

Análise de Robustez em Algoritmo de Estimação de Carga para Lavadora de Roupas

*Relatório submetido à Universidade Federal de Santa Catarina
como requisito para a aprovação na disciplina
DAS 5511: Projeto de Fim de Curso*

Luiz Fernando de Amorim Jollembeck

Florianópolis, Julho de 2014

**Análise de Robustez em Algoritmo de Estimação de Carga para
Lavadora de Roupas**

Luiz Fernando de Amorim Jollebeck

Esta monografia foi julgada no contexto da disciplina
DAS5511: Projeto de Fim de Curso
e aprovada na sua forma final pelo
Curso de Engenharia de Controle e Automação

Prof. *Marcelo Ricardo Stemmer*

Assinatura do Orientador

Banca Examinadora:

Maurilio Fabio Rodrigues Catharino
Orientador na Empresa

Prof. Marcelo Ricardo Stemmer
Orientador no Curso

Prof. <nome do professor avaliador>
Avaliador

<nome aluno 1>
<nome aluno 2>
Debatedores

Agradecimentos

Muitas pessoas passaram pelo meu caminho, dando suas opiniões e reflexões, valores e sentidos para a vida. Cada uma delas faz parte daquilo que me formou, seja com a concordância de ideias, introdução de conceitos, ou à mera, mas importante, instigação ao questionamento. Infelizmente não é possível citar todos individualmente, mas saibam que fazem parte de mim.

Agradeço aos meus professores de séries iniciais, por me mostrarem a importância do conhecimento e aceitarem a difícil tarefa de manter crianças concentradas durante tantas horas. Aos professores do ensino médio, pela paciência e vontade de ensinar, pela paixão que demonstraram e que me fez rumar para a engenharia. Também, àqueles que aceitaram nos ensinar na universidade, em um período tão complicado de nossas vidas, onde fazemos, de forma confusa, a transição de adolescentes para adultos. Obrigado pelo empenho em ensinar e passar adiante o tão importante conhecimento em Engenharia de Controle e Automação, fornecendo uma base sólida para nossas futuras carreiras profissionais e, se tudo der certo, para um país melhor.

Ao gestor e orientador de estágio na Whirlpool, Maurilio Catharino, pela oportunidade única de desenvolver minhas habilidades profissionais em empresa de tal porte, além do suporte nas atividades e aprendizado proporcionado. Estendo estes agradecimentos também a todos os colegas de trabalho, pelo auxílio quando necessário e por me acolherem de forma tão boa.

Aos meus amigos, que, durante estes longos anos, enfrentaram minhas oscilações de humor, causadas pelas ainda mais oscilantes notas. Obrigado por estarem presentes, compartilhando momentos de alegria e aliviando o stress, permitindo-me manter a sanidade.

Aos meus pais e familiares, por me suportarem durante tantos anos! Obrigado pelo amor e carinho, paciência, compreensão e apoio. Obrigado pela educação, e por priorizarem meu estudo sobre todas as coisas. Obrigado por serem os maiores responsáveis pela existência deste documento. Obrigado pela oportunidade de seguir os meus sonhos. Obrigado.

Resumo

A Whirlpool, maior fabricante mundial de eletrodomésticos, faz parte de um mercado extremamente competitivo. A constante inovação, marca característica da empresa, é importante para a manutenção de sua posição no mercado. O desenvolvimento de novas tecnologias visa, assim, equilibrar a implementação de funcionalidades sem o aumento do custo. O algoritmo analisado, chamado A-Profile, permite à máquina de lavar roupas a detecção da massa de carga inserida pelo operador sem a necessidade de sensores, evitando assim o aumento do custo do produto. Devido à característica de produção em massa, sendo distribuídos para diversos países, é importante a verificação da robustez de forma a garantir um mínimo de probabilidade de falhas. Alguns testes foram realizados neste sentido, tratando fatores ambientais, variação de produto para produto, forma de uso e influência do operador. Foram verificados resultados bastante satisfatórios, dentro do esperado e que possibilitam a aprovação do algoritmo para a fase de produção.

Abstract

Whirlpool, world's largest home appliances manufacturer, takes part in an extremely competitive market. Constant innovation, the company's flagship, is important for the maintenance of its market position. The development of new technologies aims to balance the implementation of functionalities without increasing the costs. The analyzed algorithm, named A-Profile, allows the washing machine to sense the load mass inserted by the operator without the need of sensors, thus avoiding an increase on the products' cost. Due to the characteristic of mass production, being distributed to many countries, it's important to verify the robustness in order to guarantee a minimum probability of failures. Some tests were performed regarding this matter, involving environmental factors, product to product variation, use cases and operator's influence. Very satisfying results were obtained, within the expected and allowing the approval of the algorithm for the production phase.

Sumário

Agradecimentos	4
Resumo	5
Abstract	6
Sumário	7
Capítulo 1: Introdução	9
1.1: Definição Geral do Problema	9
1.2: Justificativa	10
1.3: Objetivo Geral.....	10
1.4: Objetivos Específicos	10
1.5: Estrutura do Documento.....	10
Capítulo 2: A Whirlpool e as Circunstâncias do Problema	12
2.1: A Whirlpool Corporation	12
2.2: O Desenvolvimento do Trabalho	13
2.3: Contexto do Mercado	13
2.4: O Problema	14
Capítulo 3: Fundamentação Teórica	16
3.1: Determinação da Massa da Carga de Roupas.....	16
3.2: Técnicas de Determinação da Massa	16
3.2.1: Técnicas com Sensores	16
3.2.2: Técnicas sem Sensores	18
3.2.3: O Algoritmo de A-Profile.....	22
3.2.4: A Conversão Inércia - Massa	25
Capítulo 4: Ferramentas Utilizadas	26

4.1: A Metodologia Seis Sigma	26
4.1.1: Ciclo PDSA	27
4.1.2: Gráfico de Variabilidade	27
4.1.3: <i>Design of Experiment</i> (DOE)	28
4.2: Aquisição, Tratamento e Análise dos Dados	29
4.2.1: Itool	29
4.2.2: Beagle	30
4.2.3: JMP	30
Capítulo 5: Desenvolvimento	31
5.1: Teste Geral de Robustez	31
5.1.1: As Variáveis Testadas	31
5.1.2: Programação dos Testes	33
5.2: Curva de Calibração	35
5.3: Robustez à Forma de Carregamento	36
5.3.1: Planejamento dos Experimentos	38
Capítulo 6: Resultados	40
6.1: Teste Geral de Robustez	40
6.2: Curva de Calibração	45
6.3: Robustez à Forma de Carregamento	46
Capítulo 7: Conclusões e Perspectivas	50
Capítulo 8: Bibliografia	51

Capítulo 1: Introdução

O mercado de eletrodomésticos tem grande volatilidade e vem recebendo grande atenção por parte de gigantes do mercado mundial. Empresas que anteriormente tinham seus focos voltados apenas para bens como televisões ou aparelhos de som, agora buscam também abranger a fatia pertencente à linha branca, onde a Whirlpool se destaca e é tida como líder mundial.

Esta incursão vinda de concorrentes de peso, aliada à súbita alta na concorrência de empresas chinesas, que vêm inundando o mercado mundial com produtos extremamente baratos, traz consigo uma bandeira vermelha para aqueles que pretendem se manter líderes. A inovação, estratégia a qual a Whirlpool ostenta com orgulho, se demonstra cada vez mais essencial para a manutenção de sua posição no mercado, permitindo que seus produtos tenham sempre alguma forma de liderança, seja ela no preço ou na qualidade.

Conforme as tecnologias avançam e a concorrência aumenta, no entanto, fica cada vez mais difícil criar uma forma real de diferenciação. Não apenas fazer um produto inovador e criativo, mas fazer com que o consumidor note e entenda que se trata de um produto diferenciado.

Exalta-se, então, o objetivo maior dos consumidores ao realizarem uma compra de eletrodomésticos da linha branca, especialmente máquinas de lavar roupa, foco deste trabalho: conforto, praticidade e eficiência. O desenvolvimento das tecnologias para estes produtos focam, então, na solução de problemas visando atingir a percepção dos compradores nestes objetivos.

1.1: Definição Geral do Problema

Uma forma de atingir de maneira perceptível os usuários de máquinas de lavar é criar mecanismos que visem a redução da necessidade de atuação daqueles nas definições de funcionamento do produto. Isto é, quanto mais autônoma for a máquina, melhor.

Uma forma encontrada de reduzir o fator usuário no desempenho das máquinas de lavar é a implementação de métodos que possibilitem a mensuração ou estimativa do peso da roupa nela colocada. Desta forma é possível calcular a quantidade de sabão e água a ser usada no ciclo sem (ou com o mínimo de) inserção de parâmetros pelo usuário.

1.2: Justificativa

Os produtos produzidos pela Whirlpool são feitos em grande escala, chegando à marca de dezenas de milhares por dia. Não apenas seus componentes podem sofrer variações por razões diversas, mas estes ainda serão distribuídos para usuários espalhados pelo planeta, de forma que o produto deve ser capaz de realizar suas funções sob as mais variadas condições de operação.

Desta forma, qualquer tecnologia implementada deve ser ostensivamente testada e sua robustez comprovada para qualquer dos fatores supracitados, garantindo aos usuários qualidade e satisfação.

1.3: Objetivo Geral

Determinar a robustez do algoritmo de estimativa de carga uma plataforma de lavadoras de roupa de eixo vertical da Whirlpool.

1.4: Objetivos Específicos

- Determinar possíveis modos de falha do algoritmo;
- Criar testes que simulem as situações dos modos de falha;
- Analisar os resultados dos testes;
- Sugerir soluções para os modos de falha.

1.5: Estrutura do Documento

O capítulo 2 introduz o contexto do problema, trazendo informações a respeito de sua importância para empresa, como este pode ajudá-la a alcançar suas

metas, onde o trabalho foi desenvolvido, além de apresentar formalmente o problema.

O capítulo 3 apresenta alguns métodos já existentes de detecção de carga, diferenciando técnicas com e sem sensores, e introduzindo também o algoritmo proposto.

No capítulo 4 são expostas as ferramentas gerenciais e de projeto utilizadas no trabalho, bem como programas que auxiliaram no desenvolvimento, tratamento e análise dos dados.

O capítulo 5 explana cada um dos testes feitos, entrando em detalhes a respeito de seus planejamento e motivação, para que seus resultados sejam então explorados no capítulo 6.

.

Capítulo 2: A Whirlpool e as Circunstâncias do Problema

Este capítulo tem como objetivo a apresentação da empresa na qual o trabalho foi desenvolvido, possibilitando assim a posterior exposição do problema tema do trabalho, contextualizando-o com o escopo da organização.

2.1: A Whirlpool Corporation

A Whirlpool Corporation foi fundada em Michigan, nos EUA, em 1911, sob o nome de Upton Machine Company. Seu produto inicial era uma máquina de lavar roupas com motor, até então inexistente. Teve seu nome mudado em 1929 para Nineteen Hundred Corporation após sua união com a Nineteen Hundred Washer Company, e passou a chamar-se Whirlpool Corporation apenas em 1950. Durante a segunda metade do século adquiriu ainda diversas outras marcas, entre elas a KitchenAid, a qual mantém até hoje.

É atualmente a maior fabricante de eletrodomésticos de linha branca do mundo, atuando fortemente na América, Europa e Oriente Médio. Tem expandido sua participação também no continente asiático, onde recentemente adquiriu a Hefei Sanyo, como um passo importante para sua inserção definitiva neste cenário.

Conta atualmente com 66 centros de fabricação e pesquisa espalhados pelo planeta, nos quais trabalham cerca de 68 mil pessoas. Suas marcas incluem Whirlpool, Maytag, KitchenAid, Bauknecht, entre outras.

Está presente na América Latina por meio da Whirlpool Latin America, que possui escritórios na Argentina, Chile, Colômbia, Equador, Guatemala, Peru, Porto Rico e República Dominicana, além do Brasil. Aqui, adquiriu há menos de duas décadas a Embraco, e logo depois a Multibrás, responsável pelas marcas Brastemp e Consul, e trazendo também a marca KitchenAid. Tornou-se, então, a maior fabricante de eletrodomésticos do país.

Suas unidades brasileiras são, atualmente, 3 fábricas – Rio Claro, Joinville e Manaus -, 1 escritório administrativo – São Paulo, 4 centros de tecnologia – 3 em

Joinville e 1 em Rio Claro - e 2 centros de distribuição – São Paulo e Jaboatão dos Guararapes.

2.2: O Desenvolvimento do Trabalho

O presente trabalho envolve pesquisa e aplicação relacionada diretamente a lavadoras de roupa. A unidade de pesquisa da Whirlpool Latin America que lida com este tipo de produto é localizada em Rio Claro. Entretanto, existe um pequeno centro de pesquisa em *Cross Product* localizado em Joinville cujas aplicações são direcionadas ao mercado internacional, sendo realizado ali o desenvolvimento de tecnologias para diversas áreas, especialmente lavadoras de roupa.

O centro conta com três áreas principais, sendo elas *Motor Strategy*, *Motor Control* e *Controls & Sensing*. A última é responsável por desenvolvimentos na área de algoritmos, sensoriamento, instrumentação e controle de sistemas, sendo o setor no qual este trabalho foi desenvolvido.

2.3: Contexto do Mercado

Conforme mais empresas entram no mercado e aumentam a concorrência, torna-se cada vez mais difícil manter sua participação ou aumentá-la. Não existe, no entanto, empresa que aceite perder mercado facilmente, uma vez que isto impacta diretamente a receita e, conseqüentemente, o lucro. O desafio de manter-se competitiva e ser considerada como a melhor marca pelo consumidor exige muito esforço por parte de setores de marketing, mas, acima de tudo, pelos de criação e tecnologia.

É essencial que haja constante inovação e criação de valor para cada um dos produtos, e o mercado de máquinas de lavar não é diferente. Por mais que pareça simples, lavar roupa pode ser uma tarefa complexa, envolvendo diversos fatores que, em um primeiro momento, são transparentes para o consumidor.

Pode-se dizer que as métricas mais facilmente notadas são o tempo de lavação e, claro, a qualidade da mesma. Há ainda a facilidade de operação da máquina, que deve ser capaz de lavar com eficiência sem que o consumidor se

perca em centenas de opções. Existem ainda fatores bastante relevantes que podem ser muitas vezes difíceis de observar, como a quantidade de água e sabão usada, ou a eficiência energética do produto.

Para facilitar a vida do consumidor, então, existem diversas agências reguladoras e órgãos que se dedicam a observar aqueles fatores que, em uma residência, não são facilmente diferenciáveis, além de realizarem testes padronizados de qualidade de lavagem. São exemplos a Consumers Union, além de sites na internet como consumerreports.org e washingmachinereview.com.

Com consumidores cada vez mais exigentes e a crescente exposição a este tipo de informação, torna-se indispensável que todos os fatores de diferenciação sejam abraçados, tentando reduzir os *trade off* e aumentando as vantagens dos seus produtos, mantendo ainda o menor custo possível.

2.4: O Problema

É neste ponto que entra o algoritmo aqui estudado. A identificação da carga de roupa inserida em uma máquina permite que o próprio equipamento calcule a quantidade de água e sabão a ser utilizado, definindo ainda o melhor tipo de ciclo exigido para manter uma boa relação entre qualidade e eficiência, além de poder reduzir ou aumentar o tempo de ciclo conforme a carga.

Este tipo de identificação pode ser feita de diversas formas, sendo a mais simples dela por meio de sensoriamento. Além de intuitiva, tende a ser robusta e confiável. Entretanto, trata-se de bens de consumo produzidos em alta escala. A colocação de um sensor em uma máquina pode parecer simples, mas em milhares o efeito é outro. Além de gastar mais material, uma vez que o sensor provavelmente exigirá algum tipo de mudança na estrutura do produto, temos o custo do próprio produto em si e o tempo perdido na linha de produção para a inserção do mesmo. Alguns segundos por máquina não são muito para um produto, mas, ao fim do dia, estes podem ser suficientes para diminuir a produção em algumas dezenas. Ainda, a introdução de mais um elemento, o sensor, acrescenta à possibilidade de falhas, uma vez que este também deve se manter funcional enquanto o produto estiver em funcionamento.

Surge, então, a ideia da estimação de carga. O conceito é o mesmo: identificar o peso da roupa para definir as configurações de lavação. No entanto, ao invés de exigir um sensor, o peso é estimado através de parâmetros do motor, medidos durante uma rotina pré-definida.

O desenvolvimento e implementação de um algoritmo como esse, no entanto, não é simples. Modos de falha podem surgir de possíveis pontos não explorados anteriormente, ou explorados de forma insuficiente, sendo necessário estar preparado para solucioná-los. A unidade na qual o algoritmo foi desenvolvido visa a criação de novas tecnologias para o mercado norte-americano, mas que, pelas próprias características globais da empresa, tendem a ser implementados em produtos que serão vendidos em diversos países no futuro. Desta forma, exige-se que toda e qualquer inovação seja robusta aos mais variados fatores, como a temperatura e forma de operação, além das próprias diferenças entre um produto e outro (ainda que do mesmo modelo).

Isto posto, uma análise mais elaborada da robustez é essencial para que o produto possa ser colocado no mercado com a garantia de qualidade e confiança que a marca Whirlpool passa para seus clientes.

Capítulo 3: Fundamentação Teórica

3.1: Determinação da Massa da Carga de Roupas

A necessidade de se medir ou estimar a carga de roupas colocada em uma máquina de lavar não é recente. A qualidade e funcionalidade agregada que tal fator gera para o cliente é bastante considerável, de forma que pesquisas foram realizadas em razoável escala para que fosse possível sua inserção no mercado.

Diversas empresas já possuem produtos com esta funcionalidade, trazendo ao mercado um desafio constante de melhorar seus métodos, seja cortando custos, aumentando a qualidade do produto, ou, preferencialmente, ambos.

Conforme explicitado anteriormente, existem duas maneiras gerais de se determinar a massa da carga. A primeira é através de sensores, inserindo um novo hardware no sistema capaz de indicar, direta ou indiretamente, o resultado. A segunda, que vem sendo preferida pelas empresas devido à não necessidade de hardware adicional, é a estimação por parâmetros do sistema, na qual dados já conhecidos são utilizados para a determinação da massa.

3.2: Técnicas de Determinação da Massa

Com ou sem sensores, diferentes formas de alcançar um bom resultado podem ser encontradas. Aqui serão mostradas técnicas já utilizadas, explicando-as sucintamente.

3.2.1: Técnicas com Sensores

Apesar de, intuitivamente, imaginar-se que estas técnicas utilizariam diretamente sensores de carga, a criatividade fala mais alto e é possível notar sensores diversos para a realização desta tarefa, conforme exposto a seguir.

3.2.1.1: Célula de Carga

A célula de carga é a alternativa mais óbvia. Quando se pretende determinar a massa, a primeira solução prática é a colocação de um sensor que nos forneça exatamente aquilo que queremos, sem a necessidade de maiores ponderações. Trata-se de uma tecnologia que permite a obtenção de rápidos e precisos resultados, com o maior ponto negativo sendo o aumento do custo do produto. A tarefa de desenvolver e adquirir resultados robustos, no entanto, é surpreendentemente complexa, por fatores diversos.

3.2.1.2: Sensor de Posição

A estimação por sensor de posição é feita baseada em uma lógica bastante simples: de acordo com o peso da roupa colocada na máquina, os amortecedores do cesto irão ceder, permitindo um deslocamento.

Através do conhecimento do posicionamento inicial e final, além das propriedades dos amortecedores e sua relação com o movimento realizado, é possível então o cálculo da massa.

Esta é outra alternativa consideravelmente simples e cuja resposta é bastante rápida. Entretanto, devido à necessidade de um conhecimento maior do sistema e suas propriedades, pode acabar gerando erros não esperados. Ainda, possíveis mudanças nas características do produto que façam com que a dinâmica do cesto em relação a sua massa seja alterada pode causar falhas ou ser uma possível fonte de erros.

3.2.1.3: Extensômetro

O princípio da utilização do extensômetro é parecido com o do sensor de posição. Sabendo que existe uma movimentação no cesto causada pelo fato de termos os amortecedores cedendo conforme a carga é colocada, pode-se determinar o que foi inserido através de cálculos que relacionam a mesma com o deslocamento total do cesto.

Para que seu funcionamento seja bem sucedido, é necessário que o extensômetro seja estrategicamente posicionado. Normalmente é colocado junto aos amortecedores, podendo ler perfeitamente sua compressão e fornecendo resultados mais precisos.

Assim como os outros métodos por sensoriamento, este é capaz de alcançar o resultado final de forma bastante rápida. Entretanto, possui o mesmo problema do sensor de posição, onde o conhecimento do sistema deve ser pleno e alterações no produto durante sua vida útil podem afetar a qualidade do resultado.

3.2.2: Técnicas sem Sensores

Apesar de ser perfeitamente possível e aplicável mantermos um sensor específico para esta tarefa, o fator custo entra em ação e faz com que a criatividade seja ainda mais exigida. Manter o custo do produto baixo garantindo as mesmas funcionalidades é um grande passo perante a concorrência, de forma que as empresas, então, voltaram-se para métodos sem sensores.

Estas técnicas, no entanto, não possuem somente vantagens. Conforme citado, sensores possibilitam resultado rápido, enquanto estimativas baseadas em outros parâmetros causam aumento no tempo de ciclo.

Para evitar o alongamento desnecessário desta seção, serão expostos aqui apenas métodos para máquinas de eixo vertical, conforme o modelo no qual o trabalho foi desenvolvido.

3.2.2.1: Rotação do *Impeller*

O *Impeller* é um disco localizado no centro do cesto que possui pequenas protuberâncias em formato de hélice. Possui como função principal fazer a agitação da roupa durante a lavagem. Para tal, este é ligado a um sistema que o acopla/desacopla do resto do cesto, possibilitando que gire solto, sem a necessidade de fazer o motor girar toda a inércia de cesto e roupas.

Vem sendo preferido pelas fabricantes em modelos mais recentes por danificar menos as roupas, uma vez que o contato físico das mesmas é praticamente apenas

com a água, sem perda significativa na qualidade de lavagem. Ainda, devido ao seu formato menos invasivo, permite que maiores cargas sejam colocadas em cestos do mesmo tamanho.

Sua utilização como forma de determinar a quantidade de carga inserida é baseada em um princípio simples: quanto maior a dificuldade em girá-lo, maior a massa. Desta forma, o método consiste em fazer pequenas rotações, obtendo o torque necessário para realizá-las. Um equacionamento pode então ser feito relacionando o torque com a massa, permitindo assim a determinação da massa de roupa colocada no cesto.

Sua principal desvantagem é o fato de que a rotação apenas do *impeller* pode causar leituras errôneas. Isto, pois dependendo de como a carga for alocada, uma parte dela pode estar em contato apenas com o restante do cesto, fazendo com que o *impeller* gire mais facilmente e gerando resposta indesejada.

3.2.2.2: Tempo de Parada

O método de tempo de parada é baseado na primeira lei de Newton, ou princípio da inércia. De uma forma simplificada, sabe-se que objetos com maior massa tendem a exigir maior força para reduzir seu movimento em um tempo determinado, ou a aplicação por mais tempo de uma força determinada para atingir a velocidade zero.

No contexto das máquinas de lavar, isso significa que, retirando-se completamente o torque quando atingida certa velocidade, um cesto levará um tempo maior ou menor para atingir velocidade zero dependendo da quantidade de carga dentro dele.

Um método patenteado pela General Electrics envolve exatamente esta ideia. Nele, o cesto é acelerado até uma velocidade determinada aqui chamada X, quando então o torque do motor é reduzido. O tempo que o cesto leva para chegar até uma outra velocidade padrão, aqui chamada Y, sendo Y menor que X, é então considerado e, a partir de equacionamentos, é possível determinar a massa de roupa.

A principal desvantagem deste método é a necessidade de saber-se o atrito do equipamento. Mesmo que haja uma calibração para cada produto, o atrito deve sofrer alteração durante a vida útil, exigindo que o sistema se adapte. Ainda, o acréscimo no tempo de ciclo pode ser bastante considerável.

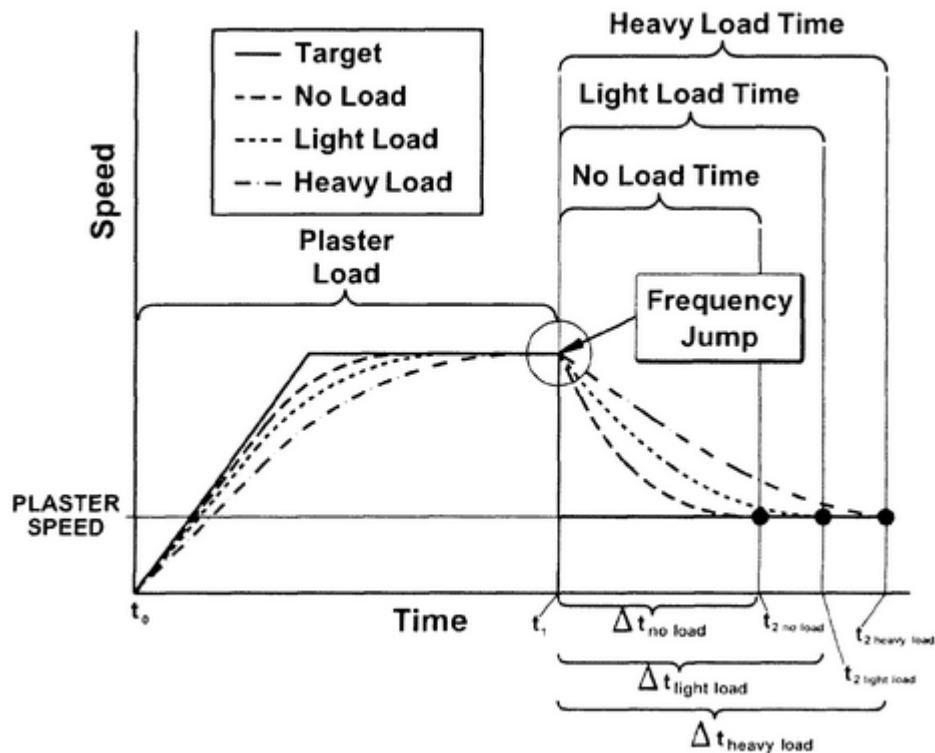


Figura 1 - Tempo de Parada [6]

3.2.2.3: Estimação de Inércia pelo Torque

Assim como o método do tempo de parada, este se utiliza da primeira lei de Newton. No entanto, aqui o objetivo é calcular a inércia, que por sua vez será convertida em massa.

Para tal, a segunda lei de Newton também é exigida. Para dinâmicas rotacionais, esta é definida da seguinte forma:

$$\tau = J\alpha$$

Onde τ é o torque, J é o momento de inércia do sistema e α é a aceleração angular. É importante ressaltar, no entanto, que esta é uma equação básica, trazendo pouca representatividade para um sistema real. Isto se deve ao fato de que

não existe sistema perfeito, onde o atrito seja zero. Desta forma, para a utilização de dada equação para casos reais, é necessária a adição de termos que representem o atrito.

Em um sistema real pode-se determinar duas formas de atrito. São eles o atrito viscoso e o atrito estático (ou torque de Coulomb).

O torque de Coulomb é considerado constante, e representa a resistência que ocorre quando duas superfícies que se tocam entram em movimento relativo. Uma força contrária ao movimento é criada, e no caso de movimentos rotativos, gera um torque.

O atrito viscoso, por outro lado, sofre variação de acordo com a velocidade. Este representa as relações entre o sistema em movimento e seus arredores, como rolamentos, viscosidade de óleos e até resistência do ar.

Desta forma, ao serem adicionados estes dois importantes componentes, tem-se a seguinte fórmula:

$$\tau(t) = J\alpha(t) + B\omega(t) + Tc \quad (2.1)$$

Onde B é o coeficiente de atrito viscoso, Tc o torque de Coulomb e $\omega(t)$ é a velocidade angular.

A Figura 2 demonstra como uma das componentes atua em uma máquina de lavar.

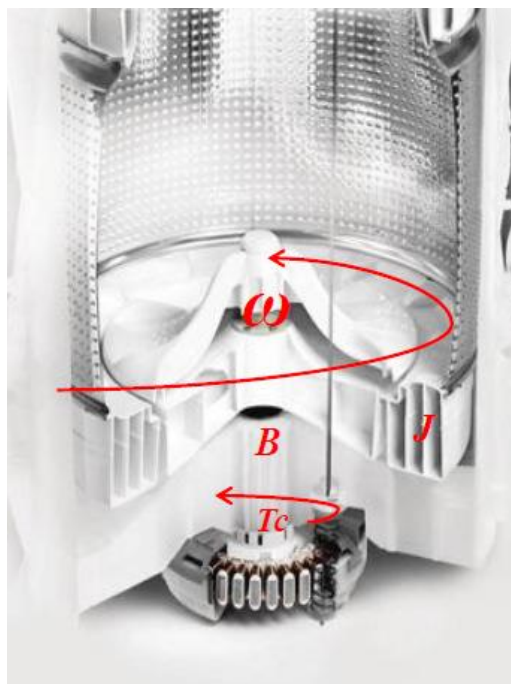


Figura 2 - As componentes para estimação de torque [5]

A partir do momento que é possível estimar a velocidade, aceleração e torque, e sabendo os coeficientes de atrito, um pouco de álgebra resulta na obtenção da inércia. Diversos perfis de velocidade e aceleração podem ser aplicados para tal cálculo.

Este método pode ser bastante preciso, desde que as variáveis possam ser lidas de forma confiável. Entretanto, conforme demonstrado, as componentes de atrito são fatores importantes na obtenção do resultado, não podendo ser ignoradas. Assim como no método do Tempo de Parada, alguma medida deve ser tomada para que os atritos sejam definidos e sejam então levados em consideração no cálculo.

3.2.3: O Algoritmo de A-Profile

O A-Profile utiliza os princípios demonstrados pelo algoritmo de obtenção da massa pela inércia, trabalhando com as mesmas bases físicas. Aqui, no entanto, o objetivo é eliminar totalmente o efeito do atrito no cálculo, reduzindo assim a equação.

Para que isto ocorra, um perfil de velocidade chamado A-Profile foi criado. Ele recebeu este nome, pois, quando exposto de forma gráfica, toma forma parecida com a letra A.

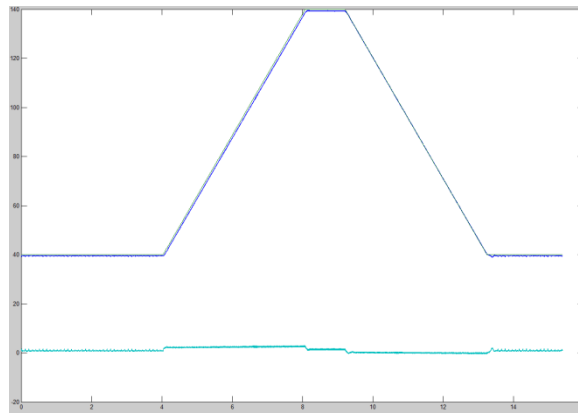


Figura 3 - A-Profile

Neste perfil ocorrem duas fases, uma de aceleração e uma de desaceleração.

Durante a fase de aceleração, a intenção é manter uma aceleração constante pré-definida até atingir a velocidade desejada. Desta forma, para esta fase obtemos a seguinte equação:

$$\tau_{up}(t) = J\alpha_{up} + B\omega(t) + Tc \quad (2.2)$$

A fase de desaceleração é semelhante, sendo aplicado um torque contrário ao movimento, freando o cesto com aceleração constante.

$$\tau_{down}(t) = J\alpha_{down} + B\omega(t) + Tc \quad (2.3)$$

Ainda, o algoritmo utilizado define que o módulo da aceleração durante as fases de aceleração e desaceleração deve ser o mesmo. Desta forma, pode-se dizer que:

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

Substituindo (2.4) em (2.2), obtemos:

$$\tau_{up}(t) = -J\alpha_{down} + B\omega(t) + Tc \quad (2.5)$$

Assim, subtraindo (2.3) de (2.5):

$$\tau_{up}(t) - \tau_{down}(t) = J\alpha_{down} + J\alpha_{down} + B\omega(t) + Tc - B\omega(t) - Tc \quad (2.6)$$

Note que os termos de atrito são os mesmos para as duas fases, uma vez que as velocidades angulares médias são as mesmas – trata-se de uma relação linear – e o torque de Coulumb também é o mesmo. Desta forma, ao realizar estes equacionamentos, elimina-se o efeito dos atritos no resultado final, como demonstrado em (2.7).

$$\tau_{up}(t) - \tau_{down}(t) = J\alpha_{down} + J\alpha_{down} \quad (2.7)$$

Como o objetivo é obter a inércia, tem-se então:

$$J = \frac{\tau_{up}(t) - \tau_{down}(t)}{2\alpha} \quad (2.8)$$

O torque, por sua vez, é obtido durante uma janela de medição de tamanhos iguais nas duas fases, tendo início e fim nas mesmas velocidades. As medições obtidas são somadas, sendo então divididas pelo número de amostras. Ou seja, o torque médio durante um intervalo de velocidade é usado.

$$J = \frac{\overline{\tau_{up}} - \overline{\tau_{down}}}{2\alpha} \quad (2.9)$$

Assim, obtendo-se o momento de inércia, pode-se fazer a conversão para massa. Esta será discutida posteriormente.

Este método está sendo implementado atualmente, e vem sendo testado para ser, então, aplicado aos produtos da marca. Trata-se de uma inovação que traz boa performance sem adicionar muito ao tempo de ciclo, e com custo mínimo, uma vez que não são necessários sensores.

Determinar sua robustez é o objetivo principal deste trabalho, relacionando-o com fatores diversos que podem causar falhas, sendo eles ambientais, de produto ou operadores.

3.2.4: A Conversão Inércia - Massa

Apenas obter o momento de inércia do cesto e sua carga não é suficiente. O objetivo final é calcular a massa de roupa inserida, para que assim sejam determinados os parâmetros de lavagem.

Observando o formato do cesto vazio, nota-se que o mesmo pode ser aproximado por uma casca cilíndrica. Entretanto, considerando que o mesmo terá roupas colocadas em seu interior, e considerando-as perfeitamente distribuídas, o mesmo poderia ser aproximado por um cilindro maciço.

É conhecido que, no entanto, dificilmente haverá carga perfeitamente distribuída, uma vez que esta é sujeita a imperfeições causadas pelo operador. Desta forma, considera-se que a carga terá um raio interno efetivo, o qual será utilizado para calcular a inércia do cesto como um cilindro vazado.

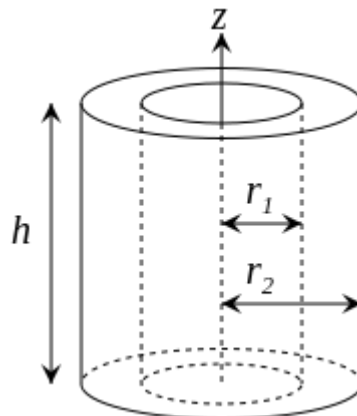


Figura 4 - Cilindro vazado [1]

Para tal, a equação de inércia é a seguinte:

$$J = \frac{m(r_1^2 + r_2^2)}{2}$$

Note que, quando r_1 é igual a r_2 , esta resulta na equação de momento de inércia da casca cilíndrica, e quando r_1 é zero, esta resultada na equação de momento de inércia de um cilindro maciço.

Capítulo 4: Ferramentas Utilizadas

4.1: A Metodologia Seis Sigma

O sigma (σ) é a letra grega utilizada na estatística para representar o desvio padrão de uma distribuição. De maneira sucinta, o desvio padrão representa o quão espalhada uma curva normal está em relação à sua média. Desta forma, um grande desvio padrão significa que há maior probabilidade de uma amostra estar longe da média.

O desvio padrão é usado, ainda, para definir percentuais de chances de uma amostra estar dentro de um intervalo da curva normal. Assim, partindo da média, uma distância de 1 desvio padrão significa que existe cerca de 68% de chance da amostra estar dentro deste intervalo, subindo para 95% em 2 desvios padrões.

A metodologia Seis Sigma tem seu nome baseada nesta definição estatística. Quando se expande a distância para a média em seis desvios padrões, tem-se praticamente 100% das amostras caindo dentro da área desejada. Este dado, por si só, permite entender o motivo do nome. Quando trazido para o ambiente empresarial, os seis sigmas significam reduzir as chances de falha para níveis próximos de zero.

Para tal, exige-se uma mudança na cultura organizacional, levando a companhia a buscar novas técnicas para garantir a qualidade, reduzir desperdícios e manter-se, então, à frente de seus concorrentes.

A Whirlpool iniciou a implementação de tal metodologia em suas companhias em 1997. O sucesso alcançado foi tamanho que se decidiu expandir para todas as partes da empresa, chegando à Whirlpool Latin America em 2002.

Para atingir os resultados prometidos, a Seis Sigma traz consigo diversas ferramentas que auxiliam gestores e demais profissionais a se organizarem e desenvolverem seus projetos de maneira mais eficientes. Algumas delas foram usadas neste trabalho e serão aqui exploradas.

4.1.1: Ciclo PDSA

Esta ferramenta tem o intuito de reger o sequenciamento de ações que se deve tomar no desenvolvimento dos projetos. Trata-se de um sistema simples e intuitivo, mas que deve ser colocado no papel para que suas etapas não acabem se misturando.

A Figura 5 demonstra suas etapas e como elas são definidas.

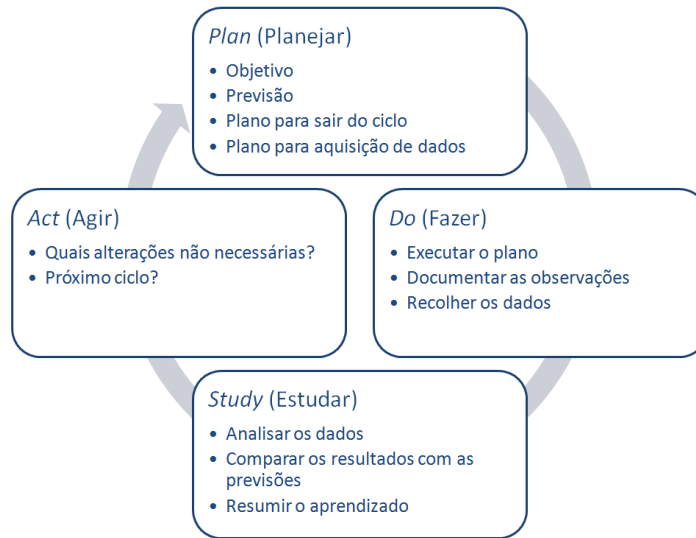


Figura 5 - O ciclo PDSA [5]

Definir de forma clara cada uma destas etapas é essencial para que não sejam executadas ações sem que tenhamos real conhecimento a respeito daquilo que queremos tratar. Seguir o ciclo não se trata de simplesmente criar etapas para aquilo que já fazemos, mas sim criar uma distinção clara entre elas para expô-las de forma lógica.

4.1.2: Gráfico de Variabilidade

Outra ferramenta que foi bastante utilizada no desenvolvimento deste foi o gráfico de variabilidade. Este consiste em demonstrar de forma visual o comportamento dos resultados distribuídos por cada variável e seus valores. Desta forma, a análise comparativa entre resultados de variáveis distintas fica bastante clara, uma vez que estas são colocadas lado a lado em uma figura.

Quando utilizando apenas uma variável, este recurso pode parecer simples, mas para diversas variáveis percebe-se grande ganho na facilidade com que elas podem ser entendidas.

Para a análise da robustez foram utilizadas diversas variáveis que poderiam afetar o resultado, não apenas de forma independente, mas também através de algum somatório de fatores. Pela sua característica, os gráficos de variabilidade foram bastante úteis na análise e compreensão dos dados.

4.1.3: *Design of Experiment (DOE)*

O *Design of Experiment* consiste em um procedimento que segue certas diretrizes para o alcance da compreensão sobre como determinadas variáveis afetam o sistema. Basicamente, com ele consegue-se relacionar entradas e saídas do sistema, analisando relações de causa-efeito. Seu intuito é o de facilitar e tornar mais eficiente o planejamento e execução dos testes para posterior análise.

De forma resumida, então, o DOE tem como função o planejamento dos testes, mas não necessariamente antecede todos eles. Testes iniciais podem ser feitos sem um DOE, com a intenção de obter conhecimento do sistema e possibilitar um planejamento mais adequado. Sua realização é importante, pois é muito mais eficiente utilizar um pouco mais de tempo planejando perfeitamente os testes do que fazendo-os de forma excessiva ou errada. O DOE deve conter todo o plano de testes, desde as variáveis a serem consideradas, que estados elas podem assumir, quantidade de testes para cada condição, entre outros.

O DOE faz parte ainda de um documento ainda mais completo, o *Factor Relationship Diagram* (FRD), que resume os testes a serem feitos e os estados das variáveis em forma gráfica e de tabelas. Este possibilita a visão esquemática dos testes a serem feitos, além de facilitar a inserção dos dados para posterior análise. Sua forma gráfica lembra a de uma árvore de testes, e sua utilização foi importante no desenvolvimento deste trabalho.

O DOE conta ainda com a técnica Fatorial Fracionado, onde o experimento é realizado selecionando-se combinações de níveis e parâmetros seguindo diretrizes que permitem a redução da quantidade de rodadas de testes a serem feitas. Esta

vantagem, no entanto, causa perdas na capacidade de analisarmos os efeitos de todas as variáveis de forma independente, ou de interações mais complexas – interações de grau maior que 2 são estatisticamente raras, portanto há pouca perda neste ponto.

4.2: Aquisição, Tratamento e Análise dos Dados

A aquisição dos dados foi feita de duas formas. A principal delas, usando o software específico da Whirlpool chamado Itool, foi usada em todos os testes. A segunda, com o Beagle (dispositivo da companhia Total Phase), foi usada apenas enquanto se tinha dúvidas quanto à eficiência do Itool e quando precisávamos de análises mais profundas. A diferença entre eles é explicada a seguir.

4.2.1: Itool

O Itool é um software desenvolvido para enviar comandos e receber dados das máquinas, permitindo ao operador controlar cada dispositivo de forma individual ou ciclos completos da máquina. Este é capaz de retornar ao usuário muitas variáveis ao mesmo tempo, permitindo que seja acompanhado tudo aquilo que está se passando no equipamento.

É bastante útil para o entendimento do comportamento do sistema em cada uma de suas etapas, o que permite que se tenha boa compreensão de erros que venham a ocorrer. Entretanto, sua frequência de aquisição é baixa, devido à limitação do sistema operacional. Ainda, este não permite acompanhamento em tempo real de algumas variáveis, apenas os valores já calculados pela placa durante intervalos de tempo e que serão usados como entradas para novos cálculos.

Por ser capaz de nos informar precisamente os resultados de variáveis como o momento de inércia e a massa da carga calculada, além de suas variáveis de entrada, seu uso é preferencial na maioria dos testes.

4.2.2: Beagle

O Beagle é um dispositivo de aquisição de dados fabricado pela empresa Total Phase. É utilizado aqui por permitir taxas de amostragem mais altas, de até 4kHz, além do acompanhamento em tempo real de até 8 variáveis. Foi bastante utilizado durante etapas iniciais, quando o desenvolvimento do software embarcado ainda estava em andamento e, portanto, o Itool era menos confiável.

Sua principal desvantagem é o fato de que, para obter-se os resultados de inércia e massa desejados, além de outras variáveis importantes, é necessária a utilização de softwares externos. O Beagle trabalha apenas com variáveis “cruas”, que podem ser lidas em tempo real, não sendo possível a leitura de dados que se utilizem de cálculos baseados nestas mesmas variáveis. No caso deste trabalho, o Matlab foi utilizado para tal fim.

Scripts foram desenvolvidos para ler as velocidades e torque e fazer o cálculo das variáveis de saída baseados nas especificações. Tal prática foi fundamental na comparação de valores entre Beagle e Itool, permitindo validar mutuamente os resultados.

4.2.3: JMP

Uma vez feitos os testes e adquiridos os dados, é necessário fazer sua análise. O JMP, ferramenta de análise estatística, fornece diversas formas de expor graficamente os dados, de forma que suas funcionalidades permitem uma exposição bastante prática e visual. O gráfico de variabilidade, citado anteriormente, pode ser feito em poucos passos.

Seu grande leque de opções traz também ferramentas poderosas de relação entre variáveis como, por exemplo, o diagrama de Pareto. Este nos permite analisar de maneira rápida como as variáveis, puras ou combinadas, influenciam no resultado final.

Em suma, o JMP permite que sejam realizados alguns passos da metodologia Seis Sigma de forma simples, evitando que tempo seja desperdiçado na geração dos gráficos e ferramentas e seja focado na parte importante, a análise.

Capítulo 5: Desenvolvimento

O presente trabalho tem como objetivo determinar a robustez do algoritmo de detecção de carga para cargas secas. Este deve ser capaz de atingir níveis confiáveis de estimação sobre diversas formas de mudanças que podem ser ambientais, físicas, diferenças na produção, entre outros.

Para que fosse possível simular as mais variadas situações, diversos testes foram realizados, buscando sempre alcançar níveis próximos aos reais. Este capítulo explica como foram definidos cada um destes testes, seus objetivos e modo de realização.

5.1: Teste Geral de Robustez

Sabe-se que o algoritmo possui várias etapas, cada uma delas dependendo de fatores diversos. Como forma mais preocupante, é necessária a confiança em uma estimação correta de aceleração, velocidade e torque, uma vez que estes são as premissas básicas na qual o algoritmo se apoiará. Uma estimação errada de qualquer uma destas variáveis faria com que os resultados fossem incorretos.

Partindo deste princípio, optou-se por iniciar os testes de robustez pelos fatores que podem influenciar na obtenção fiel dos valores destas variáveis. Uma lista de potenciais modos de falha foi feita, sendo então consideradas as formas como cada uma delas poderia acontecer e por que motivos.

Uma vez obtida esta lista, o próximo passo era entender como simular cada um dos fatores. Para cada caso, então, foi apontada uma ou mais variáveis que seriam a causa. Esta definição é importante, pois uma vez feita, permite entender e projetar como cada uma destas causas poderá ser simulada nos experimentos.

5.1.1: As Variáveis Testadas

Uma análise do sistema feita em conjunto com especialistas no desenvolvimento das placas eletrônicas e do sistema de controle do motor resultou

em uma lista relativamente curta de variáveis que deveriam ser testadas. Estas são melhor explicadas as seguir.

- Tensão de alimentação

A alimentação do sistema pode afetar diretamente parâmetros da placa eletrônica que são usados para estimação, assim como o próprio motor e sua performance. Para regulá-la, uma fonte de tensão controlada foi utilizada.

- Temperatura do motor

Sabe-se que mudanças na temperatura do motor podem acarretar em variações nas interações magnéticas do mesmo, possivelmente causando erros nas estimações. Apesar deste ter sido testado anteriormente e provada que seu efeito era devidamente compensado, os testes não utilizaram temperaturas extremas, que deviam ser então agora buscadas. O aquecimento foi feito forçando o motor a situações não convencionais de uso.

- Ganhos dos sensores da placa eletrônica

A placa eletrônica da máquina utiliza formas simples de aquisição de dados para obter os valores necessários para a estimação de torque. Tensão de barramento do motor e corrente de fase são as duas variáveis medidas, passando então por processamento que nos gera a estimação instantânea de torque e velocidade. Estes sensores, no entanto, estão sujeitos a variações de fábrica que, por maior que seja a qualidade exigida pela empresa em suas compras, não estão livres de variações.

Estas variações foram estimadas pelo engenheiro responsável pela parte eletrônica, nos fornecendo então valores extremos que representam piores casos. Como já explanado, mesmo que as chances de casos absurdos acontecerem sejam mínimas, em um universo de milhares, até milhões de máquinas produzidas, estes podem aparecer e devem, portanto, ser testados.

Uma vez que havia acesso a apenas um protótipo para testes, fazê-los com componentes reais de representassem essa variação consumiria muitos recursos, especialmente tempo. Desta forma, o procedimento feito foi o de simular mudanças

nos ganhos dos sensores através de alterações via software. Testes realizados forneceram os valores reais, bastando então acrescentar a variação desejada.

- Diferentes níveis de carga

Por mais que possa parecer óbvio que níveis de cargas diferentes acarretarão em estimações diferentes, afinal, este é o objetivo geral do algoritmo, este teste não tem apenas este fim.

Aqui, variar a carga é essencial não para testar o desempenho do algoritmo, mas para avaliar sua interação com as outras variáveis. Se for concluído que houve mudança na estimação de massa devido a alguma das causas testadas, níveis de carga diferentes auxiliam a entender se este efeito se dá de uma mesma forma em todo o espectro pretendido, ou se a forma como atua é proporcional, inversamente proporcional, ou está de algum modo ligado ao nível de carga.

5.1.2: Programação dos Testes

Em uma situação real, diversos fatores podem afetar a máquina de lavar e suas funções. Alguns destes fatores, sozinhos, podem acarretar em variações não esperadas que nos levem a algum mau funcionamento. Outros, entretanto, podem parecer inofensivos quando sozinhos, mas, combinados, também causam diferenças indesejadas.

Desta forma, chegou-se à conclusão de que não é necessário apenas realizar testes isolados com cada uma das variáveis, mas sim combiná-las em um grande conjunto de testes onde se consiga visualizar não apenas seus efeitos de forma isolada, mas também como se comportam quando interagem.

Seguindo a metodologia Seis Sigma, o primeiro passo é desenvolver o DOE de forma a organizar os dados e permitir fácil visualização daquilo que deve ser realizado. Para tal deve-se ter em mãos os níveis que cada fator deve assumir, exemplificado na Figura 6.

Fatores		Níveis		Valor Nominal	Variação %
		+	-		
X1	Tensão de Alimentação	$\bar{X1} + x\%$	$\bar{X1} - x\%$	$\bar{X1}$	X
X2	Ganhos dos Sensores	$\bar{X2} + x\%$	$\bar{X2} - x\%$	$\bar{X2}$	X
X3	Temperatura do Motor	$\bar{X3} + x\%$	$\bar{X3} - x\%$	$\bar{X3}$	X
X4	Carga	$\bar{X4} + x\%$	$\bar{X4} - x\%$	$\bar{X4}$	X

Figura 6 – Tabela Integrante do FRD do Experimento

Por motivos de confidencialidade, os valores reais não podem ser exibidos. Entretanto, é possível notar que cada variável assumiu três valores durante os testes, sendo um deles o nominal.

O próximo passo é, então, determinar qual o grau de confiança se quer obter com os testes, levando em consideração a eficiência destes em relação aos recursos. Realizar todas as interações entre cada um dos estados das variáveis é bastante ineficiente. É possível, através de planejamento inteligente dos testes, que bons resultados sejam alcançados apenas com uma fração dos testes.

O método de Fatorial Fracionado é então introduzido. Dependendo do nível de interação pretendido entre as variáveis pode-se, com ele, reduzir consideravelmente a quantidade de testes. No caso, este foi suficiente para eliminar a necessidade de realizar metade deles.

Estabelecido o procedimento, foi gerada então a árvore de testes, onde se explicita graficamente como devem ser aplicadas cada uma das variações, seguindo aquilo que foi definido pelo Fatorial Fracionado.

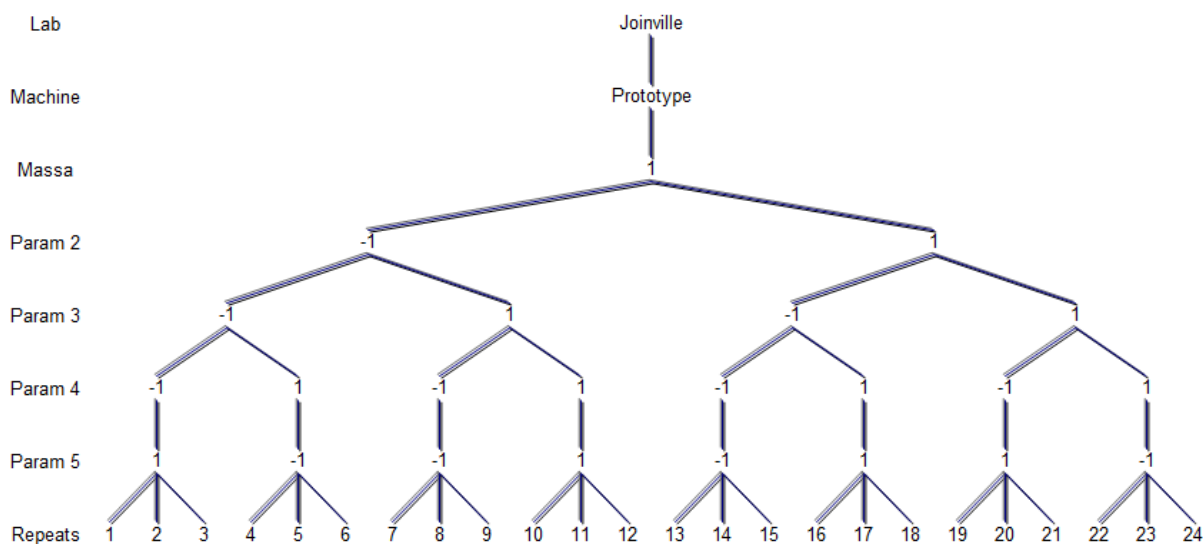


Figura 7 - Parcial da Árvore de Testes do Teste Geral de Robustez

5.2: Curva de Calibração

Conforme descrito na explicação do algoritmo, este resulta, inicialmente, em um valor de momento de inércia. Este deve, então, ser convertido através da fórmula do momento de inércia de um cilindro vazado para o valor em massa. Esta conversão, apesar de confiável, leva em consideração que temos como estimar de forma robusta o valor do raio interno assumido pela carga. Entretanto, devido ao comportamento diferenciado de cada tipo de carga, são necessários experimentos que determinem o quão relevantes estes são no resultado.

Existem, atualmente, diversos testes padrões desenvolvidos por empresas que visam facilitar a compreensão do consumidor quanto às qualidades e benefícios de cada máquina de lavar. Para que seus resultados sejam relevantes, estas criaram testes padronizados que, cada um de sua forma, representam bastante eficientemente situações reais.

Apesar de terem como interesse principal o consumidor, entender estes testes pode ser bastante útil também para o fabricante, principalmente em casos em que é preciso simular situações reais.

Assim, o uso dos procedimentos e materiais destes testes não só é interessante, mas bastante importante para evitar despesas desnecessárias de

recursos em pesquisas já feitas – como o desenvolvimento de um novo teste, que teria basicamente os mesmos resultados.

Aliando estes conhecimentos chegou-se à conclusão de que, para realizar a conversão inércia-massa de forma confiável, o ideal seria traçar uma curva de calibração. Esta seria feita através de testes com diversos tipos de carga, sendo estas com massas de valores específicos espalhados pelo espectro desejado.

Vários tipos de carga foram utilizados, destacando-se três deles, cada uma com seu procedimento de carregamento conforme apontado pelos testes padrões, fornecendo as informações necessárias para atingir o objetivo.

Nestes testes, no entanto, a utilização do Fatorial Fracionado não foi necessária. Como existe apenas uma variável, analisam-se as repostas em relação a esta sem a necessidade de relacioná-la com outros fatores. O DOE é simples, indicando apenas os valores de carga utilizados, que foram os mesmos para os três tipos.

Tipo de carga	Massa
A	1.2, 3.2, 9.6
B	1.2, 3.2, 4.9, 8.6
C	1.2, 3.2, 10

Figura 8 - Tipos de carga e massas utilizadas

A Figura 8 descreve as massas utilizadas para cada tipo de carga. Por motivos de confidencialidade, os valores são proporcionais ao range de operação da máquina, sendo 10 o limite superior e 0 o inferior.

5.3: Robustez à Forma de Carregamento

O processo de determinação da curva de calibração é essencial para esta próxima etapa. Uma vez definido por meio de testes padrões a forma como a conversão será feita, pode-se então partir para casos extremos, onde, apesar de serem usados os mesmos materiais, sua colocação na máquina não segue os procedimentos especificados. Desta forma, ao realizar a conversão, pode-se saber o valor calculado de massa e observar os limites aproximados de carga que serão alocados para cada nível de lavagem.

Como se sabe, o comportamento do consumidor é bastante imprevisível. O carregamento de uma máquina de lavar pode ser feito de diversas formas, dependendo unicamente do empenho ou conhecimento do operador. Alguns fazem uma distribuição quase perfeita da carga pelo cesto, outros tendem a colocar de qualquer forma, enquanto outros fazem anéis com as roupas.

Por mais que as fabricantes sejam específicas em auxiliar o consumidor a colocar as roupas da forma correta, ou seja, aquela para a qual a máquina foi projetada, é muito difícil garantir que estes o farão. Na verdade, é impossível prever se o consumidor realmente irá ler o manual. Uma solução encontrada é a de explicitar na própria máquina a forma ideal de carregamento, inserindo um desenho ou instruções na parte de dentro da tampa ou próximo ao cesto.

Este esforço, no entanto, não é suficiente para garantir a utilização correta do equipamento. A forma de carregamento não é o único fator a ter influência na eficiência de lavagem (limpeza), mas é o que mais afeta a lógica de estimação. Isto, pois como visto na curva de calibração, este baseia-se na premissa de que as cargas são distribuídas corretamente.

Entendendo um pouco a física do problema, lembramos que o momento de inércia do cesto foi aproximado pelo de um cilindro vazado. Seu valor depende não apenas do raio externo, ou seja, o do cesto, mas também do raio efetivo da carga colocada dentro dele. Pensando nos dois casos extremos, a distribuição da carga pode ser feita perfeitamente, levando o cesto a ter a inércia aproximada de um cilindro maciço.

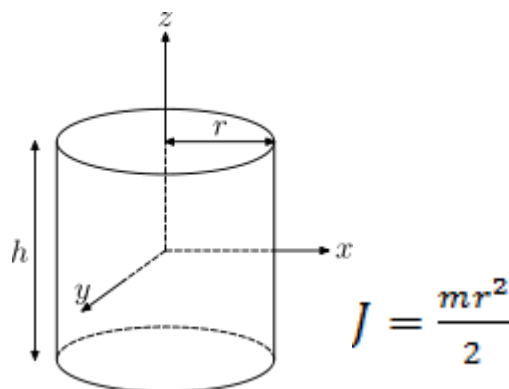


Figura 9 - Cilindro maciço [1]

No outro extremo, caso o consumidor posicione a carga formando um anel bastante próximo à parede do cesto, obtém-se um momento de inércia próximo ao de uma casca cilíndrica.

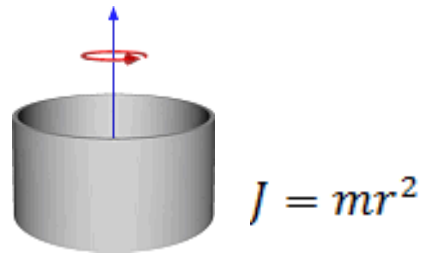


Figura 10 - Casca cilíndrica [1]

Como se pode observar, a variação que pode acontecer entre estes casos é bastante alta, onde o momento de inércia da segunda disposição chega a ser duas vezes maior que a primeira. É importante notar, no entanto, que estas são situações hipotéticas. No mundo real, dificilmente um consumidor conseguirá distribuir perfeitamente a carga. Ainda, a formação de um anel perfeito é praticamente impossível, uma vez que o próprio peso da carga a desloca para um posicionamento mais central. Caso fosse possível, levaria a problemas muito maiores do que a não detecção da massa, uma vez que o *impeller* não teria contato com a roupa, efetivamente não lavando as roupas.

Por mais que a matemática forneça limites para os casos extremos, as situações reais se mostram relativamente imprevisíveis. Quantidades diferentes de carga tendem a se comportar de forma variada, mesmo com procedimentos parecidos de carregamento.

Desta forma, concluiu-se que deveriam ser feitos testes para analisar como o momento de inércia se comportaria para determinadas quantidades de carga seguindo alguns diferentes procedimentos que tendem a ser utilizados por consumidores.

5.3.1: Planejamento dos Experimentos

Os testes utilizados para a determinação da curva de calibração envolvem diversos tipos de carga para uma variedade de massa espalhada pelo range que queremos manter a confiabilidade. Aqui manteve-se a mesma lógica, buscando

atingir diversos valores de carga, variando também seu tipo. Entretanto, para evitar que fosse necessário refazer toda a carga de testes, desta vez com procedimentos diferentes, optou-se por reduzir a quantidade de opções de carga e massa.

O planejamento foi uma etapa bastante relevante, uma vez que, para tal, seria necessário o entendimento sobre quais eram os valores mais importantes a serem testados, além de como cada um deles deveria ser distribuído.

Observando-se os resultados obtidos na curva de calibração, e tendo em mente o comportamento de cada tipo de carga e sua importância tanto para testes padronizados que virão a determinar o consumo de energia e grau de limpeza da máquina quanto para a essência do produto em gerar valor para o consumidor, objetivou-se selecionar para estes experimentos apenas cargas que tinham grandes chances de causar erros no algoritmo.

Estas foram selecionadas também de forma a estarem representando, de certa forma, todo o espectro de detecção desejado. Entretanto, diferentemente dos experimentos de calibração, aqui alguns tipos de carga foram testadas apenas para certa massa.

Foi levada em consideração, ainda, a quantidade de diferentes níveis de lavagem objetivada no desenvolvimento, e o quão facilmente cada tipo de carga poderia ser detectado erroneamente, de acordo com os limites disponíveis para cada nível.

Por motivos de confidencialidade, o tipo e a massa exata utilizada em cada teste não podem ser aqui mostrados. Para melhor entendimento, entretanto, a tabela abaixo define como foram distribuídas as cargas, massas e procedimento. As massas encontram-se proporcionais às utilizadas, sendo 10 referente à capacidade máxima da máquina e 0 o carregamento a vazio.

	Tipo de Carregamento	Distribuido	Dump	Anel
Tipo de Carga				
A		3.2		3.2
B		1.2, 4.8		1.2, 4.8
C		3.2, 10	3.2, 10	3.2

Figura 11 - Tipos de Carga e Carregamento

Capítulo 6: Resultados

Uma vez feitos os testes, uma compilação geral dos dados foi feita para poder ser analisada. Quando executando cada um dos testes, diversas variáveis que envolvem apenas dados internos do sistema são logadas, pois, por se tratarem de protótipos, erros internos ou de execução podem ser encontrados. Entretanto, uma vez obtidos os resultados finais, apenas as variáveis importantes e que apresentam os valores de massa e inércia, além de valores intermediários como torque e aceleração devem ser levadas em consideração na análise.

Assim, a primeira etapa trata-se de filtrar as variáveis menos importantes. Um script de Matlab é utilizado para tal fim, resumindo os resultados de cada teste em uma linha de uma tabela de Excel. Ainda, para facilitar a organização, o script forma também a tabela compilando todos os testes, sendo cada linha o resultado de um deles.

Esta tabela é bastante útil, pois contem todos os dados necessários para a análise. Com ela, é possível a inserção dos dados no software de análise estatística JMP, que foi utilizado em todos os resultados aqui expostos.

6.1: Teste Geral de Robustez

Conforme anteriormente descrito, o teste geral de robustez leva em consideração diversas variáveis importantes que podem ter influência na estimação. Estas devem ser avaliadas de forma independente e também em conjunto. O primeiro passo para a análise é, então, montar um gráfico de variabilidade. Este nos permite visualizar os resultados de forma clara em uma única figura, expondo o valor das variáveis em cada teste.

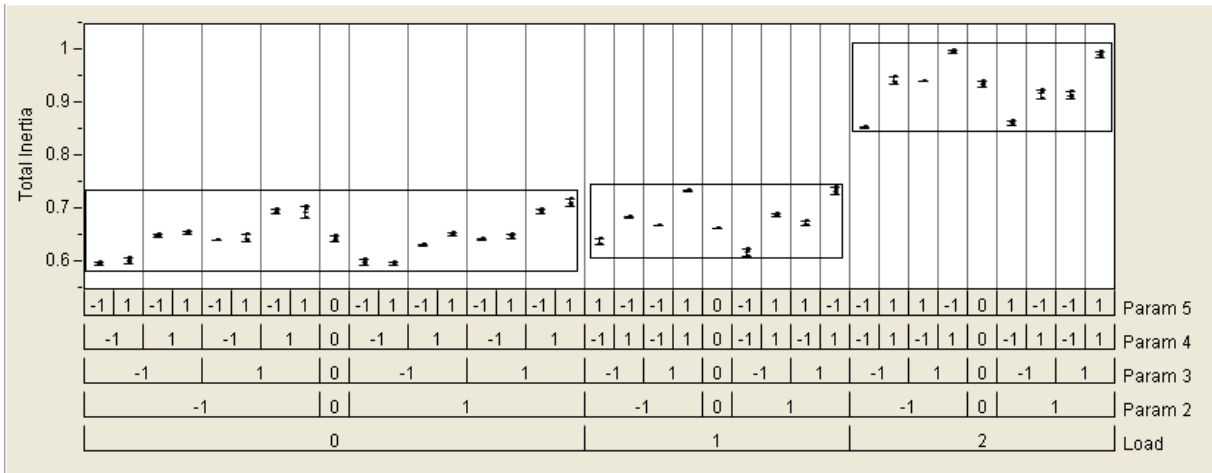


Figura 12 - Gráfico de Variabilidade do Teste Geral de Robustez

A Figura 12 mostra o gráfico de variabilidade gerado para estes testes, com valores normalizados. Nela, os parâmetros em zero conotam seu estado natural (médio), enquanto -1 e 1 referem-se a seus níveis extremos inferior e superior, respectivamente. Para o *Load*, 0 é a menor carga, 1 a intermediária e 2 a maior. Por motivos de confidencialidade, apenas o parâmetro *Load*, ou tamanho da carga, é identificado.

Observando a figura, é possível claramente notar que existe um padrão na forma como os resultados se comportam. Este será então explorado, constatando-se também suas causas.

Como medida inicial, observa-se a variável *Load*, que define o nível de carga utilizado. Como esperado, observa-se um aumento na média dos resultados conforme se aumenta a massa teste. Esta variável, sozinha, não permite que sejam tiradas conclusões mais avançadas, uma vez que é possível notar valores diferentes de inércia, mesmo dentro de cada tamanho de carga.

O Parâmetro 2 passa então a ser analisado. Com este, não é possível notar algum aumento na média dos testes. Além disso, assim como no tamanho da carga, dentro de cada um de seus valores extremos podem-se observar variações consideráveis no nível de inércia, o que indica que estas não são causadas pela mudança deste.

A análise do Parâmetro 3, por sua vez, demonstra resultado diferente. Ao ser observado o comportamento do valor de inércia para cada um dos carregamentos, é

possível notar que, entre o valor inferior e o superior deste parâmetro, ocorre uma variação na inércia calculada na forma de um *offset*.

A observação dos Parâmetros 4 e 5 se faz mais complexa, uma vez que, devido ao Fatorial Fracionado, seus testes são feitos com variação simultânea. Neste momento, para diferenciar o efeito de cada um, utiliza-se o resultado encontrado nos testes de carga 0, feitos para todas as variáveis em cada um de seus valores. Assim, nota-se primeiro que o Parâmetro 4 possui comportamento semelhante ao 3, causando um *offset* na estimação de inércia. O Parâmetro 5, por sua vez, não aparenta causar mudanças significativas nos resultados.

Em suma, através da análise do gráfico de variabilidade evidencia-se que, além da esperada variação causada pela carga, esta ocorre ainda quando os valores dos Parâmetros 3 e 4 são alterados.

A etapa de análise é bastante importante para que seja entendido o comportamento do sistema de forma geral, e racionalizadas as razões para tal. É possível, através deste, chegar a conclusões bastante precisas. Entretanto, para não só verificá-las, mas também para tentar encontrar padrões mais avançados que não se consegue atingir apenas pela análise deste gráfico, um recurso do JMP é também utilizado. Este é capaz de determinar, através de combinação linear, um modelo que representa o sistema a partir dos testes. Com o modelo, pode-se então verificar de forma matemática o quanto cada variável afeta o resultado, além da interação entre elas – mantendo as limitações determinadas pelo Fatorial Fracionado.

Inicialmente, com os perfis de interação gerados por este método, é possível observar como as variáveis relacionam-se.

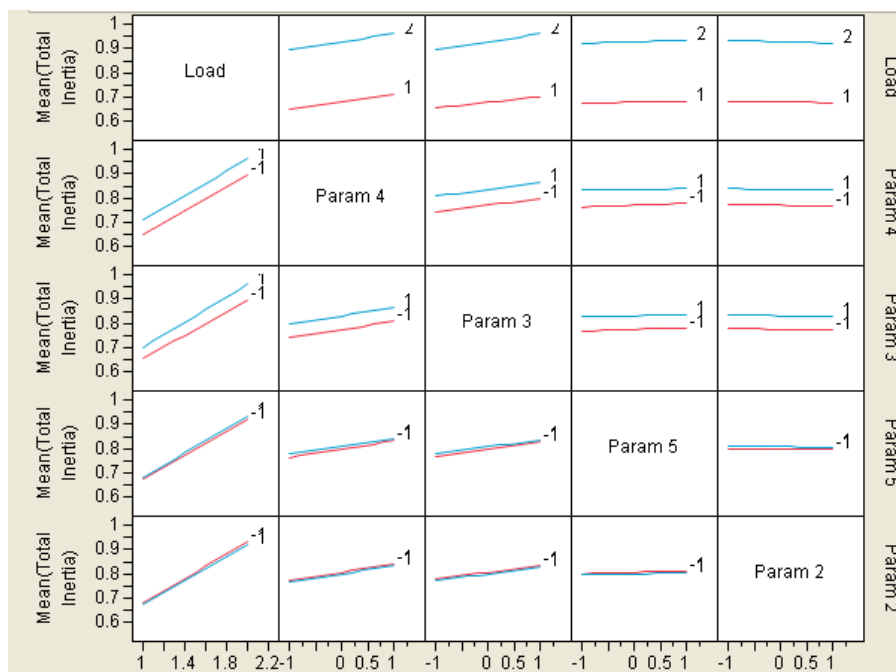


Figura 13 - Diagrama de Interação

Na Figura 13, cada curva em uma célula representa o valor da inércia de acordo com a variação dos parâmetros representados na linha e coluna nos quais a célula se encontra. Assim, curvas semelhantes em uma mesma célula indicam pouca interação entre as variáveis, enquanto curvas sobrepostas indicam que não há relação entre alterações no valor do parâmetro da linha e o resultado da inércia. Neste caso, nota-se claramente que todas as células possuem curvas semelhantes, de forma que há baixa interação entre as variáveis. Ainda, as linhas dos parâmetros 5 e 2 contém células com curvas sobrepostas, indicando que não afetam o valor da estimativa.

É importante ressaltar que o fato de não haver interação entre as variáveis permite a afirmação de que os resultados serão alterados da mesma forma para cargas altas ou baixas. Espera-se, então, um delta constante entre valores extremos de 3 e 4, o que é comprovado no gráfico de variabilidade da Figura 14.

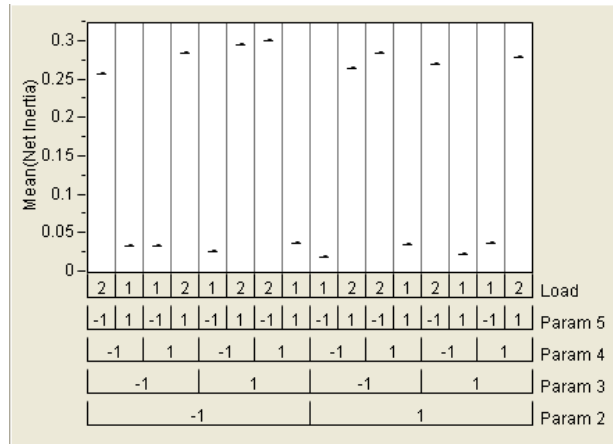


Figura 14 - Gráfico de Variabilidade Delta Constante

Todas as conclusões são melhor demonstradas de forma mais simplificada no diagrama de Pareto, também gerado pelo JMP, ainda utilizando o modelo. Este apresenta a intensidade da influência, tanto de variáveis independentes quanto de interações entre elas.

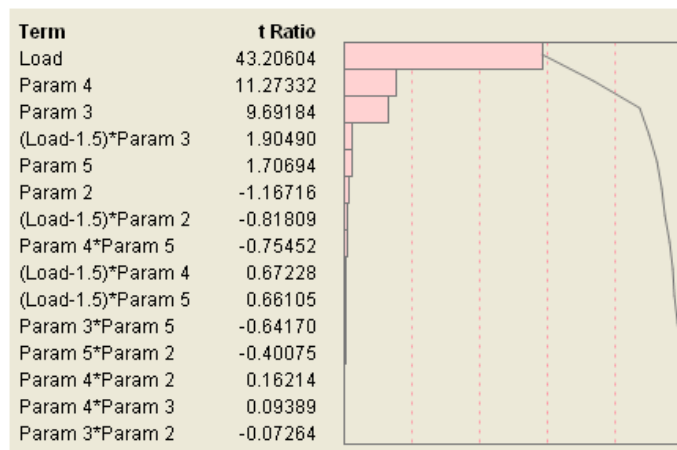


Figura 15 - Diagrama de Pareto do Teste Geral de Robustez

Assim, a Figura 15 evidencia a ampla influência do tamanho da carga no resultado, sendo acompanhada dos Parâmetros 4 e 3. Existe, ainda, influência residual causada por outros fatores que pode ser tratada como ruído, uma vez que seu valor é ínfimo comparado aos outros.

Devido à não interação entre os fatores, chega-se à conclusão de que é possível fazer uma calibração simples de cada máquina, onde o resultado da inércia zero seria armazenado para ser usado como parâmetro comparativo durante toda a vida útil do produto.

Esta calibração já era prevista antes mesmo destes resultados, uma vez que diferenças entre produtos, mesmo que em uma mesma linha, são esperadas; portanto não será aqui abordada.

6.2: Curva de Calibração

Para a obtenção da curva de calibração, cada tipo de carga teve seu procedimento padrão seguido de forma fiel. Como descrito, estas representam testes definidos por órgãos diversos e tem como intenção a projeção de como o equipamento se comporta em situações reais.

Os testes foram realizados conforme a Figura 8, com um número fixo de repetições para cada massa e carga. Sabendo a massa exata inserida na máquina, e lendo o valor de inércia estimado, foi possível então traçar as curvas de conversão para cada tipo de tecido.

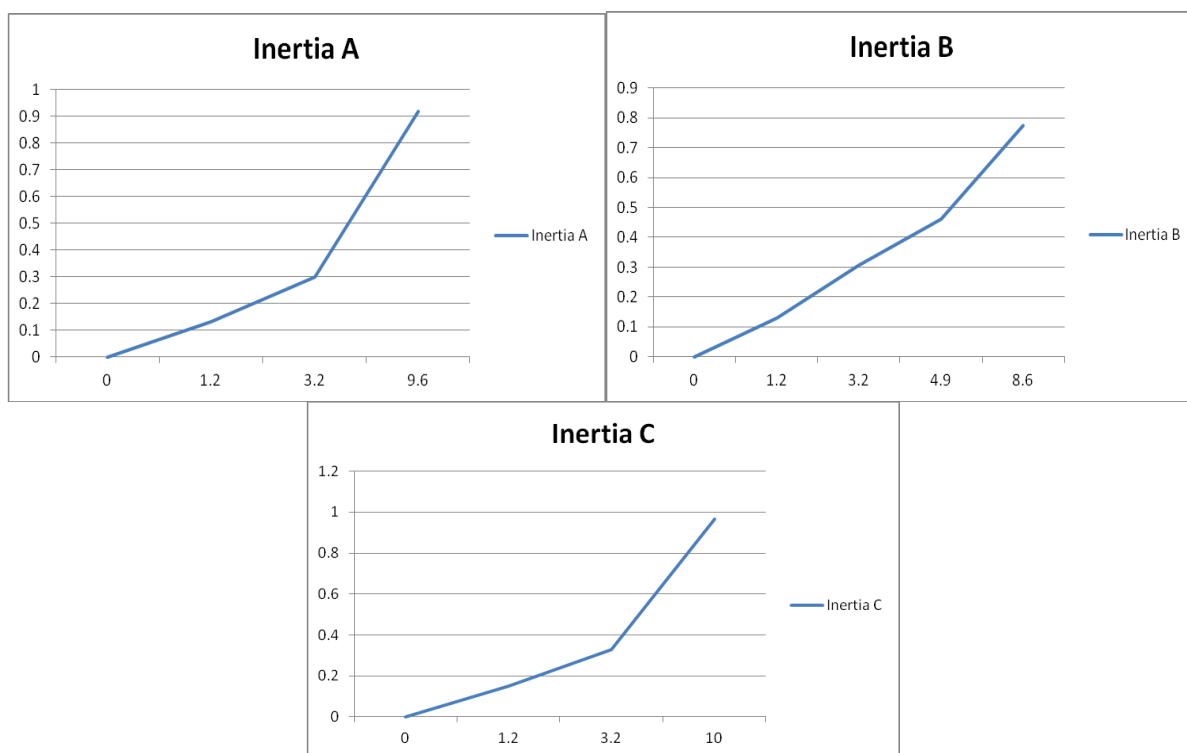


Figura 16 - Gráficos de Inércia x Massa

Apesar de serem realizados com massas diferentes, é evidente a diferença no comportamento de cada tecido em relação à massa, especialmente o tipo B. Esta diferença faz com que não seja possível a utilização de uma curva genérica

baseada em um dos tipos de tecido, mas sim uma aproximação que seja capaz de abranger de forma eficiente cada um, levando em consideração pontos críticos para o sistema.

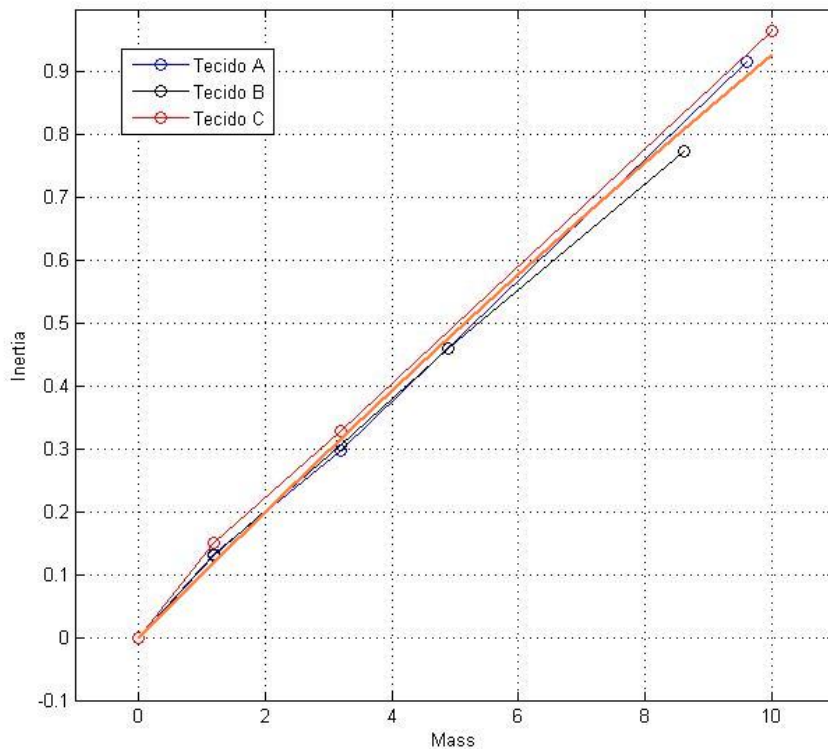


Figura 17 - Curva de Calibração

A Figura 17 apresenta todas as curvas obtidas com os testes, bem como, em laranja, a curva de calibração gerada. Esta se trata de uma aproximação de grau 2, por não haver necessidade inicial de maior precisão. Por motivos de confidencialidade, a equação da curva não será aqui exposta.

6.3: Robustez à Forma de Carregamento

Como inicialmente descrito, existem duas formas de alcançarmos os limites de estimação com uma mesma carga, sendo estas a aplicação de um carregamento perfeitamente distribuído e de um anel perfeitamente alocado na borda do cesto. Na prática, no entanto, é bastante complicado atingir níveis ótimos de carregamento. Como o intuito aqui é a representação de possíveis formas utilizadas pelo

consumidor, foi adicionado, para os primeiros testes, um terceiro tipo de carregamento: *dump*. Do inglês, significa que a carga é simplesmente largada dentro do cesto, e o ciclo se inicia sem que haja qualquer intenção do usuário em distribuí-la.

O primeiro teste foi realizado com cargas do tipo C, em quantidade 3.2 – lembrando que, por confidencialidade, a quantidade de carga está em escala de 0 a 10. O resultado pode ser visto a seguir.

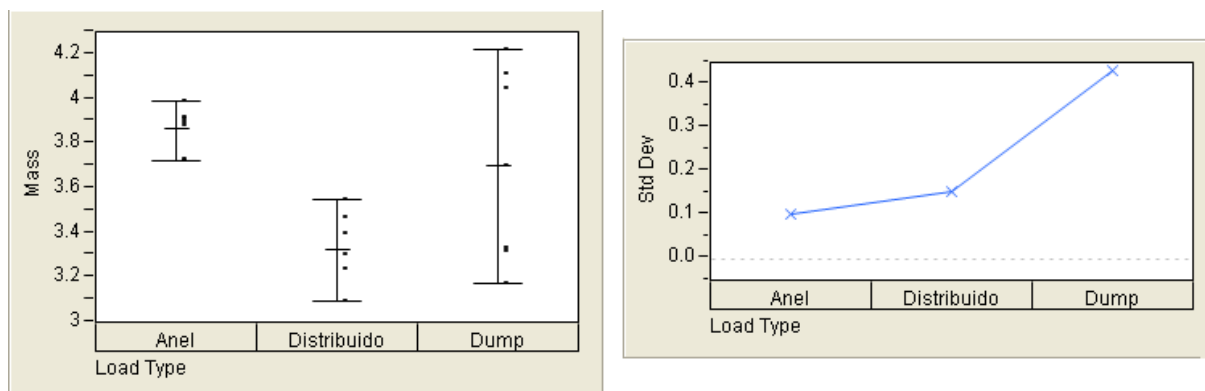


Figura 18 - Gráfico de Variabilidade e Desvio Padrão Carga C Massa 3.2

A Figura 18 apresenta o gráfico de variabilidade e o desvio padrão de cada distribuição. É notável que o carregamento distribuído, como esperado, possui os menores valores de inércia. A média do carregamento em anel, ainda, é a maior dos três. A surpresa aqui foi o carregamento dump, que, apesar de ter sua média posicionada entre a média dos outros, como esperado, teve casos extremos com valores de estimacão ainda maiores que o carregamento em anel.

O próximo passo dado foi, então, a realização de testes com o mesmo tipo de carga, C, para o limite de massa recomendado para a máquina. Devido à impossibilidade física de se alocar a carga em forma de anel, uma vez que o cesto é praticamente cheio por completo, este tipo de carregamento não foi utilizado. Os resultados são apresentados a seguir.

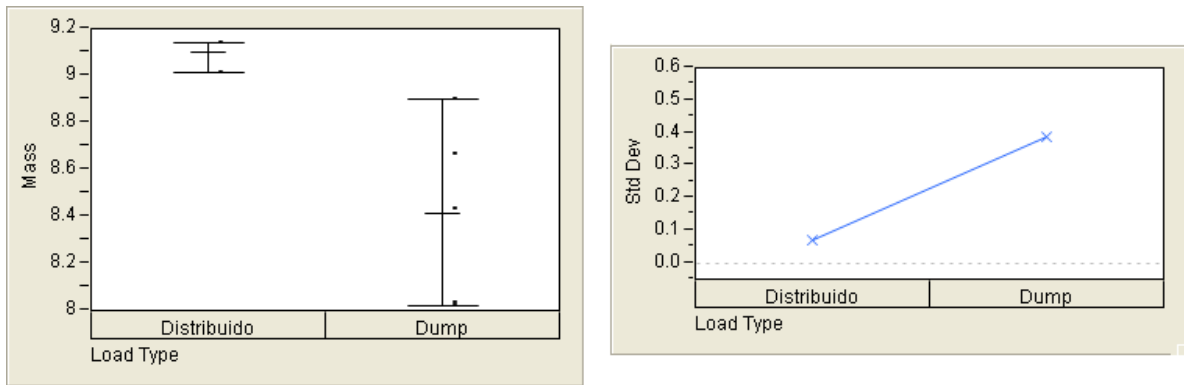


Figura 19 - Gráfico de Variabilidade e Desvio Padrão Carga C Massa 10

Surpreendentemente, neste caso tivemos valores de dump menores que distribuído. Entende-se que, devido às suas características, o carregamento dump faz com que a carga se centralize em um ponto, formando um foco de massa centralizado, o que reduz a inércia. O mesmo não ocorre para cargas menores, pois, para elas, existe espaço para que se realoquem durante a execução do algoritmo, ou para que o ponto focal da massa seja fora do eixo, causando inércia maior.

Os próximos testes, no entanto, foram realizados com cargas menores. Baseando-se no teste para carga 3.2 optou-se por deixar de fora, agora, o carregamento dump.

Para o tipo de A, apenas a carga 3.2 foi usada.

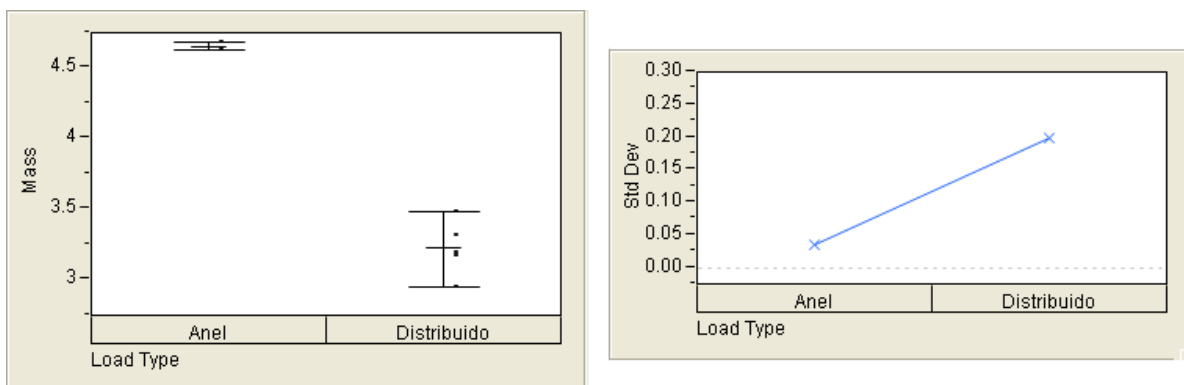


Figura 20 - Gráfico de Variabilidade e Desvio Padrão Carga A

O resultado se deu conforme esperado, tendo estimativa bem maior para a carga em anel que distribuída.

Foram feitos, então, os últimos testes, com carga B e carregamentos anel e distribuído, quantidade de carga 1.2 e 4.8.

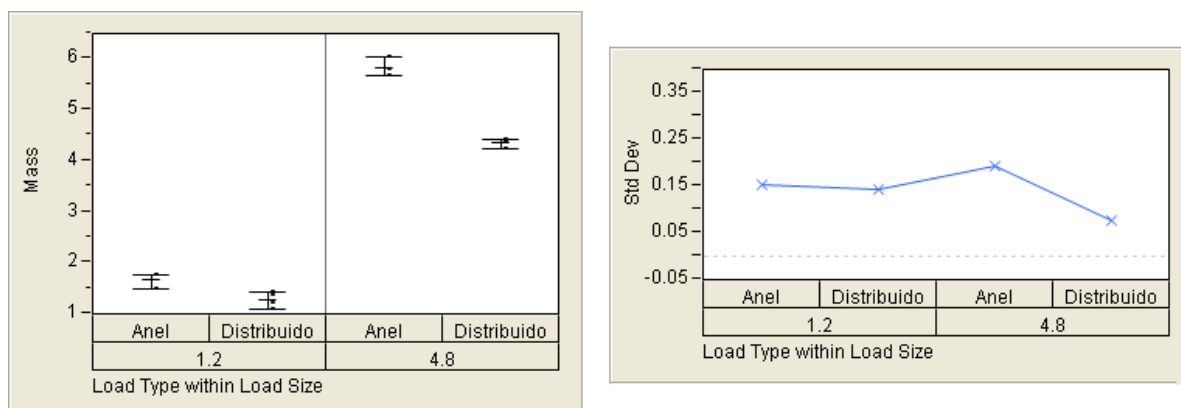


Figura 21 - Gráfico de Variabilidade e Desvio Padrão Carga B

Mais uma vez os resultados obtidos foram condizentes com o previsto, tanto para quantidade de carga 1.2 quanto para 4.8.

Com todos estes resultados em mãos foi possível então a realização da comparação dos mesmos com os níveis de lavação definidos para a máquina. Para reduzir ao mínimo as chances de uma das cargas ser reconhecida como nível diferente, optou-se por utilizar 3 desvios padrão como limite. Assim, a média de cada teste, mais ou menos 3 desvios padrão, não deveria atingir o limite superior ou inferior de seu nível de lavação.

Por não ser permitido citar a quantidade de níveis esperados, a comparação real não será aqui demonstrada. Vale ressaltar, no entanto, que os objetivos foram atingidos, e as cargas não ultrapassaram os valores limite.

Se, no entanto, obtivéssemos resultados contrários, o primeiro passo a ser revisto seria a curva de calibração. Esta poderia ser aproximada por um polinômio de maior ordem, ou outro polinômio de mesma ordem, até que a conversão estivesse dentro dos padrões. Existiria, ainda, a possibilidade de termos um problema com o sistema de medição. Este exigiria pesquisa aprofundada a respeito das causas, para então agir diretamente nelas.

Capítulo 7: Conclusões e Perspectivas

As etapas dispostas neste trabalho fazem parte dos últimos testes pertinentes ao algoritmo de detecção de massa de carga seca. O objetivo era determinar a robustez deste para possibilitar sua inserção nos produtos da Whirlpool, que serão então produzidos em massa e distribuídos para diversos países.

Devido às características citadas, era necessário que fosse minimizada qualquer chance de ocorrência de falha, especialmente tratando-se de variação de produto para produto. Ainda, a robustez a fatores ambientais e condições de uso, bem como interferência do operador, era essencial.

Os testes desenvolvidos objetivaram, então, entender o comportamento do sistema para cada caso crítico, permitindo um conhecimento maior a respeito do mesmo e, conseqüentemente, da sua robustez.

A análise dos dados obtidos resultou, por meio do teste geral de robustez na confirmação da necessidade de um teste de calibração para a inércia zero, além de assegurar que não existirão variações no resultado pelas variáveis testadas.

Ainda, por meio da determinação da curva de calibração e posterior teste de robustez à forma de carregamento, foi alcançado o objetivo de garantir que determinadas cargas estivessem dentro de um nível pré-definido de lavagem, sendo robustas a variações impostas pelo operador ao carregar a máquina.

A confirmação de que o algoritmo é robusto e funcional traz um ganho bastante considerável para a companhia, que agora tem a possibilidade de aplicá-lo aos seus produtos. Por tratar-se de um método de estimação sem sensores, espera-se que seja possível produzir máquinas de lavar roupas com funcionalidades bastante avançadas sem a introdução de custos. Em um mercado onde a concorrência é cada vez maior, esta implementação pode ser um diferencial suficiente para alavancar as vendas e garantir a manutenção da liderança, aliando qualidade com menor preço.

Capítulo 8: Bibliografia

[1] **Anexo:** Lista de momentos de inércia. Disponível em: <http://pt.wikipedia.org/wiki/Anexo:Lista_de_momentos_de_in%C3%A9rcia>. Acesso em: Junho de 2014.

[2] **Fractional Factorial DOE.** Disponível em: <<http://www.isixsigma.com/dictionary/fractional-factorial-doe/>>. Acesso em: Junho de 2014.

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

[4] HILD C., SANDERS D., ROSS B, **Mapas de Raciocínio.** *Quality Engineering*, 1999-2000, v.12, n. 1.

Patent US20060242768 - Method and apparatus for monitoring load size and load imbalance in washing machine. Disponível em: <<http://www.google.com.br/patents/US20060242768>>. Acesso em: Junho de 2014.

[5] OLIVEIRA, F. E. de. **Desenvolvimento de rotinas de sensoriamento indireto para automação de ciclo de lavadoras de roupas.** 2013, UFSC.

[6] **Patent EP2056078A2** - Load measuring apparatus and method. Disponível em: <<https://www.google.com/patents/EP2056078A2>>. Acesso em Junho 2014.

[7] SANDERS D., ROSS B., COLEMAN J. **O Mapa de Processo.** Six Sigma Associates.

[8] **Sobre << Whirlpool Latin America.** Disponível em: <<http://www.whirlpool.com.br/pagina/sobre/>>. Acesso em: Junho de 2014.

[9] TOMELIN, L. R. **Estudo Comparativo de Métodos de Detecção e Estimção de Carga Seca e Desbalanceamento em Lavadoras de Eixo Vertical.** 2014, UFSC.

[10] **Whirlpool Corporation** – About Overview. Disponível em: <<http://www.whirlpoolcorp.com/about/overview.aspx>>. Acesso em: Junho de 2014.