

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

Estudo Comparativo de Métodos de Detecção e Estimação de Carga Seca e Desbalanceamento em Lavadoras de Eixo Vertical

*Relatório submetido à Universidade Federal de Santa Catarina
como requisito para a aprovação da disciplina:*

DAS 5501: Estágio em Controle e Automação Industrial

Luiz Renato Tomelin

Florianópolis, Março de 2014

Estudo Comparativo de Métodos de Detecção e Estimação de Carga Seca e Desbalanceamento em Lavadoras de Eixo Vertical

Luiz Renato Tomelin

Orientadores:

M.Sc. Maurílio F. Catharino / Whirlpool S.A

Assinatura do Orientador

Prof. Max Hering de Queiroz

Assinatura do Orientador

Este relatório foi julgado no contexto da disciplina
DAS 5501: Estágio em Controle e Automação Industrial
e aprovado na sua forma final pelo
Curso de Engenharia de Controle e Automação

Agradecimentos

À Deus, por ter me garantido graças e bençãos que me permitiram alcançar os caminhos por Ele e por mim traçados.

Aos meus pais Luiz Tomelin e Maria Fátima do Nascimento Tomelin, pelo constante apoio, amor e carinho.

Ao meu irmão André Luiz Tomelin, por sempre agir como um excelente irmão mais velho, protegendo-me, orientando-me, compartilhando risadas e criando boas lembranças ao meu lado.

Aos professores do curso de Engenharia de Controle e Automação da UFSC, pelo excelente papel desempenhado, fornecendo-me uma sólida formação profissional. Em especial agradeço ao professor Max Hering de Queiroz, pela orientação concedida na realização deste trabalho.

Ao engenheiro da Whirlpool Maurílio Catharino, por sua orientação e apoio no desenvolvimento das atividades apresentadas neste documento, bem como outros colegas de trabalho que também se mostraram essenciais para a conclusão deste.

À minha querida namorada Mariane Y Castro, pelo apoio, carinho e paciência neste tempo de ausência.

Aos meus grandes amigos, quase irmãos, pela constante presença, nos dias bons, onde rimos e nos divertimos juntos, e ruins, onde me deram suporte e conselhos que eu tanto necessitava.

Sumário

Resumo	vii
Abstract	viii
Simbologia.....	ix
Lista de Imagens/Tabelas.....	x
1. Introdução.....	1
1.1. A Whirlpool.....	1
1.1.1. Apresentação	1
1.1.2. Motivação da Whirlpool perante o projeto/problema	2
1.2. O Problema.....	5
1.3. Objetivos	6
1.3.1. Geral	6
1.3.2. Específicos	6
1.4. Grupo de Sensoriamento	6
1.5. Estrutura do Documento	7
2. Fundamentação do Trabalho.....	8
2.1. Sensoriamento/Estimação em Máquinas de Lavar	8
2.2. Sensoriamento x Estimação.....	9
2.3. Sensoriamento/Estimação de Carga.....	10
2.3.1. Noções de Estimação/Sensoriamento de Carga.....	10
2.3.2. Razões para Medir/Estimar Carga	11
2.3.3. Metodologias de Sensoriamento/Estimação de Carga.....	12
2.3.4. Algoritmo Whirlpool de Estimação de Carga.....	18
2.4. Desbalanceamento em Máquinas de Lavar	20
2.4.1. O que é Desbalanceamento?.....	20
2.4.2. Por que Tratar o Desbalanceamento?	21
2.4.3. Sensoriamento de Desbalanceamento	22

2.4.4.	Estimação de Desbalanceamento.....	23
2.4.5.	Tratamento dos Efeitos do Desbalanceamento	24
2.4.6.	Tratamento das Causas do Desbalanceamento	26
3.	Ferramentas Utilizadas.....	27
3.1.	Seis-Sigma.....	27
3.1.1.	Mapa de Raciocínio.....	28
3.1.2.	Gráfico de Variabilidade/Dispersão	31
3.1.3.	<i>Design of Experiments</i> (DOE)	32
3.2.	Labview	33
3.2.1.	Programas de aquisição.....	34
3.3.	Matlab	36
3.4.	Programa de Análise Estatística (JMP).....	37
4.	Desenvolvimento	38
4.1.	Testes de Detecção de Carga.....	38
4.1.1.	DOE de Detecção de Carga.....	38
4.1.2.	<i>Setup</i> para Testes de Detecção de Carga	39
4.2.	Testes de Desbalanceamento.....	42
4.2.1.	DOE para Desbalanceamento	43
4.2.2.	Setup Utilizado para Desbalanceamento	44
4.3.	Scripts para Análises e Tratamento de Dados.....	45
4.3.1.	Script de Cálculo de Momento de Inércia.....	45
4.3.2.	Script para Detecção de Desbalanceamento	45
4.3.3.	Script para Tratamento de Erros de Aquisição.....	47
4.4.	Calibração do Algoritmo Whirlpool	48
5.	Resultados.....	51
5.1.	Análise Comparativa de Estimação de Carga.....	51
5.1.1.	Análise de Níveis de Água Utilizada.....	51

5.1.2.	Análise das Estratégias de Estimação de Carga	55
5.1.3.	Análise do Tempo de Estimação de Carga	57
5.2.	Análise Comparativa de Detecção de Desbalanceamento	59
5.2.1.	Modo de Detecção de Desbalanceamento	60
5.2.2.	Análise de Modo de Operação	61
6.	Conclusões e Perspectivas Futuras	63
7.	Referências Bibliográficas	64
Anexo 1:	Seis-Sigma e Organização na Whirlpool	66

Resumo

O projeto aqui apresentado foi desenvolvido na Whirlpool Corp., na cidade de Joinville/SC. O trabalho tem por objetivo a análise de duas máquinas lavadoras de eixo vertical, aqui tratadas como M1 e M2, em suas estratégias de detecção de carga seca e tratamento de desbalanceamento, comparando seu desempenho com o das máquinas da Whirlpool. Estimação/Sensoriamento da carga contida no cesto é uma tarefa essencial para uma boa lavação uma vez que muitas variáveis dependem diretamente da quantidade de carga no cesto. As metodologias mais importantes tratadas neste projeto, por serem as adotadas pelas máquinas em estudo, são estimativas pelo momento de inércia da carga no cesto da máquina de lavar e estimativas por meio do *impeller*. Neste documento tratam-se técnicas de detecção e, principalmente, rotinas de tratamento do desbalanceamento, tendo em vista que o mesmo afeta muitas variáveis da máquina, tornando-se difícil assumir qual é a estratégia adotada pelos competidores. O projeto envolveu a elaboração de um setup específico para cada uma das estratégias a serem analisadas, a aquisição, tratamento e análise dos dados e, finalmente, a criação de um relatório demonstrando os aprendizados e descobertas. Os resultados de estimativa de carga demonstraram que M1 e M2 discriminam, respectivamente, quatro e três níveis de carga diferentes. Além disso, apresentam rotinas bem distintas de estimativa, onde M2 utiliza somente informações do *impeller*, enquanto M1 e a máquina Whirlpool (MWHR) utilizam dados do *impeller* e do cesto. Os resultados de desbalanceamento, por sua vez, apresentaram as rotinas de tratamento de desbalanceamento das máquinas, bem como a descoberta do uso de um acelerômetro na estratégia adotada na M2. Finalmente, conclui-se que a MWHR é competitiva nestas características, mostrando-se superior ou igual em todas as métricas analisadas. Possíveis trabalhos futuros envolveriam a análise de outras métricas e/ou comparação com máquinas de diferentes competidores.

Abstract

The hereby presented project was developed in Whirlpool Corp, in Joinville/SC city. The work's objective is the analysis of two vertical axis washers, here treated as M1 and M2, in its dry load detection and unbalance treatment strategies, comparing its performance with Whirlpool's washing machines. Estimation/Sensing of the load contained in the basket is an essential task for a good cleaning since many variables depend directly on the quantity of load in the basket. The most important methodologies treated in this project, for being the ones adopted by the machines in study, are estimation based on the moment of inertia of the load in the washing machine basket and based on the *impeller*. This document presents technics of unbalance detection and, mainly, its treatment routines, considering that the unbalance affects many variables in the washer, making it difficult to assume what is the strategy adopted by the competitors. The project involved the development of an specific setup for each of the analyzed strategies, the data acquisition, treatment and analysis and, finally, the creation of a report presenting the learnings and findings. The load estimation results demonstrate that M1 and M2 discriminate, respectively, four and three different load levels. Beyond that, they present very distinct estimation routines, where M2 uses only information from the *impeller*, while M1 and Whirlpool's machine (MWHR) use data from the impeller and the basket. The unbalance results, on the other hand, presented the machines unbalance treatment routines, as well as the discovery of the usage of an accelerometer on the strategy adopted on M2. Finally, it is concluded that MWHR is competitive in these characteristics, showing up to be greater or equal in all the analyzed metrics. Possible future works would involve the analysis of other metrics and/or comparison with different competitors' machines.

Simbologia

1. VA - Vertical Axis (Lavadora de Eixo Vertical)
2. HA - Horizontal Axis (Lavadora de Eixo Horizontal)
3. M1 - Máquina de Lavar do Competidor 1
4. M2 - Máquina de Lavar do Competidor 2
5. MWHR – Máquina de Lavar Whirlpool
6. OPEX - Operational Excellence
7. TMAP - Mapa de Raciocínio
8. DOE - Design of Experiments
9. FRD - Diagrama de Relacionamento entre Fatores
10. NI - National Instruments
11. FEDT - Tabela de Design para Experimentos Fatoriais
12. WC - Wash Cloth (Tecido de Lavação)
13. PFC - Projeto de Fim de Curso

Lista de Imagens/Tabelas

Capítulo 1: Introdução

Fig.1.1: Matriz Importância X Desempenho

Fig.1.2: Ranking de lavadoras de eixo vertical

Capítulo 2: Sensoriamento: Fundamentação do Trabalho

Fig. 2.1: Marcações de auxílio ao operador

Fig. 2.2: Esquema de lavadoras e suspensões

Fig. 2.3: a) Extensômetro conectado em uma suspensão comprimida /esticada

b) Exemplo de lavadora HA com extensômetro em sua suspensão

Fig. 2.4: Célula de carga

Fig. 2.5: Máquina HA com sensoriamento de carga por sensor de posição

Fig. 2.6: *Impeller* em uma máquina de lavar

Fig.2.7: Máquina de lavar e forças aplicadas

Fig.2.8: Perfil de velocidade do algoritmo Whirlpool

Fig.2.9: Simplificação de uma máquina do tipo VA

Fig.2.10: Acelerômetro usado em sensoriamento de desbalanceamento

Fig.2.11: Sensores indutivo (a) e capacitivo (b)

Fig. 2.12: Análise de torque em situação Balanceada VS Desbalanceada

Fig.2.13: Espuma amortecedora de impactos laterais

Fig. 2.14: Vareta de suspensão com amortecedor

Fig.2.15: Método de redistribuição de carga

Capítulo 3: Ferramentas Utilizadas

Fig.3.1: Exemplo de TMAP

Fig. 3.2: Variação do TMAP utilizado no período de estágio

Fig. 3.3: Exemplo de gráfico de variabilidade

Fig.3.4: Correlação sem efeito de causalidade entre variáveis

Fig.3.5: Exemplo de FRD

Fig.3.6: Analisador de protocolos Beagle

Fig.3.7: Programa de aquisição de dados Beagle Reader

Fig.3.8: Programa de aquisição de dados Temp Rise

Fig.3.9: Variáveis do TempRise

Fig.3.10: Ferramenta de análise estatística JMP

Capítulo 4: Desenvolvimento

Fig.4.1: FRD de um dos experimentos de estimação de carga

Fig.4.2: Módulo de tranca da porta similar ao de M1 e M2

Fig.4.3: Interruptor de duas posições (esq.) e *reed switches* (dir.)

Fig.4.4: Balança utilizada em testes de estimação de carga

Fig.4.5: Tabela de design para experimentos fatoriais

Fig.4.6: Acelerômetro

Fig.4.7: Amostras normalizadas de torque para testes de desbalanceamento

Fig.4.8: Zeros errôneos na aquisição da balança

Fig.4.9: Erro na velocidade calculada

Fig.4.10: A-Profile adaptado para a MWHR

Capítulo 5: Resultados

Fig. 5.1: Análise de níveis para M1

Fig. 5.2: Análise de níveis para M2

Fig. 5.3: Análise de consumidores da máquina M1

Fig. 5.4: Resultados de estimação de carga na MWHR

Fig. 5.5: Análise de estimação por *impeller* de M2

Fig. 5.6: Perfil de velocidade da estimação de carga de M1

Fig. 5.7: Perfil de velocidade da patente de estimação de carga de M1

Fig. 5.8: Variação no tempo de estimação de carga de M1

Fig. 5.9: Variação no tempo de estimação de carga de M2

Fig. 5.10: Acelerômetro encontrado no cesto de M2

Fig. 5.11: Detecção de desbalanceamento em M1

Fig. 5.12: Detecção de desbalanceamento em M2

Anexo 1: Seis-Sigma e Organização na Whirlpool

Fig. A1.1: Ferramentas e armário com identificação correspondente

Fig.A1.2: Quadro de sombras

Fig.A1.3: Delimitações visuais

Fig.A1.4: Quadro de estrelas

1. Introdução

A presente monografia apresenta os resultados do Projeto de Fim de Curso, realizado na empresa Whirlpool Corp., no período de 05 de agosto de 2013 a 31 de janeiro de 2014, no contexto da disciplina "DAS 5501: Estágio em Controle e Automação industrial", do curso de Engenharia de Controle e Automação, da Universidade Federal de Santa Catarina.

Neste primeiro capítulo, busca-se apresentar informações e elementos que possibilitem ao leitor um melhor entendimento do contexto em que o trabalho foi desenvolvido. Com este objetivo, será apresentada a empresa, o ambiente de trabalho e as motivações que nortearam o projeto, assim como o problema a ser resolvido.

Ressalta-se que, de modo a preservar o anonimato de pessoas e/ou empresas, algumas imagens deste documento foram desfocadas e nomes substituídos por símbolos.

1.1. A Whirlpool

1.1.1. Apresentação

A empresa foi fundada em 1911 sob o nome Upton Machine Company. Em 1949 viria a se chamar Whirlpool Corp. [1] e, com a aquisição da empresa Maytag em 2006, tornar-se-ia a maior empresa produtora de eletrodomésticos do mundo. Entre as principais diretrizes que contribuíram para a empresa alcançar a liderança de mercado, uma delas foi, e continua sendo, a filosofia de permanentemente buscar satisfazer e surpreender os clientes. Os consumidores da atualidade estão cada vez mais bem informados e exigentes, obrigando as empresas a inovar e melhorar constantemente seus produtos. Com isso em mente a Companhia conseguiu posicionar-se como a única empresa atuante no Brasil a figurar entre as 500 maiores depositantes de patentes no mundo, sendo que em 2011 protocolou 72 pedidos de patentes somente no Brasil. [2]

A sustentabilidade é outra característica marcante da empresa americana que se instalou no Brasil, trabalhando para produzir de forma mais limpa produtos que sejam cada vez menos poluentes. A empresa concluiu o ano de 2009 com 97% de

seus produtos classificados como Classe A em consumo energético pelo Inmetro. Além destes feitos, foi a primeira indústria de eletrodomésticos a se comprometer com a meta global de redução de gases geradores do efeito estufa.

Empresa multinacional com sede nos Estados Unidos, Itália, China e Brasil; a Whirlpool vem crescendo de maneira ambiciosa e já conta com aproximadamente 70 mil postos de trabalho. No Brasil possui três unidades fabris (Joinville - SC, Rio Claro - SP e Manaus - AM), quatro centros de tecnologia (Refrigeração, Cocção e Condicionadores de Ar, em Joinville; 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 [3]. A empresa é detentora de marcas que a tornam destaque em diversos setores de eletrodomésticos no âmbito mundial, com destaque para Maytag, Kitchen Aid, Whirlpool, Bauknecht, Brastemp e Consul.

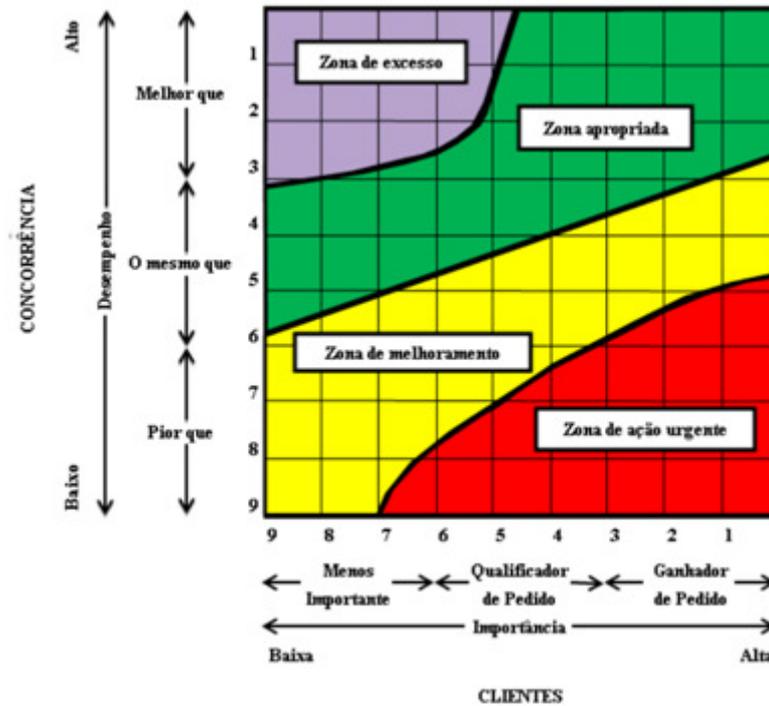
Os colaboradores, como um todo, demonstram muito empenho e comprometimento com sua missão: "Todos nós, apaixonadamente, criando consumidores leais por toda a vida". Esse esforço constante não passa despercebido. Prova disto são seus inúmeros destaques e menções alcançadas no âmbito empresarial. Basta lembrar que esteve presente diversas vezes em listas de melhores empresas para se trabalhar em 2012 (Você S.A , Época , Carta Capital, Exame), ganhou prêmios também de sustentabilidade, inovação, bens duráveis e foi considerada pelo jornal Folha de São Paulo como Top of Mind 2012 e 2013 nos seguintes setores : Brastemp - Lavadoras e Fogão; Consul - Geladeiras.

1.1.2. Motivação da Whirlpool perante o projeto/problema

A Whirlpool, como outras empresas, visa sempre entregar o maior número de funcionalidades possível em seus produtos, buscando permanentemente, minimizar custos. Essa característica é marcante em todas as companhias de sucesso, pois no mercado atual, as empresas não mais estão disputando seus consumidores pelos critérios qualificadores, e sim em critérios ganhadores de pedidos - i.e., não é mais suficiente que o produto seja capaz de realizar sua funcionalidade básica; ele deve

possuir características desejadas pelos consumidores e que o diferencie de seus concorrentes.

Fig.1.1: Matriz Importância X Desempenho



Fonte: Slack, N. ; 1993 [4]

A Fig. 1.1 mostra a matriz Importância X Desempenho [4], onde as principais funcionalidades/características de uma empresa são classificados de acordo com sua relevância na visão do cliente. O desenvolvimento e acompanhamento dessa matriz traz como principal vantagem o conhecimento de onde a empresa está situada em relação a seus concorrentes. Este conhecimento é fundamental para priorizar e direcionar os investimentos em melhorias e tomar decisões estratégicas empresariais adequadas.

Um site de avaliação de produtos muito bem conceituado e visto por muitos consumidores, principalmente americanos, é o consumerreports.org. Como visto na imagem abaixo (Fig.1.2 - retirada de [5]), a diferença da pontuação entre as 3 principais máquinas lavadoras do tipo eixo vertical (top loaders), categoria que será o foco de estudo neste trabalho, é de poucos pontos, comprovando que são os pequenos detalhes que fazem a diferença. A disputa, portanto, está em qual empresa consegue buscar mais rapidamente o conhecimento, implementar esses

pequenos diferenciais e entregar produtos com maior qualidade a seus consumidores a um preço mais acessível.

Fig.1.2: Ranking de lavadoras de eixo vertical

Brand & Model	Price	Overall score	Washing performance	Energy efficiency	Water efficiency	Capacity	Gentleness	Noise	Vibration	Cycle time (min.)
✓ [Brand & Model]	\$700 Price & Shop	77	+	+	+	+	+	+	+	75
✓ [Brand & Model]	\$750 Price & Shop	76	+	+	+	+	○	+	+	75
✓ [Brand & Model]	\$1000 Price & Shop	75	+	+	+	+	+	+	+	65

Fonte: Internet; <consumerreports.org> [5]

O conhecimento pode ser adquirido de diversas maneiras. A prática mais comum é a de tentativa e erro, onde acertos são considerados boas práticas e erros documentados para que não se repitam. Essa estratégia, apesar de útil, demanda muito tempo.

A análise comparativa é muito utilizada nas empresas líderes de cada categoria. Esta prática fornece conhecimento sem a necessidade de cometer erros, tornando-se uma maneira rápida de aprendizado e de melhoria de desempenho. Uma empresa que deseja ser e manter-se como a maior e melhor do mercado deve estar sempre atenta à demanda futura do mercado a fim de melhor adequar sua produção e estratégia. Parte dessa previsão inclui saber o comportamento e as características dos produtos de seus competidores. Esta informação não é nada fácil de conseguir, considerando que a maioria de suas estratégias, melhorias e inovações se escondem atrás de segredos industriais mantidos sob sigilo. Todavia, um estudo detalhado de seus produtos e estratégias de mercado fornecem indícios que contribuem para a previsão do comportamento do mercado futuro.

Levando estes fatores em consideração, a Whirlpool decidiu pela importância em financiar e executar o projeto, envolvendo a compra de duas máquinas de empresas concorrentes e o estudo de seus componentes e comportamento, quando

em funcionamento, comparando seu desempenho com o das máquinas atualmente em produção e desenvolvimento na Whirlpool.

1.2. O Problema

Lavar roupas sempre foi um trabalho árduo e exigente. Um ciclo normal de lavação envolve ensaboar, esfregar, deixar de molho, enxaguar e torcer. Este processo exigia um grande esforço manual e, para aqueles que não moravam próximos aos rios, significava ter que ir várias vezes pegar água. No século XIX foi desenvolvida a primeira máquina de lavar que apresentava um cesto e que, de certa maneira, se assemelhava com as que encontramos nos dias de hoje, diferenciando-se pelo fato de que era operada de maneira totalmente manual, através de um sistema de manivelas. No início do século XX, a popularização dos motores elétricos possibilitou o surgimento de máquinas que já não mais exigiam a mão de obra humana para operar.

Executar um ciclo de lavação não é uma tarefa trivial para uma máquina, uma vez que muitas variáveis estão envolvidas. Uma máquina que seja completamente autônoma deve ser capaz de medir ou estimar todas essas variáveis e usar tais informações para realizar o ciclo de limpeza das roupas. Este documento irá contemplar principalmente duas dessas variáveis: Sensoriamento de carga seca no cesto e Desbalanceamento, durante a execução do ciclo.

Várias são as maneiras de uma empresa melhorar seus produtos. Uma das melhores práticas é a análise comparativa entre concorrentes, pois além de saber para onde estão direcionados, permite aprender com eles de modo a possibilitar estar sempre um passo a frente e superá-los. A empresa Xerox definiu essa análise como: "O processo contínuo de medirmos e compararmos os nossos produtos, serviços e práticas com os mais fortes concorrentes ou com as empresas reconhecidas como líderes da indústria". É neste contexto que se situam os objetivos do projeto de final de curso.

1.3. Objetivos

1.3.1. Geral

Estudar as vantagens e desvantagens dos produtos competidores, máquinas de lavar M1 e M2, e seus comportamentos em situações específicas.

1.3.2. Específicos

A partir dos dados coletados durante o trabalho, buscou-se perseguir os seguintes objetivos específicos:

- Adquirir dados com foco em sensoriamento/estimação de carga e detecção de desbalanceamento.
- Obter dados de consumo de água, perfis de velocidade e correntes entregues aos motores das máquinas concorrentes.
- Tratar, processar e analisar criticamente os dados adquiridos de modo a, ao fim do projeto, elaborar um relatório com pontos fortes e fracos das máquinas M1 e M2.
- Verificar a viabilidade de aproveitamento dos pontos positivos, observados nas máquinas M1 e M2, nos novos modelos da máquina Whirlpool (MWHR).

1.4. Grupo de Sensoriamento

Na Whirlpool, em Joinville, um pequeno centro de pesquisa e desenvolvimento na área de *Cross Product* (*i.e.* abriga vários projetos em diversos setores da empresa) contribui para o desenvolvimento de novos produtos. Este centro é dividido em Motor Control, Motor Strategy e Control & Electronics. Este último é responsável por pesquisas na área de novos algoritmos, sensoriamento, instrumentação e controle de sistemas.

O estágio desenvolvido para a elaboração deste documento foi realizado na área de Sensing & Algorithms, uma subárea da já apresentada Control & Electronics. Esta subárea conta com engenheiros seniores, plenos, juniores e estagiários. A função do estagiário é a de auxiliar em um ou mais projetos da subárea com o acompanhamento e supervisão contínuos de um engenheiro sênior. Neste caso, o

principal projeto desenvolvido foi a análise comparativa entre a MWHR e as máquinas M1 e M2, exigindo do estagiário planejamento e execução de testes, desenvolvimento de scripts para tratamento e análise de dados, análise crítica e, finalmente, a elaboração de relatório e apresentação dos resultados.

Durante todo o percurso percorrido na obtenção dos objetivos previamente citados, foram fundamentais os conhecimentos adquiridos durante a graduação em Engenharia de Controle e Automação na UFSC. Além do desenvolvimento do raciocínio crítico durante o curso de graduação, exigiram-se, também, noções em instrumentação, estatística, física e na ferramenta MatLab, que serão melhor detalhados no decorrer deste documento.

1.5. Estrutura do Documento

O presente documento foi escrito de modo a ser o mais simples e direto possível, buscando sempre a compreensão por parte de todos os leitores, por mais leigos que sejam no assunto.

Com o problema, empresa e objetivos do projeto já expostos, serão apresentadas, no próximo capítulo, as principais teorias que fornecem as bases conceituais necessárias para a compreensão do trabalho. A fim de que o leitor se familiarize com a fundamentação necessária, no capítulo 3 é apresentado o conjunto de ferramentas utilizadas, que possibilitaram a realização deste trabalho. No capítulo 4, são descritas as etapas de desenvolvimento do projeto. Os resultados obtidos são apresentados no capítulo 5 e, no capítulo 6, as conclusões e perspectivas futuras.

2. Fundamentação do Trabalho

O presente capítulo traz uma breve noção sobre sensoriamento/estimação e sua importância com um foco em máquinas de lavar, dado o escopo deste documento.

Após discorrer a respeito da importância do sensoriamento/estimação nas máquinas de lavar, bem como a diferença entre ambos, o capítulo aborda os dois principais tipos de sensoriamento/estimação necessários para a compreensão do projeto: Sensoriamento/Estimação de Carga e Sensoriamento/Estimação de desbalanceamento.

2.1. Sensoriamento/Estimação em Máquinas de Lavar

As máquinas de lavar mais comuns necessitam que o operador forneça algumas informações e execute determinadas ações, como entrada, para que o processo de lavagem seja realizado da maneira mais adequada possível; e.g. se a roupa está muito ou pouco suja, quão delicada é a roupa, adição de amaciante e sabão nas quantidades e proporções corretas, a quantidade de roupa na máquina, e por fim, a escolha do ciclo adequado de operação. Tantas informações e ações como responsabilidade do operador constituem-se em pontos negativos, tanto do ponto de vista do operador quanto da empresa, uma vez que poucos usuários lêem manuais e, portanto, estão mais suscetíveis a cometerem erros nessas decisões. Esses erros resultam no uso desnecessário de recursos ou afetam o próprio resultado do processo, i.e. a qualidade da limpeza. Por fim, o consumidor relacionaria isso como sendo culpa da máquina e da empresa que a desenvolveu.

Uma máquina de lavar "perfeita" seria, portanto, aquela onde o operador não precisaria oferecer tais informações pois ela, autonomamente, seria capaz de tomar a decisão correta de modo a entregar a melhor limpeza com a utilização otimizada de recursos. Muitas máquinas tentam facilitar as decisões dos operadores de modo que o erro seja menor, e.g. alguns modelos trazem marcações no cesto para ajudar o operador na decisão da quantidade de roupa no cesto (Fig.2.1), mas isso ainda não é o suficiente para que o erro introduzido seja desconsiderado. É importante, portanto, a busca da eliminação dessas informações e ações de responsabilidade do operador.

Fig. 2.1: Marcações de auxílio ao operador



Fonte: Internet; < http://www.novomundo.com.br/fotos/23241_2_1000x1000.jpg>

2.2. Sensoriamento x Estimação

Existem dois métodos para se obterem, automaticamente, as informações mencionadas anteriormente: Sensoriamento e Estimação.

O sensoriamento requer a utilização de um transdutor para adquirir o sinal desejado. O transdutor pode ser definido como sendo um módulo de um sistema de medição que está em contato com aquilo que se deseja medir; responsável por gerar um sinal proporcional (mecânico, pneumático, elétrico ou outro) ao mensurando, segundo uma função bem definida, normalmente linear, baseada em um ou mais fenômenos físicos. Em termos gerais, um transdutor transforma um efeito físico noutro. Quando o transdutor é composto de vários módulos, várias transformações de efeitos podem estar presentes. O primeiro módulo do transdutor, aquele que entra em contato diretamente com o mensurando, é também denominado de sensor. A rigor, o sensor é uma parte do transdutor. [6]

A estimação ou *virtual sensing* [7], como também é conhecida, pode ser dividida em duas grandes categorias: Analítica e Empírica.

A analítica utiliza-se de cálculos e leis físicas que regem grandezas conhecidas ou que podem ser medidas e que se relacionam com as variáveis desejadas. No entanto, nem todo processo possui um modelo físico suficientemente representativo.

Estimação empírica, por sua vez, utiliza dados que se sabe possuir uma relação entre si mas não se conhece o modelo físico ou este requer muito recurso computacional para manter uma estimação analítica que seja consistente e válida. Utiliza portanto uma função gerada por regressão polinomial provinda de uma base experimental entre variáveis que se acredita estarem relacionadas.

O fato de que o transdutor presente no sensoriamento é um *hardware* adicional que deve ser incorporado ao produto e, conseqüentemente, um custo a mais em sua fabricação, faz com que a estimação seja preferencialmente escolhida, quando ambas atendem as especificações do produto.

Nas seções 2.3 e 2.4 serão detalhadas algumas dessas técnicas voltadas para tomar decisões relativas à quantidade de carga seca na máquina ou ao seu desbalanceamento.

2.3. Sensoriamento/Estimação de Carga

A presente seção traz informações que são consideradas fundamentais para o entendimento do projeto no que diz respeito a métodos de sensoriamento e estimação de carga seca em máquinas de lavar, esclarecendo as perguntas mais pertinentes a respeito do assunto e, posteriormente, o método utilizado pela equipe da Whirlpool na análise comparativa desenvolvida neste trabalho.

2.3.1. Noções de Estimação/Sensoriamento de Carga

Sensoriamento ou estimação de carga é a maneira que uma máquina de lavar possui para, usando ou não sensores, concluir a respeito da quantidade de roupa depositada pelo operador em seu interior. Já é, hoje, característica encontrada com bastante frequência em lavadoras de última geração. Até recentemente os estudos visando a esta funcionalidade eram raros, havendo necessidade de *hardwares* específicos (transdutores) para obter-se tal informação por meio de sensoriamento. Como mencionado anteriormente, um *hardware* é sempre um custo adicional para a produção da máquina refletindo no preço final repassado ao consumidor.

Constata-se sempre mais a presença dessa função nas lavadoras populares. Um estudo aprofundado a respeito da dinâmica da máquina de lavar forneceu dados suficientes para possibilitar um cálculo satisfatório de carga da máquina, utilizando

somente os sensores que já eram necessários ao funcionamento normal da máquina, utilizando-se assim, estimação ao invés de sensoriamento. Desta maneira, não há porque deixar de usar tal algoritmo onde tanto o consumidor quanto a empresa são beneficiados, sem acréscimo de custos de produção.

2.3.2. Razões para Medir/Estimar Carga

A operação de uma máquina de lavar tem como uma das informações mais importantes a quantidade de roupa a ser lavada. Isto se justifica pelo fato de que muitas variáveis, como sabão, amaciante, água e energia consumidos, dependem diretamente deste fator.

Este dado pode ser obtido de três maneiras distintas: informado pelo operador, através de medição ou por meio de estimação. Escolher uma entre as duas últimas significa que o consumidor não precisa se preocupar em escolher a configuração adequada para a correta lavagem e a empresa tem a garantia de que sua máquina estará recebendo sempre esta informação correta, removendo a fonte de incerteza que, neste caso, seria o próprio operador da máquina. Vale ressaltar o que foi destacado no capítulo anterior, que no mercado atual são pequenos detalhes como este que fazem com que o produto seja vendido.

Essa visão não é única e exclusiva da Whirlpool. Prova disto que inúmeras são as empresas buscando criar um método de detecção ou sensoriamento de carga e, para proteger tais ideias, criam patentes. Essas patentes podem ser bem explícitas, protegendo de maneira firme suas ideias, ou com informações gerais, de modo a não fornecer muita informação a respeito do que está sendo efetivamente realizado. Outras, por sua vez, consideram que a criação de certas patentes não é interessante pois faria com que seus concorrentes pudessem compreender muito melhor como são realizadas certas funcionalidades e tentariam burlar a patente em alguma brecha da mesma.

O fato de uma empresa possuir uma patente não significa necessariamente que ela irá produzir algum produto com a ideia ali apresentada. Pode ser de interesse somente certificar-se que nenhuma outra empresa possa utilizar-se desta ideia sem seu consentimento.

2.3.3. Metodologias de Sensoriamento/Estimação de Carga

Nesta subseção algumas metodologias de sensoriamento e estimação de carga são apresentadas, bem como suas vantagens e desvantagens.

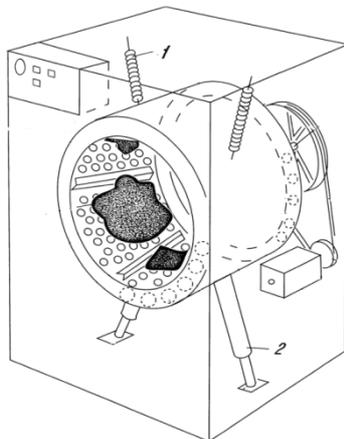
- **Sensoriamento com Extensômetro**

Um extensômetro é um transdutor capaz de medir a deformação de um corpo. O mais utilizado para esse tipo de medição é o elétrico, que através de sua própria deformação cria uma variação em sua resistência elétrica. Basta que este seja ligado a um circuito elétrico capaz de medir resistência elétrica (e.g. ponte de Wheatstone) e tem-se uma grandeza diretamente proporcional ao alongamento de um corpo.

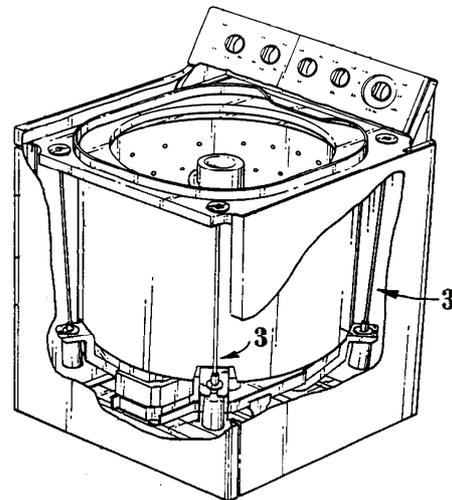
Consiste em uma das primeiras técnicas para sensoriamento de carga tanto para máquinas de lavar verticais quanto para as horizontais, e utiliza-se do fato de que ambas possuem, em sua maioria, o cesto sustentado através de alguma suspensão flexível (Fig 2.2).

Fig. 2.2: Esquema de lavadoras e suspensões

Lavadora de Eixo Horizontal (HA)



Lavadora de Eixo Vertical (VA)



1- Suspensão superior de uma HA

2- Suspensão inferior de uma HA

3- Suspensão de uma VA

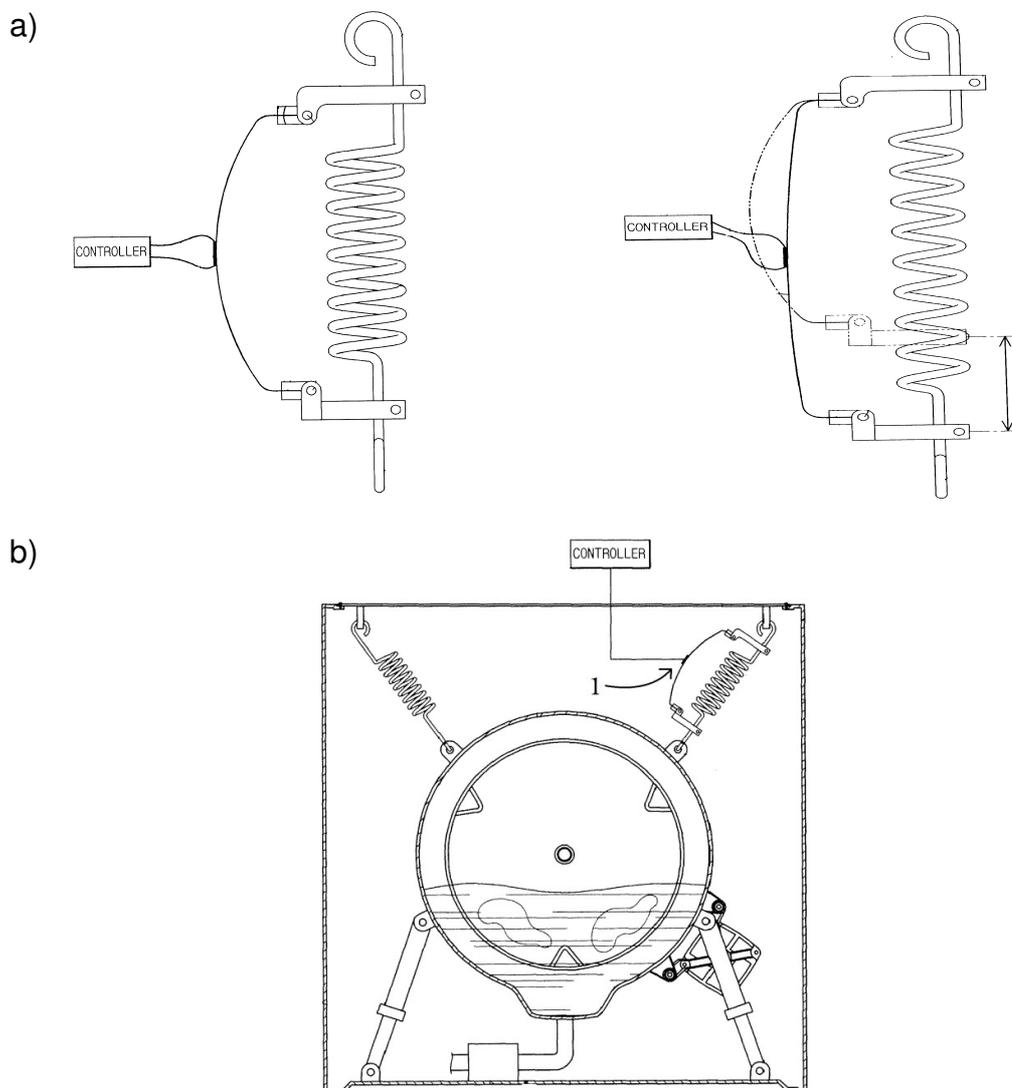
Fonte: Internet; Adaptado; <<https://www.google.com/patents/EP0772707B1>>
<<http://www.freepatentsonline.com/6578225-0-large.jpg>>

O princípio utilizado é que, ao efetuar o carregamento nas máquinas de lavar, cria-se uma diferença no comprimento de suas suspensões. Esta diferença de

comprimento é traduzida em uma deformação que altera a resistência elétrica de um extensômetro. Esta deformação, i.e. variação na resistência elétrica, é então traduzida em uma quantidade de massa.

Um exemplo pode ser visto na patente [8]. O extensômetro, neste caso, é fixado em um membro flexível que conecta as extremidades da suspensão como é mostrado, simplificada, na Fig 2.3. A variação de resistência elétrica é captada por um circuito e então traduzida em massa.

**Fig. 2.3: a) Extensômetro conectado em uma suspensão comprimida/esticada
b) Exemplo de lavadora HA com extensômetro em sua suspensão**



Fonte: Internet; Adaptado; <<https://www.google.com/patents/EP2322705A1>> [8]

- **Sensoriamento por Célula de Carga**

Um dos transdutores mais conhecidos para sensoriamento de carga é a célula de carga (Fig.2.4). Este é capaz de converter uma força em pulsos elétricos. Muito semelhante ao apresentado pelo extensômetro, o procedimento é normalmente muito simples. Uma vez acoplada corretamente a célula de carga, é feita então uma amostra do valor de carga para que o peso do cesto seja compensado. Depois disso, através da resolução de pulsos elétricos por pressão aplicada é fácil fazer a transformação de pulsos elétricos para a quantidade de carga no cesto. Possui uma resposta rápida mas, em contrapartida, o custo agregado é relativamente alto.

Fig. 2.4: Célula de carga



Fonte: Internet; <<http://www.andilog.com/images/super/high-capacity-load-cell.gif>>

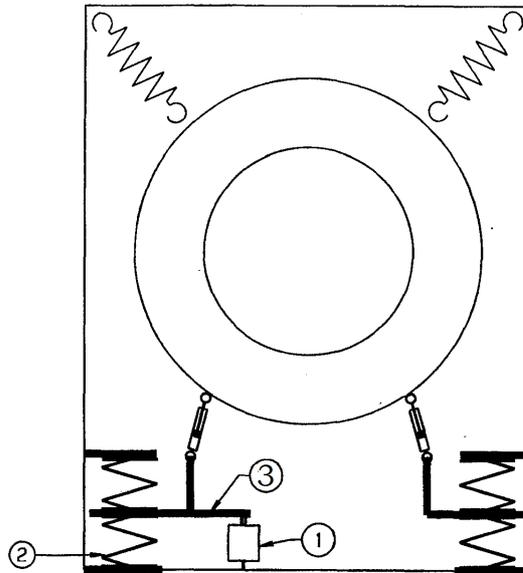
- **Sensoriamento com Sensor de Posição**

Uma solução também adotada para sensoriamento de carga envolve a utilização de um sensor de posição. Novamente, a variação de altura do cesto suspenso devido a carga em seu interior é utilizada. Um exemplo de como utilizar tal sensor é o demonstrado em [9], onde as molas da suspensão são acopladas a uma haste cujo movimento vertical é medido através de um sensor. Uma representação pode ser vista da aplicação em uma máquina HA na Fig. 2.5.

Esta solução apresenta como principais vantagens a portabilidade para máquinas do tipo VA, sua simplicidade, precisão e rapidez. Por ser uma das soluções mais lógicas é uma das mais populares envolvendo algum tipo de sensor.

Tanto a solução envolvendo o sensor de posição quanto a anterior, utilizando um extensômetro, são soluções que necessitam de um *hardware* adicional para estimar a massa e, portanto, adicionam um custo à produção. As próximas alternativas apresentadas são aquelas que conseguem resultados também satisfatórios sem a necessidade de agregar mais custo desnecessário.

Fig. 2.5: Máquina HA com sensoriamento de carga por sensor de posição



- 1- Sensor de Posição
- 2- Suspensão da lavadora
- 3- Haste fixa as molas

Fonte: Internet; Adaptado; <<http://www.google.com/patents/EP1988206A1?cl=en>> [9]

- **Estimação por Rotação de Impeller**

Um *impeller* (Fig.2.6) é uma solução para a substituição dos agitadores presentes nas máquinas lavadoras mais antigas. Traz diversas vantagens sobre seu predecessor como:

- Maior facilidade de carregamento de roupas na máquina;
- Melhoria na eficiência das máquinas;
- Aumento da capacidade do cesto;
- Menor "agressividade" na lavagem, uma vez que diminui-se a ação mecânica aplicada diretamente entre o *impeller* e as roupas.

Fig. 2.6: *Impeller* em uma máquina de lavar



Fonte: Internet; <<http://profiles.sulekhalive.com/mstore/13680321/albums/default/thumbnaillfull/impeller-3.jpg>>

Pequenas rotações são feitas com o *impeller* em ambas direções e, pelo torque necessário para conseguir realizar esse movimento, é possível estimar a quantidade de carga no cesto. Quanto maior a carga, mais difícil torna-se a rotação.

- **Estimação de Carga por Momento de Inércia Rotativa**

"Todo corpo continua em seu estado de repouso ou de movimento uniforme em uma linha reta, a menos que seja forçado a mudar aquele estado por forças aplicadas sobre ele". A primeira lei de Newton aplica-se não somente para corpos em linha reta, mas também em dinâmica rotacional, i.e. um corpo que está rotacionando só para de rotacionar se uma força aplicada sobre ele fizer com que isso aconteça. O momento de inércia rotativa está diretamente relacionada com a quantidade de força necessária para que isso ocorra.

A segunda lei de Newton explica melhor a relação de forças aplicadas ao corpo e sua massa:

$$F = m \cdot a$$

Quando direcionada a uma dinâmica rotacional, a força aplicada para a rotação do corpo é o torque (τ); a aceleração do sistema linear corresponde à aceleração angular ($\alpha = \dot{\omega}$) e a massa relaciona-se com o momento de inércia do corpo (J) :

$$\tau = J \cdot \alpha = J \cdot \dot{\omega}$$

Essa equação, no entanto, despreza as forças de atrito no sistema. Uma equação mais fiel à realidade da máquina de lavar, traz mais duas componentes de atrito: Cinético e Estático. O atrito cinético ($B \cdot \omega(t)$) é aquele que se relaciona à velocidade entre dois corpos, bem como com os materiais que estão em contato entre si. É diretamente proporcional à velocidade do sistema em que se encontra.

O atrito estático ou torque de Coulomb (T_c) é a força que apresenta resistência para que dois corpos/superfícies não criem um movimento relativo entre si, podendo ser representado como uma força constante no sistema.

$$\tau(t) = J \cdot \dot{\omega}(t) + B \cdot \omega(t) + T_c \quad (2.1)$$

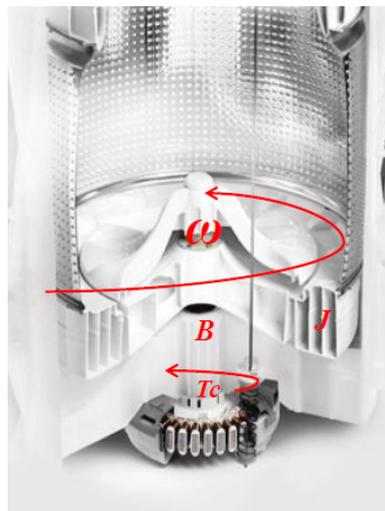
B – Coeficiente de atrito Cinético

T_c – Coeficiente de atrito Estático

Em uma lavadora de roupas o sistema corresponde, simplificada, a um cesto e a um motor (Fig. 2.7). As forças de atrito devem ser consideradas, pois o motor gira em velocidades muito altas, fazendo com que elas não sejam desprezíveis em relação a outras forças presentes no sistema.

Em um cesto, um aumento de carga em seu interior, implica em um aumento no momento de inércia rotativa e, desta forma, sendo possível encontrar uma maneira de medir ou estimar o momento de inércia, é também possível estimar a carga no cesto.

Fig.2.7: Máquina de lavar e forças aplicadas



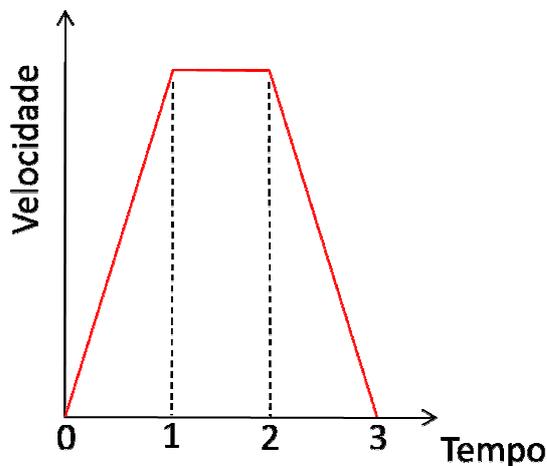
Fonte: Oliveira, F.E.de.; 2013 [10]

A patente descrita em [12], da General Electric, é um exemplo de como essa técnica pode ser aplicada. Acelera-se o cesto até uma determinada velocidade e, então, desenergiza-se o motor, de modo que o cesto venha a atingir uma velocidade inferior, previamente estabelecida, apenas devido aos atritos. É possível então distinguir entre diferentes quantidades de carga, devido aos diferentes tempos de frenagem, causados pelos distintos momentos de inércias.

2.3.4. Algoritmo Whirlpool de Estimação de Carga

A Whirlpool corp. possui um método com ainda mais ênfase no momento de inércia. Nele ocorre, com uma aceleração conhecida, um aumento da velocidade de rotação até um patamar pré-determinado e, em seguida, uma frenagem com aceleração de mesmo módulo mas sentido oposto (Fig. 2.8). Este perfil de velocidade é chamado de *spin* ou "A-Profile" pela semelhança que possui com a letra A.

Fig.2.8: Perfil de velocidade do algoritmo Whirlpool



Fonte: Autoria própria

Este perfil é adotado de modo que a análise possa ser feita, cancelando-se o efeito do atrito. Isto ocorre da seguinte maneira:

O período de tempo de 0 a 1 pode ser descrito, usando-se (2.1), pela seguinte equação:

$$\tau_{up}(t) = J \cdot \alpha_{up} + B \cdot w(t) + T_c \quad (2.2)$$

O período de descida, entre 2 e 3, pode ser representado de maneira similar:

$$\tau_{down}(t) = J \cdot \alpha_{down} + B \cdot w(t) + T_c \quad (2.3)$$

Como as duas acelerações são iguais em módulo e direção, porém opostas em sentido, tem-se que:

$$\alpha_{down} = -\alpha_{up} \quad (2.4)$$

Substituindo-se (2.4) em (2.3) e subtraindo-se a equação resultante de (2.2), tem-se que:

$$\begin{aligned} \tau_{up}(t) - \tau_{down}(t) &= J \cdot \alpha_{up} + J \cdot \alpha_{up} + B \cdot w(t) - B \cdot w(t) + T_c - T_c \\ \tau_{up}(t) - \tau_{down}(t) &= 2 \cdot J \cdot \alpha_{up} \end{aligned} \quad (2.5)$$

Resolvendo-se (2.5) para o momento de inércia, tem-se:

$$J = \frac{\tau_{up}(t) - \tau_{down}(t)}{2 \cdot \alpha_{up}} \quad (2.6)$$

O torque necessário para acelerar ou frear, mantendo-se uma mesma aceleração, é constante. Todavia, para diminuir a chance de cometer erros, o torque é avaliado durante toda uma janela de velocidade nas rampas de subida e descida.

$$\tau_{up}(t) = \frac{\sum_{i=m}^n \tau_i}{n - m}$$

$$e, da mesma forma: \quad \tau_{down}(t) = \frac{\sum_{i=0}^p \tau_i}{p - o}$$

onde: $n - m = p - o$, ou seja as janelas são de tamanhos iguais.

Tem-se, portanto, em (2.6), uma maneira simples de se obter o momento de inércia da carga, aplicando um perfil de velocidade com acelerações controladas. Tendo em vista que o torque pode ser estimado/medido pelas correntes entregues ao motor utilizando um resistor shunt, sensor hall, ou outro transdutor capaz de medir correntes. Este processo de cálculo do momento de inércia é considerado uma estimativa analítica.

Considerando-se, então, que a carga no cesto assuma o formato de um cilindro vazado, seu momento de inércia pode ser representado como:

$$J = \frac{M}{2} (r^2 + R^2) \quad (2.7)$$

M - Massa da carga no cesto

r - Raio interno do cilindro

R - Raio externo do cilindro

Por fim, tem-se em (2.7), a última transformação do momento de inércia em massa. Os dados de massa no cesto são então utilizados para decidir o comportamento futuro do ciclo de lavação, de modo que seja o mais adequado possível a esta situação, possibilitando uma limpeza com qualidade superior.

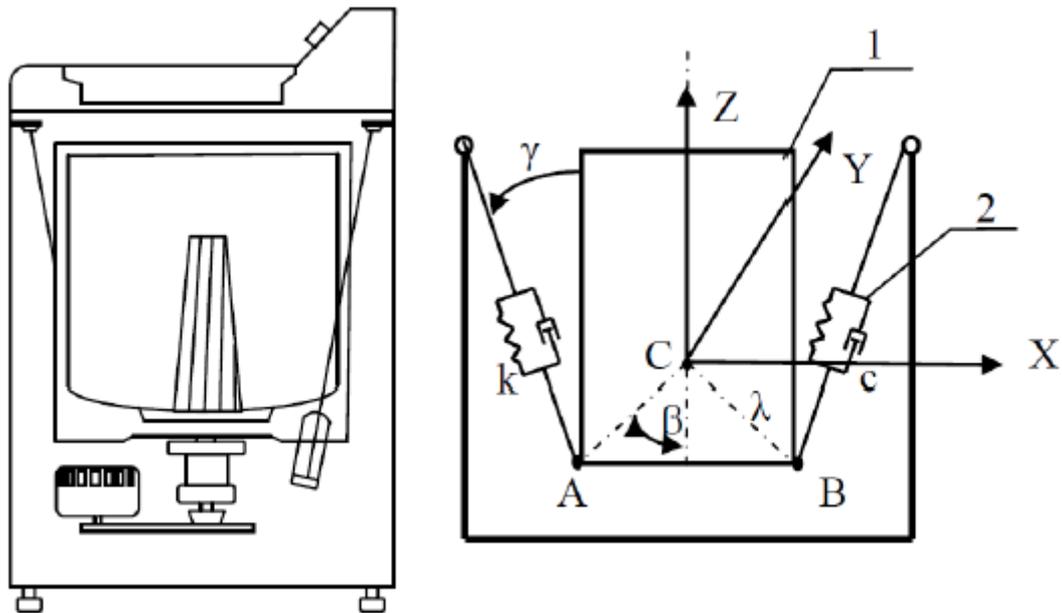
2.4. Desbalanceamento em Máquinas de Lavar

A seguinte seção objetiva fornecer o embasamento teórico necessário para a compreensão de como um desbalanceamento de carga afeta uma máquina de lavar, as razões que justificam o tratamento do desbalanceamento e os meios para melhor compreender os resultados encontrados nesta análise comparativa.

2.4.1. O que é Desbalanceamento?

O foco deste trabalho são as máquinas do tipo VA. Uma simplificação de sua estrutura física, e como relaciona-se o cesto e suas suspensões, pode ser vista na Fig.2.9. O desbalanceamento neste tipo de máquinas pode ser traduzido como um desalinhamento entre o centro de massa do sistema (carga, cesto e amortecedores) e o eixo de rotação do cesto (Z). O desbalanceamento pode ser gerado por dimensões assimétricas na construção e/ou montagem da máquina, por densidades variáveis dos materiais que compõem a máquina, por deformações, por falhas na produção ou, a situação mais comum, por uma distribuição incorreta de carga no interior do cesto. Isso provoca uma força centrípeta não-uniforme nas cargas, capaz de gerar um movimento translacional (X) no corpo.

Fig.2.9: Simplificação de uma máquina do tipo VA



Fonte: Silva, G.B.T.da. ; 2013 [11]

2.4.2. Por que Tratar o Desbalanceamento?

"Coloque as roupas abertas no cesto, distribuindo-as de maneira uniforme ao redor do agitador, começando pelas peças maiores. Isso dará mais estabilidade à sua Lavadora, evitando trepidações durante a lavagem". É assim que o manual da Brastemp [13] sugere ao seu consumidor a distribuição de cargas em sua lavadora. Esta orientação é pertinente porque, dependendo do nível de desbalanceamento provocado, o dano às roupas, máquina e, potencialmente ao consumidor, são preocupantes.

Uma máquina de lavar em um ciclo de centrifugação pode atingir velocidades superiores a 1200 rpm. Em velocidades tão altas até o menor desbalanceamento pode causar graves consequências.

Os principais fatores que tornam tão importante o tratamento de desbalanceamento são o aumento de:

- Desgaste;
- Esforço;
- Vibrações;
- Ruídos da máquina.

Tais fatores podem reduzir a vida útil do produto, afetar sua operacionalidade e o conforto do usuário.

Muitas empresas fabricantes de máquinas de lavar, considerando os fatores acima mencionados, já adicionaram algum método de detecção de desbalanceamento, bem como, algum tipo de tratamento.

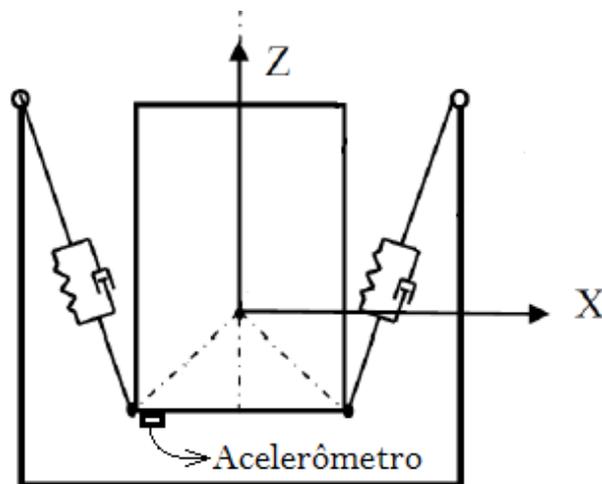
Apresentadas as razões que levam o desbalanceamento a constituir-se em um item que não pode ser ignorado pelas fabricantes de máquina de lavar, nas próximas seções serão descritas metodologias para sensoriamento/estimação e tratamentos que minimizam ou reduzem as causas ou efeitos do desbalanceamento.

2.4.3. Sensoriamento de Desbalanceamento

A principal maneira de sensoriar o desbalanceamento leva em consideração o movimento translacional indesejado que só ocorre quando o mesmo se manifesta. Os transdutores mais populares entre os fabricantes são:

- Acelerômetro:

Fig.2.10: Acelerômetro usado em sensoriamento de desbalanceamento



Fonte: Adaptado; Silva, G.B.T.da. ; 2013 [11]

O acelerômetro (Fig.2.10) é um transdutor capaz de medir a aceleração de um corpo em relação à gravidade. Considerando que o deslocamento em X só ocorre em situações de desbalanceamento, uma aceleração nesta direção indicaria

uma possível situação de carga mal distribuída. Uma determinada aceleração é então escolhida como sendo a máxima permitida, e qualquer ocasião que a exceda deve passar por uma rotina de tratamento do desbalanceamento, ou simplesmente abortar a lavagem, priorizando sempre o bem-estar do produto e, principalmente, de seu consumidor.

- Sensor de Proximidade

O maior problema ocorre quando o desbalanceamento se encontra em um estado tão intenso que fortes impactos ocorrem entre o cesto e as laterais da máquina. Um transdutor capaz de detectar a proximidade entre ambos, pode ser considerado também um transdutor de desbalanceamento.

Os dois sensores de posição mais utilizados são o indutivo e o capacitivo (Fig.2.11). O indutivo funciona através de uma bobina. Quando um corpo metálico atravessa o campo magnético da bobina, a modificação é interpretada como a proximidade a este corpo. Considerando que a lateral da máquina de lavar é metálica, este tipo de sensor é passível de ser utilizado. O sensor capacitivo, por sua vez, utiliza-se da variação no material dielétrico entre as suas placas capacitivas. A variação da capacitância é considerada como sendo a proximidade de um corpo. Leva vantagem sobre o sensor indutivo, por não captar somente objetos metálicos.

Fig.2.11: Sensores indutivo (a) e capacitivo (b)



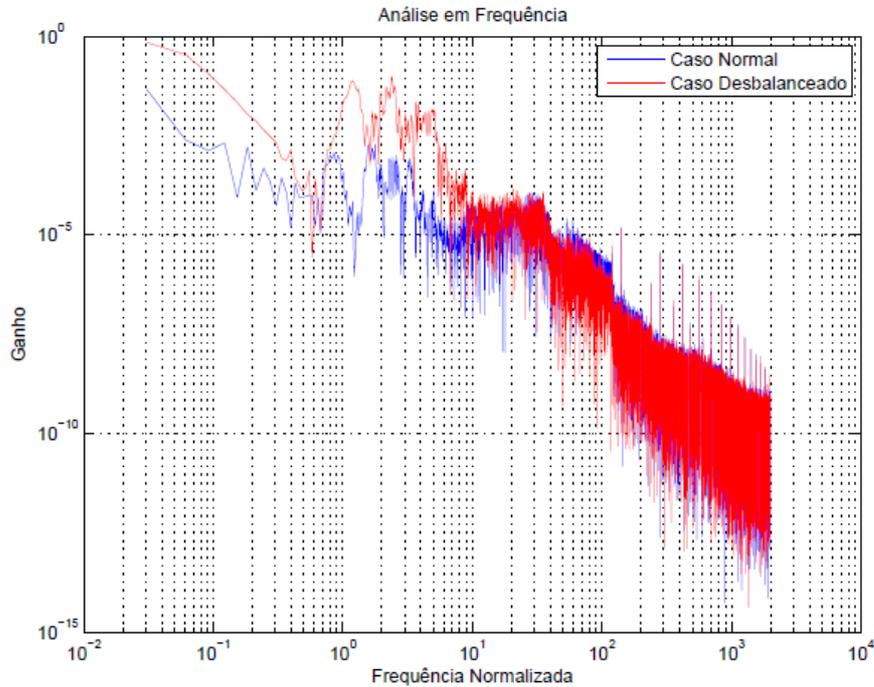
Fonte: Internet; <<http://www.priel.com.br/protecao-industrial/sensor-proximidade>>

2.4.4. Estimação de Desbalanceamento

A estimação de desbalanceamento usa dados já fornecidos por outros sensores, intrínsecos ao bom funcionamento da máquina. Um desbalanceamento, como já mencionado, aumenta o esforço necessário para a máquina operar. Normalmente este aumento de esforço pode ser visto como uma maior potência consumida, um maior torque exigido e uma maior corrente elétrica a ser enviada ao motor. Uma vez que é possível caracterizar a situação "normal" de funcionamento da

máquina, qualquer esforço necessário acima disto, pode ser interpretado como um desbalanceamento.

Fig. 2.12: Análise de torque em situação Balanceada VS Desbalanceada



Fonte: Silva, G.B.T.da. ; 2013 [11]

A Fig.2.12, resultado de um experimento realizado na Whirlpool, mostra que em uma determinada frequência, aqui normalizada para proteção de dados da empresa, o torque da carga desbalanceada mostra-se muito superior ao do caso normal. Esta informação, unida a uma estimacão de carga no cesto, bastaria para proporcionar uma boa estimacão de desbalanceamento. Sabendo-se o torque necessário para cada carga, sabe-se também se a carga está ou não desbalanceada.

2.4.5. Tratamento dos Efeitos do Desbalanceamento

A maior parte das vezes o consumidor não realiza um carregamento capaz de gerar grandes desbalanceamentos e, quando o faz, o ciclo de lavagem ajuda a distribuir as roupas de maneira mais uniforme, reduzindo-o. A maior reclamação, portanto, de consumidores, que faz referência ao desbalanceamento, é o da

quantidade de ruído sonoro, devidos a vibrações e batidas indesejadas. Uma solução mais simples para atender às reclamações, seria então, ao invés de detectar e consertar o desbalanceamento, reduzir o nível de ruído.

A maneira mais comum de reduzir o nível de ruído causado pelas batidas entre cesto e lateral da máquina é a utilização de uma espuma amortecedora, de maneira a reduzir os impactos e diminuir a energia contida no cesto, devido ao desbalanceamento.(Fig.2.13)

Fig.2.13: Espuma amortecedora de impactos laterais



Fonte: A autoria própria

Outro método para reduzir os efeitos do desbalanceamento é a adição de um amortecedor nas varetas de suspensão do cesto (Fig.2.14). Deste modo, o desbalanceamento causaria um menor nível de ruído, uma vez que parte dele seria transformado em deformação destes amortecedores.

Fig. 2.14: Vareta de suspensão com amortecedor



Fonte: Internet; < <http://www.royalstar.com.br/upload/produtos/1316720232.jpg>>

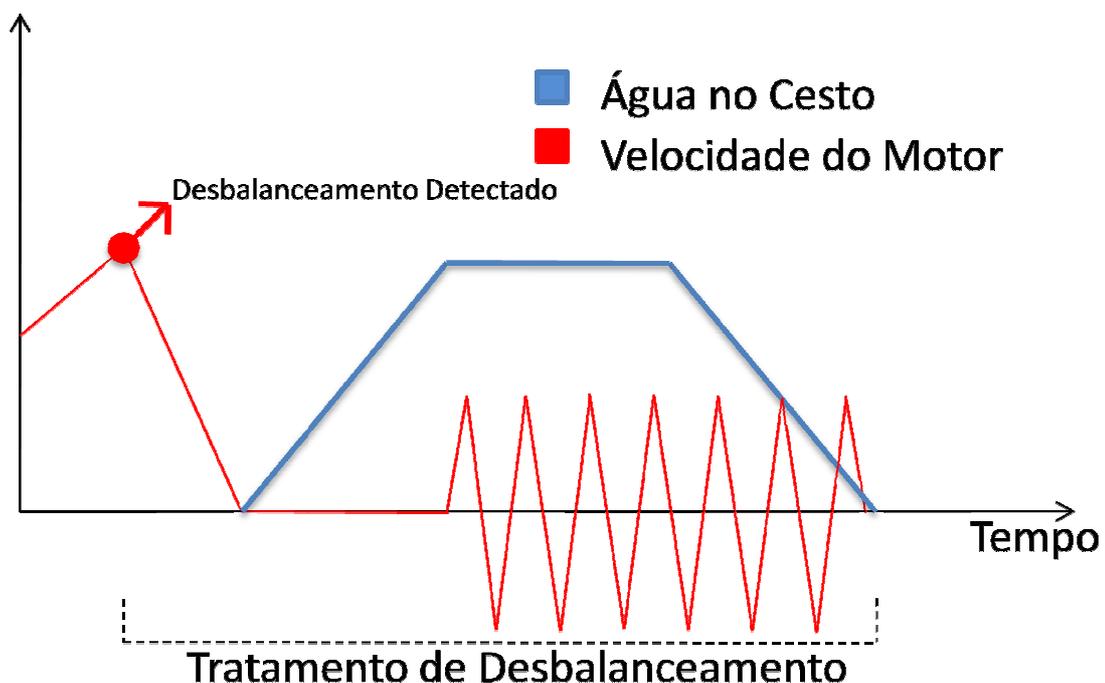
2.4.6. Tratamento das Causas do Desbalanceamento

Os tratamentos previamente citados são meramente paliativos. Detectado o desbalanceamento e sabendo-se que em altas velocidades as consequências podem ser desastrosas, algumas empresas preferem adotar uma dinâmica mais focada na causa do desbalanceamento do que em suas consequências.

Tomando-se como verdade que o desbalanceamento não ocorre devido a falhas de fabricação, montagem e/ou peças defeituosas, a única causa possível é a má disposição das roupas dentro do cesto.

A solução mais adotada para redistribuição de carga no cesto envolve: o enchimento do mesmo com água, agitações do *impeller*/agitador e, finalmente, um ciclo de extração de água.(Fig.2.15).

Fig.2.15: Método de redistribuição de carga



Fonte: Autoria própria

Este método traz como desvantagem o fato de que exige um ciclo só para ele, consumindo tempo, energia e água. Todavia, é mais eficaz, uma vez que age diretamente na causa do desbalanceamento.

3. Ferramentas Utilizadas

Este capítulo visa a familiarização do leitor com as ferramentas utilizadas no desenvolvimento deste projeto, demonstrando a importância de cada uma na obtenção dos resultados.

3.1. Seis-Sigma

As ferramentas Seis-Sigma surgiram originalmente em 1986, desenvolvidas no âmbito da Motorola [14]. Sua difusão somente ocorreu no final de 1995, quando o CEO da General Electric, Jack Welch, as utilizou com excelentes resultados em sua empresa. Logo após o sucesso na GE, a Maytag, uma das atuais marcas do grupo Whirlpool, implementou, também com sucesso, as mesmas ferramentas. Posteriormente, em 1997, a Whirlpool as implementou em todas suas unidades, em âmbito mundial, através do programa denominado Operational Excellence (OPEX) [15], que conta com uma série de ferramentas, algumas das quais baseadas na filosofia Seis-Sigma.

Através deste programa conseguiu-se não apenas reduzir os custos da empresa como, também, o tempo dos ciclos produtivos. Este último aspecto possibilitou o aumento da produtividade, bem como uma melhoria da organização interna, refletindo assim em uma qualidade superior dos produtos.

Os profissionais, treinados para desenvolver o Seis-Sigma, são distribuídos pela empresa de modo que toda ela esteja sempre utilizando, bem como aprendendo, novas técnicas do programa. Os responsáveis pela implementação desta filosofia são treinados e graduados em cursos, recebendo títulos de especialistas na área ("*Champions*", "*Black Belts*", "*Green Belts*", "*Yellow Belts*", etc.). A Whirlpool percebeu que investir adequadamente no treinamento de seus funcionários pode resultar em significativa redução do retrabalho. A partir de 1997, mais de 1500 *black belts* e *master black belts* foram certificados na empresa.

Estima-se que em 3 anos o programa OPEX possibilitou à Whirlpool uma economia de 175 milhões de dólares. Recentemente, em 2012, a empresa foi premiada pela International Quality & Productivity Center por apresentar o melhor projeto de Lean Seis-Sigma. [16]

Serão apresentadas a seguir as ferramentas de Seis-Sigma que foram utilizadas durante o desenvolvimento do projeto. No final deste documento, no Anexo 1, podem ser vistas mais algumas demonstrações de como era implementada a organização no ambiente de trabalho, no âmbito da Whirlpool.

3.1.1. Mapa de Raciocínio

A filosofia Lean, também presente no programa OPEX, tem como principal objetivo buscar a redução de desperdícios e do retrabalho. A fim de se evitar o retrabalho é necessário um planejamento bem estruturado e detalhado em relação a cada atividade. Uma das ferramentas do Seis-Sigma capaz de trazer este planejamento é o Mapa de Raciocínio (Thought Map - TMAP).

O TMAP é uma ferramenta onde são registradas todas as dúvidas referentes a um projeto, bem como as ações tomadas, possíveis teorias desenvolvidas, conclusões e pontos em aberto; em resumo, qualquer detalhe que direta ou indiretamente diz respeito ao projeto. Os desenvolvimentos das teorias, conclusões e ações são trazidos em relatórios específicos. O TMAP traz somente uma síntese do que foi feito e do que é planejado, de modo que qualquer colaborador possa, rapidamente, entender a razão da existência do projeto e, como o próprio nome indica, a linha de raciocínio que está sendo utilizada para resolver os problemas presentes no mesmo. Auxilia também a manter controle do que foi feito e dos pontos em aberto, que poderão, ou não, serem desenvolvidos.

Um exemplo aplicado desta ferramenta pode ser visto na Fig.3.1. O problema aqui apresentado é o de se escrever um Projeto de Fim de Curso (PFC). Inicialmente o problema deve ser dividido em perguntas a serem respondidas que, normalmente, geram ramos paralelos a serem respondidos. No TMAP cada quadro com cor diferente possui um significado. Neste caso:

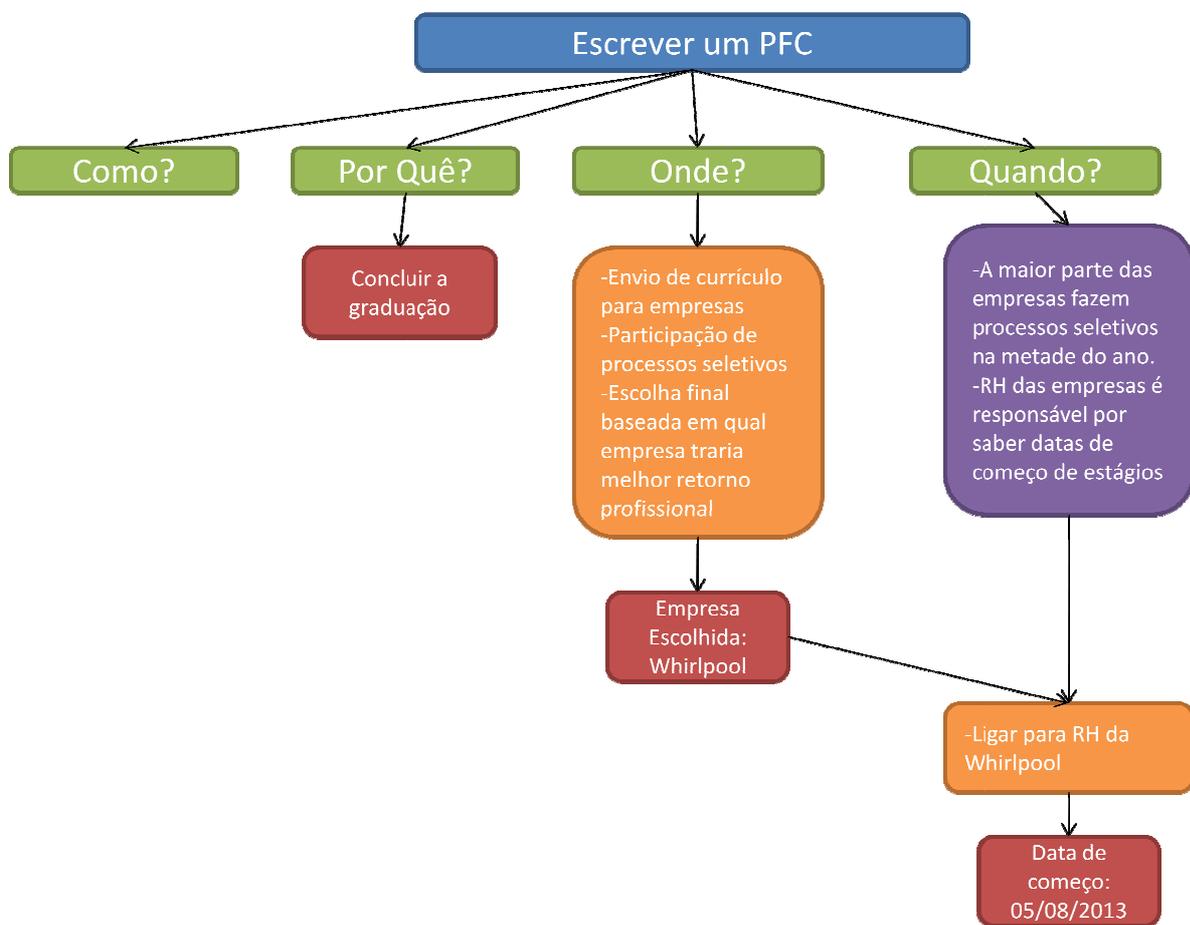
- Vermelho - Conclusões/Decisões;
- Laranja - Ações;
- Roxo - Teorias/Conhecimentos;
- Azul - Problema.

Perguntas podem gerar ações, teorias, respostas ou, até mesmo, outras perguntas. É fácil observar neste caso, que a pergunta "Como?" permanece como

um ramo deixado em branco e que pode ser tratado posteriormente. Esta também é uma vantagem do uso do TMAP: os pontos em abertos estão sempre claros e serão resolvidos quando, e se, houver interesse e recursos para tal.

A adoção do TMAP é interessante principalmente para grandes equipes pois, desde que seja constantemente atualizado, todos os colaboradores da equipe estarão sempre a par dos últimos resultados e ações geradas. Desta maneira, os integrantes podem contribuir mais para o desenvolvimento das ramificações que, quando concluídas, poderão levar à solução do problema.

Fig.3.1: Exemplo de TMAP



Fonte: Autoria própria

O projeto de análise comparativa, objeto deste documento, contava com uma pequena equipe de desenvolvimento, possibilitando a criação e utilização de uma variação do TMAP. Nessa variação, o TMAP era mais voltado para reportar as atividades desenvolvidas no estágio, ter um controle melhor das atividades

realizadas, das tarefas ainda por fazer e das perguntas/teorias/conclusões que cada uma das atividades gerou, dentro do modelo TMAP, conforme anteriormente apresentado.

A Fig.3.2 traz uma breve representação da variação do TMAP utilizada. Trata-se de uma planilha em Microsoft Excel dividida em três colunas destinadas a ações tomadas, atividades planejadas e atividades desenvolvidas. As linhas representam cada semana do período de estágio.

Semanalmente essa planilha era atualizada acrescentando as atividades realizadas e conclusões e/ou novas perguntas geradas. As ações eram classificadas em tipos (Leitura/Estudo, Execução de Testes, Análises etc...) e, a cada tipo, atribuía-se uma cor diferente. As conclusões eram apresentadas em relatórios com o embasamento e fundamentação que as geraram em planilhas diferenciadas. Quando isso ocorria, um *hiperlink* era incluído, no texto, para facilitar a navegação dentro do documento. Além das atividades realizadas, era necessário analisar quais as tarefas planejadas para a semana, preenchendo as desenvolvidas, na medida em que foram executadas. Finalmente, acrescentadas às atividades planejadas porém ainda não desenvolvidas, novas atividades deveriam ser propostas para a semana seguinte.

Fig. 3.2: Variação do TMAP utilizado no período de estágio

	Ações	Atividades Planejadas	Atividades Desenvolvidas
Semana 1		1- 1.1- 1.2- 1.3- 2- 3- 4- 4.1- 4.2-	1- 1.1 1.2 2- 3-
Semana 2		1- 1.3- 4- 4.1- 4.2- 5- 6- 6.1- 6.2-	1- 1.3- 4- 4.1- 4.2-

⋮

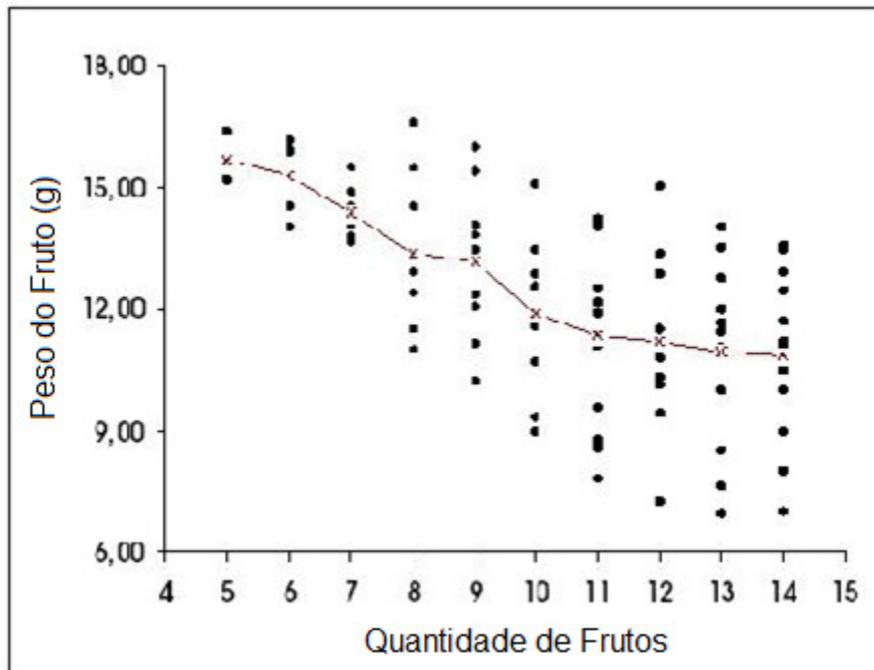
Fonte: Autoria própria

Este TMAP auxiliou muito na organização, tanto na centralização das informações e conclusões em um único documento, quanto no planejamento de atividades futuras. É uma ferramenta que exige, porém, muita disciplina, uma vez que depende de atualização permanente. Se o TMAP ficar desatualizado, e suas informações obsoletas, ele perde seu propósito.

3.1.2. Gráfico de Variabilidade/Dispersão

No trabalho de análise comparativa o gráfico de variabilidade foi muito usado, predominantemente, para visualizar a relação entre variáveis. Em uma mesma condição, no mínimo 3 execuções do mesmo teste eram realizadas. O gráfico de dispersão mostrava quão próximos os valores encontrados estavam, aumentando assim, as chances de se utilizar um valor mais fiel à realidade. No exemplo da Fig.3.3, as variáveis relacionadas são: "Quantidade de Frutos" e "Peso do Fruto". Se apenas uma única amostra fosse adquirida para cada "Quantidade de Fruto", a curva resultante seria diferente e, provavelmente, menos compatível com a realidade.

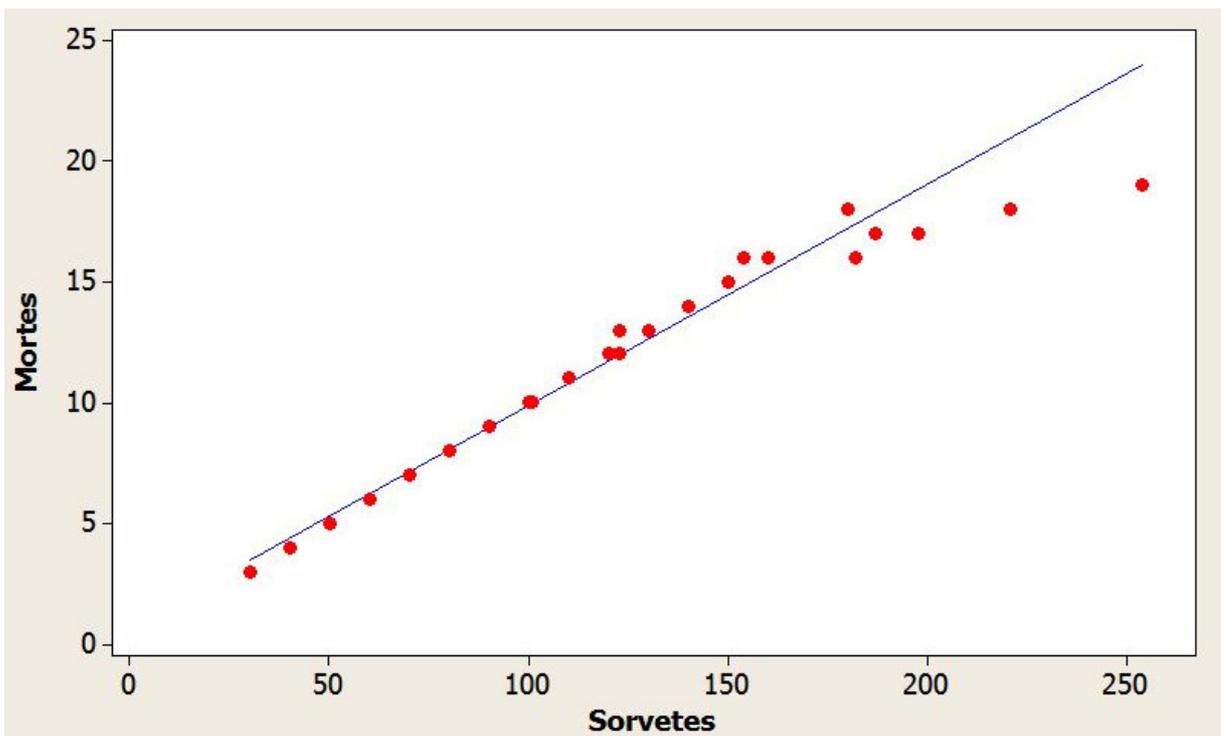
Fig. 3.3: Exemplo de gráfico de variabilidade



Fonte: Internet; Adaptado; <<http://leg.ufpr.br/~shimakur/CE055/img50.png>>

Uma coisa a ser levada em consideração é que o gráfico demonstra a relação entre duas variáveis mas, não necessariamente, implica que estas duas variáveis tenham uma relação de causa/efeito; e.g. A Fig.3.4 apresenta a relação entre as variáveis "Mortes na Praia" e "Sorvetes Comprados" [17]. Observa-se pelo gráfico que ambas possuem forte relação. O que é compreensível, devido ao fato que, em dias mais quentes, as pessoas entram mais fundo no mar e, também, consomem mais sorvetes. Todavia, não existe qualquer relação de causalidade entre as duas variáveis, i.e. as mortes na praia não são causadas pelas compras de sorvete, e nem os sorvetes comprados devido às mortes.

Fig.3.4: Correlação sem efeito de causalidade entre variáveis



Fonte: Internet; < <http://www.auctus.com.br/diagrama-de-dispersao/> > [17]

3.1.3. *Design of Experiments* (DOE)

Esta ferramenta tem, como o TMAP apresentado anteriormente, um foco voltado ao planejamento das atividades a serem desenvolvidas. Neste caso, as atividades consistem em uma sequência de testes que visam avaliar a influência de uma ou mais variáveis de controle em uma variável resultante.

O DOE é muito presente nas áreas de desenvolvimento de produto para avaliar a melhor combinação dessas variáveis de controle, ou simplesmente a

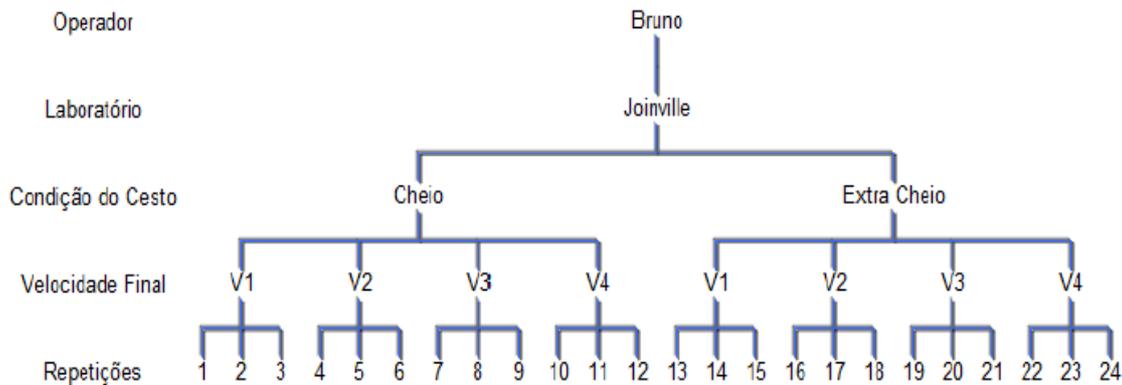
robustez da variável resposta perante as variações propostas. Mostra-se muito útil na avaliação de relações de causalidade.

O DOE é um documento que deve trazer todos os dados a respeito de um determinado experimento, i.e. quais dados devem ser variados, em que resolução deve-se alterar as variáveis de controle e em que condições deve ser feita a amostragem da variável resposta (dados estáticos/imutáveis - e.g. nome do laboratório e/ou operador).

Um plano de DOE bem feito retrata todas as informações a respeito do experimento. Uma maneira de resumir boa parte das informações pertinentes, sem prejudicar a compreensão, é a utilização de um diagrama de relacionamento entre fatores (FRD).

Um FRD consiste em uma abordagem gráfica simplificada de boa parte das informações de um dado experimento (Fig.3.5).

Fig.3.5: Exemplo de FRD



Fonte: Guerios, B.E.; 2013 [18]

3.2. Labview

Trata-se de uma linguagem de programação desenvolvida pela National Instruments(NI). Tem grande flexibilidade e facilita a integração de diferentes *hardwares*, não somente da própria NI como de outros fabricantes e desenvolvedores. Isso torna o LabVIEW uma excelente plataforma de programação para laboratórios experimentais. É por isso que a aquisição de dados utilizada neste

projeto de análise comparativa foi realizada em programas desenvolvidos em LabVIEW.

3.2.1. Programas de aquisição

- Beagle Reader:

Um dos programas de aquisição utilizados era o Beagle Reader (Fig.3.7). Possui este nome pois foi desenvolvido especificamente para possibilitar ao operador a interpretação e avaliação dos dados fornecidos pelo analisador de protocolos Beagle da empresa Total Phase. (Fig.3.6).

Fig.3.6: Analisador de protocolos Beagle



Fonte: Autoria própria

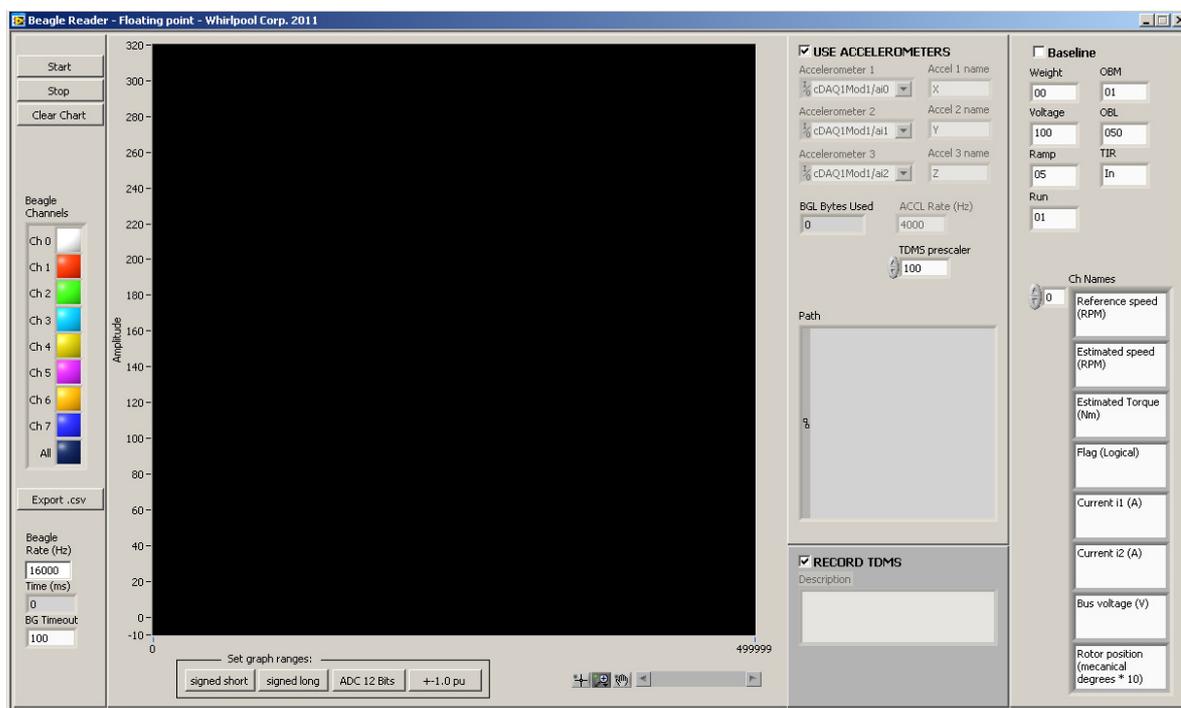
Analisadores de protocolos são *hardwares* responsáveis por realizar a aquisição e análise de sinais em uma determinada rede. Possuem diferentes características de armazenamento de dados, aquisição, tratamento de colisões, contagem de pacotes; entre outras funcionalidades. É necessário, portanto, um estudo mais aprofundado ao se adquirir um analisador, de modo que todas as especificações do projeto sejam atendidas. A principal característica buscada no analisador em sua compra foi a capacidade de realizar aquisição de dados em uma alta taxa de amostragem sem muito ruído no sinal amostrado. O Beagle, da Total Phase, é capaz de realizar amostras a uma taxa de 4000 amostras por segundo. Taxa satisfatória inclusive para aquisição de dados referentes à correntes elétricas.

As variáveis a serem amostradas eram adicionadas no *software* embarcado para que a aquisição fosse possível. A análise comparativa não nos permitia acesso

aos softwares embarcados dos competidores, desta forma, esse programa de aquisição era exclusivamente utilizado na MWHR.

Tendo em vista que os testes de desbalanceamento utilizariam um acelerômetro, uma adaptação foi realizada no Beagle Reader de modo a centralizar as informações em um único programa de aquisição de dados.

Fig.3.7: Programa de Aquisição de dados Beagle Reader



Fonte: Autoria própria

- **Temp Rise:**

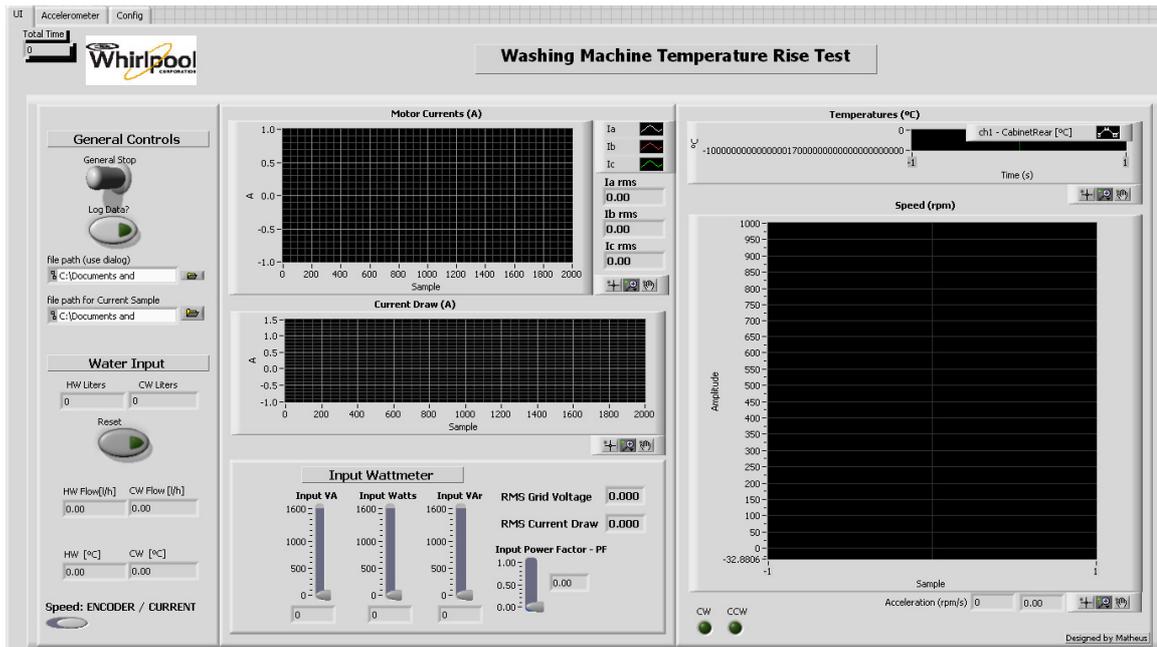
O programa utilizado para realizar as aquisições de dados nas máquinas competidoras era inicialmente um programa para avaliar temperaturas em máquinas de lavar, por isso o nome Temp Rise (Fig. 3.8).

O Temp Rise foi modificado, possibilitando:

- Seleção entre cálculo de velocidade por *encoder* ou pelas correntes do motor;
- Inclusão de dados relativos à quantidade de água no cesto;
- Inclusão de dados do acelerômetro.

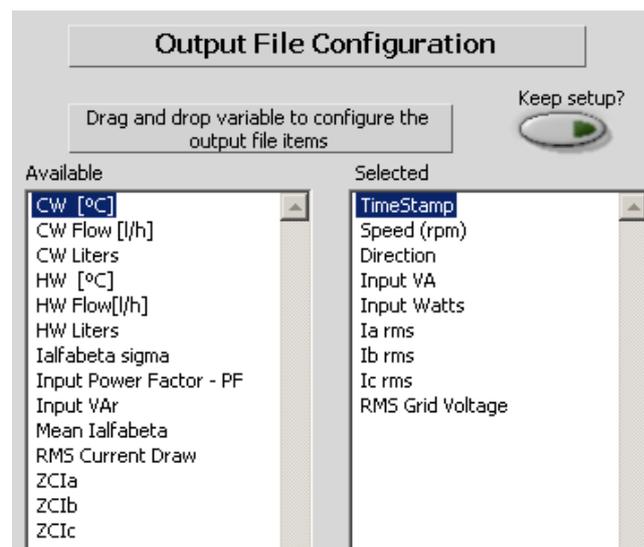
Além dessas modificações, diversas variáveis (Fig.3.9) já pré-definidas, poderiam ser escolhidas dentre as possíveis a medir para serem incluídas ao log de dados gerado.

Fig.3.8: Programa de aquisição de dados Temp Rise



Fonte: Autoria própria

Fig.3.9: Variáveis do Temp Rise



Fonte: Autoria própria

3.3. Matlab

Uma vez concluídos o planejamento e os experimentos a serem avaliados, os dados devem ser tratados e analisados possibilitando a inferência de conhecimentos úteis a partir dos logs de informações gerados pelos programas de aquisição.

O Matlab é uma linguagem de programação de alto nível com foco em operações matemáticas. Originalmente criado para operações matriciais, por isso o nome (MATrix LABoratory).

Neste projeto foram desenvolvidos scripts para tratamento de dados e cálculo do momento de inércia, além de utilizar o script de detecção de desbalanceamento. Estes scripts serão novamente abordados, individualmente, no próximo capítulo.

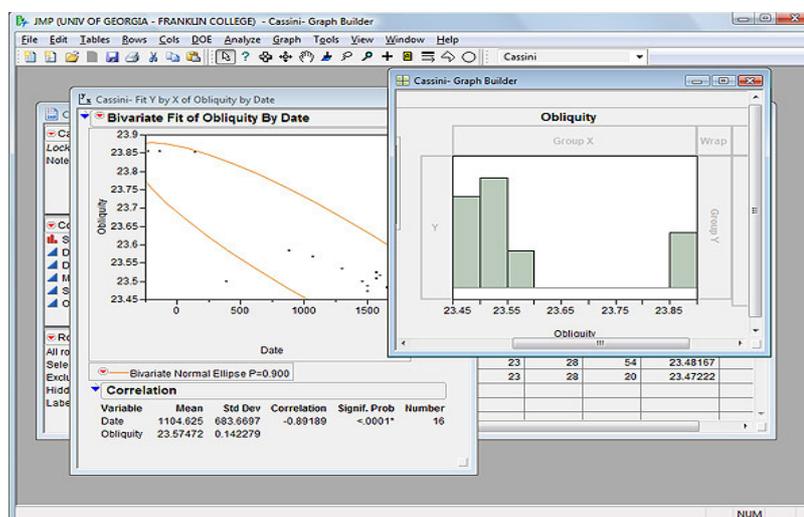
3.4. Programa de Análise Estatística (JMP)

Ao término do tratamento de dados e compilação dos dados pós-processados pelos scripts do Matlab, utilizou-se uma ferramenta de análise estatística de modo a gerar gráficos e imagens que facilitassem a tomada de decisões e a concluir afirmações a respeito dos dados.

A ferramenta JMP (Fig.3.10) - de pronúncia "*jump*"- foi criada na década de 1980 por John Sall e um time de desenvolvedores para ser inicialmente utilizada na Macintosh [19]. O objetivo era de dar suporte a engenheiros e cientistas na criação de DOE para seus experimentos sustentando a filosofia seis-sigma apresentada no começo deste capítulo.

Este programa foi utilizado principalmente para a criação dos, também já apresentados, gráficos de dispersão/variabilidade. Estes serão posteriormente expostos juntamente com outros resultados deste projeto.

Fig.3.10: Ferramenta de análise estatística JMP



Fonte: Internet; <<http://www.covingtoninnovations.com/michael/blog/0904/090401-JMP1.jpg>>

4. Desenvolvimento

Uma vez apresentadas a teoria e fundamentação exigidas para a compreensão do projeto desenvolvido e descrito neste documento, o presente capítulo detalha as etapas e as tarefas realizadas para a obtenção dos resultados gerados.

Primeiramente são descritas as características das máquinas dos competidores. Efetuaram-se testes envolvendo detecção de carga, seguidos de testes de desbalanceamento. Nestes casos, o foco principal será o DOE e setup utilizados para cada situação. Uma vez coletados os dados, torna-se necessário realizar o pós-processamento dos mesmos. Abordam-se, então, os scripts desenvolvidos no Matlab. Finalmente, o capítulo trata da MWHR: Como foram executados o *tuning* e validação do algoritmo Whirlpool de estimação de carga.

4.1. Testes de Detecção de Carga

Os testes de detecção de carga tinham por objetivo analisar a resolução do sistema de estimação/sensoriamento de carga dos competidores. Tendo em vista a impossibilidade de acesso direto aos códigos embarcados nas placas, o método utilizado envolvia a medição de diferentes níveis de água entregues para lavação.

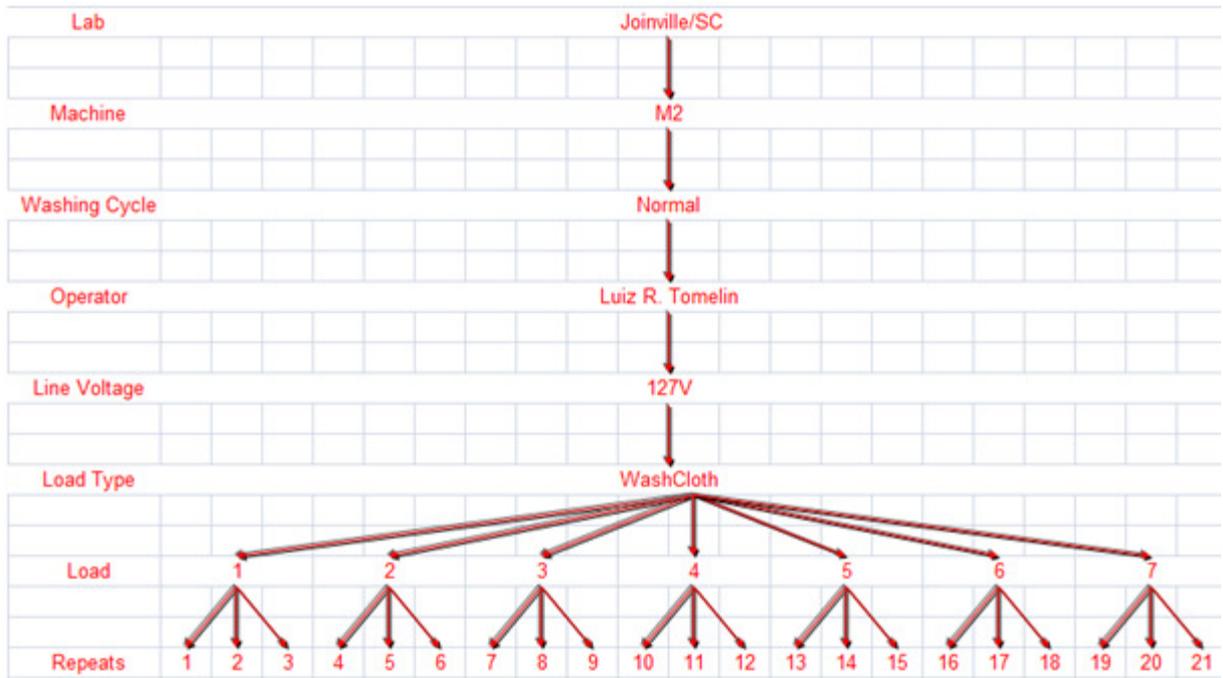
4.1.1. DOE de Detecção de Carga

Para cada sequência de testes realizada um DOE era confeccionado contendo todos os dados pertinentes ao experimento e às alterações das variáveis de controle. No caso da detecção de carga, a variável de controle era a quantidade de carga; as variáveis respostas eram, por sua vez, a quantidade de água depositada no cesto, o tempo de execução da rotina de estimação de carga e o tempo de enchimento do cesto.

Conforme dito no capítulo terceiro, um FRD é uma representação gráfica de dados de um DOE. O FRD (Fig.4.1) traz informações pertinentes ao experimento, sejam estáticas, ou alterações nas variáveis de controle. As informações das variáveis respostas são registradas em uma outra tabela do DOE chamada Tabela

de Design para Experimentos Fatoriais (FEDT - Factorial Experiment Design Tables).

Fig.4.1: FRD de um dos experimentos de estimação de carga



Fonte: Autoria própria

As máquinas utilizadas neste projeto têm tamanho e capacidade similar. A capacidade total foi dividida em 7 diferentes níveis, distribuídos da maneira mais adequada possível. Levou-se em consideração também, os níveis utilizados nos testes das agências reguladoras de consumo de água e energia dos Estados Unidos.

4.1.2. Setup para Testes de Detecção de Carga

Uma vez feito o planejamento das variáveis desejadas, torna-se necessário que o *setup* seja feito corretamente afim de que a aquisição de dados possibilite a obtenção de todas as variáveis respostas, diretamente, ou através de pós-processamento.

- Tranca:

Visando um melhor entendimento do que acontece dentro das máquinas em seus ciclos de operação, a primeira tarefa realizada foi a remoção da tranca das máquinas competidoras, que não permitia a abertura da tampa da máquina de lavar durante o ciclo de lavagem.

As fabricantes das máquinas M1 e M2 terceirizavam a produção dessa peça e, coincidentemente, ambas possuem o mesmo sistema de tranca.(Fig.4.2).

O módulo consiste de um atuador, responsável pela ação mecânica de manter a porta trancada, preso a um garfo metálico que fechava dois circuitos, ao travar a porta um e ao destravar outro. Estes dois circuitos informam a situação da porta, aberta ou fechada. De modo a garantir o travamento da porta, um *reed switch* (Fig.4.3) é acionado pelo atuador, que também possui propriedades magnéticas. Um *reed switch* é um interruptor que entra no estado "ligado" quando sofre influência de um campo magnético, voltando ao estado "desligado" quando o campo para de atuar sobre o mesmo.

Fig.4.2: Módulo de tranca da porta similar ao de M1 e M2

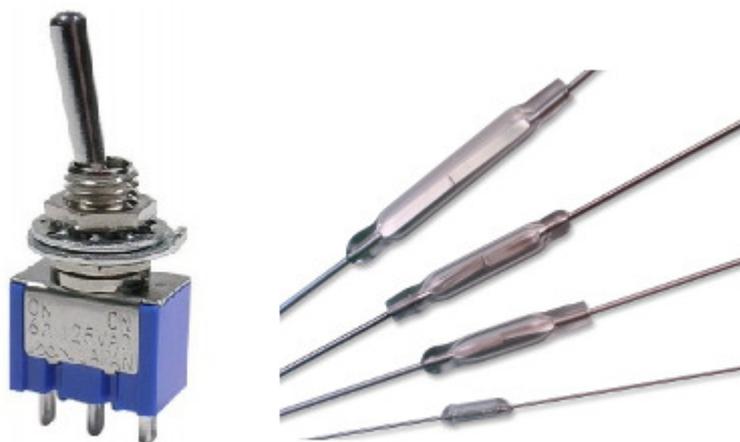


Fonte: Internet; Adaptado; <<http://www.appliancepartshelp.com/assets/images/cabrio.jpg>>

O *setup*, envolvendo a tranca, resume-se em remover o *reed switch*, curto circuitando-o, e em adicionar um interruptor externo (Fig.4.3) à máquina. Esta última

operação possibilita ao operador dos testes a alternância entre os dois circuitos (aberto e fechado).

Fig.4.3: Interruptor de duas posições (esq.) e reed switches (dir.)



Fonte: Internet; <<http://www.mroelectronics.com/mro/img/p/3878-4752-large.jpg>>
<<http://www.standexelectronics.com/products/images/categoryReedSwitches.jpg>>

- **Balança:**

A estratégia adotada para a mensuração da quantidade de água despejada no cesto foi a utilização de uma balança do tipo plataforma (Fig4.4), onde a máquina a ser estudada era colocada. Após a máquina ter seu peso mensurado, a balança era zerada, de tal forma que qualquer variação constatada seria devida à carga ou à água despejada no cesto. Sendo a quantidade de carga colocada uma variável de controle e, portanto, conhecida, o peso da água contida no cesto durante os diferentes testes também passou a ser conhecido. Sabendo-se a densidade da água ($1.000,00 \text{ kg/m}^3$) é possível também obter o seu volume.

A comunicação da balança com o computador foi mediante um cabo serial.

Fig.4.4: Balança utilizada em testes de estimação de carga



Fonte: Autoria própria

- Wattímetro:

Necessitou-se também de um *setup* apropriado para a aquisição de dados das correntes do motor e da velocidade de rotação do cesto. As correntes do motor foram necessárias para realizar a estimação analítica de algumas variáveis respostas. Sua amostragem foi realizada utilizando um Wattímetro, desenvolvido pelo grupo de sensoriamento da Whirlpool, conectado ao computador por um módulo de aquisição da NI.

A aquisição da velocidade estava, inicialmente, planejada para ser realizada através de um *encoder*. Todavia, após a efetuação do *setup*, constatou-se uma aquisição demasiada ruidosa. Isto, devido às vibrações resultantes do desbalanceamento entre os eixos do motor e do encoder, somados ao da máquina. Uma mudança de estratégia fez com que as velocidades das máquinas fossem calculadas a partir da estimação analítica de velocidades de motores síncronos [20]:

$$Velocidade (rpm) = \frac{60 \cdot f}{p}$$

f - Frequência da rede

p - Número de polos no motor

A fim de evitar que o motor fosse removido, e isso pudesse alterar os resultados dos testes a serem executados, o número de polos foi obtido através de estimações e comparando-se a velocidade calculada pela equação com o valor retornado por um tacômetro.

Desta maneira um mesmo *setup* possibilitou a aquisição de múltiplas variáveis respostas.

4.2. Testes de Desbalanceamento

Os experimentos de desbalanceamento das máquinas competidoras objetivavam observar as estratégias utilizadas em relação a estimação/sensoriamento de desbalanceamento, bem como a sensibilidade dos mesmos.

Uma vez que roupas e tecidos se deslocariam durante a execução dos testes e a distribuição deveria ser a mais uniforme possível em todas as execuções,

- Posição da massa desbalanceada (TIR).

No exemplo acima, os valores reais dos fatores foram substituídos por variáveis, mantendo o sigilo industrial. As variáveis respostas eram:

- A detecção de desbalanceamento e velocidade em que isto ocorreu;
- Velocidade máxima atingida;
- Batidas do cesto na lateral da máquina em baixas e altas velocidades;
- Deslocamento dos pés da máquina de lavar;
- Deslocamento do cesto.

4.2.2. Setup Utilizado para Desbalanceamento

As variáveis respostas envolvendo batidas e deslocamento dos pés da máquina deveriam ser inseridas no DOE manualmente e analisadas no momento da execução do teste pelo operador. Isto insere subjetividade e incerteza nestas medições, uma vez que estes dados podem variar com a mudança de operador. Outras, no entanto, tiveram o *setup* reutilizado dos testes de estimação de carga, precisando somente remover a balança para não inserir mais uma dinâmica no sistema. A variável resposta deslocamento do cesto, por sua vez, foi medida por meio de um acelerômetro(Fig.4.6).

Fig.4.6: Acelerômetro



Fonte: Internet; <<http://images.nei.com.br/lg/227601.jpg>>

4.3. Scripts para Análises e Tratamento de Dados

A presente seção trata dos scripts de Matlab utilizados e desenvolvidos durante o projeto. Os scripts para cálculo do momento de inércia e de tratamento de erros de aquisição de dados.

4.3.1. Script de Cálculo de Momento de Inércia

O script para cálculo de momento de inércia foi realizado especificamente para a MWHR, uma vez que as máquinas competidoras adotam estratégias diferentes e desconhecidas de estimação de carga.

O algoritmo é a representação em código ".m" (MatLab) da estratégia apresentada em 2.3.5. Algumas variações foram realizadas no decorrer do projeto devido a mudanças implementadas na MWHR, novos protótipos e adições de novas funcionalidades no script (cálculo de atrito, cálculo de atraso do controle de velocidade nas rampas, mudança no número de *spins*,...).

O funcionamento do script ocorre da seguinte maneira:

- Seleção de parâmetros *hard-coded* (embutidos no código .m);
- Seleção da pasta com dados adquiridos;
- Geração automática de um "relatório" em excel.

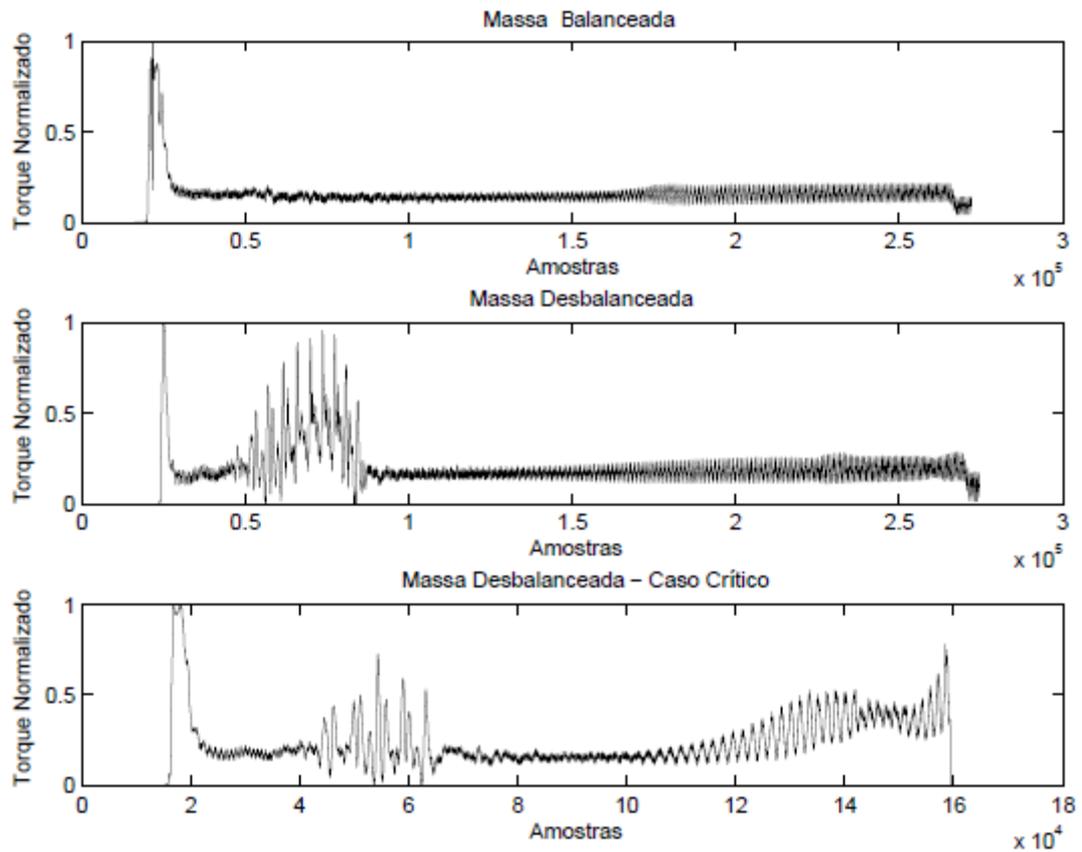
O arquivo gerado em excel traz na primeira planilha todas as informações de torque, aceleração e momento de inércia de cada execução. A segunda, por sua vez, traz gráficos contendo dados de velocidade e torque para cada uma das rodadas.

4.3.2. Script para Detecção de Desbalanceamento

A técnica utilizada atualmente para detecção de desbalanceamento, diferentemente da adotada em estimação de carga, ainda não possui uma patente protegendo-a. Consequentemente pouco pode ser escrito a seu respeito. A Fig.4.7 traz alguns dados de torque que foram normalizados, também para manter a confidencialidade da informação. Nestes dados é possível observar um caso sem

desbalanceamento, outro com desbalancement e, finalmente, um exemplo onde o desbalanceamento é crítico.

Fig.4.7: Amostras normalizadas de torque para testes de desbalanceamento



Fonte: Silva, G.B.T.da. ; 2013 [11]

O experimento aqui realizado, consistia de manter uma aceleração constante até uma determinada velocidade. No primeiro gráfico, pode-se observar que o torque permaneceu constante em praticamente todo o experimento. O segundo gráfico representa um caso em que ocorre desbalanceamento. Nele, é possível observar, na frequência de ressonância, uma perturbação no sinal de torque. O desbalanceamento tornou-se evidente com o movimento translacional citado em 2.4.1, mas recuperou-se depois de sair da frequência de ressonância, também chegando à velocidade final do experimento. O terceiro caso, por sua vez, teve sua parada antecipada, tendo em vista que as batidas do cesto na lateral da máquina tornaram-se tão fortes que a continuidade do teste poderia implicar em danos estruturais permanentes.

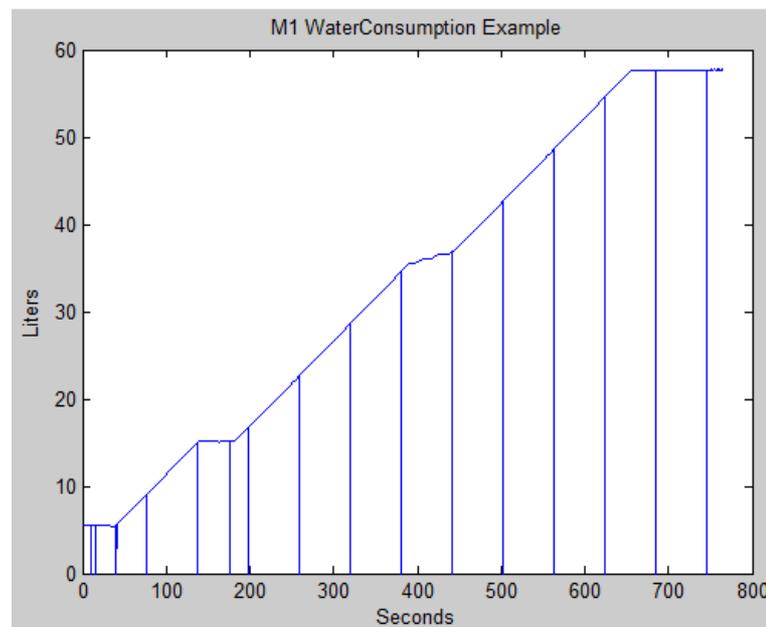
Variações como as acima citadas, entre casos sem e com desbalanceamento de carga, são consideradas no script da Whirlpool para diferenciar um caso de outro.

4.3.3. Script para Tratamento de Erros de Aquisição

Um script foi desenvolvido especificamente para tratar erros de aquisição de dados, sendo que os dois principais ocorriam na comunicação com a balança e na mensuração da velocidade.

A comunicação com a balança apresentava valores errôneos iguais a zero (Fig.4.8). A remoção destes valores é bastante simples uma vez que os dados estão no MatLab. A função *find()* tem como parâmetro uma condição envolvendo uma matriz. Após sua execução, retorna os índices dos elementos da matriz onde a condição estabelecida mostra-se verdadeira. Desta forma, bastou que a condição fosse valores iguais a zero onde seu sucessor e antecessor fossem maiores do que 1. Esta última condição pois o zero errôneo apresenta sucessores e antecessores não coerentes, impedindo assim a exclusão indevida de algum zero. A função, com esta condição como parâmetro, retorna todos os índices onde ocorreu este erro. O tratamento aplicado foi a substituição dos zeros por médias aritméticas entre seus antecessores e sucessores.

Fig.4.8: Zeros errôneos na aquisição da balança

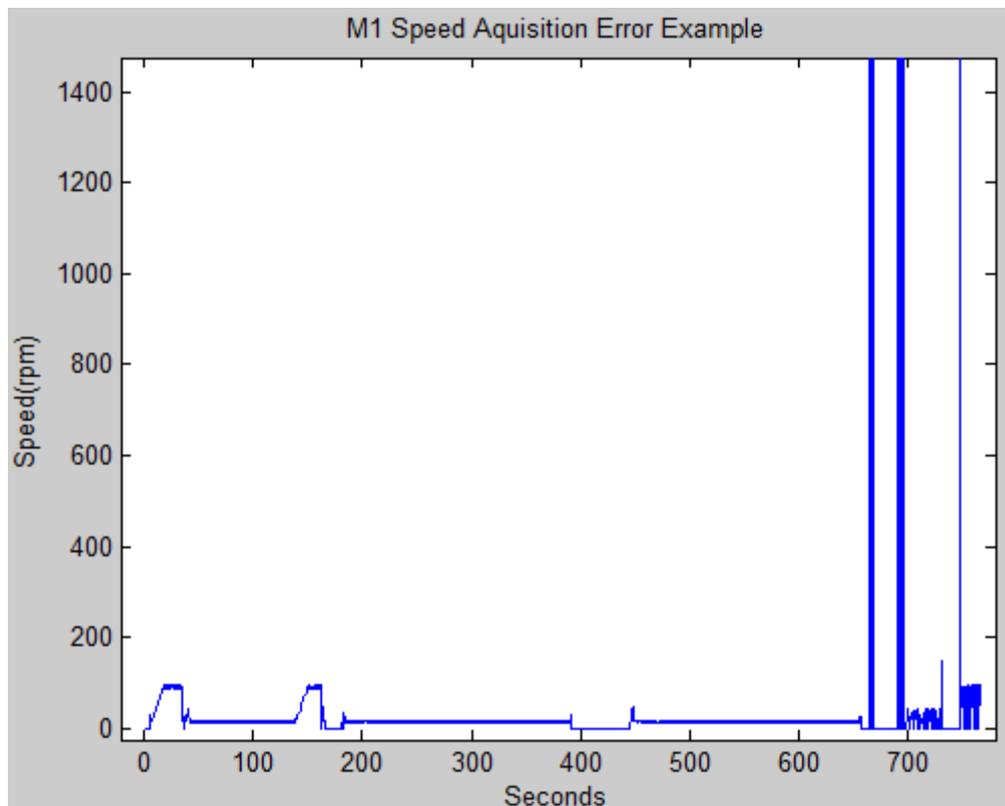


Fonte: Autoria própria

A estimação analítica de velocidade leva em consideração somente dois fatores: número de polos no motor e frequência da rede elétrica. O número de polos é constante e, portanto, as fontes de erro restantes resultam do programa de aquisição de dados ou de picos de frequência na rede. Em todo caso, o resultado dos testes apresentava velocidades claramente erradas (Fig.4.9). Sua remoção foi semelhante a técnica aplicada para os zeros encontrados nos dados da balança, onde a condição foi de valores superiores a um determinado limiar máximo de velocidade estipulado.

Uma vez que cada um dos erros era tratado, um novo arquivo era gerado para que, neste sim, pudesse ser aplicado o correspondente script de análise.

Fig.4.9: Erro na velocidade calculada



Fonte: Autoria própria

4.4. Calibração do Algoritmo Whirlpool

A metodologia demonstrada em 2.3.5 é uma estimação analítica de cálculo de momento de inércia. A transformação de momento de inércia para massa, todavia, é realizada através de uma estimação empírica. Várias execuções são realizadas,

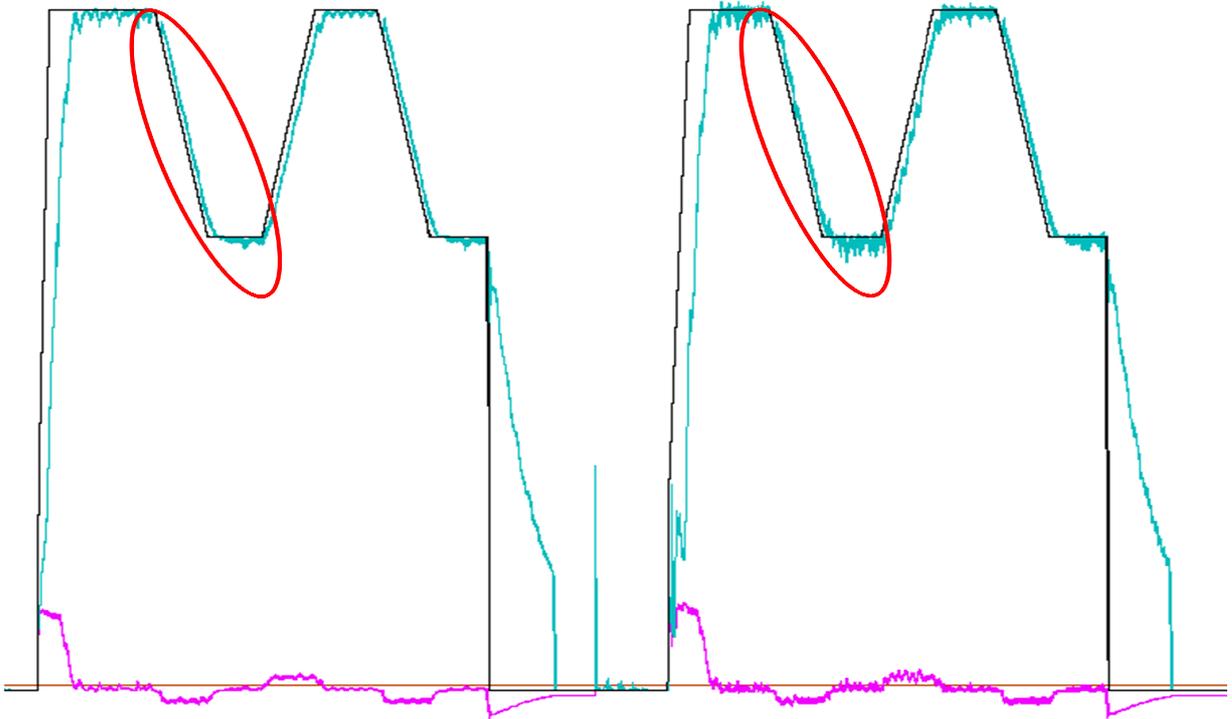
onde sabe-se a massa dentro do cesto, e, ao final do processo, uma regressão polinomial é aplicada de modo a se obter uma equação capaz de transformar o momento de inércia calculado em massa. Esta calibração deve ser realizada para cada tipo de máquina, considerando que o peso e dinâmica do cesto variam, resultando em momentos de inércias diferentes para uma mesma massa.

Nesta etapa utilizou-se um determinado número de níveis de carga, capaz de representar bem toda a amplitude de capacidade de armazenamento do cesto da MWHR. Além disto, outro fator que sofreu variações, foi o tipo de tecido. Os diferentes tecidos tinham propriedades distintas de absorção de água, textura e densidade. Foram utilizados os mesmos tecidos que as agências reguladoras adotam para classificar a qualidade da lavagem em diversos aspectos.

Como visto anteriormente (seção 2.3.5) o A-profile consiste num perfil de velocidade onde ocorre uma aceleração do motor até uma determinada velocidade, a manutenção desta velocidade por um período de tempo e, em seguida, uma frenagem. Assim como o algoritmo, este perfil foi modificado de modo a melhor adaptar-se as condições da nova MWHR. Na Fig.4.10 pode-se ver a mudança realizada de tempo nos patamares de velocidade do primeiro *spin*. Essa mudança se mostrou necessária, pois a alteração da frequência de ressonância da máquina fez com que a energia acumulada na mesma se manifestasse também no segundo *spin*, como demonstrado no perfil à direita na Fig.4.10. O aumento do tempo no patamar do primeiro *spin* (perfil à esquerda) fez com que fosse possível que a energia acumulada na frequência de ressonância fosse dissipada, não afetando desta maneira, o segundo *spin*. Na imagem, destaca-se como a descida do primeiro *spin* é mais suave para o caso onde o tempo foi maior.

Concluídos os experimentos necessários para a regressão polinomial, testes de validação do algoritmo foram feitos para verificar a qualidade da estimação de carga realizada. Estes resultados, assim como os dos outros experimentos, encontram-se no próximo capítulo.

Fig.4.10: A-Profile adaptado para a MWHR



Fonte: Autoria própria

5. Resultados

Após feito o planejamento de quais os fatores desejavam-se observar, criada uma árvore de testes apropriada para aplicar uma variação em tais parâmetros que possibilite verificar suas influências, providenciado o *setup* apropriado e realizados os testes, foram obtidos os dados desejados que serão apresentados neste capítulo, bem como as análises correspondentes.

O capítulo foi dividido em duas partes: Estimação de Carga e Estimação de Desbalanceamento. Cada uma será abordada individualmente buscando-se, desta maneira, uma melhor organização dos conteúdos, facilitando a leitura e compreensão do documento.

5.1. Análise Comparativa de Estimação de Carga

Conforme esclarecido anteriormente, os experimentos realizados para a análise comparativa de sensoriamento/estimação de carga foram feitos utilizando somente um tipo de tecido (*Wash Cloth*), em 7 diferentes níveis de carga, com um carregamento distribuído e diferenciado em cada execução.

5.1.1. Análise de Níveis de Água Utilizada

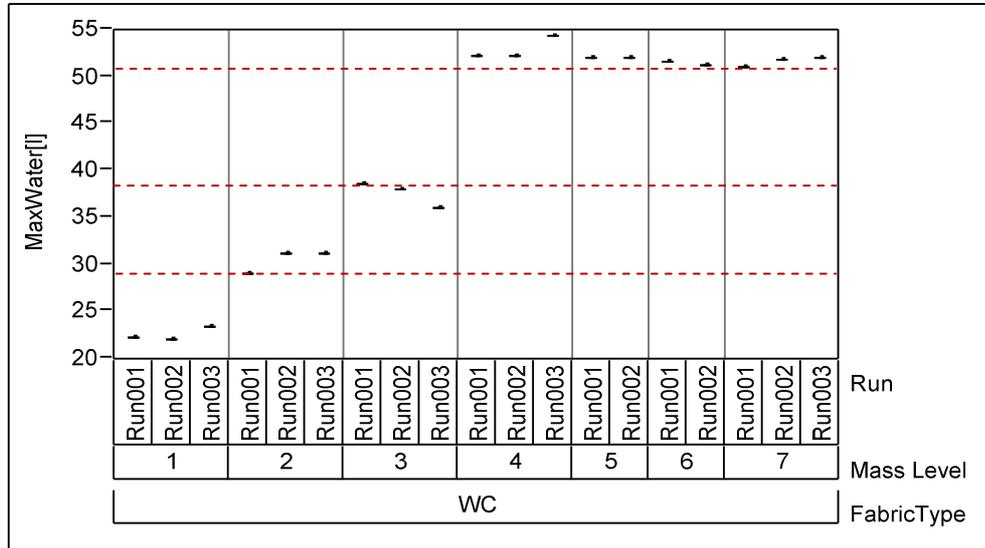
Uma vez que não se tem acesso ao código embarcado das placas responsáveis pelo processamento envolvido na execução dos ciclos de lavagem de cada uma das máquinas M1 e M2, assumiu-se que um bom modo de conhecer a resolução de seus sistemas de estimação de carga seria a medição de quantos diferentes patamares de água (níveis) poderiam ser entregues por cada máquina operando em seu ciclo normal.

A máquina M1 apresentou os resultados vistos na Fig 5.1. É possível observar que, na execução da árvore de testes, M1 apresentou 4 diferentes níveis de, aproximadamente, 22.5 , 30 , 37.5 , 52 litros.

Ao ser analisada a rodada de referência com cesto vazio, i.e. sem qualquer carga, observou-se a utilização de 20 litros de água. Considerando que existem outros casos com variação de 2 litros entre repetições de um mesmo nível de carga,

assumiu-se que os 20 litros encontrados para o cesto vazio correspondem ao primeiro nível possível (22.5 litros). Deste modo, conclui-se que M1 tem a capacidade de diferenciar entre 4 quantidades distintas de roupas.

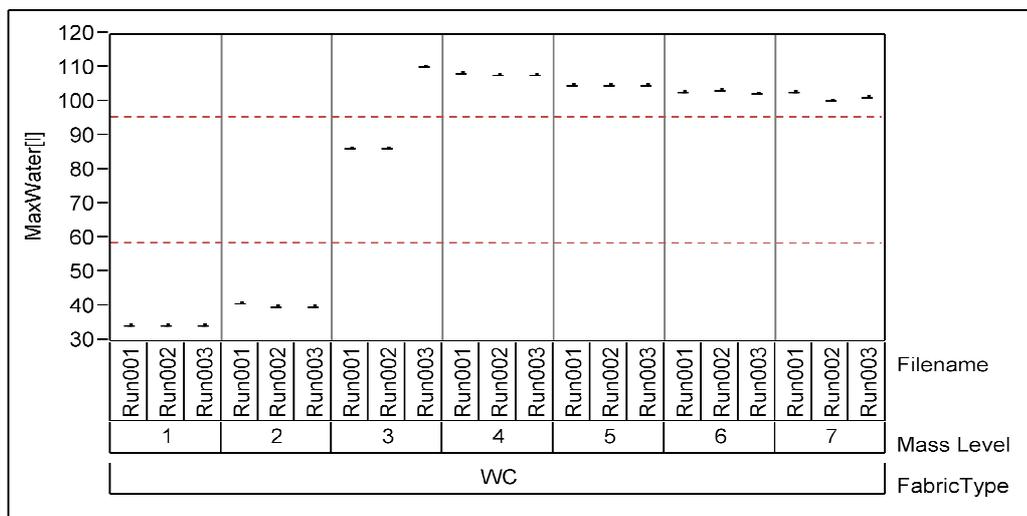
Fig. 5.1: Análise de níveis para M1



Fonte: Autoria própria

A mesma análise, quando feita com M2 (Fig 5.2), apresentou um comportamento semelhante no que diz respeito ao fato que também, do nível 4 ao 7 de carga, aparenta utilizar uma quantidade de água constante. Todavia, a diferença reside na quantidade de água entregue, i.e. M1 entrega menos água do que M2.

Fig. 5.2: Análise de níveis para M2

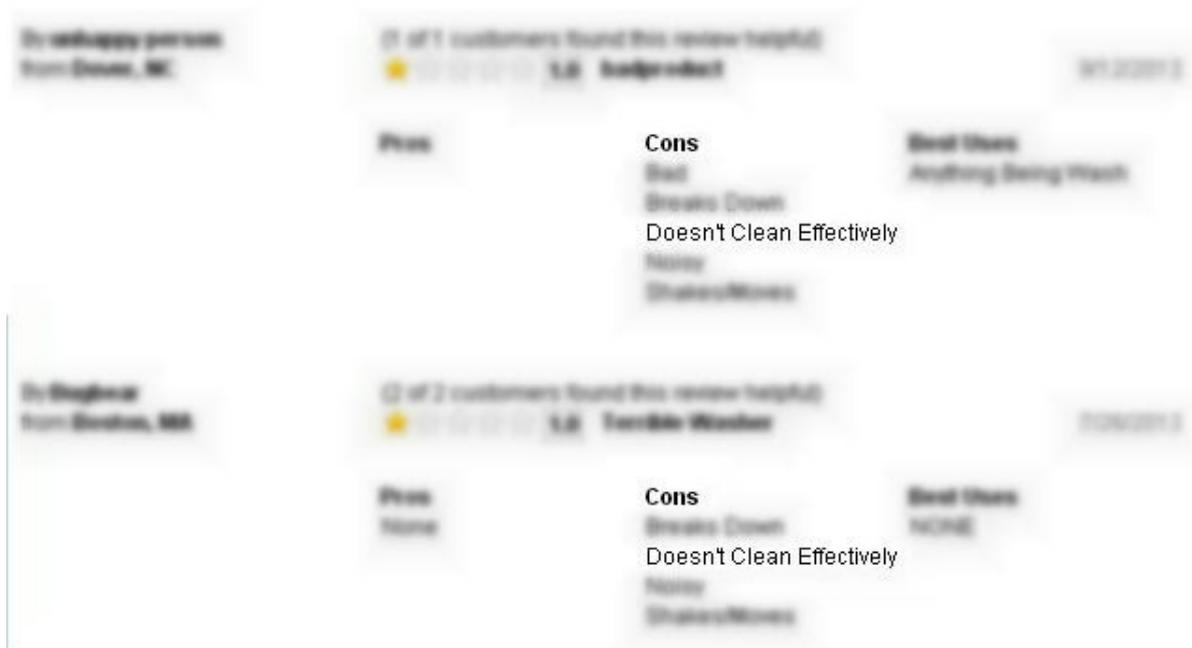


Fonte: Autoria própria

O consumo de água de M1 para grandes cargas de roupa é aproximadamente 50% menor que M2. Conseguir entregar uma lavagem eficiente utilizando 50% menos de água representa uma grande conquista, pois o cliente, ao comprar uma lavadora, avalia também o consumo de água. Trata-se de um recurso natural importante, que não deve ser desperdiçado, e representa um maior custo de operação do eletrodoméstico. Todavia, operar com uma quantidade tão inferior de água pode significar o sacrifício da qualidade de lavagem que, para muitos, é mais importante do que o consumo de água.

O site consumerreports.org é um site pago responsável por selecionar diversos produtos - de celulares a lavadoras - e classificá-los de acordo com vários critérios. No mesmo site, os consumidores podem também deixar suas próprias opiniões e críticas a respeito dos produtos.

Fig. 5.3: Análise de consumidores da máquina M1
(A figura foi desfocada de modo a preservar o anonimato dos clientes)



Fonte: Internet; Adaptado; <www.consumerreports.org>

A página do site mencionado acima que avalia M1 tem mostrado (Fig. 5.3) consumidores insatisfeitos com a qualidade de lavagem.

Um dos fatores mais importantes para uma boa qualidade de lavagem é a quantidade de água entregue. Em face dos dados acima apresentados, uma possível abordagem da marca responsável por M1 seria, portanto, efetuar uma

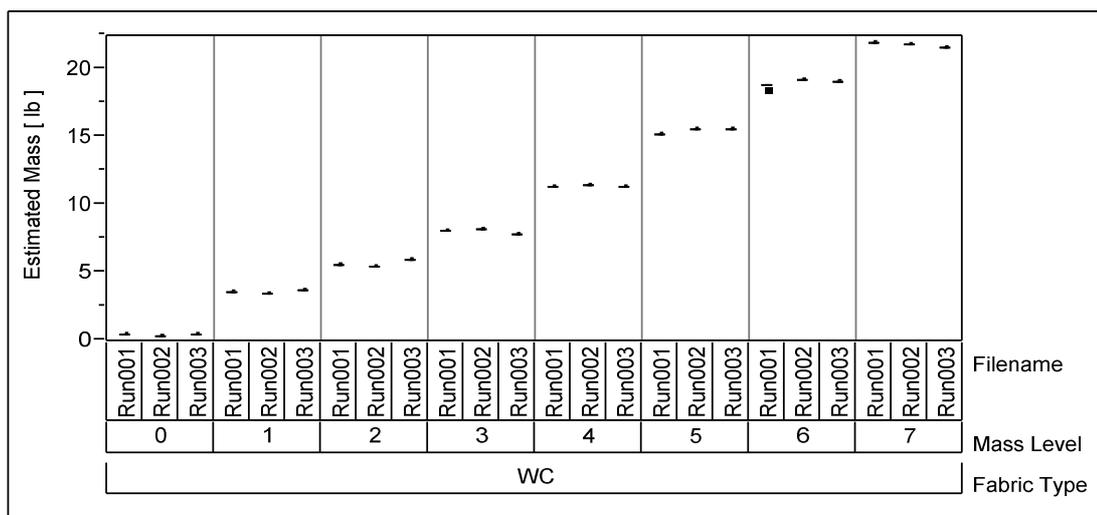
análise mais aprofundada destas críticas, de modo a verificar se as mesmas são pontuais ou se a maioria de seus consumidores compartilha da mesma opinião. Estes dados possibilitariam a adoção de estratégias que visassem impedir uma possível difusão de uma imagem negativa associada a marca.

Retomando a análise de M2, a árvore de testes encontrou, neste caso, 3 diferentes níveis de, aproximadamente, 38, 86, 105 litros. É quase certo dizer que não existe diferença de água utilizada entre os níveis 3 e 4 de carga, tendo em vista que uma das execuções (*Run003*), pertencente ao nível 3 de carga, confundiu-se como sendo do nível 4.

Não ficou bem clara a razão porque M2 adota a estratégia de diminuir, gradativamente, a quantidade de água entregue, ao aumentar do nível 4 para valores de maior carga.

A MWHR apresentou resultados excelentes na discriminação de carga. O resultado apresentado na Fig.5.4 corresponde aos testes de validação do algoritmo Whirlpool mencionados no capítulo anterior. A relação entre a massa estimada e a massa real está bem próxima. Essa resolução de estimação deverá agora, ser repassada ao setor de *Fabric Care* que, com os conhecimentos de lavação e essa informação, serão responsáveis por determinar a quantidade de níveis de água mais apropriada para a MWHR.

Fig. 5.4: Resultados de estimação de carga na MWHR



Fonte: Autoria própria

A fim de se possibilitar uma melhor compreensão no que se refere à exatidão e à precisão da estimação de carga realizada pela MWHR, foi realizada uma análise de erros absolutos e relativos. Nesta análise foi possível identificar, em magnitude e porcentagem, onde encontravam-se os maiores erros. Tais análises não constam neste documento por se tratarem de informações sigilosas da empresa.

Uma maneira de tornar a análise da MWHR ainda mais completa e fiel à realidade, poderia ser a adição das fontes de erros conhecidas, de modo a estressar o algoritmo, verificando assim sua robustez, bem como sua precisão e exatidão perante variações na fabricação da máquina e/ou nos diferentes ciclos de operação.

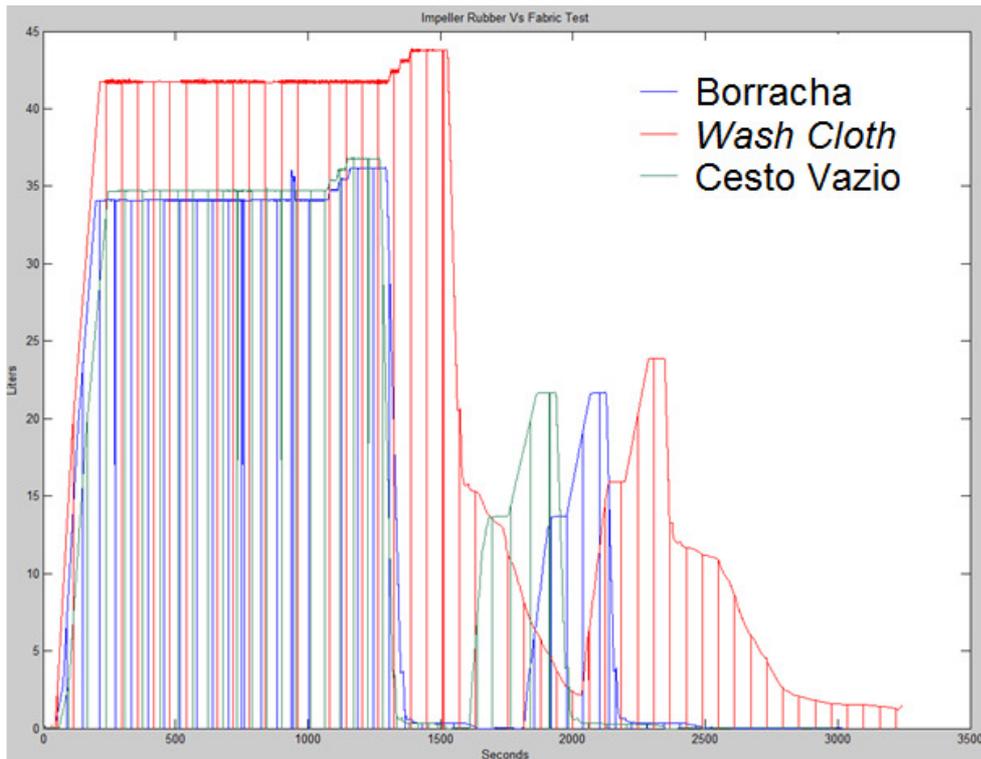
5.1.2. Análise das Estratégias de Estimação de Carga

A presente análise envolveu, além de averiguar a resolução de sua estimação, obter uma boa percepção de como a mesma é realizada em M1 e em M2. Ao analisar a rotina de M2 é possível observar que somente o *impeller* se move, diferentemente das estratégias de estimação adotadas nas MWHR e M1, onde além do *impeller* todo o cesto também é rotacionado.

Um modo de falha de M2 seria, portanto, se a roupa não encostasse no *impeller*. Para verificar a veracidade desta afirmação bastou um simples experimento: Definiu-se uma determinada carga, com a qual foram executadas duas rodadas, com carga distribuída de borracha e com carga normal (*Wash Cloth*). Além destas, efetuou-se uma com o cesto vazio.

Como pode ser observado na Fig.5.5, a quantidade de água despejada no cesto nos casos de carga de borracha e com cesto vazio foram muito semelhantes. Uma maior alteração no volume de água empregada pode ser observada quando é utilizada carga de tecido. Isso ocorreu pois o algoritmo de detecção de carga falhou. Presume-se portanto que a análise seja somente uma estimação empírica que relacione o torque e/ou corrente necessária para fazer com que o *impeller* consiga atingir uma determinada velocidade e a carga no cesto. Outra possível maneira de se efetuar esta estimação poderia ser o fornecimento de uma potência pré-estabelecida seguida de uma análise de quanto rotacionou o *impeller* e, finalmente, uma correlação entre a rotação do *impeller* e a carga no cesto.

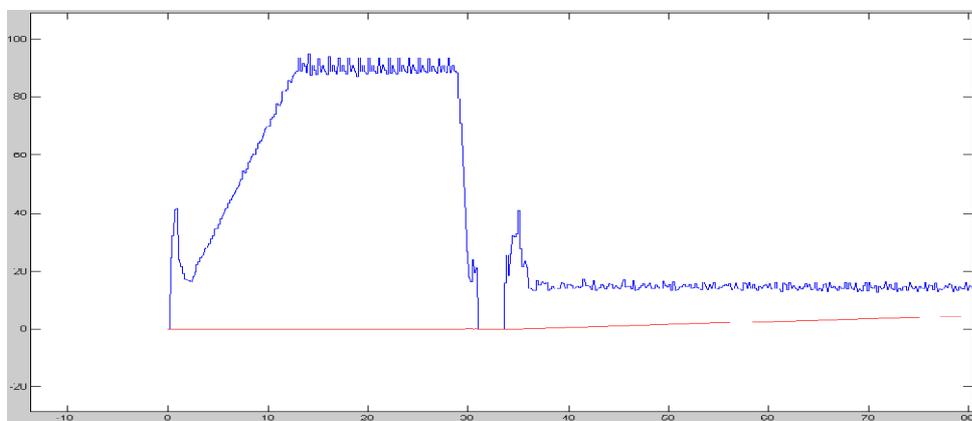
Fig. 5.5: Análise de estimação por *impeller* de M2



Fonte: Autoria própria

A máquina M1, por sua vez, apresentou uma dinâmica diferente em seu modo de estimação. Cesto e *impeller*, rotacionam, simultaneamente, com uma aceleração constante até determinado nível de velocidade. Atingida a velocidade pré-definida, permanecem na mesma por determinado período de tempo. Por fim, terminam o perfil de velocidade (Fig. 5.6), desacelerando até a parada total.

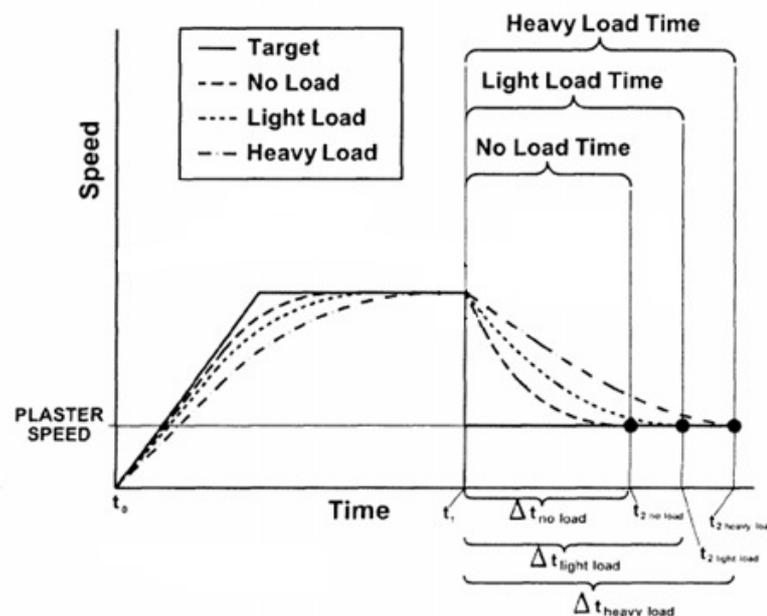
Fig. 5.6: Perfil de velocidade da estimação de carga de M1



Fonte: Autoria própria

A marca General Electric é detentora de uma patente [12], já mencionada no capítulo 4, que aplica uma técnica envolvendo um perfil bem semelhante ao observado em M1 (Fig.5.7). A patente protege um método de estimação de carga onde acelera-se a carga até uma determinada velocidade conhecida. Após determinado período nesta velocidade coloca-se a máquina em "coast down", i.e. desenergiza-se o motor de modo que cesto e impeller desacelerem, sozinhos, até outra velocidade menor e, também, pré-estabelecida. O momento de inércia provocado pela carga dentro do cesto resultará em tempos diferentes de desaceleração. Estes serão traduzidos na quantidade de roupa contida no cesto.

Fig. 5.7: Perfil de velocidade da patente de estimação de carga de M1



Fonte: Internet; Adaptado; < <https://www.google.com/patents/EP2056078A2>> [12]

A metodologia de estimação da MWHR foi apresentada na seção 2.3.5 e, portanto, não será novamente abordada nesta seção.

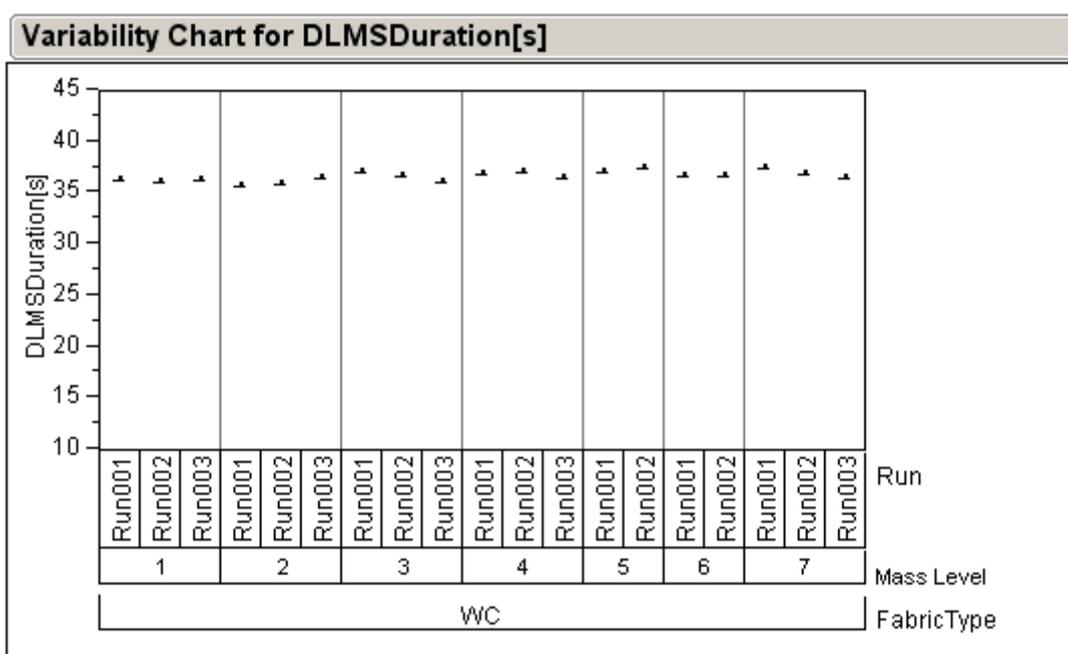
5.1.3. Análise do Tempo de Estimação de Carga

No século XXI, marcado pela rapidez com que ocorrem mudanças e inovações, o tempo de resposta de um produto, mais do que nunca, torna-se uma característica de fundamental importância a ser considerada no desenvolvimento do mesmo. Uma das análises que não poderia ser deixada de fora deste documento é,

portanto, a comparação entre os diferentes tempos de duração de cada um dos métodos de estimação aqui mostrados.

A máquina M1, como visto na análise anterior, possui um perfil de velocidade bem constante, não importando a carga que nela se insere. A previsão, comprovada nesta análise (Fig. 5.8) , é que, mesmo variando-se a carga, a duração da estimação de carga é semelhante. Uma variação de 5% foi calculada entre o tempo mais alto e o mais baixo da árvore de teste, mostrando que em M1 a variação pode ser considerada desprezível. A média encontrada foi de 36.6 segundos.

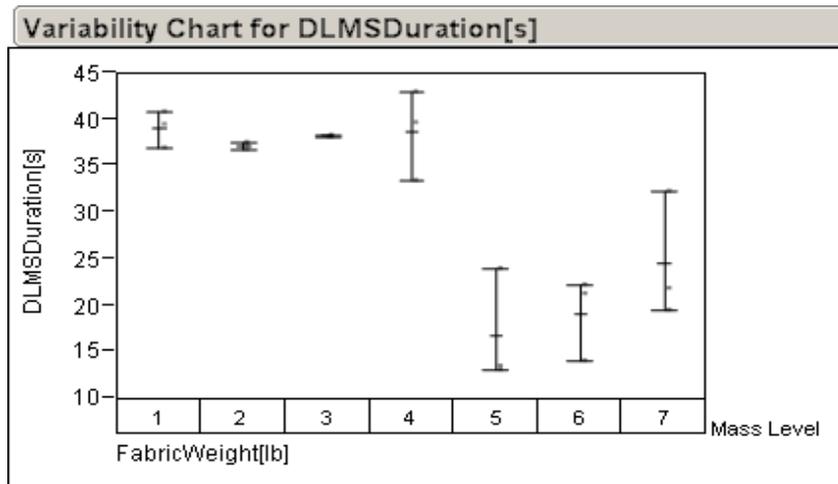
Fig. 5.8: Variação no tempo de estimação de carga de M1



Fonte: Autoria própria

A máquina M2, por sua vez, obteve uma variação maior em seu tempo de estimação, onde a quantidade de carga se mostrou inversamente proporcional à duração da rotina (Fig. 5.9). A chance de um algoritmo que utiliza somente o *impeller* como fonte de informação cometer erros para cargas menores é maior do que os algoritmos encontrado em M1 e na MWHR, onde rotacionam-se cesto e impeller. Sacrifica-se tempo, portanto, de modo que, para cargas menores, a quantidade de amostras seja maior e o erro reduzido.

Fig. 5.9: Variação no tempo de estimação de carga de M2



Fonte: Autoria própria

Rodadas de teste dentro de um mesmo nível de carga mostraram uma variação relativamente grande, e.g. nível 7 variou de 19.5 a 32.3 segundos; mesmo assim, é possível notar que há fortes indícios da existência de um limiar entre os níveis 4 e 5 de carga, que aumenta ou reduz o tempo de estimação. A média, considerando-se todas as execuções, foi de 30.6 segundos. A utilização da média torna-se mais válida para M1 do que para M2, devido ao grande desvio padrão verificado nas execuções de M2.

A MWHR, assim como M1, possui um perfil de velocidade constante de estimação de carga e, sendo assim, a variação também é considerada desprezível. A média do perfil utilizado na MWHR é de 27 segundos. Este tempo é inferior às médias encontradas na M1 e na M2.

5.2. Análise Comparativa de Detecção de Desbalanceamento

Os experimentos objetivando a análise de desbalanceamento foram realizados utilizando somente o ciclo de centrifugação (onde o desbalanceamento normalmente ocorre e é mais crítico) e cargas de borracha, de modo que a repetibilidade destes fosse maior. Como mencionado no capítulo anterior, os fatores que variavam na árvore de testes eram: OBM, OBL, TIR e DW.

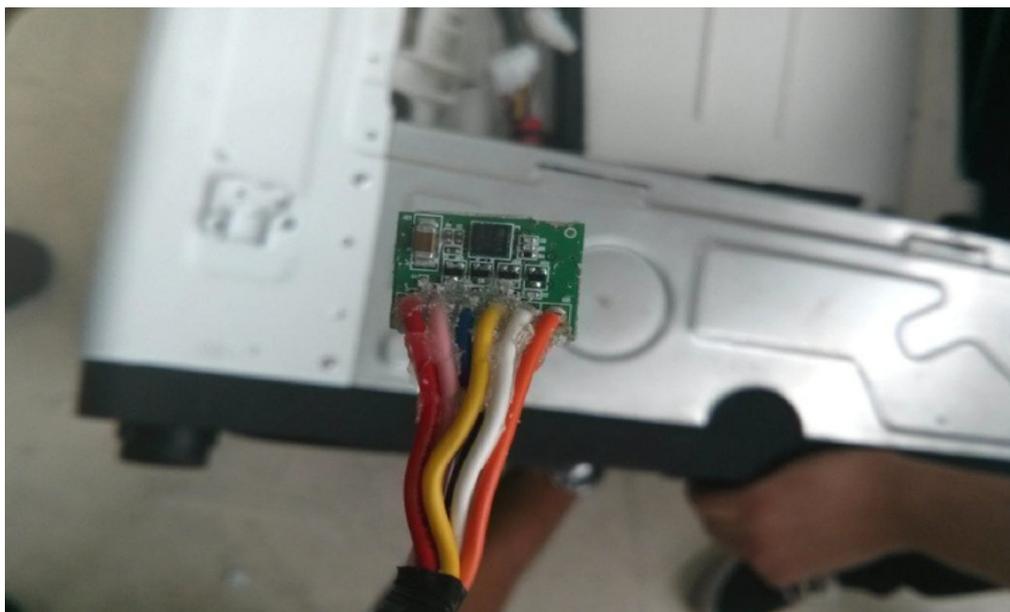
5.2.1. Modo de Detecção de Desbalanceamento

A inferência do modo de detecção de desbalanceamento nas máquinas M1 e M2 é difícil, uma vez que diversas são as variações entre um caso balanceado para um desbalanceado. Sendo assim, inúmeras são as possíveis estratégias de detecção que podem ser adotadas. Outro fator que dificulta a inferência do mesmo é o fato que muitas dessas variáveis afetadas pelo desbalanceamento podem ser obtidas sem a adição de qualquer *hardware* adicional. i.e. em casos onde utilizam-se apenas estimações, não é possível saber exatamente quais métricas e/ou dados são utilizados para identificar a ocorrência de um desbalanceamento.

A análise visada por este documento é, portanto, do modo de operação das máquinas M1 e M2, quando estas detectam o desbalanceamento.

A técnica utilizada por M2, todavia, não é uma estimativa pura, já que a mesma se utiliza de um *hardware* adicional que auxilia na detecção de desbalanceamentos. O *hardware* é um acelerômetro (Fig. 5.10) que foi encontrado na base do cesto. Com este transdutor torna-se muito mais fácil a detecção de desbalanceamento, uma vez que, quando este ocorre, observa-se um deslocamento translacional do cesto. Basta portanto, que seja determinado um limite na aceleração translacional do cesto, onde dados superiores a este representam um desbalanceamento a ser tratado.

Fig. 5.10: Acelerômetro encontrado no cesto de M2



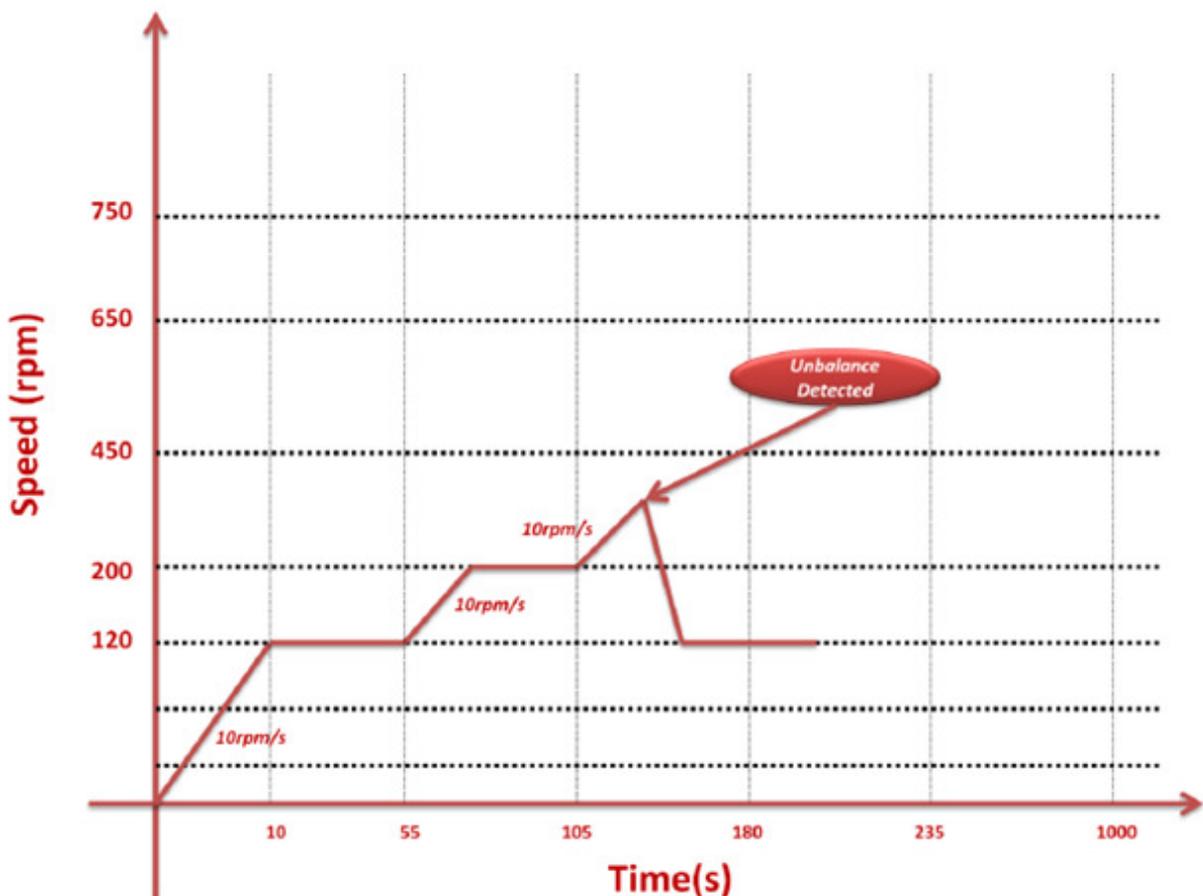
Fonte: Autoria própria

5.2.2. Análise de Modo de Operação

O modo de operação são as ações seguintes à detecção da carga desbalanceada no cesto, normalmente, visando a uma melhor distribuição das cargas. Seu objetivo é fazer com que o ciclo de lavagem possa ser finalizado sem causar danos à máquina e, possivelmente ao consumidor, caso a mesma entre em *walking mode*, i.e. o movimento resultante do desbalanceamento é tão intenso que faz com que a máquina "caminhe".

A máquina M1 adota uma estratégia onde, ao detectar desbalanceamento (Fig 5.11), reduz sua velocidade para um patamar inferior, onde atua por alguns segundos e tenta novamente acelerar para o próximo nível de velocidade do perfil de centrifugação. Esta técnica não envolve nenhum ciclo para correção do desbalanceamento.

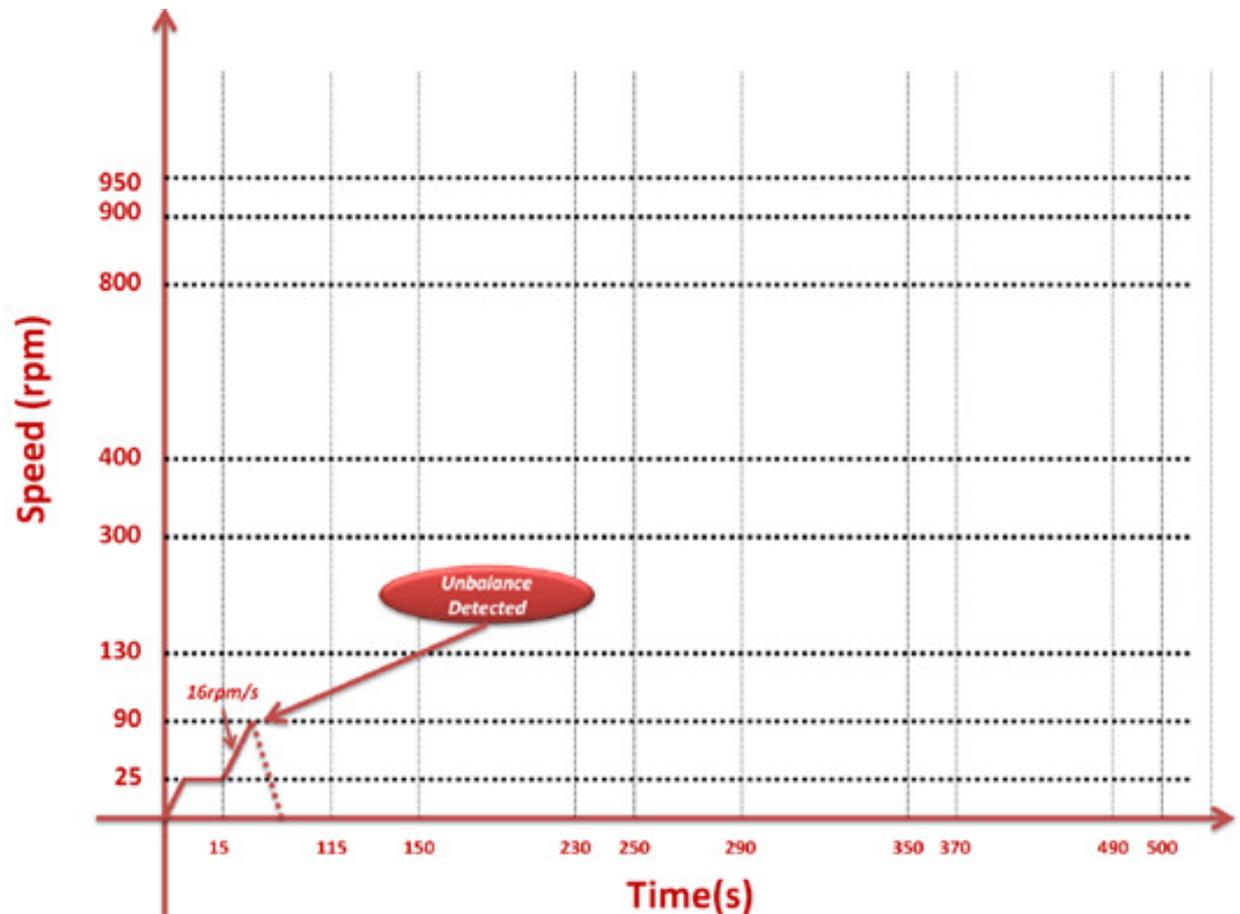
Fig. 5.11: Detecção de desbalanceamento em M1



Fonte: Autoria própria

A máquina M2, por sua vez, ao sensoriar um desbalanceamento (Fig. 5.12), reduz sua velocidade a zero, começa um novo ciclo de enchimento, utiliza o impeller para tentar redistribuir as cargas presentes no cesto, realiza a extração da água e busca novamente realizar a centrifugação.

Fig. 5.12: Detecção de desbalanceamento em M2



Fonte: Autoria própria

A MWHR ainda é uma plataforma em desenvolvimento e, portanto, ainda não foi definido o tratamento correto para a detecção de desbalanceamento, mas é provável que envolva um ciclo de correção semelhante ao utilizado em M2.

6. Conclusões e Perspectivas Futuras

Uma análise comparativa com marcas competidoras é sempre importante. O conhecimento de como seus competidores atendem, ou pretendem atender, o mercado auxilia o direcionamento das estratégias a serem adotadas pela empresa. A análise comparativa, relatada neste documento, demonstrou que a MWHR, tanto para estimação de carga quanto para tratamento de desbalanceamento, é, nesses itens, competitiva e até superior à dos concorrentes aqui considerados.

Em projetos futuros, novas métricas e variáveis respostas podem ser avaliadas nas máquinas M1 e M2. Desta maneira, outros tipos de sensoriamento e técnicas de estimação podem ser também avaliados. Outra possível abordagem seria a avaliação das mesmas métricas em máquinas de outros fabricantes, uma vez que competidores reconhecidamente competentes não tiveram suas máquinas examinadas neste trabalho, por limitação financeira e temporal do projeto.

A análise comparativa também ajudou a avaliar os problemas de estimação de carga e de desbalanceamento com perspectivas diferentes, o que agrega novas idéias à própria metodologia Whirlpool de resolver tais questões. De acordo com Spendolini: *“O benchmarking é um excelente exercício de quebra de barreiras e de estímulo à visão ampla, que respeita e considera o externo. Aprender a pensar para fora da caixa, por intermédio dessa tecnologia, é promover o fortalecimento do espírito sistêmico e da capacidade de enxergar para além do horizonte.”* (SPENDOLINI apud ARAUJO, 2001) [21].

O trabalho desenvolvido na Whirlpool mostrou-se importante seja tanto do ponto de vista profissional quanto, pessoal. A empresa possibilitou aos colaboradores deste projeto excelente oportunidade de aprendizagem sobretudo nos seguintes campos:

- Lean para *Project Development*;
- Boas práticas de organização pessoal;
- Novos *softwares*;
- Desenvolvimento de análise crítica;
- Aplicação prática de conhecimentos adquiridos durante o curso de graduação em Engenharia de Controle e Automação.

Isto mais que justifica constituir-se, o presente trabalho, num PFC.

7. Referências Bibliográficas

- [1] "**Our History**" Disponível em:
<<http://www.whirlpoolcorp.com/about/history.aspx>>; Acessado em Janeiro de 2014.
- [2] "**Whirlpool é Campeã Brasileira em Patentes**" ; Disponível em:
<http://www.fapesc.sc.gov.br/index.php?option=com_content&view=article&id=1095:0401-whirlpool-e-campea-brasileira-em-patentes&catid=8:noticias&Itemid=20>;
Acessado em Janeiro de 2014.
- [3] "**Sobre a Whirlpool**" ; Disponível em:
<<http://www.whirlpool.com.br/SobreWhirlpool/>>; Acessado em Janeiro de 2014.
- [4] SLACK, N. "**Vantagem competitiva em manufatura**". São Paulo: ed. Atlas, 1993.
- [5] "**Top Loading Washing Machines Ratings**"; Disponível em:
<<http://www.consumerreports.org/cro/appliances/laundry-and-cleaning/washing-machines/top-loading-washing-machine-ratings/ratings-overview.htm>>; Acessado em Janeiro de 2014.
- [6] Albertazzi Gonçalves Jr, A. "**Apostila Metrologia Parte I - 2004**". Laboratório de Metrologia e Automatização - UFSC; Disponível em:
<http://www.demec.ufmg.br/disciplinas/ema092/Documentos/APOSTILA_PARTE_I.pdf> ; Acessado em Janeiro de 2014.
- [7] Lichuan Liu; Kuo, S. M.; Zhou, M. "**Virtual sensing techniques and their applications**". *2009 International Conference on Networking, Sensing and Control*. ISBN 978-1-4244-3491-6
- [8] "**Washing Machine and Laundry Amount Detection Device Thereof**" ; Disponível em: <<https://www.google.com/patents/EP2322705A1>> ; Acessado em Fevereiro de 2014.
- [9] CASAGRANDE, S. "**Washing machine with improved sensor for load weight**", disponível em <<http://www.google.com/patents/EP1988206A1?cl=en>>. Acessado em Janeiro de 2013.
- [10] Oliveira, F. E. de. "**Desenvolvimento de rotinas de sensoriamento indireto para automação de ciclo de lavadoras de roupas**". 2013; UFSC.

[11] Silva, G. B. T. da. "**Mecanismo de detecção de desbalanceamento para lavadoras de eixo vertical**". 2013; UFSC.

[12] "**Load measuring apparatus and method**"; Disponível em: <<https://www.google.com/patents/EP2056078A2>>; Acessado em Fevereiro de 2014.

[13] "**Manual de Instruções - Brastemp**" ; Disponível em: <http://www.brastemp.com.br/documentos/brastemp/bwc06abana/bwc06a_manual.pdf>; Acessado em Fevereiro de 2014.

[14] Tennant, Geoff. "**Six Sigma: SPC and TQM in Manufacturing and Services**". 2001; Gower Publishing, Ltd. ISBN 0-566-08374-4.

[15] "**Whirlpool - Operational Excellence**"; Disponível em: <<http://www.isixsigma.com/industries/computers-electronics/whirlpool-operational-excellence/>>; Acessado em Fevereiro de 2014.

[16] "**Imprensa - Whirlpool recebe prêmio de Melhor Projeto Lean Seis Sigma**"; Disponível em: <<http://www.whirlpool.com.br/Imprensa/EntryId/755/Whirlpool-recebe-premio-de-Melhor-Projeto-Lean-Seis-Sigma>> ; Acessado em Fevereiro de 2014.

[17] "**Diagrama de Dispersão**" ; Disponível em: <<http://www.auctus.com.br/diagrama-de-dispersao/>> ; Acessado em Fevereiro de 2014.

[18] Guerios, B.E. "**Adaptação e Melhoria em Algoritmo de Estimção de Carga para Lavadora de Roupas**", 2013; UFSC.

[19] Ian Cox; Marie A. Gaudard; Philip J. Ramsey; Mia L. Stephens, Leo Wright. "**Visual Six Sigma: Making Data Analysis Lean**". 2009; John Wiley & Sons. ISBN 978-0-470-50691-2.

[20] "**Motores Síncronos - Velocidade Síncrona**" ; Disponível em: <<http://ecatalog.weg.net/files/wegnet/WEG-motores-sincronos-artigo-tecnico-portugues-br.PDF>>; Acessado em Fevereiro de 2014.

[21] ARAUJO, Luis César G. de. "**Organização, Sistemas e Métodos e as Tecnologias de Gestão Organizacional**". 2001; São Paulo, ed. Atlas.

Anexo 1: Seis-Sigma e Organização na Whirlpool

O presente anexo tem por objetivo apresentar algumas das técnicas de organização adotadas pela Whirlpool, empresa que, para muitos, é exemplo em boas práticas de técnicas Seis-Sigma.

- **Armário e Ferramentas com Identificação:**

Relembrando a descrição do grupo de sensoriamento, feita em 1.4, o ambiente onde este projeto foi desenvolvido, apresentava 3 equipes distintas: *Motor Control*, *Motor Strategy* e *Control & Electronics*. Cada uma destas equipes dispunha de suas próprias ferramentas. A técnica para discriminá-las foi a utilização de armários com cores diferentes para cada time, bem como a identificação de cada ferramenta com uma fita adesiva na cor correspondente. (Fig. A1.1).

Fig. A1.1: Ferramentas e armário com identificação correspondente



Fonte: Autoria própria

- **Quadro de Sombras:**

A estratégia para o controle de uso de ferramentas envolvia, na ferramentaria, o uso de um quadro de sombras (Fig.A1.2). Desta forma, facilita-se sua localização, bem como a percepção de quando a mesma está em uso.

Fig.A1.2: Quadro de sombras



Fonte: Autoria própria

- **Delimitações Visuais:**

No centro de pesquisa da Whirlpool, onde atua o grupo de sensoriamento, encontram-se inúmeros produtos como objetos de estudo. Torna-se necessário, portanto, uma logística para a manutenção da organização de tais produtos. Com este objetivo, destinou-se um local apropriado onde, para cada categoria de produtos, demarcou-se uma área específica, conforme pode-se observar na Fig.A1.3.

Fig.A1.3: Delimitações visuais



Fonte: Autoria própria

- **Quadro de Estrelas:**

Outra técnica adotada pela empresa para manter os laboratórios sempre organizados é o Quadro de Estrelas (Fig. A1.4) . O quadro consiste no nome de cada integrante da equipe e, ao lado do nome, 5 estrelas. Para cada área do laboratório foi designado um responsável. Sempre que um colaborador não mantém a respectiva organização nas bancadas, não guarda as ferramentas ou deixa qualquer desordem ao final da execução de seu trabalho, é advertido pelo responsável da área. Após a terceira advertência uma estrela é removida de seu nome no Quadro de Estrelas. A quantidade de estrelas tem influência direta no bônus anual de cada colaborador motivando-o, desta forma, a evitar a perda de estrelas.

Fig. A1.4: Quadro de estrelas

(A figura foi desfocada de modo a preservar o anonimato dos colaboradores)



Fonte: Autoria própria