

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA

Programa de Pós-graduação em Metrologia Científica e Industrial

Miguel Burg Demay

**DESENVOLVIMENTO DE SISTEMAS PARA
MEDIÇÃO DE FREQUÊNCIA ROTACIONAL EM
COMPRESSORES HERMÉTICOS**

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

Orientador: Carlos Alberto Flesch, Dr.Eng.

Florianópolis, 18 de setembro de 2008.

DESENVOLVIMENTO DE SISTEMAS PARA MEDIÇÃO DE FREQUÊNCIA ROTACIONAL EM COMPRESSORES HERMÉTICOS

Miguel Burg Demay

Esta dissertação foi julgada adequada para a obtenção do título de

“MESTRE EM METROLOGIA”

e aprovada na sua forma final pelo

Programa de Pós-graduação em Metrologia Científica e Industrial

Prof. Carlos Alberto Flesch, Dr.Eng.

ORIENTADOR

Prof. Armando Albertazzi Gonçalves Júnior, Dr.Eng.

COORDENADOR DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Arcanjo Lenzi, Ph.D.

Prof. Armando Albertazzi Gonçalves Júnior, Dr.Eng.

Prof. César José Deschamps, Ph.D.

Eng. André Paz Rosa, M.Sc.

A Wenceslau Gregório Burg e Geni Gomes Burg

A Dilnei Demay e Jane Elvira Burg Demay

A Jean Burg Demay e Flávio Burg Demay

Às memórias de Jaime Corrêa Plácido e Rodrigo Gesser Demay

AGRADECIMENTOS

Meus mais sinceros agradecimentos a minha família, pelo fundamental apoio a minha carreira, pela compreensão e proteção nos diversos momentos difíceis que ficaram pelo caminho.

À Universidade Federal de Santa Catarina, por me propiciar uma formação ampla: como pessoa, cidadão e profissional.

Ao programa de pós-graduação, pela aceitação e confiança; as quais espero ter retribuído à altura.

À EMBRACO, pela oportunidade, acompanhamento e fomento. Em especial, por acreditar na universidade e no LABMETRO e no que eles são capazes de produzir. O exemplo de parceria de que o Brasil necessita para se desenvolver de forma sustentável. Estendido a André Paz Rosa, Maikon Ronsani e Marco Aurélio do Oliveira, pelo auxílio e incentivo.

Ao professor Carlos Alberto Flesch, pela confiança em me dedicar o tema e pela orientação. Além disso, por me fazer acreditar que, no país do formalismo, ainda é possível alcançar objetivos, bons resultados e representação trabalhando duro e com competência, lutando para fazer acontecer e não esperando que os problemas sejam resolvidos. Por último, por acreditar que a universidade pode fazer muito pela indústria e pelo país e ainda pela competência em gerar as condições para que a indústria fixe parceria, há tanto tempo, com o LABMETRO.

Aos professores Hari Bruno Mohr e Rui Seara, pela amizade e auxílio.

A César Alberto Penz, pela competência, amizade, incentivo e paciência.

A Analúcia Fantin Pezotta, pelo auxílio e prontidão em ajudar.

A Rogério Domingos, pelo interesse, dedicação e auxílio.

Aos colegas de projeto: Fúlvio, Sérgio, Pacheco, Xavier, Júlio, Kleber, Flávio, Igor, Alexandre, Rodolfo, Tobias, Pedro, Benjamim, João, Humberto, Arthur, Iara, Lúnia, Vladimir, Filipe, Guilherme e Willian.

A Mariah Härtel, pela amizade e pelos auxílios em matemática.

Aos colegas de mestrado e LABMETRO, pela amizade, colaboração e disposição em ajudar. Agradeço pelas horas de lazer e descontração e pela compreensão nos momentos de “tensão”.

À Rosana, por sua competência, amizade e dedicação ao trabalho.

Aos profissionais do LABMETRO em geral.

E a todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para o sucesso deste trabalho.

“De tudo, ficaram três coisas: a certeza de que ele estava sempre começando, a certeza de que era preciso continuar e a certeza de que seria interrompido antes de terminar. Fazer da interrupção um caminho novo. Fazer da queda um passo de dança, do medo uma escada, do sono uma ponte, da procura um encontro.”

Fernando Sabino, em “O encontro marcado”.

RESUMO

Dentre as diversas grandezas importantes para caracterização operacional de compressores de refrigeração, frequência rotacional possui destaque em diferentes ensaios de compressores. Atualmente, para compressores herméticos, é usual instrumentar-se internamente o compressor para a realização da medição de frequência rotacional, o que demanda tempo e custos indesejáveis.

O presente trabalho objetiva propor, desenvolver e avaliar soluções para viabilizar a medição indireta e não-invasiva da frequência rotacional para uso em bancadas automatizadas de ensaios de compressores. Ressalta-se que não existe no mercado um instrumento adequado para a realização da medição de tal grandeza, o que fornece ao sistema desenvolvido o caráter de inovação tecnológica.

Duas frentes de trabalho realizadas para se obter os métodos de medição propostos são descritas e analisadas: seleção das grandezas que compõem a função de medição e seleção das ferramentas matemáticas mais adequadas para tratamento da informação. Os métodos escolhidos foram implementados e analisados experimentalmente contra um compressor padrão instrumentado internamente.

Dentre as diversas formas estudadas, a análise do sinal de pressão de descarga e do sinal de corrente de alimentação do compressor, tanto pela identificação da frequência de escorregamento, quanto pela detecção de componentes de excentricidade, apresentaram excelentes resultados.

Além de permitir a medição empregando informações de grandezas já normalmente medidas em ensaios – corrente e pressão – os métodos propostos suplantaram muito as exigências estabelecidas por normas técnicas para medição de frequência rotacional em ensaios de compressores. Obteve-se um sistema de medição de frequência rotacional versátil, rápido e de baixa incerteza.

ABSTRACT

The measurement of rotational frequency is important in several tests applied to refrigeration compressors, to determine their work characteristics. Nowadays, the measurement procedure of rotational frequency in hermetic compressors used in industry is based on placing transducers in their body that means a waste of time and money.

The goal of this work is to propose, to develop and to analyze alternatives that allow the measurement of rotational frequency of hermetic compressors, in an indirect and not invasive way, based on quantities, which are able to be measured outside a compressor. Also, it is purposed applying the solutions to automated test benches.

Nowadays there is no instrument able to make such measurement of rotational frequency in compressors, what assures that the proposed measurement system is innovative.

To achieve the measurement methods, the quantities, which are able to be measured outside the compressors and the most adapted mathematical tools to the handling of information are described and analyzed. The chosen methods were implemented and experimentally analyzed with an instrumented standard compressor.

The analysis of the discharge pressure and the current signals showed excellent results, either by the estimation of the slipping frequency or by the estimation of the eccentricity harmonics. Both signals are often measured in industry.

The proposed methods have achieved results much better than the specified by standards for tests in compressors. A fast, versatile and with uncertainty measurement system for rotational frequency of hermetic compressors is presented.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Compressor hermético alternativo ^[8]	20
Figura 2 – Relação entre pressão no interior do cilindro (a) e vibração na carcaça de compressores(b) ^[28]	22
Figura 3 – Sinal de corrente de alimentação no tempo.....	23
Figura 4 – Forma do sinal de corrente em um motor assíncrono ^[37]	25
Figura 5 – Ciclo de sucção do compressor ^[19]	27
Figura 6 – Ciclo de compressão do compressor ^[19]	28
Figura 7 – Sinal de saída de um transmissor usado para medir a pressão de descarga do compressor.....	29
Figura 8 – Análise em freqüência do sinal de pressão de descarga (a) de um compressor alimentado a 60 Hz. (b) Em visão ampliada.....	29
Figura 9 – Dispersão espectral inerente à transformada de Fourier	33
Figura 10 – Erro inerente à identificação de componentes freqüenciais ^[43]	34
Figura 11 – Ilustração da técnica de <i>zero padding</i> ^[40]	37
Figura 12 – Demonstração da incapacidade do <i>zero padding</i> melhorar a identificação de componentes não presentes no espectro ^[40]	38
Figura 13 – Alocação dos pontos no plano complexo pela transformada Chirp-Z ^{[40][47]}	43
Figura 14 – A janela de freqüências da CZT ^[37]	44
Figura 15 – Amplificador <i>lock-in</i>	45
Figura 16 – Detecção sensível à fase ^[50]	46
Figura 17 – Representação no plano complexo do sinal $y(t)$ formado por duas componentes. (a) Análise por um período da componente fundamental. (b) Em visão ampliada, destaque para a variação de módulo e fase.	49
Figura 18 – Ilustração do comportamento do módulo $B(t)$ para $x(t)=10\text{sen}(2\pi 10t)+1\text{sen}(2\pi 11t)$	50
Figura 19 – Espectro de freqüências de $B(t)$ para $x(t)=10\text{sen}(2\pi 10t)+1\text{sen}(2\pi 11t)$	50
Figura 20 – Ilustração do comportamento da fase $\phi(t)$ para $x(t)=10\text{sen}(2\pi 10t)+1\text{sen}(2\pi 11t)$	51

Figura 21 – Espectro de frequências de $\phi(t)$ para $x(t)=10\text{sen}(2\pi 10t)+1\text{sen}(2\pi 11t)$	51
Figura 22 – Sinal de sincronismo.....	68
Figura 23 – Determinação do erro máximo de cada amostra.....	72
Figura 24 – Valores de erro máximo apresentados por métodos de medição baseados em detecção de componentes de excentricidade para diferentes intervalos de aquisição, em 59 Hz.	75
Figura 25 – Valores de erro máximo apresentados por métodos de medição baseados em detecção de componentes de excentricidade para diferentes intervalos de aquisição, em 58 Hz.	75
Figura 26 – Valores de erro máximo apresentados por métodos de medição baseados em detecção de frequência de escorregamento para diferentes intervalos de aquisição, em 59 Hz.	77
Figura 27 – Valores de erro máximo apresentados por métodos de medição baseados em detecção de frequência de escorregamento para diferentes intervalos de aquisição, em 58 Hz.	77
Figura 28 – Valores de erro máximo apresentados por métodos de medição baseados em análise em frequência do sinal de pressão para diferentes intervalos de aquisição, em 59 Hz.	79
Figura 29 – Valores de erro máximo apresentados por métodos de medição baseados em detecção de frequência de escorregamento para diferentes intervalos de aquisição, em 58 Hz.	79

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Formas não-invasivas para a medição de frequências rotacionais de compressores.....	53
Tabela 2 – Critérios de avaliação da matriz de decisão.....	54
Tabela 3 – Grau de importância de cada critério de avaliação	54
Tabela 4 – Matriz de decisão para as alternativas de medição estudadas.....	55
Tabela 5 – Valores de incertezas de medição do padrão para diferentes intervalos de medição	70
Tabela 6 – Medição de frequência rotacional pelo sistema de medição padrão	73
Tabela 7 – Erros máximos apresentados por métodos de medição baseados na identificação de harmônicas de excentricidade do sinal de corrente – em rpm.....	74
Tabela 8 – Erros máximos apresentados por métodos de medição baseados na identificação de frequência de escorregamento pelo sinal de corrente – em rpm.....	76
Tabela 9 – Erros máximos apresentados por métodos de medição baseados na identificação de frequência de escorregamento pelo sinal de corrente – em rpm.....	78

LISTA DE ABREVIATURAS

B(t)	Módulo da Transformada de Hilbert
CZT	Transformada Chirp-Z (<i>Chirp-Z Transform</i>)
DFT	Transformada Discreta de Fourier (<i>Discrete Fourier Transform</i>)
FFT	Transformada Rápida de Fourier (<i>Fast Fourier Transform</i>)
FFTInt	Transformada Rápida de Fourier Interpolada
T_p	Intervalo de Observação de um Sinal
VFM	Valor Final de Faixa de Medição
ϕ(t)	Fase da Transformada de Hilbert

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	15
1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO	15
1.2 OBJETIVO DO TRABALHO	17
1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	18
2 REVISÃO DA LITERATURA: COMPRESSORES HERMÉTICOS E ALTERNATIVAS PARA A MEDIÇÃO DE SUA FREQUÊNCIA ROTACIONAL	19
2.1 COMPRESSORES HERMÉTICOS PARA SISTEMAS DE REFRIGERAÇÃO	19
2.2 ALTERNATIVAS PARA A MEDIÇÃO DE FREQUÊNCIA ROTACIONAL	20
2.2.1 Medição por modelagem matemática de motores	21
2.2.2 Medição através da vibração do compressor	21
2.2.3 Medição através da corrente de alimentação	23
2.2.4 Medição através dos sinais de pressão de sucção e de descarga	27
3 FERRAMENTAS MATEMÁTICAS EMPREGADAS NOS MÉTODOS DE MEDIÇÃO PROPOSTOS	31
3.1 TRANSFORMADA DE FOURIER	31
3.1.1 <i>Zero padding</i>	36
3.1.2 Transformada interpolada de Fourier	39
3.2 TRANSFORMADA Z	40
3.2.1 Transformada Chirp-Z	41
3.3 ANALISADOR DE ESPECTROS <i>LOCK-IN</i>	45
3.4 TRANSFORMADA DE HILBERT	47
4 PROPOSTAS DE MÉTODOS PARA MEDIÇÃO DE FREQUÊNCIA ROTACIONAL DE COMPRESSORES HERMÉTICOS	52
4.1 SELEÇÃO DAS FORMAS DE MEDIÇÃO MAIS ADEQUADAS	52
4.2 PROCEDIMENTOS DE MEDIÇÃO PROPOSTOS	56

4.2.1 Propostas de medição da freqüência rotacional pelo sinal de corrente através da identificação de componentes relativas às variações de entreferro	57
4.2.2 Propostas de medição da freqüência rotacional pelo sinal de corrente através da identificação da freqüência de escorregamento	61
4.2.3 Propostas de medição da freqüência rotacional pelo sinal de pressão	65
5 AVALIAÇÃO DOS MÉTODOS PROPOSTOS	67
5.1 ENSAIOS REALIZADOS.....	67
5.1.1 Estrutura do experimento	67
5.1.2 Padrão de freqüência rotacional	68
5.1.3 Procedimento de ensaio	71
5.1.4 Procedimento de avaliação do erro máximo obtido por cada método	71
5.2 RESULTADOS OBTIDOS.....	72
5.2.1 Estabilidade da freqüência rotacional	72
5.2.2 Medição de freqüência rotacional	73
5.3 CONSIDERAÇÕES FINAIS	79
6 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	86
6.1 CONCLUSÕES	86
6.1.1 Quanto às grandezas escolhidas para compor a função de medição	86
6.1.2 Quanto aos métodos matemáticos empregados.....	87
6.1.3 Quanto à adequação do programa <i>Labview</i>	87
6.1.4 Quanto aos resultados alcançados	87
6.2 PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS	88
REFERÊNCIAS.....	89
APÊNDICE I.....	95
APÊNDICE II.....	107

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

A competitividade gerada pelo desenvolvimento econômico mundial motiva a busca pela melhoria contínua nos padrões de qualidade dos produtos fabricados. Nesse contexto, a Whirlpool S. A., na condição de maior fabricante de eletrodomésticos do mundo^[1], com o intuito de aumentar a qualidade dos produtos fornecidos a seus clientes e de se garantir como líder mundial em seu setor, preza pela constante redução de custos operacionais, melhoria de eficiência e introdução de inovação relevante em seus produtos^[2]. Em sua unidade Embraco, líder mundial na produção de compressores herméticos para refrigeradores domésticos^{[2][3]}, realiza grande quantidade de ensaios relacionados à pesquisa e desenvolvimento e ao controle de qualidade.

Tais ensaios devem ter confiabilidade metrológica assegurada. A redução de incertezas e de tempos demandados por esses ensaios, bem como o aumento da confiabilidade nos resultados obtidos, são melhorias estratégicas, que visam colocar a empresa à frente de seus concorrentes.

Nesse sentido, Poletto^[4], Flesch^[5] e Petrovcic^[6] estudaram formas de reduzir as incertezas de medição e aumentar a confiabilidade e o grau de automação dos ensaios de desempenho de compressores.

Barbosa^[7] estudou formas de reduzir a incerteza de medição de grandezas elétricas, enquanto Henklein^[8], Steinbach^[9] e Scussel^[10] enfocaram a questão da redução de tempo de ensaios de desempenho. Henklein^[8], através da inferência de valores de regime permanente de variáveis de interesse a partir de dados do regime

transitório do ensaio¹, trabalho esse continuado e expandido por Steinbach^[9], no sentido de identificar o instante em que as condições de regime permanente são atingidas; Scussel^[10], através de técnicas de redução do período em que o compressor se encontra em regime transitório. Já Pacheco^[11], propôs uma forma de medir a resistência elétrica de enrolamentos de compressores energizados.

Embora avanços significativos já tenham sido alcançados, existem ainda diversas variáveis para as quais não existe no mercado instrumentação de medição que seja satisfatória; frequência rotacional é uma delas.

O monitoramento da frequência rotacional é importante em diversos ensaios de compressores, como os testes de desempenho e de tombamento². A norma ISO 917, que rege ensaios de desempenho em compressores herméticos, determina que a frequência rotacional não deve apresentar desvios superiores a $\pm 1\%$ durante a execução do ensaio^[14]. Dessa forma, a adequação de um determinado compressor às normas vigentes depende da confiabilidade do monitoramento de sua frequência rotacional. Tal grandeza é também importante para caracterizar a operação em regime permanente do compressor^[15].

O monitoramento da frequência rotacional também pode ser empregado para identificação de falhas na produção e a conseqüente presença de não-conformidades em relação aos requisitos de projeto.

Atualmente, a medição da frequência rotacional depende da inserção de um sensor indutivo, o que implica necessidade de uma prévia instrumentação do compressor a ser testado^[16]. Dessa forma, o processo de medição de frequência rotacional de compressores é consideravelmente lento, pois é composto também pela abertura dos compressores e a correta fixação do sensor indutivo.

¹ Por regime transitório subentende-se o período de estabilização, ou seja, o período desde o aquecimento do compressor e da bancada até o momento em que todas as variáveis analisadas se encontram dentro dos limites de tolerância do ensaio. Possui duração de mais de três horas^[10].

² Quando o torque exigido pela carga excede o torque máximo aplicado pelo motor ocorre o tombamento do compressor: o motor rapidamente desacelera até alcançar a condição de rotor travado^[12]. É possível estimar o instante do tombamento através do monitoramento da frequência de rotação, a qual pode variar consideravelmente nessas circunstâncias, podendo atingir frequências 20% inferiores à frequência nominal e até mesmo frequências superiores à nominal^[13].

1.2 OBJETIVO DO TRABALHO

O presente trabalho objetiva o desenvolvimento de um sistema não-invasivo de medição de frequência rotacional de compressores herméticos para aplicação em bancadas automatizadas de ensaio.

Faz parte do escopo deste o estudo de diferentes alternativas de medição de frequência rotacional de compressores herméticos a partir de grandezas passíveis de serem medidas externamente ao compressor.

Ressalta-se que não existe no mercado um instrumento adequado para a realização da medição de tal grandeza, o que fornece ao sistema a ser desenvolvido o caráter de inovação tecnológica.

De acordo com a empresa Whirlpool S. A, que apoiou técnica e economicamente a realização deste trabalho, o sistema de medição a ser desenvolvido, para que seja plenamente adequado a suas aplicações, deve ser capaz de atender aos seguintes requisitos:

- apresentação a cada 10 s da frequência rotacional média do período ao usuário;
- embora normas vigentes a ensaios de compressores, ASHRAE 23 e ISO 917, estabelecerem que medições de frequência rotacional devam ser executadas com instrumentos de erro máximo de $\pm 1\%$ do valor lido^[17] e com desvio padrão menor de $\pm 0,75\%$ ^[11], respectivamente, é desejável, e foi estabelecido como meta, que o sistema a ser construído deva apresentar erro máximo de até 2 rpm, ou 33,33 mHz, o equivalente a 0,05% do valor final da faixa de medição – VFM – para compressores alimentados em 60 Hz;
- aplicabilidade do sistema de medição a uma diversificada gama de tipos de compressores;
- emprego do programa *Labview*, da National Instruments, para o processamento de dados no sistema de medição;
- identificação da frequência rotacional a partir de uma grandeza passível de ser medida externamente ao compressor;

- capacidade de implementação futura em um sistema de medição microprocessado, autônomo e independente, capaz de integrar outros sistemas, tais como de medição de grandezas elétricas^[7] e de temperatura de enrolamento de compressores^[11].

1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Este documento está dividido em seis capítulos.

No capítulo dois é apresentado um levantamento bibliográfico sobre métodos de medição de frequência rotacional de compressores. Cada método é analisado e suas vantagens e desvantagens evidenciadas.

No capítulo três são apresentadas as ferramentas matemáticas necessárias à implementação dos métodos considerados mais viáveis.

O capítulo quatro inicia com a definição da grandeza a partir da qual será inferida a frequência rotacional. Os métodos apresentados no capítulo dois são comparados entre si e os considerados mais viáveis de ser implementados são determinados. Assim, é mote desse capítulo os métodos e as alternativas propostas à realização da medição de frequência rotacional, enquanto que o capítulo cinco apresenta os resultados de ensaios realizados com o intuito de verificar a viabilidade de utilização de tais métodos frente aos requisitos de projeto.

No capítulo seis apresenta-se a conclusão deste trabalho e as propostas para sua continuidade.

2 REVISÃO DA LITERATURA: COMPRESSORES HERMÉTICOS E ALTERNATIVAS PARA A MEDIÇÃO DE SUA FREQUÊNCIA ROTACIONAL

Este capítulo apresenta um estudo sobre alternativas para a medição de frequência rotacional existentes na literatura, passíveis de serem empregados na resolução do problema em questão. Inicia-se, entretanto, com uma breve introdução sobre o objeto de estudo: compressores empregados em sistemas de refrigeração.

2.1 COMPRESSORES HERMÉTICOS PARA SISTEMAS DE REFRIGERAÇÃO

Compressores são equipamentos utilizados para elevar a pressão de um determinado fluido^[18] e ocupam o papel principal em sistemas de refrigeração. No mercado atual de compressores, os mais empregados são os de tipo hermético alternativo^[19], caracterizados, tipicamente, pela existência de um conjunto cilindro-pistão^[20] e um motor interno à sua carcaça. Nesses, as ligações típicas existentes com o meio externo são os terminais elétricos do motor e as conexões de processo, sucção e descarga. Em sua maioria, esses compressores empregam motores assíncronos monofásicos para movimentar o pistão.

A figura 1 apresenta o compressor hermético alternativo e seus principais componentes.

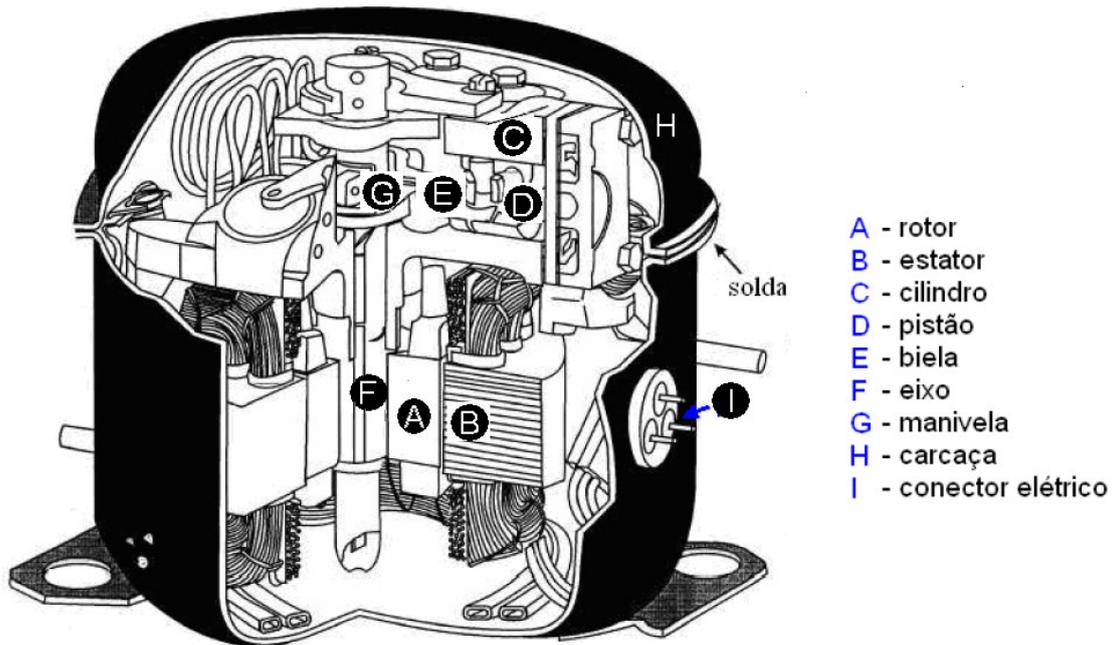


Figura 1 – Compressor hermético alternativo^[8]

Especificamente, este trabalho direciona-se a compressores herméticos alternativos, pois corresponde à grande maioria dos compressores produzidos pela empresa parceira deste trabalho.

2.2 ALTERNATIVAS PARA A MEDIÇÃO DE FREQUÊNCIA ROTACIONAL

O problema de medir frequência rotacional de motores é bastante conhecido e de resolução consideravelmente simples. Transdutores como tacômetros e *encoders* são bastante empregados para tal fim^{[21][22]}.

Entretanto, o fato de o compressor ser hermeticamente fechado torna a medição da frequência rotacional de compressores uma tarefa de complexidade considerável. A solução de empregar transdutores acoplados ao eixo do motor não é passível de implementação, pois o acoplamento dos mesmos exigiria a abertura do compressor, o que contraria os objetivos deste trabalho.

A literatura é vasta no que diz respeito a alternativas de estimação indireta de frequência rotacional, porém para aplicações diferentes de compressores herméticos. A reunião de algumas dessas, aplicáveis ao problema em questão, é aqui apresentada.

2.2.1 Medição por modelagem matemática de motores

A modelagem matemática dos motores internos aos compressores permite a estimação da frequência rotacional a partir de grandezas elétricas, como tensão e corrente de entrada, cujas medições são passíveis de serem executadas externamente ao compressor. O monitoramento dessas grandezas aliado ao prévio equacionamento permite a estimação da frequência rotacional do compressor^{[23][24][25][26][27]}.

A grande vantagem desta técnica é a simplicidade de processamento, uma vez que o modelo tenha sido estabelecido. Por outro lado, tal método apresenta uma série de empecilhos à sua utilização:

- a complexidade inerente ao processo de construção de modelos matemáticos de motores, devido à existência de não-linearidades de difícil identificação;
- a necessidade de conhecimento de vários parâmetros construtivos, tais como resistências de enrolamento do rotor e do estator e reatâncias mútuas entre tais componentes^[23];
- a garantia da robustez dos modelos a variações dos parâmetros que o compõem é sempre uma tarefa de considerável dificuldade;
- a necessidade de definição de um modelo matemático para cada tipo de motor empregado nos compressores produzidos.

2.2.2 Medição através da vibração do compressor

A variação de pressão no interior do cilindro e o fluxo pulsado de gás do sistema de descarga de compressores geram vibrações e ruídos, principalmente no bloco do compressor. Tais fenômenos se transmitem à carcaça mecanicamente, através das molas e do tubo de descarga, e acusticamente, através das pulsações do sistema de sucção do compressor^[28].

A figura 2 apresenta um exemplo de como as vibrações na carcaça do compressor, medidas sob a forma de aceleração, relacionam-se com a variação da pressão no interior do cilindro.

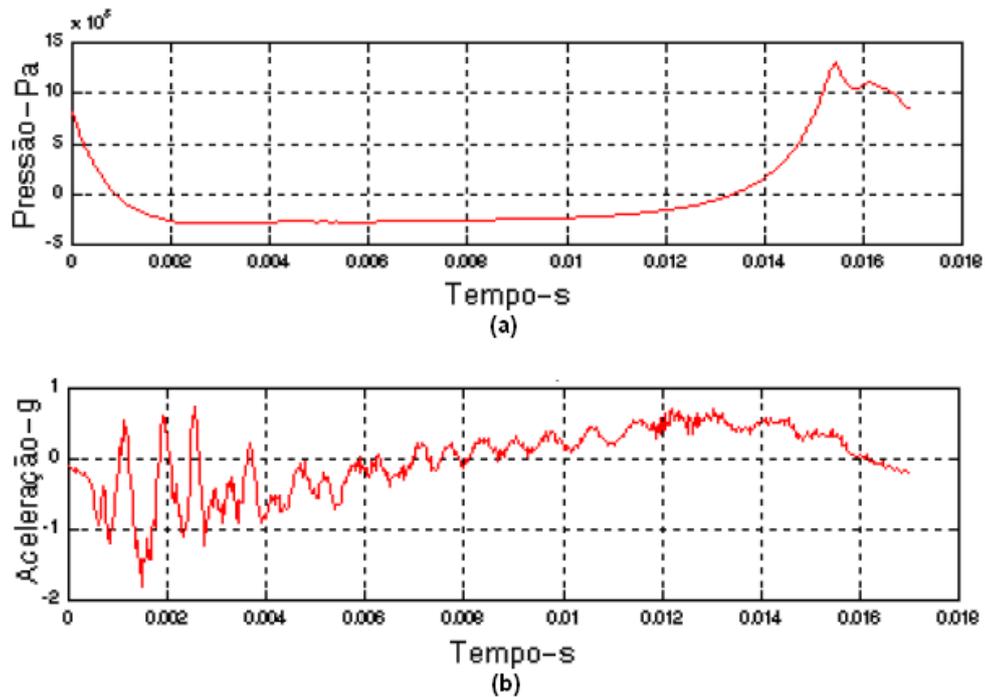


Figura 2 – Relação entre pressão no interior do cilindro (a) e vibração na carcaça de compressores(b)^{[28]3}

É possível perceber na figura 2 a existência de vibrações mais salientes após à abertura da válvula de descarga. Ensaio realizados atestam que o sinal de vibração ou ruído obtido de um compressor apresenta periodicidade e seu espectro de frequência é composto basicamente por harmônicas da frequência rotacional^{[28][30]}.

A análise em frequência do sinal de vibração fornece, portanto, informações sobre a frequência rotacional de compressores. É uma grandeza de fácil acesso, pois transdutores, como acelerômetros, podem ser acoplados à carcaça do compressor.

Por outro lado, tal sinal está altamente sujeito a perturbações provenientes do meio externo. Além disso, a maneira como componentes internos aos compressores podem interferir na medição é desconhecida, principalmente em caso de falhas. Portanto, a medição de frequências rotacional de compressores através do sinal de vibração apresenta dificuldades à implementação.

³ Na figura, a aceleração é parametrizada em função da gravidade (unidade g). Embora não seja unidade aceita pelo Sistema Internacional de Unidades^[30], é a usual em medição de vibração.

O emprego de microfones para a medição pela vibração através do sinal de pressão sonora não modifica o quadro de imprevisibilidade da medição e ainda exige a utilização de um sistema adequado de isolamento acústico.

2.2.3 Medição através da corrente de alimentação

A existência de variações no torque exigido do motor nas etapas de compressão e admissão provoca alterações na forma do sinal de corrente de alimentação do motor, de modo que o sinal senoidal da corrente é adicionado de uma componente de frequência igual à de escorregamento^{4[15]}. Outras componentes surgem oriundas de variações na permeabilidade do entreferro devido às ranhuras do rotor e à sua excentricidade^{[31][32][33][34][35]}.

Dessa forma, o sinal de corrente de alimentação de compressores contém informações sobre a frequência rotacional. A análise desse sinal nos domínios do tempo e da frequência viabiliza, portanto, a detecção da frequência rotacional do compressor.

2.2.3.1 Identificação da frequência de escorregamento

A frequência de escorregamento do motor pode ser identificada a partir da oscilação do sinal de corrente de alimentação^[15], a qual é apresentada na figura 3.

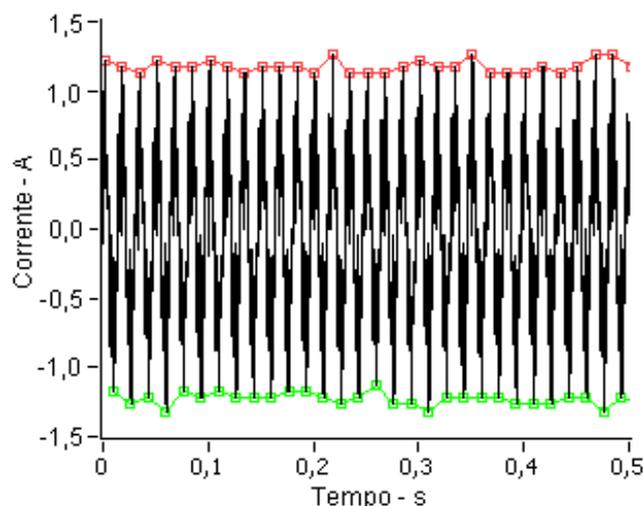


Figura 3 – Sinal de corrente de alimentação no tempo

⁴ Frequência de escorregamento é a diferença entre a frequência de alimentação e a rotacional^[36]

A oscilação existente nas envoltórias do sinal de corrente é causada pela presença de uma componente correspondente à frequência de escorregamento do motor^[15]. A identificação de pontos existentes sobre tais envoltórias permite, portanto, a determinação da frequência de escorregamento do motor através da determinação da média dos períodos entre pontos sucessivos. Com esse procedimento é possível obter resultados com incertezas menores que ± 1 rpm para aquisições realizadas em intervalos de tempo de um minuto^[15]. A fim de reduzir essa incerteza é possível, ainda, compor os resultados gerados através de ambas as envoltórias.

Uma possível desvantagem desta alternativa é o tempo necessário à medição. Como as envoltórias são compostas por pontos relativos aos picos e vales do sinal de corrente, um máximo de sessenta pontos por segundo pode ser amostrado sobre cada envoltória, para a frequência de alimentação de 60 Hz. Entretanto, é possível analisar tais envoltórias em frequência, de forma a tornar inválida a desvantagem apresentada. Não foi encontrada, todavia, bibliografia que ateste tal hipótese.

2.2.3.2 Identificação de harmônicas relativas à variação do entreferro

Harmônicas relacionadas com a frequência rotacional de compressores são produzidas por variações na permeabilidade do entreferro devido às ranhuras do rotor⁵ e a sua excentricidade.

Em operação, para um observador estacionário localizado no estator, as ranhuras do rotor se movem de maneira que a área de entreferro é modificada a cada passagem de ranhura. Assim, a permeabilidade do entreferro é alterada, o que provoca alterações no fluxo magnético no entreferro e gera harmônicas no sinal de corrente, o que é mostrado na figura 4.

As componentes relativas às ranhuras do rotor podem ser determinadas através da equação $1^{[31][32][33][34][35]}$, a qual evidencia a relação entre as componentes freqüenciais relativas às ranhuras e o escorregamento do motor.

⁵ Ranhuras são as reentrâncias onde são alojados os condutores em motores assíncronos^[36].

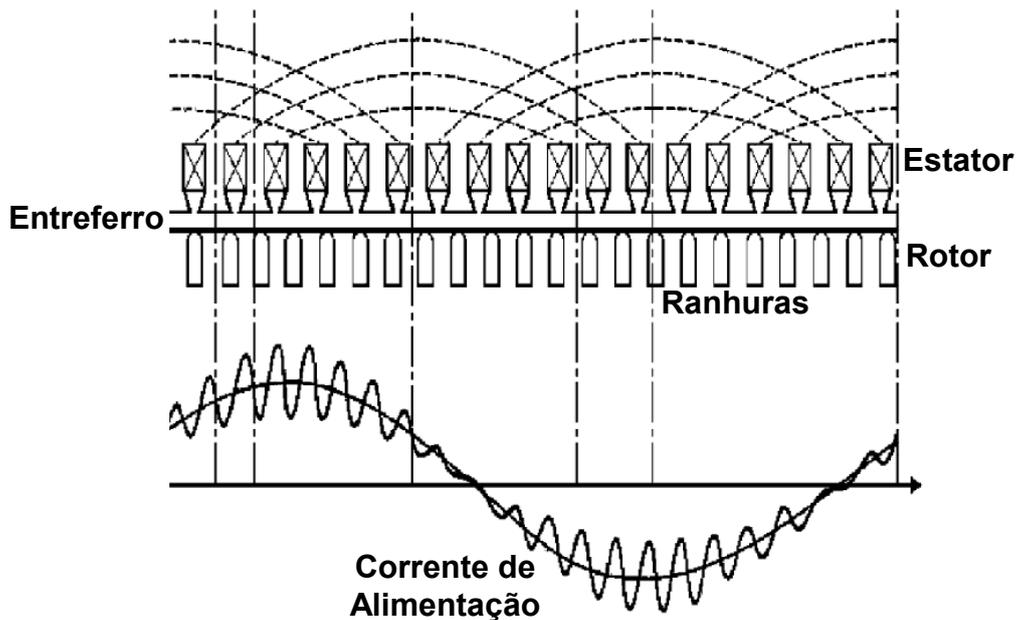


Figura 4 – Forma do sinal de corrente em um motor assíncrono^[37]

$$f_h = f_s \left((kR + n_d) \left(\frac{1-s}{p} \right) + n_w \right) \quad (1)$$

Onde:

- f_h : freqüência da harmônica de ranhura;
- f_s : freqüência de alimentação;
- k : um número inteiro positivo;
- R : número de ranhuras do rotor;
- n_d : ordem da excentricidade;
- s : escorregamento do rotor;
- p : número de pares de pólos do estator;
- n_w : ordem das harmônicas da força magneto-motriz no entreferro.

Apesar de apresentar a vantagem de determinar a freqüência rotacional sem depender de fatores externos, como carga e temperatura, a equação 1 exige o conhecimento de vários parâmetros construtivos do motor, o que torna bastante complexa sua utilização. Ensaio prévios específicos para cada tipo de motor se apresentam capazes de estimar alguns parâmetros, como o número de ranhuras do rotor^[38]. Entretanto a realização de tais experimentos aumenta o tempo necessário à medição, o que contraria os objetivos de projeto.

Uma forma de simplificar esse problema é a utilização de harmônicas relacionadas à excentricidade do rotor para a determinação da frequência rotacional. Harmônicas de excentricidade surgem devido ao incorreto posicionamento do rotor ou estator, flexionamento do eixo do rotor, desalinhamento e desgaste de mancais^[34].

No espectro de frequências, tais harmônicas se localizam simetricamente à frequência de alimentação^[37] e sua detecção apresenta vantagens em relação à utilização de harmônicas relacionadas às ranhuras, uma vez que o número de parâmetros relativos à construção do motor é minimizado. Tais harmônicas são determinadas segundo a equação 2^{[31][32][33][34][34]}, que é uma simplificação da equação 1 para o caso de $n_w=1$, $k=0$ e $n_d=\pm 1$ ^[34].

$$f_h = f_s \left(1 \pm \left(\frac{1-s}{p} \right) \right) \quad (2)$$

Onde:

- f_h : frequência da harmônica a ser detectada;
- f_s : frequência de alimentação;
- s : escorregamento do rotor;
- p : número de pares de pólos do estator.

De um modo geral, a medição de frequência rotacional pela corrente de alimentação apresenta-se bastante prática, uma vez que o acesso a tal grandeza é facilitado. Entretanto, tal método não se aplica a compressores acionados por inversores de frequência, pois os terminais de alimentação do motor não estão disponíveis externamente nesse tipo de compressor. Contudo, salienta-se que tais compressores não pertencem ao escopo deste trabalho, de forma que novas pesquisas que viabilizem a medição de frequência rotacional para tais compressores são necessárias. De maneira semelhante, outro ponto importante a ser estudado é o comportamento de tal método de medição frente a situações críticas, como em ensaios de partida e tombamento, citados no item 1.1.

2.2.4 Medição através dos sinais de pressão de sucção e de descarga

O ciclo de um compressor alternativo pode ser definido em duas etapas: a fase de admissão, ou sucção, e de compressão. Durante a etapa de sucção, o pistão se desloca do ponto morto superior ao inferior, aumentando o volume no interior do cilindro. A pressão no cilindro é reduzida, conseqüentemente, até o momento em que se torna ligeiramente inferior à pressão na linha de sucção, o que provoca a abertura da válvula de sucção e a entrada de fluido no cilindro^[19]. A figura 5 representa tal comportamento.

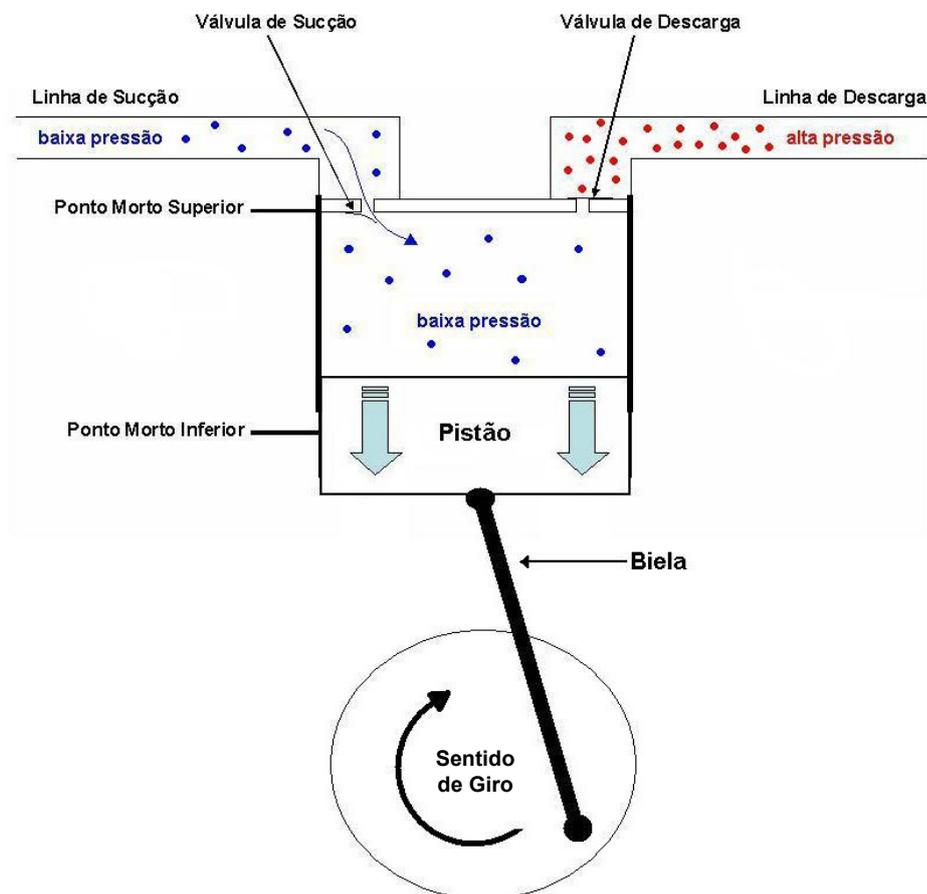


Figura 5 – Ciclo de sucção do compressor^[19]

Na etapa de compressão, que corresponde ao período em que o pistão se movimenta do ponto morto inferior ao superior, o comportamento é o oposto: o fluido é comprimido até a pressão no interior do cilindro ter valor ligeiramente acima da pressão na linha de descarga. A partir desse instante, a válvula de descarga se abre e o fluido é expelido para fora do compressor, de acordo com a figura 6.

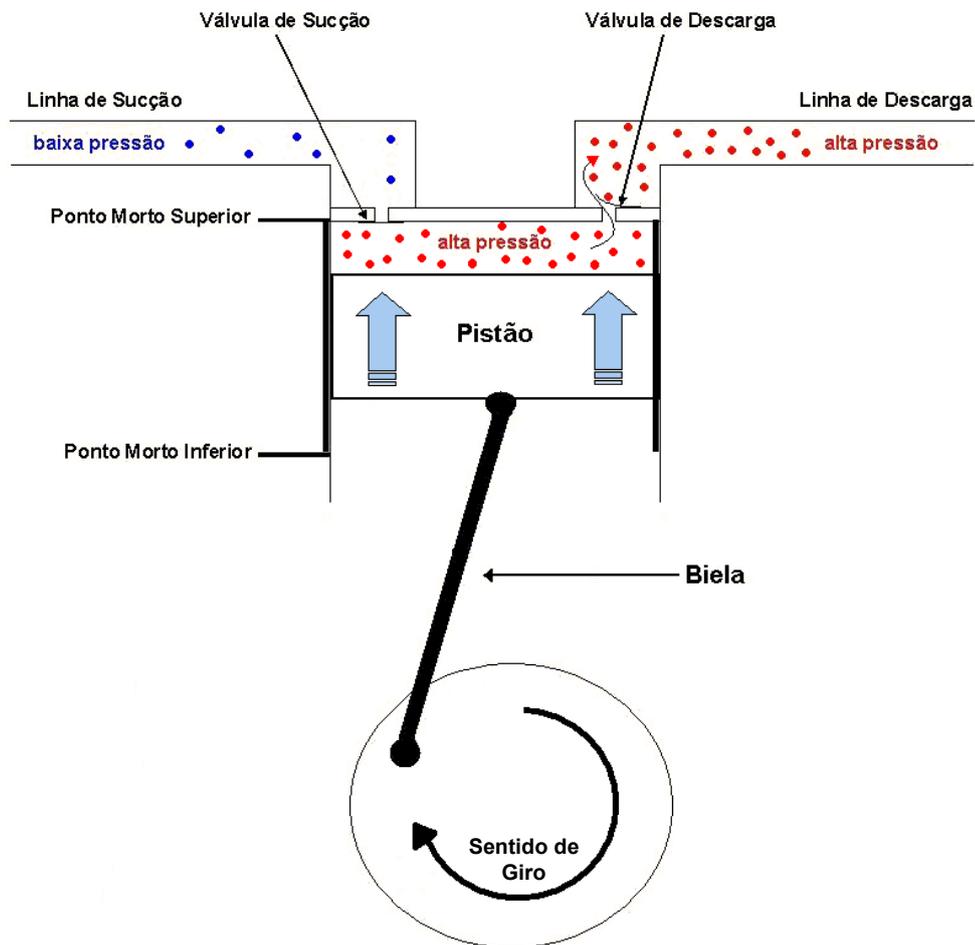


Figura 6 – Ciclo de compressão do compressor^[19]

Dessa forma, a pressão no interior do cilindro adquire um comportamento cíclico, ou pulsado, com a primeira derivada positiva durante o ciclo de compressão e negativa durante o ciclo de sucção. É esperado, portanto, que os sinais de pressão de sucção e descarga apresentem comportamento semelhantes, pela sincronia e seqüência dos movimentos do pistão.

A figura 7 apresenta o sinal de pressão adquirido como exemplo, no âmbito deste trabalho, através de um transmissor de pressão localizado na linha de descarga do compressor. Nessa, os pontos máximos e mínimos correspondem ao ponto morto superior e inferior, respectivamente. De um outro ponto de vista, correspondem à abertura e ao fechamento das válvulas, o que está relacionado com a frequência rotacional^[39].

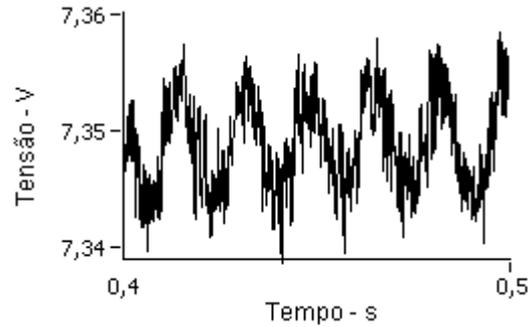


Figura 7 – Sinal de saída de um transmissor usado para medir a pressão de descarga do compressor

Dessa forma, o tempo decorrido entre dois pontos de máxima consecutivos, medidos na sucção ou na descarga de um compressor, corresponde ao período entre dois pontos mortos superiores consecutivos. Revela-se, assim, a relação entre a periodicidade dos sinais de pressão com o período de oscilação do pistão, ou seja, com a frequência rotacional dos compressores.

Observa-se na figura 8 a relação direta entre a frequência do sinal de pressão de descarga e a frequência rotacional dos compressores. Salienta-se que a frequência rotacional (destaque na figura 8(b), aproximadamente 59 Hz) é sempre menor do que a frequência de alimentação (60 Hz) devido ao escorregamento inerente a motores de indução.

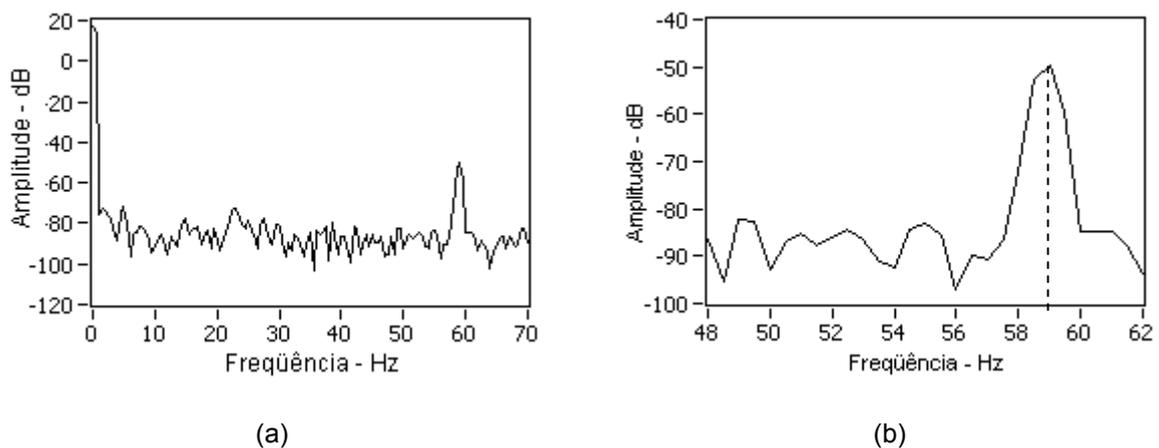


Figura 8 – Análise em frequência do sinal de pressão de descarga (a) de um compressor alimentado a 60 Hz. (b) Em visão ampliada.

Conclui-se, portanto, que a medição de frequência rotacional de compressores a partir do sinal de pressão de sucção ou de descarga é um método passível de ser implementado.

Como vantagens, tal método é bastante simples e de fácil aplicação, uma vez que a medição é simplificada pelo fácil acesso às grandezas a serem mensuradas e o processo de medição de pressão é bastante conhecido pelas empresas de refrigeração. Outro aspecto positivo é a confiabilidade metrológica dos transdutores empregados. A principal desvantagem desse método é a existência de pouca bibliografia específica sobre o tema.

Neste capítulo foram apresentadas diversas formas de medição indireta de frequência rotacional de compressores herméticos. Para implementá-las, entretanto, é necessário o emprego de algumas ferramentas matemáticas, as quais são o assunto do capítulo 3.

3 FERRAMENTAS MATEMÁTICAS EMPREGADAS NOS MÉTODOS DE MEDIÇÃO PROPOSTOS

Existem diversas ferramentas matemáticas que podem ser empregadas para extração de componentes em espectros de frequência. No escopo deste capítulo são apresentadas as quatro ferramentas utilizadas nos métodos de medição propostos no capítulo 4: transformada de Fourier, transformada Z, analisador *lock-in* e transformada de Hilbert.

3.1 TRANSFORMADA DE FOURIER

A transformada de Fourier é uma operação matemática que transporta um sinal do domínio do tempo para o da frequência e vice-versa, partindo do pressuposto de que todo sinal pode ser definido como a soma ponderada de funções trigonométricas. A equação 3 representa essa ferramenta matemática no domínio do tempo contínuo^[40].

$$X(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t)e^{-i\omega t} dt \quad (3)$$

Onde:

- $X(\omega)$: sinal no domínio da frequência;
- $x(t)$: sinal no domínio do tempo;
- i : representação de número imaginário;
- ω : frequência – rad/s;
- t : tempo.

No domínio do tempo discreto, tal operação é intitulada Transformada Discreta de Fourier – DFT – e é apresentada na equação 4. Nesse domínio, o sinal é amostrado a determinada frequência de amostragem, obtendo-se $x(n)$ ^[40].

$$X(\omega) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} x(n)e^{-i\omega n} \quad (4)$$

Onde:

- $X(\omega)$: sinal no domínio da frequência ;
- $x(n)$: sinal no domínio do tempo;
- i : representação de número imaginário;
- ω : frequência – rad/s;
- n : tempo (discreto).

O processamento da transformada de Fourier em suas equações 3 e 4 é entretanto computacionalmente inviável, uma vez que necessitam infinitos pontos do sinal x . A fim de limitar a quantidade de valores computados, são definidos intervalos de observação (de integração, no caso da equação 3, ou intervalos do somatório, para a equação 4).

Com o intuito de reduzir as necessidades de hardware para o processamento da transformada de Fourier, foram desenvolvidos algoritmos capazes de diminuir o número de operações de ponto flutuante necessárias, o espaço reservado ao armazenamento de informações e o tempo de acesso à memória^[41]. Os mais conhecidos são os *Fast Fourier Transform* – FFT.

A transformada de Fourier considera que qualquer sinal é composto por funções trigonométricas e, por conseguinte, periódicas, de modo que todo sinal pode ser considerado periódico, de período definido por suas componentes. É possível assim determinar um intervalo de observação (T_p) igual ou múltiplo do período do sinal.

Caso o sinal seja amostrado com um período diferente e não múltiplo do intervalo de observação, o sinal será analisado como periódico mesmo sendo não periódico. Tal fato origina um fenômeno conhecido como dispersão espectral, o qual é apresentado na figura 9^[40].

A figura 9 apresenta dois sinais amostrados com o mesmo intervalo de observação, transpostos para o domínio da frequência através da transformada discreta de Fourier, a qual os considera como periódicos de período T_p . Em (a) o sinal apresenta período igual a T_p , de forma que a transformada de Fourier resulta em um valor único.

Em (b) o sinal e o intervalo de observação apresentam diferenças, seja pela incorreta definição de T_p ou pela presença de componentes no sinal de período não-múltiplos de T_p . Tal fato implica a incorreta identificação do sinal pela transformada de Fourier, para a qual o sinal em questão apresenta descontinuidades. Nesse caso, tal operação matemática não é capaz de gerar um resultado único, mas um *continuum* de pontos presentes ao longo de todo o espectro de frequências e mais saliente nas frequências das componentes do sinal analisado.

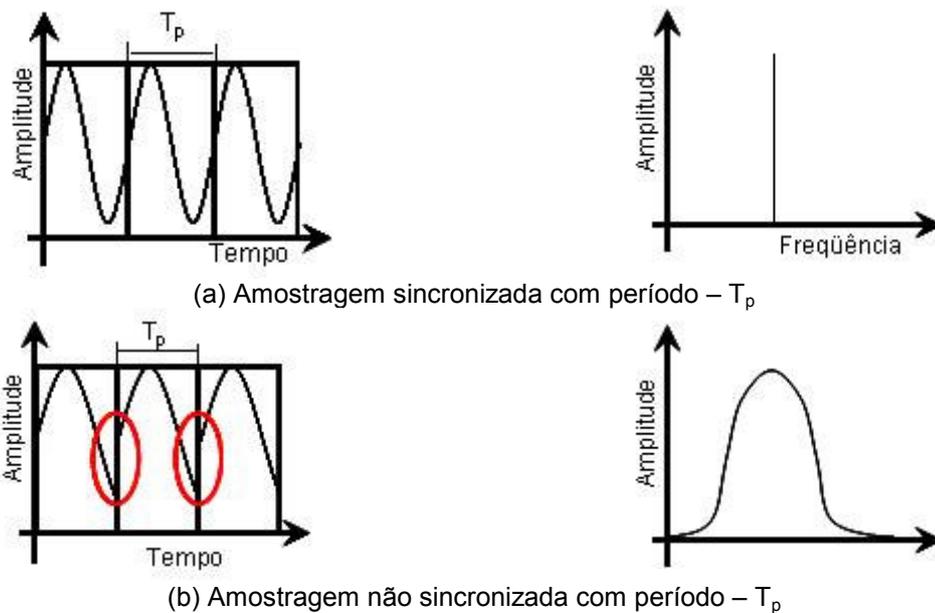
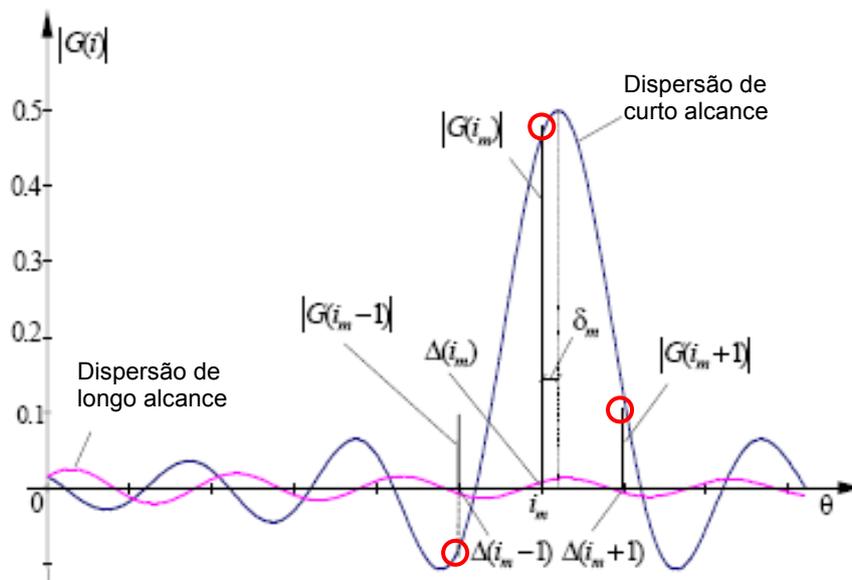


Figura 9 – Dispersão espectral inerente à transformada de Fourier

Experimentalmente, a dispersão espectral pode ser considerada inevitável, devido à presença de ruídos, interferências e perturbações inerentes aos processos de medição, caracterizando-se como uma importante fonte de incertezas no processo de detecção de componentes de um sinal. Seus efeitos podem ser amenizados através de uma técnica conhecida como janelamento^[42].

Janelas são funções matemáticas de ponderação empregadas com o intuito de diminuir a ordem das discontinuidades nos limites do período de observação T_p , de forma a suavizá-las. De um outro ponto de vista, pode-se afirmar que a função do janelamento é dar uma maior projeção às frequências próximas à frequência fundamental do sinal^[42].

Tendo em vista que a dispersão espectral de cada componente se estende por todo o espectro, o valor em amplitude de um determinado componente é a composição do seu próprio valor, após o janelamento e calculado via transformada de Fourier (dispersão de curto alcance), e dos valores da dispersão espectral de cada componente do sinal no ponto em questão (dispersão de longo alcance), conforme apresentado na figura 10. Tal composição pode resultar em um desvio entre a frequência de uma componente e seu real valor^[43].



Legenda:

- G : amplitude da componente em frequência;
- Δ : frequência da componente;
- i : componente em frequência;
- δ : desvio (erro);
- m : índice da componente.

Figura 10 – Erro inerente à identificação de componentes frequenciais^[43]

Além do erro δ , a resolução em frequência Δf é outra importante fonte de incertezas em análise em frequência. De acordo com PROAKIS e MANOLAKIS^[40] “a periodicidade de ‘período’ α em um domínio automaticamente implica discretização com resolução $1/\alpha$ no outro domínio”. Assim, a resolução em frequência e o período de amostragem utilizado estão relacionados de acordo com a equação 5^[40].

$$\Delta f = \frac{1}{T_p} \quad (5)$$

Onde:

- Δf : resolução em frequência;
- T_p : intervalo de observação.

O intervalo de observação T_p pode ser definido em termos da frequência de amostragem adotada e do número de pontos amostrados, conforme a equação 6^[40].

$$T_p = \frac{N}{f_s} \quad (6)$$

Onde:

- T_p : intervalo de observação;
- N : número de amostras;
- f_s : frequência de amostragem.

Assim, é possível determinar a resolução em frequência Δf de acordo com a equação 7^[44], da qual se conclui que a resolução em frequência é proporcional à frequência de amostragem empregada e inversamente proporcional ao número de amostras coletado.

$$\Delta f = \frac{1}{T_p} = \frac{f_s}{N} \quad (7)$$

Onde:

- Δf : resolução em frequência;
- T_p : intervalo de observação;
- f_s : frequência de amostragem;
- N : número de amostras.

De acordo com COX e HARRIS^[45], “a incerteza associada à identificação em frequência pela transformada de Fourier é a mesma incerteza associada à medição em si”. Entretanto, o erro de detecção δ e a resolução em frequência podem possuir considerável influência no resultado de medição, de acordo com a incerteza desejada. Por esse motivo diversas técnicas para reduzir o erro de detecção δ e melhorar a resolução em frequência vêm sendo estudadas. No escopo deste trabalho apresenta-se a técnica de *zero padding*, a transformada interpolada de Fourier e a transformada Chirp-Z.

3.1.1 *Zero padding*

A fim de melhorar a identificação de uma determinada componente através da transformada de Fourier pode-se empregar a técnica conhecida como *zero padding*. Esta técnica consiste em acrescentar zeros no domínio do tempo ao sinal amostrado, após o janelamento e antes da implementação de uma FFT. O objetivo é melhorar a resolução em frequência através de um aumento do número de pontos calculados (vide equação 7), sem que as características do sinal amostrado sejam alteradas^[40].

Após a FFT, os pontos provenientes diretamente do sinal amostrado são transportados para o domínio da frequência. Entretanto, os pontos de amplitude zero não afetam o espectro de frequências. Dessa forma, os espectros de frequência obtidos com e sem a aplicação de *zero padding* abrangem a mesma faixa de frequências.

O aumento no número de pontos provocado pela inserção de pontos de valor zero ao sinal amostrado ocasiona, todavia, um aumento do número de pontos em frequência, o que implica uma redução na distância entre os pontos em frequência, de acordo com a equação 7. Dessa forma, o espectro do sinal com *zero padding* apresenta mais pontos, intermediários aos pontos provenientes do sinal amostrado.

A técnica de *zero padding* é apresentada nas figuras 11 e 12. Nessas são apresentados sinais compostos de duas componentes de frequências. Na figura 11 tais componentes se apresentam distantes 0,06 Hz entre si, localizadas em (0,135 e 0,141) Hz (a).

Tal sinal é amostrado em dezesseis pontos e visualizado em freqüência com oito pontos, conforme a figura 11 (b). Aplica-se então o *zero padding*, o que possibilita a análise em dezesseis (c), trinta e dois (d) e cento e vinte e oito pontos em freqüência (e)^[40].

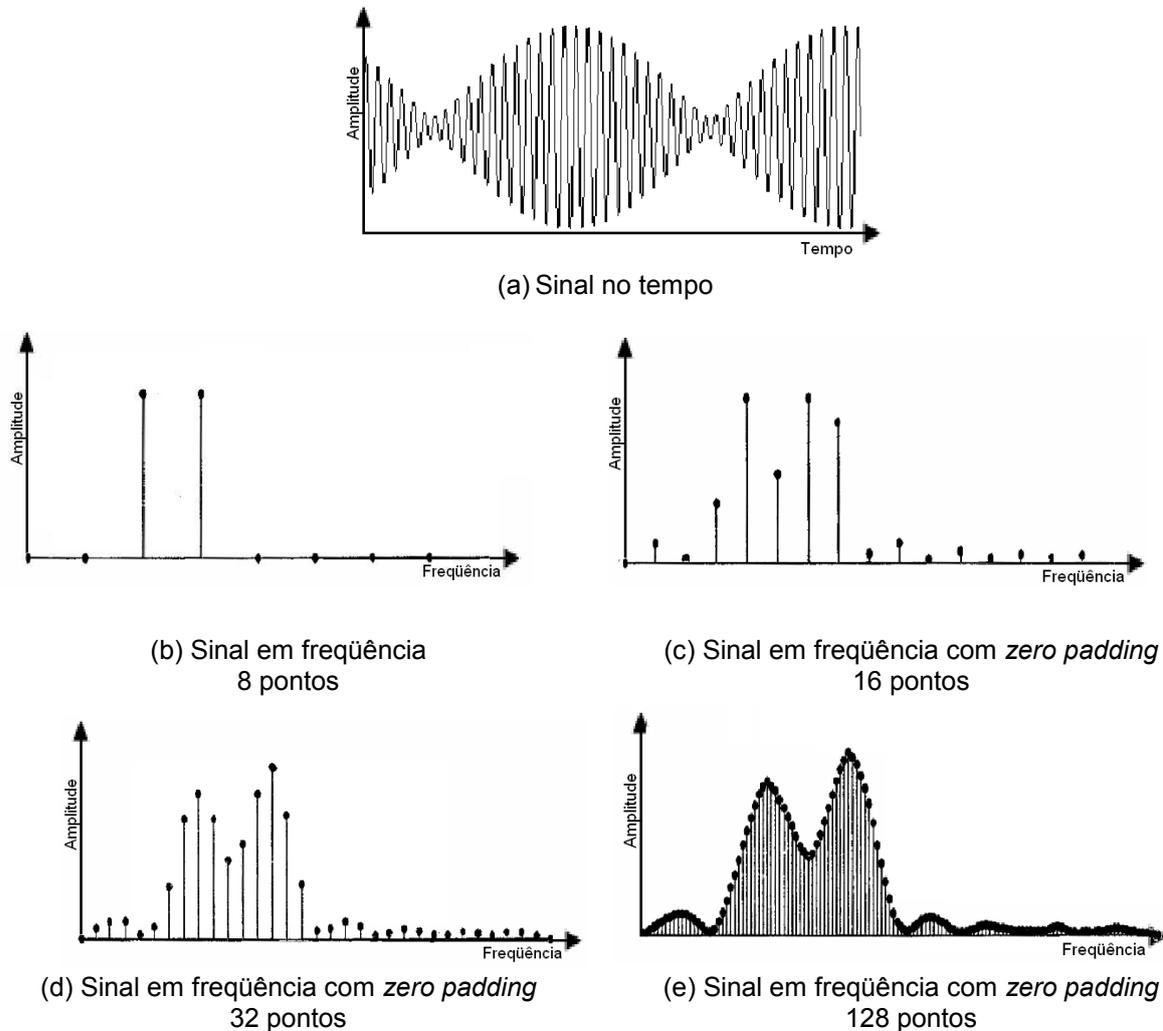


Figura 11 – Ilustração da técnica de *zero padding*^[40]

Na figura 11(b) é possível visualizar que o espectro de freqüências apresenta duas componentes mais proeminentes, relativas às duas componentes do sinal. A técnica de *zero padding* fornece um método de interpolação do espectro, o que enriquece a forma e permite uma melhor visualização do mesmo, uma vez que são gerados pontos intermediários entre os pontos relativos ao sinal amostrado, conforme apresentado na figura 11(c), (d) e (e). Entretanto, tais pontos não portam informações adicionais sobre o real espectro do sinal, pois sua presença deve à inserção de pontos de valor zero, ou seja, não portadores de informação.

A figura 12 apresenta a utilização de *zero padding* para um sinal composto também de duas componentes, mas com frequências espaçadas de 0,01 Hz, localizadas em (0,135 e 0,145) Hz (a). Tal sinal é amostrado em dezesseis pontos e visualizado em frequência com oito pontos (b). A técnica de *zero padding* é aplicada, de forma a possibilitar a análise em dezesseis (c), trinta e dois (d) e cento e vinte e oito pontos em frequência (e)^[40].

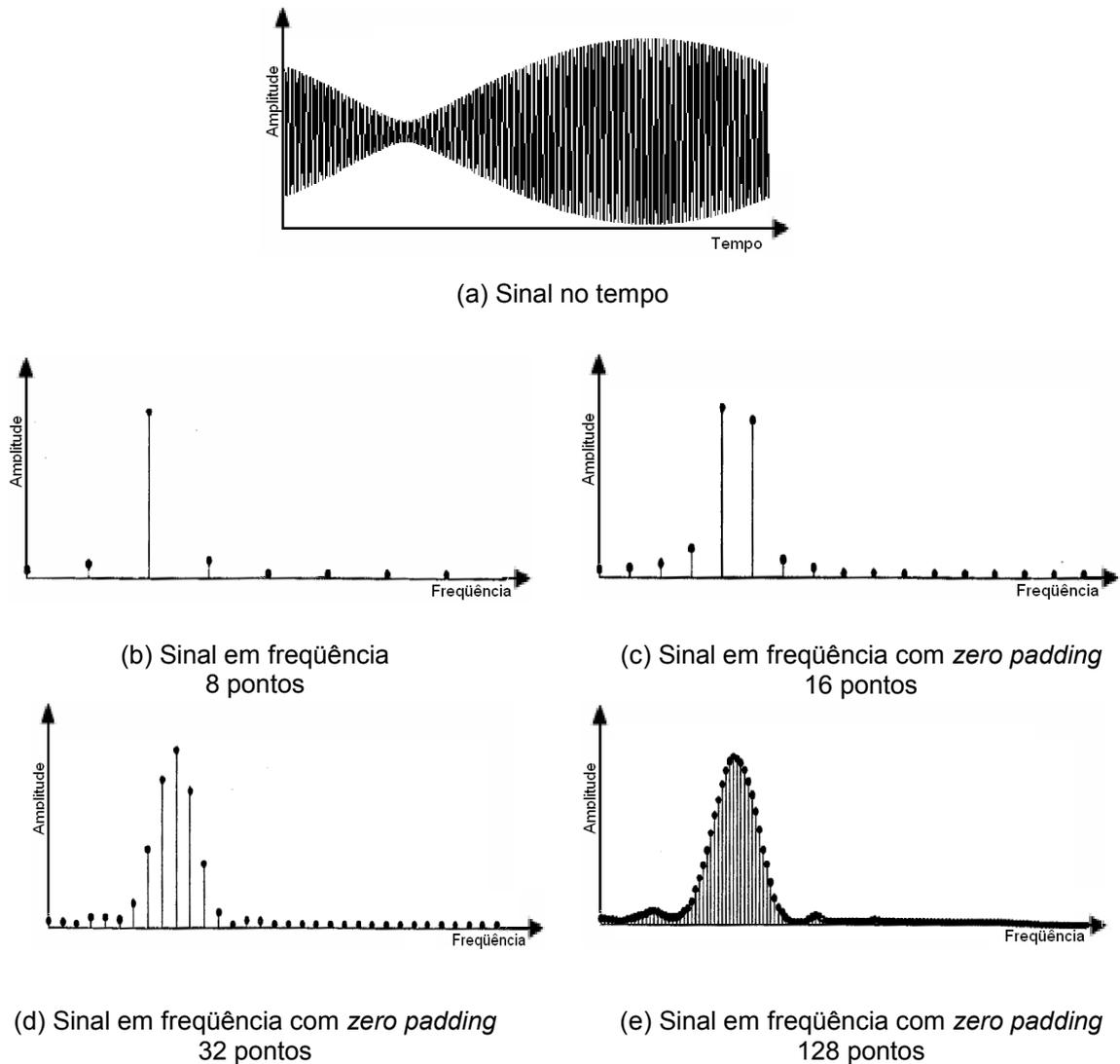


Figura 12 – Demonstração da incapacidade do *zero padding* melhorar a identificação de componentes não presentes no espectro^[40]

Pode-se perceber que na figura 12(b) não é possível identificar as duas componentes, devido a sua proximidade. A técnica de *zero padding* apresenta-se neste caso incapaz de determinar a presença de tais componentes no espectro, como é possível visualizar nas figuras 12(c), (d) e (e).

A técnica de *zero padding* é, portanto, promissora para a melhoria da visualização de componentes freqüenciais presentes no espectro e não válida para não-presentes. Sua aplicação permite, no entanto, a identificação mais aproximada de uma componente, a partir de um pequeno número de pontos amostrados, ou seja, requer menor tempo de amostragem^{[40][46]}.

3.1.2 Transformada interpolada de Fourier

De maneira semelhante ao *zero padding*, a transformada interpolada de Fourier (FFTInt) tem por objetivo empregar pontos presentes no espectro de freqüências para estimar pontos não presentes, via interpolação. Entretanto, não possui o objetivo de melhorar a visualização do espectro.

Após a aplicação da transformada de Fourier a um dado sinal, os pontos gerados podem ser interpolados, de forma que seja possível prever o comportamento do espectro entre os mesmos.

Tal interpolação não agrega todavia informação ao espectro, de forma que somente uma estimativa dos valores intermediários é possível. Entretanto, a interpolação permite estimar o desvio δ (vide figura 10) existente não somente devido à presença de ruído no sinal medido, mas também à dispersão espectral de outros componentes. Tal desvio ocasiona um deslocamento em amplitude e posição do componente estimado^[42], conforme mencionado anteriormente – vide item 3.1.

Dessa forma, a amplitude estimada de um determinado componente é composta como uma combinação de dois elementos: a dispersão de curto alcance, gerada pela dispersão do próprio componente que se deseja identificar; dispersão de longo alcance, originada pela presença de ruído e pela influência de outros componentes^{[42][43]}.

Considerando-se que o sinal é amostrado de forma adequada, de modo que os componentes de freqüência se encontrem suficientemente espaçados, a dispersão de longo alcance pode ser considerada desprezível^[43].

A equação 8 apresenta o valor do erro δ para interpolações de dois pontos, quando a função janela de Hanning transportada ao domínio da freqüência for utilizada como função de interpolação^[43] – vide figura 10.

$$\delta_m = \frac{2|G(i_m + 1)| - |G(i_m)|}{|G(i_m)| + |G(i_m + 1)|} \quad (8)$$

Onde:

- G: amplitude da componente em freqüência;
- m: índice da componente em freqüência;
- i: componente em freqüência;
- δ : desvio (erro).

A FFTInt é bastante adequada para melhoria da identificação de componentes em freqüência que apresentem forte amplitude. Entretanto, apresenta limitações quanto a alterações em freqüência durante o intervalo de amostragem ou perturbações espúrias perto da componente de interesse^[44].

3.2 TRANSFORMADA Z

A transformada Z é uma outra ferramenta empregada para transportar um sinal entre os domínios do tempo e freqüência. Ela pode ser definida de acordo com a equação 9^[40].

$$X(z) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} x(n)z^{-n} \quad (9)$$

Onde:

- X(z): sinal no domínio da freqüência;
- z: variável complexa;
- x(n): sinal no domínio do tempo;
- n: tempo (discreto).

A variável complexa z pode ser expressa em coordenadas polares, conforme apresentado na equação 10^[40].

$$z = re^{i\omega} \quad (10)$$

Onde:

- z: variável complexa;
- r: módulo da variável z;
- w: fase da variável z;
- i: representação imaginária.

As equações 9 e 10 podem ser combinadas, o que leva à definição da transformada Z de acordo com a equação 11^[40], a qual é idêntica à equação 4 para valores de r iguais a um. Assim, a transformada de Fourier pode ser analisada como um caso particular da transformada Z, quando calculada sobre um círculo de raio unitário^[40]. A transformada Z é portanto uma expansão da transformada de Fourier.

$$X(z) \Big|_{z=re^{-i\omega n}} = \sum_{n=-\infty}^{\infty} [x(n)r^{-n}] e^{-i\omega n} \quad (11)$$

Onde:

- X(z): sinal x(n) no domínio complexo;
- z: variável complexa;
- r: módulo da variável z;
- ω : frequência angular da variável z;
- n: número de pontos;
- i: representação imaginária;
- x(n): sinal no tempo.

3.2.1 Transformada Chirp-Z

A transformada Chirp-Z (CZT) é um algoritmo para o cálculo da transformada Z. Ela objetiva a determinação da transformada Z em pontos igualmente espaçados, localizados sobre curvas, a partir de pontos iniciais arbitrariamente alocados no plano complexo^[47].

A CZT é apresentada na equação 12^{[37][40][47]}.

$$z_k = A_0 e^{i2\pi\theta_0} (W_0 e^{i2\pi\phi_0})^{-k}, \quad k=0,1,\dots,M-1 \quad (12)$$

Onde:

- A_0 : módulo do ponto inicial da curva;
- i : representação imaginária;
- θ_0 : freqüência do ponto inicial;
- W_0 : razão de variação dos módulos dos pontos;
- Φ_0 : incremento em freqüência da CZT;
- M : número de pontos no plano complexo.

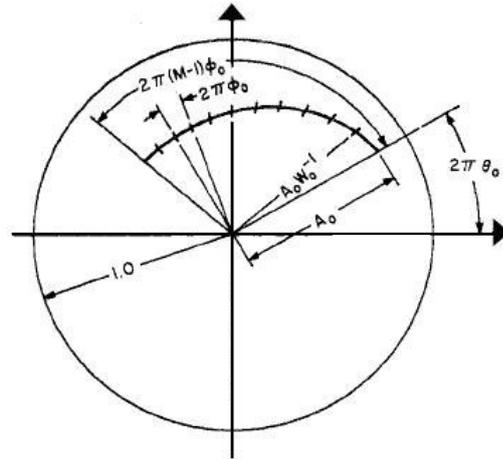
Ao se substituir o valor de z da equação 10 pelo apresentado na equação 12, a equação 11 transforma-se na equação 13.

$$X(z_k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) \cdot A_0 W_0^{-n} \cdot e^{-in} (e^{2\pi(\theta_0 - \phi_0 k)})^{-n}, \quad \text{para } k=0,1,\dots,M-1 \quad (13)$$

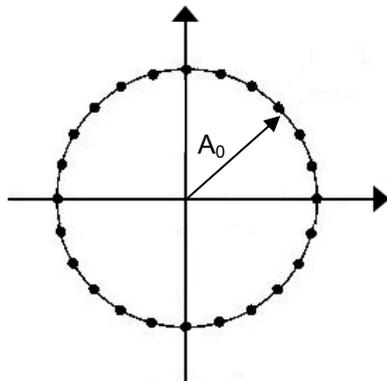
Onde:

- $X(z_k)$: sinal $x(n)$ no domínio complexo;
- z_k : variável complexa;
- k : ponto no plano complexo;
- N : número de pontos amostrados;
- n : ponto no domínio do tempo;
- $x(n)$: sinal no domínio do tempo;
- A_0 : módulo do ponto inicial da curva;
- i : representação imaginária;
- θ_0 : freqüência do ponto inicial;
- W_0 : razão de variação dos módulos dos pontos;
- Φ_0 : incremento em freqüência da CZT;
- M : número de pontos no plano complexo.

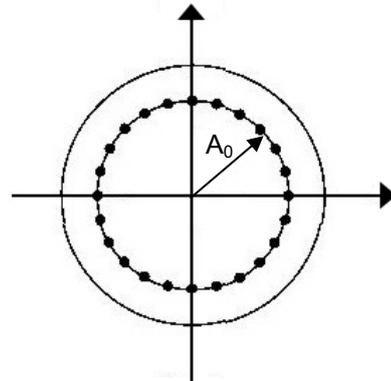
Diferentemente da transformada de Fourier, a CZT gera diversos pontos no plano complexo para cada ponto amostrado, gerando curvas ao invés de pontos. A forma dessas curvas depende do valor das variáveis: o ponto inicial ($k=0$) apresenta módulo A_0 e fase θ_0 e os seguintes se deslocam de acordo com os valores de W_0 e Φ_0 , conforme apresentado na figura 13^[47].



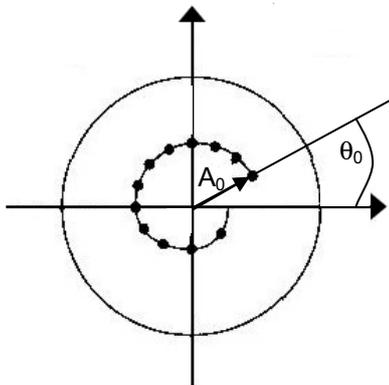
(a) Algoritmo de alocação de pontos no plano complexo pela CZT.



(b) $A_0=1$, $W_0=1$, $\varphi_0=1$ e $\theta_0=1$



(c) $A_0 < 1$, $W_0=1$, $\varphi_0=1$ e $\theta_0=1$



(e) $A_0 < 1$, $W_0^{-1} > 1$

Legenda:

- A_0 : módulo do ponto inicial da curva;
- W_0 : razão de variação dos módulos dos pontos;
- θ_0 : freqüência do ponto inicial;
- Φ_0 : incremento em freqüência da CZT;
- M : número de pontos no plano complexo.

Figura 13 – Alocação dos pontos no plano complexo pela transformada Chirp-Z^{[40][47]}

A CZT realiza a transformada Z dos pontos analisados, mas possui a capacidade de limitar a análise a uma faixa de frequências de interesse, determinada pelos parâmetros θ_0 e Φ_0 . Para tanto, basta definir duas novas variáveis, f_0 e f_f , denominadas frequência inicial e final da faixa, respectivamente. As equações 14 e 15 apresentam os valores de f_0 e f_f .

$$f_0 = \theta_0 \quad (14)$$

$$f_f = \frac{f_f - f_0}{f_{amostragem}} \quad (15)$$

A figura 14 apresenta a alocação de pontos pela CZT para os valores de $A_0=W_0=1$. Como a DFT, os pontos se localizam sobre o círculo unitário. Entretanto, são alocados M pontos entre as fases $2\pi f_f$ e $2\pi f_0$. A resolução espectral obtida pela CZT é apresentada na equação 16.

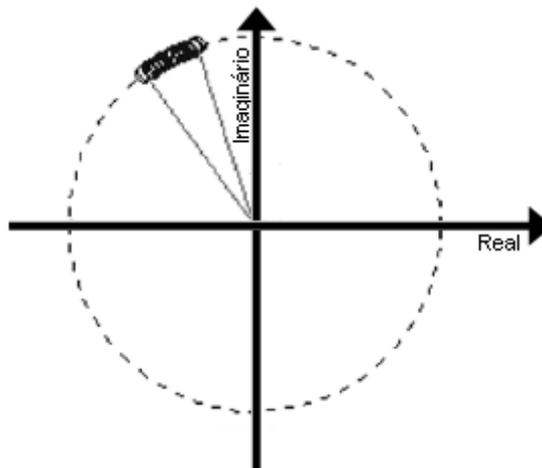


Figura 14 – A janela de frequências da CZT^[37]

$$\Delta f_{CZT} = \frac{f_w}{N} \quad (16)$$

Onde:

- Δf : resolução em frequência da CZT;
- f_w : janela de frequências observada ($f_f - f_0$); e
- N : número de pontos amostrados

Quando comparada à FFT, a CZT apresenta grandes avanços no que tange à resolução espectral obtida, devido à redução da janela de observação em frequência e necessita de um menor número de pontos amostrados^[37]. Portanto, a CZT apresenta grande vantagem para identificação de componentes em uma estreita faixa de frequências.

3.3 ANALISADOR DE ESPECTROS *LOCK-IN*

O analisador de espectros *lock-in* emprega a detecção sensível à fase para estimar a frequência de componentes de sinais^{[48][49][50]}. Essa pode ser implementada por um amplificador cujo ganho assume os valores +1 e -1, de forma sincronizada com a frequência de um sinal de referência, a qual corresponde à frequência da componente que se deseja identificar. O sinal de saída é obtido pela multiplicação do sinal de entrada pelo ganho do amplificador. Por fim, a componente contínua do sinal de saída é determinada por um filtro passa-baixas^{[49][50]}, conforme apresentado na figura 15.

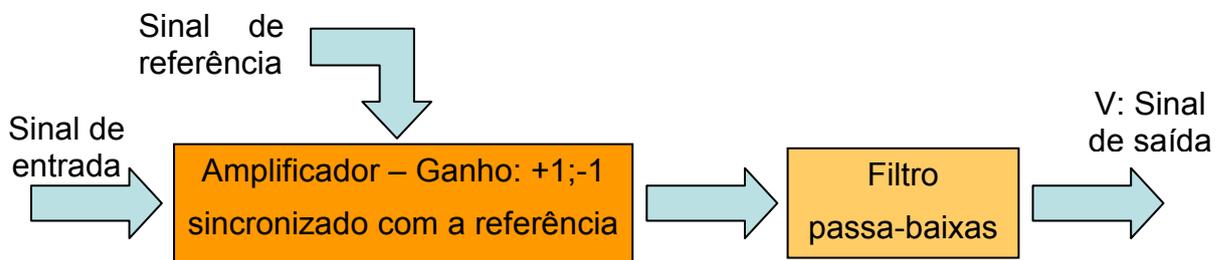


Figura 15 – Amplificador *lock-in*

O valor médio do sinal de saída do filtro (V) apresenta amplitude inversamente proporcional à diferença entre as frequências dos sinais de entrada e de referência, e pode ser definido de acordo com a equação 17.

$$V = \frac{2A \cos(\varphi)}{\pi} \quad (17)$$

Onde:

- V: tensão de saída do amplificador *lock-in*;
- A: amplitude do sinal de entrada;
- φ : diferença de fase entre os sinais de entrada e de referência.

A figura 16 representa o procedimento de detecção sensível à fase de uma componente freqüencial de um sinal. O ganho do amplificador varia de acordo com uma freqüência determinada f_c , igual à freqüência do sinal de referência.

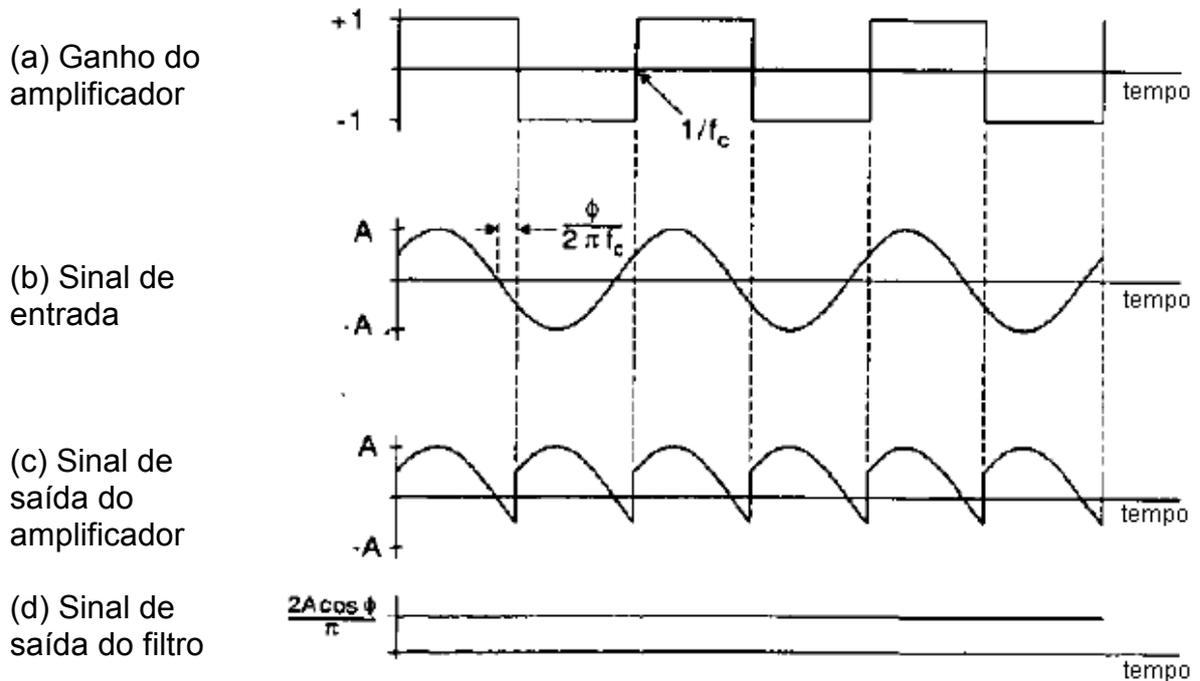


Figura 16 – Detecção sensível à fase^[50]

Diferentemente do amplificador *lock-in*, o analisador de espectros *lock-in* realiza uma varredura iterativa em uma determinada faixa de freqüências, ao invés de monitorar uma única freqüência. Essa técnica dispensa também a inserção de sinal de referência no circuito, através do armazenamento em memória dos valores correspondentes aos diversos sinais de referência desejados^[48].

A implementação do analisador *lock-in* apresenta como vantagens o fato de que a resolução da detecção de uma componente é determinada pelo intervalo adotado no procedimento de varredura, o número de amostras necessário é menor e a imunidade a ruídos é maior do que em métodos convencionais, como FFT^[48].

3.4 TRANSFORMADA DE HILBERT

A transformada de Hilbert é uma técnica muito empregada em processamento digital de sinais por sua importância em tarefas tais como detecção de envelopes de amplitude e demodulação de sinais^[51]. Basicamente, essa ferramenta desloca a fase das componentes de um determinado sinal em noventa graus, sem alterar sua amplitude. A equação 18 apresenta a transformada de Hilbert de um sinal $x(t)$ ^{[34][44]}.

$$\hat{x}(t) = H(x(t)) = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} x(\tau) \frac{1}{t - \tau} d\tau \quad (18)$$

Onde:

- $x(t)$: sinal a ser deslocado em frequência;
- $\hat{x}(t)$: sinal $x(t)$ transformado pela transformada de Hilbert;
- $H(x(t))$: transformada de Hilbert de $x(t)$.

A transformada de Hilbert pode ser empregada para extrair a componente fundamental de um sinal e permitir a análise das demais componentes sem a influência da componente de maior intensidade. Para tanto, um sinal $y(t)$ pode ser definido, de acordo com a equação 19^[34].

$$y(t) = x(t) + i \cdot \hat{x}(t) \quad (19)$$

Onde:

- $y(t)$: sinal de saída;
- $x(t)$: sinal analisado;
- $\hat{x}(t)$: sinal $x(t)$ transformado pela transformada de Hilbert;
- i : representação imaginária.

Para o caso do sinal sob análise ser um cosseno, a equação 19 se transforma na equação 20. Tal sinal assume no plano complexo a forma de um círculo. O número de pontos sobre o círculo e a distância entre os mesmos dependem da frequência de amostragem e do número de pontos adquiridos. A quantidade de rotações depende da frequência f do sinal analisado. A equação 21 apresenta o sinal $y(t)$ na forma exponencial.

$$y(t) = A \cdot \cos(2\pi f t) + A \cdot i \cdot \text{sen}(2\pi f t) \quad (20)$$

$$y(t) = A \cdot e^{i2\pi f t} \quad (21)$$

Onde:

- $y(t)$: sinal de saída;
- A : amplitude do sinal sob análise;
- f : frequência do sinal analisado;
- t : tempo;
- i : representação imaginária.

A forma do sinal $y(t)$ permite determinar seu módulo e fase através das equações 22 e 23^{[34][44]}.

$$B(t) = \sqrt{x(t)^2 + \hat{x}(t)^2} \quad (22)$$

$$\phi(t) = \text{arctg}\left(\frac{\hat{x}(t)}{x(t)}\right) \quad (23)$$

Onde:

- $B(t)$: módulo do sinal $y(t)$;
- $x(t)$: sinal analisado;
- $\hat{x}(t)$: sinal $x(t)$ transformado pela transformada de Hilbert;
- $\phi(t)$: fase do sinal $y(t)$.

Caso o sinal sob análise seja composto por duas componentes, o sinal $y(t)$ adquire o comportamento apresentado na equação 24. É possível, portanto, descrever o sinal $y(t)$ pela equação 25.

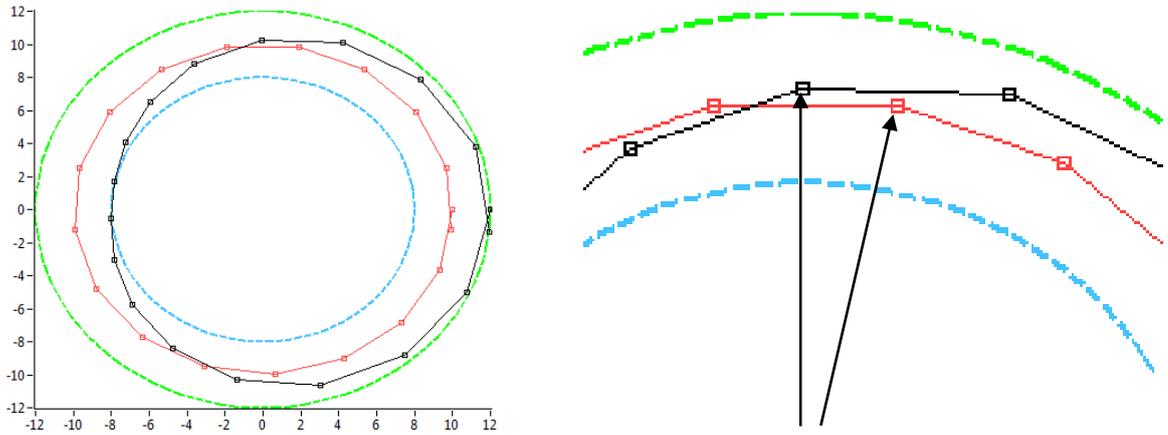
$$y(t) = A \cdot \cos(2\pi f_1 t) + B \cdot \cos(2\pi f_2 t) + i \cdot (A \cdot \text{sen}(2\pi f_1 t) + B \cdot \text{sen}(2\pi f_2 t)) \quad (24)$$

$$y(t) = A \cdot e^{i2\pi f_1 t} + B \cdot e^{i2\pi f_2 t} \quad (25)$$

Onde:

- $y(t)$: sinal de saída;
- A : amplitude da primeira componente do sinal sob análise;
- B : amplitude da segunda componente do sinal sob análise;
- $f_{1,2}$: frequências das componentes do sinal analisado;
- t : tempo.

Como as componentes possuem amplitudes e frequências diferentes, a forma do sinal $y(t)$ no plano complexo adquire o comportamento apresentado na figura 17: seu módulo varia entre a soma e a diferença das amplitudes das componentes e sua fase também sofre variações.



Legenda:

-  Sinal $y(t)$ formado por duas componentes;
-  Sinal $y(t)$ formado por uma componente, de amplitude igual à maior componente de $y(t)$;
-  Círculo de máxima amplitude;
-  Círculo de mínima amplitude.

Figura 17 – Representação no plano complexo do sinal $y(t)$ formado por duas componentes. (a) Análise por um período da componente fundamental. (b) Em visão ampliada, destaque para a variação de módulo e fase.

A presença de outras componentes no sinal gera, portanto, flutuações em amplitude e em fase, as quais alteram a forma do sinal $y(t)$. Tais flutuações alteram também a forma dos sinais de módulo e fase, os quais deixam de ser constantes no tempo, conforme apresentado na figura 17.

A figura 18 apresenta o comportamento do módulo $B(t)$ do sinal $y(t)$ quando $x(t)$ é composto por duas componentes: uma fundamental em 10 Hz e de amplitude 10 e outra em 11 Hz de amplitude 1.

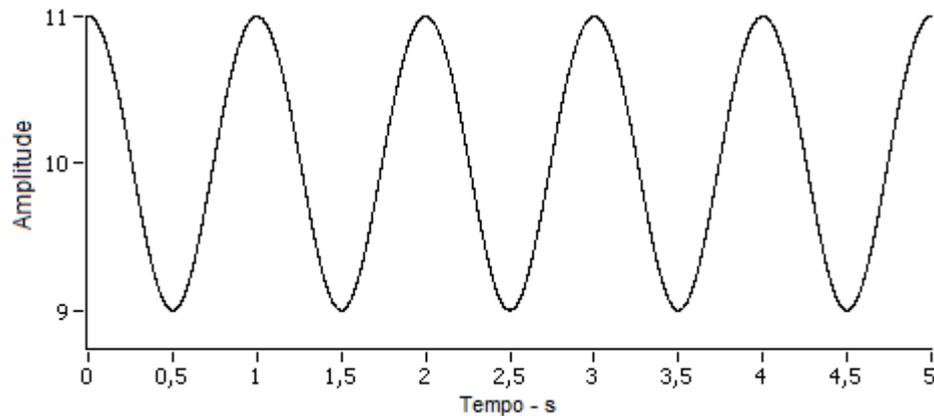


Figura 18 – Ilustração do comportamento do módulo $B(t)$ para $x(t)=10\text{sen}(2\pi 10t)+1\text{sen}(2\pi 11t)$

Na figura 18 é perceptível que o módulo $B(t)$ do sinal $y(t)$ apresenta um valor médio de 10, referente à componente fundamental, e amplitudes máximas de módulo 1, devido à influência da componente de 11 Hz. Tal sinal $B(t)$ pode ter subtraído seu valor médio, com o objetivo de retirar do sinal a componente contínua e analisar a componente alternada, ou seja, eliminar a influência da componente fundamental no sinal $B(t)$.

Dessa forma, o módulo $B(t)$ apresenta todas as componentes freqüenciais do sinal $y(t)$, exceto a sua componente fundamental, o que permite a análise de freqüências de menor amplitude do sinal $x(t)$. A figura 19 apresenta o espectro de freqüências do módulo do sinal $y(t)$, o qual evidencia uma componente em 1 Hz, referente ao módulo da diferença entre a componente fundamental, extraída da análise, e da outra componente.

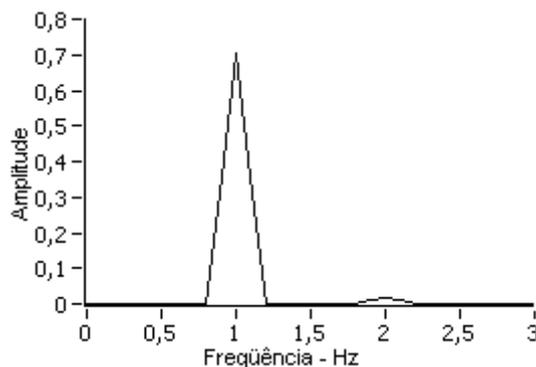


Figura 19 – Espectro de freqüências de $B(t)$ para $x(t)=10\text{sen}(2\pi 10t)+1\text{sen}(2\pi 11t)$

De forma semelhante ao módulo de $y(t)$, o sinal de fase $\phi(t)$ permite a análise em frequência e a extração da componente fundamental do sinal. O comportamento da fase $\phi(t)$ é apresentado na figura 20, após a remoção do salto de fase⁶. A figura 21 mostra o espectro de frequências do sinal $\phi(t)$.

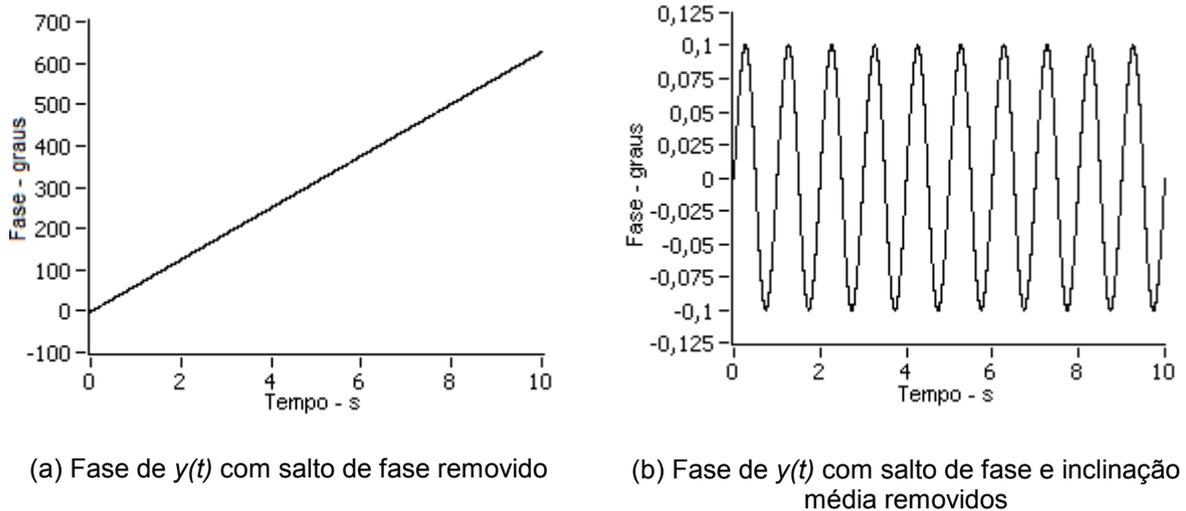


Figura 20 – Ilustração do comportamento da fase $\phi(t)$ para $x(t)=10\text{sen}(2\pi 10t)+1\text{sen}(2\pi 11t)$

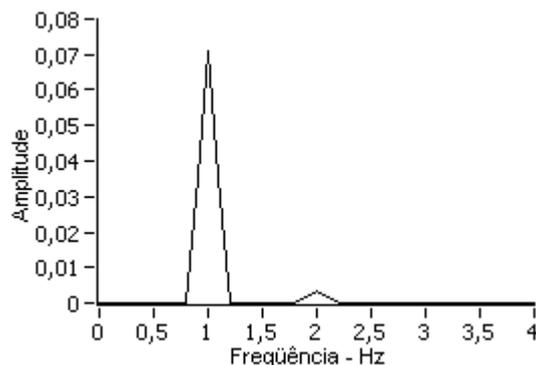


Figura 21 – Espectro de frequências de $\phi(t)$ para $x(t)=10\text{sen}(2\pi 10t)+1\text{sen}(2\pi 11t)$

Dessa forma, a transformada de Hilbert é uma ferramenta bastante poderosa para a extração da componente fundamental de um determinado sinal, seja pela análise via módulo ou via fase do sinal em questão.

Uma vez que os sinais que portam informações sobre a frequência rotacional e as ferramentas matemáticas necessárias à medição são conhecidos, é possível propor alternativas de medição de frequência rotacional de compressores. Esse é o tema do próximo capítulo.

⁶ Saltos de fase são descontinuidades existentes no sinal de fase quando os valores absolutos excedem 2π ^[52].

4 PROPOSTAS DE MÉTODOS PARA MEDIÇÃO DE FREQUÊNCIA ROTACIONAL DE COMPRESSORES HERMÉTICOS

Nos capítulos anteriores foi abordada a teoria necessária à idealização e desenvolvimento de propostas para medição de frequência rotacional de compressores herméticos.

O presente capítulo trata exatamente da apresentação das propostas concebidas. Ao estudo das grandezas que portam informações sobre a frequência rotacional passíveis de serem medidas externamente ao compressor foi combinado o conhecimento das ferramentas matemáticas que possibilitam tal medição.

A fim de restringir o escopo deste trabalho, as alternativas apresentadas no capítulo dois são comparadas entre si e as mais viáveis de serem implementadas são definidas.

4.1 SELEÇÃO DAS FORMAS DE MEDIÇÃO MAIS ADEQUADAS

Com base no exposto no capítulo dois foi construída a tabela 1, de forma a permitir uma melhor visualização das vantagens e desvantagens da implementação da medição a partir de cada uma das grandezas apresentadas.

Tabela 1 – Formas não-invasivas para a medição de freqüências rotacionais de compressores

Forma de Medição		Vantagens	Desvantagens
Modelagem matemática		<ul style="list-style-type: none"> – Simplicidade de processamento 	<ul style="list-style-type: none"> – Complexidade inerente à modelagem de sistemas – Construção de muitos modelos – Necessidade de conhecimento de parâmetros – Variação paramétrica
Análise do sinal de vibração		<ul style="list-style-type: none"> – De fácil acesso 	<ul style="list-style-type: none"> – Imprevisibilidade – Método pouco estudado
	Pressão sonora		<ul style="list-style-type: none"> – Necessidade de ambiente adequado
Análise do sinal de corrente		<ul style="list-style-type: none"> – Método bastante conhecido – De fácil acesso 	<ul style="list-style-type: none"> – Não-aplicável a compressores acionados por inversores de freqüência
	Detecção do escorregamento	<ul style="list-style-type: none"> – Simplicidade de aplicação 	<ul style="list-style-type: none"> – Longo tempo de medição
	Detecção de harmônicas relacionadas a variações no entreferro		<ul style="list-style-type: none"> – Conhecimento de parâmetros do motor
Análise do sinal de pressão		<ul style="list-style-type: none"> – De fácil acesso – Processo de medição usual à empresa 	<ul style="list-style-type: none"> – Método pouco estudado

A tabela 1 embasou a construção de uma matriz de decisão como meio de melhor comparar tais alternativas entre si e dar suporte à decisão da forma de medição a ser empregada. Os critérios de avaliação estão expostos na tabela 2. A retroação, ou não-interferência no funcionamento normal do compressor durante a medição, não foi considerada como critério de avaliação, pois é um requisito deste trabalho.

Tabela 2 – Critérios de avaliação da matriz de decisão

Critérios	Detalhamento
Simplicidade	Facilidade de aplicação do método, utilização por parte do usuário e acesso à grandeza a ser monitorada.
Robustez	Imunidade a variações inerentes à medição ou ao funcionamento do compressor.
Conhecimento do método	Existência de bibliografia e/ou especialistas que ofereçam suporte à aplicação do método.
Expansibilidade	Aplicabilidade do método a outros tipos de compressores, como os acionados por inversores de frequência.
Tempo de medição	Tempo necessário à realização da medição com a incerteza desejada (2 rpm).
Parecer da empresa	Emprego de processos de medição conhecidos, adotados e sugeridos pela empresa Whirlpool.

O grau de importância de cada critério foi definido conforme apresentado na tabela 3.

Tabela 3 – Grau de importância de cada critério de avaliação

Grau de importância	Detalhamento
1	Pouco relevante
2	Relevante
3	Considerável relevância
4	Muito relevante
5	Extremamente relevante

A adaptabilidade de uma alternativa a um determinado critério é ponderada de zero a dez, sendo zero para a não adequação e dez para a total adequação. Por fim, a tabela 4 apresenta a matriz de decisão.

Tabela 4 – Matriz de decisão para as alternativas de medição estudadas

	Simplicidade	Robustez	Conhecimento do método	Expansibilidade	Tempo de medição	Parecer da empresa	TOTAL	Pontuação percentual
Grau de Importância	4	5	4	5	5	5	280	100
Modelagem	0	0	5	8	5	10	135	48
Análise pela vibração	10	3	2	10	7	5	173	62
Análise pela pressão sonora	3	2	4	10	7	5	148	53
Análise do sinal de corrente: escorregamento	10	10	10	5	3	10	220	79
Análise do sinal de corrente: variação do entreferro	10	9	10	5	10	10	250	89
Análise do sinal de pressão	9	10	5	10	10	7	241	86

A análise da tabela 4 permite observar que a modelagem matemática sofre um grande revés nos critérios simplicidade e robustez, enquanto que a imprevisibilidade da medição da frequência rotacional através da vibração limita sua aplicação ao problema em questão; e tal desvantagem é ainda maior no caso de medição pela pressão sonora.

Por outro lado, as alternativas de medição identificadas pela matriz como as mais viáveis de serem implementadas são as baseadas na análise do sinal de pressão e de corrente. Como pontos fracos, é possível elencar:

- quanto às alternativas baseadas no sinal de corrente:
 - a análise do sinal de corrente não é expansível a todos os tipos de compressores, visto que existem tipos acionados por inversores;
 - o tempo de medição é possivelmente elevado para identificação da frequência de escorregamento.
- quanto à alternativa baseada no sinal de pressão:
 - a análise do sinal de pressão não possui um suporte bibliográfico considerável;

4.2 PROCEDIMENTOS DE MEDIÇÃO PROPOSTOS

De acordo com o item 4.1, a medição de frequência rotacional de compressores foi considerada mais viável de ser implementada através de análises dos sinais de corrente de alimentação e de pressão do compressor. Estudos comprovam a existência em literatura de procedimentos para a medição da frequência rotacional através da corrente de alimentação, enquanto que a medição através do sinal de pressão exige o desenvolvimento de procedimentos próprios, devido ao caráter inovativo do método.

Este capítulo apresenta procedimentos para realização da medição de frequência rotacional através da corrente de alimentação e da pressão do compressor. Conforme explicitado, existem duas formas de medir a frequência rotacional através da corrente de alimentação do compressor: a medição da

freqüência de escorregamento e a medição de componentes relativos a variações no entreferro, pela estimação de componentes relativas às excentricidades e às ranhuras do motor. A detecção pelas freqüências de excentricidade exige todavia um conhecimento menor dos parâmetros do motor e por isso são aqui estudadas.

Diversas ferramentas podem ser empregadas para a resolução do problema em questão. Foram concebidas vinte e sete propostas de medição de freqüência rotacional de compressores pela corrente de alimentação: doze pelos componentes relativos à variação do entreferro e quinze através da freqüência de escorregamento, além de cinco métodos de medição de freqüência rotacional pelo sinal de pressão.

Todas as propostas concebidas apresentaram-se válidas em ensaios preliminares. Na seqüência são explicitadas as 14 propostas que se apresentaram mais viáveis de serem implementadas. As demais são apresentadas no apêndice I.

4.2.1 Propostas de medição da freqüência rotacional pelo sinal de corrente através da identificação de componentes relativas às variações de entreferro

Anteriormente à definição de propostas, o espectro dos sinais de corrente e pressão foi examinado, a fim de identificar a viabilidade de várias propostas existentes em literatura. Foi verificado que as harmônicas pares da freqüência fundamental do sinal de corrente possuem amplitude nula, o que evidencia a existência de simetria de meia onda no sinal de corrente^[53]. Dessa forma, as harmônicas de excentricidade próximas às harmônicas pares se apresentam mais salientes no espectro de freqüências.

4.2.1.1 Proposta 1: Transformada Chirp-Z

A transformada Chirp-Z pode ser empregada para determinar freqüências de excentricidade. Para tanto, é suficiente a definição da janela de freqüências entre valor da freqüência fundamental e este valor subtraído do máximo escorregamento do motor. Dessa forma, apenas uma freqüência de excentricidade é determinada, pois é a componente de maior intensidade do espectro de freqüências no intervalo

definido. O valor máximo de escorregamento é obtido experimentalmente e pode variar de acordo com o modelo do compressor.

A região próxima à primeira harmônica par da componente fundamental foi empregada para a análise. Assim, a incerteza da medição referente à variação da frequência fundamental, inerente ao sistema de fornecimento de energia nacional, pode ser eliminada^{[54][55]}.

Assim, a proposta 1 sugere o seguinte algoritmo:

1. Amostragem do sinal de corrente;
2. Execução de uma CZT em torno da primeira harmônica par, com limite inferior definido pelo valor do máximo escorregamento e superior de 1 Hz, a fim de abranger as possíveis variações da frequência de alimentação.

4.2.1.2 Proposta 2: Transformada de Fourier e *zero padding* do módulo de $y(t)$ proveniente da transformada de Hilbert

A transformada de Hilbert é adequada para extrair a componente fundamental do sinal de corrente de alimentação. Conforme descrito em 3.4, é possível analisar o módulo ou a fase do sinal $y(t)$.

A transformada de Fourier do módulo de $y(t)$ é capaz de evidenciar as frequências de excentricidade, as quais são de difícil detecção por se localizarem próximas à componente fundamental. Uma vez extraída a fundamental, as componentes relativas à excentricidade são as mais notáveis, de intensidade comparada somente às harmônicas da componente fundamental.

Em torno da primeira harmônica par, as componentes de excentricidade se tornam ainda mais salientes após a remoção da componente fundamental. É possível melhorar a detecção espectral através do emprego de *zero padding* como uma alternativa para melhor evidenciar as frequências de excentricidade.

A proposta 2 propõe o seguinte algoritmo:

1. Amostragem do sinal de corrente;
2. Remoção da componente de frequência igual a 0;
3. Execução de uma transformada de Hilbert, com o intuito de retirar a componente fundamental da análise;
4. Determinação do módulo do sinal $y(t)$ – vide item 3.4;
5. Remoção da componente de frequência igual a 0;
6. Aplicação de um filtro passa-baixas, de frequência de corte em 70 Hz, a fim de limitar a análise à primeira harmônica par;
7. Execução de *zero padding* no sinal de módulo de $y(t)$. O número de pontos adicionados é suficiente para elevar a quantidade de pontos analisada até a segunda potência de 2 acima do mesmo;
8. Execução de uma FFT para a determinação da componente de excentricidade de maior amplitude.

4.2.1.3 Proposta 3: Transformada de Fourier interpolada em dois pontos do módulo de $y(t)$ proveniente da transformada de Hilbert

A transformada interpolada de Fourier é uma outra possibilidade de melhorar a detecção das componentes de excentricidade. Nesta proposta avalia-se a utilização de dois pontos para interpolação. O seguinte algoritmo é proposto:

1. Amostragem do sinal de corrente;
2. Remoção da componente de frequência igual a 0;
3. Execução de uma transformada de Hilbert, com o intuito de retirar a componente fundamental da análise;
4. Determinação do módulo do sinal $y(t)$ – vide item 3.4;
5. Remoção da componente de frequência igual a 0;
6. Aplicação de um filtro passa-baixas, de frequência de corte em 70 Hz, a fim de limitar a análise à primeira harmônica par;

7. Execução de uma FFTInt para a determinação da componente de excentricidade de maior amplitude.

4.2.1.4 Proposta 4: Transformada Chirp-Z do módulo de $y(t)$ proveniente da transformada de Hilbert

A componente de excentricidade pode ainda ser determinada através de uma transformada Chirp-Z. Para tanto, propõe-se o seguinte algoritmo:

1. Amostragem do sinal de corrente;
2. Remoção da componente de frequência igual a 0;
3. Execução de uma transformada de Hilbert, com o intuito de retirar a componente fundamental da análise;
4. Determinação do módulo do sinal $y(t)$ – vide item 3.4;
5. Remoção da componente de frequência igual a 0;
6. Aplicação de um filtro passa-baixas, de frequência de corte em 70 Hz, a fim de limitar a análise à primeira harmônica par;
7. Execução de uma CZT para a determinação da componente de excentricidade de maior amplitude, de janela definida em torno da primeira harmônica par, de intervalo definido entre: (o valor do máximo escorregamento e 1) Hz.

4.2.1.5 Proposta 5: Transformada de Fourier interpolada em dois pontos da fase de $y(t)$ proveniente da transformada de Hilbert

O seguinte algoritmo é sugerido na proposta 5:

1. Amostragem do sinal de corrente;
2. Remoção da componente de frequência igual a 0;
3. Execução de uma transformada de Hilbert, com o intuito de retirar a componente fundamental da análise;
4. Determinação da fase do sinal $y(t)$ e retirada do salto de fase – vide item 3.4;

5. Subtração entre os valores obtidos e sua melhor reta, determinada por mínimos quadrados;
6. Aplicação de um filtro passa-banda, de banda passante entre (10 e 70) Hz;
7. Execução de uma FFTInt para a determinação da componente de excentricidade de maior amplitude.

4.2.1.6 Proposta 6: Transformada Chirp-Z da fase de $y(t)$ proveniente da transformada de Hilbert

A proposta 6 sugere a adoção do seguinte algoritmo:

1. Amostragem do sinal de corrente;
2. Remoção da componente de frequência igual a 0;
3. Execução de uma transformada de Hilbert, com o intuito de retirar a componente fundamental da análise;
4. Determinação da fase do sinal $y(t)$ e retirada do salto de fase;
5. Subtração entre os valores obtidos e sua melhor reta, determinada por mínimos quadrados;
6. Aplicação de um filtro passa-banda, de banda passante entre (10 e 70) Hz;
7. Execução de uma CZT para a determinação da componente de excentricidade de maior amplitude.

4.2.2 Propostas de medição da frequência rotacional pelo sinal de corrente através da identificação da frequência de escorregamento

Conforme apresentado no item 2.2.3.1, existe no sinal de corrente uma oscilação, cuja frequência é a frequência de escorregamento do motor. Dessa forma, é possível construir diversas propostas à medição de frequência rotacional de compressores a partir da identificação da frequência de escorregamento.

4.2.2.1 Proposta 7: Transformada interpolada de Fourier do sinal de picos da corrente

Esta proposta avalia o emprego da FFTInt sobre a envoltória de picos do sinal de corrente de alimentação. Para tanto, sugere-se o seguinte algoritmo:

1. Amostragem do sinal de corrente;
2. Identificação dos instantes de picos do sinal de corrente. Devido a ruídos, a média dos 5 maiores pontos de cada período é definido como o valor de pico e a média de seus instantes é considerada o instante de pico do período analisado;
3. Determinação da média dos valores de intervalos entre picos consecutivos: tal valor é considerado o período da envoltória em questão;
4. Execução de uma FFTInt da envoltória dos picos do sinal de corrente para a determinação da componente de escorregamento;
5. Execução de uma FFTInt do sinal de corrente para a determinação da frequência de alimentação;
6. Subtração, do valor da frequência de alimentação, do valor da frequência de escorregamento.

4.2.2.2 Proposta 8: Transformada interpolada de Fourier do sinal de vales da corrente

De forma semelhante à proposta anterior, o emprego da transformada interpolada de Fourier é analisado sobre o sinal de vales do sinal de corrente de alimentação. Propõe-se assim o seguinte algoritmo:

1. Amostragem do sinal de corrente;
2. Identificação dos instantes de vales do sinal de corrente. Devido a ruídos, a média dos 5 menores pontos de cada período é definido como o valor de vale e a média de seus instantes é considerada o instante de vale do período analisado;

3. Determinação da média dos valores de intervalos entre vales consecutivos: tal valor é considerado o período da envoltória em questão;
4. Execução de uma FFTInt da envoltória dos vales do sinal de corrente para a determinação da componente de escorregamento;
5. Execução de uma FFTInt do sinal de corrente para a determinação da frequência de alimentação;
6. Subtração, do valor da frequência de alimentação, do valor da frequência de escorregamento.

4.2.2.3 Proposta 9: Transformada interpolada de Fourier dos sinais de picos e vales da corrente

A presente proposta visa compor as duas propostas anteriormente citadas, ou seja, determinar a frequência através do escorregamento pelos picos e pelos vales do sinal de corrente de alimentação, pois o sinal amostrado possui informações para realizar a medição tanto pelos vales quanto pelos picos.

A composição de tais resultados é realizada através de uma média entre os dois valores obtidos.

4.2.2.4 Proposta 10: Transformada Chirp-Z do sinal de picos da corrente

Esta proposta visa a utilização da transformada Chirp-Z para a identificação da frequência de escorregamento e também da frequência de alimentação a partir do sinal de picos do sinal de corrente, de maneira semelhante às propostas anteriores, de forma que sugere o seguinte algoritmo:

1. Amostragem do sinal de corrente;
2. Identificação dos instantes de picos do sinal de corrente. Devido a ruídos, a média dos 5 maiores pontos de cada período é definido como o valor de pico e a média de seus instantes é considerada o instante de pico do período analisado;

3. Determinação da média dos valores de intervalos entre picos consecutivos: tal valor é considerado o período da envoltória em questão;
4. Execução de uma CZT da envoltória dos picos do sinal de corrente para a determinação da componente de escorregamento, de janela entre 0 Hz e o valor do máximo escorregamento;
5. Execução de uma CZT do sinal de corrente para a determinação da frequência de alimentação, de janela em torno da frequência fundamental, com limites de 2 Hz;
6. Subtração, do valor da frequência de alimentação, do valor da frequência de escorregamento.

4.2.2.5 Proposta 11: Transformada Chirp-Z do sinal de vales da corrente

Esta proposta objetiva o emprego da transformada Chirp-Z para a identificação da frequência de escorregamento, bem como da frequência de alimentação, a partir do sinal de vales do sinal de corrente.

1. Amostragem do sinal de corrente;
2. Identificação dos instantes de vales do sinal de corrente. Devido a ruídos, a média dos 5 menores pontos de cada período é definido como o valor de vale e a média de seus instantes é considerada o instante de vale do período analisado;
3. Determinação da média dos valores de intervalos entre vales consecutivos: tal valor é considerado o período da envoltória em questão;
4. Execução de uma CZT da envoltória dos picos do sinal de corrente para a determinação da componente de escorregamento, de janela entre 0 Hz e o valor do máximo escorregamento;
5. Execução de uma CZT do sinal de corrente para a determinação da frequência de alimentação, de janela em torno da frequência fundamental, com limites de 2 Hz;

6. Subtração, do valor da frequência de alimentação, do valor da frequência de escorregamento.

4.2.2.6 Proposta 12: Transformada Chirp-Z dos sinais de picos e vales da corrente

De maneira semelhante à proposta 9, esta objetiva a composição das duas últimas propostas apresentadas.

4.2.3 Propostas de medição da frequência rotacional pelo sinal de pressão

A pulsação existente no sinal de pressão é diretamente proporcional à frequência rotacional do compressor, conforme apresentado no item 2.2.4. Dessa forma, a identificação no sinal de pressão da componente representativa da pulsação corresponde à medição da frequência rotacional do compressor.

Foram concebidas cinco propostas de medição da frequência rotacional através do sinal de pressão, as quais são explanadas na seqüência.

4.2.3.1 Proposta 13: Transformada Chirp-Z

A fim de determinar a frequência rotacional a transformada Chirp-Z pode ser empregada. É necessário, entretanto, estimar os valores máximo e mínimo da janela de frequência, os quais dependem da frequência de alimentação do compressor e do máximo escorregamento, respectivamente. Assim, o seguinte algoritmo é proposto:

1. Amostragem do sinal de pressão;
2. Remoção da componente de frequência igual a 0;
3. Execução de uma CZT em torno da frequência de alimentação, com limites entre esta menos o máximo escorregamento e a mesma adicionada de uma unidade, a fim de abranger as possíveis variações da frequência de alimentação.

4.2.3.2 Proposta 14: Transformada de Fourier interpolada em dois pontos

A proposta 27 emprega a transformada interpolada de Fourier do sinal de pressão. Para tanto sugere-se o seguinte algoritmo:

1. Amostragem do sinal de pressão;
2. Remoção da componente de frequência igual a 0;
3. Execução de uma FFTInt do sinal.

Após a concepção de várias propostas, é necessário verificar a viabilidade de utilização das mesmas frente aos requisitos de projeto. Para tanto, ensaios devem ser realizados, com o intuito de comparar tais propostas entre si e determinar as mais viáveis de serem implementadas. Esse é o objeto do próximo capítulo.

5 AVALIAÇÃO DOS MÉTODOS PROPOSTOS

As propostas concebidas, apresentadas no capítulo anterior e no apêndice I, foram testadas, a fim de comprovar sua eficácia frente aos requisitos de projeto. Ensaios foram realizados, de forma a ser possível avaliar quantitativamente cada proposta. A apresentação dos ensaios e dos resultados obtidos é o objetivo deste capítulo.

5.1 ENSAIOS REALIZADOS

Foi realizada uma análise experimental do desempenho das propostas de medição de frequência rotacional apresentadas, através da corrente de alimentação e da pressão, para diferentes números de amostras e diferentes condições. Ensaios preliminares sobre os sinais de pressão de descarga e de sucção atestam que este último não se apresenta tão estável no tempo quanto o de descarga, de forma que a medição de pressão de sucção é preterida frente à de descarga para medição de frequência rotacional.

5.1.1 Estrutura do experimento

Para realização do experimento foi projetado e construído em bancada um circuito experimental completo de refrigeração, com o intuito de realizar ensaios em condições reais de operação. Nesta bancada foi instalado um compressor previamente instrumentado, de tensão de alimentação de (110 a 127) V e frequência de alimentação de (50 a 60) Hz.

A instrumentação utilizada nessa pode ainda ser expandida, o que torna a bancada capaz de servir a outros trabalhos e promove o estudo em instrumentação aplicada à área de refrigeração.

A instrumentação empregada foi composta por:

- uma fonte de alimentação alternada 6812B, fabricante *Agilent*^[56], a fim de reduzir as incertezas associadas à variação da frequência da rede;
- uma placa de aquisição 9215, fabricante *National Instruments*, de 100 kHz de frequência de amostragem e 16 bits^[57], para a aquisição dos sinais de sincronismo, de pressão e de corrente de alimentação;
- um computador com o programa Labview;
- um transdutor de corrente 1146A, fabricante *Agilent*, com 100 kHz de frequência de amostragem^[58];
- um transdutor de pressão PDCR4070, da *GE*^[59], de saída analógica. A saída do sinal de pressão é ainda amplificada e filtrada analogicamente através de um filtro passa-baixas de terceira ordem com frequência de corte de aproximadamente 150 Hz;
- um dispositivo de tratamento do sinal de sincronismo^[16].

5.1.2 Padrão de frequência rotacional

O padrão de medição de frequência rotacional adotado foi o sinal de sincronismo. Tal sinal é proveniente de um sensor indutivo instalado no corpo do bloco do compressor. Esse sensor é excitado por um ímã disposto sobre o excêntrico. O sinal de sincronismo é condicionado por uma unidade de tratamento de sinais^[16] e é apresentado na figura 22.

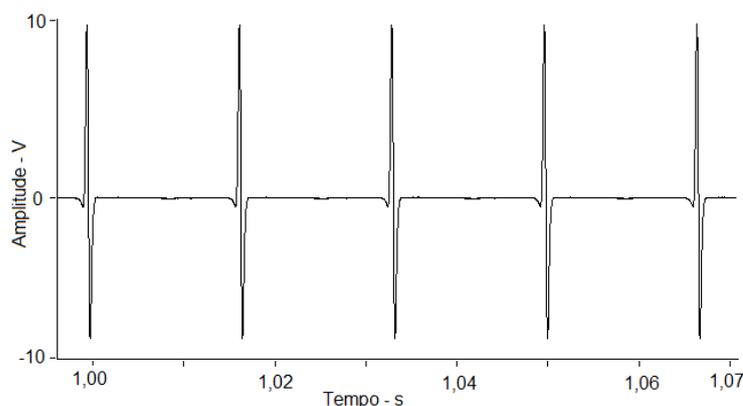


Figura 22 – Sinal de sincronismo

5.1.2.1 Avaliação de incertezas associadas ao padrão adotado

A frequência rotacional medida através do sistema de medição padrão em um determinado período é determinada pelo inverso do valor médio do intervalo de tempo existente entre pulsos consecutivos do sinal de sincronismo, adquiridos durante um determinado intervalo de tempo, de acordo com a equação 26.

$$f_r = \frac{np}{\sum_{i=1}^{np} T_{i+1} - T_i} = \frac{np}{t} \quad (26)$$

Onde:

- f_r : frequência rotacional;
- np : número de pulsos presentes no intervalo analisado;
- T : instante dos pulsos do sinal de sincronismo;
- t : intervalo analisado.

Dessa forma, a incerteza de medição de frequência rotacional através do sinal de sincronismo pode ser determinada de acordo com a equação 27^[60].

$$\left[\frac{u(f_r)}{f_r} \right]^2 = \left[\frac{u(np)}{np} \right]^2 + \left[\frac{u(t)}{t} \right]^2 \quad (27)$$

Onde:

- $u(f_r)$: incerteza associada à frequência rotacional;
- f_r : frequência rotacional;
- $u(np)$: incerteza associada ao número de pulsos;
- np : número de pulsos presentes no intervalo analisado;
- $u(t)$: incerteza associada ao intervalo analisado;
- t : intervalo analisado.

Uma vez que a incerteza associada ao número de pulsos é desprezível, a equação 27 adquire a forma apresentada na equação 28.

$$\left[\frac{u(f_r)}{f_r} \right]^2 = \left[\frac{u(t)}{t} \right]^2 \quad (28)$$

Onde:

- $u(f_r)$: incerteza associada à frequência rotacional;
- f_r : frequência rotacional;
- $u(t)$: incerteza associada ao intervalo analisado;
- t : intervalo analisado.

Por fim, a incerteza $u(t)$ pode ser definida como o inverso da frequência de aquisição. Assim, a incerteza de medição de frequência rotacional pelo sistema de medição padrão pode ser definida de acordo com a equação 29.

$$u(f_r) = \frac{f_r}{f_a \cdot t} \quad (29)$$

Onde:

- $u(f_r)$: incerteza associada à frequência rotacional;
- f_r : frequência rotacional;
- f_a : frequência de aquisição;
- t : período analisado.

A tabela 5 apresenta os valores de incerteza de medição obtidos para cinco intervalos de medição diferentes e as respectivas incertezas associadas, considerando-se os valores de 12 kHz de frequência de amostragem e frequência de alimentação de 60 Hz.

Tabela 5 – Valores de incertezas de medição do padrão para diferentes intervalos de medição

Intervalo de medição – s	Incerteza de medição – rpm
1	0,30
2	0,15
3	0,10
5	0,06
10	0,03

O padrão de medição apresenta incerteza aproximadamente 6,67 vezes inferior ao erro máximo desejado para 1 segundo de medição. Para intervalos iguais ou superiores a 2 segundos, a incerteza é mais de 10 vezes menor do que o erro almejado.

Dessa forma, o valor de 12 kHz foi adotado como frequência de aquisição.

5.1.3 Procedimento de ensaio

Os ensaios devem ser realizados em duas condições de carga diferentes, com o compressor operando a aproximadamente 59 Hz e 58 Hz, de modo a reproduzir o comportamento do compressor em situações normais de trabalho.

Para a realização dos ensaios, o seguinte procedimento deve ser seguido:

1. o sistema em teste deve ser inicializado a partir da rede elétrica, uma vez que a fonte de alimentação empregada não é capaz de dar suporte à partida do compressor, pois níveis de correntes consideravelmente altos são exigidos;
2. após a partida do sistema, a alimentação deve ser chaveada da rede para a fonte;
3. antes de iniciar a medição deve-se esperar a frequência rotacional estabilizar;
4. o sinal de corrente, pressão e sincronismo devem ser amostrados simultaneamente durante cinco intervalos de aquisição diferentes: (1, 2, 3, 5 e 10) s;
5. para cada intervalo de aquisição devem ser realizadas 10 medições.

5.1.4 Procedimento de avaliação do erro máximo obtido por cada método

Como a frequência rotacional varia entre medições simultâneas, a comparação entre os resultados de cada método e o valor determinado pelo padrão deve ser realizada a cada medição. Assim, é possível obter os erros associados a cada medição, subtraindo os valores obtidos pelos métodos, dos fornecidos pelo padrão.

Para cada método são realizadas 10 medições para o mesmo intervalo de aquisição. É possível, portanto, calcular a tendência – T_d – e o desvio-padrão dos erros de cada medição – s , o qual permite determinar a repetitividade da distribuição dos erros. O erro máximo de cada método pode então ser determinado, pois o erro sistemático e a repetitividade da distribuição são conhecidos. Foi adotado o intervalo de confiança de 95%^{[60][61]}. Tal procedimento é representado na figura 23.

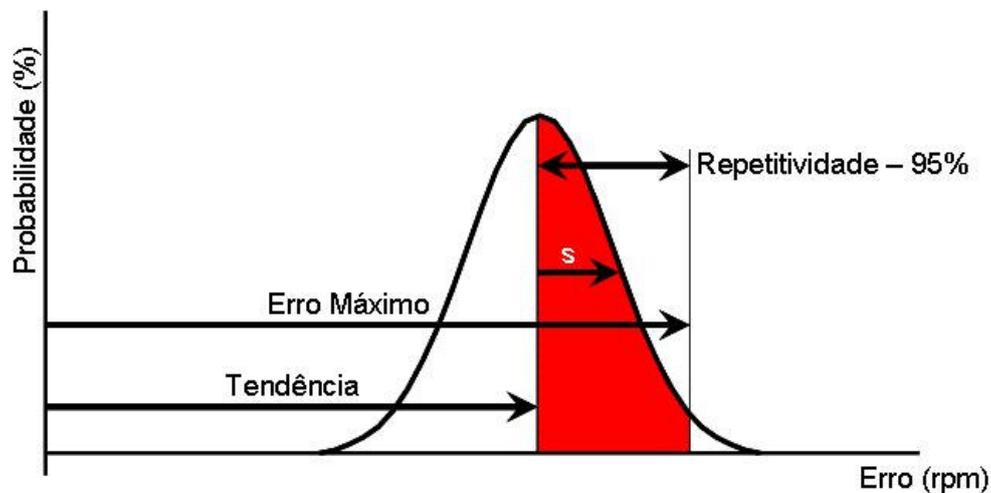


Figura 23 – Determinação do erro máximo de cada amostra

5.2 RESULTADOS OBTIDOS

5.2.1 Estabilidade da freqüência rotacional

A primeira análise realizada objetivou comprovar a estabilidade do sistema. Os resultados são apresentados na tabela 6. Nela é possível perceber que a freqüência de rotação não pode ser considerada constante durante o intervalo de aquisição. Para alterar a condição de freqüência rotacional, a pressão de descarga foi elevada de 6,5 bar para 12 bar e a tensão de alimentação reduzida de 110 V para 90 V.

Os valores obtidos mostram que foi possível atingir uma boa estabilidade da freqüência rotacional para freqüências de rotação de aproximadamente 59 Hz. Para freqüências de rotação próximas a 58 Hz também foi possível atingir a estabilidade,

embora os desvios-padrão apresentam diferenças da ordem de 10 vezes quando comparados às medições a 59 Hz. A origem de tal diferença reside na incapacidade do sistema de atingir um melhor nível de estabilidade em condições de maior exigência.

Tabela 6 – Medição de frequência rotacional pelo sistema de medição padrão

Condição de Frequência - Hz	Tempo de Aquisição - s	Valor Médio rpm	Desvio-padrão - rpm	Repetitividade - rpm (95%)
59 Hz	1	3548,25	0,36	0,82
	2	3548,27	0,10	0,23
	3	3548,68	0,13	0,29
	5	3549,04	0,09	0,20
	10	3548,84	0,40	0,89
58 Hz	1	3479,32	2,87	6,49
	2	3470,87	2,77	6,26
	3	3461,24	3,54	8,01
	5	3449,96	3,38	7,65
	10	3443,42	2,46	5,57

5.2.2 Medição de frequência rotacional

A cada proposta apresentada os procedimentos de ensaio e de avaliação do erro máximo descritos anteriormente foram aplicados. Os métodos de maior sucesso são aqui apresentados. Os valores medidos por cada método, bem como os respectivos valores de tendência, repetitividade e erro máximo se encontram no apêndice II.

Os valores obtidos são apresentados em tabelas, que apresentam a seguinte legenda:

- Td: tendência calculada com base em 10 medições;
- Re: repetitividade para 95% de intervalo de confiança;
- Emáx: erro máximo.

Em destaque (amarelo) são apresentados os valores de erros máximos dentro dos requisitos de projeto (abaixo de 2 rpm).

5.2.2.1 Medição de frequência rotacional pelas harmônicas de excentricidade do sinal de corrente

A tabela 7 apresenta os erros de medição dos métodos mais proeminentes baseados em identificação de componentes de excentricidade no espectro do sinal de corrente.

Os resultados obtidos comprovam a eficácia de seis métodos de medição de frequência rotacional. Para frequência rotacional de aproximadamente 59 Hz, 5 destes métodos apresentam excelentes resultados a partir de 2 s de aquisição e todos a partir de 3 s. Um método apresentou-se eficaz para intervalos de aquisição de 1 s nessa condição.

Para 58 Hz, 4 desses métodos apresentam excelentes resultados a partir de 2 s de aquisição e todos a partir de 5 s. Três métodos apresentaram-se eficazes para intervalos de aquisição de 1 s.

Tabela 7 – Erros máximos apresentados por métodos de medição baseados na identificação de harmônicas de excentricidade do sinal de corrente – em rpm

Proposta:		frequência									
		59 Hz					58 Hz				
		tempo - s									
		1	2	3	5	10	1	2	3	5	
1: Chirp-Z	Td	-0,36	-0,35	-0,22	-0,43	-0,38	0,35	0,04	0,13	-0,20	
	Re	10,20	1,99	0,22	0,45	0,13	16,94	3,85	2,11	0,68	
	Emáx	10,56	2,34	0,44	0,88	0,51	17,29	3,89	2,24	0,88	
2: Módulo da Transf. de Hilbert + zero padding	Td	-1,87	0,31	-0,10	-0,46	-0,26	-3,25	0,81	-0,55	-0,25	
	Re	12,78	0,11	0,14	0,10	0,45	9,05	3,13	1,95	1,16	
	Emáx	14,65	0,43	0,24	0,55	0,70	12,30	3,94	2,50	1,42	
3: Módulo da Transf. de Hilbert + FFTInt	Td	1,14	-0,01	0,04	0,00	-0,01	-0,01	-0,05	-0,11	0,02	
	Re	2,73	0,24	0,15	0,05	0,03	0,73	0,25	0,17	0,17	
	Emáx	3,88	0,25	0,18	0,05	0,03	0,74	0,30	0,28	0,19	
4: Módulo da Transf. de Hilbert + CZT	Td	-0,24	0,10	0,08	-0,10	-0,08	-0,55	0,13	-0,14	-0,05	
	Re	1,08	0,27	0,25	0,13	0,11	1,21	0,47	0,23	0,14	
	Emáx	1,32	0,37	0,33	0,23	0,19	1,76	0,60	0,37	0,19	
5: Fase da Transf. de Hilbert + FFTInt	Td	5,95	0,39	0,64	0,70	0,70	1,14	0,71	0,60	0,70	
	Re	7,96	0,36	0,18	0,06	0,03	1,05	0,23	0,22	0,16	
	Emáx	13,91	0,75	0,82	0,75	0,73	2,19	0,94	0,82	0,86	
6: Fase da Transf. de Hilbert + CZT	Td	-0,84	0,88	0,71	0,89	0,73	0,86	0,64	0,73	0,91	
	Re	2,17	0,25	0,42	0,16	0,11	0,80	0,19	0,21	0,17	
	Emáx	3,02	1,13	1,13	1,04	0,84	1,66	0,83	0,94	1,08	

A tabela 7 permite observar que a repetitividade de todos os métodos melhora com o aumento do intervalo de aquisição, enquanto a tendência apresenta um comportamento oscilatório em torno de um valor fixo.

As figuras 24 e 25 ilustram o comportamento dos erros máximos de cada método em relação ao intervalo de aquisição.

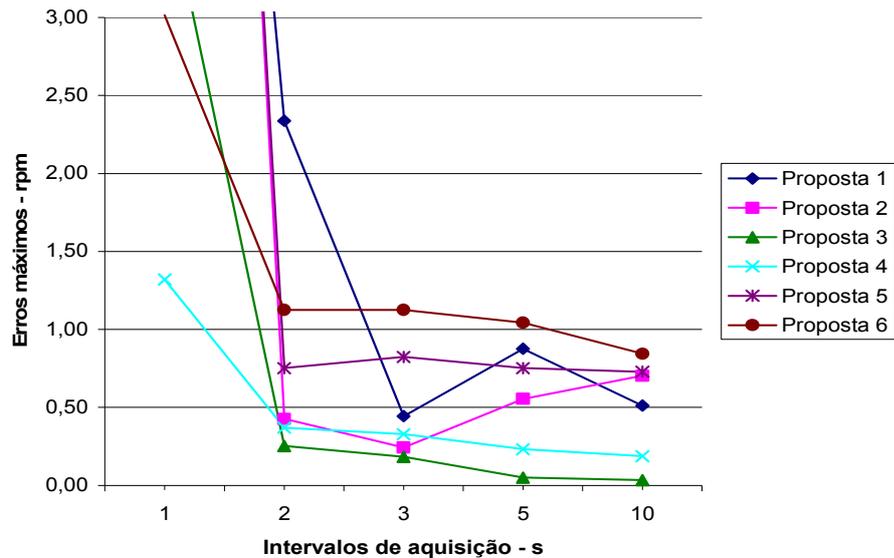


Figura 24 – Valores de erro máximo apresentados por métodos de medição baseados em detecção de componentes de excentricidade para diferentes intervalos de aquisição, em 59 Hz.

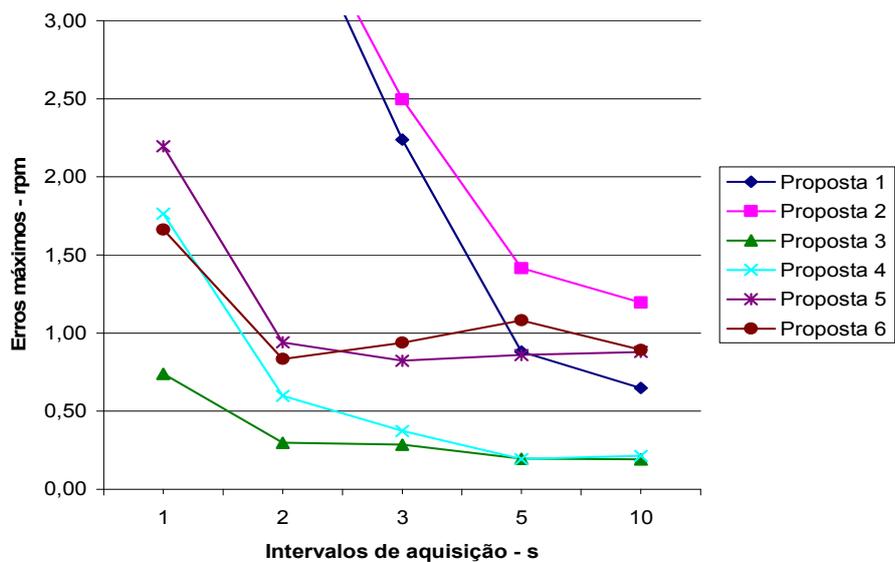


Figura 25 – Valores de erro máximo apresentados por métodos de medição baseados em detecção de componentes de excentricidade para diferentes intervalos de aquisição, em 58 Hz.

5.2.2.2 Medição pela identificação da frequência de escorregamento pelo sinal de corrente

A frequência rotacional do compressor foi medida através de métodos de identificação da frequência de escorregamento. Os erros de cada método comparado ao padrão são apresentados na tabela 8.

Tabela 8 – Erros máximos apresentados por métodos de medição baseados na identificação de frequência de escorregamento pelo sinal de corrente – em rpm

Proposta:		frequência									
		59 Hz					58 Hz				
		tempo - s									
		1	2	3	5	10	1	2	3	5	10
7: FFTInt dos picos	Td	-46,67	-0,76	0,17	0,01	0,03	3,89	-0,66	0,30	-0,10	-0,03
	Re	14,17	3,33	0,33	0,13	0,09	6,78	2,25	1,35	0,50	0,23
	Emáx	60,84	4,09	0,50	0,14	0,11	10,67	2,91	1,65	0,59	0,27
8: FFTInt dos vales	Td	-45,66	0,84	-0,08	-0,03	-0,03	-3,27	0,48	-0,52	0,23	0,03
	Re	12,39	3,25	0,57	0,15	0,06	5,48	2,45	1,14	0,68	0,21
	Emáx	58,05	4,09	0,64	0,18	0,09	8,75	2,93	1,66	0,91	0,23
9: Média de picos e vales - FFTInt	Td	-46,16	0,04	0,05	-0,01	0,00	0,31	-0,09	-0,11	0,07	0,00
	Re	7,74	0,89	0,18	0,07	0,03	1,45	0,48	0,21	0,24	0,20
	Emáx	53,90	0,93	0,22	0,07	0,03	1,76	0,57	0,32	0,31	0,20
10: CZT dos picos	Td	-5,38	-0,40	-0,36	0,05	0,13	-0,86	-0,51	0,28	-0,03	0,11
	Re	10,68	0,41	0,75	0,14	0,14	3,39	2,13	0,77	0,39	0,16
	Emáx	16,06	0,82	1,11	0,19	0,27	4,24	2,63	1,06	0,42	0,27
11: CZT dos vales	Td	-5,22	-0,35	-0,38	0,16	0,06	0,60	0,36	-0,13	0,14	0,03
	Re	10,98	0,34	0,96	0,19	0,11	5,35	2,54	1,01	0,43	0,21
	Emáx	16,19	0,69	1,34	0,36	0,17	5,95	2,89	1,14	0,56	0,25
12: Média dos picos e vales - CZT	Td	-5,30	-0,38	-0,37	0,11	0,09	-0,13	-0,08	0,08	0,06	0,07
	Re	10,80	0,19	0,84	0,07	0,09	3,92	0,46	0,25	0,10	0,11
	Emáx	16,10	0,57	1,21	0,18	0,19	4,05	0,54	0,33	0,15	0,18

A tabela 8 comprova a eficácia de seis métodos de medição de frequência rotacional baseados na medição da frequência de escorregamento. Para frequência rotacional de aproximadamente 59 Hz, 4 desses métodos apresentam excelentes resultados a partir de 2 segundos de aquisição e todos a partir de 3 segundos.

Para 58 Hz, 2 desses métodos apresentam excelentes resultados a partir de 2 segundos de aquisição e todos a partir de 3 segundos. Um método apresentou-se eficaz para intervalos de aquisição de 1 s.

A tabela 8 permite observar que a repetitividade de todos os métodos melhora com o aumento do intervalo de aquisição, e que, neste caso, a tendência apresenta comportamento semelhante.

As figuras 26 e 27 ilustram o comportamento dos erros máximos de cada método em relação ao intervalo de aquisição.

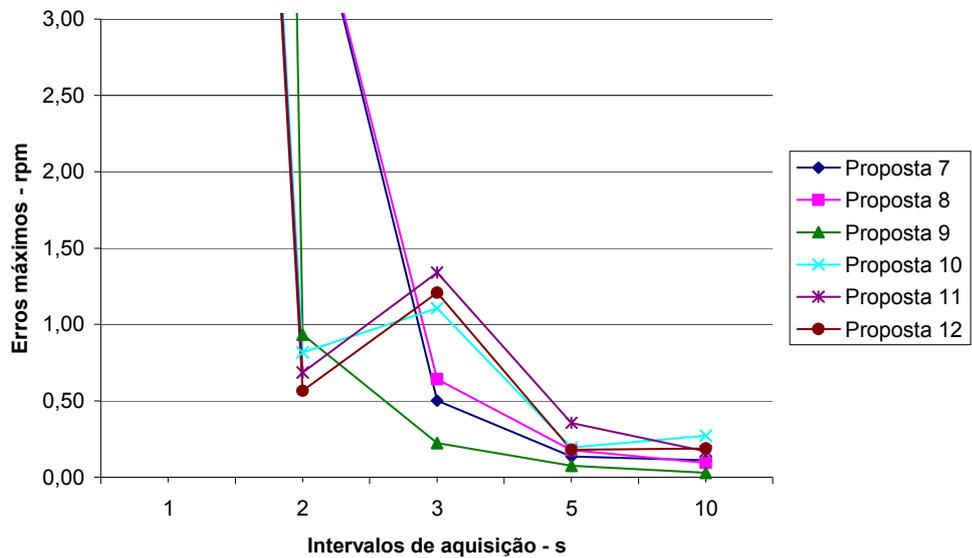


Figura 26 – Valores de erro máximo apresentados por métodos de medição baseados em detecção de frequência de escorregamento para diferentes intervalos de aquisição, em 59 Hz.

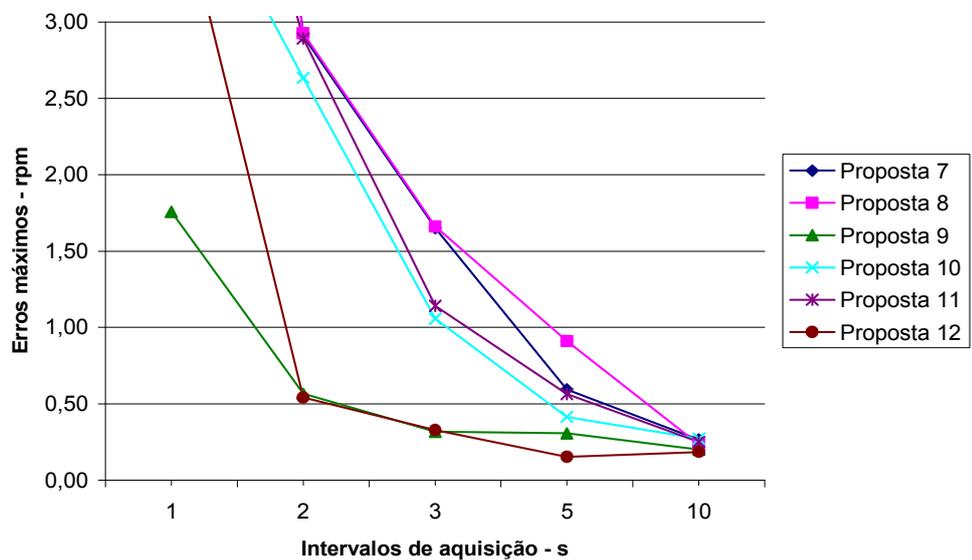


Figura 27 – Valores de erro máximo apresentados por métodos de medição baseados em detecção de frequência de escorregamento para diferentes intervalos de aquisição, em 58 Hz.

5.2.2.3 Medição pelo sinal de pressão de descarga

A frequência rotacional do compressor foi medida através de métodos de identificação pelo sinal de pressão. Os erros de cada método comparado ao padrão são apresentados na tabela 9.

Tabela 9 – Erros máximos apresentados por métodos de medição baseados na identificação de frequência de escorregamento pelo sinal de corrente – em rpm

Proposta:		frequência									
		59 Hz					58 Hz				
		tempo - s									
		1	2	3	5	10	1	2	3	5	10
13: CZT	Td	0,57	-0,10	0,04	0,12	0,09	-0,28	-0,02	-0,01	0,08	0,05
	Re	2,59	0,54	0,14	0,12	0,05	0,36	0,14	0,16	0,11	0,13
	Emáx	3,16	0,64	0,18	0,24	0,14	0,64	0,16	0,16	0,19	0,18
14: FFTInt	Td	1,33	0,55	-0,02	-0,01	0,00	0,65	0,00	-0,05	0,03	-0,01
	Re	4,87	2,60	0,06	0,02	0,02	1,20	0,11	0,17	0,16	0,18
	Emáx	6,20	3,15	0,08	0,03	0,02	1,85	0,11	0,22	0,19	0,19

A tabela 9 comprova a eficácia de dois métodos de medição de frequência rotacional baseados na análise do sinal de pressão. Para frequência rotacional de aproximadamente 59 Hz, ambos os métodos apresentam excelentes resultados a partir de 3 segundos de aquisição e um a partir de 2 segundos.

Para 58 Hz, todos os métodos apresentam excelentes resultados a partir de 1 segundo.

É possível ainda perceber que a repetitividade de ambos os métodos melhora com o aumento do intervalo de aquisição. A tendência apresenta um comportamento oscilatório em torno de um valor fixo.

As figuras 28 e 29 apresentam o comportamento do erro máximo dos métodos de medição pelo sinal de pressão em função do intervalo de aquisição.

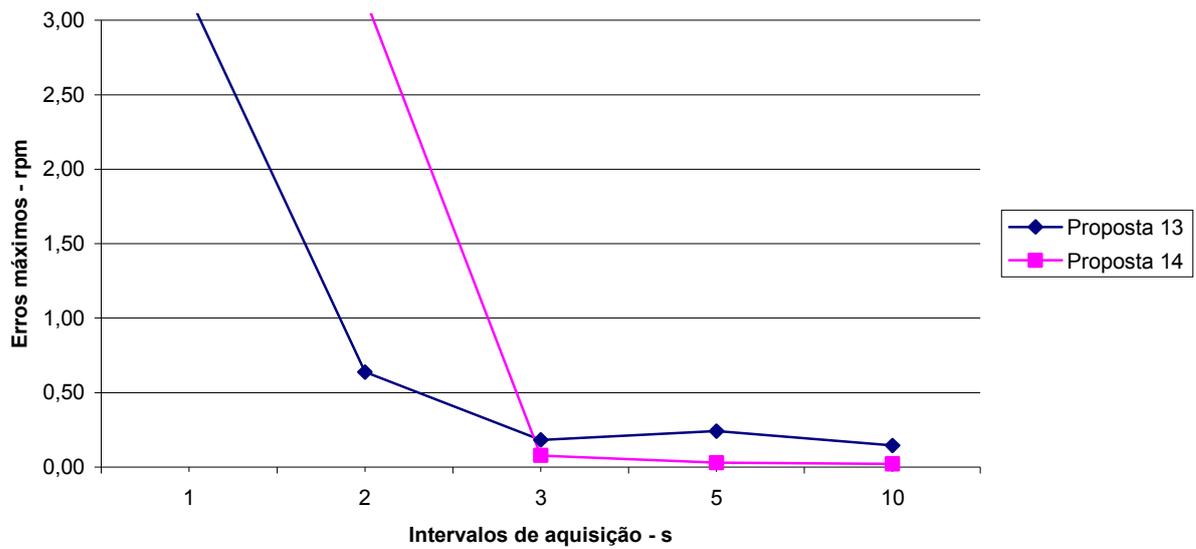


Figura 28 – Valores de erro máximo apresentados por métodos de medição baseados em análise em frequência do sinal de pressão para diferentes intervalos de aquisição, em 59 Hz.

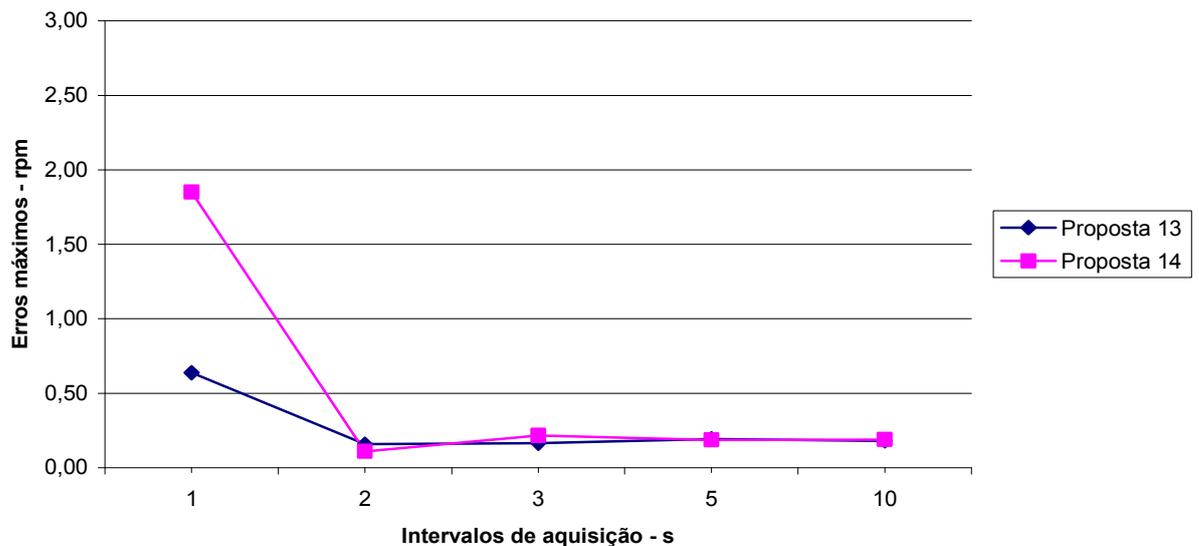


Figura 29 – Valores de erro máximo apresentados por métodos de medição baseados em detecção de frequência de escorregamento para diferentes intervalos de aquisição, em 58 Hz.

5.3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho teve início no estudo de grandezas passíveis de serem medidas externamente ao compressor portadoras de informações sobre a frequência rotacional do mesmo.

Foram identificadas cinco alternativas viáveis de realizar tal medição: através da modelagem matemática de motores presentes no interior de compressores herméticos, pela vibração existente na carcaça do compressor, pelo sinal de corrente de alimentação, seja pela identificação da frequência de escorregamento ou pela determinação das frequências relativas à excentricidade do motor e, finalmente, pelos sinais de pressão de sucção e de descarga dos compressores.

A modelagem matemática apresenta-se bastante vantajosa no que tange à simplicidade de processamento, uma vez que o modelo tenha sido construído. Por outro lado, tal método de medição apresenta como desvantagens a complexidade das atividades de modelagem, a necessidade de conhecimento de vários parâmetros construtivos, a dificuldade de garantir a robustez dos modelos frente a variações dos parâmetros e a necessidade de definição de um modelo matemático para cada tipo de motor empregado nos compressores produzidos pela empresa.

A medição pelo sinal de vibração apresenta-se possível de ser realizada, através de transdutores dispostos sobre a carcaça do compressor. Por outro lado, a forma como tal sinal se comportaria frente a alterações internas do produto, decorrentes, por exemplo, da variabilidade da produção, não é bem conhecida. Estudos apontam a utilização de tal sinal à detecção de falhas em compressores^{[62][63]}, o que comprova a variabilidade de tal sinal para diferentes condições dos compressores. Portanto, a medição de frequências rotacional de compressores através do sinal de vibração apresenta dificuldades à implementação.

O emprego de microfones para a medição pela vibração através do sinal de pressão sonora não modifica o quadro de imprevisibilidade da medição e, ainda, exige a utilização de um sistema adequado de isolamento acústico, aumentando pois as desvantagens da utilização de tal alternativa.

A análise do sinal de corrente apresenta-se bastante promissora, seja pela detecção da frequência de escorregamento ou pela determinação das componentes relativas à excentricidade.

A frequência de escorregamento apresenta-se muito pouco representativa no espectro de frequências do sinal de corrente de alimentação. Entretanto, sua ação é bastante visível no tempo: o sinal de corrente apresenta uma envoltória de frequência igual ao do escorregamento do motor (vide figura 3), a qual altera a

amplitude dos picos e dos vales do sinal de corrente. Assim é possível determinar a frequência de escorregamento, a qual, subtraída da frequência de alimentação, fornece a frequência rotacional do compressor.

A determinação da frequência de escorregamento pode ser realizada de dois modos. O primeiro se baseia na determinação do período médio entre instantes de vales ou picos consecutivos. O inverso de tal número é a frequência média rotacional do período analisado. Embora tal alternativa se apresente simples, o tempo necessário à medição pode se tornar uma grande desvantagem, pois um máximo de sessenta pontos por segundo pode ser amostrado sobre cada envoltória, para a frequência de alimentação de 60 Hz. Uma forma de melhorar a incerteza de tal medição é a identificação dos picos e dos vales e, como ambas as medições são válidas, compor seus resultados. Associado a isso é possível analisar em frequência os pontos da envoltória, tanto por sua parte positiva quanto pela negativa, a fim de reduzir o tempo de medição.

O sinal de corrente também porta informações diretamente relativas à frequência rotacional de compressores, ocasionadas por variações de fluxo no entreferro. Tal efeito surge devido à existência de ranhuras e excentricidade nos motores.

A detecção de harmônicas relacionadas a ranhuras depende de vários parâmetros, de forma que as harmônicas de excentricidade são mais práticas de utilização. Tais harmônicas se localizam simetricamente às harmônicas da frequência de alimentação.

A medição de frequência rotacional pela corrente de alimentação se apresenta bastante prática, uma vez que o acesso a tal grandeza é facilitado. Entretanto, tal método não se aplica a compressores acionados por inversores de frequência.

Outro sinal que porta informações sobre a frequência rotacional é o sinal de pressão. O ciclo de um compressor alternativo pode ser definido em duas etapas: a fase de sucção, durante a qual o pistão se desloca do ponto morto superior ao inferior, aumentando o volume no interior do cilindro; e a de compressão, durante a qual o oposto ocorre. Dessa forma, a pressão no interior do cilindro adquire um comportamento cíclico, ou pulsado. É esperado, portanto, que os sinais de pressão

de sucção e descarga apresentem comportamento semelhante, pela sincronia e seqüência dos movimentos do pistão.

Experimentalmente, pode-se afirmar que o sinal de pressão de sucção não se apresenta tão estável no tempo quanto o de descarga, de forma que o sinal de pressão de descarga foi considerado neste trabalho mais apropriado de empregar à realização de medições de freqüência rotacional. A pressão de descarga é uma grandeza de fácil acesso e de procedimento de medição bastante conhecido pelas empresas de refrigeração. A principal desvantagem desse método é a existência de pouca bibliografia específica sobre o tema.

Tais formas de medição foram comparadas através de uma matriz de decisão, que direcionou à conclusão de que a medição de freqüência rotacional de compressores herméticos através de grandezas passíveis de serem medidas externamente a compressores é mais viável de ser implementada através dos sinais de corrente de alimentação e de pressão de descarga.

Para a realização da medição foram estudadas diversas ferramentas matemáticas, e as que se demonstraram mais adequadas foram a transformada de Fourier, o analisador de espectros *lock-in*, a transformada de Hilbert e a transformada Chirp-Z.

A transformada de Fourier é o método mais tradicional de análise de sinais em freqüência. Entretanto, de acordo com a incerteza desejada, pode ser necessário um grande número de pontos para a detecção da componente de interesse. A fim de melhorar tal detecção, técnicas como o *zero padding* e a transformada interpolada de Fourier podem ser empregadas como tentativas de estimar o comportamento do espectro entre os pontos originados da transformada de Fourier.

O analisador de espectros *lock-in* visa expandir o conceito de detecção sensível à fase empregado no amplificador *lock-in*. É uma ferramenta bastante poderosa quanto a sua eficácia, mas sofre uma considerável perda de desempenho para erros de detecção consideravelmente pequenos, de acordo com a dimensão da faixa de freqüências de interesse.

A transformada de Hilbert é um procedimento bastante empregado para retirar de um determinado sinal a freqüência fundamental, facilitando a detecção de

outras componentes. Um caso típico de sua utilização é a retirada da componente fundamental do sinal de corrente de alimentação do compressor, o que torna as demais frequências mais representativas no espectro e facilita suas identificações.

A última ferramenta estudada foi a transformada Chirp-Z, que é um algoritmo de cálculo da transformada Z sobre curvas espirais. A grande vantagem desta ferramenta é a possibilidade de restringir a análise espectral a certa faixa de frequências.

As quatro ferramentas foram combinadas em 32 métodos de medição de frequência rotacional: 27 métodos pelo sinal de corrente de alimentação (12 métodos através das frequências de excentricidade e 15 métodos pela identificação da frequência de escorregamento) e 5 métodos pelo sinal de pressão de descarga.

A fim de atestar a viabilidade de cada método foram realizados ensaios, com o intuito de verificar seu desempenho frente aos seguintes requisitos de projeto:

- apresentação a cada 10 s da rotação média do período ao usuário;
- erro máximo de até 2 rpm, ou 33,33 mHz, o equivalente a 0,05% do valor final da faixa de medição – VFM – para compressores alimentados a 60 Hz. As normas vigentes (ASHRAE 23^[17] e ISO 917^[11]) estipulam que medições de frequência rotacional devem ser executadas com instrumentos de erro máximo de $\pm 1\%$ e de desvio-padrão de $\pm 0,75\%$ (36 rpm e 54 rpm), respectivamente.

Os ensaios foram realizados em duas condições de carga diferentes, com o compressor operando a aproximadamente 59 Hz e 58 Hz, de modo a reproduzir o comportamento do compressor em situações normais de trabalho. Antes de iniciar o procedimento de medição, foi esperado um tempo para estabilização da frequência rotacional. Após isso, os sinais de corrente, pressão e sincronismo foram amostrados simultaneamente durante cinco intervalos de aquisição diferentes: (1, 2, 3, 5 e 10) s. Para cada intervalo de aquisição foram realizadas 10 medições.

Entre os 12 métodos baseados na detecção das frequências de excentricidade, a grande maioria apresentou erro menor do que as normas supracitadas estabelecem, seja para (59 ou 58) Hz. Entretanto, as propostas

baseadas na transformada Chirp-Z, na transformada interpolada de Fourier e na transformada de Hilbert apresentaram os melhores resultados.

Os resultados obtidos comprovam a eficácia de seis métodos de medição de frequência rotacional baseados na detecção das frequências de excentricidade frente aos requisitos de projeto.

Para frequência rotacional de aproximadamente 59 Hz, 5 desses métodos apresentam excelentes resultados a partir de 2 s de aquisição e todos a partir de 3 s. Um método apresentou-se eficaz para intervalos de aquisição de 1 s.

Para 58 Hz, 4 desses métodos apresentam excelentes resultados a partir de 2 s de aquisição e todos a partir de 5 s. Três métodos apresentaram-se eficazes para intervalos de aquisição de 1 s.

Dos 15 métodos baseados na detecção da frequência de escorregamento, a grande maioria apresentou erro menor do que as normas supracitadas estabelecem, para tempos de medição iguais ou superiores a 1 segundo.

Os métodos baseados na transformada interpolada de Fourier e na Chirp-Z novamente se mostraram mais eficazes. Para frequência rotacional de aproximadamente 59 Hz, 4 destes métodos apresentam excelentes resultados a partir de 2 segundos de aquisição e todos a partir de 3 segundos.

Para 58 Hz, 2 destes métodos apresentam excelentes resultados a partir de 2 segundos de aquisição e todos a partir de 3 segundos. Um método apresentou-se eficaz para intervalos de aquisição de 1 s.

Dos 5 métodos baseados no sinal de pressão de descarga, somente o analisador de espectros *lock-in* não apresentou erro menor do que as normas estabelecem, a partir de 1 segundo de medição, seja para (59 ou 58) Hz. Os métodos que apresentaram os menores erros foram os que empregam a transformada Chirp-Z e a transformada interpolada de Fourier. Para frequência rotacional de aproximadamente 59 Hz, ambos os métodos apresentam excelentes resultados a partir de 3 s de aquisição e um a partir de 2 s. Para 58 Hz, todos os métodos apresentam excelentes resultados a partir de 1 s.

Assim, conclui-se que os objetivos deste projeto foram plenamente atingidos. A incerteza desejada foi atingida em um tempo três vezes menor do que o estipulado. Os métodos mais adequados foram ainda avaliados em operação dentro da indústria parceira deste projeto, e os resultados foram considerados bastante satisfatórios.

Convém, entretanto, realizar mais testes e ensaios, de modo a verificar a eficácia dos métodos aqui apresentados frente a diferentes situações, como transitórios e condições de partida e tombamento de compressores.

Salienta-se que o sinal adquirido pelo sistema de medição padrão não é instantâneo, e sua frequência varia dentro do intervalo de aquisição. Assim, para maiores períodos de aquisição, a medição está mais sujeita à influência de tais oscilações. Uma forma de reduzir ainda mais a incerteza de medição seria a realização de várias medições de curto intervalo de aquisição, e a determinação da média dos valores medidos. Em outras palavras, seria possível realizar três medições de 3 s de intervalo de aquisição e compor os resultados encontrados, ao invés de uma medição de 9 s de intervalo de aquisição.

6 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

6.1 CONCLUSÕES

O presente trabalho teve por objetivo estudar alternativas para a medição não-invasiva da frequência rotacional de compressores herméticos. Para tanto, foram estudadas as grandezas portadoras de informações sobre a frequência rotacional passíveis de serem medidas externamente a compressores, bem como ferramentas matemáticas que permitem a extração da informação dos sinais medidos.

Foram elaborados 32 métodos de medição de frequência rotacional e avaliados, em bancada, frente a um compressor padrão previamente instrumentado.

Para maior clareza, as conclusões deste trabalho são apresentadas divididas em itens.

6.1.1 Quanto às grandezas escolhidas para compor a função de medição

Foram analisadas várias grandezas passíveis de serem medidas externamente ao compressor e os sinais de corrente de alimentação e de pressão de sucção e de descarga foram considerados mais apropriados para a medição da frequência rotacional.

O sinal de pressão de descarga se apresentou mais estável no tempo do que o de sucção, de forma que foi analisado de forma mais aprofundada neste trabalho.

6.1.2 Quanto aos métodos matemáticos empregados

A identificação de componentes de excentricidade do motor no espectro de frequências do sinal de corrente de alimentação, a identificação da frequência de escorregamento do motor a partir de envoltórias do sinal de corrente e a análise em frequência do sinal de pressão de descarga do compressor apresentaram excelentes resultados nos ensaios realizados.

A transformada Chirp-Z e a transformada interpolada de Fourier apresentaram-se bastante eficientes para identificação de componentes frequenciais. A transformada de Hilbert também se mostrou bastante útil para a extração de componentes fundamentais de sinais.

6.1.3 Quanto à adequação do programa *Labview*

O *Labview* apresentou-se eficaz para o processamento dos métodos matemáticos propostos. A existência de blocos de funções predefinidos facilita a programação e eleva a robustez do sistema, diminuindo a probabilidade de ocorrência de erros de programação.

6.1.4 Quanto aos resultados alcançados

Os métodos mais proeminentes não apenas foram capazes de suplantar e muito os valores estabelecidos pelas normas de ensaio de compressores vigentes, como geraram resultados consideravelmente abaixo dos requisitos de erro máximo e de tempo de medição sugeridos pela empresa parceira nesta dissertação.

Os ensaios realizados garantem o cumprimento do requisito de erro máximo menor de 2 rpm, para 3 s de aquisição, para os métodos mais proeminentes, tanto para frequências rotacionais próximas a 59 Hz como para próximas a 58 Hz. Alguns métodos atingiram tal requisito para 2 s de aquisição e alguns para apenas 1 s de aquisição.

Tais métodos foram implementados em *Labview*, resultando rotinas prontas que necessitam apenas que parâmetros sejam inseridos pelo operador, o que torna o sistema bastante fácil de operar e robusto frente a erros operacionais.

De uma forma geral, o presente trabalho atingiu seus objetivos de forma bastante satisfatória: os requisitos de projeto foram cumpridos e a relação empresa-universidade foi fortalecida, o que incentiva a continuidade de tal parceria.

6.2 PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS

O presente trabalho abre um leque de oportunidades de estudos futuros. É possível empregar a teoria apresentada e expandir a análise realizada para determinar instantes de partida e tombamento e condições de falhas em compressores, entre outros.

Os métodos baseados em corrente podem ainda ser viáveis de emprego para a determinação de frequência rotacional de motores assíncronos, o que motiva um estudo nessa direção.

A construção de um sistema de medição microprocessado, autônomo e independente, capaz de integrar outros sistemas, tais como de medição de grandezas elétricas^[7] e de temperatura de enrolamento de compressores^[11] é também uma boa sugestão de continuidade deste projeto, pois não existe equivalente no mercado para tal instrumento de medição. Além disso, possibilitaria a implementação na indústria de vários instrumentos de medição desenvolvidos na universidade e no LABMETRO, o que fortalece o papel de ambos como geradores de inovação tecnológica. Isso vai ao encontro da inclusão, na indústria, de equipamentos nacionais, concebidos e fabricados no Brasil.

REFERÊNCIAS

- [1] WHIRLPOOL. **Perfil Institucional Whirlpool Corporation**. Disponível em: <<http://www.whirlpool.com.br/site/p/institucional/perfil/whirlpool-corporation>>. Acesso em: Julho de 2007.
- [2] WHIRLPOOL. **About Whirlpool Corporation**. Disponível em: <<http://www.whirlpoolcorp.com/about/default.asp>>. Acesso em: Julho de 2007.
- [3] WHIRLPOOL. **Perfil Institucional EMBRACO**. Disponível em: <<http://www.whirlpool.com.br/site/p/institucional/perfil/embraco>>. Acesso em: Julho de 2007.
- [4] POLLETO, E. L. **Aprimoramento de uma Bancada de Ensaio de Desempenho de Compressores Herméticos Visando Reduzir Incertezas de Medição**. 2006. Dissertação (Mestrado em Metrologia Científica e Industrial) - Programa de Pós-Graduação em Metrologia Científica e Industrial, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2006.
- [5] FLESCHE, R. C. C. **Desenvolvimento e Instalação de Recursos de Automação Aplicados a Ensaios de Compressores de Refrigeração da Embraco**. 2006. Monografia (Graduação em Engenharia de Controle e Automação Industrial) - Programa de Engenharia de Controle e Automação Industrial, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2006.
- [6] PETROVIC, S. A. B. **Proposta de Arquitetura do Sistema de Automação Aplicado a Ensaios de Desempenho de Compressores Herméticos de Refrigeração**. 2007. Dissertação (Mestrado em Metrologia Científica e Industrial) - Programa de Pós-Graduação em Metrologia Científica e Industrial, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2007.
- [7] BARBOSA, F. Q. **Redução das Incertezas nas Medições de Grandezas Elétricas em uma Bancada de Ensaios de Desempenho de Compressores**. 2006. Dissertação (Mestrado em Metrologia Científica e Industrial) - Programa de Pós-Graduação em Metrologia Científica e Industrial, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2006.
- [8] HENKLEIN, P. **Análise de Ensaios de Compressores Herméticos Durante o Transitório**. 2006. Dissertação (Mestrado em Metrologia Científica e Industrial) - Programa de Pós-Graduação em Metrologia Científica e Industrial, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2006.

- [9] STEINBACH, K. **Identificação do Instante de Entrada em Condição de Regime Permanente em Ensaios de Desempenho de Compressores**. 2008. Dissertação (Mestrado em Metrologia Científica e Industrial) - Programa de Pós-Graduação em Metrologia Científica e Industrial, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2008.
- [10] SCUSSEL, J. N. **Propostas de Ações para Reduzir o Tempo Demandado por Ensaio de Desempenho de Compressores Herméticos**. 2006. Dissertação (Mestrado em Metrologia Científica e Industrial) - Programa de Pós-Graduação em Metrologia Científica e Industrial, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2006.
- [11] PACHECO, A. L. S. **Desenvolvimento de Sistema para Medir Resistência de Enrolamento em Motores de Compressores Energizados**. 2007. Dissertação (Mestrado em Metrologia Científica e Industrial) - Programa de Pós-Graduação em Metrologia Científica e Industrial, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2007.
- [12] PADUANO, J. D., GREITZER, E. M., EPSTEIN, H. **Compression System Stability and Active Control**. Annu. Rev. Fluid Mech. 2001.
- [13] WALKER, J. D., WILLIAMSON, S. **Temperature Rise in Induction Motors under Stall Conditions**. IEE Colloquium on Thermal Aspects. p. 7/1-7/4. 1992.
- [14] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 917: Testing of Refrigerant Compressors**. 1989.
- [15] WALTER, M. L. **Control of Refrigeration Compressor Calorimeter for Minimum Testing Time**. A. Bell & Howell Company, 1973.
- [16] EMBRACO. **Dispositivos de Sincronismo. Padrão Operacional PO GTTP 00054**. 2002. Revisão 01.
- [17] AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS, INC. **ANSI/ASHRAE 23: Methods of Testing for Rating Positive Displacement Refrigerant Compressors and Condensing Units**. Atlanta, EUA, 1993.
- [18] SONNTAG, R. E., BORGNAKKE, C., VAN WYLEN, G. J. **Fundamentos da Termodinâmica**. Edgard Blücher, 2003.
- [19] BENEDET, M. E. **Medição de Perdas Mecânicas em Compressores Herméticos para Refrigeração Utilizando Carga Nominal**. 2006. Monografia (Graduação em Engenharia de Controle e Automação Industrial) – Programa de Engenharia de Controle e Automação Industrial, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2006.
- [20] STOECKER, W. F., JABARDO, J. M. S. **Refrigeração Industrial**. Edgard Blücher, 2. ed., 2002.

- [21] WILLIAMS, B. W., GOODFELLOW, J. K., GREEN, T. C. **“Sensorless” Speed Measurement of Inverter Driven Squirrel Cage Induction Motors**. Fourth International Conference on Power Electronics and Variable-Speed Drives. p. 297-300. 2001.
- [22] PHIPPS, W., AL-BAHADLY, I. **Sensorless Speed Control in Induction Motor Drives**. Proceedings of the First IEEE International Workshop in Electronic Design, Test and Applications. p. 480-482. Jan. 2002.
- [23] YOUNG, C., LIU, C., LIU, C. **Vibration Analysis of Rolling Piston-Type Compressors Driven by Single-Phase Induction Motors**. Proceedings of the IECON'93, International Conference on Industrial Electronics, Control and Instrumentation. p. 918-923. v. 2. November 1993.
- [24] LIU, J., KUNG, I., CHAO, H. **Speed Estimation of Induction Motor Parameters Using a Non-linear Identification Technique**. Procedures of National Science Council, R.O.C. pp 107-114. v. 25, n. 2. 2001.
- [25] BARAMBONES, O., GARRIDO, A. J., MASEDA, F. J. **A Sensorless Robust Vector Control of Induction Motor Drives**. 9th IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation. Lisboa, Portugal. September 2003.
- [26] ZIDAN, H., *et al.* **A Simple Sensor-less Vector Control System for Variable Speed Induction Motor Drives**. Transactions of the Institute of Electrical Engineers of Japan. v. 120-D, n. 10, p. 1165-1170. 2000.
- [27] HOLTZ, J., JULIET, J. **Sensorless Acquisition of the Rotor Position Angle of Induction Motors with Arbitrary Stator Windings**. IEEE Transactions of Industry Applications. v. 41, n. 6. Nov./Dec. 2005.
- [28] RODRIGUES, R. S. **Análise dos Esforços Dinâmicos Transmitidos pelo Eixo e Pistão ao Bloco de Compressores Herméticos**. 2003. Dissertação (Mestrado em Mecânica) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2003.
- [29] INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, NORMALIZAÇÃO E QUALIDADE INDUSTRIAL. **Quadro Geral de Unidades de Medidas**. 4. ed. SENAI. 2007.
- [30] CRUCQ, J., apud RODRIGUES, R. S, *idem*.
- [31] HURST, K. D., HABLETER, T., G. **Sensorless Speed Measurement Using Current Harmonic Spectral Estimation in Induction Machine Drives**. IEEE Transactions on Power Electronics. v. 11, n. 1. Jan. 2006.
- [32] BLASCO-GIMENEZ, R. *et al.* **Performance of FFT-rotor Slot Harmonic Speed Detector for Sensorless Induction Motor Drives**. IEE Proceedings – Electric Power Applications. v. 143. p. 258-268. 1996.

- [33] FERRAH, A., BRADLEY, K. J., ASHER, G. M. **An FFT-Based Novel Approach to Noninvasive Speed Measurement in Induction Motor Drives.** IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, v. 41, n. 6. Dec. 1992.
- [34] HURST, K. D. et al. **Speed Sensorless Field-Oriented Control of Induction Machines Using Current Harmonic Spectral Estimation.** Conference Record of the 1994 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting. v. 1. p. 601-607. Oct. 1994.
- [35] SHI, D., UNSWORTH, P. J., GAO, R. X. **Sensorless Speed Measurement of Induction Motor Using Hilbert Transform and Interpolated Fast Fourier Transform.** IEEE Trans. on Instrumentation and Measurement. v. 55, n. 1. Feb. 2006.
- [36] DEL TORO, V. **Fundamentos de Máquinas Eléctricas.** LTC. 1999.
- [37] AIELLO, M., CATALIOTTI, A., NUCCIO, S. **An Induction Motor Speed Measurement Method Based on Current Harmonic Analysis with the Chirp-Z Transform.** IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, v. 54, n. 5. Oct. 2005.
- [38] FERRAH, A., BRADLEY, K. G., ASHER, G. M. **Sensorless Speed Detection of Inverter Fed Induction Motors Using Rotor Slot Harmonics and Fast Fourier Transform.** 23rd Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference. v. 1. p. 279-286. June-July 1992.
- [39] HUBACHER, B., GROLL, E. A. **Measurement of Performance of Carbon Dioxide Compressors – Final Report.** Air-Conditioning And Refrigeration Technology Institute – ARTI 21-CR. n. 611-10070. 2002.
- [40] PROAKIS, J. G., MANOLAKIS, D. G. **Digital Signal Processing.** 3. ed. Prentice Hall. 1996.
- [41] ALLEN, R. L., MILS, D. W. **Signal Analysis.** Wiley-Interscience, 2004.
- [42] HARRIS, F.J. **On the Use of Windows for Harmonic Analysis with Discrete Fourier Transform.** Proceedings of the IEEE. v. 66, n. 1. Jan. 1978.
- [43] AGREZ, D. **Fast Measurement of Power Frequency System Frequency in the Frequency Domain.** XVIII Imeko World Congress. Rio de Janeiro, Brasil. Sep. 2006.
- [44] RAMOS, P. M. *et al.* **A Comparative Evaluation Between Frequency Estimation Algorithms for Power Quality Assessment in DSP Implementation.** XVIII Imeko World Congress. Rio de Janeiro, Brasil. Sep. 2006.
- [45] COX, M. G., HARRIS, P. M. **Software Support for Metrology Best Practice Guide No. 6: Uncertainty Evaluation.** National Physical Laboratory. Reino Unido. Sep. 2006.

- [46] HURST, K. D., HABETLER, T. G. **A Comparison of Spectrum Estimation Techniques for Sensorless Speed Detection in Induction Machines.** IEEE Transactions on Industry Applications. v. 33, n 4. July/Aug. 1997.
- [47] RABINER, I. R., SCHAFER, R. W., RADER, C. M. **The Chirp Z-Transform Algorithm.** IEEE Transactions on Radio and Electroacoustics. v. 17, n. 2. p.86-92. June 1969.
- [48] SANTOS, E. T. F., OLIVEIRA, A. Estimação Indireta de Velocidade de um Motor de Indução Trifásico Utilizando um Analisador de Espectros *Lock-in*. **Revista Controle & Automação.** v. 16, n. 1. jan/fev/mar 2005.
- [49] DIEFENDERFER, A. J., HOLTON, B. E. **Principles of Electronic Instrumentation.** Saunders College Publishing. 3. ed. 1994.
- [50] SMITH, R. W. M. *et al.* **Design of a Phase-sensitive Detector to Maximize Signal-to-noise Ratio in the Presence of Gaussian Wideband Noise.** Meas. Sci. Technol. 3. Grã-Bretanha, 1992.
- [51] GOLD, B., OPPENHEIM, A. V., RADER, C. M. **Theory and Implementation of the Discrete Hilbert Transform.** Proc. Symp. Comput. Process Commun., p. 235-250. New York: Polytechnic Press. 1970.
- [52] ROBINSON, D. R. **“Phase Unwrapping Methods”, Interferogram Analysis.** Bristol: IOP Publishing LTD., 1993.
- [53] ARRILAGA, J., BRADLEY, D. A., BODGER, P. S. **Power Systems Harmonics.** John Wiley and Sons. 1985.
- [54] OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO. **Manual de Procedimentos de Operação – Módulo 10 – Submódulo 10.21. IO – CG.BR.02:** Operação Normal do Controle Automático de Geração. 09/01/2007.
- [55] OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO. **Manual de Procedimentos de Operação – Módulo 10 – Submódulo 10.21. IO – CG.BR.03:** Operação em Contingência do Controle Automático de Geração. 04/07/2007.
- [56] AGILENT TECHNOLOGIES. **6812B.** Disponível no portal eletrônico <http://www.home.agilent.com/upload/cmc_upload/All/6800series_datasheet_Jan06.pdf>. Acesso em Julho de 2008.
- [57] NATIONAL INSTRUMENTS. **NI9215.** Disponível no portal eletrônico <http://www.ni.com/pdf/products/us/c_series_ai.pdf>. Acesso em Julho de 2008.
- [58] AGILENT TECHNOLOGIES. **1146A.** Disponível no portal eletrônico <<http://www.home.agilent.com/agilent/product.jsp?cc=US&lc=eng&nid=-536902770.536880131&pageMode=OV>>. Acesso em Julho de 2008.

- [59] GE INDUSTRIAL, SENSING. **PDCR4000**. Disponível no portal eletrônico http://www.gesensing.com/downloads/datasheets/920_214B_E.pdf>. Acesso em Julho de 2008.
- [60] BIPM, et al. Guia para a expressão da incerteza de medição. 2 ed. Tradução por INMETRO et al. de “Guide to the expression of uncertainty in measurement”. Rio de Janeiro: INMETRO, ago. 1998.
- [61] MONTGOMERY, D. C., RUNGER, G. C. **Estatística Aplicada e Probabilidade para Engenheiros**. LTC, Brasil: 2006.
- [62] RILEY, C. M. *et al.* **A Method for Sensorless On-Line Vibration Monitoring of Induction Machines**. Conference Record of the 1997 IEEE Industry Applications Conference. Thirty-Second IAS Annual Meeting. v. 1. p. 201-207. Oct. 1997.
- [63] ZHANG, Y. et al. **Condition Monitoring and Fault Detection of a Compressor Using Signal Processing Techniques**. Proceedings of the American Control Conference. v. 6. p. 4460-4465. June 2001.

APÊNDICE I

Aqui são apresentadas as 18 propostas de medição de frequência rotacional concebidas não apresentadas no texto.

Propostas de medição da frequência rotacional pelo sinal de corrente através da identificação de componentes relativas às variações de entreferro

Proposta 15: Transformada de Fourier do módulo de $y(t)$ proveniente da transformada de Hilbert

A transformada de Hilbert é adequada para extrair a componente fundamental do sinal de corrente de alimentação. Conforme descrito em 3.4, é possível analisar o módulo ou a fase do sinal $y(t)$.

A transformada de Fourier do módulo de $y(t)$ é capaz de evidenciar as frequências de excentricidade, as quais são de difícil detecção por se localizarem próximas à componente fundamental. Uma vez extraída a fundamental, as componentes relativas à excentricidade são as mais notáveis, de intensidade comparada somente às harmônicas da componente fundamental.

Em torno da primeira harmônica par, as componentes de excentricidade se tornam ainda mais salientes após a remoção da componente fundamental. Assim, a proposta 15 sugere o seguinte algoritmo:

1. Amostragem do sinal de corrente;
2. Remoção da componente de frequência igual a 0;
3. Execução de uma transformada de Hilbert, com o intuito de retirar a componente fundamental da análise;
4. Determinação do módulo do sinal $y(t)$ – vide item 3.4;
5. Remoção da componente de frequência igual a 0;
6. Aplicação de um filtro passa-baixas, de frequência de corte em 70 Hz;

7. Execução de uma FFT para a determinação da componente de excentricidade de maior amplitude.

Proposta 16: Transformada de Fourier da fase de $y(t)$ proveniente transformada de Hilbert

Como apresentado no item 3.4, a transformada de Hilbert pode ser empregada para extrair da análise a frequência fundamental, através da análise do módulo e da fase de um sinal $y(t)$.

A presente proposta emprega a transformada de Fourier para obter as frequências de excentricidade do sinal de fase $y(t)$, segundo os seguintes passos:

1. Amostragem do sinal de corrente;
2. Remoção da componente de frequência igual a 0;
3. Execução de uma transformada de Hilbert, com o intuito de retirar a componente fundamental da análise;
4. Determinação da fase do sinal $y(t)$ e retirada do salto de fase – vide item 3.4;
5. Subtração entre os valores obtidos e sua melhor reta, determinada por mínimos quadrados, a fim de eliminar a influência da componente fundamental;
6. Aplicação de um filtro passa-banda, de banda passante entre (10 e 70) Hz, a fim de limitar a análise à primeira harmônica par;
7. Execução de uma FFT para a determinação da componente de excentricidade de maior amplitude.

Proposta 17: Transformada de Fourier e *zero padding* da fase de $y(t)$ proveniente da transformada de Hilbert

Esta proposta sugere a utilização de *zero padding* em adição à proposta anterior. Dessa forma, propõe-se a adoção do seguinte algoritmo:

1. Amostragem do sinal de corrente;

2. Remoção da componente de frequência igual a 0;
3. Execução de uma transformada de Hilbert, com o intuito de retirar a componente fundamental da análise;
4. Determinação da fase do sinal $y(t)$ e retirada do salto de fase – vide item 3.4;
5. Subtração entre os valores obtidos e sua melhor reta, determinada por mínimos quadrados, a fim de eliminar a influência da componente fundamental;
6. Aplicação de um filtro passa-banda, de banda passante entre (10 e 70) Hz, a fim de limitar a análise à primeira harmônica par;
7. Execução de *zero padding* no sinal de módulo de $y(t)$. O número de pontos adicionados é suficiente para elevar a quantidade de pontos analisada até a segunda potência de 2 acima do mesmo;
8. Execução de uma FFT para a determinação da componente de excentricidade de maior amplitude.

Proposta 18: Analisador *lock-in*

A proposta 18 sugere o emprego do analisador *lock-in* para a determinação da componente de excentricidade. Para tanto, os passos abaixo apresentados devem ser executados:

1. Amostragem do sinal de corrente;
2. Execução de um amplificador *lock-in* com sinal de entrada de frequência igual a menor frequência do intervalo em torno da primeira harmônica par, com limite inferior definido pelo valor do máximo escorregamento e superior de 1 Hz;
3. Incremento de 0,01 Hz na frequência do sinal de referência;
4. Caso a frequência do sinal de referência seja maior do que a máxima do intervalo, a etapa 5 deve ser executada. Caso contrário, retorna-se à etapa 2, com o sinal de referência atualizado;

5. Identificação da frequência do sinal de referência de máximo valor de saída.

Proposta 19: Analisador lock-in sobre o sinal do módulo de $y(t)$ proveniente da transformada de Hilbert

Uma vez extraída a componente fundamental, as componentes de excentricidade se tornam mais notáveis no espectro. Dessa forma, a detecção pode se tornar mais exata caso a transformada de Hilbert seja empregada anteriormente ao analisador *lock-in*.

Esta proposta emprega o sinal de módulo de $y(t)$ e sugere o seguinte algoritmo:

1. Amostragem do sinal de corrente;
2. Remoção da componente de frequência igual a 0;
3. Execução de uma transformada de Hilbert, com o intuito de retirar a componente fundamental da análise;
4. Determinação do módulo do sinal $y(t)$ – vide item 3.4;
5. Remoção da componente de frequência igual a 0;
6. Aplicação de um filtro passa-baixas, de frequência de corte em 70 Hz;
7. Execução de um amplificador *lock-in* com sinal de entrada de frequência igual a menor frequência do intervalo em torno da primeira harmônica par, com limite inferior definido pelo valor do máximo escorregamento e superior de 1 Hz
8. Incremento de 0,01 Hz na frequência do sinal de referência;
9. Caso a frequência do sinal de referência seja maior do que a máxima do intervalo, a etapa 10 deve ser executada. Caso contrário, retorna-se à etapa 7, com o sinal de referência atualizado;
10. Identificação da frequência do sinal de referência de máximo valor de saída.

Proposta 20: Analisador lock-in sobre o sinal da fase de $y(t)$ proveniente da transformada de Hilbert

De maneira semelhante à proposta anterior, o analisador *lock-in* pode ser empregado sobre o sinal de fase de $y(t)$. Com tal intuito o seguinte algoritmo é sugerido:

1. Amostragem do sinal de corrente;
2. Remoção da componente de frequência igual a 0;
3. Execução de uma transformada de Hilbert, com o intuito de retirar a componente fundamental da análise;
4. Determinação da fase do sinal $y(t)$ e retirada do salto de fase – vide item 3.4;
5. Subtração entre os valores obtidos e sua melhor reta, determinada por mínimos quadrados;
6. Aplicação de um filtro passa-banda, de banda passante entre (10 e 70) Hz;
7. Execução de um amplificador *lock-in* com sinal de entrada de frequência igual a menor frequência do intervalo em torno da primeira harmônica par, com limite inferior definido pelo valor do máximo escorregamento e superior de 1 Hz;
8. Incremento de 0,01 Hz na frequência do sinal de referência;
9. Caso a frequência do sinal de referência seja maior do que a máxima do intervalo, a etapa 10 deve ser executada. Caso contrário, retorna-se à etapa 7, com o sinal de referência atualizado;
10. Identificação da frequência do sinal de referência de máximo valor de saída.

Propostas de medição da frequência rotacional pelo sinal de corrente através da identificação da frequência de escorregamento

Proposta 21: Transformada de Fourier do sinal de picos da corrente

A transformada de Fourier pode ser empregada para determinar a frequência de oscilação dos picos do sinal de corrente de alimentação, a qual corresponde à frequência de escorregamento do motor. Para tanto, esta proposta apresenta o seguinte algoritmo:

1. Amostragem do sinal de corrente;
2. Identificação dos instantes de picos do sinal de corrente. Devido a ruídos, a média dos 5 maiores pontos de cada período é definido como o valor de pico e a média de seus instantes é considerada o instante de pico do período analisado;
3. Determinação da média dos valores de intervalos entre picos consecutivos: tal valor é considerado o período da envoltória em questão;
4. Execução de uma FFT da envoltória dos picos para a determinação da componente de escorregamento;
5. Execução de uma FFT do sinal de corrente para a determinação da frequência de alimentação;
6. Subtração, do valor da frequência de alimentação, do valor da frequência de escorregamento.

Proposta 22: Transformada de Fourier do sinal de vales da corrente

Tal proposta visa a determinação da frequência de escorregamento de maneira semelhante à apresentada na proposta anterior. Emprega todavia as variações na amplitude dos vales, e não dos picos, para determinar a frequência rotacional do compressor.

A proposta 22 sugere o seguinte algoritmo:

1. Amostragem do sinal de corrente;

2. Identificação dos instantes de vales do sinal de corrente. Devido a ruídos, a média dos 5 menores pontos de cada período é definido como o valor de vale e a média de seus instantes é considerada o instante de vale do período analisado;
3. Determinação da média dos valores de intervalos entre vales consecutivos: tal valor é considerado o período da envoltória em questão;
4. Execução de uma FFT da envoltória dos vales do sinal de corrente para a determinação da componente de escorregamento;
5. Execução de uma FFT do sinal de corrente para a determinação da frequência de alimentação;
6. Subtração, do valor da frequência de alimentação, do valor da frequência de escorregamento.

Proposta 23: Transformada de Fourier dos sinais de picos e vales da corrente

A presente proposta visa compor as duas propostas anteriormente citadas, ou seja, determinar a frequência através do escorregamento pelos picos e pelos vales do sinal de corrente de alimentação, pois o sinal amostrado possui informações para realizar a medição tanto pelos vales quanto pelos picos.

A composição de tais resultados é realizada através de uma média entre os dois valores obtidos.

Proposta 24: Transformada de Fourier e *zero padding* do sinal de picos da corrente

A presente proposta visa a adoção de *zero padding* às propostas anteriores. Assim, o seguinte algoritmo é sugerido:

1. Amostragem do sinal de corrente;

2. Identificação dos instantes de picos do sinal de corrente. Devido a ruídos, a média dos 5 maiores pontos de cada período é definido como o valor de pico e a média de seus instantes é considerada o instante de pico do período analisado;
3. Determinação da média dos valores de intervalos entre picos consecutivos: tal valor é considerado o período da envoltória em questão;
4. Execução de *zero padding* no sinal de corrente. O número de pontos adicionados é suficiente para elevar a quantidade de pontos analisada até a segunda potência de 2 acima do mesmo;
5. Execução de *zero padding* na envoltória de picos do sinal de corrente. O número de pontos adicionados é suficiente para elevar a quantidade de pontos analisada até a segunda potência de 2 acima do mesmo;
6. Execução de uma FFT da envoltória dos picos do sinal de corrente para a determinação da componente de escorregamento;
7. Execução de uma FFT do sinal de corrente para a determinação da frequência de alimentação;
8. Subtração, do valor da frequência de alimentação, do valor da frequência de escorregamento.

Proposta 25: Transformada de Fourier e *zero padding* do sinal de vales da corrente

Esta proposta avalia o emprego de *zero padding* e da transformada de Fourier sobre o sinal de vales do sinal de corrente de alimentação. O algoritmo abaixo apresentado é proposto:

1. Amostragem do sinal de corrente;
2. Identificação dos instantes de vales do sinal de corrente. Devido a ruídos, a média dos 5 menores pontos de cada período é definido como o valor de vale e a média de seus instantes é considerada o instante de vale do período analisado;

3. Determinação da média dos valores de intervalos entre vales consecutivos: tal valor é considerado o período da envoltória em questão;
4. Execução de *zero padding* no sinal de corrente. O número de pontos adicionados é suficiente para elevar a quantidade de pontos analisada até a segunda potência de 2 acima do mesmo;
5. Execução de *zero padding* na envoltória de vales do sinal de corrente. O número de pontos adicionados é suficiente para elevar a quantidade de pontos analisada até a segunda potência de 2 acima do mesmo;
6. Execução de uma FFT da envoltória dos vales do sinal de corrente para a determinação da componente de escorregamento;
7. Execução de uma FFT do sinal de corrente para a determinação da frequência de alimentação;
8. Subtração, do valor da frequência de alimentação, do valor da frequência de escorregamento.

Proposta 26: Transformada de Fourier e zero padding dos sinais de picos e vales da corrente

A composição dos resultados obtidos nas duas propostas anteriores pode aumentar a confiabilidade da medição. Este é o objetivo da presente proposta.

Proposta 27: Analisador lock-in do sinal de picos da corrente

Esta proposta objetiva o emprego do analisador *lock-in* para a identificação da frequência de escorregamento, bem como da frequência de alimentação, a partir do sinal de picos do sinal de corrente. Ela apresenta o seguinte algoritmo:

1. Amostragem do sinal de corrente;
2. Identificação dos instantes de picos do sinal de corrente. Devido a ruídos, a média dos 5 maiores pontos de cada período é definido como o valor de pico e a média de seus instantes é considerada o instante de pico do período analisado;

3. Determinação da média dos valores de intervalos entre picos consecutivos: tal valor é considerado o período da envoltória em questão;
4. Execução de um analisador *lock-in* da envoltória dos picos do sinal de corrente para a determinação da componente de escorregamento, de janela entre 0 Hz e o valor do máximo escorregamento, incremento de 0,01 Hz;
5. Execução de um analisador *lock-in* do sinal de corrente para a determinação da freqüência de alimentação, de janela em torno da freqüência fundamental, com limites de 2 Hz, incremento de 0,01 Hz;
6. Subtração, do valor da freqüência de alimentação, do valor da freqüência de escorregamento.

Proposta 28: Analisador *lock-in* do sinal de vales da corrente

Esta proposta objetiva o emprego do analisador *lock-in* para a identificação da freqüência de escorregamento, bem como da freqüência de alimentação, a partir do sinal de vales do sinal de corrente. Ela apresenta o seguinte algoritmo:

1. Amostragem do sinal de corrente;
2. Identificação dos instantes de vales do sinal de corrente. Devido a ruídos, a média dos 5 menores pontos de cada período é definido como o valor de vale e a média de seus instantes é considerada o instante de vale do período analisado;
3. Determinação da média dos valores de intervalos entre vales consecutivos: tal valor é considerado o período da envoltória em questão;
4. Execução de um analisador *lock-in* da envoltória dos picos do sinal de corrente para a determinação da componente de escorregamento, de janela entre 0 Hz e o valor do máximo escorregamento, incremento de 0,01 Hz;

5. Execução de uma de um analisador *lock-in* do sinal de corrente para a determinação da frequência de alimentação, de janela em torno da frequência fundamental, com limites de 2 Hz, incremento de 0,01 Hz;
6. Subtração, do valor da frequência de alimentação, do valor da frequência de escorregamento.

Proposta 29: Analisador *lock-in* dos sinais de picos e vales da corrente

De maneira semelhante a outras propostas, os sinais obtidos nas duas propostas anteriores podem ser combinados.

Propostas de medição da frequência rotacional pelo sinal de pressão

Proposta 30: Transformada de Fourier

A utilização da transformada de Fourier também é possível, a fim de determinar a frequência rotacional do compressor. Para tanto, o seguinte algoritmo é proposto:

1. Amostragem do sinal de pressão;
2. Remoção da componente de frequência igual a 0;
3. Execução de uma FFT do sinal.

Proposta 31: Transformada de Fourier e zero padding

A técnica de *zero padding* é empregada pela proposta 31, a qual apresenta o seguinte algoritmo:

1. Amostragem do sinal de pressão;
2. Remoção da componente de frequência igual a 0;

3. Execução de *zero padding* no sinal. O número de pontos adicionados é suficiente para elevar a quantidade de pontos analisada até a segunda potência de 2 acima do mesmo;
4. Execução de uma FFT do sinal.

Proposta 32: Analisador *lock-in*

A última alternativa proposta é o emprego do analisador *lock-in* para a detecção da componente relativa à frequência rotacional do compressor. Dessa forma, o seguinte algoritmo é proposto:

1. Amostragem do sinal de pressão;
2. Remoção da componente de frequência igual a 0;
3. Execução de um amplificador *lock-in* com o sinal de entrada com frequência igual à menor frequência do intervalo (frequência de alimentação menos o valor do máximo escorregamento) Hz;
4. Incremento de 0,01 Hz na frequência do sinal de referência;
5. Caso a frequência do sinal de referência seja maior do que a máxima do intervalo – frequência de alimentação adicionada de uma unidade, a etapa 6 deve ser executada. Caso contrário, retorna-se à etapa 3, com o sinal de referência atualizado;
6. Identificação da frequência do sinal de referência de máximo valor de saída.

APÊNDICE II

Nas páginas seguintes estão apresentados os valores de erro máximo obtido para cada método de medição avaliado. Os valores de erros são apresentados em rpm.

a) Valores obtidos para a medição através da análise de componentes de excentricidade presentes no sinal de corrente: 59 Hz

Tempo de Aquisição	Frequência Padrão		CZT		FFT Módulo Hilbert		FFT Fase Hilbert		FFT + ZP Módulo Hilbert	
	Valor Lido	Erro - média	Valor Lido	Erro	Valor Lido	Erro	Valor Lido	Erro	Valor Lido	Erro
1 s	3548,87	0,62	3553,50	4,63	3540,00	-8,87	3540,00	-8,87	3559,57	10,70
	3548,83	0,58	3546,60	-2,23	3540,00	-8,83	3540,00	-8,83	3537,60	-11,23
	3548,52	0,27	3557,70	9,18	3540,00	-8,52	3540,00	-8,52	3559,57	11,05
	3548,22	-0,04	3540,00	-8,22	3540,00	-8,22	3540,00	-8,22	3537,60	-10,62
	3547,87	-0,38	3532,20	-15,67	3540,00	-7,87	3540,00	-7,87	3537,60	-10,27
	3547,92	-0,33	3557,10	9,18	3540,00	-7,92	3540,00	-7,92	3559,57	11,65
	3548,08	-0,17	3550,50	2,42	3540,00	-8,08	3540,00	-8,08	3537,60	-10,49
	3547,95	-0,30	3551,70	3,75	3540,00	-7,95	3540,00	-7,95	3559,57	11,62
	3548,08	-0,17	3535,20	-12,88	3540,00	-8,08	3540,00	-8,08	3537,60	-10,49
	3548,18	-0,07	3554,40	6,22	3540,00	-8,18	3540,00	-8,18	3537,60	-10,59
	ValorMédio	3548,25	Tendência	-0,36	Tendência	-8,25	Tendência	-8,25	Tendência	-1,87
	Repetitividade	0,82	Repetitividade	10,20	Repetitividade	0,41	Repetitividade	0,41	Repetitividade	12,78
	Valor Máximo	3549,08	ErroMáximo	10,56	ErroMáximo	8,67	ErroMáximo	8,67	ErroMáximo	14,65

Tempo de Aquisição	FFT + ZP Fase Hilbert		FFTInt Módulo Hilbert		FFTInt Fase Hilbert		CZT Módulo Hilbert		CZT Fase Hilbert	
	Valor Lido	Erro	Valor Lido	Erro	Valor Lido	Erro	Valor Lido	Erro	Valor Lido	Erro
1 s	3552,54	3,67	3548,26	-0,61	3557,25	8,38	3549,90	1,03	3547,50	-1,37
	3552,54	3,71	3552,07	3,24	3561,46	12,63	3546,90	-1,93	3545,10	-3,73
	3552,54	4,02	3547,74	-0,78	3554,88	6,36	3549,00	0,48	3547,50	-1,02
	3552,54	4,32	3547,35	-0,87	3537,18	-11,04	3548,10	-0,12	3551,10	2,88
	3552,54	4,67	3550,86	2,99	3546,35	-1,52	3548,10	0,23	3549,00	1,13
	3552,54	4,62	3547,56	-0,35	3555,61	7,69	3548,10	0,18	3547,20	-0,72
	3552,54	4,46	3548,04	-0,05	3558,16	10,08	3548,40	0,32	3545,70	-2,38
	3552,54	4,58	3546,62	-1,33	3555,95	7,99	3547,50	-0,45	3548,10	0,15
	3552,54	4,46	3552,20	4,12	3558,24	10,16	3546,30	-1,78	3545,40	-2,68
	3552,54	4,36	3553,24	5,06	3556,99	8,81	3547,80	-0,38	3547,50	-0,68
	Tendência	4,29	Tendência	1,14	Tendência	5,95	Tendência	-0,24	Tendência	-0,84
	Repetitividade	0,41	Repetitividade	2,73	Repetitividade	7,96	Repetitividade	1,08	Repetitividade	2,17
	ErroMáximo	4,70	ErroMáximo	3,88	ErroMáximo	13,91	ErroMáximo	1,32	ErroMáximo	3,02

Tempo de Aquisição	Lockin		Lockin Módulo Hilbert		Lockin Fase Hilbert	
	Valor Lido	Erro	Valor Lido	Erro	Valor Lido	Erro
1 s	3541,80	-7,07	3546,00	-2,87	3549,60	0,73
	3544,20	-4,63	3551,40	2,57	3555,00	6,17
	3555,00	6,48	3544,80	-3,72	3528,60	-19,92
	3546,00	-2,22	3561,60	13,38	3550,80	2,58
	3547,80	-0,07	3549,00	1,13	3553,80	5,93
	3552,00	4,08	3544,80	-3,12	3528,60	-19,32
	3541,20	-6,88	3540,00	-8,08	3535,20	-12,88
	3546,60	-1,35	3547,20	-0,75	3540,00	-7,95
	3547,20	-0,88	3543,60	-4,48	3548,40	0,32
	3549,00	0,82	3559,80	11,62	3562,80	14,62
	Tendência	-1,17	Tendência	0,57	Tendência	-2,97
Repetitividade	4,94	Repetitividade	7,88	Repetitividade	13,09	
ErroMáximo	6,12	ErroMáximo	8,44	ErroMáximo	16,06	

Tempo de Aquisição	Frequência Padrão		CZT		FFT Módulo Hilbert		FFT Fase Hilbert		FFT + ZP Módulo Hilbert	
	Valor Lido	Erro - média	Valor Lido	Erro	Valor Lido	Erro	Valor Lido	Erro	Valor Lido	Erro
2 s	3548,125	-0,147	3547,80	-0,32	3540,00	-8,12	3540,00	-8,12	3548,58	0,46
	3548,132	-0,141	3545,40	-2,73	3540,00	-8,13	3540,00	-8,13	3548,58	0,45
	3548,210	-0,063	3549,00	0,79	3540,00	-8,21	3540,00	-8,21	3548,58	0,37
	3548,336	0,064	3548,10	-0,24	3540,00	-8,34	3540,00	-8,34	3548,58	0,25
	3548,390	0,118	3549,60	1,21	3540,00	-8,39	3540,00	-8,39	3548,58	0,19
	3548,434	0,162	3549,30	0,87	3540,00	-8,43	3540,00	-8,43	3548,58	0,15
	3548,315	0,043	3549,30	0,99	3540,00	-8,31	3540,00	-8,31	3548,58	0,27
	3548,263	-0,010	3544,80	-3,46	3540,00	-8,26	3540,00	-8,26	3548,58	0,32
	3548,249	-0,024	3546,30	-1,95	3540,00	-8,25	3540,00	-8,25	3548,58	0,34
	3548,269	-0,003	3549,60	1,33	3540,00	-8,27	3540,00	-8,27	3548,58	0,31
	ValorMédio	3548,272	Tendência	-0,35	Tendência	-8,27	Tendência	-8,27	Tendência	0,31
Repetitividade	0,229	Repetitividade	1,99	Repetitividade	0,11	Repetitividade	0,11	Repetitividade	0,11	
ValorMáximo	3548,501	ErroMáximo	2,34	ErroMáximo	8,39	ErroMáximo	8,39	ErroMáximo	0,43	

Tempo de Aquisição	FFT + ZP Fase Hilbert		FFTInt Módulo Hilbert		FFTInt Fase Hilbert		CZT Módulo Hilbert		CZT Fase Hilbert	
	Valor Lido	Erro	Valor Lido	Erro	Valor Lido	Erro	Valor Lido	Erro	Valor Lido	Erro
2 s	3552,54	4,41	3548,38	0,25	3548,05	-0,08	3548,70	0,58	3548,70	0,58
	3552,54	4,41	3548,27	0,14	3548,53	0,39	3548,40	0,27	3548,70	0,57
	3552,54	4,33	3548,00	-0,21	3548,60	0,39	3548,10	-0,11	3549,30	1,09
	3541,55	-6,78	3548,37	0,03	3549,24	0,90	3548,10	-0,24	3549,30	0,96
	3552,54	4,15	3548,08	-0,31	3548,82	0,43	3548,40	0,01	3549,60	1,21
	3552,54	4,10	3548,63	0,20	3548,42	-0,01	3548,70	0,27	3549,30	0,87
	3552,54	4,22	3548,06	-0,25	3548,36	0,04	3548,40	0,09	3549,30	0,99
	3552,54	4,28	3548,13	-0,13	3548,98	0,72	3548,10	-0,16	3549,00	0,74
	3552,54	4,29	3548,20	-0,05	3548,88	0,63	3548,40	0,15	3549,30	1,05
	3552,54	4,27	3548,52	0,25	3548,74	0,47	3548,40	0,13	3549,00	0,73
	Tendência	3,17	Tendência	-0,01	Tendência	0,39	Tendência	0,10	Tendência	0,88
Repetitividade	3,96	Repetitividade	0,24	Repetitividade	0,36	Repetitividade	0,27	Repetitividade	0,25	
ErroMáximo	7,12	ErroMáximo	0,25	ErroMáximo	0,75	ErroMáximo	0,37	ErroMáximo	1,13	

Tempo de Aquisição	Lockin		Lockin Módulo Hilbert		Lockin Fase Hilbert	
	Valor Lido	Erro	Valor Lido	Erro	Valor Lido	Erro
2 s	3556,20	8,08	3544,20	-3,92	3544,80	-3,32
	3553,20	5,07	3543,60	-4,53	3547,80	-0,33
	3558,00	9,79	3548,40	0,19	3553,80	5,59
	3546,60	-1,74	3544,20	-4,14	3544,80	-3,54
	3543,60	-4,79	3550,80	2,41	3547,80	-0,59
	3550,20	1,77	3544,20	-4,23	3543,00	-5,43
	3541,20	-7,11	3541,80	-6,51	3546,60	-1,71
	3547,80	-0,46	3552,60	4,34	3545,40	-2,86
	3548,40	0,15	3541,80	-6,45	3541,80	-6,45
	3543,60	-4,67	3552,00	3,73	3546,60	-1,67
	Tendência	0,61	Tendência	-1,91	Tendência	-2,03
Repetitividade	6,36	Repetitividade	4,72	Repetitividade	3,75	
ErroMáximo	6,97	ErroMáximo	6,64	ErroMáximo	5,78	

Tempo de Aquisição	Frequência Padrão		CZT		FFT Módulo Hilbert		FFT Fase Hilbert		FFT + ZP Módulo	
	Valor Lido	Erro - média	Valor Lido	Erro	Valor Lido	Erro	Valor Lido	Erro	Valor Lido	Erro
3 s	3548,49	-0,19	3548,10	-0,39	3540,00	-8,49	3540,00	-8,49	3548,58	0,09
	3548,65	-0,04	3548,10	-0,55	3540,00	-8,65	3540,00	-8,65	3548,58	-0,06
	3548,52	-0,16	3548,10	-0,42	3540,00	-8,52	3540,00	-8,52	3548,58	0,06
	3548,72	0,04	3548,70	-0,02	3540,00	-8,72	3540,00	-8,72	3548,58	-0,14
	3548,83	0,14	3548,70	-0,13	3540,00	-8,83	3540,00	-8,83	3548,58	-0,24
	3548,55	-0,13	3548,40	-0,15	3540,00	-8,55	3540,00	-8,55	3548,58	0,03
	3548,73	0,05	3548,70	-0,03	3540,00	-8,73	3540,00	-8,73	3548,58	-0,14
	3548,86	0,18	3548,70	-0,16	3540,00	-8,86	3540,00	-8,86	3548,58	-0,28
	3548,69	0,01	3548,70	0,01	3540,00	-8,69	3540,00	-8,69	3548,58	-0,10
	3548,78	0,10	3548,40	-0,38	3540,00	-8,78	3540,00	-8,78	3548,58	-0,20
	ValorMédio	3548,68	Tendência	-0,22	Tendência	-8,68	Tendência	-8,68	Tendência	-0,10
Repetitividade	0,29	Repetitividade	0,22	Repetitividade	0,14	Repetitividade	0,14	Repetitividade	0,14	
Valor Máximo	3548,97	ErroMáximo	0,44	ErroMáximo	8,83	ErroMáximo	8,83	ErroMáximo	0,24	

Tempo de Aquisição	FFT + ZP Fase Hilbert		FFTInt Módulo Hilbert		FFTInt Fase Hilbert		CZT Módulo Hilbert		CZT Fase Hilbert	
	Valor Lido	Erro	Valor Lido	Erro	Valor Lido	Erro	Valor Lido	Erro	Valor Lido	Erro
3 s	3547,05	-1,44	3548,50	0,01	3549,03	0,54	3548,70	0,21	3549,30	0,81
	3547,05	-1,60	3548,87	0,23	3549,12	0,47	3548,70	0,05	3549,30	0,65
	3547,05	-1,48	3548,71	0,19	3549,07	0,55	3548,70	0,18	3549,30	0,78
	3552,54	3,82	3548,90	0,18	3549,10	0,38	3549,00	0,28	3549,90	1,18
	3552,54	3,71	3548,87	0,04	3549,42	0,59	3549,00	0,17	3549,90	1,07
	3547,05	-1,50	3548,54	-0,01	3549,30	0,75	3548,70	0,15	3549,00	0,45
	3547,05	-1,68	3548,56	-0,17	3549,52	0,79	3549,00	0,27	3549,90	1,17
	3547,05	-1,81	3548,75	-0,11	3549,70	0,85	3548,40	-0,46	3549,00	0,14
	3547,05	-1,64	3548,63	-0,05	3549,37	0,68	3548,70	0,01	3549,30	0,61
	3547,05	-1,74	3548,83	0,05	3549,61	0,83	3548,70	-0,08	3549,00	0,22
	Tendência	-0,54	Tendência	0,04	Tendência	0,64	Tendência	0,08	Tendência	0,71
Repetitividade	2,57	Repetitividade	0,15	Repetitividade	0,18	Repetitividade	0,25	Repetitividade	0,42	
ErroMáximo	3,10	ErroMáximo	0,18	ErroMáximo	0,82	ErroMáximo	0,33	ErroMáximo	1,13	

Tempo de Aquisição	Lockin		Lockin Módulo Hilbert		Lockin Fase Hilbert	
	Valor Lido	Erro	Valor Lido	Erro - instante	Valor Lido	Erro
3 s	3540,60	-7,89	3553,80	5,31	3557,40	8,91
	3540,60	-8,05	3554,40	5,75	3558,00	9,35
	3544,20	-4,32	3543,00	-5,52	3543,00	-5,52
	3556,80	8,08	3555,60	6,88	3544,20	-4,52
	3543,60	-5,23	3540,60	-8,23	3555,00	6,17
	3555,00	6,45	3541,80	-6,75	3543,60	-4,95
	3542,40	-6,33	3555,60	6,87	3543,00	-5,73
	3541,80	-7,06	3541,80	-7,06	3553,80	4,94
	3541,80	-6,89	3555,60	6,91	3558,00	9,31
	3554,40	5,62	3556,80	8,02	3543,60	-5,18
	Tendência	-2,56	Tendência	1,22	Tendência	1,28
Repetitividade	7,38	Repetitividade	7,97	Repetitividade	7,86	
ErroMáximo	9,94	ErroMáximo	9,19	ErroMáximo	9,14	

Tempo de Aquisição	Frequência Padrão		CZT		FFT Módulo Hilbert		FFT Fase Hilbert		FFT + ZP Módulo Hilbert	
	Valor Lido	Erro - média	Valor Lido	Erro	Valor Lido	Erro	Valor Lido	Erro	Valor Lido	Erro
5 s	3549,01	-0,03	3548,70	-0,31	3552,00	2,99	3552,00	2,99	3548,58	-0,43
	3549,00	-0,04	3548,40	-0,60	3552,00	3,00	3552,00	3,00	3548,58	-0,42
	3548,85	-0,19	3548,70	-0,15	3552,00	3,15	3552,00	3,15	3548,58	-0,27
	3549,08	0,04	3549,30	0,22	3552,00	2,92	3552,00	2,92	3548,58	-0,50
	3548,98	-0,06	3548,40	-0,58	3552,00	3,02	3552,00	3,02	3548,58	-0,40
	3549,08	0,04	3548,70	-0,38	3552,00	2,92	3552,00	2,92	3548,58	-0,50
	3549,17	0,13	3548,10	-1,07	3552,00	2,83	3552,00	2,83	3548,58	-0,58
	3549,07	0,03	3549,00	-0,07	3552,00	2,93	3552,00	2,93	3548,58	-0,49
	3549,09	0,05	3548,70	-0,39	3552,00	2,91	3552,00	2,91	3548,58	-0,51
	3549,07	0,03	3548,10	-0,97	3552,00	2,93	3552,00	2,93	3548,58	-0,49
	ValorMédio	3549,04	Tendência	-0,43	Tendência	2,96	Tendência	2,96	Tendência	-0,46
	Repetitividade	0,20	Repetitividade	0,45	Repetitividade	0,10	Repetitividade	0,10	Repetitividade	0,10
	ValorMáximo	3549,24	ErroMáximo	0,88	ErroMáximo	3,06	ErroMáximo	3,06	ErroMáximo	0,55

Tempo de Aquisição	FFT + ZP Fase Hilbert		FFTInt Módulo Hilbert		FFTInt Fase Hilbert		CZT Módulo Hilbert		CZT Fase Hilbert	
	Valor Lido	Erro	Valor Lido	Erro	Valor Lido	Erro	Valor Lido	Erro	Valor Lido	Erro
5 s	3552,54	3,53	3548,97	-0,05	3549,72	0,70	3549,00	-0,01	3549,90	0,89
	3547,05	-1,96	3548,95	-0,05	3549,68	0,68	3549,00	0,00	3549,90	0,90
	3547,05	-1,80	3548,90	0,05	3549,53	0,68	3548,70	-0,15	3549,60	0,75
	3547,05	-2,04	3549,14	0,06	3549,72	0,63	3548,70	-0,38	3550,20	1,12
	3547,05	-1,93	3549,03	0,05	3549,68	0,71	3549,00	0,02	3549,90	0,92
	3547,05	-2,03	3549,03	-0,05	3549,83	0,75	3549,00	-0,08	3549,90	0,82
	3552,54	3,37	3549,19	0,02	3549,95	0,78	3549,00	-0,17	3549,90	0,73
	3547,05	-2,03	3549,04	-0,03	3549,80	0,73	3549,00	-0,07	3550,20	1,13
	3547,05	-2,05	3549,08	-0,01	3549,77	0,68	3549,00	-0,09	3549,90	0,81
	3547,05	-2,02	3549,07	0,00	3549,69	0,62	3549,00	-0,07	3549,90	0,83
	Tendência	-0,90	Tendência	0,00	Tendência	0,70	Tendência	-0,10	Tendência	0,89
Repetitividade	2,59	Repetitividade	0,05	Repetitividade	0,06	Repetitividade	0,13	Repetitividade	0,16	
ErroMáximo	3,49	ErroMáximo	0,05	ErroMáximo	0,75	ErroMáximo	0,23	ErroMáximo	1,04	

Tempo de Aquisição	Lockin		Lockin Módulo Hilbert		Lockin Fase Hilbert	
	Valor Lido	Erro	Valor Lido	Erro	Valor Lido	Erro
5 s	3544,80	-4,21	3555,00	5,99	3553,80	4,79
	3552,60	3,60	3545,40	-3,60	3544,20	-4,80
	3544,20	-4,65	3543,00	-5,85	3553,80	4,95
	3543,60	-5,48	3544,80	-4,28	3555,00	5,92
	3543,60	-5,38	3544,20	-4,78	3554,40	5,42
	3542,40	-6,68	3556,80	7,72	3544,80	-4,28
	3543,60	-5,57	3545,40	-3,77	3544,20	-4,97
	3543,00	-6,07	3544,20	-4,87	3553,80	4,73
	3552,60	3,51	3555,00	5,91	3555,60	6,51
	3544,80	-4,27	3543,00	-6,07	3555,00	5,93
	Tendência	-3,52	Tendência	-1,36	Tendência	2,42
Repetitividade	4,30	Repetitividade	6,25	Repetitividade	5,58	
ErroMáximo	7,83	ErroMáximo	7,61	ErroMáximo	8,00	

Tempo de Aquisição	Frequência Padrão		CZT		FFT Módulo Hilbert		FFT Fase Hilbert		FFT + ZP Módulo Hilbert	
	Valor Lido	Erro - média	Valor Lido	Erro	Valor Lido	Erro	Valor Lido	Erro	Valor Lido	Erro
10 s	3549,01	0,17	3548,70	-0,31	3546,00	-3,01	3552,00	2,99	3548,58	-0,42
	3548,99	0,15	3548,40	-0,59	3552,00	3,01	3552,00	3,01	3548,58	-0,41
	3549,10	0,26	3548,70	-0,40	3552,00	2,90	3552,00	2,90	3548,58	-0,51
	3549,09	0,25	3548,70	-0,39	3552,00	2,91	3552,00	2,91	3548,58	-0,51
	3549,19	0,34	3548,70	-0,49	3552,00	2,81	3552,00	2,81	3548,58	-0,60
	3549,26	0,42	3549,00	-0,26	3552,00	2,74	3552,00	2,74	3548,58	-0,67
	3548,58	-0,26	3548,10	-0,48	3546,00	-2,58	3552,00	3,42	3548,58	0,00
	3548,77	-0,08	3548,40	-0,37	3546,00	-2,77	3552,00	3,23	3548,58	-0,18
	3548,40	-0,44	3548,10	-0,30	3546,00	-2,40	3552,00	3,60	3548,58	0,19
	3548,03	-0,81	3547,80	-0,23	3546,00	-2,03	3546,00	-2,03	3548,58	0,56
	ValorMédio	3548,84	Tendência	-0,38	Tendência	0,16	Tendência	2,56	Tendência	-0,26
Repetitividade	0,89	Repetitividade	0,13	Repetitividade	3,25	Repetitividade	1,85	Repetitividade	0,45	
ValorMáximo	3549,73	ErroMáximo	0,51	ErroMáximo	3,41	ErroMáximo	4,41	ErroMáximo	0,70	

Tempo de Aquisição	FFT + ZP Fase Hilbert		FFTInt Módulo Hilbert		FFTInt Fase Hilbert		CZT Módulo Hilbert		CZT Fase Hilbert	
	Valor Lido	Erro - instante	Valor Lido	Erro	Valor Lido	Erro	Valor Lido	Erro	Valor Lido	Erro
10 s	3549,79	0,79	3549,00	-0,01	3549,71	0,70	3549,00	-0,01	3549,90	0,89
	3549,79	0,80	3549,00	0,01	3549,70	0,71	3549,00	0,01	3549,60	0,61
	3549,79	0,70	3549,10	0,00	3549,80	0,70	3549,00	-0,10	3549,90	0,80
	3549,79	0,70	3549,10	0,00	3549,82	0,72	3549,00	-0,09	3549,90	0,81
	3549,79	0,61	3549,18	-0,01	3549,89	0,71	3549,00	-0,19	3549,90	0,71
	3549,79	0,54	3549,27	0,01	3549,97	0,71	3549,30	0,04	3549,90	0,64
	3549,79	1,21	3548,59	0,01	3549,30	0,72	3548,40	-0,18	3549,30	0,72
	3549,79	1,03	3548,74	-0,03	3549,44	0,67	3548,70	-0,07	3549,60	0,83
	3549,79	1,40	3548,38	-0,02	3549,12	0,72	3548,40	0,00	3549,00	0,60
	3549,79	1,77	3547,96	-0,06	3548,68	0,65	3547,80	-0,23	3548,70	0,67
	Tendência	0,95	Tendência	-0,01	Tendência	0,70	Tendência	-0,08	Tendência	0,73
Repetitividade	0,45	Repetitividade	0,03	Repetitividade	0,03	Repetitividade	0,11	Repetitividade	0,11	
ErroMáximo	1,40	ErroMáximo	0,03	ErroMáximo	0,73	ErroMáximo	0,19	ErroMáximo	0,84	

Tempo de Aquisição	Lockin		Lockin Módulo Hilbert		Lockin Fase Hilbert	
	Valor Lido	Erro - instante	Valor Lido	Erro - instante	Valor Lido	Erro
10 s	3544,80	-4,21	3552,00	2,99	3547,20	-1,81
	3551,40	2,41	3552,60	3,61	3552,00	3,01
	3546,00	-3,10	3547,20	-1,90	3546,60	-2,50
	3546,00	-3,09	3546,00	-3,09	3552,00	2,91
	3545,40	-3,79	3546,00	-3,19	3547,20	-1,99
	3544,80	-4,46	3546,60	-2,66	3547,20	-2,06
	3550,80	2,22	3552,00	3,42	3553,20	4,62
	3545,40	-3,37	3545,40	-3,37	3552,00	3,23
	3546,00	-2,40	3544,80	-3,60	3552,00	3,60
	3544,20	-3,83	3551,40	3,37	3551,40	3,37
	Tendência	-2,36	Tendência	-0,44	Tendência	1,24
	Repetitividade	2,86	Repetitividade	3,73	Repetitividade	3,29
ErroMáximo	5,23	ErroMáximo	4,17	ErroMáximo	4,53	

b) Valores obtidos para a medição através da análise de componentes de excentricidade presentes no sinal de corrente: 58 Hz

Tempo de Aquisição	Frequência Padrão		CZT		FFT Módulo Hilbert		FFT Fase Hilbert		FFT + ZP Módulo	
	Valor Lido	Erro - média	Valor Lido	Erro	Valor Lido	Erro	Valor Lido	Erro	Valor Lido	Erro
1 s	3481,26	1,94	3497,70	16,44	3480,00	-1,26	3480,00	-1,26	3471,68	-9,58
	3483,24	3,92	3466,20	-17,04	3480,00	-3,24	3480,00	-3,24	3471,68	-11,56
	3482,10	2,78	3490,50	8,40	3480,00	-2,10	3480,00	-2,10	3493,65	11,55
	3479,58	0,26	3465,30	-14,28	3480,00	0,42	3480,00	0,42	3471,68	-7,90
	3482,68	3,36	3495,60	12,92	3480,00	-2,68	3480,00	-2,68	3493,65	10,97
	3478,28	-1,04	3464,40	-13,88	3480,00	1,72	3480,00	1,72	3471,68	-6,60
	3478,05	-1,27	3470,10	-7,95	3480,00	1,95	3480,00	1,95	3471,68	-6,37
	3476,21	-3,11	3495,30	19,09	3480,00	3,79	3480,00	3,79	3471,68	-4,53
	3476,20	-3,12	3490,20	14,00	3480,00	3,80	3480,00	3,80	3471,68	-4,52
	3475,60	-3,72	3461,40	-14,20	3480,00	4,40	3480,00	4,40	3471,68	-3,92
	ValorMédio	3479,32	Tendência	0,35	Tendência	0,68	Tendência	0,68	Tendência	-3,25
	Repetitividade	6,49	Repetitividade	16,94	Repetitividade	3,25	Repetitividade	3,25	Repetitividade	9,05
ValorMáximo	3485,81	ErroMáximo	17,29	ErroMáximo	3,93	ErroMáximo	3,93	ErroMáximo	12,30	

Tempo de Aquisição	FFT + ZP Fase Hilbert		FFTInt Módulo Hilbert		FFTInt Fase Hilbert		CZT Módulo Hilbert		CZT Fase Hilbert	
	Valor Lido	Erro	Valor Lido	Erro	Valor Lido	Erro	Valor Lido	Erro	Valor Lido	Erro
1 s	3486,62	5,36	3482,18	0,91	3482,90	1,64	3480,60	-0,66	3482,10	0,84
	3486,62	3,38	3482,70	-0,53	3484,11	0,88	3482,10	-1,14	3483,30	0,06
	3486,62	4,52	3481,37	-0,73	3481,51	-0,59	3482,70	0,60	3483,60	1,50
	3486,62	7,05	3479,39	-0,18	3481,86	2,29	3478,50	-1,08	3480,00	0,42
	3486,62	3,94	3483,94	1,26	3484,81	2,12	3481,80	-0,88	3484,20	1,52
	3486,62	8,34	3478,52	0,25	3480,29	2,01	3476,10	-2,18	3479,70	1,42
	3486,62	8,57	3478,05	0,00	3479,59	1,54	3477,90	-0,15	3480,00	1,95
	3486,62	10,41	3475,62	-0,60	3476,46	0,24	3474,60	-1,61	3477,00	0,79
	3464,65	-11,55	3475,96	-0,24	3476,82	0,62	3476,40	0,20	3476,10	-0,10
	3486,62	11,02	3475,41	-0,19	3476,27	0,67	3477,00	1,40	3475,80	0,20
	Tendência	5,10	Tendência	-0,01	Tendência	1,14	Tendência	-0,55	Tendência	0,86
	Repetitividade	7,27	Repetitividade	0,73	Repetitividade	1,05	Repetitividade	1,21	Repetitividade	0,80
ErroMáximo	12,37	ErroMáximo	0,74	ErroMáximo	2,19	ErroMáximo	1,76	ErroMáximo	1,66	

Tempo de Aquisição	Lockin		Lockin Módulo Hilbert		Lockin Fase Hilbert	
	Valor Lido	Erro	Valor Lido	Erro	Valor Lido	Erro
1 s	3469,20	-12,06	3474,60	-6,66	3481,80	0,54
	3482,40	-0,84	3478,80	-4,44	3497,40	14,16
	3468,60	-13,50	3476,40	-5,70	3487,20	5,10
	3473,40	-6,18	3483,00	3,42	3495,60	16,02
	3482,40	-0,28	3478,20	-4,48	3496,80	14,12
	3475,80	-2,48	3482,40	4,12	3482,40	4,12
	3477,00	-1,05	3475,20	-2,85	3481,80	3,75
	3477,60	1,39	3480,00	3,79	3483,60	7,39
	3468,60	-7,60	3467,40	-8,80	3482,40	6,20
	3473,40	-2,20	3469,20	-6,40	3490,20	14,60
	Tendência	-4,48	Tendência	-2,80	Tendência	8,60
Repetitividade	5,81	Repetitividade	5,44	Repetitividade	6,31	
ErroMáximo	10,29	ErroMáximo	8,24	ErroMáximo	14,91	

Tempo de Aquisição	Frequência Padrão		CZT		FFT Módulo Hilbert		FFT Fase Hilbert		FFT + ZP Módulo Hilbert	
	Valor Lido	Erro - média	Valor Lido	Erro	Valor Lido	Erro	Valor Lido	Erro	Valor Lido	Erro
2 s	3474,33	3,46	3470,10	-4,23	3480,00	5,67	3480,00	5,67	3471,68	-2,65
	3473,49	2,62	3477,00	3,51	3480,00	6,51	3480,00	6,51	3471,68	-1,81
	3472,14	1,27	3469,20	-2,94	3480,00	7,86	3480,00	7,86	3471,68	-0,46
	3472,69	1,82	3474,00	1,31	3480,00	7,31	3480,00	7,31	3471,68	-1,01
	3469,87	-1,00	3467,40	-2,47	3480,00	10,13	3480,00	10,13	3471,68	1,81
	3472,71	1,84	3473,70	0,99	3480,00	7,29	3480,00	7,29	3471,68	-1,03
	3471,51	0,64	3478,80	7,29	3480,00	8,49	3480,00	8,49	3471,68	0,17
	3468,54	-2,33	3467,10	-1,44	3480,00	11,46	3480,00	11,46	3471,68	3,14
	3466,35	-4,52	3465,90	-0,45	3480,00	13,65	3480,00	13,65	3471,68	5,33
	3467,07	-3,80	3465,90	-1,17	3480,00	12,93	3480,00	12,93	3471,68	4,61
	ValorMédio	3470,87	Tendência	0,04	Tendência	9,13	Tendência	9,13	Tendência	0,81
Repetitividade	6,26	Repetitividade	3,85	Repetitividade	3,13	Repetitividade	3,13	Repetitividade	3,13	
ValorMáximo	3477,13	ErroMáximo	3,89	ErroMáximo	12,26	ErroMáximo	12,26	ErroMáximo	3,94	

Tempo de Aquisição	FFT + ZP Fase Hilbert		FFTInt Módulo Hilbert		FFTInt Fase Hilbert		CZT Módulo Hilbert		CZT Fase Hilbert	
	Valor Lido	Erro	Valor Lido	Erro	Valor Lido	Erro	Valor Lido	Erro	Valor Lido	Erro
2 s	3475,63	1,30	3474,55	0,21	3475,02	0,69	3474,60	0,27	3474,90	0,57
	3475,63	2,15	3473,07	-0,42	3474,42	0,94	3473,40	-0,09	3474,00	0,51
	3475,63	3,50	3472,34	0,21	3473,14	1,01	3472,20	0,06	3472,80	0,66
	3475,63	2,94	3472,75	0,05	3473,11	0,41	3473,10	0,41	3473,40	0,71
	3475,63	5,76	3470,02	0,15	3470,59	0,72	3470,40	0,53	3470,70	0,83
	3475,63	2,93	3472,41	-0,30	3473,37	0,66	3473,10	0,39	3473,10	0,39
	3475,63	4,13	3471,26	-0,25	3472,26	0,76	3470,70	-0,81	3472,20	0,69
	3464,65	-3,89	3468,56	0,02	3469,43	0,88	3468,30	-0,24	3469,50	0,96
	3464,65	-1,70	3466,23	-0,12	3466,73	0,38	3466,80	0,45	3466,80	0,45
	3464,65	-2,42	3467,01	-0,05	3467,69	0,62	3467,40	0,33	3467,70	0,63
	Tendência	1,47	Tendência	-0,05	Tendência	0,71	Tendência	0,13	Tendência	0,64
	Repetitividade	3,54	Repetitividade	0,25	Repetitividade	0,23	Repetitividade	0,47	Repetitividade	0,19
ErroMáximo	5,01	ErroMáximo	0,30	ErroMáximo	0,94	ErroMáximo	0,60	ErroMáximo	0,83	

Tempo de Aquisição	Lockin		Lockin Módulo Hilbert		Lockin Fase Hilbert	
	Valor Lido	Erro	Valor Lido	Erro	Valor Lido	Erro
2 s	3484,20	9,87	3467,40	-6,93	3481,80	7,47
	3473,40	-0,09	3465,60	-7,89	3481,20	7,71
	3478,20	6,06	3469,80	-2,34	3486,60	14,46
	3466,20	-6,49	3472,80	0,11	3483,00	10,31
	3458,40	-11,47	3466,20	-3,67	3483,60	13,73
	3473,40	0,69	3470,40	-2,31	3483,60	10,89
	3466,20	-5,31	3478,80	7,29	3483,60	12,09
	3458,40	-10,14	3473,40	4,86	3483,00	14,46
	3470,40	4,05	3471,00	4,65	3480,60	14,25
	3478,80	11,73	3459,00	-8,07	3486,60	19,53
	Tendência	-0,11	Tendência	-1,43	Tendência	12,49
	Repetitividade	9,18	Repetitividade	6,28	Repetitividade	4,09
ErroMáximo	9,29	ErroMáximo	7,71	ErroMáximo	16,58	

Tempo de Aquisição	Frequência Padrão		CZT		FFT Módulo Hilbert		FFT Fase Hilbert		FFT + ZP Módulo Hilbert	
	Valor Lido	Erro - média	Valor Lido	Erro	Valor Lido	Erro	Valor Lido	Erro	Valor Lido	Erro
3 s	3466,04	4,79	3463,80	-2,24	3460,00	-6,04	3460,00	-6,04	3466,19	0,15
	3465,81	4,57	3466,80	0,99	3460,00	-5,81	3460,00	-5,81	3466,19	0,37
	3464,24	3,00	3464,10	-0,14	3460,00	-4,24	3460,00	-4,24	3466,19	1,95
	3462,15	0,91	3459,60	-2,55	3460,00	-2,15	3460,00	-2,15	3460,69	-1,46
	3462,64	1,40	3464,40	1,76	3460,00	-2,64	3460,00	-2,64	3460,69	-1,95
	3461,20	-0,04	3461,70	0,50	3460,00	-1,20	3460,00	-1,20	3460,69	-0,51
	3458,55	-2,69	3459,60	1,05	3460,00	1,45	3460,00	1,45	3460,69	2,14
	3457,64	-3,60	3455,40	-2,24	3460,00	2,36	3460,00	2,36	3455,20	-2,44
	3458,08	-3,16	3460,80	2,72	3460,00	1,92	3460,00	1,92	3455,20	-2,88
	3456,05	-5,19	3457,50	1,45	3460,00	3,95	3460,00	3,95	3455,20	-0,85
	ValorMédio	3461,24	Tendência	0,13	Tendência	-1,24	Tendência	-1,24	Tendência	-0,55
Repetitividade	8,01	Repetitividade	2,11	Repetitividade	4,00	Repetitividade	4,00	Repetitividade	1,95	
ValorMáximo	3469,25	ErroMáximo	2,24	ErroMáximo	5,25	ErroMáximo	5,25	ErroMáximo	2,50	

Tempo de Aquisição	FFT + ZP Fase Hilbert		FFTInt Módulo Hilbert		FFTInt Fase Hilbert		CZT Módulo Hilbert		CZT Fase Hilbert	
	Valor Lido	Erro	Valor Lido	Erro	Valor Lido	Erro	Valor Lido	Erro	Valor Lido	Erro
3 s	3464,65	-1,39	3465,88	-0,16	3466,82	0,78	3465,90	-0,14	3466,80	0,76
	3464,65	-1,17	3465,79	-0,02	3466,65	0,83	3465,90	0,09	3466,80	0,99
	3464,65	0,41	3464,15	-0,09	3464,83	0,59	3464,10	-0,14	3465,00	0,76
	3464,65	2,50	3461,83	-0,32	3462,53	0,38	3462,00	-0,15	3462,60	0,45
	3464,65	2,01	3462,35	-0,29	3462,94	0,29	3462,60	-0,04	3463,20	0,56
	3464,65	3,44	3461,37	0,17	3462,09	0,89	3460,80	-0,40	3462,00	0,80
	3459,16	0,60	3458,59	0,04	3459,12	0,57	3458,70	0,15	3459,00	0,45
	3459,16	1,51	3457,40	-0,25	3458,16	0,51	3457,20	-0,44	3458,40	0,76
	3459,16	1,07	3457,99	-0,09	3458,76	0,68	3458,10	0,02	3459,00	0,92
	3459,16	3,10	3455,92	-0,13	3456,57	0,52	3455,70	-0,35	3456,90	0,85
	Tendência	1,21	Tendência	-0,11	Tendência	0,60	Tendência	-0,14	Tendência	0,73
Repetitividade	1,86	Repetitividade	0,17	Repetitividade	0,22	Repetitividade	0,23	Repetitividade	0,21	
ErroMáximo	3,07	ErroMáximo	0,28	ErroMáximo	0,82	ErroMáximo	0,37	ErroMáximo	0,94	

Tempo de Aquisição	Lockin		Lockin Módulo Hilbert		Lockin Fase Hilbert	
	Valor Lido	Erro	Valor Lido	Erro	Valor Lido	Erro
3 s	3468,60	2,56	3472,20	6,16	3482,40	16,36
	3472,20	6,39	3461,40	-4,41	3481,80	15,99
	3471,00	6,76	3469,80	5,56	3493,20	28,96
	3470,40	8,25	3469,20	7,05	3490,80	28,65
	3469,20	6,56	3457,80	-4,84	3495,00	32,36
	3454,20	-7,00	3466,80	5,60	3493,80	32,60
	3452,40	-6,15	3451,20	-7,35	3489,00	30,45
	3462,60	4,96	3450,00	-7,64	3484,80	27,16
	3451,80	-6,28	3450,60	-7,48	3490,20	32,12
	3447,60	-8,45	3450,60	-5,45	3487,20	31,15
	Tendência	0,76	Tendência	-1,28	Tendência	27,58
Repetitividade	7,73	Repetitividade	7,30	Repetitividade	7,08	
ErroMáximo	8,49	ErroMáximo	8,58	ErroMáximo	34,66	

Tempo de Aquisição	Frequência Padrão		CZT		FFT Módulo Hilbert		FFT Fase Hilbert		FFT + ZP Módulo Hilbert	
	Valor Lido	Erro - média	Valor Lido	Erro	Valor Lido	Erro	Valor Lido	Erro	Valor Lido	Erro
5 s	3455,46	5,50	3455,10	-0,36	3456,00	0,54	3456,00	0,54	3455,20	-0,26
	3454,28	4,32	3453,60	-0,68	3456,00	1,72	3456,00	1,72	3455,20	0,92
	3450,75	0,79	3450,60	-0,15	3456,00	5,25	3456,00	5,25	3449,71	-1,04
	3450,74	0,78	3451,50	0,76	3456,00	5,26	3456,00	5,26	3449,71	-1,03
	3450,29	0,33	3451,20	0,91	3456,00	5,71	3456,00	5,71	3449,71	-0,58
	3450,29	0,33	3449,40	-0,89	3456,00	5,71	3456,00	5,71	3449,71	-0,58
	3448,91	-1,05	3448,20	-0,71	3444,00	-4,91	3444,00	-4,91	3449,71	0,80
	3448,63	-1,33	3448,50	-0,13	3444,00	-4,63	3444,00	-4,63	3449,71	1,08
	3443,91	-6,05	3443,40	-0,51	3444,00	0,09	3444,00	0,09	3444,21	0,31
	3446,34	-3,62	3446,10	-0,24	3444,00	-2,34	3444,00	-2,34	3444,21	-2,13
	ValorMédio	3449,96	Tendência	-0,20	Tendência	1,24	Tendência	1,24	Tendência	-0,25
	Repetitividade	7,65	Repetitividade	0,68	Repetitividade	4,76	Repetitividade	4,76	Repetitividade	1,16
	ValorMáximo	3457,61	ErroMáximo	0,88	ErroMáximo	6,00	ErroMáximo	6,00	ErroMáximo	1,42

Tempo de Aquisição	FFT + ZP Fase Hilbert		FFTInt Módulo Hilbert		FFTInt Fase Hilbert		CZT Módulo Hilbert		CZT Fase Hilbert	
	Valor Lido	Erro	Valor Lido	Erro	Valor Lido	Erro	Valor Lido	Erro	Valor Lido	Erro
5 s	3453,66	-1,80	3455,41	-0,05	3456,11	0,64	3455,40	-0,06	3456,30	0,84
	3453,66	-0,62	3454,44	0,16	3455,20	0,92	3454,50	0,22	3455,40	1,12
	3453,66	2,91	3450,70	-0,04	3451,34	0,59	3450,60	-0,15	3451,50	0,75
	3453,66	2,92	3450,63	-0,11	3451,31	0,56	3450,60	-0,14	3451,50	0,76
	3453,66	3,38	3450,45	0,16	3451,06	0,77	3450,30	0,01	3451,20	0,91
	3453,66	3,37	3450,35	0,06	3451,01	0,73	3450,30	0,01	3451,20	0,91
	3448,17	-0,74	3449,07	0,16	3449,72	0,81	3448,80	-0,11	3450,00	1,09
	3448,17	-0,46	3448,62	-0,01	3449,39	0,76	3448,50	-0,13	3449,70	1,07
	3442,68	-1,23	3443,61	-0,30	3444,37	0,46	3443,70	-0,21	3444,60	0,69
	3448,17	1,83	3446,51	0,17	3447,14	0,80	3446,40	0,06	3447,30	0,96
	Tendência	0,96	Tendência	0,02	Tendência	0,70	Tendência	-0,05	Tendência	0,91
	Repetitividade	2,38	Repetitividade	0,17	Repetitividade	0,16	Repetitividade	0,14	Repetitividade	0,17
	ErroMáximo	3,34	ErroMáximo	0,19	ErroMáximo	0,86	ErroMáximo	0,19	ErroMáximo	1,08

Tempo de Aquisição	Lockin		Lockin Módulo Hilbert		Lockin Fase Hilbert	
	Valor Lido	Erro	Valor Lido	Erro	Valor Lido	Erro
5 s	3458,40	2,94	3450,00	-5,46	3490,80	35,34
	3450,00	-4,28	3450,00	-4,28	3489,00	34,72
	3457,80	7,05	3446,40	-4,35	3483,60	32,85
	3455,40	4,66	3447,00	-3,74	3483,60	32,86
	3446,40	-3,89	3447,00	-3,29	3484,80	34,51
	3442,80	-7,49	3454,20	3,91	3481,80	31,51
	3456,00	7,09	3444,00	-4,91	3483,00	34,09
	3443,40	-5,23	3444,60	-4,03	3481,80	33,17
	3438,00	-5,91	3447,00	3,09	3480,60	36,69
	3451,80	5,46	3442,20	-4,14	3483,60	37,26
	Tendência	0,04	Tendência	-2,72	Tendência	34,30
	Repetitividade	6,66	Repetitividade	3,78	Repetitividade	2,03
	ErroMáximo	6,70	ErroMáximo	6,50	ErroMáximo	36,33

Tempo de Aquisição	Frequência Padrão		CZT		FFT Módulo Hilbert		FFT Fase Hilbert		FFT + ZP Módulo Hilbert	
	Valor Lido	Erro - média	Valor Lido	Erro	Valor Lido	Erro	Valor Lido	Erro	Valor Lido	Erro
10 s	3445,87	2,45	3445,20	-0,67	3444,00	-1,87	3444,00	-1,87	3446,96	1,10
	3446,04	2,62	3445,80	-0,24	3444,00	-2,04	3444,00	-2,04	3446,96	0,92
	3445,76	2,34	3445,50	-0,26	3444,00	-1,76	3444,00	-1,76	3446,96	1,20
	3445,30	1,88	3444,90	-0,40	3444,00	-1,30	3444,00	-1,30	3444,21	-1,09
	3439,40	-4,01	3438,90	-0,50	3438,00	-1,40	3438,00	-1,40	3438,72	-0,68
	3441,14	-2,28	3440,70	-0,44	3444,00	2,86	3444,00	2,86	3441,47	0,33
	3444,76	1,34	3444,60	-0,16	3444,00	-0,76	3444,00	-0,76	3444,21	-0,55
	3440,50	-2,92	3440,10	-0,40	3438,00	-2,50	3444,00	3,50	3441,47	0,97
	3442,60	-0,82	3441,90	-0,70	3444,00	1,40	3444,00	1,40	3441,47	-1,13
	3442,82	-0,60	3442,20	-0,62	3444,00	1,18	3444,00	1,18	3441,47	-1,35
	ValorMédio	3443,42	Tendência	-0,44	Tendência	-0,62	Tendência	-0,02	Tendência	-0,03
Repetitividade	5,57	Repetitividade	0,21	Repetitividade	2,03	Repetitividade	2,35	Repetitividade	1,17	
ValorMáximo	3448,99	ErroMáximo	0,65	ErroMáximo	2,65	ErroMáximo	2,37	ErroMáximo	1,20	

Tempo de Aquisição	FFT + ZP Fase Hilbert		FFTInt Módulo Hilbert		FFTInt Fase Hilbert		CZT Módulo Hilbert		CZT Fase Hilbert	
	Valor Lido	Erro	Valor Lido	Erro	Valor Lido	Erro	Valor Lido	Erro	Valor Lido	Erro
10 s	3445,42	-0,44	3445,87	0,01	3446,58	0,71	3445,80	-0,07	3446,70	0,83
	3448,17	2,13	3446,25	0,21	3446,97	0,93	3446,10	0,06	3447,00	0,96
	3445,42	-0,33	3445,66	-0,10	3446,31	0,56	3445,50	-0,26	3446,40	0,64
	3445,42	0,12	3445,18	-0,12	3445,92	0,62	3445,20	-0,10	3446,10	0,80
	3439,93	0,52	3439,21	-0,19	3439,91	0,50	3439,20	-0,20	3440,10	0,70
	3442,68	1,53	3441,22	0,08	3441,93	0,79	3441,00	-0,14	3441,90	0,76
	3445,42	0,66	3444,88	0,12	3445,60	0,84	3444,90	0,14	3445,50	0,74
	3439,93	-0,57	3440,69	0,19	3441,36	0,86	3440,70	0,20	3441,30	0,80
	3442,68	0,08	3442,32	-0,28	3443,04	0,44	3442,50	-0,10	3443,40	0,80
	3442,68	-0,14	3442,83	0,02	3443,53	0,72	3442,80	-0,02	3443,70	0,88
	Tendência	0,36	Tendência	-0,01	Tendência	0,70	Tendência	-0,05	Tendência	0,79
Repetitividade	1,00	Repetitividade	0,19	Repetitividade	0,18	Repetitividade	0,16	Repetitividade	0,10	
ErroMáximo	1,35	ErroMáximo	0,19	ErroMáximo	0,88	ErroMáximo	0,21	ErroMáximo	0,89	

Tempo de Aquisição	Lockin		Lockin Módulo Hilbert		Lockin Fase Hilbert	
	Valor Lido	Erro	Valor Lido	Erro	Valor Lido	Erro
10 s	3447,60	1,73	3442,80	-3,07	3481,80	35,93
	3442,20	-3,84	3443,40	-2,64	3482,40	36,36
	3448,80	3,04	3442,20	-3,56	3482,40	36,64
	3441,60	-3,70	3448,20	2,90	3480,60	35,30
	3441,60	2,20	3442,80	3,40	3480,60	41,20
	3436,80	-4,34	3444,00	2,86	3480,60	39,46
	3447,60	2,84	3441,60	-3,16	3480,60	35,84
	3436,80	-3,70	3437,40	-3,10	3480,60	40,10
	3439,20	-3,40	3438,00	-4,60	3480,60	38,00
	3439,80	-3,02	3441,00	-1,82	3482,40	39,58
	Tendência	-1,22	Tendência	-1,28	Tendência	37,84
Repetitividade	3,62	Repetitividade	3,47	Repetitividade	2,38	
ErroMáximo	4,84	ErroMáximo	4,75	ErroMáximo	40,22	

c) Valores obtidos para a medição através da identificação da frequência de escorregamento pelo sinal de corrente: 59 Hz

Tempo de Aquisição	Frequência Padrão		FFT Picos		FFT Vales		FFT Picos e Vales		FFT + ZP Picos	
	Valor Lido	Erro - média	Valor Lido	Erro	Valor Lido	Erro	Valor Lido	Erro	Valor Lido	Erro
1 s	3548,87	0,62	3540,01	-8,86	3540,00	-8,87	3540,01	-8,87	3547,27	-1,60
	3548,83	0,58	3540,01	-8,82	3538,99	-9,84	3539,50	-9,33	3547,27	-1,56
	3548,52	0,27	3540,01	-8,51	3538,98	-9,54	3539,50	-9,02	3547,27	-1,25
	3548,22	-0,04	3540,00	-8,21	3540,01	-8,21	3540,01	-8,21	3575,39	27,17
	3547,87	-0,38	3538,99	-8,88	3540,01	-7,87	3539,50	-8,37	3575,39	27,52
	3547,92	-0,33	3538,98	-8,94	3540,01	-7,91	3539,50	-8,42	3547,27	-0,65
	3548,08	-0,17	3538,99	-9,09	3540,00	-8,08	3539,50	-8,59	3547,27	-0,81
	3547,95	-0,30	3538,98	-8,97	3540,01	-7,95	3539,50	-8,46	3547,27	-0,69
	3548,08	-0,17	3540,01	-8,08	3540,00	-8,08	3540,00	-8,08	3547,27	-0,81
	3548,18	-0,07	3540,00	-8,18	3540,01	-8,18	3540,01	-8,18	3547,27	-0,91
	ValorMédio	3548,25	Tendência	-8,65	Tendência	-8,45	Tendência	-8,55	Tendência	4,64
Repetitividade	0,82	Repetitividade	0,42	Repetitividade	0,81	Repetitividade	0,46	Repetitividade	13,54	
Valor Máximo	3549,08	ErroMáximo	9,08	ErroMáximo	9,26	ErroMáximo	9,01	ErroMáximo	18,18	

Tempo de Aquisição	FFT + ZP Vales		FFT + ZP Picos e Vales		FFTInt Picos		FFTInt Vales		FFTInt Picos e Vales	
	Valor Lido	Erro	Valor Lido	Erro	Valor Lido	Erro	Valor Lido	Erro	Valor Lido	Erro
1 s	3547,27	-1,60	3547,27	-1,60	3509,52	-39,35	3500,85	-48,02	3505,19	-43,69
	3547,27	-1,56	3547,27	-1,56	3490,99	-57,84	3497,24	-51,59	3494,12	-54,71
	3547,27	-1,25	3547,27	-1,25	3511,59	-36,93	3487,13	-61,39	3499,36	-49,16
	3575,40	27,18	3575,39	27,18	3502,14	-46,08	3522,14	-26,07	3512,14	-36,07
	3575,39	27,52	3575,39	27,52	3525,85	-22,03	3501,57	-46,30	3513,71	-34,16
	3547,27	-0,65	3547,27	-0,65	3488,77	-59,15	3504,59	-43,32	3496,68	-51,24
	3547,27	-0,82	3547,27	-0,81	3509,59	-38,49	3490,01	-58,07	3499,80	-48,28
	3547,27	-0,68	3547,27	-0,68	3488,85	-59,10	3499,93	-48,02	3494,39	-53,56
	3547,27	-0,81	3547,27	-0,81	3489,15	-58,93	3517,85	-30,23	3503,50	-44,58
	3547,27	-0,91	3547,27	-0,91	3499,42	-48,77	3504,65	-43,53	3502,03	-46,15
	Tendência	4,64	Tendência	4,64	Tendência	-46,67	Tendência	-45,66	Tendência	-46,16
Repetitividade	13,54	Repetitividade	13,54	Repetitividade	14,17	Repetitividade	12,39	Repetitividade	7,74	
ErroMáximo	18,18	ErroMáximo	18,18	ErroMáximo	60,84	ErroMáximo	58,05	ErroMáximo	53,90	

Tempo de Aquisição	CZT Picos		CZT Vales		CZT Picos e Vales	
	Valor Lido	Erro	Valor Lido	Erro	Valor Lido	Erro
1 s	3534,54	-14,33	3534,72	-14,15	3534,63	-14,24
	3544,65	-4,18	3545,73	-3,10	3545,19	-3,64
	3535,11	-13,41	3532,95	-15,57	3534,03	-14,49
	3551,82	3,60	3553,98	5,76	3552,90	4,68
	3554,55	6,68	3553,11	5,24	3553,83	5,96
	3533,49	-14,43	3533,85	-14,07	3533,67	-14,25
	3535,65	-12,43	3536,19	-11,89	3535,92	-12,16
	3533,13	-14,82	3533,31	-14,64	3533,22	-14,73
	3551,64	3,56	3553,62	5,54	3552,63	4,55
	3554,16	5,98	3552,90	4,72	3553,53	5,35
	Tendência	-5,38	Tendência	-5,22	Tendência	-5,30
	Repetitividade	10,68	Repetitividade	10,98	Repetitividade	10,80
ErroMáximo	16,06	ErroMáximo	16,19	ErroMáximo	16,10	

Tempo de Aquisição	Lockin Picos		Lockin Vales		Lockin Picos e Vales	
	Valor Lido	Erro	Valor Lido	Erro	Valor Lido	Erro
1 s	3406,20	-142,67	3406,20	-142,67	3406,20	-142,67
	3404,40	-144,43	3404,40	-144,43	3404,40	-144,43
	3404,40	-144,12	3404,40	-144,12	3404,40	-144,12
	3406,20	-142,02	3406,20	-142,02	3406,20	-142,02
	3406,20	-141,67	3406,20	-141,67	3406,20	-141,67
	3404,40	-143,52	3404,40	-143,52	3404,40	-143,52
	3406,20	-141,88	3406,20	-141,88	3406,20	-141,88
	3404,40	-143,55	3404,40	-143,55	3404,40	-143,55
	3406,20	-141,88	3406,20	-141,88	3406,20	-141,88
	3405,60	-142,58	3405,60	-142,58	3405,60	-142,58
	Tendência	-142,83	Tendência	-142,83	Tendência	-142,83
	Repetitividade	1,14	Repetitividade	1,14	Repetitividade	1,14
ErroMáximo	143,97	ErroMáximo	143,97	ErroMáximo	143,97	

Tempo de Aquisição	Frequência Padrão		FFT Picos		FFT Vales		FFT Picos e Vales		FFT + ZP Picos	
	Valor Lido	Erro - média	Valor Lido	Erro	Valor Lido	Erro	Valor Lido	Erro	Valor Lido	Erro
2 s	3548,12	-0,15	3539,50	-8,62	3540,01	-8,12	3539,75	-8,37	3547,27	-0,85
	3548,13	-0,14	3540,01	-8,13	3540,01	-8,13	3540,01	-8,13	3547,27	-0,86
	3548,21	-0,06	3539,50	-8,71	3540,01	-8,20	3539,75	-8,46	3547,27	-0,94
	3548,34	0,06	3539,50	-8,83	3540,01	-8,33	3539,75	-8,58	3547,27	-1,06
	3548,39	0,12	3540,00	-8,39	3539,50	-8,89	3539,75	-8,64	3547,27	-1,12
	3548,43	0,16	3540,00	-8,43	3540,01	-8,43	3540,01	-8,43	3547,27	-1,17
	3548,31	0,04	3539,50	-8,82	3540,01	-8,31	3539,75	-8,56	3547,27	-1,05
	3548,26	-0,01	3539,50	-8,76	3540,00	-8,26	3539,75	-8,51	3547,27	-0,99
	3548,25	-0,02	3540,00	-8,24	3540,01	-8,24	3540,01	-8,24	3547,27	-0,98
	3548,27	0,00	3539,50	-8,77	3540,01	-8,26	3539,75	-8,52	3547,27	-1,00
	ValorMédio	3548,27	Tendência	-8,57	Tendência	-8,32	Tendência	-8,44	Tendência	-1,00
	Repetitividade	0,23	Repetitividade	0,29	Repetitividade	0,25	Repetitividade	0,18	Repetitividade	0,12
ValorMáximo	3548,50	ErroMáximo	8,86	ErroMáximo	8,57	ErroMáximo	8,62	ErroMáximo	1,12	

Tempo de Aquisição	FFT + ZP Vales		FFT + ZP Picos e Vales		FFTInt Picos		FFTInt Vales		FFTInt Picos e Vales	
	Valor Lido	Erro	Valor Lido	Erro	Valor Lido	Erro	Valor Lido	Erro	Valor Lido	Erro
2 s	3547,27	-0,85	3547,27	-0,85	3544,80	-3,33	3551,45	3,33	3548,12	0,00
	3547,27	-0,86	3547,27	-0,86	3544,61	-3,52	3552,42	4,29	3548,52	0,39
	3547,27	-0,94	3547,27	-0,94	3547,05	-1,16	3548,68	0,47	3547,87	-0,34
	3547,27	-1,07	3547,27	-1,07	3552,51	4,18	3543,58	-4,75	3548,05	-0,29
	3547,27	-1,12	3547,27	-1,12	3545,22	-3,17	3553,11	4,72	3549,17	0,78
	3547,27	-1,16	3547,27	-1,16	3546,41	-2,02	3549,72	1,29	3548,07	-0,37
	3547,27	-1,04	3547,27	-1,04	3547,63	-0,69	3546,88	-1,44	3547,25	-1,06
	3547,27	-1,00	3547,27	-0,99	3549,27	1,01	3548,01	-0,25	3548,64	0,38
	3547,27	-0,98	3547,27	-0,98	3545,24	-3,01	3549,81	1,56	3547,53	-0,72
	3547,27	-1,00	3547,27	-1,00	3552,39	4,12	3547,46	-0,81	3549,92	1,65
	Tendência	-1,00	Tendência	-1,00	Tendência	-0,76	Tendência	0,84	Tendência	0,04
	Repetitividade	0,11	Repetitividade	0,11	Repetitividade	3,33	Repetitividade	3,25	Repetitividade	0,89
ErroMáximo	1,11	ErroMáximo	1,12	ErroMáximo	4,09	ErroMáximo	4,09	ErroMáximo	0,93	

Tempo de Aquisição	CZT Picos		CZT Vales		CZT Picos e Vales	
	Valor Lido	Erro	Valor Lido	Erro	Valor Lido	Erro
2 s	3547,89	-0,23	3547,89	-0,23	3547,89	-0,23
	3548,07	-0,06	3547,89	-0,24	3547,98	-0,15
	3547,35	-0,86	3547,89	-0,32	3547,62	-0,59
	3547,71	-0,63	3547,89	-0,45	3547,80	-0,54
	3548,61	0,22	3547,89	-0,50	3548,25	-0,14
	3548,25	-0,18	3547,53	-0,90	3547,89	-0,54
	3547,71	-0,60	3547,89	-0,42	3547,80	-0,51
	3547,35	-0,91	3548,43	0,17	3547,89	-0,37
	3548,04	-0,21	3547,68	-0,57	3547,86	-0,39
	3547,71	-0,56	3548,25	-0,02	3547,98	-0,29
	Tendência	-0,40	Tendência	-0,35	Tendência	-0,38
	Repetitividade	0,41	Repetitividade	0,34	Repetitividade	0,19
	ErroMáximo	0,82	ErroMáximo	0,69	ErroMáximo	0,57

Tempo de Aquisição	Lockin Picos		Lockin Vales		Lockin Picos e Vales	
	Valor Lido	Erro	Valor Lido	Erro	Valor Lido	Erro
2 s	3246,60	-301,52	3246,60	-301,52	3246,60	-301,52
	3246,00	-302,13	3246,00	-302,13	3246,00	-302,13
	3246,60	-301,61	3246,60	-301,61	3246,60	-301,61
	3246,60	-301,74	3246,60	-301,74	3246,60	-301,74
	3246,00	-302,39	3246,00	-302,39	3246,00	-302,39
	3246,00	-302,43	3246,00	-302,43	3246,00	-302,43
	3246,60	-301,71	3246,60	-301,71	3246,60	-301,71
	3246,60	-301,66	3246,60	-301,66	3246,60	-301,66
	3244,80	-303,45	3244,80	-303,45	3244,80	-303,45
	3246,60	-301,67	3246,60	-301,67	3246,60	-301,67
	Tendência	-302,03	Tendência	-302,03	Tendência	-302,03
	Repetitividade	0,67	Repetitividade	0,67	Repetitividade	0,67
	ErroMáximo	302,71	ErroMáximo	302,71	ErroMáximo	302,71

Tempo de Aquisição	Frequência Padrão		FFT Picos		FFT Vales		FFT Picos e Vales		FFT + ZP Picos	
	Valor Lido	Erro - média	Valor Lido	Erro	Valor Lido	Erro	Valor Lido	Erro	Valor Lido	Erro
3 s	3548,49	-0,19	3540,01	-8,48	3540,01	-8,48	3540,01	-8,48	3541,78	-6,71
	3548,65	-0,04	3540,00	-8,64	3540,01	-8,64	3540,01	-8,64	3548,81	0,16
	3548,52	-0,16	3540,01	-8,51	3540,01	-8,52	3540,01	-8,52	3548,81	0,29
	3548,72	0,04	3540,00	-8,72	3540,01	-8,72	3540,01	-8,72	3548,81	0,08
	3548,83	0,14	3540,01	-8,82	3539,67	-9,16	3539,84	-8,99	3548,81	-0,02
	3548,55	-0,13	3540,01	-8,54	3540,00	-8,54	3540,01	-8,54	3548,81	0,26
	3548,73	0,05	3540,01	-8,72	3540,01	-8,72	3540,01	-8,72	3541,78	-6,95
	3548,86	0,18	3539,67	-9,19	3540,01	-8,85	3539,84	-9,02	3548,81	-0,05
	3548,69	0,01	3539,67	-9,02	3540,01	-8,68	3539,84	-8,85	3548,81	0,12
	3548,78	0,10	3540,00	-8,78	3540,01	-8,77	3540,01	-8,78	3548,81	0,02
	ValorMédio	3548,68	Tendência	-8,74	Tendência	-8,71	Tendência	-8,73	Tendência	-1,28
Repetitividade	0,29	Repetitividade	0,25	Repetitividade	0,22	Repetitividade	0,21	Repetitividade	3,31	
Valor Máximo	3548,97	ErroMáximo	9,00	ErroMáximo	8,93	ErroMáximo	8,94	ErroMáximo	4,59	

Tempo de Aquisição	FFT + ZP Vales		FFT + ZP Picos e Vales		FFTInt Picos		FFTInt Vales		FFTInt Picos e Vales	
	Valor Lido	Erro	Valor Lido	Erro	Valor Lido	Erro	Valor Lido	Erro	Valor Lido	Erro
3 s	3548,81	0,32	3545,29	-3,20	3548,59	0,10	3548,76	0,27	3548,67	0,18
	3548,81	0,17	3548,81	0,16	3548,94	0,30	3548,71	0,06	3548,83	0,18
	3548,81	0,29	3548,81	0,29	3549,09	0,56	3547,76	-0,76	3548,42	-0,10
	3548,81	0,09	3548,81	0,08	3548,38	-0,35	3549,53	0,80	3548,95	0,23
	3541,78	-7,05	3545,29	-3,53	3548,55	-0,27	3549,21	0,39	3548,88	0,06
	3548,81	0,26	3548,81	0,26	3548,83	0,28	3548,67	0,12	3548,75	0,20
	3548,81	0,08	3545,29	-3,44	3548,77	0,04	3548,57	-0,16	3548,67	-0,06
	3548,81	-0,05	3548,81	-0,05	3549,06	0,20	3548,16	-0,70	3548,61	-0,25
	3541,78	-6,91	3545,29	-3,40	3549,15	0,46	3548,16	-0,53	3548,66	-0,03
	3548,81	0,03	3548,81	0,03	3549,12	0,34	3548,54	-0,24	3548,83	0,05
	Tendência	-1,28	Tendência	-1,28	Tendência	0,17	Tendência	-0,08	Tendência	0,05
Repetitividade	3,40	Repetitividade	2,06	Repetitividade	0,33	Repetitividade	0,57	Repetitividade	0,18	
ErroMáximo	4,68	ErroMáximo	3,34	ErroMáximo	0,50	ErroMáximo	0,64	ErroMáximo	0,22	

Tempo de Aquisição	CZT Picos		CZT Vales		CZT Picos e Vales	
	Valor Lido	Erro	Valor Lido	Erro	Valor Lido	Erro
3 s	3547,53	-0,96	3547,53	-0,96	3547,53	-0,96
	3549,69	1,04	3549,87	1,22	3549,78	1,13
	3547,89	-0,63	3547,53	-0,99	3547,71	-0,81
	3549,15	0,43	3549,69	0,97	3549,42	0,70
	3548,25	-0,58	3548,25	-0,58	3548,25	-0,58
	3548,07	-0,48	3547,53	-1,02	3547,80	-0,75
	3548,07	-0,66	3548,25	-0,48	3548,16	-0,57
	3548,79	-0,07	3548,43	-0,43	3548,61	-0,25
	3547,53	-1,16	3547,35	-1,34	3547,44	-1,25
	3548,25	-0,53	3548,61	-0,17	3548,43	-0,35
	Tendência	-0,36	Tendência	-0,38	Tendência	-0,37
	Repetitividade	0,75	Repetitividade	0,96	Repetitividade	0,84
	ErroMáximo	1,11	ErroMáximo	1,34	ErroMáximo	1,21

Tempo de Aquisição	Lockin Picos		Lockin Vales		Lockin Picos e Vales	
	Valor Lido	Erro	Valor Lido	Erro	Valor Lido	Erro
3 s	3252,60	-295,89	3252,60	-295,89	3252,60	-295,89
	3251,40	-297,25	3251,40	-297,25	3251,40	-297,25
	3251,40	-297,12	3251,40	-297,12	3251,40	-297,12
	3251,40	-297,32	3251,40	-297,32	3251,40	-297,32
	3253,20	-295,63	3253,20	-295,63	3253,20	-295,63
	3252,60	-295,95	3252,60	-295,95	3252,60	-295,95
	3252,60	-296,13	3252,60	-296,13	3252,60	-296,13
	3309,60	-239,26	3309,60	-239,26	3309,60	-239,26
	3252,60	-296,09	3252,60	-296,09	3252,60	-296,09
	3324,00	-224,78	3309,00	-239,78	3316,50	-232,28
	Tendência	-283,54	Tendência	-285,04	Tendência	-284,29
	Repetitividade	30,96	Repetitividade	27,15	Repetitividade	28,99
	ErroMáximo	314,50	ErroMáximo	312,19	ErroMáximo	313,28

Tempo de Aquisição	Frequência Padrão		FFT Picos		FFT Vales		FFT Picos e Vales		FFT + ZP Picos	
	Valor Lido	Erro - média	Valor Lido	Erro	Valor Lido	Erro	Valor Lido	Erro	Valor Lido	Erro
5 s	3549,01	-0,03	3551,84	2,83	3552,00	2,99	3551,92	2,91	3548,81	-0,20
	3549,00	-0,04	3551,84	2,84	3552,01	3,00	3551,92	2,92	3548,81	-0,19
	3548,85	-0,19	3552,00	3,16	3552,00	3,15	3552,00	3,15	3545,29	-3,56
	3549,08	0,04	3551,85	2,76	3552,00	2,92	3551,92	2,84	3548,81	-0,27
	3548,98	-0,06	3552,01	3,03	3552,00	3,02	3552,00	3,03	3545,29	-3,68
	3549,08	0,04	3552,00	2,92	3552,01	2,93	3552,00	2,92	3545,29	-3,79
	3549,17	0,13	3552,00	2,84	3552,00	2,84	3552,00	2,84	3548,81	-0,36
	3549,07	0,03	3552,01	2,93	3552,00	2,93	3552,00	2,93	3545,29	-3,78
	3549,09	0,05	3552,00	2,91	3552,01	2,91	3552,00	2,91	3548,81	-0,29
	3549,07	0,03	3551,84	2,77	3552,01	2,94	3551,92	2,85	3545,29	-3,78
	Valor Médio	3549,04	Tendência	2,90	Tendência	2,96	Tendência	2,93	Tendência	-1,99
	Repetitividade	0,20	Repetitividade	0,14	Repetitividade	0,10	Repetitividade	0,11	Repetitividade	2,06
Valor Máximo	3549,24	Erro Máximo	3,04	Erro Máximo	3,06	Erro Máximo	3,04	Erro Máximo	4,05	

Tempo de Aquisição	FFT + ZP Vales		FFT + ZP Picos e Vales		FFTInt Picos		FFTInt Vales		FFTInt Picos e Vales	
	Valor Lido	Erro	Valor Lido	Erro	Valor Lido	Erro	Valor Lido	Erro	Valor Lido	Erro
5 s	3548,81	-0,20	3548,81	-0,20	3548,95	-0,06	3548,92	-0,09	3548,94	-0,08
	3545,29	-3,71	3547,05	-1,95	3549,03	0,03	3548,98	-0,03	3549,00	0,00
	3548,81	-0,04	3547,05	-1,80	3549,07	0,22	3548,78	-0,07	3548,93	0,08
	3545,29	-3,79	3547,05	-2,03	3549,02	-0,06	3549,17	0,09	3549,10	0,01
	3548,81	-0,17	3547,05	-1,93	3548,93	-0,05	3549,08	0,10	3549,01	0,03
	3548,81	-0,27	3547,05	-2,03	3549,11	0,03	3548,79	-0,29	3548,95	-0,13
	3548,81	-0,36	3548,81	-0,36	3549,06	-0,11	3549,34	0,17	3549,20	0,03
	3548,81	-0,27	3547,05	-2,02	3549,23	0,16	3548,96	-0,12	3549,09	0,02
	3548,81	-0,29	3548,81	-0,29	3549,13	0,04	3549,02	-0,08	3549,08	-0,02
	3548,81	-0,26	3547,05	-2,02	3548,96	-0,11	3549,12	0,05	3549,04	-0,03
	Tendência	-0,94	Tendência	-1,46	Tendência	0,01	Tendência	-0,03	Tendência	-0,01
	Repetitividade	1,68	Repetitividade	0,93	Repetitividade	0,13	Repetitividade	0,15	Repetitividade	0,07
Erro Máximo	2,62	Erro Máximo	2,39	Erro Máximo	0,14	Erro Máximo	0,18	Erro Máximo	0,07	

Tempo de Aquisição	CZT Picos		CZT Vales		CZT Picos e Vales	
	Valor Lido	Erro	Valor Lido	Erro	Valor Lido	Erro
5 s	3548,97	-0,04	3549,33	0,32	3549,15	0,14
	3549,33	0,33	3548,79	-0,21	3549,06	0,06
	3548,79	-0,06	3549,15	0,30	3548,97	0,12
	3549,15	0,07	3549,15	0,07	3549,15	0,07
	3548,97	-0,01	3549,15	0,17	3549,06	0,08
	3549,15	0,07	3549,15	0,07	3549,15	0,07
	3549,33	0,16	3549,51	0,34	3549,42	0,25
	3549,15	0,08	3549,33	0,26	3549,24	0,17
	3549,15	0,06	3549,15	0,06	3549,15	0,06
	3548,97	-0,10	3549,33	0,26	3549,15	0,08
	Tendência	0,05	Tendência	0,16	Tendência	0,11
	Repetitividade	0,14	Repetitividade	0,19	Repetitividade	0,07
	ErroMáximo	0,19	ErroMáximo	0,36	ErroMáximo	0,18

Tempo de Aquisição	Lockin Picos		Lockin Vales		Lockin Picos e Vales	
	Valor Lido	Erro	Valor Lido	Erro	Valor Lido	Erro
5 s	3242,40	-306,61	3242,40	-306,61	3242,40	-306,61
	3242,40	-306,60	3242,40	-306,60	3242,40	-306,60
	3242,40	-306,45	3242,40	-306,45	3242,40	-306,45
	3243,00	-306,08	3243,00	-306,08	3243,00	-306,08
	3242,40	-306,58	3242,40	-306,58	3242,40	-306,58
	3241,20	-307,88	3241,20	-307,88	3241,20	-307,88
	3241,20	-307,97	3241,20	-307,97	3241,20	-307,97
	3241,20	-307,87	3241,20	-307,87	3241,20	-307,87
	3241,20	-307,89	3241,20	-307,89	3241,20	-307,89
	3243,00	-306,07	3243,00	-306,07	3243,00	-306,07
	Tendência	-307,00	Tendência	-307,00	Tendência	-307,00
	Repetitividade	0,91	Repetitividade	0,91	Repetitividade	0,91
	ErroMáximo	307,91	ErroMáximo	307,91	ErroMáximo	307,91

Tempo de Aquisição	Frequência Padrão		FFT Picos		FFT Vales		FFT Picos e Vales		FFT + ZP Picos	
	Valor Lido	Erro - média	Valor Lido	Erro	Valor Lido	Erro	Valor Lido	Erro	Valor Lido	Erro
10 s	3549,01	0,17	3552,00	3,00	3552,00	3,00	3552,00	3,00	3549,80	0,79
	3548,99	0,15	3552,00	3,01	3552,01	3,01	3552,00	3,01	3549,80	0,80
	3549,10	0,26	3552,01	2,91	3552,00	2,91	3552,00	2,91	3549,80	0,70
	3549,09	0,25	3552,00	2,91	3551,92	2,83	3551,96	2,87	3549,80	0,70
	3549,19	0,34	3551,92	2,74	3552,01	2,82	3551,96	2,78	3549,80	0,61
	3549,26	0,42	3552,01	2,75	3551,92	2,67	3551,96	2,71	3549,80	0,54
	3548,58	-0,26	3551,92	3,34	3546,01	-2,58	3548,96	0,38	3549,80	1,21
	3548,77	-0,08	3551,92	3,16	3552,00	3,24	3551,96	3,20	3549,80	1,03
	3548,40	-0,44	3546,01	-2,39	3546,00	-2,39	3546,01	-2,39	3549,80	1,40
	3548,03	-0,81	3546,00	-2,02	3546,01	-2,02	3546,01	-2,02	3549,80	1,77
	ValorMédio	3548,84	Tendência	1,94	Tendência	1,35	Tendência	1,64	Tendência	0,96
	Repetitividade	0,89	Repetitividade	2,48	Repetitividade	2,88	Repetitividade	2,47	Repetitividade	0,45
ValorMáximo	3549,73	ErroMáximo	4,42	ErroMáximo	4,23	ErroMáximo	4,12	ErroMáximo	1,40	

Tempo de Aquisição	FFT + ZP Vales		FFT + ZP Picos e Vales		FFTInt Picos		FFTInt Vales		FFTInt Picos e Vales	
	Valor Lido	Erro	Valor Lido	Erro	Valor Lido	Erro	Valor Lido	Erro	Valor Lido	Erro
10 s	3549,80	0,79	3549,80	0,79	3548,98	-0,03	3548,99	-0,01	3548,99	-0,02
	3549,80	0,80	3549,80	0,80	3549,03	0,04	3548,98	-0,02	3549,01	0,01
	3549,80	0,70	3549,80	0,70	3549,14	0,04	3549,07	-0,02	3549,11	0,01
	3549,80	0,70	3549,80	0,70	3549,17	0,07	3549,02	-0,07	3549,09	0,00
	3549,80	0,61	3549,80	0,61	3549,16	-0,03	3549,23	0,04	3549,19	0,01
	3549,80	0,54	3549,80	0,54	3549,32	0,06	3549,24	-0,02	3549,28	0,02
	3549,80	1,22	3549,80	1,22	3548,78	0,20	3548,43	-0,15	3548,60	0,02
	3549,80	1,03	3549,80	1,03	3548,77	0,00	3548,75	-0,01	3548,76	-0,01
	3549,80	1,40	3549,80	1,40	3548,34	-0,06	3548,41	0,02	3548,37	-0,02
	3549,80	1,77	3549,80	1,77	3547,98	-0,04	3547,97	-0,06	3547,98	-0,05
	Tendência	0,96	Tendência	0,96	Tendência	0,03	Tendência	-0,03	Tendência	0,00
	Repetitividade	0,45	Repetitividade	0,45	Repetitividade	0,09	Repetitividade	0,06	Repetitividade	0,03
ErroMáximo	1,40	ErroMáximo	1,40	ErroMáximo	0,11	ErroMáximo	0,09	ErroMáximo	0,03	

Tempo de Aquisição	CZT Picos		CZT Vales		CZT Picos e Vales	
	Valor Lido	Erro	Valor Lido	Erro	Valor Lido	Erro
10 s	3548,97	-0,04	3549,15	0,14	3549,06	0,05
	3549,15	0,16	3548,97	-0,02	3549,06	0,07
	3549,33	0,23	3549,33	0,23	3549,33	0,23
	3549,15	0,06	3548,97	-0,12	3549,06	-0,03
	3549,33	0,14	3549,33	0,14	3549,33	0,14
	3549,33	0,07	3549,33	0,07	3549,33	0,07
	3548,97	0,39	3548,61	0,03	3548,79	0,21
	3548,79	0,02	3548,79	0,02	3548,79	0,02
	3548,61	0,21	3548,43	0,03	3548,52	0,12
	3548,07	0,04	3548,07	0,04	3548,07	0,04
	Tendência	0,13	Tendência	0,06	Tendência	0,09
	Repetitividade	0,14	Repetitividade	0,11	Repetitividade	0,09
	ErroMáximo	0,27	ErroMáximo	0,17	ErroMáximo	0,19

Tempo de Aquisição	Lockin Picos		Lockin Vales		Lockin Picos e Vales	
	Valor Lido	Erro	Valor Lido	Erro	Valor Lido	Erro
10 s	3246,60	-302,41	3244,80	-304,21	3245,70	-303,31
	3246,00	-302,99	3247,80	-301,19	3246,90	-302,09
	3250,80	-298,30	3247,80	-301,30	3249,30	-299,80
	3248,40	-300,69	3251,40	-297,69	3249,90	-299,19
	3251,40	-297,79	3248,40	-300,79	3249,90	-299,29
	3249,60	-299,66	3249,60	-299,66	3249,60	-299,66
	3249,60	-298,98	3243,60	-304,98	3246,60	-301,98
	3246,60	-302,17	3246,60	-302,17	3246,60	-302,17
	3241,80	-306,60	3240,60	-307,80	3241,20	-307,20
	3241,80	-306,23	3241,80	-306,23	3241,80	-306,23
	Tendência	-301,58	Tendência	-302,60	Tendência	-302,09
	Repetitividade	3,50	Repetitividade	3,54	Repetitividade	3,20
	ErroMáximo	305,08	ErroMáximo	306,14	ErroMáximo	305,29

d) Valores obtidos para a medição através da identificação da frequência de escorregamento pelo sinal de corrente: 58 Hz

Tempo de Aquisição	Frequência Padrão		FFT Picos		FFT Vales		FFT Picos e Vales		FFT + ZP Picos	
	Valor Lido	Erro - média	Valor Lido	Erro	Valor Lido	Erro	Valor Lido	Erro	Valor Lido	Erro
1 s	3481,26	1,94	3477,98	-3,28	3480,01	-1,25	3479,00	-2,26	3491,03	9,77
	3483,24	3,92	3480,01	-3,23	3480,01	-3,23	3480,01	-3,23	3491,03	7,79
	3482,10	2,78	3480,01	-2,09	3480,01	-2,09	3480,01	-2,09	3491,03	8,93
	3479,58	0,26	3480,01	0,44	3480,01	0,44	3480,01	0,44	3491,03	11,45
	3482,68	3,36	3480,01	-2,68	3480,02	-2,67	3480,01	-2,67	3491,02	8,34
	3478,28	-1,04	3477,98	-0,30	3480,01	1,73	3479,00	0,72	3491,03	12,75
	3478,05	-1,27	3480,01	1,96	3480,01	1,96	3480,01	1,96	3491,03	12,98
	3476,21	-3,11	3477,98	1,76	3480,01	3,80	3478,99	2,78	3491,03	14,81
	3476,20	-3,12	3480,01	3,81	3480,01	3,81	3480,01	3,81	3491,03	14,83
	3475,60	-3,72	3480,01	4,41	3477,98	2,38	3478,99	3,39	3491,03	15,43
	ValorMédio	3479,32	Tendência	0,08	Tendência	0,49	Tendência	0,29	Tendência	11,71
	Repetitividade	6,49	Repetitividade	3,24	Repetitividade	2,99	Repetitividade	3,03	Repetitividade	3,25
	ValorMáximo	3485,81	ErroMáximo	3,32	ErroMáximo	3,47	ErroMáximo	3,31	ErroMáximo	14,95

Tempo de Aquisição	FFT + ZP Vales		FFT + ZP Picos e Vales		FFTInt Picos		FFTInt Vales		FFTInt Picos e Vales	
	Valor Lido	Erro	Valor Lido	Erro	Valor Lido	Erro	Valor Lido	Erro	Valor Lido	Erro
1 s	3491,03	9,77	3491,03	9,77	3483,57	2,31	3479,35	-1,91	3481,46	0,20
	3491,03	7,79	3491,03	7,79	3492,07	8,83	3475,32	-7,91	3483,70	0,46
	3491,02	8,92	3491,03	8,92	3499,62	17,52	3471,34	-10,77	3485,48	3,37
	3491,03	11,45	3491,03	11,45	3482,36	2,79	3474,33	-5,25	3478,34	-1,23
	3491,03	8,35	3491,03	8,34	3482,34	-0,34	3482,31	-0,38	3482,32	-0,36
	3491,03	12,75	3491,03	12,75	3478,24	-0,04	3480,35	2,07	3479,29	1,02
	3491,03	12,98	3491,03	12,98	3484,28	6,23	3472,22	-5,83	3478,25	0,20
	3491,03	14,81	3491,03	14,81	3474,52	-1,70	3477,84	1,63	3476,18	-0,04
	3491,03	14,83	3491,03	14,83	3481,67	5,47	3468,66	-7,54	3475,17	-1,04
	3462,90	-12,70	3476,97	1,37	3473,38	-2,22	3478,83	3,23	3476,11	0,51
	Tendência	8,89	Tendência	10,30	Tendência	3,89	Tendência	-3,27	Tendência	0,31
	Repetitividade	9,05	Repetitividade	4,58	Repetitividade	6,78	Repetitividade	5,48	Repetitividade	1,45
	ErroMáximo	17,95	ErroMáximo	14,88	ErroMáximo	10,67	ErroMáximo	8,75	ErroMáximo	1,76

Tempo de Aquisição	CZT Picos		CZT Vales		CZT Picos e Vales	
	Valor Lido	Erro	Valor Lido	Erro	Valor Lido	Erro
1 s	3483,09	1,83	3486,33	5,07	3484,71	3,45
	3487,02	3,78	3487,20	3,96	3487,11	3,87
	3480,00	-2,10	3477,66	-4,44	3478,83	-3,27
	3481,80	2,22	3484,50	4,92	3483,15	3,57
	3478,56	-4,12	3476,94	-5,74	3477,75	-4,93
	3479,49	1,21	3484,17	5,89	3481,83	3,55
	3475,32	-2,73	3475,14	-2,91	3475,23	-2,82
	3475,89	-0,32	3472,65	-3,56	3474,27	-1,94
	3471,72	-4,48	3481,26	5,06	3476,49	0,29
	3471,75	-3,85	3473,37	-2,23	3472,56	-3,04
	Tendência	-0,86	Tendência	0,60	Tendência	-0,13
	Repetitividade	3,39	Repetitividade	5,35	Repetitividade	3,92
	ErroMáximo	4,24	ErroMáximo	5,95	ErroMáximo	4,05

Tempo de Aquisição	Lockin Picos		Lockin Vales		Lockin Picos e Vales	
	Valor Lido	Erro	Valor Lido	Erro	Valor Lido	Erro
1 s	3404,40	-76,86	3404,40	-76,86	3404,40	-76,86
	3406,20	-77,04	3406,20	-77,04	3406,20	-77,04
	3405,60	-76,50	3405,60	-76,50	3405,60	-76,50
	3406,20	-73,38	3406,20	-73,38	3406,20	-73,38
	3406,20	-76,48	3406,20	-76,48	3406,20	-76,48
	3405,60	-72,68	3405,60	-72,68	3405,60	-72,68
	3406,20	-71,85	3406,20	-71,85	3406,20	-71,85
	3404,40	-71,81	3404,40	-71,81	3404,40	-71,81
	3406,20	-70,00	3406,20	-70,00	3406,20	-70,00
	3405,60	-70,00	3405,60	-70,00	3405,60	-70,00
	Tendência	-73,66	Tendência	-73,66	Tendência	-73,66
	Repetitividade	3,20	Repetitividade	3,20	Repetitividade	3,20
	ErroMáximo	76,86	ErroMáximo	76,86	ErroMáximo	76,86

Tempo de Aquisição	Frequência Padrão		FFT Picos		FFT Vales		FFT Picos e Vales		FFT + ZP Picos	
	Valor Lido	Erro - média	Valor Lido	Erro	Valor Lido	Erro	Valor Lido	Erro	Valor Lido	Erro
2 s	3474,33	3,46	3480,01	5,68	3479,00	4,67	3479,51	5,18	3476,97	2,64
	3473,49	2,62	3479,00	5,51	3480,01	6,53	3479,51	6,02	3491,03	17,54
	3472,14	1,27	3480,01	7,88	3479,00	6,87	3479,51	7,37	3476,97	4,83
	3472,69	1,82	3480,01	7,31	3480,01	7,32	3480,01	7,32	3476,96	4,27
	3469,87	-1,00	3479,00	9,13	3480,02	10,15	3479,51	9,64	3476,96	7,09
	3472,71	1,84	3479,00	6,29	3480,01	7,31	3479,51	6,80	3476,97	4,26
	3471,51	0,64	3479,01	7,50	3480,01	8,50	3479,51	8,00	3476,97	5,46
	3468,54	-2,33	3479,01	10,46	3480,01	11,47	3479,51	10,97	3476,97	8,43
	3466,35	-4,52	3479,00	12,65	3480,01	13,66	3479,51	13,16	3462,90	-3,45
	3467,07	-3,80	3480,01	12,95	3479,00	11,94	3479,51	12,44	3476,97	9,90
	ValorMédio	3470,87	Tendência	8,54	Tendência	8,84	Tendência	8,69	Tendência	6,10
Repetitividade	6,26	Repetitividade	3,06	Repetitividade	3,22	Repetitividade	3,09	Repetitividade	6,12	
ValorMáximo	3477,13	ErroMáximo	11,59	ErroMáximo	12,06	ErroMáximo	11,78	ErroMáximo	12,22	

Tempo de Aquisição	FFT + ZP Vales		FFT + ZP Picos e Vales		FFTInt Picos		FFTInt Vales		FFTInt Picos e Vales	
	Valor Lido	Erro	Valor Lido	Erro	Valor Lido	Erro	Valor Lido	Erro	Valor Lido	Erro
2 s	3476,97	2,63	3476,97	2,63	3474,62	0,28	3474,38	0,05	3474,50	0,17
	3462,91	-10,58	3476,97	3,48	3475,81	2,32	3469,88	-3,61	3472,84	-0,65
	3476,96	4,83	3476,97	4,83	3474,27	2,13	3470,01	-2,12	3472,14	0,01
	3476,97	4,27	3476,96	4,27	3468,83	-3,87	3474,93	2,24	3471,88	-0,81
	3476,97	7,10	3476,96	7,09	3466,59	-3,28	3473,73	3,86	3470,16	0,29
	3476,97	4,26	3476,97	4,26	3471,97	-0,74	3472,49	-0,22	3472,23	-0,48
	3476,96	5,45	3476,96	5,46	3470,11	-1,40	3472,76	1,25	3471,43	-0,07
	3476,96	8,42	3476,97	8,42	3467,78	-0,76	3470,14	1,60	3468,96	0,42
	3476,97	10,62	3469,94	3,58	3466,16	-0,19	3466,44	0,09	3466,30	-0,05
	3462,90	-4,16	3469,94	2,87	3466,01	-1,06	3468,73	1,66	3467,37	0,30
	Tendência	3,28	Tendência	4,69	Tendência	-0,66	Tendência	0,48	Tendência	-0,09
	Repetitividade	7,07	Repetitividade	2,10	Repetitividade	2,25	Repetitividade	2,45	Repetitividade	0,48
	ErroMáximo	10,36	ErroMáximo	6,79	ErroMáximo	2,91	ErroMáximo	2,93	ErroMáximo	0,57

Tempo de Aquisição	CZT Picos		CZT Vales		CZT Picos e Vales	
	Valor Lido	Erro	Valor Lido	Erro	Valor Lido	Erro
2 s	3474,63	0,30	3474,09	-0,24	3474,36	0,03
	3477,69	4,20	3468,69	-4,80	3473,19	-0,30
	3469,77	-2,37	3474,63	2,49	3472,20	0,06
	3471,00	-1,69	3474,78	2,09	3472,89	0,20
	3468,69	-1,18	3471,57	1,70	3470,13	0,26
	3472,47	-0,24	3472,83	0,12	3472,65	-0,06
	3470,67	-0,84	3473,19	1,68	3471,93	0,42
	3466,89	-1,65	3470,49	1,95	3468,69	0,15
	3464,55	-1,80	3466,71	0,36	3465,63	-0,72
	3467,25	0,18	3465,27	-1,80	3466,26	-0,81
	Tendência	-0,51	Tendência	0,36	Tendência	-0,08
	Repetitividade	2,13	Repetitividade	2,54	Repetitividade	0,46
ErroMáximo	2,63	ErroMáximo	2,89	ErroMáximo	0,54	

Tempo de Aquisição	Lockin Picos		Lockin Vales		Lockin Picos e Vales	
	Valor Lido	Erro	Valor Lido	Erro	Valor Lido	Erro
2 s	3246,60	-227,73	3246,60	-227,73	3246,60	-227,73
	3246,60	-226,89	3246,60	-226,89	3246,60	-226,89
	3246,60	-225,54	3246,60	-225,54	3246,60	-225,54
	3244,80	-227,89	3244,80	-227,89	3244,80	-227,89
	3246,60	-223,27	3246,60	-223,27	3246,60	-223,27
	3246,00	-226,71	3246,00	-226,71	3246,00	-226,71
	3246,60	-224,91	3246,60	-224,91	3246,60	-224,91
	3246,00	-222,54	3246,00	-222,54	3246,00	-222,54
	3246,60	-219,75	3246,60	-219,75	3246,60	-219,75
	3246,60	-220,47	3246,60	-220,47	3246,60	-220,47
	Tendência	-224,57	Tendência	-224,57	Tendência	-224,57
	Repetitividade	3,33	Repetitividade	3,33	Repetitividade	3,33
ErroMáximo	227,90	ErroMáximo	227,90	ErroMáximo	227,90	

Tempo de Aquisição	Frequência Padrão		FFT Picos		FFT Vales		FFT Picos e Vales		FFT + ZP Picos	
	Valor Lido	Erro - média	Valor Lido	Erro	Valor Lido	Erro	Valor Lido	Erro	Valor Lido	Erro
3 s	3466,04	4,79	3460,01	-6,02	3460,01	-6,02	3460,01	-6,02	3464,44	-1,60
	3465,81	4,57	3460,01	-5,80	3459,23	-6,58	3459,62	-6,19	3464,44	-1,37
	3464,24	3,00	3460,01	-4,22	3459,23	-5,01	3459,62	-4,62	3464,44	0,20
	3462,15	0,91	3460,01	-2,14	3460,01	-2,14	3460,01	-2,14	3464,44	2,29
	3462,64	1,40	3460,01	-2,63	3460,01	-2,63	3460,01	-2,63	3464,44	1,80
	3461,20	-0,04	3460,01	-1,19	3459,23	-1,97	3459,62	-1,58	3457,41	-3,79
	3458,55	-2,69	3460,01	1,46	3460,01	1,46	3460,01	1,46	3457,41	-1,14
	3457,64	-3,60	3460,01	2,37	3459,23	1,59	3459,62	1,98	3457,41	-0,23
	3458,08	-3,16	3460,01	1,93	3459,23	1,15	3459,62	1,54	3457,41	-0,67
	3456,05	-5,19	3459,23	3,18	3460,01	3,96	3459,62	3,57	3450,38	-5,67
	ValorMédio	3461,24	Tendência	-1,31	Tendência	-1,62	Tendência	-1,46	Tendência	-1,02
Repetitividade	8,01	Repetitividade	3,87	Repetitividade	4,05	Repetitividade	3,95	Repetitividade	2,69	
ValorMáximo	3469,25	ErroMáximo	5,17	ErroMáximo	5,67	ErroMáximo	5,41	ErroMáximo	3,71	

Tempo de Aquisição	FFT + ZP Vales		FFT + ZP Picos e Vales		FFTInt Picos		FFTInt Vales		FFTInt Picos e Vales	
	Valor Lido	Erro	Valor Lido	Erro	Valor Lido	Erro	Valor Lido	Erro	Valor Lido	Erro
3 s	3464,44	-1,59	3464,44	-1,59	3466,06	0,02	3465,65	-0,39	3465,85	-0,18
	3464,44	-1,37	3464,44	-1,37	3467,07	1,26	3464,25	-1,56	3465,66	-0,15
	3464,44	0,20	3464,44	0,20	3463,93	-0,31	3464,62	0,38	3464,27	0,03
	3457,41	-4,74	3460,93	-1,22	3462,42	0,27	3461,76	-0,40	3462,09	-0,06
	3464,44	1,80	3464,44	1,80	3461,94	-0,71	3462,61	-0,04	3462,27	-0,37
	3457,41	-3,80	3457,41	-3,79	3464,39	3,18	3458,44	-2,77	3461,41	0,21
	3457,41	-1,14	3457,41	-1,14	3459,15	0,60	3458,00	-0,55	3458,57	0,02
	3457,41	-0,23	3457,41	-0,23	3457,48	-0,17	3457,02	-0,63	3457,25	-0,40
	3457,41	-0,67	3457,41	-0,67	3457,90	-0,18	3458,06	-0,02	3457,98	-0,10
	3457,41	1,36	3453,90	-2,16	3455,07	-0,98	3456,81	0,76	3455,94	-0,11
	Tendência	-1,02	Tendência	-1,02	Tendência	0,30	Tendência	-0,52	Tendência	-0,11
Repetitividade	2,32	Repetitividade	1,67	Repetitividade	1,35	Repetitividade	1,14	Repetitividade	0,21	
ErroMáximo	3,34	ErroMáximo	2,69	ErroMáximo	1,65	ErroMáximo	1,66	ErroMáximo	0,32	

Tempo de Aquisição	CZT Picos		CZT Vales		CZT Picos e Vales	
	Valor Lido	Erro	Valor Lido	Erro	Valor Lido	Erro
3 s	3465,99	-0,05	3465,63	-0,41	3465,81	-0,23
	3466,53	0,72	3465,09	-0,72	3465,81	0,00
	3464,19	-0,05	3464,55	0,31	3464,37	0,13
	3463,83	1,68	3460,41	-1,74	3462,12	-0,03
	3462,21	-0,43	3463,47	0,83	3462,84	0,20
	3461,67	0,47	3460,23	-0,97	3460,95	-0,25
	3459,51	0,96	3457,89	-0,66	3458,70	0,15
	3457,89	0,25	3458,25	0,61	3458,07	0,43
	3457,89	-0,19	3458,97	0,89	3458,43	0,35
	3455,55	-0,50	3456,63	0,58	3456,09	0,04
	Tendência	0,28	Tendência	-0,13	Tendência	0,08
	Repetitividade	0,77	Repetitividade	1,01	Repetitividade	0,25
	ErroMáximo	1,06	ErroMáximo	1,14	ErroMáximo	0,33

Tempo de Aquisição	Lockin Picos		Lockin Vales		Lockin Picos e Vales	
	Valor Lido	Erro	Valor Lido	Erro	Valor Lido	Erro
3 s	3404,40	-61,64	3404,40	-61,64	3404,40	-61,64
	3278,40	-187,41	3406,20	-59,61	3342,30	-123,51
	3406,20	-58,04	3406,20	-58,04	3406,20	-58,04
	3404,40	-57,75	3404,40	-57,75	3404,40	-57,75
	3252,60	-210,04	3277,80	-184,84	3265,20	-197,44
	3264,00	-197,20	3405,60	-55,60	3334,80	-126,40
	3404,40	-54,15	3404,40	-54,15	3404,40	-54,15
	3264,00	-193,64	3405,60	-52,04	3334,80	-122,84
	3406,20	-51,88	3406,20	-51,88	3406,20	-51,88
	3406,20	-49,85	3406,20	-49,85	3406,20	-49,85
	Tendência	-112,16	Tendência	-68,54	Tendência	-90,35
	Repetitividade	82,98	Repetitividade	46,41	Repetitividade	56,28
	ErroMáximo	195,14	ErroMáximo	114,95	ErroMáximo	146,64

Tempo de Aquisição	FFT + ZP Vales		FFT + ZP Picos e Vales		FFTInt Picos		FFTInt Vales		FFTInt Picos e Vales	
	Valor Lido	Erro - instante	Valor Lido	Erro	Valor Lido	Erro	Valor Lido	Erro	Valor Lido	Erro
5 s	3453,90	-1,57	3453,90	-1,57	3454,87	-0,59	3456,89	1,43	3455,88	0,42
	3453,90	-0,39	3453,90	-0,39	3454,16	-0,12	3454,69	0,41	3454,43	0,14
	3450,38	-0,37	3450,38	-0,37	3449,89	-0,85	3451,38	0,63	3450,64	-0,11
	3446,87	-3,87	3448,62	-2,12	3450,90	0,15	3450,32	-0,43	3450,61	-0,14
	3446,86	-3,42	3448,62	-1,66	3450,88	0,59	3450,03	-0,25	3450,46	0,17
	3446,86	-3,42	3448,62	-1,66	3450,23	-0,05	3450,50	0,21	3450,37	0,08
	3446,87	-2,04	3448,62	-0,29	3449,23	0,32	3449,04	0,13	3449,13	0,22
	3446,86	-1,76	3446,86	-1,76	3448,12	-0,51	3449,06	0,43	3448,59	-0,04
	3443,35	-0,56	3441,59	-2,31	3444,01	0,10	3443,22	-0,68	3443,62	-0,29
	3443,35	-2,99	3445,11	-1,24	3446,34	-0,01	3446,79	0,45	3446,56	0,22
	Tendência	-2,04	Tendência	-1,34	Tendência	-0,10	Tendência	0,23	Tendência	0,07
Repetitividade	1,51	Repetitividade	0,84	Repetitividade	0,50	Repetitividade	0,68	Repetitividade	0,24	
ErroMáximo	3,55	ErroMáximo	2,18	ErroMáximo	0,59	ErroMáximo	0,91	ErroMáximo	0,31	

Tempo de Aquisição	FFT + ZP Vales		FFT + ZP Picos e Vales		FFTInt Picos		FFTInt Vales		FFTInt Picos e Vales	
	Valor Lido	Erro	Valor Lido	Erro	Valor Lido	Erro	Valor Lido	Erro	Valor Lido	Erro
5 s	3453,90	-1,57	3453,90	-1,57	3454,87	-0,59	3456,89	1,43	3455,88	0,42
	3453,90	-0,39	3453,90	-0,39	3454,16	-0,12	3454,69	0,41	3454,43	0,14
	3450,38	-0,37	3450,38	-0,37	3449,89	-0,85	3451,38	0,63	3450,64	-0,11
	3446,87	-3,87	3448,62	-2,12	3450,90	0,15	3450,32	-0,43	3450,61	-0,14
	3446,86	-3,42	3448,62	-1,66	3450,88	0,59	3450,03	-0,25	3450,46	0,17
	3446,86	-3,42	3448,62	-1,66	3450,23	-0,05	3450,50	0,21	3450,37	0,08
	3446,87	-2,04	3448,62	-0,29	3449,23	0,32	3449,04	0,13	3449,13	0,22
	3446,86	-1,76	3446,86	-1,76	3448,12	-0,51	3449,06	0,43	3448,59	-0,04
	3443,35	-0,56	3441,59	-2,31	3444,01	0,10	3443,22	-0,68	3443,62	-0,29
	3443,35	-2,99	3445,11	-1,24	3446,34	-0,01	3446,79	0,45	3446,56	0,22
	Tendência	-2,04	Tendência	-1,34	Tendência	-0,10	Tendência	0,23	Tendência	0,07
Repetitividade	1,51	Repetitividade	0,84	Repetitividade	0,50	Repetitividade	0,68	Repetitividade	0,24	
ErroMáximo	3,55	ErroMáximo	2,18	ErroMáximo	0,59	ErroMáximo	0,91	ErroMáximo	0,31	

Tempo de Aquisição	CZT Picos		CZT Vales		CZT Picos e Vales	
	Valor Lido	Erro	Valor Lido	Erro	Valor Lido	Erro
5 s	3455,19	-0,27	3456,09	0,63	3455,64	0,18
	3454,29	0,01	3454,65	0,37	3454,47	0,19
	3450,15	-0,60	3451,23	0,48	3450,69	-0,06
	3451,23	0,49	3450,15	-0,59	3450,69	-0,05
	3450,33	0,04	3450,33	0,04	3450,33	0,04
	3450,69	0,40	3449,97	-0,32	3450,33	0,04
	3449,07	0,16	3448,89	-0,02	3448,98	0,07
	3448,17	-0,46	3449,07	0,44	3448,62	-0,01
	3443,85	-0,06	3444,03	0,12	3443,94	0,03
	3446,37	0,03	3446,55	0,21	3446,46	0,12
	Tendência	-0,03	Tendência	0,14	Tendência	0,06
	Repetitividade	0,39	Repetitividade	0,43	Repetitividade	0,10
	ErroMáximo	0,42	ErroMáximo	0,56	ErroMáximo	0,15

Tempo de Aquisição	Lockin Picos		Lockin Vales		Lockin Picos e Vales	
	Valor Lido	Erro	Valor Lido	Erro	Valor Lido	Erro
5 s	3417,60	-37,86	3417,60	-37,86	3417,60	-37,86
	3418,20	-36,08	3418,20	-36,08	3418,20	-36,08
	3418,20	-32,55	3418,20	-32,55	3418,20	-32,55
	3418,20	-32,54	3418,20	-32,54	3418,20	-32,54
	3417,60	-32,69	3417,60	-32,69	3417,60	-32,69
	3418,20	-32,09	3418,20	-32,09	3418,20	-32,09
	3416,40	-32,51	3416,40	-32,51	3416,40	-32,51
	3417,60	-31,03	3417,60	-31,03	3417,60	-31,03
	3416,40	-27,51	3416,40	-27,51	3416,40	-27,51
	3417,60	-28,74	3417,60	-28,74	3417,60	-28,74
	Tendência	-32,36	Tendência	-32,36	Tendência	-32,36
	Repetitividade	3,43	Repetitividade	3,43	Repetitividade	3,43
	ErroMáximo	35,79	ErroMáximo	35,79	ErroMáximo	35,79

Tempo de Aquisição	Frequência Padrão		FFT Picos		FFT Vales		FFT Picos e Vales		FFT + ZP Picos	
	Valor Lido	Erro - média	Valor Lido	Erro	Valor Lido	Erro	Valor Lido	Erro	Valor Lido	Erro
10 s	3445,87	2,45	3444,02	-1,85	3444,01	-1,85	3444,02	-1,85	3446,10	0,23
	3446,04	2,62	3444,01	-2,03	3444,02	-2,03	3444,02	-2,03	3447,85	1,81
	3445,76	2,34	3443,75	-2,00	3444,02	-1,74	3443,89	-1,87	3447,85	2,10
	3445,30	1,88	3444,02	-1,29	3444,02	-1,29	3444,02	-1,29	3446,10	0,79
	3439,40	-4,01	3438,01	-1,39	3437,75	-1,66	3437,88	-1,52	3440,82	1,42
	3441,14	-2,28	3444,02	2,87	3444,02	2,87	3444,02	2,87	3442,58	1,44
	3444,76	1,34	3444,02	-0,75	3444,01	-0,75	3444,01	-0,75	3446,10	1,34
	3440,50	-2,92	3438,02	-2,48	3443,75	3,25	3440,89	0,38	3440,82	0,32
	3442,60	-0,82	3444,01	1,41	3443,76	1,16	3443,88	1,29	3444,34	1,74
	3442,82	-0,60	3443,75	0,94	3444,02	1,20	3443,89	1,07	3444,34	1,52
	ValorMédio	3443,42	Tendência	-0,66	Tendência	-0,08	Tendência	-0,37	Tendência	1,27
	Repetitividade	5,57	Repetitividade	2,02	Repetitividade	2,30	Repetitividade	1,90	Repetitividade	0,71
	ValorMáximo	3448,99	ErroMáximo	2,68	ErroMáximo	2,38	ErroMáximo	2,27	ErroMáximo	1,98

Tempo de Aquisição	FFT + ZP Vales		FFT + ZP Picos e Vales		FFTInt Picos		FFTInt Vales		FFTInt Picos e Vales	
	Valor Lido	Erro	Valor Lido	Erro	Valor Lido	Erro	Valor Lido	Erro	Valor Lido	Erro
10 s	3447,85	1,99	3446,98	1,11	3445,90	0,04	3445,84	-0,03	3445,87	0,00
	3447,86	1,81	3447,85	1,81	3446,19	0,15	3446,31	0,27	3446,25	0,21
	3446,10	0,34	3446,98	1,22	3445,67	-0,08	3445,62	-0,13	3445,65	-0,11
	3446,10	0,79	3446,10	0,79	3445,03	-0,27	3445,31	0,01	3445,17	-0,13
	3439,07	-0,34	3439,94	0,54	3439,30	-0,10	3439,08	-0,32	3439,19	-0,21
	3442,58	1,44	3442,58	1,44	3441,19	0,05	3441,28	0,14	3441,24	0,10
	3446,10	1,34	3446,10	1,34	3444,89	0,13	3444,94	0,18	3444,92	0,15
	3440,82	0,32	3440,82	0,32	3440,66	0,16	3440,73	0,23	3440,70	0,20
	3444,34	1,74	3444,34	1,74	3442,12	-0,48	3442,51	-0,09	3442,31	-0,29
	3444,34	1,52	3444,34	1,52	3442,88	0,07	3442,84	0,02	3442,86	0,04
	Tendência	1,10	Tendência	1,18	Tendência	-0,03	Tendência	0,03	Tendência	0,00
	Repetitividade	0,88	Repetitividade	0,56	Repetitividade	0,23	Repetitividade	0,21	Repetitividade	0,20
	ErroMáximo	1,97	ErroMáximo	1,75	ErroMáximo	0,27	ErroMáximo	0,23	ErroMáximo	0,20

Tempo de Aquisição	CZT Picos		CZT Vales		CZT Picos e Vales	
	Valor Lido	Erro	Valor Lido	Erro	Valor Lido	Erro
10 s	3445,83	-0,04	3446,19	0,32	3446,01	0,14
	3446,19	0,15	3446,19	0,15	3446,19	0,15
	3446,01	0,25	3445,47	-0,29	3445,74	-0,02
	3445,29	-0,01	3445,47	0,17	3445,38	0,08
	3439,53	0,13	3439,17	-0,23	3439,35	-0,05
	3441,33	0,19	3441,15	0,01	3441,24	0,10
	3444,93	0,17	3444,93	0,17	3444,93	0,17
	3440,79	0,29	3440,61	0,11	3440,70	0,20
	3442,41	-0,19	3442,59	-0,01	3442,50	-0,10
	3442,95	0,13	3442,77	-0,05	3442,86	0,04
	Tendência	0,11	Tendência	0,03	Tendência	0,07
	Repetitividade	0,16	Repetitividade	0,21	Repetitividade	0,11
	ErroMáximo	0,27	ErroMáximo	0,25	ErroMáximo	0,18

Tempo de Aquisição	Lockin Picos		Lockin Vales		Lockin Picos e Vales	
	Valor Lido	Erro	Valor Lido	Erro	Valor Lido	Erro
10 s	3419,40	-26,47	3419,40	-26,47	3419,40	-26,47
	3418,20	-27,84	3418,20	-27,84	3418,20	-27,84
	3420,00	-25,76	3420,00	-25,76	3420,00	-25,76
	3418,20	-27,10	3418,20	-27,10	3418,20	-27,10
	3419,40	-20,00	3419,40	-20,00	3419,40	-20,00
	3418,20	-22,94	3418,20	-22,94	3418,20	-22,94
	3419,40	-25,36	3419,40	-25,36	3419,40	-25,36
	3420,00	-20,50	3420,00	-20,50	3420,00	-20,50
	3418,20	-24,40	3418,20	-24,40	3418,20	-24,40
	3419,40	-23,42	3419,40	-23,42	3419,40	-23,42
	Tendência	-24,38	Tendência	-24,38	Tendência	-24,38
	Repetitividade	3,01	Repetitividade	3,01	Repetitividade	3,01
	ErroMáximo	27,39	ErroMáximo	27,39	ErroMáximo	27,39

e) Valores obtidos para a medição através do sinal de pressão de descarga: 59 Hz

Tempo de Aquisição	Frequência Padrão		CZT		FFT	
	Valor Lido	Erro - média	Valor Lido	Erro	Valor Lido	Erro
1 s	3548,87	0,62	3549,12	0,25	3540,00	-8,87
	3548,83	0,58	3551,85	3,02	3540,00	-8,83
	3548,52	0,27	3546,39	-2,13	3540,00	-8,52
	3548,22	-0,04	3551,22	3,00	3540,00	-8,22
	3547,87	-0,38	3544,92	-2,95	3540,00	-7,87
	3547,92	-0,33	3550,80	2,88	3540,00	-7,92
	3548,08	-0,17	3551,01	2,93	3540,00	-8,08
	3547,95	-0,30	3548,49	0,54	3540,00	-7,95
	3548,08	-0,17	3546,81	-1,27	3540,00	-8,08
	3548,18	-0,07	3547,65	-0,53	3540,00	-8,18
	Valor Médio	3548,25	Tendência	0,57	Tendência	-8,25
	Repetitividade	0,82	Repetitividade	2,59	Repetitividade	0,41
Valor Máximo	3549,08	Erro Máximo	3,16	Erro Máximo	8,67	

Tempo de Aquisição	FFT + ZP		FFTInt		Lockin	
	Valor Lido	Erro	Valor Lido	Erro	Valor Lido	Erro
1 s	3559,57	10,70	3550,23	1,36	3420,00	-128,87
	3559,57	10,74	3554,10	5,27	3507,00	-41,83
	3537,60	-10,92	3544,50	-4,02	3420,00	-128,52
	3559,57	11,35	3553,57	5,35	3439,80	-108,42
	3537,60	-10,27	3541,16	-6,71	3463,80	-84,07
	3537,60	-10,32	3553,62	5,70	3420,00	-127,92
	3537,60	-10,49	3553,17	5,08	3425,40	-122,68
	3559,57	11,62	3549,87	1,92	3483,00	-64,95
	3559,57	11,49	3546,53	-1,55	3454,20	-93,88
	3537,60	-10,59	3549,05	0,87	3420,00	-128,18
	Tendência	0,33	Tendência	1,33	Tendência	-102,93
	Repetitividade	12,94	Repetitividade	4,87	Repetitividade	35,01
Erro Máximo	13,27	Erro Máximo	6,20	Erro Máximo	137,94	

Tempo de Aquisição	Frequência Padrão		CZT		FFT	
	Valor Lido	Erro - média	Valor Lido	Erro	Valor Lido	Erro
2 s	3548,12	-0,15	3548,70	0,58	3540,00	-8,12
	3548,13	-0,14	3547,65	-0,48	3540,00	-8,13
	3548,21	-0,06	3547,86	-0,35	3540,00	-8,21
	3548,34	0,06	3548,07	-0,27	3540,00	-8,34
	3548,39	0,12	3548,70	0,31	3540,00	-8,39
	3548,43	0,16	3547,86	-0,57	3540,00	-8,43
	3548,31	0,04	3548,91	0,60	3540,00	-8,31
	3548,26	-0,01	3547,86	-0,40	3540,00	-8,26
	3548,25	-0,02	3548,49	0,24	3540,00	-8,25
	3548,27	0,00	3547,65	-0,62	3540,00	-8,27
	ValorMédio	3548,27	Tendência	-0,10	Tendência	-8,27
	Repetitividade	0,23	Repetitividade	0,54	Repetitividade	0,11
	Valor Máximo	3548,50	ErroMáximo	0,64	ErroMáximo	8,39

Tempo de Aquisição	FFT + ZP		FFTInt		Lockin	
	Valor Lido	Erro	Valor Lido	Erro	Valor Lido	Erro
2 s	3548,58	0,46	3545,14	-2,99	3426,00	-122,12
	3548,58	0,45	3550,85	2,72	3421,80	-126,33
	3548,58	0,37	3551,27	3,06	3421,80	-126,41
	3548,58	0,25	3549,53	1,19	3538,80	-9,54
	3548,58	0,19	3547,36	-1,03	3534,00	-14,39
	3548,58	0,15	3551,07	2,64	3537,00	-11,43
	3548,58	0,27	3545,54	-2,78	3508,20	-40,11
	3548,58	0,32	3549,27	1,01	3421,80	-126,46
	3548,58	0,34	3547,45	-0,79	3421,80	-126,45
	3548,58	0,31	3550,74	2,47	3515,40	-32,87
	Tendência	0,31	Tendência	0,55	Tendência	-73,61
	Repetitividade	0,11	Repetitividade	2,60	Repetitividade	62,82
	ErroMáximo	0,43	ErroMáximo	3,15	ErroMáximo	136,44

Tempo de Aquisição	Frequência Padrão		CZT		FFT	
	Valor Lido	Erro - média	Valor Lido	Erro	Valor Lido	Erro
3 s	3548,49	-0,19	3548,70	0,21	3540,00	-8,49
	3548,65	-0,04	3548,70	0,05	3540,00	-8,65
	3548,52	-0,16	3548,49	-0,03	3540,00	-8,52
	3548,72	0,04	3548,70	-0,02	3540,00	-8,72
	3548,83	0,14	3548,91	0,08	3540,00	-8,83
	3548,55	-0,13	3548,70	0,15	3540,00	-8,55
	3548,73	0,05	3548,91	0,18	3540,00	-8,73
	3548,86	0,18	3548,91	0,05	3540,00	-8,86
	3548,69	0,01	3548,49	-0,20	3540,00	-8,69
	3548,78	0,10	3548,70	-0,08	3540,00	-8,78
	Valor Médio	3548,68	Tendência	0,04	Tendência	-8,68
	Repetitividade	0,29	Repetitividade	0,14	Repetitividade	0,14
Valor Máximo	3548,97	Erro Máximo	0,18	Erro Máximo	8,83	

Tempo de Aquisição	FFT + ZP		FFTInt		Lockin	
	Valor Lido	Erro	Valor Lido	Erro	Valor Lido	Erro
3 s	3548,58	0,09	3548,46	-0,03	3610,80	62,31
	3548,58	-0,06	3548,70	0,06	3508,20	-40,45
	3548,58	0,06	3548,41	-0,11	3606,00	57,48
	3548,58	-0,14	3548,70	-0,02	3493,80	-54,92
	3548,58	-0,24	3548,87	0,04	3483,60	-65,23
	3548,58	0,03	3548,60	0,05	3486,60	-61,95
	3548,58	-0,14	3548,73	0,00	3490,80	-57,93
	3548,58	-0,28	3548,82	-0,04	3488,40	-60,46
	3548,58	-0,10	3548,64	-0,05	3493,80	-54,89
	3548,58	-0,20	3548,73	-0,05	3481,80	-66,98
	Tendência	-0,10	Tendência	-0,02	Tendência	-34,30
	Repetitividade	0,14	Repetitividade	0,06	Repetitividade	56,77
Erro Máximo	0,24	Erro Máximo	0,08	Erro Máximo	91,08	

Tempo de Aquisição	Frequência Padrão		CZT		FFT	
	Valor Lido	Erro - média	Valor Lido	Erro	Valor Lido	Erro
5 s	3549,01	-0,03	3549,12	0,11	3552,00	2,99
	3549,00	-0,04	3549,12	0,12	3552,00	3,00
	3548,85	-0,19	3549,12	0,27	3552,00	3,15
	3549,08	0,04	3549,12	0,04	3552,00	2,92
	3548,98	-0,06	3549,12	0,14	3552,00	3,02
	3549,08	0,04	3549,12	0,04	3552,00	2,92
	3549,17	0,13	3549,12	-0,05	3552,00	2,83
	3549,07	0,03	3549,33	0,26	3552,00	2,93
	3549,09	0,05	3549,33	0,24	3552,00	2,91
	3549,07	0,03	3549,12	0,05	3552,00	2,93
	Valor Médio	3549,04	Tendência	0,12	Tendência	2,96
	Repetitividade	0,20	Repetitividade	0,12	Repetitividade	0,10
	Valor Máximo	3549,24	Erro Máximo	0,24	Erro Máximo	3,06

Tempo de Aquisição	FFT + ZP		FFTInt		Lockin	
	Valor Lido	Erro	Valor Lido	Erro	Valor Lido	Erro
5 s	3548,58	-0,43	3548,99	-0,02	3609,00	59,99
	3548,58	-0,42	3549,00	-0,01	3553,80	4,80
	3548,58	-0,27	3548,85	0,00	3498,00	-50,85
	3548,58	-0,50	3549,12	0,04	3606,00	56,92
	3548,58	-0,40	3548,97	-0,01	3551,40	2,42
	3548,58	-0,50	3549,07	-0,01	3609,00	59,92
	3548,58	-0,58	3549,17	0,00	3553,80	4,63
	3548,58	-0,49	3549,06	-0,02	3490,80	-58,27
	3548,58	-0,51	3549,06	-0,03	3606,00	56,91
	3548,58	-0,49	3549,05	-0,02	3483,60	-65,47
	Tendência	-0,46	Tendência	-0,01	Tendência	7,10
	Repetitividade	0,10	Repetitividade	0,02	Repetitividade	57,77
	Erro Máximo	0,55	Erro Máximo	0,03	Erro Máximo	64,87

Tempo de Aquisição	Frequência Padrão		CZT		FFT	
	Valor Lido	Erro - média	Valor Lido	Erro	Valor Lido	Erro
10 s	3549,01	0,17	3549,12	0,11	3546,00	-3,01
	3548,99	0,15	3549,12	0,13	3546,00	-2,99
	3549,10	0,26	3549,12	0,02	3552,00	2,90
	3549,09	0,25	3549,12	0,03	3552,00	2,91
	3549,19	0,34	3549,33	0,14	3552,00	2,81
	3549,26	0,42	3549,33	0,07	3552,00	2,74
	3548,58	-0,26	3548,70	0,12	3546,00	-2,58
	3548,77	-0,08	3548,91	0,14	3546,00	-2,77
	3548,40	-0,44	3548,49	0,09	3546,00	-2,40
	3548,03	-0,81	3548,07	0,04	3546,00	-2,03
	ValorMédio	3548,84	Tendência	0,09	Tendência	-0,44
	Repetitividade	0,89	Repetitividade	0,05	Repetitividade	3,21
ValorMáximo	3549,73	ErroMáximo	0,14	ErroMáximo	3,65	

Tempo de Aquisição	FFT + ZP		FFTInt		Lockin	
	Valor Lido	Erro	Valor Lido	Erro	Valor Lido	Erro
10 s	3548,58	-0,42	3549,00	-0,01	3490,80	-58,21
	3548,58	-0,41	3549,00	0,00	3606,00	57,01
	3548,58	-0,51	3549,11	0,01	3546,60	-2,50
	3548,58	-0,51	3549,09	0,00	3490,80	-58,29
	3548,58	-0,60	3549,18	-0,01	3490,80	-58,39
	3548,58	-0,67	3549,26	0,01	3493,80	-55,46
	3548,58	0,00	3548,59	0,01	3548,40	-0,18
	3548,58	-0,18	3548,75	-0,01	3493,80	-54,97
	3548,58	0,19	3548,40	0,00	3493,80	-54,60
	2,75	-3545,28	3547,98	-0,04	3493,80	-54,23
	Tendência	-354,84	Tendência	0,00	Tendência	-33,98
	Repetitividade	1267,95	Repetitividade	0,02	Repetitividade	44,49
ErroMáximo	1622,79	ErroMáximo	0,02	ErroMáximo	78,47	

f) Valores obtidos para a medição através do sinal de pressão de descarga: 58 Hz

Tempo de Aquisição	Frequência Padrão		CZT		FFT	
	Valor Lido	Erro - média	Valor Lido	Erro	Valor Lido	Erro
1 s	3481,26	1,94	3481,08	-0,18	3480,00	-1,26
	3483,24	3,92	3482,34	-0,90	3480,00	-3,24
	3482,10	2,78	3481,92	-0,18	3480,00	-2,10
	3479,58	0,26	3478,98	-0,60	3480,00	0,42
	3482,68	3,36	3482,34	-0,34	3480,00	-2,68
	3478,28	-1,04	3478,35	0,07	3480,00	1,72
	3478,05	-1,27	3477,72	-0,33	3480,00	1,95
	3476,21	-3,11	3475,83	-0,38	3480,00	3,79
	3476,20	-3,12	3476,04	-0,16	3480,00	3,80
	3475,60	-3,72	3475,83	0,23	3480,00	4,40
	ValorMédio	3479,32	Tendência	-0,28	Tendência	0,68
Repetitividade	6,49	Repetitividade	0,36	Repetitividade	3,25	
ValorMáximo	3485,81	ErroMáximo	0,64	ErroMáximo	3,93	

Tempo de Aquisição	FFT + ZP		FFTInt		Lockin	
	Valor Lido	Erro	Valor Lido	Erro	Valor Lido	Erro
1 s	3471,68	-9,58	3480,90	-0,36	3636,00	154,74
	3471,68	-11,56	3484,75	1,51	3425,40	-57,84
	3471,68	-10,42	3483,94	1,84	3638,40	156,30
	3471,68	-7,90	3481,13	1,55	3420,00	-59,58
	3471,68	-11,00	3485,05	2,37	3602,40	119,72
	3471,68	-6,60	3477,80	-0,47	3420,00	-58,28
	3471,68	-6,37	3478,14	0,09	3557,40	79,35
	3471,68	-4,53	3476,61	0,40	3605,40	129,19
	3471,68	-4,52	3476,20	0,00	3631,20	155,00
	3471,68	-3,92	3475,20	-0,40	3434,40	-41,20
	Tendência	-7,64	Tendência	0,65	Tendência	57,74
Repetitividade	3,25	Repetitividade	1,20	Repetitividade	112,08	
ErroMáximo	10,89	ErroMáximo	1,85	ErroMáximo	169,82	

Tempo de Aquisição	Frequência Padrão		CZT		FFT	
	Valor Lido	Erro - média	Valor Lido	Erro	Valor Lido	Erro
2 s	3474,33	3,46	3474,36	0,03	3480,00	5,67
	3473,49	2,62	3473,31	-0,18	3480,00	6,51
	3472,14	1,27	3472,05	-0,09	3480,00	7,86
	3472,69	1,82	3472,47	-0,22	3480,00	7,31
	3469,87	-1,00	3469,95	0,08	3480,00	10,13
	3472,71	1,84	3472,68	-0,03	3480,00	7,29
	3471,51	0,64	3471,63	0,12	3480,00	8,49
	3468,54	-2,33	3468,48	-0,06	3480,00	11,46
	3466,35	-4,52	3466,38	0,03	3480,00	13,65
	3467,07	-3,80	3467,22	0,15	3480,00	12,93
	ValorMédio	3470,87	Tendência	-0,02	Tendência	9,13
	Repetitividade	6,26	Repetitividade	0,14	Repetitividade	3,13
ValorMáximo	3477,13	ErroMáximo	0,16	ErroMáximo	12,26	

Tempo de Aquisição	FFT + ZP		FFTInt		Lockin	
	Valor Lido	Erro	Valor Lido	Erro	Valor Lido	Erro
2 s	3471,68	-2,65	3474,28	-0,05	3421,80	-52,53
	3471,68	-1,81	3473,38	-0,11	3519,60	46,11
	3471,68	-0,46	3472,17	0,03	3546,00	73,86
	3471,68	-1,01	3472,66	-0,03	3438,60	-34,09
	3471,68	1,81	3469,95	0,08	3421,80	-48,07
	3471,68	-1,03	3472,55	-0,16	3544,20	71,49
	3471,68	0,17	3471,50	0,00	3467,40	-4,11
	3471,68	3,14	3468,64	0,09	3430,80	-37,74
	3471,68	5,33	3466,35	0,00	3421,80	-44,55
	3471,68	4,61	3467,23	0,16	3421,80	-45,27
	Tendência	0,81	Tendência	0,00	Tendência	-7,49
	Repetitividade	3,13	Repetitividade	0,11	Repetitividade	58,21
ErroMáximo	3,94	ErroMáximo	0,11	ErroMáximo	65,70	

Tempo de Aquisição	Frequência Padrão		CZT		FFT	
	Valor Lido	Erro - média	Valor Lido	Erro	Valor Lido	Erro
3 s	3466,04	4,79	3465,96	-0,08	3460,00	-6,04
	3465,81	4,57	3465,96	0,15	3460,00	-5,81
	3464,24	3,00	3464,28	0,04	3460,00	-4,24
	3462,15	0,91	3461,97	-0,18	3460,00	-2,15
	3462,64	1,40	3462,39	-0,25	3460,00	-2,64
	3461,20	-0,04	3461,34	0,14	3460,00	-1,20
	3458,55	-2,69	3458,61	0,06	3460,00	1,45
	3457,64	-3,60	3457,77	0,13	3460,00	2,36
	3458,08	-3,16	3457,98	-0,10	3460,00	1,92
	3456,05	-5,19	3456,09	0,04	3460,00	3,95
	ValorMédio	3461,24	Tendência	-0,01	Tendência	-1,24
	Repetitividade	8,01	Repetitividade	0,16	Repetitividade	4,00
	ValorMáximo	3469,25	ErroMáximo	0,16	ErroMáximo	5,25

Tempo de Aquisição	FFT + ZP		FFTInt		Lockin	
	Valor Lido	Erro	Valor Lido	Erro	Valor Lido	Erro
3 s	3466,19	0,15	3466,02	-0,01	3529,80	63,76
	3466,19	0,37	3465,89	0,07	3421,80	-44,01
	3466,19	1,95	3464,23	-0,01	3421,80	-42,44
	3460,69	-1,46	3461,91	-0,25	3529,80	67,65
	3460,69	-1,95	3462,33	-0,31	3429,00	-33,64
	3460,69	-0,51	3461,42	0,22	3421,80	-39,40
	3460,69	2,14	3458,53	-0,02	3517,80	59,25
	3455,20	-2,44	3457,55	-0,09	3421,80	-35,84
	3460,69	2,61	3458,04	-0,04	3421,80	-36,28
	3455,20	-0,85	3456,01	-0,04	3421,80	-34,25
	Tendência	0,00	Tendência	-0,05	Tendência	-7,52
	Repetitividade	2,00	Repetitividade	0,17	Repetitividade	55,65
	ErroMáximo	2,00	ErroMáximo	0,22	ErroMáximo	63,17

Tempo de Aquisição	Frequência Padrão		CZT		FFT	
	Valor Lido	Erro - média	Valor Lido	Erro	Valor Lido	Erro
5 s	3455,46	5,50	3455,46	0,00	3456,00	0,54
	3454,28	4,32	3454,41	0,13	3456,00	1,72
	3450,75	0,79	3450,84	0,09	3456,00	5,25
	3450,74	0,78	3450,63	-0,11	3456,00	5,26
	3450,29	0,33	3450,42	0,13	3456,00	5,71
	3450,29	0,33	3450,42	0,13	3456,00	5,71
	3448,91	-1,05	3449,16	0,25	3444,00	-4,91
	3448,63	-1,33	3448,74	0,11	3444,00	-4,63
	3443,91	-6,05	3443,91	0,00	3444,00	0,09
	3446,34	-3,62	3446,43	0,09	3444,00	-2,34
	ValorMédio	3449,96	Tendência	0,08	Tendência	1,24
	Repetitividade	7,65	Repetitividade	0,11	Repetitividade	4,76
	ValorMáximo	3457,61	ErroMáximo	0,19	ErroMáximo	6,00

Tempo de Aquisição	FFT + ZP		FFTInt		Lockin	
	Valor Lido	Erro	Valor Lido	Erro	Valor Lido	Erro
5 s	3455,20	-0,26	3455,34	-0,12	3515,40	59,94
	3455,20	0,92	3454,52	0,24	3490,80	36,52
	3449,71	-1,04	3450,69	-0,06	3503,40	52,65
	3449,71	-1,03	3450,59	-0,15	3508,20	57,46
	3449,71	-0,58	3450,42	0,14	3510,00	59,71
	3449,71	-0,58	3450,35	0,07	3457,80	7,51
	3449,71	0,80	3449,04	0,13	3505,20	56,29
	3449,71	1,08	3448,65	0,02	3501,00	52,37
	3444,21	0,31	3443,76	-0,15	3450,60	6,69
	3444,21	-2,13	3446,50	0,16	3503,40	57,06
	Tendência	-0,25	Tendência	0,03	Tendência	44,62
	Repetitividade	1,16	Repetitividade	0,16	Repetitividade	23,62
	ErroMáximo	1,42	ErroMáximo	0,19	ErroMáximo	68,24

Tempo de Aquisição	Frequência Padrão		CZT		FFT	
	Valor Lido	Erro - média	Valor Lido	Erro	Valor Lido	Erro
10 s	3445,87	2,45	3446,01	0,14	3444,00	-1,87
	3446,04	2,62	3446,22	0,18	3444,00	-2,04
	3445,76	2,34	3445,80	0,04	3444,00	-1,76
	3445,30	1,88	3445,38	0,08	3444,00	-1,30
	3439,40	-4,01	3439,29	-0,11	3438,00	-1,40
	3441,14	-2,28	3441,18	0,04	3444,00	2,86
	3444,76	1,34	3444,96	0,20	3444,00	-0,76
	3440,50	-2,92	3440,55	0,05	3438,00	-2,50
	3442,60	-0,82	3442,44	-0,16	3444,00	1,40
	3442,82	-0,60	3442,86	0,04	3444,00	1,18
	ValorMédio	3443,42	Tendência	0,05	Tendência	-0,62
	Repetitividade	5,57	Repetitividade	0,13	Repetitividade	2,03
ValorMáximo	3448,99	ErroMáximo	0,18	ErroMáximo	2,65	

Tempo de Aquisição	FFT + ZP		FFTInt		Lockin	
	Valor Lido	Erro	Valor Lido	Erro	Valor Lido	Erro
10 s	3446,96	1,10	3445,89	0,02	3450,60	4,73
	3446,96	0,92	3446,25	0,20	3443,40	-2,64
	3446,96	1,20	3445,62	-0,14	3450,60	4,84
	3444,21	-1,09	3445,20	-0,10	3440,40	-4,90
	3438,72	-0,68	3439,20	-0,20	3440,40	1,00
	3441,47	0,33	3441,23	0,09	3436,20	-4,94
	3444,21	-0,55	3444,86	0,10	3501,00	56,24
	3441,47	0,97	3440,67	0,17	3438,00	-2,50
	3441,47	-1,13	3442,35	-0,25	3438,00	-4,60
	3444,21	1,40	3442,80	-0,02	3438,00	-4,82
	Tendência	0,25	Tendência	-0,01	Tendência	4,24
	Repetitividade	1,14	Repetitividade	0,18	Repetitividade	21,11
ErroMáximo	1,38	ErroMáximo	0,19	ErroMáximo	25,35	