2,521	-31,51	0,128	0,733	7,33E-03	0,303	2,22E-03	
100 kHz sideband	99874,75	0,022	204,56	99874,84	0,768	-62,20	0,008	0,046	4,63E-04	0,301	1,39E-04	
	100124,86	0,023	222,79	100125,21	0,786	252,54	0,008	0,045	4,47E-04	0,008	3,50E-06	
200 kHz sideband	199873,70	0,009	239,47	199873,97	0,500	-27,85	0,002	0,012	1,16E-04	0,002	2,00E-07	
	200124,23	0,008	250,89	200124,71	0,495	-76,11	0,002	0,009	9,43E-05	0,002	2,00E-07	
										Pot. ativa total =	17,43 W	
										Erro máx total =	0,16 W	
										Erro máx % =	0,90%	

Tabela D.7: Incerteza de medição para o wattímetro WT230 para situação POT0006

POT0006 - 10000 rpm/143 mN.m													
Corrente			Tensão			Potência			Incertezas				
Freq [Hz]	Amp [A]	Fase [°]	Freq [Hz]	Amp [V]	Fase [°]	Pot. ativa [W]	Pot. %	Pot. pond.	Erro máximo [W]	E. máx pond. [W]			
Fundamental	166,69	3,881	173,75	166,69	32,991	144,92	110,857	99,755	9,98E-01	0,822	8,20E-01		
50 kHz sideband	49833,12	0,116	205,22	49833,16	2,482	-65,30	0,123	0,111	1,11E-03	1,503	1,67E-03		
100 kHz sideband	50166,44	0,118	20,91	50166,51	2,515	49,39	0,135	0,121	1,21E-03	1,503	1,82E-03		
	99832,83	0,026	-38,06	99832,63	0,949	46,46	0,009	0,008	7,94E-05	1,501	1,19E-04		
	100166,43	0,025	115,65	100165,83	0,929	159,52	0,006	0,005	5,05E-05	0,006	3,00E-07		
										Pot. ativa total =	111,13 W		
										Erro máx total =	0,82 W		
										Erro máx % =	0,74%		

Tabela D.8: Incerteza de medição para o wattímetro WT230 para situação POT0007

POT0007 - 10000 rpm/24 mN.m													
Corrente			Tensão			Potência			Incertezas				
Freq [Hz]	Amp [A]	Fase [°]	Freq [Hz]	Amp [V]	Fase [°]	Pot. ativa [W]	Pot. %	Pot. pond.	Erro máximo [W]	E. máx pond. [W]			
Fundamental	165,78	0,879	72,97	166,68	25,295	42,12	19,250	98,513	9,85E-01	0,098	9,70E-02		
50 kHz sideband	49833,17	0,124	-15,04	49833,24	2,659	73,24	0,135	0,690	6,90E-03	0,153	1,06E-03		
100 kHz sideband	50166,49	0,125	-50,93	50166,40	2,688	-21,20	0,147	0,753	7,53E-03	0,153	1,16E-03		
	149833,04	0,015	86,76	149832,69	0,699	180,73	0,005	0,026	2,59E-04	0,005	1,30E-06		
	150166,19	0,015	47,80	150165,67	0,683	84,20	0,003	0,018	1,77E-04	0,003	6,00E-07		
										Pot. ativa total =	19,54 W		
										Erro máx total =	0,1 W		
										Erro máx % =	0,51%		

Tabela D.9: Incerteza de medição para o wattímetro WT230 para situação POT0008

POT0008 - 12500 rpm/115 mN.m											
Corrente			Tensão			Potência			Incertezas		
Freq [Hz]	Amp [A]	Fase [°]	Freq [Hz]	Amp [V]	Fase [°]	Pot. ativa [W]	Pot. %	Pot. pond.	Erro máximo [W]	E. máx pond.	[W]
Fundamental	208,58	3,102	200,79	208,37	36,544	169,74	98,169	9,98E-01	0,796	7,95E-01	
50 kHz sideband	49791,66	0,101	-80,00	49791,53	2,128	9,98	0,093	0,095	1,502	1,42E-03	
	50208,10	0,104	147,94	50207,86	2,175	177,22	0,100	0,101	1,502	1,52E-03	
100 kHz sideband	99791,12	0,033	133,17	99791,07	1,169	223,92	0,017	0,017	1,501	2,61E-04	
	100207,68	0,032	-8,97	100207,11	1,142	27,13	0,013	0,013	0,013	1,70E-06	
									Pot. ativa total =	98,39 W	
									Erro máx total =	0,8 W	
									Erro máx % =	0,81%	

Tabela D.10: Incerteza de medição para o wattímetro WT230 para situação POT0009

POT0009 - 12500 rpm/19 mN.m											
Corrente			Tensão			Potência			Incertezas		
Freq [Hz]	Amp [A]	Fase [°]	Freq [Hz]	Amp [V]	Fase [°]	Pot. ativa [W]	Pot. %	Pot. pond.	Erro máximo [W]	E. máx pond.	[W]
Fundamental	204,96	0,745	91,52	208,22	30,686	52,73	19,573	98,577	0,159	1,57E-01	
50 kHz sideband	49791,64	0,119	77,26	49791,63	2,542	166,11	0,127	0,639	0,303	1,94E-03	
	50207,64	0,122	65,07	50207,78	2,592	93,84	0,142	0,716	0,303	2,17E-03	
100 kHz sideband	99792,74	0,018	-38,66	99791,80	0,614	53,39	0,005	0,026	0,300	7,66E-05	
	100207,41	0,017	-54,42	100206,87	0,575	-17,65	0,003	0,017	0,003	5,00E-07	
150 kHz sideband	149792,41	0,012	20,06	149793,17	0,517	113,96	0,003	0,015	0,003	4,00E-07	
	150205,22	0,012	20,81	150203,99	0,502	55,92	0,002	0,011	0,002	2,00E-07	
									Pot. ativa total =	19,86 W	
									Erro máx total =	0,16 W	
									Erro máx % =	0,81%	

Tabela D. 11: Incerteza de medição para o wattímetro WT230 para situação POT0010

POT0010 - 15000 rpm/96 mN.m											
	Corrente			Tensão			Potência			Incertezas	
	Freq [Hz]	Amp [A]	Fase [°]	Freq [Hz]	Amp [V]	Fase [°]	Pot. ativa [W]	Pot. %	Pot. pond.	Erro máximo [W]	E. máx pond. [W]
Fundamental	249,11	2,684	137,88	249,91	40,943	104,46	94,990	99,851	9,99E-01	0,790	7,89E-01
50 kHz sideband	49748,81	0,076	124,65	49749,94	1,583	212,59	0,049	0,051	5,11E-04	1,501	7,67E-04
	50250,79	0,079	218,83	50250,54	1,646	247,25	0,059	0,062	6,18E-04	1,501	9,28E-04
100 kHz sideband	99747,56	0,034	116,32	99749,69	1,184	204,41	0,016	0,017	1,70E-04	1,501	2,56E-04
	100250,15	0,032	200,62	100249,27	1,152	235,26	0,014	0,015	1,46E-04	0,014	2,00E-06
150 kHz sideband	149753,97	0,010	86,82	149751,03	0,473	183,89	0,002	0,002	2,47E-05	0,002	1,00E-07
	150243,35	0,010	200,22	150246,19	0,490	231,56	0,002	0,002	2,10E-05	0,002	0,00E+00
										Pot. ativa total =	95,13 W
										Erro máx total =	0,79 W
										Erro máx % =	0,83%

Tabela D. 12: Incerteza de medição para o wattímetro WT230 para situação POT0011

POT0011 - 15000 rpm/16 mN.m											
	Corrente			Tensão			Potência			Incertezas	
	Freq [Hz]	Amp [A]	Fase [°]	Freq [Hz]	Amp [V]	Fase [°]	Pot. ativa [W]	Pot. %	Pot. pond.	Erro máximo [W]	E. máx pond. [W]
Fundamental	252,65	0,641	153,50	250,10	35,982	135,16	19,558	98,822	9,88E-01	0,159	1,57E-01
50 kHz sideband	49749,57	0,103	233,00	49749,15	2,186	-36,93	0,098	0,493	4,93E-03	0,302	1,49E-03
	50249,47	0,106	26,14	50249,64	2,246	54,46	0,108	0,547	5,47E-03	0,303	1,68E-03
100 kHz sideband	99750,00	0,032	-3,23	99750,27	1,111	87,07	0,015	0,078	7,81E-04	0,301	2,35E-04
	100250,19	0,030	143,74	100249,71	1,068	178,63	0,012	0,060	6,04E-04	0,012	7,20E-06
										Pot. ativa total =	19,79 W
										Erro máx total =	0,16 W
										Erro máx % =	0,81%

APÊNDICE E – GRÁFICOS COM AVALIAÇÃO DA REPRODUTIBILIDADE PARA O MOTOR EC45

Os gráficos deste apêndice apresentam os resultados de reprodutibilidade entre cinco ensaios completos realizados obedecendo o que foi descrito anteriormente no capítulo 6, seção 6.4. São apresentados aqui, os resultados para seis pontos de carga em três frequências rotacionais distintas, ou seja, 15000, 7500 e 2500 rpm para o motor EC45. Dos gráficos têm-se como resultado os valores médios para cada ponto de carga além da diferença percentual de cada ponto em relação a média dos seis ensaios.

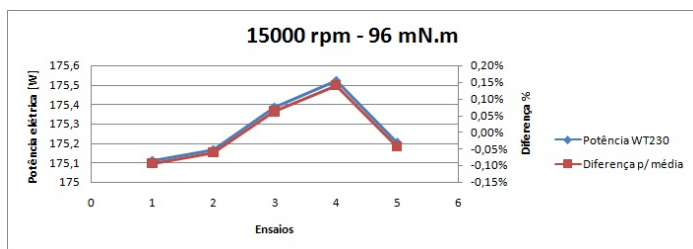


Figura E.1: Reprodutibilidade para o motor EC 45 - 15000 rpm/96 mN.m

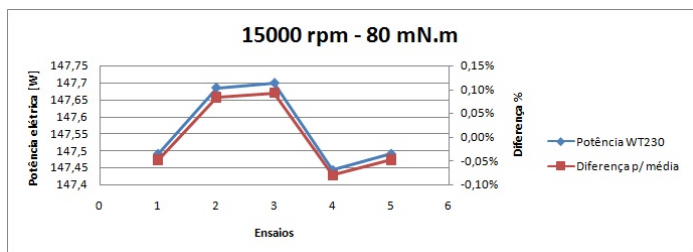


Figura E.2: Reprodutibilidade para o motor EC 45 - 15000 rpm/80 mN.m

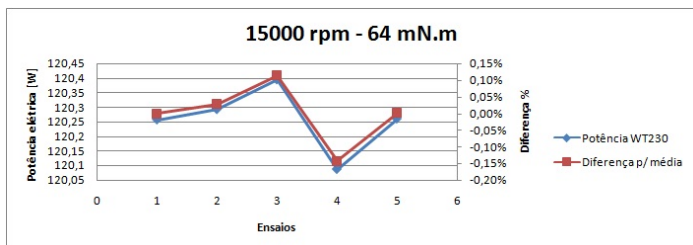


Figura E.3: Reprodutibilidade para o motor EC 45 - 15000 rpm/64 mN.m

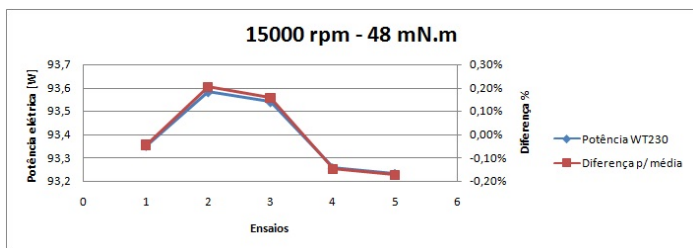


Figura E.4: Reprodutibilidade para o motor EC 45 - 15000 rpm/48 mN.m

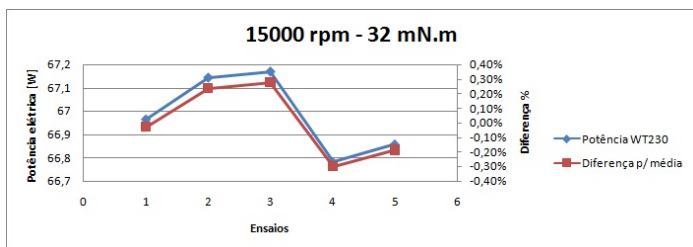


Figura E.5: Reprodutibilidade para o motor EC 45 - 15000 rpm/32 mN.m

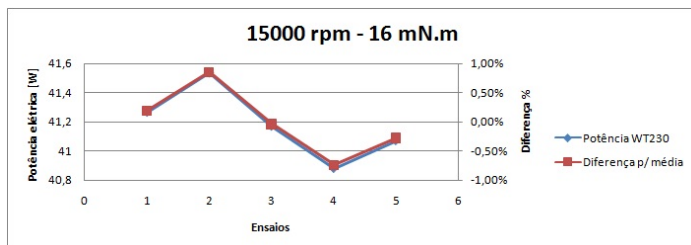


Figura E.6: Reprodutibilidade para o motor EC 45 - 15000 rpm/16 mN.m

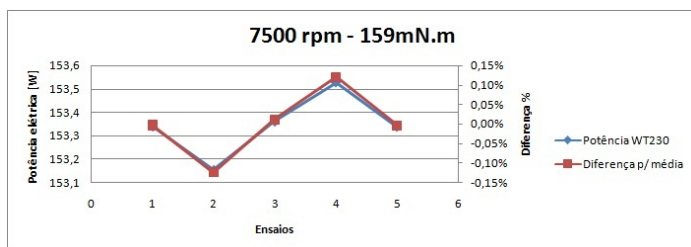


Figura E.7: Reprodutibilidade para o motor EC 45 - 7500 rpm/159 mN.m

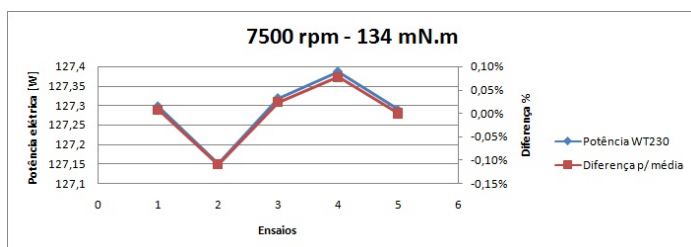


Figura E.8: Reprodutibilidade para o motor EC 45 - 7500 rpm/134 mN.m

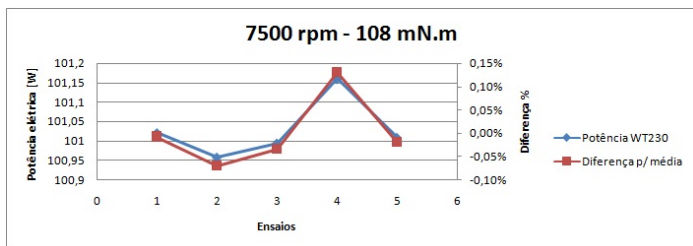


Figura E.9: Reprodutibilidade para o motor EC 45 - 7500 rpm/108 mN.m

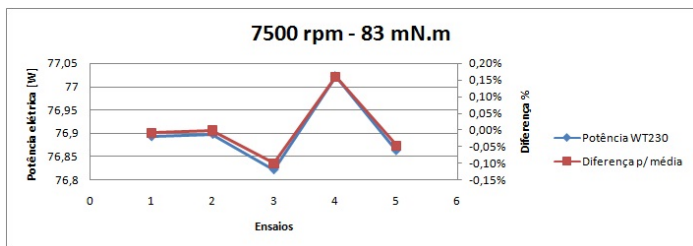


Figura E.10: Reprodutibilidade para o motor EC 45 - 7500 rpm/83 mN.m

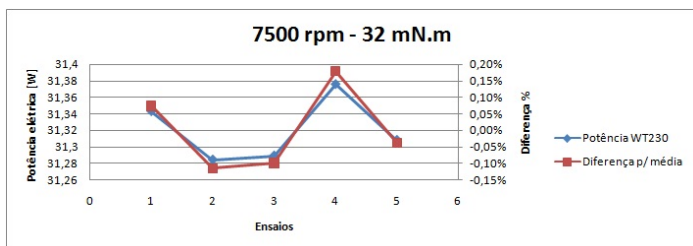


Figura E.11: Reprodutibilidade para o motor EC 45 - 7500 rpm/57 mN.m

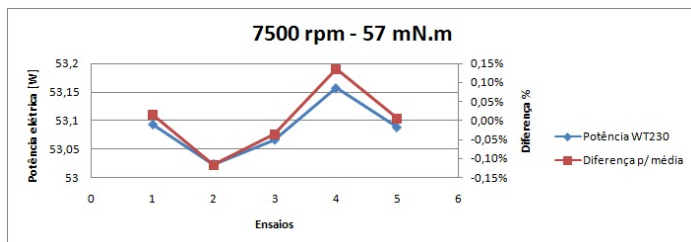


Figura E.12: Reprodutibilidade para o motor EC 45 - 7500 rpm/32 mN.m

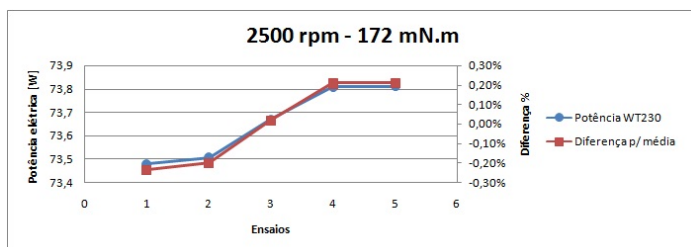


Figura E.13: Reprodutibilidade para o motor EC 45 - 2500 rpm/172 mN.m

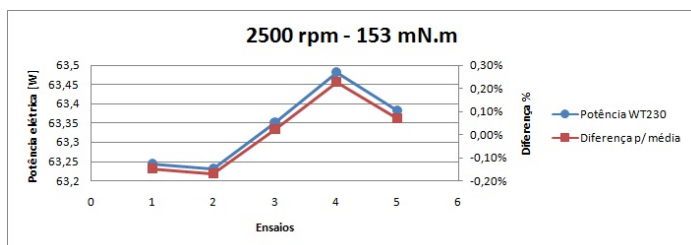


Figura E.14: Reprodutibilidade para o motor EC 45 - 2500 rpm/153 mN.m

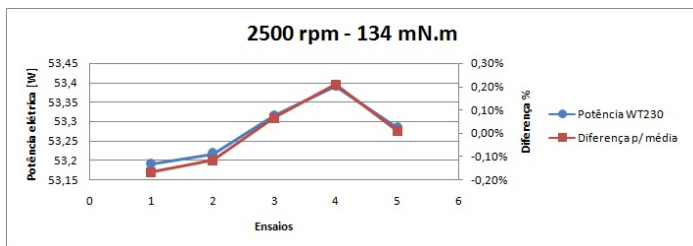


Figura E.15: Reprodutibilidade para o motor EC 45 - 2500 rpm/134 mN.m

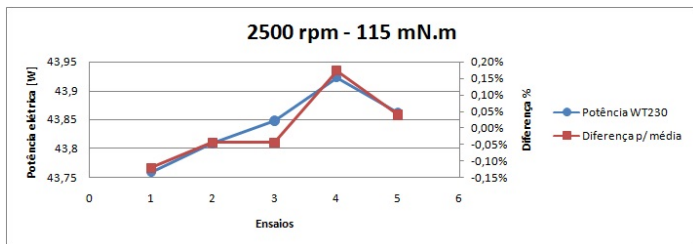


Figura E.16: Reprodutibilidade para o motor EC 45 - 2500 rpm/115 mN.m

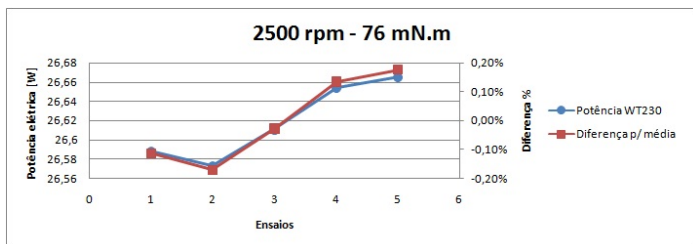


Figura E.17: Reprodutibilidade para o motor EC 45 - 2500 rpm/96 mN.m

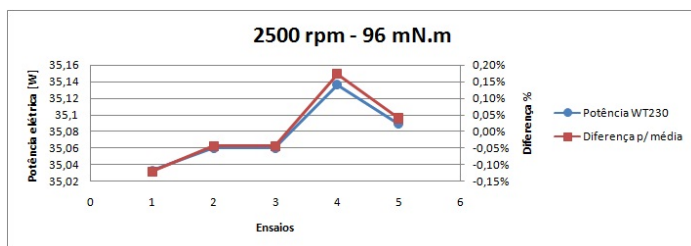


Figura E.18: Reprodutibilidade para o motor EC 45 - 2500 rpm/76 mN.m

APÊNDICE F – GRÁFICOS COM AVALIAÇÃO DA REPRODUTIBILIDADE PARA O MOTOR EC60

Os gráficos deste apêndice apresentam os resultados de reprodutibilidade entre cinco ensaios completos realizados obedecendo o que foi descrito anteriormente no capítulo 6, seção 6.4. São apresentados aqui, os resultados para seis pontos de carga em três frequências rotacionais distintas, ou seja, 3500, 2500 e 1000 rpm para o motor EC60. Dos gráficos têm-se como resultado os valores médios para cada ponto de carga além da diferença percentual de cada ponto em relação a média dos seis ensaios.

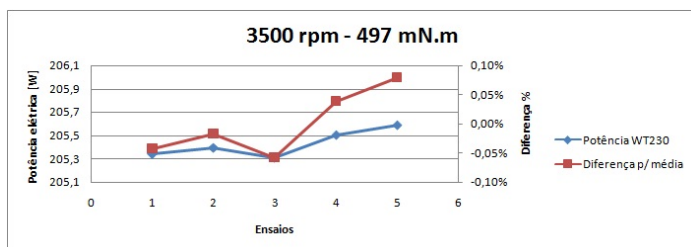


Figura F.1: Reprodutibilidade para o motor EC 60 - 3500 rpm/497 mN.m

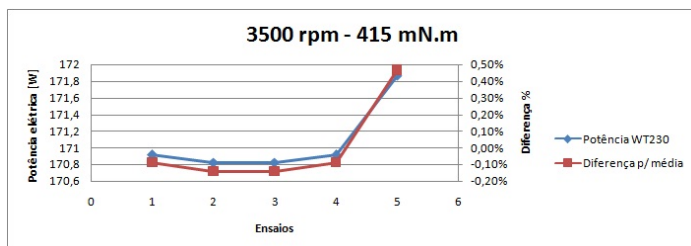


Figura F.2: Reprodutibilidade para o motor EC 60 - 3500 rpm/415 mN.m

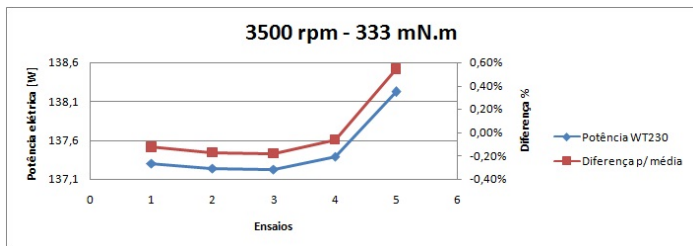


Figura F.3: Reprodutibilidade para o motor EC 60 - 3500 rpm/333 mN.m

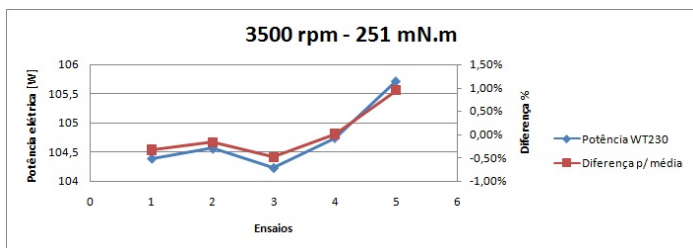


Figura F.4: Reprodutibilidade para o motor EC 60 - 3500 rpm/251 mN.m

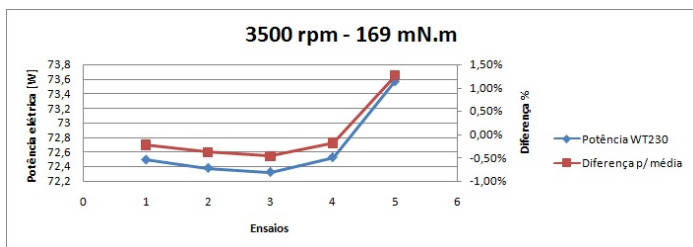


Figura F.5: Reprodutibilidade para o motor EC 60 - 3500 rpm/169 mN.m

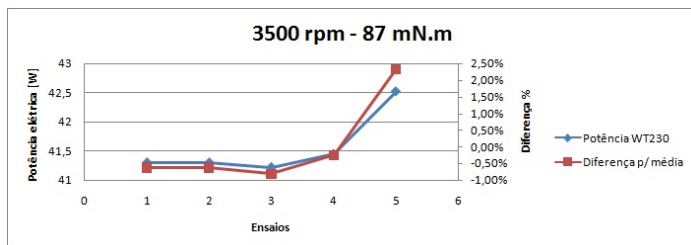


Figura F.6: Reprodutibilidade para o motor EC 60 - 3500 rpm/87 mN.m

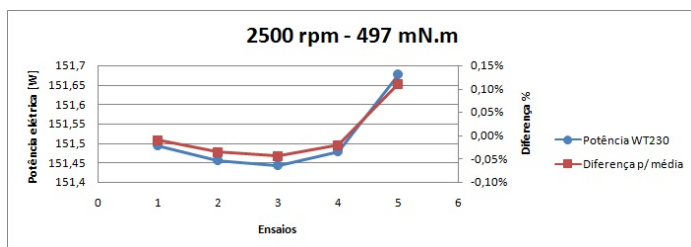


Figura F.7: Reprodutibilidade para o motor EC 60 - 2500 rpm/497 mN.m

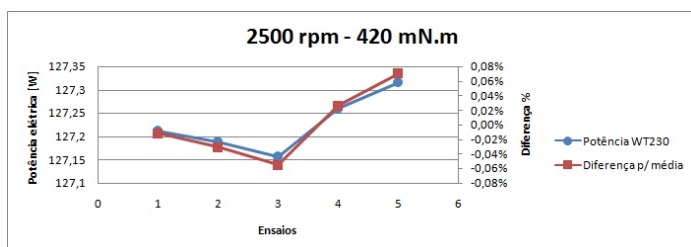


Figura F.8: Reprodutibilidade para o motor EC 60 - 2500 rpm/420 mN.m

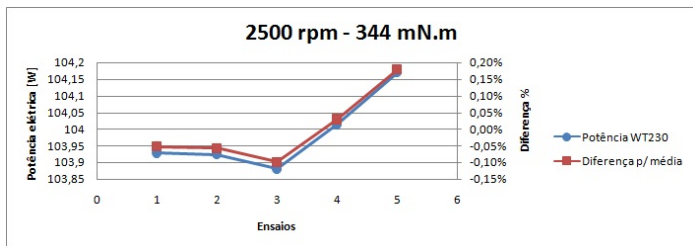


Figura F.9: Reprodutibilidade para o motor EC 60 - 2500 rpm/344 mN.m

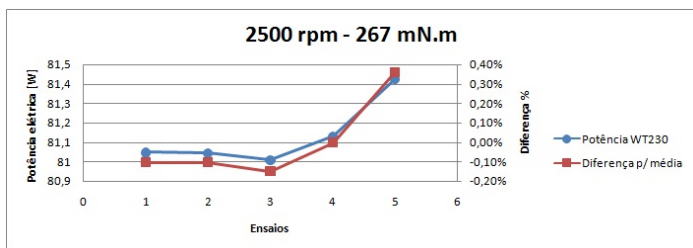


Figura F.10: Reprodutibilidade para o motor EC 60 - 2500 rpm/267 mN.m

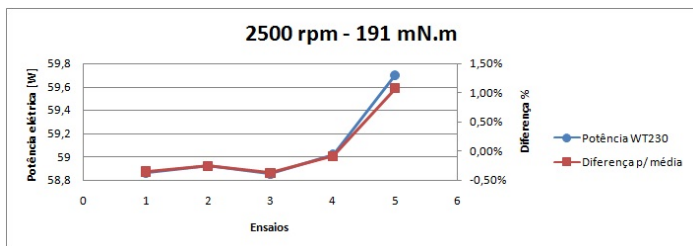


Figura F.11: Reprodutibilidade para o motor EC 60 - 2500 rpm/191 mN.m

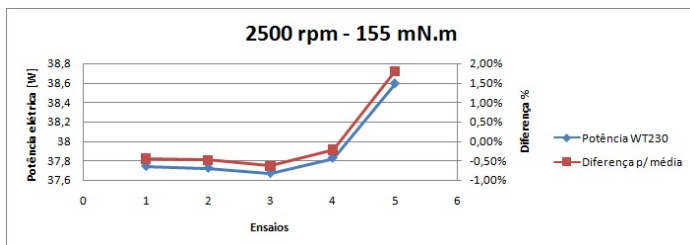


Figura F.12: Reprodutibilidade para o motor EC 60 - 2500 rpm/115 mN.m

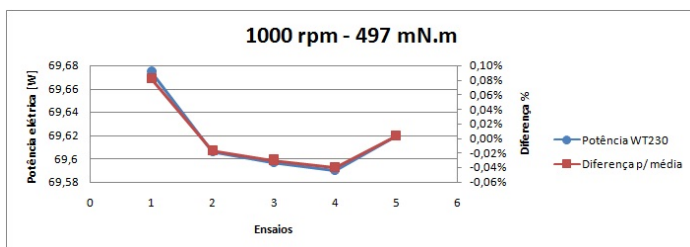


Figura F.13: Reprodutibilidade para o motor EC 60 - 1000 rpm/497 mN.m

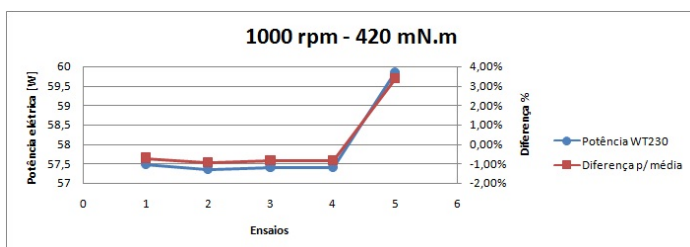


Figura F.14: Reprodutibilidade para o motor EC 60 - 1000 rpm/420 mN.m

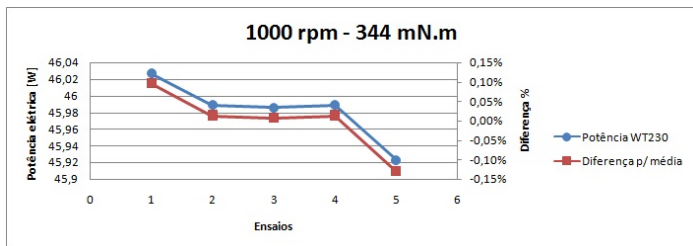


Figura F.15: Reprodutibilidade para o motor EC 60 - 1000 rpm/344 mN.m

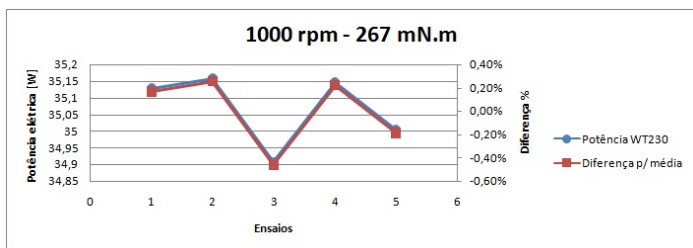


Figura F.16: Reprodutibilidade para o motor EC 60 - 1000 rpm/267 mN.m

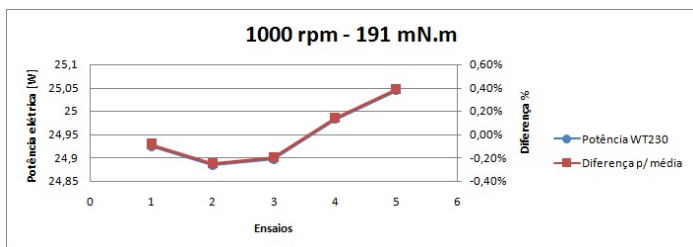


Figura F.17: Reprodutibilidade para o motor EC 60 - 1000 rpm/191 mN.m

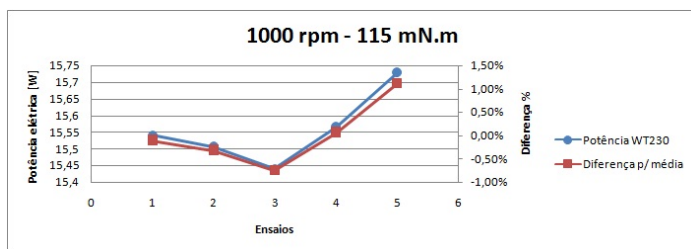


Figura F.18: Reprodutibilidade para o motor EC 60 - 1000 rpm/115 mN.m