

DAS Departamento de Automação e Sistemas
CTC **Centro Tecnológico**
UFSC Universidade Federal de Santa Catarina

Mecanismo de detecção de desbalancemanto para lavadoras de eixo vertical.

*Monografia submetida à Universidade Federal de Santa Catarina
como requisito para a aprovação da disciplina:*

DAS 5511: Projeto de Fim de Curso

Guilherme Bencke Teixeira da Silva

Florianópolis, agosto de 2013

Mecanismo de detecção de desbalancamento para lavadoras de eixo vertical.

Guilherme Bencke Teixeira da Silva

Esta monografia foi julgada no contexto da disciplina
DAS 5511: Projeto de Fim de Curso
e aprovada na sua forma final pelo
Curso de Engenharia de Controle e Automação

Werner Kraus Jr.

Assinatura do Orientador

Rafael Cabral Melo

Assinatura do Orientador

Banca Examinadora:

Prof. Werner Kraus Jr.
Orientador do Curso

Rafael Cabral Melo
Orientador da Empresa

Prof. Ricardo José Rabelo
Responsável pela disciplina

Prof. Alexandre Trofino Neto
Avaliador

Henrique Behr
Juliano Toda
Debatedores

Agradecimentos

Agradeço à minha família pelo carinho e suporte; à minha namorada pelo apoio e paciência; e aos meus amigos pela constante presença. Essas pessoas nunca me deixaram perder o foco no que realmente importa.

Aos meus orientadores, agradeço pelo direcionamento e compartilhamento de experiências. Agradeço aos mestres pela sólida formação que me foi concedida.

Agradeço também à Whirlpool e aos meus colegas de trabalho pelo ambiente excepcional de troca de ideias e pela estrutura que me foi disponibilizada, sem os quais este trabalho não seria possível.

Contents

Resumo	v
Abstract	vi
Lista de Figuras	vii
Lista de Tabelas	ix
Simbologia	x
1 Introdução	1
2 A empresa e o projeto	3
2.1 A empresa	3
2.2 Contexto do projeto	4
2.3 Organização do documento	4
3 Fundamentação do trabalho	5
3.1 A lavadora de roupas	5
3.1.1 Características construtivas	6
3.1.2 A lavadora de eixo vertical	6
3.1.3 Ciclo de funcionamento	7
3.2 Motores elétricos	8
3.2.1 Motor DC	9
3.2.2 Motor de indução	10
3.2.2.1 Motor de indução monofásico	11
3.2.3 Motor <i>brushless</i> DC de íma permanente	13

3.2.3.1	Controle de motores BLDC	14
3.2.3.2	Controle escalar	15
3.2.3.3	Controle vetorial	16
3.2.4	Comparação entre as tecnologias	18
3.3	O problema da carga desbalanceada	18
3.3.1	Desbalanceamento em sistemas rotacionais	20
4	Desenvolvimento	22
4.1	O conjunto de ferramentas Seis Sigma e excelência operacional	22
4.1.1	DOE - <i>Design of Experiments</i>	23
4.2	Testes exploratórios	24
4.2.1	Planejamento das árvores de teste	24
4.2.2	Configuração de testes	26
4.2.3	Sensores utilizados nos testes	27
4.3	Análises de deslocamento do sistema	29
4.3.1	O problema da integração no tempo	31
4.4	Algoritmos de detecção de carga desbalanceada	33
4.4.1	Algoritmo 1	34
4.4.2	Algoritmo 2	36
5	Resultados	39
5.1	Análises de variação	39
5.1.1	Algoritmo 1	40
5.1.2	Algoritmo 2	40
5.2	Comparação com análises de deslocamento	41
5.3	Testes embarcados	43
6	Conclusões e Perspectivas	45

Resumo

É imenso o potencial que tecnologias inovadoras possuem em impactar positivamente no cotidiano dos mais diversos indivíduos. O mercado consumidor de utilidades domésticas possui necessidades latentes em relação à absorção de bens de consumo cada vez mais eficientes, simples e inteligentes. Assim, criam-se oportunidades para que novos conceitos e abordagens sejam utilizados para resolver velhos problemas.

Este documento explora a investigação e execução de técnicas para que desbalanceamentos rotacionais sejam detectados em máquinas de lavar roupas de eixo vertical, antes que o comportamento dinâmico destes sistemas seja a causa de danos estruturais ou a seus usuários.

Abstract

Innovative technologies have a huge potential regarding their positive impact on the life of every subject. The home appliance consuming market has several latent needs when it comes to the absorption of consuming goods increasingly efficient, simple and smart. Therefore, opportunities are made so novel concepts and approaches are handed in the sense of solving old problems.

This document addresses the investigation and following execution of techniques applied aiming the detection of rotational unbalance in vertical axis washing machines, before the dynamic behavior of those systems is presented as harmful to both the structures and its users.

Lista de Figuras

3.1	Exemplo de máquina de lavar roupas do século XIX.	5
3.2	Esquema ilustrativo de uma máquina de lavar roupas moderna.	7
3.3	Esquema ilustrativo de um motor DC.	10
3.4	Campo pulsante e interação entre dois campos defasados, criando um campo girante.	12
3.5	Circuito equivalente a uma das fases do motor.	14
3.6	Malha de controle de um sistema <i>Field Oriented Control, sensorless</i> . . .	17
3.7	Malha de controle da estratégia <i>Direct Torque Control</i>	18
3.8	Esquema construtivo do cesto de uma máquina de lavar de eixo vertical e sua suspensão.	20
3.9	Amplificação do deslocamento próximo a frequência de ressonância. .	21
4.1	Ciclo de desenvolvimento PDSA.	23
4.2	Configuração de cargas para testes de desbalanceamento.	27
4.3	Módulo acelerômetro utilizado para captura de vibrações do cesto da lavadora.	28
4.4	Rotina implementada em LABVIEW para captura dos níveis de tensão lidos do módulo acelerômetro.	28
4.5	Acelerações estáticas causadas pelo campo gravitacional da Terra. . .	29
4.6	Método de integração numérica trapezoidal.	30
4.7	Alocação de pólos e zeros para o filtro passa-banda projetado para o pós-processamento dos sinais de aceleração.	32
4.8	Resposta em frequência normalizada para o filtro passa-banda.	33
4.9	Sequência do algoritmo de reconstrução de deslocamento.	34
4.10	Séries temporais de torque no eixo do motor, comparando três diferentes dinâmicas desbalanceadas.	35

4.11 Comparativo dos sinais de deslocamento translacional do cesto e torque estimado.	36
4.12 Análise frequencial de um caso de aceleração balanceada vs. desbalanceada.	37
4.13 Etapas de processamento efetuadas pelo algoritmo número 2.	38
5.1 Gráfico de variação da métrica #1 para a primeira frequência ressonante.	41
5.2 Gráfico de variação da métrica #1 para a segunda frequência ressonante.	42
5.3 Gráfico de variação da métrica #2 para a primeira frequência ressonante.	43
5.4 Regressão linear das saídas de ambas as métricas, comparadas com o deslocamento máximo do cesto.	44

Lista de Tabelas

3.1	Comparação entre diferentes tecnologias de motores elétricos.	19
4.1	Fatores variados experimentalmente.	25
4.2	Fatores variados como base comparativa.	26

Simbologia

Sensorless	Técnica de controle que dispensa sensores para realimentação de estados.
Tub	Cesto da máquina de lavar roupas.
Impeller	Elemento movimentador do carregamento no cesto.
DC	Corrente contínua.
AC	Corrente alternada.
Brushless	Motor sem escovas de comutação.
BLDC	Motor <i>brushless</i> DC.
PMSM	Motor síncrono com ímas permanentes.
FOC	<i>Field Oriented Control</i> .
DTC	<i>Direct Torque Control</i> .
Encoder	Dispositivo transdutor de deslocamento angular.
Back EMF	Força eletromotriz inversa.
PID	Controlador proporcional integral derivativo.
DMAIC	Definir, medir, analisar, melhorar e controlar. Ciclo de melhoria Seis Sigma.
PDSA	Planejar, fazer, estudar, atuar. Ciclo de melhoria Seis Sigma.
DOE	<i>Design</i> de experimentos.
COV	Análise de componentes de variação.
DAQ	Dispositivo de aquisição de dados.
FFT	Transformada rápida de Fourier.
RMS	Valor quadrático médio.

Capítulo 1: Introdução

Tecnologias inovadoras mostram-se cada vez mais como fatores diferenciais no competitivo mercado de utilidades domésticas. Principalmente em mercados exigentes, como por exemplo o americano e o europeu, o sucesso de uma linha inteira de produtos está profundamente atrelado com o esforço despendido no desenvolvimento de novos modos de operação que garantam eficiência energética, simplificação dos casos de uso e redução na utilização de recursos, mantendo baixos os tempos de ciclos de funcionamento e produção de características indesejáveis, como ruído, vibração e necessidade de constantes reparos.

Além da dinâmica natural dos mercados consumidores, entram em cena órgãos governamentais cujo intuito é regulamentar os bens de consumo, impondo diversas métricas de avaliação que podem tanto estar publicadas em periódicos especializados, ou diretamente na rede varejista, atrelado com mostruários de produtos. Nestas classificações, o consumo energético ocupa um lugar de destaque.

Neste contexto, uma classe de produtos bastante relevante no dia-a-dia de consumidores do mundo inteiro e que movimentam toda uma indústria são as máquinas de lavar roupas automáticas. Na maior parte das economias globais, sejam elas emergentes ou já industrializadas, o público em geral considera grande parte das tarefas domésticas como dispensáveis de trabalho manual, lançando mão de uma gama cada vez maior e mais popular de utilidades domésticas. Lavadoras de roupas possuem papel fundamental na rotina diária, onde grande parte dos indivíduos utilizam-se de dispositivos automáticos a fim de evitar extenuantes tarefas.

De olho neste imenso potencial para ganhos com tecnologias inovadoras, companhias que outrora dedicavam-se a outros ramos de atuação, como por exemplo o de eletrônicos, entram com força no mercado. Utilizando-se de estratégias agressivas, tanto do ponto de vista de preços competitivos, com baixas margens de lucro, quanto investindo largamente no desenvolvimento de novos produtos, expandem a cada dia o estado da arte.

Portanto, mesmo companhias líderes de segmento contam cada vez mais com setores de pesquisa focados em levar os mais recentes avanços tecnológicos rapidamente para o mercado consumidor, visando manter suas posições de liderança e evitar que novos competidores aproveitem-se da rápida evolução alavancada pela ca-

pacidade cada vez maior do público em absorver novidades tecnológicas.

Capítulo 2: A empresa e o projeto

2.1: A empresa

A Whirlpool Corporation posiciona-se como maior indústria de eletrodomésticos de linha branca do mundo, contando com cerca de 68 mil colaboradores, que atuam em cerca de 70 centros de produção e tecnologia. É conhecida por várias marcas ao redor do mundo, com destaque para Whirlpool, Maytag, Kitchen Aid, Bauknecht, Brastemp e Consul (1).

No Brasil, a divisão Whirlpool Latin America conta com três unidades fabris (Joinville, Rio Claro e Manaus), quatro centros de tecnologia (Refrigeração, Cocção e Condicionadores de Ar em Joinville e Lavanderia em Rio Claro), dois centros de distribuição (São Paulo e Pernambuco) e um centro administrativo (São Paulo). Além disso, conta com um centro de distribuição na Argentina e escritórios em sete países da América Latina.

Em 2010 mais de 200 modelos de produtos foram lançados pela companhia, que depositou neste ano o pedido de 68 novas patentes. Estes são indicadores que mostram o espírito de inovação da empresa, buscando sempre produtos com características exclusivas. A tarefa de criar novos produtos é função do grupo de pesquisa e desenvolvimento de cada um dos centros de tecnologia. Dos 14500 colaboradores que trabalham no Brasil, 700 são dedicados exclusivamente à pesquisa e desenvolvimento de produtos. Diferente de muitas empresas, a grande maioria dos produtos produzidos para o mercado nacional são desenvolvidos no próprio país.

Embora o centro de tecnologia de lavanderia localize-se em Rio Claro, também existe um pequeno centro de pesquisa e desenvolvimento em Joinville na área de *Cross-Product*, que abriga, entre outros, vários projetos em lavanderia e trabalha junto às divisões norte-americana e europeia, visando a concepção de novas tecnologias para estes mercados.

2.2: Contexto do projeto

Este trabalho foi desenvolvido ao longo de uma frente de desenvolvimento para um novo produto de lavanderia para o mercado americano. Por possuir estritas normas e legislação reguladora quanto a níveis de ruído e vibração para lavadoras de roupa, há um cuidado especial quanto ao desenvolvimento de mecanismos eficientes e robustos para a detecção destes comportamentos indesejados. Além disso, a aceitação de novos produtos neste competitivo mercado é bastante influenciada pelo desempenho em relação às características previamente citadas.

2.3: Organização do documento

O desenvolvimento desta monografia é fundamentado pelo capítulo 2, onde é realizada uma breve contextualização histórica acerca da máquina de lavar roupas, apontando a evolução e história de tal utilitário doméstico. São expostos em termos gerais seus princípios de funcionamento e funções principais. O tema motores elétricos, vital para o desenvolvimento deste trabalho, também é exposto neste capítulo, onde três diferentes tecnologias de máquinas elétricas são caracterizadas. Finalmente, esta seção é concluída com a exposição de conceitos teóricos acerca da dinâmica do desbalanceamento rotacional.

No capítulo 3, de desenvolvimento, exploram-se todas as ferramentas utilizadas e desenvolvidas no processo de execução e planejamento de testes e projeto, implementação e validação de conceitos *sensorless* para detecção de diferentes comportamentos em sistemas rotacionais desbalanceados.

O capítulo 4 explora e expõe os resultados alcançados com o desenvolvimento deste trabalho, além de mostrar como as técnicas de avaliação de desempenho dos algoritmos foram utilizadas. Finalmente, o capítulo 5 conclui o trabalho, listando também perspectivas para o futuro das técnicas desenvolvidas e consequentes aplicações.

Capítulo 3: Fundamentação do trabalho

3.1: A lavadora de roupas

A tecnologia de máquinas de lavar roupas constitui um grande avanço no setor de utilidades domésticas. Através de agitação compelida por um motor elétrico e transmitida a carga por pás e agitadores, resíduos são removidos sem intervenção manual. Tais dispositivos constituem um fator de conforto indispensável nos lares modernos.

O desenvolvimento de tais sistemas teve início no século XVII. A primeira patente concedida sob a categoria de máquinas lavadoras data de 1691. Projetos de lavadoras até o século XIX utilizavam dispositivos de rotação por alavanca, propelidos manualmente pelo usuário, agitando assim os tecidos dentro de barris de madeira. Dispositivos de remoção de água da época eram constituídos de rolos compressores manuais. A figura 3.1 ilustra um sistema de lavação da época (2).



Figura 3.1: Exemplo de máquina de lavar roupas do século XIX.

Após a segunda guerra mundial, com o desenvolvimento de motores elétricos, os ciclos de lavação de roupas começam a ganhar autonomia, necessitando cada vez menos de intervenção humana. Temporizadores eletromecânicos e caixas de engrenagens eram utilizados para sequenciar processos de lavação e extração de água.

A partir dos anos 1990 e com o desenvolvimento da microeletrônica, micro-controladores começam a ser utilizados para o controle e sequenciamento dos ciclos de lavação, mostrando-se mais confiáveis e de menor custo que complexas soluções eletromecânicas.

3.1.1: Características construtivas

A lavadora de roupas moderna pode ser classificada quanto à orientação do eixo de rotação de seu tambor, ou então pela forma de carregamento adotada. Lavadoras de eixo horizontal ou *front-loaders* são muito populares no mercado europeu, asiático e americano. Pela orientação horizontal do *tub*, a porta de carregamento fica na parte frontal do produto. Já as lavadoras de eixo vertical possuem uma abertura superior, por onde a carga é adicionada ao sistema. Este trabalho foi desenvolvido no escopo das lavadoras de eixo vertical.

3.1.2: A lavadora de eixo vertical

Construtivamente, a máquina de lavar possui alguns elementos fundamentais. Um conjunto de dois tambores, aqui referidos como *tub*, no caso do componente externo, e cesto, o interno, atuam como receptáculo para a carga a ser higienizada. O cesto interno possui orifícios pela extensão de suas paredes por onde a água flui livremente. O *tub* é um recipiente impermeável, que é drenado por um sistema de bombas. No seu centro encontra-se o componente responsável pela agitação das roupas, etapa onde resíduos são eliminados. Tal sistema de agitação possui duas formas populares: O agitador, que alonga-se até próximo da extremidade superior do cesto, e o *impeller*, que agita a carga através da movimentação da água contida no recipiente.

Tais componentes giratórios, assim como o cesto interior, são propelidos por um motor elétrico e acoplados por sistemas de engrenagens, correias ou então diretamente ao eixo central. Um atuador eletromecânico, em conjunto com um sistema de engrenagens de redução é comumente utilizado para a seleção do componente a ser propelido, horas o cesto, horas o agitador.

O cesto da máquina de lavar roupas de eixo vertical é normalmente sustentado por quatro varetas de suspensão, com molas em suas extremidades, que atuam como amortecedores. Na figura 3.2 observa-se um esquema construtivo de uma máquina de lavar roupas, com as principais partes em destaque.

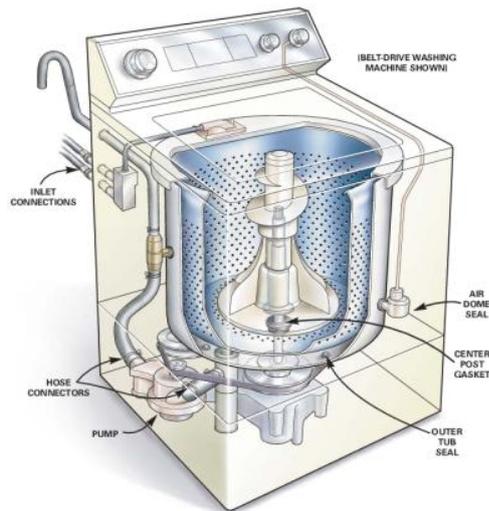


Figura 3.2: Esquema ilustrativo de uma máquina de lavar roupas moderna.

3.1.3: Ciclo de funcionamento

O ciclo de lavagem é composto de uma série de operações sequenciais que visam, por agitação mecânica, remover resíduos dos tecidos a serem higienizados. No processo de lavagem, água é depositada no cesto de roupas até atingir um determinado nível. Algumas lavadoras possuem meios para aquecer a água que é injetada no sistema, facilitando a remoção de sujeira. O volume de água a ser utilizado é normalmente configurado pelo usuário, seja diretamente ou indiretamente, entrando com um valor estimado da quantidade de carga depositada. Nos últimos anos, sistemas de estimativa de carga vem sendo desenvolvidos e constantemente aprimorados, a fim de garantir o uso da menor quantidade de recursos o possível e diminuir a necessidade de intervenção humana na configuração do ciclo de lavagem.

Um motor elétrico propõe o eixo agitador periodicamente em breves rotações com sentidos intercalados. A carga é assim movimentada e interage com detergentes e amaciantes, diluindo e removendo resíduos acumulados em sua superfície. A fim de remover os fluidos detergentes, o cesto de roupas é esvaziado e a operação é repetida diversas vezes (3).

A etapa de centrifugação visa remover a extração da água retida pelos tecidos nas fases de lavagem, enxágue e molho. Nesta fase, no caso de lavadoras com caixa de transmissão, o elemento agitador é desacoplado do eixo do motor, e em seu lugar, ocorre o acoplamento do cesto interior. Assim, tal sistema é acelerado angularmente e por força centrípeta os líquidos são propelidos para o envólucro externo do cesto de roupas. Ao longo da centrifugação, uma bomba remove a água contida

no *tub*. Em tal etapa, a carga acoplada no motor alcança consideráveis velocidades. Distribuições não-uniformes do conteúdo a ser acelerado podem causar comportamentos indesejáveis, como vibração, ruído e danos mecânicos.

3.2: Motores elétricos

O elemento propulsor de tais sistemas de lavagem é o motor elétrico. Em termos gerais, motores elétricos são dispositivos que possuem como função principal converter energia elétrica em trabalho mecânico. A fim de cumprir tal tarefa, estes são alimentados por correntes provenientes de linhas de transmissão, fontes de corrente contínua, baterias ou outras formas de armazenamento e propagação de energia elétrica. Desde o início do século XX, soluções envolvendo o uso de máquinas de corrente contínua vem sendo largamente utilizadas. Porém, a mudança de paradigma para a eletrônica de estado sólido representou um grande desenvolvimento para a adoção de máquinas de corrente alternada, gerando um esforço de mais de 50 anos para compreender completamente e refinar a aplicação de tal tecnologia.

Segundo (4), aproximadamente 40% de toda a energia elétrica consumida no Brasil é usada para o acionamento de motores elétricos, sendo que no setor industrial cerca de 50% da energia consumida deve-se a este tipo de máquina elétrica. Há estimativas de que exista grande número de instalações industriais no Brasil onde mais de 80% do consumo deva-se a motores elétricos.

Nesta seção serão discutidas três diferentes formas de implementação de máquinas elétricas. Destas, o motor de indução apresenta-se como o mais popular no mercado de utilidades domésticas, pela simplicidade de seu design e pela sua robustez.

A partir da década de 1990, com a popularização da eletrônica de potência embarcada e com o desenvolvimento de microcontroladores cada vez mais baratos e avançados, o motor *brushless* de ímã permanente vem se mostrando como uma boa alternativa, tendo em vista sua versatilidade e potencial para economia de energia, visto que avançadas estratégias de controle são viabilizadas pelo conjunto inversor de frequência, microcontrolador e motor síncrono. O trabalho de desenvolvimento de um algoritmo de detecção de carga desbalanceada foi desenvolvido dentro do escopo de uma linha de produtos que utilizará tal forma de motor e acionamentos.

3.2.1: Motor DC

Construtivamente, os componentes principais da máquina elétrica de corrente contínua são o rotor, ou armadura, o anel comutador, o estator e as escovas (5).

- **Rotor:** É a parte girante do motor. Este é montado sobre o eixo da máquina e constituído por material ferromagnético, envolvido em enrolamento chamado de enrolamento de armadura. Por este passa a corrente proveniente da fonte principal de alimentação. É o circuito responsável por transportar tal forma de energia.
- **Anel comutador:** Tal componente é projetado para que o circuito entre cada uma das bobinas constituintes do enrolamento da armadura e as escovas seja fechado no momento adequado. Para tanto, este é segmentado por material isolante e é montado junto ao eixo da máquina, girando junto com o mesmo. Tal movimento de rotação é responsável por produzir a comutação os circuitos dos enrolamentos.
- **Estator:** A principal função do estator é a de produzir um campo magnético fixo, que irá interagir com o campo da armadura. Este componente da máquina elétrica DC é montado, como diz o nome, estaticamente em volta do rotor. Deve possuir dimensões que possibilitem a livre movimentação interna do rotor. Constituído de material ferromagnético, este é envolto em um enrolamento de baixa potência, chamado de enrolamento de campo.
- **Escovas:** Em um dispositivo rotacional, as escovas são dispositivos que possuem a função de conduzir energia elétrica entre fontes estacionárias e partes móveis. Tal componente é responsável por alimentar o enrolamento de armadura.

Ao aplicar uma tensão energia elétrica sobre o enrolamento de armadura cria-se corrente elétrica circulante, que produzirá um campo magnético em tal circuito. Esta tensão elétrica é aplicada pelo anel comutador, também denominado coletor. Ao mesmo tempo, tensão é aplicada sobre os enrolamentos do estator, que intensificará os campos no material ferromagnético no qual este é construído, produzindo assim pólos magnéticos norte e sul espalhados por toda a sua extensão.

Pares de pólos são criados no enrolamento da armadura quando, com a máquina parada, o comutador faz com que a tensão aplicada seja transferida o mesmo, fa-

zendo circular corrente. A orientação desse campo permanece fixa. Como resultado da interação de tais campos magnéticos, será gerada uma força tendendo ao alinhamento dos mesmos. O polo sul de um dos campos tende a alinhar-se com o polo norte do outro.

O eixo da máquina é livre para movimentar-se angularmente, então enquanto os campos do estator e da armadura não estiverem alinhados surgirá um binário de forças entre estes, produzindo torque no eixo e fazendo o mesmo rotacionar. Durante o curso de rotação, o anel comutador é rotacionado junto ao eixo, assim tal componente inverterá o sentido da tensão e conseqüentemente da corrente conduzida na armadura, mudando assim o sentido do campo magnético produzido.

Assim, a posição dos pólos magnéticos norte e sul do campo da armadura é invertida. Somando-se ao fato de os pólos induzidos no estator continuarem fixos, é gerado então um novo binário de forças que mantém assim o torque resultante no eixo da máquina, produzindo um movimento rotacional contínuo pela mudança cíclica de orientação do campo criado no rotor.

A figura 3.3 ilustra os componentes construtivos do motor DC e suas interações.

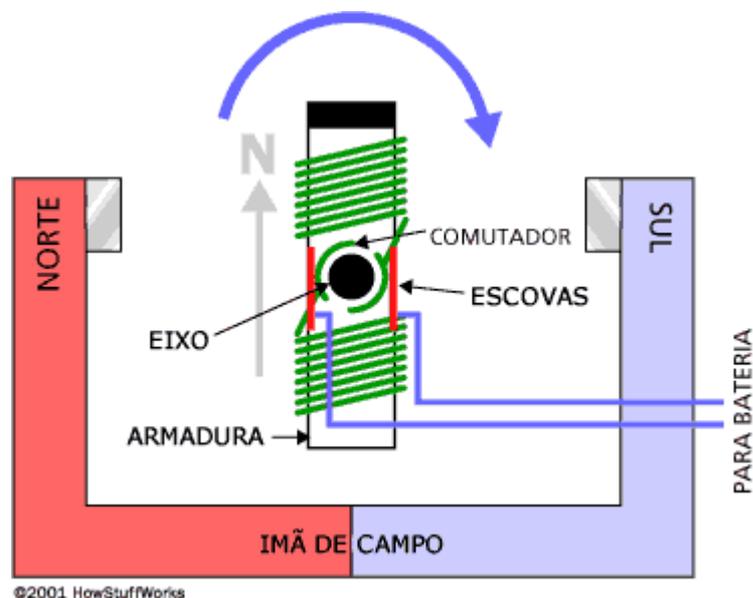


Figura 3.3: Esquema ilustrativo de um motor DC.

3.2.2: Motor de indução

O motor de indução, ou motor assíncrono, é uma máquina elétrica alimentada por tensão alternada, onde a corrente elétrica necessária para a geração de torque

é produzida no rotor a partir da indução eletromagnética do campo gerado nos enrolamentos do estator. Por este motivo, tal motor não requer comutação mecânica, diferente do que ocorre no sistema comutador-escovas da máquina DC.

Também conhecido como máquina assíncrona, é a máquina elétrica mais frequentemente utilizada na indústria de eletrodomésticos. O seu largo emprego se justifica pela sua robustez (não há partes que se desgastam facilmente, tais como comutador e escova), pelo seu baixo custo, pouca necessidade de manutenção e possibilidade de emprego em praticamente qualquer aplicação, incluindo ambientes hostis, explosivos, ambientes com poeiras, aplicações navais, etc. Por outro lado, a variação e controle da sua velocidade não é tão fácil como no caso do motor de corrente contínua.

Basicamente, o motor de indução é constituído de dois componentes construtivos principais. O estator, parte estática alimentada com corrente alternada a fim de criar um campo magnético girante, e o rotor, acoplado ao eixo de saída e cujo objetivo é produzir torque a partir da interação com o campo girante.

O princípio da indução eletromagnética diz que uma variação no campo magnético a que um condutor é submetido criará uma tensão sobre o mesmo, que é proporcional a taxa de variação do fluxo deste campo. Em uma máquina de indução o fluxo tem uma distribuição espacial aproximadamente senoidal e é criado inicialmente pela corrente alternada que passa pelo enrolamento do estator. Sobre o enrolamento do rotor existe assim um fluxo alternado produzindo neste tensões induzidas, as quais por sua vez produzirão correntes induzidas sempre que o enrolamento do rotor se encontrar fechado.

O campo magnético criado pelas correntes do rotor cria, por sua vez, um outro campo magnético também senoidalmente distribuído que é atraído pelo campo do estator, à semelhança do que ocorre com os pólos de dois ímãs. A força de atração se traduz num torque que atua sobre o eixo do rotor, fazendo-o girar.

3.2.2.1: Motor de indução monofásico

Os motores de indução monofásicos (6) são assim chamados porque os seus enrolamentos de campo (estator) são alimentados por uma fonte AC de fase única. Entre os vários tipos de motores elétricos monofásicos, os motores com rotor gaiola destacam-se pela simplicidade de fabricação e, principalmente, pela robustez, confi-

abilidade e manutenção reduzida. Por terem somente uma fase de alimentação, não possuem um campo girante como os motores polifásicos, mas um campo magnético pulsante. Isso impede que tenham torque de partida, tendo em conta que no rotor se induzem campos magnéticos alinhados ao campo do estator.

Porém, se de alguma forma se puder conseguir um segundo campo com defasagem de 90° em relação à alimentação, cria-se um sistema bifásico, e assim é possível a obtenção de um campo girante capaz de promover a partida, como mostra a figura 3.4.

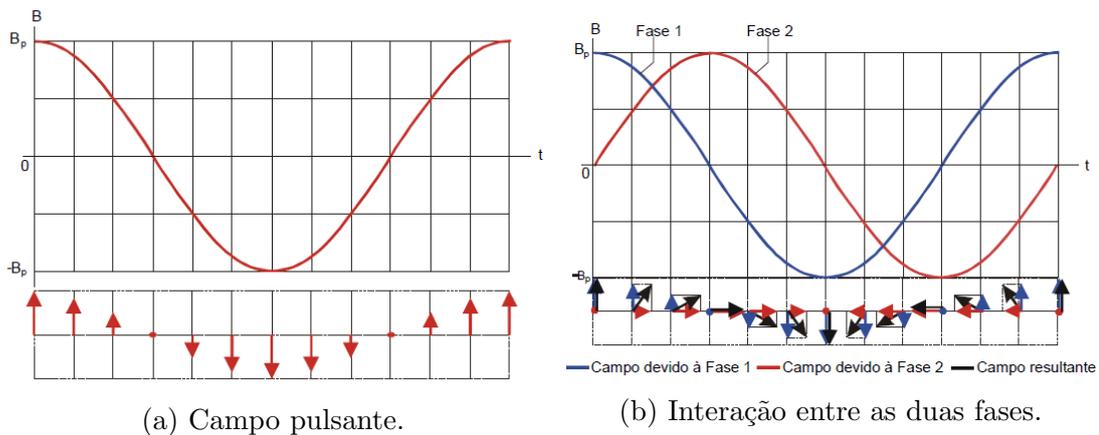


Figura 3.4: Campo pulsante e interação entre dois campos defasados, criando um campo girante.

Diversas técnicas podem ser empregadas a fim de proporcionar a defasagem necessária para a obtenção de um campo girante para a partida do motor:

- **Motor de Fase Dividida:** Possui um enrolamento auxiliar espacialmente defasado em 90° em relação ao enrolamento principal. Quando é atingida uma determinada rotação, este enrolamento auxiliar é desconectado do circuito do motor por intermédio de uma chave centrífuga. Já que é dimensionado para atuar somente durante a partida, se não for desconectado, poderá ser danificado pelas altas correntes.

Na prática, o ângulo de defasagem entre os campos nos dois enrolamentos (principal e auxiliar) é bem menor que 90° , o que resulta em conjugado de partida igual ou pouco superior ao nominal. Por isso esse tipo de motor é usado para cargas de pequena potência e conjugados de partida moderados (por exemplo: ventiladores, exaustores, bombas centrífugas, etc.).

- **Motor com Capacitor de Partida:** O que diferencia este motor do de fase dividida é a inclusão de um capacitor em série com a fase auxiliar, o que per-

mite a obtenção de ângulos de defasagem bem maiores e, conseqüentemente, conjugados de partida bem mais elevados (entre 200% e 350% do conjugado nominal).

- **Motor com Capacitor Permanente, ou PSC:** Neste tipo de motor, o enrolamento auxiliar e seu capacitor em série ficam permanentemente conectados. A vantagem aqui é a ausência de partes móveis, o que facilita a manutenção.

3.2.3: Motor *brushless* DC de íma permanente

Os motores elétricos do tipo *brushless* (do inglês, sem escovas) DC, também conhecidos como ECMs, ou motores eletronicamente comutados são motores síncronos. Isto é, transmitem trabalho mecânico rotacional na mesma frequência que o campo girante a que seus estatores são submetidos. Estes motores são alimentados por uma fonte elétrica DC, e seus *drives* (do inglês, acionamentos) são encarregados, via inversores de frequência ou fontes inversoras, de produzirem as tensões AC necessárias para acionar o motor, criando assim o campo girante. Vale ressaltar que AC aqui não significa necessariamente uma forma de onda senoidal, mas sim sinais bidirecionais sem restrição quanto ao seu formato.

O motor DC sem escovas tipicamente possui ímãs permanentes em seu rotor, e sua armadura é fixa. Assim, eliminam-se potenciais problemas associados a conexão elétrica com partes móveis. O conjunto escovas-comutador é substituído por um controlador eletrônico, que mantém o motor funcionando a partir da constante alimentação dos enrolamentos com fases alternadas.

Os motores *brushless*, quando comparados com motores DC com escovas oferecem diversas vantagens (7). Dentre estas, ressalta-se maior capacidade de torque frente a sua massa, melhor relação torque/potência elétrica, maior confiabilidade, ruído reduzido, maior vida útil, já que não sofre de problemas como erosão nas escovas e comutadores, além de uma redução geral na interferência eletromagnética em comparação com outras tecnologias de máquinas elétricas. Como os enrolamentos são suportados pelo estator fixo, estes podem ser resfriados por condução. Assim, o resfriamento por convecção pode ser deixado de lado em motores com suas partes internas seladas, evitando assim danos causados por sujeira ou outros materiais externos.

A potência máxima alcançada por um motor *brushless* DC é limitada quase

que exclusivamente pelo calor produzido pelo mesmo. Se este tornar-se demasiadamente elevado reduzirá o campo magnético gerado pelos ímãs do rotor, além de poder danificar os enrolamentos. A maior desvantagem desta tecnologia é seu custo elevado quando comparada com outras soluções. A causa principal para tal limitação está na maior complexidade de seus controladores e *drives*. Todavia, com o barateamento da eletrônica de potência microcontrolada e com a popularização e fabricação em larga escala, tais motores mostram-se como alternativas viáveis para diversos tipos de aplicações comerciais, como é o caso da linha de lavadora de roupas em estudo. A maior eficiência energética desta tecnologia, em conjunto com a crescente preocupação com o consumo racional de recursos torna-a muito atrativa em setores competitivos, como por exemplo o de utilidades domésticas.

As fases do estator em tais máquinas elétricas podem ser modeladas de acordo com o circuito elétrico ilustrado no diagrama da figura 3.5. No circuito equivalente, a resistência R representa o fator resistivo dos enrolamentos, e L seu fator indutivo. Há também um elemento conhecido como *back EMF*, ou força eletromotriz inversa. Tal tensão é induzida pela variação do fluxo magnético no tempo. Esta variação é gerada pela rotação do rotor, mudando a orientação angular dos seus ímãs permanentes e conseqüentemente, do campo magnético gerado por estes.

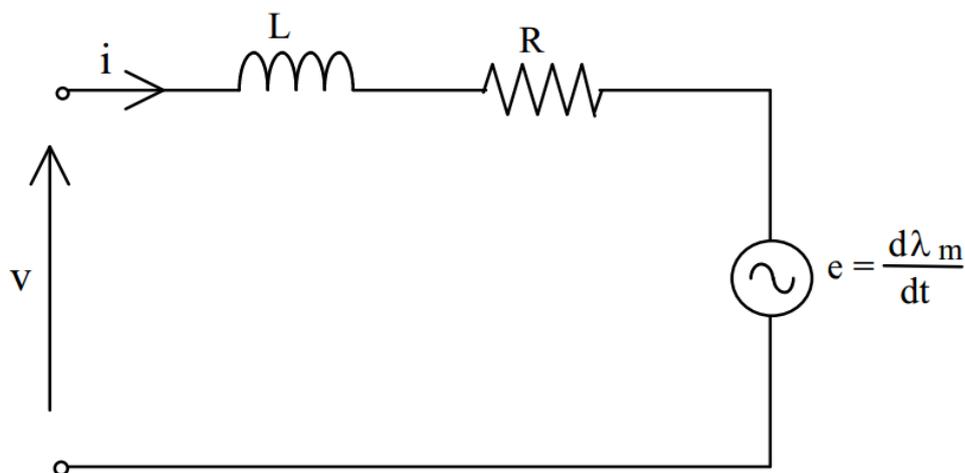


Figura 3.5: Circuito equivalente a uma das fases do motor.

3.2.3.1: Controle de motores BLDC

Para que o controle dos estados mecânicos do sistema (velocidade do rotor e posição, por exemplo) seja implementado em malha fechada, é necessário que o estado de posição do rotor em relação aos enrolamentos do estator seja observável.

Para tanto, é possível utilizar abordagens baseadas em sensores, como por exemplo os de efeito Hall ou então *encoders* rotacionais (8), medindo diretamente a posição angular do rotor. Há também a possibilidade da utilização de técnicas chamadas *sensorless*, que abrem mão de sensores e utilizam leituras de corrente e tensão para inferir tais variáveis de controle. A *back EMF*, por exemplo, é um indicador importante para a estimação da posição do rotor. Tais implementações são interessantes pois nem sempre é prático reservar espaço para dispositivos adicionais, como os transdutores. Outro ponto é que não há custo adicional com tais elementos do sistema de controle.

Um desafio em relação ao controle *sensorless* (9) é a estimação da posição inicial do rotor, visto que no momento em que este está estacionário, nenhuma força eletromotriz inversa está sendo gerada. Inúmeras estratégias podem ser utilizadas para contornar tal limitação, como por exemplo o início do movimento a partir de uma fase arbitrária, e então alinhando-se com a fase correta caso haja um erro em relação a inicial.

3.2.3.2: Controle escalar

É possível atuar nos seguintes parâmetros, tendo em vista a variação da velocidade do motor enquanto mantém-se o torque na faixa de funcionamento:

- Mudança do número de pólos do estator;
- Variação da amplitude da tensão fornecida;
- Variação na frequência da tensão.

A mudança do número de pólos causa grandes variações nas relações torque e velocidade, enquanto a atuação na amplitude da tensão torna possível a variação de apenas uma estreita faixa de velocidade. A solução mais promissora seria atuar na frequência da tensão fornecida. Contudo, enquanto aumenta-se a velocidade, as impedâncias elevam-se e a corrente diminui.

A amplitude da tensão, assim como sua frequência, possui uma relação intrínseca com a corrente que percorre o sistema. Assim, desenvolveu-se um método capaz de controlar tanto a velocidade quanto o torque de motores elétricos, onde varia-se simultaneamente as grandezas de amplitude e tensão, mantendo sua relação constante e

assim compensando a queda na corrente, fluxo magnético e torque mecânico que o aumento da frequência causa. Tal método é conhecido como controle por Volts/Hertz, ou controle escalar. A vantagem desta abordagem escalar é sobretudo a sua simplicidade de implementação.

De acordo com a equação da tensão induzida (3.1), a técnica de controle V/Hz fornece um fluxo constante no estator.

$$\frac{V_{e,RMS}}{f} = 4.44 \cdot N \cdot \psi_s \cdot \xi \quad (3.1)$$

Onde:

- $V_{e,RMS}$: Tensão induzida no estator;
- f : Frequência da tensão;
- N : Número de voltas no enrolamento;
- ψ_s : Fluxo magnético no estator;
- ξ : Constante do enrolamento.

3.2.3.3: Controle vetorial

Com a popularização de sistemas microcontrolados e inversores de frequência, torna-se viável a abordagem de estratégias de controle mais avançadas que a abordagem do controle escalar. Há diferentes variações de controles vetoriais (10), como o *FOC - Field Oriented Control* e o *DTC - Direct Torque Control*, entre outros. Apresentam-se como pontos positivos comuns a estas técnicas sua boa performance em relação a tempos de resposta, operação suave entre diferentes faixas de velocidade e precisão na estimação de diversas variáveis de controle, como torque, velocidade angular e ângulo de carga.

Basicamente, o controle vetorial gera um conjunto de três fases de tensão, provenientes de um vetor de tensões complexas, a fim de controlar um vetor complexo de corrente, derivado de projeções e rotações em diferentes sistemas de coordenada, como o sistema trifásico dependente do tempo e velocidade e sua correspondente bidimensional invariante no tempo.

O algoritmo de controle FOC em um motor PMSM começa adquirindo as correntes das fases i_a, i_b, i_c e transformando-as para um sistema de coordenadas bidimensional I_α, I_β através da transformada de Clarke. Este par é então rotacionado para ser alinhado com o fluxo magnético do rotor através da sua posição angular θ . Assim, tal transformação, alinhada com o vetor de rotação através da transformada de Park fornece o par i_d, i_q , que mantém-se constante durante condições de regime permanente. Sinais de erro entre as variáveis i_d, i_q e suas referências, que controlam fluxo e saída de torque do motor, respectivamente são calculados. Tais sinais são utilizados por controles PI, cujas saídas são os vetores de tensão V_q, V_d , que são rotacionados para V_α, V_β e então são transformados de volta para o sistemas de coordenadas tridimensional V_a, V_b, V_c , ou tensões de armadura do motor. O diagrama 3.6 ilustra tal malha de controle.

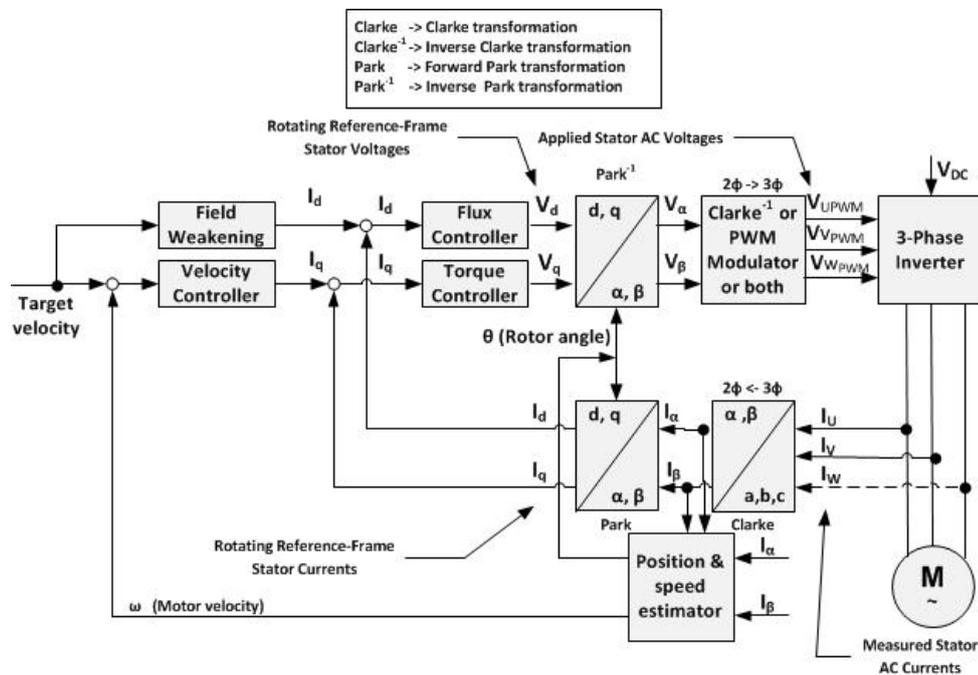


Figura 3.6: Malha de controle de um sistema *Field Oriented Control, sensorless*.

A técnica *Direct Torque Control* utiliza malhas de controle a fim de controlar o torque do motor, e então controlar sua velocidade. Tal técnica utiliza-se de três malhas de controle em cascata. Com controladores PI e PID, força-se dinâmicas para as malhas de corrente i_d, i_q , fluxo magnético do rotor e velocidade. Na figura 3.7 está ilustrado o diagrama de controle desta abordagem.

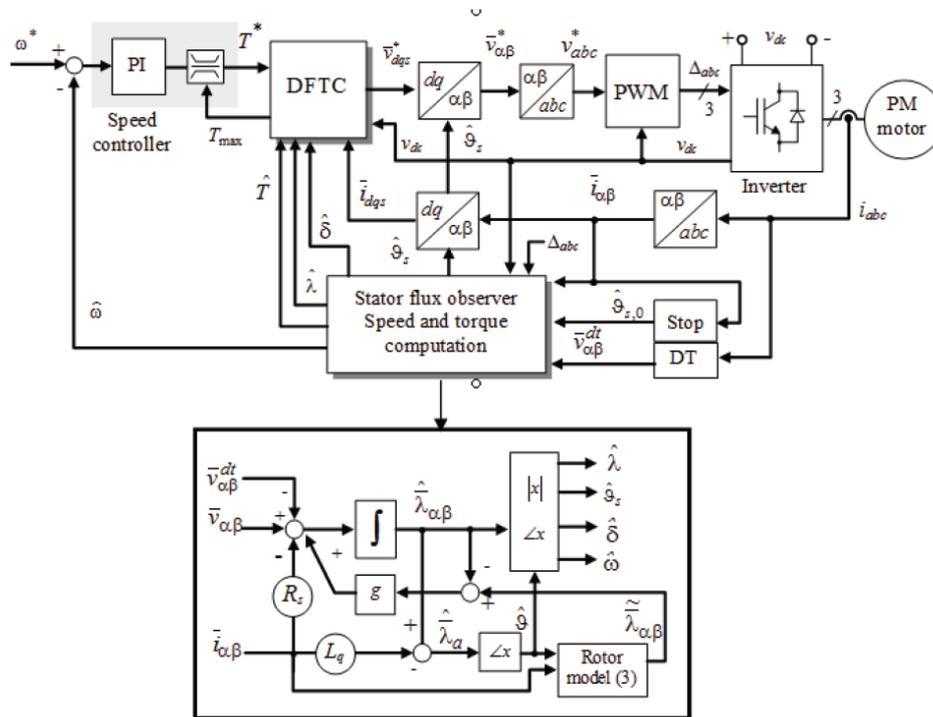


Figura 3.7: Malha de controle da estratégia *Direct Torque Control*.

3.2.4: Comparação entre as tecnologias

Tendo exposto em termos gerais as características construtivas e funcionais de motores de indução e motores DC com e sem escovas, resumem-se na tabela 3.1 os seus principais fatores comparativos.

3.3: O problema da carga desbalanceada

Durante o ciclo de lavagem uma operação importante é a extração de água. Para efetuar tal processo, o cesto de roupas é acelerado angularmente até velocidades que podem chegar a cerca de 1200 RPM, onde a força centrífuga que atua na carga faz a mesma ser comprimida contra a parede porosa do compartimento. Como resultado, a água é extraída para o compartimento exterior do cesto, de onde será removida por uma bomba de extração.

Por tratar-se de um sistema rotacional capaz de alcançar altas velocidades angulares, distribuições não uniformes de carga podem causar efeitos indesejáveis e destrutivos. Do ponto de vista do consumidor, tais efeitos podem ser extremamente inconvenientes. Comportamentos anômalos como deslocamento da lavadora de rou-

Feature	Motor DC sem escovas	Motor DC com escovas	Motor de indução AC
Estrutura mecânica	Campos magnéticos no rotor são gerados por ímãs permanentes.	Campos magnéticos no rotor podem ser gerados por ímãs permanentes ou eletroímãs.	Rotor e estator possuem enrolamentos. Apenas o estator é conectado a rede AC.
Manutenção	Baixa ou dispensável.	Manutenção periódica nas escovas e comutador.	Baixa manutenção.
Relação velocidade-torque	Linear: Opera em todas as velocidades com torque nominal.	Perdas no torque em altas velocidades, por causa de perdas nas escovas.	Não-linear.
Eficiência	Alta: sem perdas energéticas em escovas. Estator é capaz de dissipar mais calor via condução.	Moderada. Perdas nas escovas e rotor enclausurado, dificultando trocas térmicas.	Baixa por perdas térmicas e de correntes, em ambos o estator e rotor. Motores de indução de alta eficiência possuem custo elevado.
Faixa de velocidade	Alta por não possuir perdas nas escovas.	Moderada, limitada pelas perdas nas escovas.	Baixa, limitada pela frequência da corrente AC. Aumentos na carga diminuem a velocidade.
Método de comutação	Circuitos eletrônicos e inversores de frequência.	Contato mecânico entre escovas e comutador.	Circuito adicional necessário para a partida.
Ruído elétrico	Baixo.	Alto, gerado pelas escovas.	Baixo.
Método de detecção da posição do rotor	Sensores de efeito Hall, <i>encoders</i> , estratégias <i>sensorless</i> .	Detectado automaticamente pela posição das escovas e rotor.	Indisponível.
Inversão de direção	Inversão da sequência de chaveamento no inversor.	Inversor da tensão elétrica nos terminais.	Inverte-se as fases.
Requisitos de controle	Controlador é sempre necessário.	Controlador não é necessário para velocidade fixa. Necessário para velocidades variáveis.	Controlador não é necessário para velocidade fixa. Necessário para velocidades variáveis.
Custo do sistema	Alto pela necessidade de controlador externo.	Baixo.	Baixo.

Tabela 3.1: Comparação entre diferentes tecnologias de motores elétricos.

pas, vibração excessiva e ruído em excesso são causas de insatisfação com o bem de consumo adquirido.

3.3.1: Desbalanceamento em sistemas rotacionais

Desbalanceamento rotacional é a dinâmica resultante do desalinhamento do centro de massa em relação ao eixo de rotação de um corpo a ser acelerado angularmente. Devido à força centrípeta não-uniforme ao longo da distribuição de carga, acaba-se criando uma componente de movimento translacional indesejada no corpo a ser rotacionado. Um modelo construtivo simplificado do cesto de uma máquina de lavar roupas e sua suspensão é mostrado na figura 3.8.

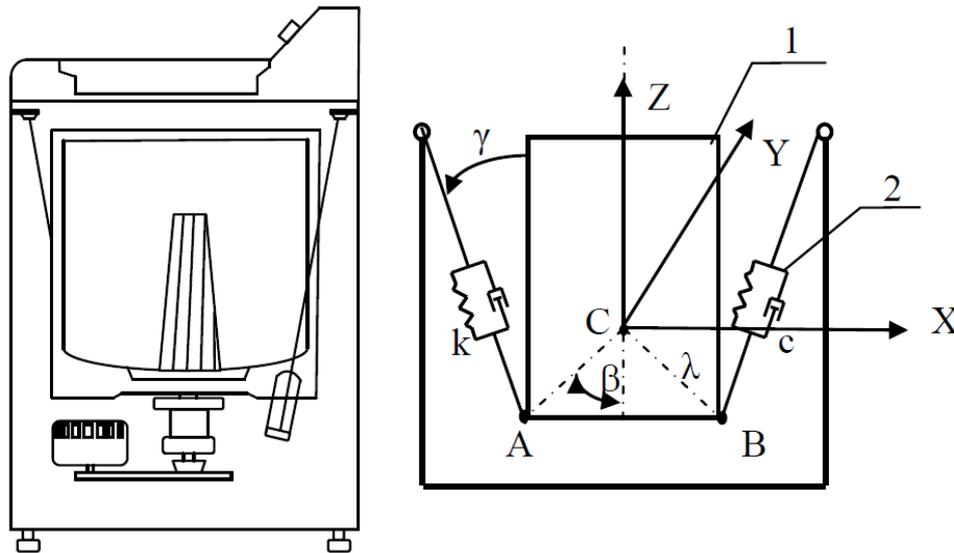


Figura 3.8: Esquema construtivo do cesto de uma máquina de lavar de eixo vertical e sua suspensão.

O movimento translacional do cesto de roupas é atenuado pelos amortecedores, quatro varetas com molas e amortecedores em suas extremidades (11). A dinâmica de translação do cesto no plano perpendicular ao eixo de rotação é definida pelo sistema de equações (3.2):

$$\begin{aligned} M\ddot{x} + c\dot{x} + kx &= M_e w^2 \cos(wt) \\ M\ddot{y} + c\dot{y} + ky &= M_e w^2 \sin(wt) \end{aligned} \quad (3.2)$$

Onde:

- M: Massa total do cesto;

- c : Constante de amortecimento;
- k : Constante elástica da mola;
- x : Deslocamento translacional;
- M_e : Massa desbalanceada;
- w : Velocidade angular do cesto.

A amplitude das vibrações pode ser aproximada por (3.3):

$$x(t) = a_x \cos(\omega t) \quad (3.3)$$

Onde a_x representa a amplitude de translação causada pela carga desbalanceada e é definido na equação (3.4):

$$a_x = \frac{M_e}{M} \frac{s^2}{\sqrt{(1-s^2)^2 + (2\xi s)^2}} \quad (3.4)$$

Onde $s = \frac{\omega}{\omega_0}$ representa a razão da frequência angular ω e a frequência natural do sistema, $\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{M}}$ e $\xi = \frac{c}{2\sqrt{km}}$ a constante de amortecimento. Quanto excitado em velocidades angulares próximas à frequência natural, o sistema rotacional tenderá a apresentar uma maior quantidade de vibração, podendo inclusive levar a comportamentos destrutivos que exponham o consumidor a riscos de segurança. Na figura 3.9 é possível observar a relação entre a_x e amplificação do movimento próximo à frequência de ressonância.

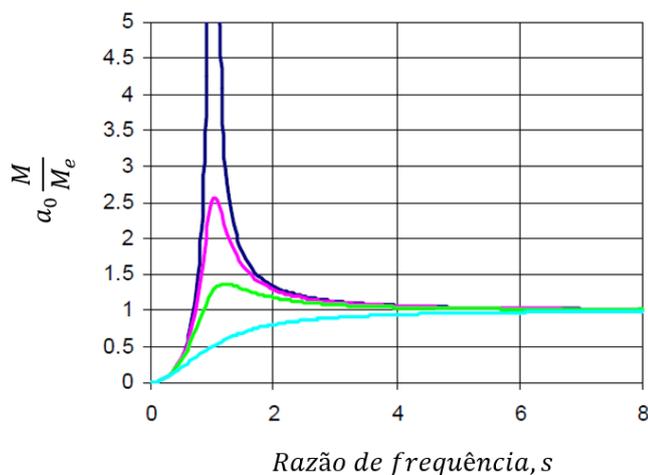


Figura 3.9: Amplificação do deslocamento próximo a frequência de ressonância.

Capítulo 4: Desenvolvimento

4.1: O conjunto de ferramentas Seis Sigma e excelência operacional

Ao longo do desenvolvimento deste trabalho algumas ferramentas provenientes da metodologia Seis sigma foram utilizadas a fim de garantir repetibilidade e robustez às métricas de avaliação do comportamento desbalanceado, frente às mais diversas variações que podem ser observadas durante o funcionamento destes sistemas.

Sendo utilizada na Whirlpool Corporation desde 1997, esta metodologia, que pode tanto ser aplicada ao processo de desenvolvimento de novas tecnologias ou a cadeias de manufatura, visa a racionalização de processos a fim de identificar elementos chave de variação, sejam eles controláveis ou não, e assim estudar seu impacto através de ferramentas estatísticas de avaliação. Um conceito bastante explorado por esta abordagem de gerenciamento de qualidade é a dispersão das observações. A principal busca é por processos com repetibilidade o suficiente para garantir que dentro de um intervalo de seis desvios padrão mantém-se consistência e o comportamento esperado é entregue. Seis desvios padrão representam ao longo de uma distribuição normal 99,99966% das observações (12).

Apesar da importância que os métodos estatísticos representam para o desenvolvimento da metodologia, esta se resume apenas a aplicação dos mesmos. Planejar criteriosamente processos exploratórios e de execução e conhecê-los a fundo, enquanto metas qualitativas precisas são definidas faz parte desta filosofia de eliminação de comportamentos inconsistentes. Para a sua aplicação efetiva, é importante que haja comprometimento com os conceitos por parte de todos os envolvidos com o processo de desenvolvimento de produto e de tecnologia, com mudanças culturais e adaptação estrutural.

Tanto o ciclo DMAIC (*Define, Measure, Analyze, Improve, Control*) quanto o PDSA (*Plan, Do, Study, Act*) são fundamentais à aplicação dos conceitos Seis Sigma ao longo da cadeia produtiva. Neste trabalho o foco principal quanto à melhoria contínua foi o ciclo PDSA, cujo foco é a validação de soluções e novos conceitos, e que está ilustrado na figura 4.1 (13).

Na primeira etapa (*Plan*, ou planejar) são criados os objetivos do projeto. O

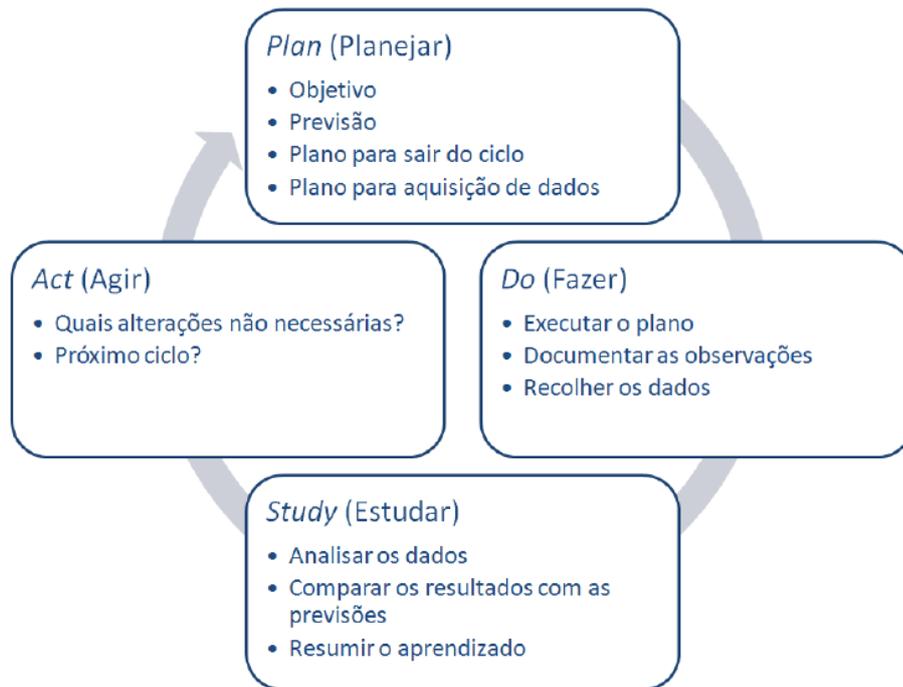


Figura 4.1: Ciclo de desenvolvimento PDSA.

processo é estudado e testes são planejados. É feita uma previsão dos resultados do teste para posterior confrontamento. Na segunda etapa (*Do*, ou fazer) ocorre a execução dos testes, documentação dos problemas e de variações não esperadas. A terceira etapa (*Study*, ou estudar) é onde confrontam-se os resultados encontrados com as previsões. É aqui que se concentra o estudo dos resultados antes das implementações. Na última etapa (*Act*, do português agir) as teorias são modificadas com base nos estudos realizados e processos alternativos podem ou não serem desenhados. Se ao final de uma iteração do ciclo persistirem dúvidas ou inconsistências, deve-se iniciar novamente a primeira etapa e novos testes exploratórios serão planejados e executados.

4.1.1: DOE - *Design of Experiments*

DOE (*Design of Experiment*), é um método sistemático que determina a relação entre fatores que afetam um processo e sua saída. Na prática, é utilizado para determinar relações de causa-efeito (14). Esta informação é necessária para gerenciar entradas do processo com intuito de otimizar sua saída. Um fato importante é que o projetista não precisa (e nem é seu objetivo) levantar equações diferenciais que modelem o sistema a ser testado, mas sim desenvolver um conjunto de medições que crie dados suficientes para provar estatisticamente essas relações, de forma a entender a

influência das variáveis de entrada na saída do sistema. Consiste resumidamente em três fases: o planejamento, onde deve-se cuidadosamente decidir quais variáveis devem ser analisadas; a execução, que deve ser feita com atenção para evitar possíveis erros de interpretação dos resultados ou necessidade de refazer os testes; e a análise dos dados, responsável pelas conclusões e teorias resultantes com base nos testes realizados. Relacionado ao ciclo PDSA, estas três fases encaixam-se, respectivamente, em planejar (*plan*), fazer (*do*) e estudar (*study*).

4.2: Testes exploratórios

A fim de entender melhor e caracterizar os efeitos das cargas desbalanceadas na fase de centrifugação da lavadora, uma rotina de teste foi desenvolvida. Tal rotina consiste em forçar diversos fatores de variação enquanto a carga em questão é acelerada até uma velocidade final comum.

O conjunto de dados resultante da execução destes ensaios forneceu informações de grande importância tanto para a proposta e desenvolvimento de mecanismos de detecção de comportamentos anômalos gerados pela rotação de cargas desbalanceadas, quanto criou uma satisfatória base para validação e *tuning* das estratégias desenvolvidas.

Devido à complexidade do comportamento dinâmico frente a divergências construtivas inerentes aos processos de fabricação dos protótipos utilizados durante o desenvolvimento deste trabalho, os ensaios foram executados em conjunto com outros membros da equipe, que possuem acesso a diferentes protótipos da lavadora em questão. Tais ensaios forneceram uma base importante de comparação, e mostraram diferentes comportamentos que foram levados em conta durante a elaboração de heurísticas robustas para detecção de anomalias durante o funcionamento das lavadoras.

4.2.1: Planejamento das árvores de teste

Os fatores avaliados como críticos para entender a dinâmica de funcionamento com carga desbalanceada foram variados em dois ou três diferentes níveis cada. Tais níveis, escolhidos a partir de testes preliminares, e suas combinações, visam forçar os mais diversos comportamentos dinâmicos sobre o sistema rotativo. Assim, com configurações artificiais, é possível prever com um bom nível de confiança como a

máquina de lavar irá comportar-se para diferentes usuários e casos de uso.

Apesar de o sistema de controle de motor (principalmente do ponto de vista de observadores de estados e estimadores) ter sido projetado para não sofrer influência de variações na tensão de linha, foi tomada a decisão de incluir variações da mesma em diferentes níveis, a fim de garantir que esta não degradaria as métricas de detecção de desbalanceamento.

Pelo entendimento teórico e prático da dinâmica rotacional da lavadora de roupas de eixo vertical, outro fator essencial é a quantidade de carga desbalanceada. Níveis diferentes de desbalanceamento foram escolhidos, a partir de testes preliminares baseados em normas americanas de ruído e deslocamento da máquina de lavar roupas durante o ciclo de lavagem.

Por fim, diferentes rampas de aceleração a serem impostas ao controle de motor foram selecionadas. Tal fator está ligado com o tempo em que a carga estará sendo rotacionada em suas frequências de ressonância, e também está intrinsecamente ligado à quantidade de torque que o motor fornecerá à carga. Outros fatores considerados relevantes quanto sua influência na dinâmica desbalanceada também foram analisados e variados experimentalmente.

A tabela 4.1 resume os diferentes fatores e seus níveis, normalizados por motivos de confidencialidade, levados em contas no planejamento dos experimentos.

Fatores	Níveis		
Fator 1	-1	1	-
Fator 2	-1	1	2
Fator 3	-1	1	2
Fator 4	-1	1	2
Fator 5	-1	1	-
Fator 6	-1	1	-

Tabela 4.1: Fatores variados experimentalmente.

A fim de assegurar a consistência do comportamento de cada uma das combinações dos fatores propostos, 3 repetições de cada tratamento foram executadas. Tendo em vista o alto número de fatores e a quantidade de repetições de cada teste, seria impraticável investigar cada uma das combinações entre as sete variáveis escolhidas, visto que isto resultaria em um número de $2^7 \cdot 3$ rodadas; 384 no total. Então, com o auxílio do software de análise estatística de dados e planejamento de experimentos JMP, uma árvore fatorial fracionada com 48 rodadas foi obtida para a DOE em questão. O software garante que haja a máxima interação entre as variáveis enquanto obedece-se a

limitação do número de tratamentos.

Uma análise de COV (Componentes de variação) também foi executada sem que fossem forçados níveis de desbalanceamento. Este conjunto de testes visa prover uma base comparativa, retratando o funcionamento normal do sistema. A tabela 4.2 resume tais variáveis e seus níveis.

Fatores	Níveis	
Fator 1	-1	1
Fator 3	-1	1
Fator 5	-1	1

Tabela 4.2: Fatores variados como base comparativa.

Para o experimento de base foram executadas todas as combinações entre as variáveis, considerando 3 repetições para cada um dos tratamentos. O número total de execuções da rotina de teste para os dados de base é, portanto, 24.

Assim, cada bateria de testes exploratórios fornece dados provenientes de 72 rodadas experimentais.

4.2.2: Configuração de testes

Definido um plano de testes, foram definidos os materiais a serem utilizados como cargas balanceadas e desbalanceadas. Para carga balanceada, anéis de borracha com comprimento igual a circunferência interna do cesto foram cortados, a fim de garantir uma distribuição uniforme de massa. A fim de simular as duas distribuições desbalanceadas a serem exploradas, pedaços de borracha foram cortados, conforme as massas especificadas. Calços de isopor são utilizados a fim de variar a altura da carga excêntrica. A figura 4.2 mostra tal configuração de testes.

Uma fonte de tensão controlada AC foi utilizada a fim de variar a tensão de linha, garantindo consistência neste ponto ao longo dos experimentos.

Séries temporais relevantes para as posteriores análises, como sinais de torque e velocidade foram capturadas com o auxílio de uma solução comercial de comunicação e aquisição de dados digitais, a fim de fazer a interface entre a placa controladora da máquina de lavar roupas e o computador utilizado para envio de comandos e leitura de dados dos experimentos.



Figura 4.2: Configuração de cargas para testes de desbalanceamento.

4.2.3: Sensores utilizados nos testes

Simultaneamente a aquisição das séries temporais utilizadas para caracterização da dinâmica de funcionamento do sistema de controle de motor, um aparato composto de acelerômetros foi implementado a fim de capturar o comportamento físico do cesto da máquina de lavar roupas. Assim, possibilita-se a obtenção de fatores quantitativos para comparação das métricas calculadas com base no comportamento dinâmico do sistema de controle, tendo assim, indicadores externos e objetivos para a caracterização de métricas de vibração e deslocamento da carga.

Para tanto, foi utilizado um acelerômetro triaxial largamente utilizado em equipamentos portáteis como celulares e computadores, e implementado na forma de um circuito integrado, o MMA7361. A solução comercial escolhida para tal intuito apresenta circuitos condicionadores para os sinais provenientes do sensor e sua devida alimentação. As acelerações instantâneas em 3 eixos são então disponibilizadas na forma de níveis de tensão DC de 0 a 3.3V, com sensibilidade de 800mV/g. Tal transdutor de vibração é mostrado na figura 4.3.

Para a aquisição dos sinais analógicos provenientes do acelerômetro, um *DAQ* (Dispositivo de aquisição de dados) da empresa National Instruments foi utilizado, em conjunto com uma solução de software implementada sobre a plataforma LABVIEW, da mesma empresa. Para que os sinais digitais logados a partir da placa de controle fossem sincronizados com as séries temporais adquiridas do transdutor de aceleração,

sofrer influência deste fator.

4.3: Análises de deslocamento do sistema

A fim de extrair dados sobre o comportamento dinâmico da carga acoplada ao motor elétrico, foram desenvolvidas rotinas de pós-processamento dos sinais captados a partir do sensor de vibração. Um indicador interessante obtido a partir do tratamento das séries temporais de aceleração é o deslocamento do sistema *versus* tempo. Nesta seção será explicitado o método utilizado para a obtenção de tal métrica.

Além das acelerações causadas por deslocamentos mecânicos, uma componente sempre presente nos sinais de saída do módulo utilizado é a força proveniente do campo gravitacional da Terra. Tal fator está constantemente representado por *offsets* DC nos valores lidos, que variam de acordo com a orientação do sensor. Na figura 4.5, disponibilizada pelo fabricante do circuito integrado MMA7361, tais leituras são ilustradas conforme suas respectivas disposições.

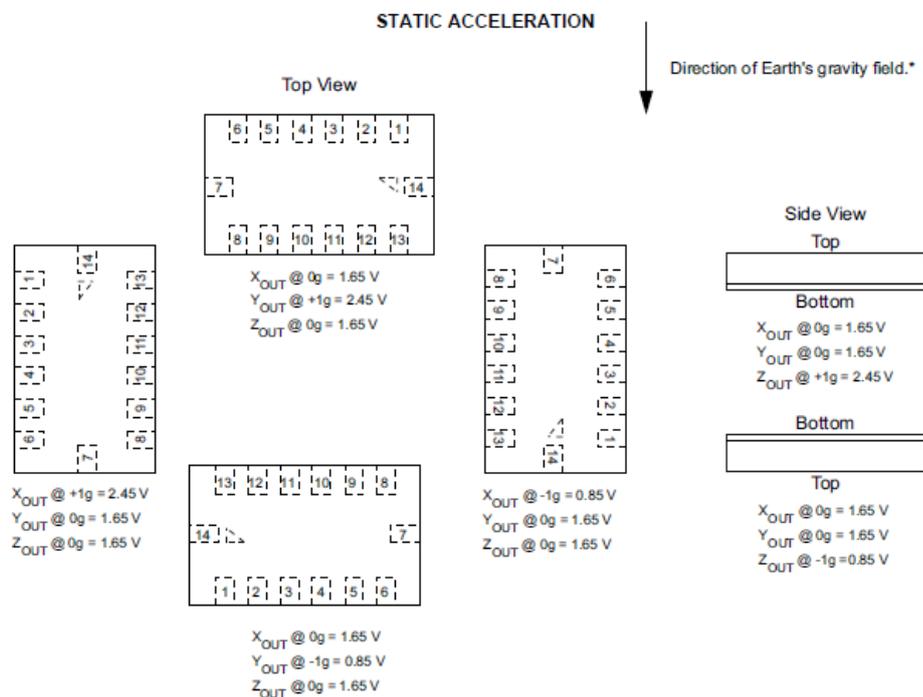


Figura 4.5: Acelerações estáticas causadas pelo campo gravitacional da Terra.

Quando os sinais adquiridos são representado no domínio frequencial, através da transformada de Fourier, a energia proveniente de tal componente DC é vista no início do espectro, com frequência próxima a zero. Portanto, quando tratado por um filtro passa-altas, tal elemento é atenuado e obtém-se uma representação temporal

com média zero, livre do *offset*. Como a orientação do sensor é constante ao longo do experimento, já que este é submetido apenas a movimentos de translação, e não de rotação ou inclinação, os *offsets* DC mantêm-se ao longo do sinal. Portanto, uma alternativa mais simples que o filtro passa-altas seria a subtração da média da série temporal de cada uma das amostras. Assim, define-se o primeiro passo da rotina de reconstituição da trajetória de translação do sistema rotacional.

Como o objetivo é a reconstituição da trajetória do sistema a partir de suas acelerações instantâneas, é importante estudar como estas grandezas relacionam-se entre si. A relação entre sinais de aceleração, velocidade e posição se dá por uma ou duas integrações ao longo do tempo, respectivamente, conforme previsto pela cinemática. Matematicamente, para grandezas contínuas, tal desenvolvimento é expresso pela fórmula (4.1).

$$d(t) = d_0 + v_0 \cdot t + \int_0^t dt \cdot \int_0^\tau a(\tau) \cdot d\tau \quad (4.1)$$

Como o sinal a ser tratado é uma série temporal discreta, e não contínua, deve-se lançar mão de métodos numéricos de integração, como por exemplo o método do trapézio, ilustrado na figura 4.6.

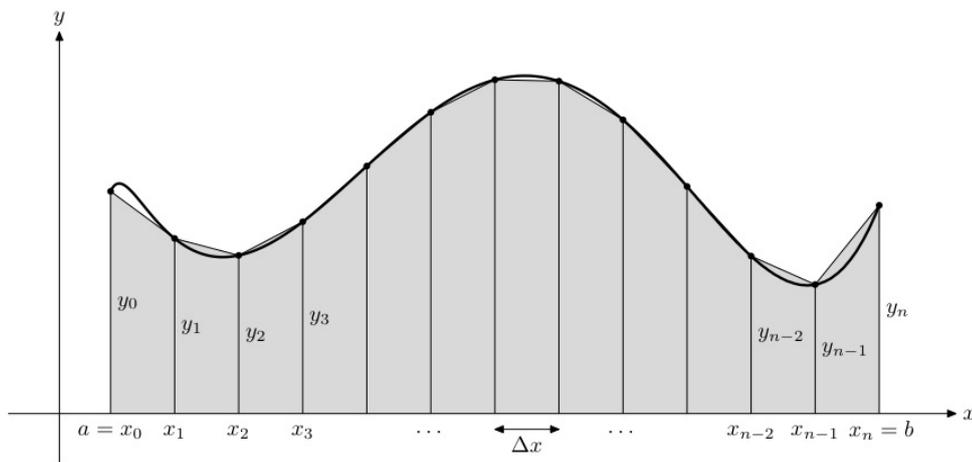


Figura 4.6: Método de integração numérica trapezoidal.

Numericamente, tal método de integração é calculado seguindo a fórmula (4.2):

$$\int_{t_0}^{t_n} a(t) \cdot dt \cong \sum_{i=1}^n \left(\frac{a(i-1) + a(i)}{2} \right) \cdot \Delta t \quad (4.2)$$

Onde:

- $a(t)$: Sinal contínuo no tempo;
- $a(i)$: Amostra i do sinal discreto;
- Δt : Incremento de tempo entre amostras;
- n : Número de amostras do sinal digital;

4.3.1: O problema da integração no tempo

Apesar de a integração no tempo parecer simples a primeira vista, há uma série de desafios que podem comprometer os resultados finais (15). Quando integra-se um sinal, componentes de baixa frequência são fortemente amplificados; componentes de alta frequência são atenuados e há alterações de fase. Destes problemas, o que representa maior desafio e maior degradação dos resultados são as componentes de baixa frequência. Qualquer *offset* dominará a resposta de posição.

Assim, uma solução seria filtrar o sinal com um filtro digital que atenuar as baixas frequências, deixando passar as altas. Tal solução foi adotada, e assim, entre as duas etapas de integração, o sinal é previamente filtrado, garantindo assim que tais componentes não se propaguem e não degradem o resultado final. Tal tratamento, por remover parte do espectro frequencial, conseqüentemente impossibilita a análise de tal faixa do espectro. Assim, o deslocamento relativo ao sistema referencial da máquina de lavar é reconstituído, pois seu movimento acontece em frequências maiores do que as atenuadas. Porém, a informação sobre a translação da lavadora no espaço, conhecida também como *machine walking* é perdida. Para obter tais dados de deslocamento, são utilizados sistemas de medição de distância a laser, apontados para os pés da máquina de lavar. Outra opção seria demarcar o chão e utilizar posições iniciais padrão. Assim seria possível medir quanto o sistema se deslocou durante o experimento, pela diferença em relação a posição padrão.

Outro ponto a ser notado em relação ao processamento do sinal proveniente dos acelerômetros, é sua extrema suscetibilidade a interferências eletromagnéticas, inclusive das causadas pelo chaveamento efetuado pelo inversor de frequência que compõe o sistema de controle de motor. Para remover as componentes de ruído do sinal, é utilizado um filtro passa-baixas, tunado após cuidadoso estudo sobre as frequências fundamentais que representam a vibração mecânica do sistema.

Finalmente, combinando ambas as especificações de remoção de componen-

tes de altas e baixas frequências, chega-se ao projeto de um filtro passa-banda. Como solução, foi utilizado um filtro elíptico de quarta ordem (oitava ordem, pois $N = 2 \cdot n$ para filtros passa-banda, já que estes podem ser vistos como um filtro passa-baixas e um passa-altas concatenados), capaz de isolar apenas a região de interesse do espectro frequencial. A figura 4.7 mostra as posições dos polos e zeros de tal sistema linear discreto no plano complexo.

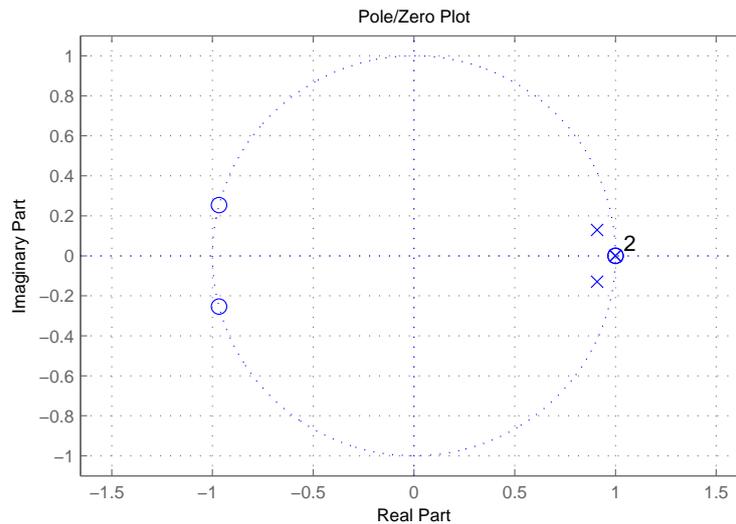


Figura 4.7: Alocação de pólos e zeros para o filtro passa-banda projetado para o pós-processamento dos sinais de aceleração.

Na figura 4.8 está representada a resposta em frequência do filtro passa-banda utilizado no pós-processamento dos sinais de aceleração. Tal resposta está normalizada a fim de evitar expor quaisquer informações sigilosas sobre a dinâmica de sistemas que ainda estão em fase de desenvolvimento.

Sintetiza-se assim um algoritmo para reconstrução do movimento translacional do cesto da lavadora de roupas durante a realização dos experimentos planejados. A sequência de execução é basicamente a seguinte:

1. Remove-se a componente DC do sinal e o mesmo é processado pelo filtro previamente projetado;
2. É efetuada a primeira integração do sinal, e uma nova filtragem, adquirindo-se assim o sinal de velocidade do sistema;
3. O sinal de velocidade é integrado, obtendo-se assim o deslocamento no decorrer do tempo.

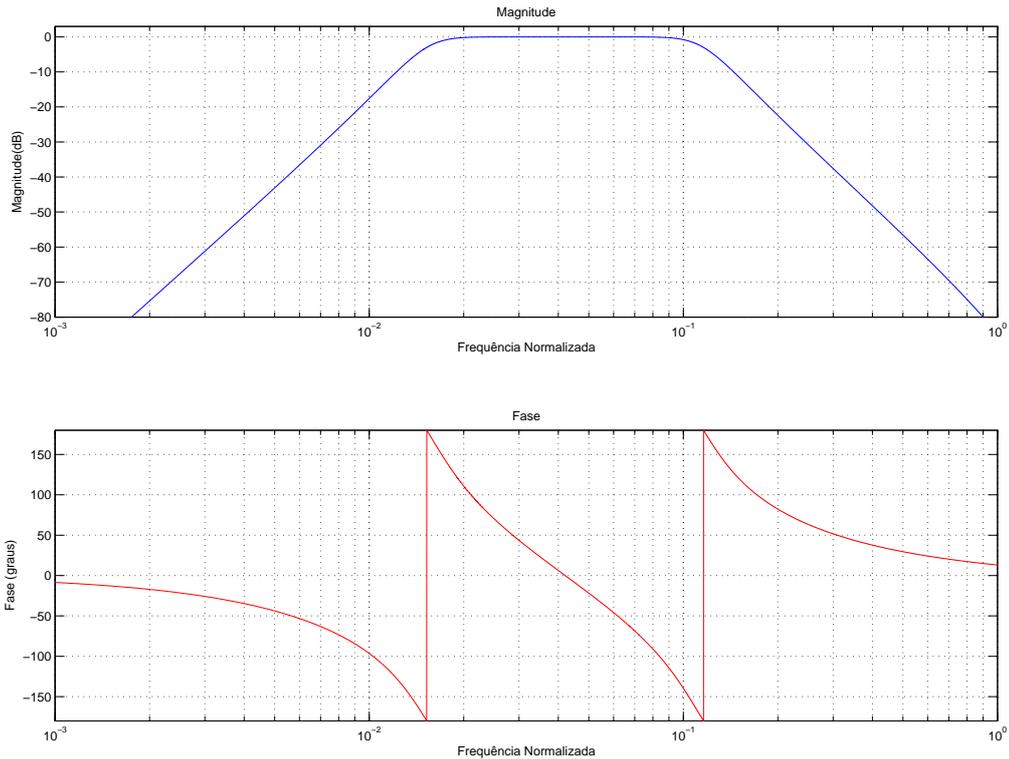


Figura 4.8: Resposta em frequência normalizada para o filtro passa-banda.

Na figura 4.9 estão representadas as etapas de processamento dos sinais de aceleração.

4.4: Algoritmos de detecção de carga desbalanceada

Tendo definido métricas comparativas e planos de testes, passa-se a etapa de desenvolvimento de algoritmos que sejam capazes de entregar métricas com uma boa correlação com medidas relacionadas aos efeitos nocivos da aceleração do cesto da máquina de lavar roupas quando este é carregado com distribuições excêntricas de carga. Tais distribuições podem surgir, por exemplo, após o ciclo de lavação e agitação das roupas.

Um dos requisitos para as estratégias de detecção de desbalanceamento a serem desenvolvidas é a não-utilização de sensores, como por exemplo acelerômetros ou sensores de deslocamento. O objetivo principal aqui é encontrar métricas de processamento dos sinais disponibilizados pelos observadores e estimadores presentes na malha de controle de motor. Estados como torque, velocidade, posição, tensão de

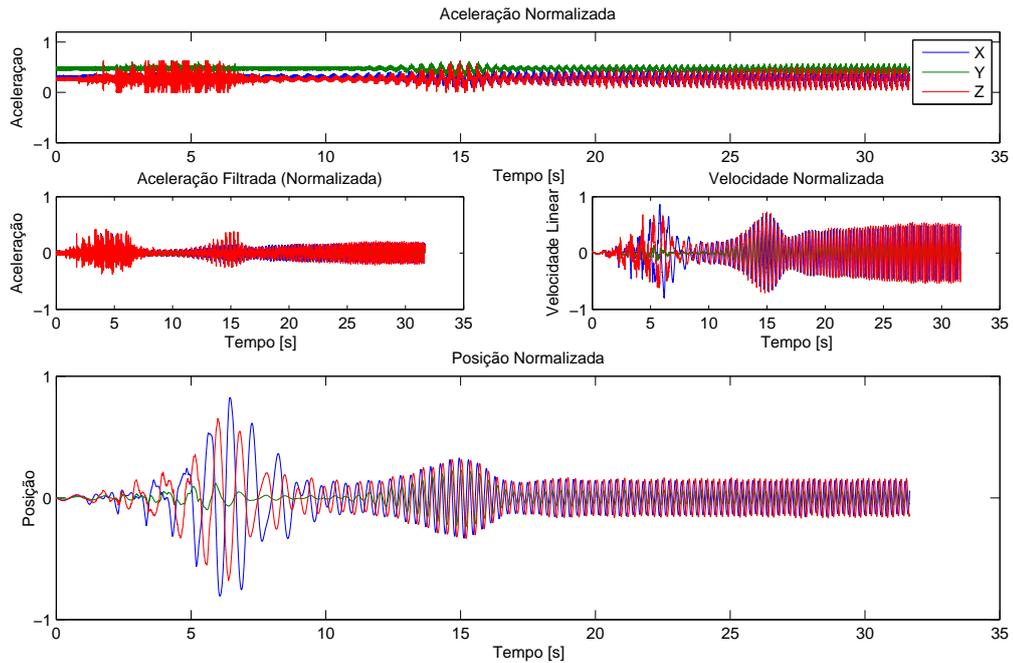


Figura 4.9: Sequência do algoritmo de reconstrução de deslocamento.

barramento, entre outros, podem fornecer informações indicativas sobre a dinâmica rotacional. Eventuais batidas do cesto na carcaça, ou vibração e deslocamento causados por cargas desbalanceadas acabam por refletir na dinâmica de controle, visto que tais eventos são perturbações sobre o sistema rotacional, cujo objetivo principal aqui é seguir rampas de referência de velocidade angular.

Dois diferentes conceitos foram explorados um explorando o comportamento dinâmico da potência do motor e outro observando seu torque. Por motivos de confidencialidade, tais estratégias não poderão ser abordadas em detalhes neste documento. Esta seção mostra uma visão geral dos fluxos de execução de ambos os conceitos.

4.4.1: Algoritmo 1

O primeiro conceito de detecção de cargas desbalanceadas utiliza informações de potência instantânea do sistema, a fim de calcular uma métrica que seja capaz de diferenciar casos de funcionamento normal das rodadas experimentais que apresentaram um comportamento ruim ou crítico. Na figura 4.10 são ilustradas séries temporais de torque do motor, quando o mesmo é acelerado até uma velocidade final predeterminada. Vale ressaltar que os valores aqui estão normalizados, a fim de evitar expor

informações sigilosas.

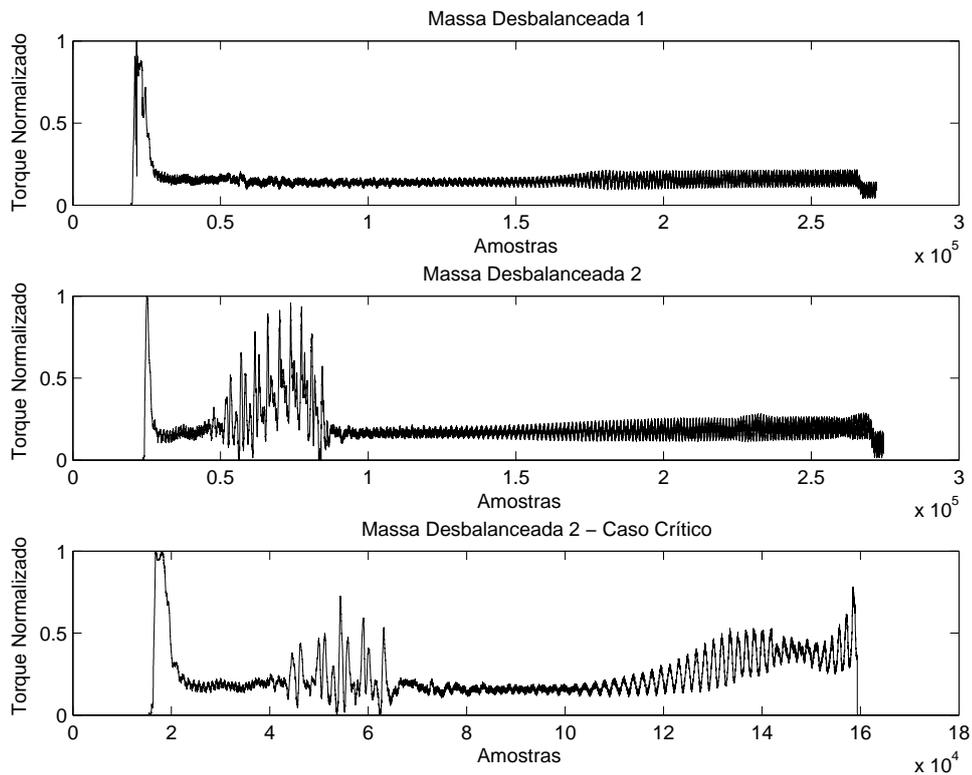


Figura 4.10: Séries temporais de torque no eixo do motor, comparando três diferentes dinâmicas desbalanceadas.

Cada um dos sinais representa um tipo de comportamento dinâmico no sistema. No caso normal, a carga atingiu a velocidade final sem maior incidência de vibração ou qualquer outra anomalia. No caso ruim, apesar desta ter apresentado bastante vibração e até deslocamento da máquina de lavar roupas como um todo (comportamento conhecido como *machine walking*) ao passar pelas frequências de ressonância do sistema rotacional, esta foi capaz de atingir a velocidade final sem maiores danos construtivos. Já no caso crítico, foi necessária a parada emergencial do motor elétrico, visto que o sistema apresentou impactos excessivos entre o cesto a ser acelerado e a carcaça da máquina, com grande potencial para causar danos construtivos permanentes. A figura 4.11 mostra a comparação ao longo do tempo dos sinais de deslocamento calculados e do sinal de torque estimado pelo algoritmo de controle. No canto superior direito da imagem, foi desenhada a órbita do sistema, quando *plotados* os deslocamentos sobre o plano perpendicular ao eixo de rotação.

Rotinas de processamento em lote foram implementadas em MATLAB, a fim de processar automaticamente os dados provenientes de todas as rodadas de exploração previamente executadas, conforme os planos de teste desenvolvidos. A análise das

métricas calculadas para cada caso foi feita utilizando uma ferramenta de análise estatística. Um extenso conjunto de dados foi gerado neste processo, onde os graus de liberdade de cada algoritmo foram explorados visando maximizar a discriminação entre casos bons e ruins e minimizar o erro quadrático da saída do algoritmo com as reconstruções de deslocamento.

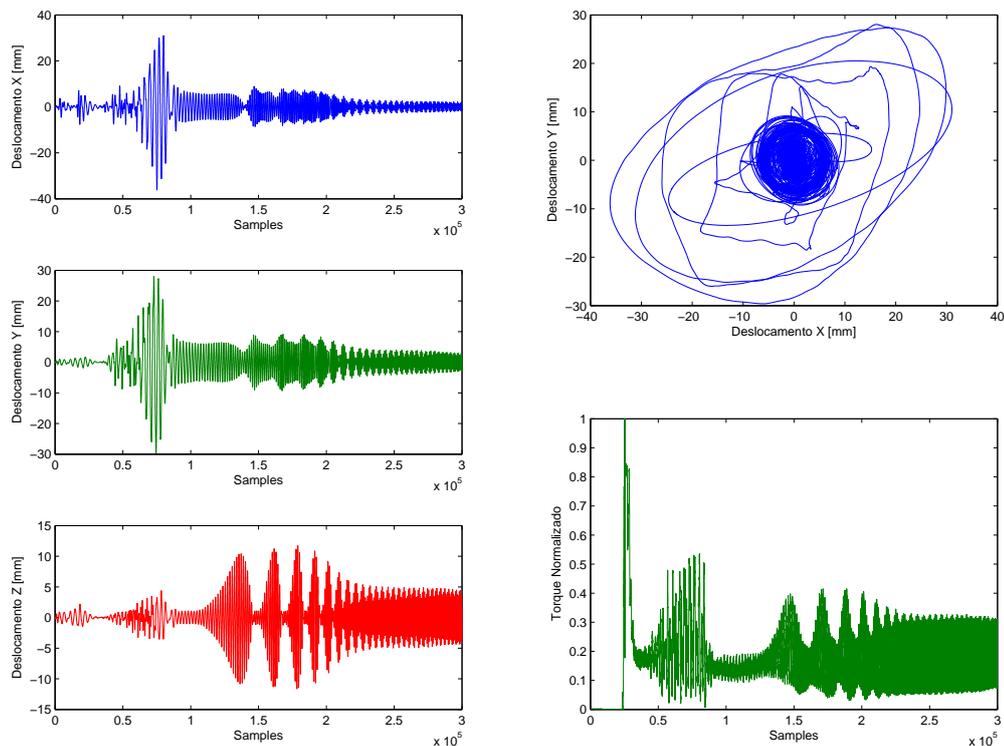


Figura 4.11: Comparativo dos sinais de deslocamento translacional do cesto e torque estimado.

4.4.2: Algoritmo 2

O segundo algoritmo estudado é utilizado no processamento do sinal de torque, diferente do primeiro conceito, que explora a potência do sistema. A partir de um estudo comparativo no domínio da frequência, apontou-se uma faixa do espectro onde há a maior diferença entre sinais provenientes de rodadas críticas e normais, em relação ao desbalanceamento. A figura 4.12 mostra FFTs calculadas para um caso passível de detecção e uma rodada normal, que não deve ser detectada. A escala de frequência deste gráfico está normalizada, a fim de evitar a divulgação de informações sensíveis.

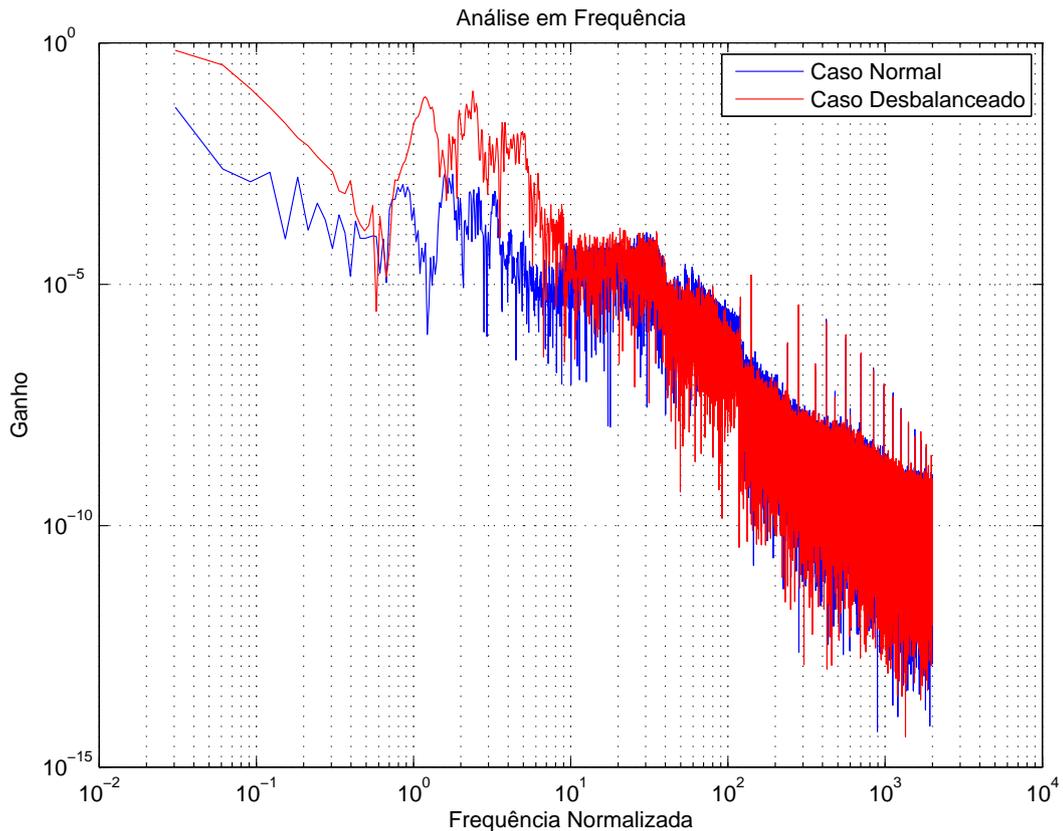


Figura 4.12: Análise frequencial de um caso de aceleração balanceada vs. desbalanceada.

Obtém-se assim conhecimento de uma faixa de frequência onde a diferença entre os casos é bastante clara. No diagrama 4.12 esta faixa corresponde ao espaço de 1 a 10 unidades no eixo da frequência. Tanto frequências mais baixas, quanto mais altas que estas não mostram informações relevantes para a detecção de desbalanceamento. A banda de baixa frequência corresponde à resposta ao sinal de referência, que acaba representando um *offset* DC no sinal de torque. Este *offset* não reflete significativamente o impacto da carga desbalanceada, e sim de outros fatores, como inclinação da rampa de referência de velocidade angular, quantidade de carga balanceada, massa do cesto, etc. As componentes de alta frequência também não mostram-se relevantes e relacionadas com as cargas desbalanceadas. Nesta faixa estão contidas compensações internas da malha de controle, como de fluxo e corrente, que acabam impactando também na estimação de torque e nos sinais de controle enviados para o motor. Tal componente não é afetada também pela dinâmica de cargas excêntricas. Assim, o pré-processamento do sinal de torque envolve sua filtragem com um filtro passa-banda, afim de reter apenas as componentes frequenciais consideradas relevantes.

Algumas outras etapas de processamento são efetuadas e obtém-se então o fluxo de execução do algoritmo, que foi devidamente estudado e ajustado com base nos dados adquiridos do plano de experimentos exploratórios, e finalmente implementado na linguagem C e embarcado na placa controladora da lavadora de roupas, afim de validar sua eficiência em configurações conhecidamente passíveis de detecção. A figura 4.13 mostra em linhas gerais o fluxo de processamento executado pelo conceito #2 de detecção de carga desbalanceada.

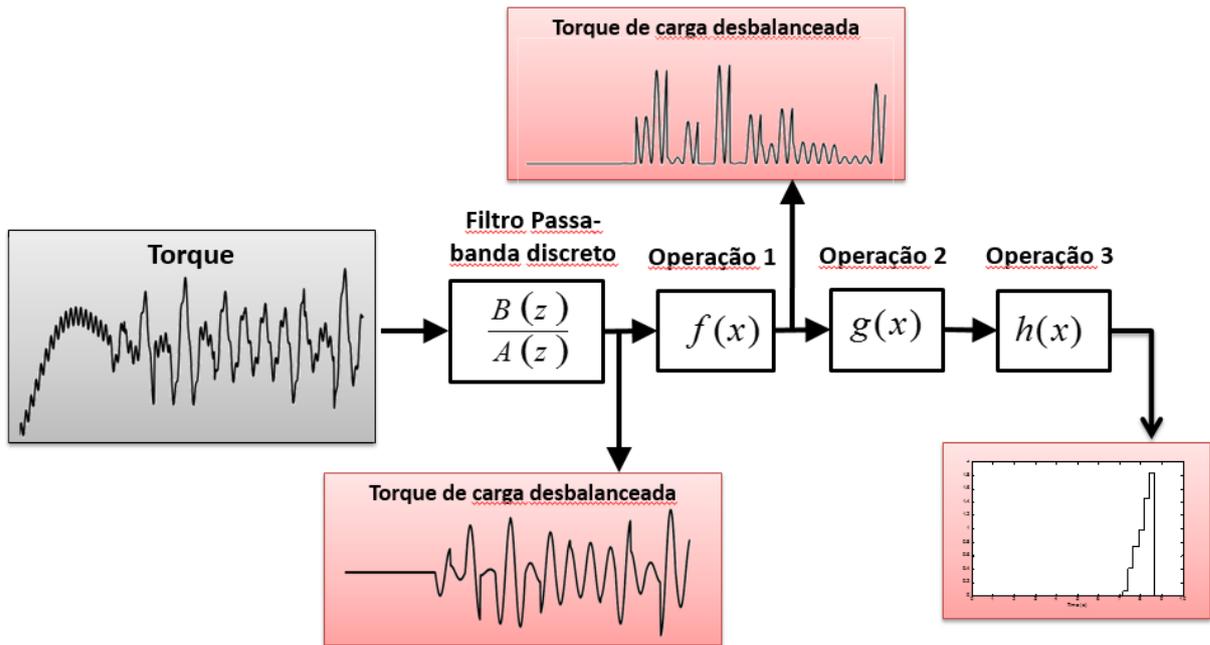


Figura 4.13: Etapas de processamento efetuadas pelo algoritmo número 2.

Capítulo 5: Resultados

Neste capítulo serão discutidos os resultados alcançados, tanto em relação às abordagens *offline* de processamento em lote dos dados de experimentos exploratórios, quanto os resultados das implementações embarcadas dos conceitos de detecção de carga desbalanceada aqui propostos.

5.1: Análises de variação

O gráfico de variação foi a ferramenta 6 sigma mais utilizada ao longo do processo de desenvolvimento e ajuste dos algoritmos, devido ao potencial desta ferramenta para organização e comparação de grandes quantidades de dados. Cada experimento gerou 144 conjuntos de sinais, a cada vez que o plano de testes foi executado. As rodadas de *baseline* são constituídas de 8 configurações. Somam-se a estas 40 configurações diferentes de cargas excêntricas, variando os fatores citados no capítulo de desenvolvimento. Para cada variação, 3 rodadas foram executadas. Nas últimas etapas de desenvolvimento, dados provenientes de dois experimentos realizados em protótipos diferentes foram levados em conta. Portanto, fazem-se necessários meios eficientes de visualização e indexação de resultados, a fim de tornar possível a análise consistente de um universo de variações tão grande. Assim, os gráficos de variação desempenharam um importante papel no processo de obtenção de métricas robustas e coerentes.

Tendo em vista os diferentes comportamentos dinâmicos do sistema quando este é excitado no primeiro e segundo modos de ressonância, as análises comparativas foram efetuadas separadamente em cada uma das faixas de velocidade angular relevantes. Esta análise é importante pois evita que deslocamentos máximos sejam confundidos entre as diferentes dinâmicas, e cria a oportunidade de checar a consistência das métricas quando aplicadas a diferentes comportamentos.

As análises aqui apresentadas resumem-se à menor aceleração angular explorada, visto que quando exposto ao segundo nível do plano de testes, tanto a diferenciação entre diferentes dinâmicas quanto a correlação com os deslocamentos máximos do cesto foram menos satisfatórias do que quando o sistema foi exposto ao primeiro nível de aceleração.

5.1.1: Algoritmo 1

Ao longo da primeira frequência ressonante, o principal comportamento observado foi um grave deslocamento ao longo do plano perpendicular ao eixo de rotação, causando inúmeros impactos entre o cesto da máquina de lavar roupas e sua carcaça. Dependendo da gravidade das colisões, houve maiores ou menores deslocamentos do sistema inteiro, quantificados a partir de medidores laser fixados em cada um dos quatro suportes (pés) da máquina.

Observam-se aqui dois pontos bastante interessantes: no primeiro deles, nota-se a boa correlação entre o deslocamento translacional do cesto de lavar roupas inferido por acelerômetros, e a saída da métrica aplicada aos sinais de controle de motor do sistema. Outro ponto a ser colocado é que, segundo as observações de *machine walking*, ou deslocamento dos pés da máquina de lavar, os casos marcados em vermelho, que posicionam-se claramente acima das demais rodadas, foram os únicos que apresentaram-se fora dos limites impostos pelos órgãos reguladores. Assim, basta uma simples comparação com um limiar (definido em 0.6, para que tais casos sejam detectados em tempo de execução.

Observa-se na figura 5.1 a análise de variação dos máximos deslocamentos calculados para o cesto de roupas frente à saída da métrica número um para detecção de cargas desbalanceadas.

Enquanto a carga é rotacionada ao longo da segunda frequência ressonante do sistema, esta apresenta um novo comportamento dinâmico, que pode ser visto na figura 5.2; isto é, desloca-se ao longo do eixo longitudinal de rotação, além do deslocamento anteriormente observado ao longo do plano perpendicular. Tal dinâmica possui um efeito extremamente danoso ao sistema, do ponto de vista de vibração e ruído. Em algumas configurações pode inclusive forçar a parada emergencial da rotação da carga, a fim de evitar danos estruturais permanentes ao equipamento. Tal caso emergencial está marcado em vermelho no gráfico de variação, que mostra novamente uma boa correlação entre máximo deslocamento e métrica de avaliação.

5.1.2: Algoritmo 2

Na figura 5.3 pode-se observar as saídas para o processamento dos sinais provenientes da rotação do sistema ao longo da primeira frequência ressonante, utilizando o conceito de detecção de desbalanceamento #2. Um ponto bastante interes-

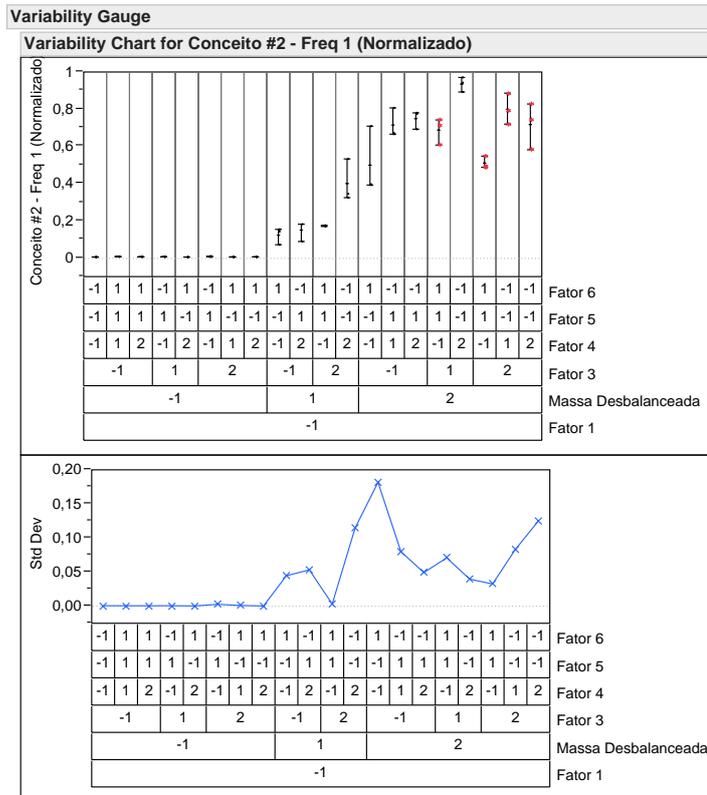


Figura 5.3: Gráfico de variação da métrica #2 para a primeira frequência ressonante.

5.3: Testes embarcados

A escolha do conceito mais adequado foi efetuada a partir da avaliação da saída de rotinas de pós-processamento em lote, que, implementadas em MATLAB visam reproduzir a lógica de execução do algoritmo de forma idêntica à que este seria executado embarcado no sistema. A partir destas rotinas, foi possível analisar criticamente os conceitos propostos e possibilitou também o ajuste dos parâmetros relacionados a estas métricas de processamento de sinais. Lembrando, estes algoritmos foram executados de forma *offline* utilizando sinais capturados dos testes exploratórios.

A fim de validar os algoritmos de processamento em lote, e conseqüentemente os conceitos em desenvolvimento, um segundo passo foi a implementação destes em C e sua integração com a plataforma embarcada de controle de motor e rotinas de lavagem. Algumas modificações foram efetuadas, como por exemplo, a implementação de *buffers* para comparações entre sinais em diferentes instantes de tempo, e a implementação de filtros discretos em forma de equações a diferenças. Um

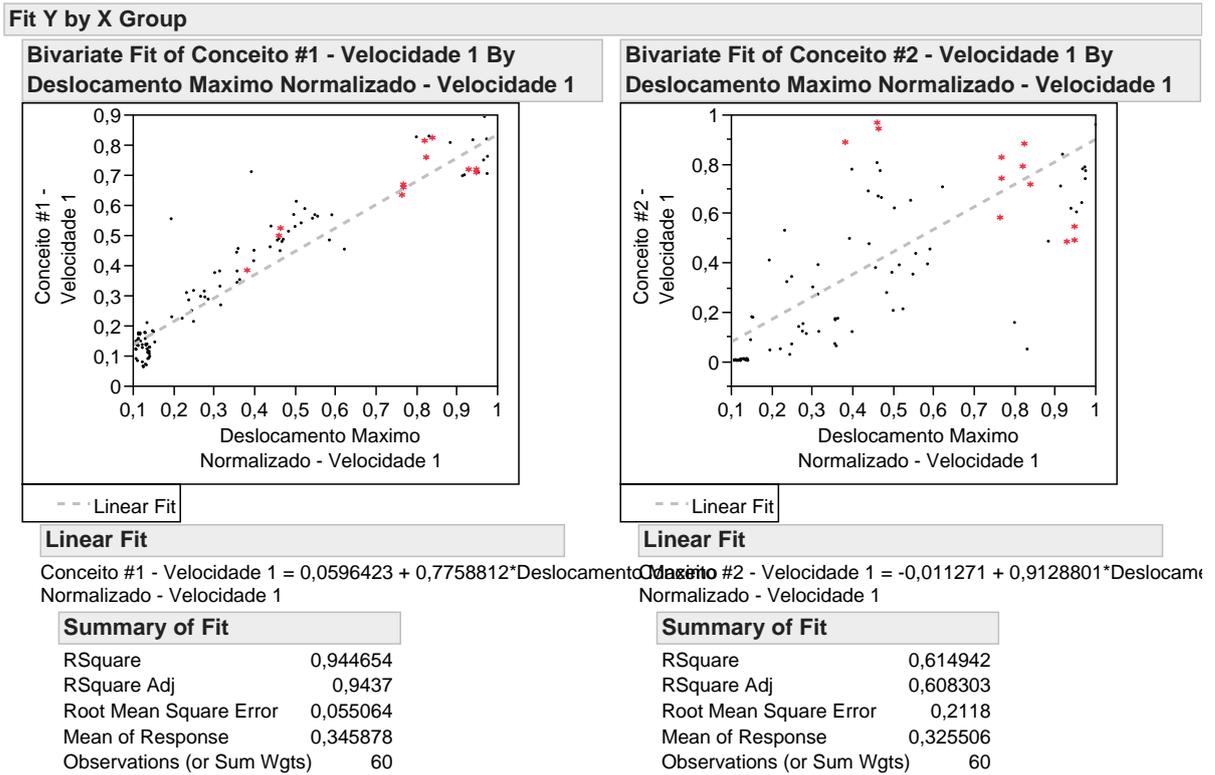


Figura 5.4: Regressão linear das saídas de ambas as métricas, comparadas com o deslocamento máximo do cesto.

threshold, ou limiar, foi escolhido para cada uma das métricas com base no conhecimento adquirido na fase exploratória. Este limiar possui como função separar entre momentos passíveis de detecção e comportamentos regulares.

O conceito #1 mostrou-se bastante satisfatório nestes testes, apresentando uma taxa de 100% de detecção para os casos previamente conhecidos como passíveis de serem classificados como críticos, sem nenhum falso positivo. Vale ressaltar também que nos momentos onde houve a detecção de desbalanceamento crítico, esta informação foi obtida momentos antes à necessidade de atuação com parada emergencial do sistema. Quando configurado para parar o motor em caso de detecção, o movimento do cesto foi cessado antes que houvesse potencial de danos construtivos à máquina de lavar roupas.

Capítulo 6: Conclusões e Perspectivas

Ao fim deste trabalho, o projeto de desenvolvimento de um mecanismo de detecção de desbalanceamento em lavadoras de eixo vertical encontra-se já em estado avançado. Foi possível provar a aplicabilidade de um dos conceitos estudados na atual problemática, e o mesmo pôde ser desenvolvido a ponto de alcançar considerável maturidade. Sua eficácia foi comprovada a partir de experimentos embarcados nos protótipos disponíveis no momento, restando agora sua validação e possíveis melhorias em futuras fases do ciclo de desenvolvimento de produto no qual este está inserido.

Resta agora para a equipe de desenvolvimento atuante neste projeto, validar e comparar com outras métricas que vêm sendo concebidas em paralelo por outros integrantes, e também refinar a abordagem atual a fim de obter ainda melhores correlações com deslocamentos do sistema. Outro ponto passível de ser trabalhado é o desenvolvimento de novas métricas comparativas, descritivas das dinâmicas desbalanceadas das máquinas de lavar. Equipamentos de transdução de distância, como ultrassom e laser podem ser utilizados neste intuito.

Uma nova plataforma, que está ainda em fase de concepção, herdará os conceitos aqui desenvolvidos, cabendo à equipe envolvida com a mesma a adaptação destes e consequentes refinamentos sobre a nova linha de produtos.

Do ponto de vista pessoal, este trabalho teve irrefutável importância ao fornecer inúmeras oportunidades de aplicação de conceitos teóricos internalizados ao longo do curso de Engenharia de Controle e Automação. Processamento digital de sinais, técnicas de controle, métricas de avaliação de desempenho, entre outros tantos conceitos foram abordados ao longo da busca por soluções simples, elegantes e robustas para cumprir os objetivos aqui propostos.

Referências

- 1 WHIRLPOOL Latin America. Disponível em: <<http://www.whirlpool.com.br/>>. Acesso em: agosto de 2013.
- 2 WASHING Machine. Disponível em: <http://en.wikipedia.org/wiki/Washing_machine>. Acesso em: agosto de 2013.
- 3 HOW Washing Machines Work. Disponível em: <<http://home.howstuffworks.com/washer.htm>>. Acesso em: agosto de 2013.
- 4 FILHO, G. F. Motor de indução. [S.l.]: Ed. Érica, 2000.
- 5 CONDIT, R. Brushed dc motor fundamentals. Microchip Technology Inc, <http://ww1.microchip.com/downloads/en/AppNotes/00905a.pdf>, 2004.
- 6 STEINMETZ, C. P. The alternating current induction motor. American Institute of Electrical Engineers, Transactions of the, IEEE, v. 14, n. 1, p. 183–217, 1897.
- 7 SEKALALA, S. Performance of a Three-phase Permanent Magnet Motor Operating as a Synchronous Motor and a Brushless DC Motor. Tese (Doutorado) — Louisiana State University, 2006.
- 8 NASH, J. N. Direct torque control, induction motor vector control without an encoder. Industry Applications, IEEE Transactions on, IEEE, v. 33, n. 2, p. 333–341, 1997.
- 9 GAMAZO-REAL, J. C.; VÁZQUEZ-SÁNCHEZ, E.; GÓMEZ-GIL, J. Position and speed control of brushless dc motors using sensorless techniques and application trends. Sensors, Molecular Diversity Preservation International, v. 10, n. 7, p. 6901–6947, 2010.
- 10 KUMAR, R.; GUPTA, R.; BHANGALE, S. Vector control techniques for induction motor drive: a review. International Journal of Automation and Control, Inderscience, v. 3, n. 4, p. 284–306, 2009.
- 11 MAJEWSKI, T.; VALENZUELA, I. Fluid automatic balancer for a washing machine. In: XVI Congreso Internacional Anual de la SOMIM. [S.l.: s.n.], 2010.
- 12 PANDE, P.; NEUMAN, R. P.; CAVANAGH, R. R. The six sigma way: how Ge, Motora and other top companies are honing their performance. [S.l.]: Recherche, 2000.
- 13 INTRODUCTION to Lean and Six Sigma Approaches to Quality Improvement. Disponível em: <<http://www.qualitymeasures.ahrq.gov/expert/expert-commentary.aspx?id=32943>>. Acesso em: agosto de 2013.
- 14 DESIGN of Experiment (DOE). Disponível em: <<http://www.isixsigma.com/tools-templates/design-of-experiments-doe/>>. Acesso em: agosto de 2013.

15 SLIFKA, L. D.; SLIFKA, L. D. An accelerometer based approach to measuring displacement of a vehicle body. Master of Science in Engineering, Department of Electrical and Computer Engineering, University of Michigan–Dearborn, 2004.