



Departamento de Engenharia Elétrica e de Computação

**ESTUDOS DE MÉTODOS E ALTERNATIVAS  
PARA AUTOMATIZAÇÃO DA DETECÇÃO  
DE CARGA NAS LAVADORAS**

SÃO CARLOS

2016



**Ailton Akira Alves Cordeiro**

**ESTUDOS DE MÉTODOS E ALTERNATIVAS  
PARA AUTOMATIZAÇÃO DA DETECÇÃO  
DE CARGA NAS LAVADORAS**

Trabalho de Conclusão de Curso  
Apresentado à Escola de Engenharia de  
São Carlos, da Universidade de São Paulo

Curso de Engenharia Elétrica  
com ênfase em Eletrônica

Orientador: Prof. Dr. Marco Henrique Terra

São Carlos  
2016

AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO,  
POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS  
DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

C794e      Cordeiro, Ailton Akira Alves  
             Estudos de Métodos e Alternativas para  
Automatização da Detecção de Carga nas Lavadoras /  
Ailton Akira Alves Cordeiro; orientador Marco Henrique  
Terra. São Carlos, 2016.

Monografia (Graduação em Engenharia Elétrica com  
ênfase em Eletrônica) -- Escola de Engenharia de São  
Carlos da Universidade de São Paulo, 2016.

1. Lavadora de roupas. 2. Sensores. 3.  
Transdutores. 4. Sensores IMU. 5. Processo de  
Fabricação. I. Título.

# FOLHA DE APROVAÇÃO

Nome: Ailton Akira Alves Cordeiro

Título: “Estudos de métodos e alternativas para automatização da detecção de carga nas lavadoras”

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado  
em 23 / 11 / 2016,

com NOTA (5,0 , cinco), pela Comissão Julgadora:

*Prof. Titular Marco Henrique Terra - Orientador - SEL/EESC/USP*

*Prof. Assistente Carlos Goldenberg - SEL/EESC/USP*

*Prof. Assistente Edson Gesualdo - SEL/EESC/USP*

Coordenador da CoC-Engenharia Elétrica - EESC/USP:  
Prof. Associado José Carlos de Melo Vieira Júnior



## DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meus pais, por todo o trabalho e incentivo nesta jornada de aprendizado, e a todos os amigos e pessoas que fizeram da minha vida em São Carlos uma experiência fantástica.



## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço, primeiramente, ao meu orientador Prof. Dr. Marco Henrique Terra, que tem apoiado, auxiliado e ensinado ao longo da graduação.

À Prof.<sup>a</sup> Ana Claudia Nabarro por expandir os meus horizontes e ajudar a superar as dificuldades da disciplina: Cálculo III.

Aos professores Carlos Goldenberg, Jerson Vargas e Edson Gesualdo por, de forma direta ou indireta, acompanharem a minha trajetória na graduação e contribuírem para a minha evolução pessoal e profissional.



“Uma pessoa inteligente resolve um problema, um sábio o previne.”

Albert Einstein



## SUMÁRIO

|   |           |
|---|-----------|
| <b>RESUMO.....</b>  | <b>ix</b> |
| <b>ABSTRACT.....</b>  | <b>xi</b> |
| <b>INTRODUÇÃO.....</b>  | <b>1</b>  |
| <b>1. MOTIVAÇÃO.....</b>                                      | <b>3</b>  |
| 1.1 ANÁLISE DE NECESSIDADES.....                              | 3         |
| 1.2 ANÁLISE DE REQUISITOS.....                                | 3         |
| <b>2 ESTUDOS DO EQUIPAMENTO.....</b>                          | <b>6</b>  |
| 2.1 MODELOS DE MÁQUINAS DE LAVAR ROUPAS.....                  | 6         |
| 2.2 MÁQUINA ESTUDADA.....                                     | 7         |
| 2.2.1 FUNCIONAMENTO DA MÁQUINA ESTUDADA.....                  | 8         |
| 2.2.2 PRESSOSTATO.....  | 9         |
| 2.2.3 MOTOR DE ÍMÃ PERMANENTE.....                            | 10        |
| 2.2.4 CHICOTE ELÉTRICO DAS LAVADORAS.....                     | 11        |
| <b>3 PROPOSTAS DE FERRAMENTAS PARA DETECÇÃO DE CARGA.....</b> | <b>12</b> |
| 3.1 ALGORITMOS DE ESTIMATIVA DE CARGA.....                    | 12        |
| 3.1.1 ALGORITMO DE MÉTODOS COMBINADOS, PETRONILHO E TERRA...  | 12        |
| 3.1.2 CONCLUSÃO DO ALGORITMO.....                             | 15        |
| 3.2 CÉLULA DE PESO.....                                       | 16        |
| 3.2.1 INSERÇÃO DA CÉLULA DE PESO SOB O CESTO.....             | 17        |
| 3.2.2 INSERÇÃO DA CÉLULA DE PESO NOS PÉS DA MÁQUINA.....      | 18        |
| 3.2.3 INSERÇÃO DA CÉLULA DE PESO NAS MOLAS DAS VARETAS.....   | 19        |
| 3.3 INSERÇÃO DE UM DINAMÔMETRO NAS MOLAS DAS VARETAS.....     | 20        |
| 3.4 INSERÇÃO DE UM SENSOR DE REFERENCIAL INERCIAL.....        | 21        |
| <b>4 RESULTADOS.....</b>                                      | <b>23</b> |
| 4.1 ANÁLISE DE PREÇO.....                                     | 23        |
| 4.2 RESULTADOS DAS ANÁLISES.....                              | 24        |
| 4.3 TESTES PRÁTICOS.....                                      | 26        |
| 4.4 RESTRIÇÕES.....   | 29        |
| 4.5 FLUXOGRAMA DO MODELO PROPOSTO.....                        | 30        |
| 4.6 OUTRAS POSSIBILIDADES COM O PRESSOSTATO.....              | 31        |
| 4.6.1 PRESSOSTATO COM MAIS NÍVEIS DE SELEÇÃO.....             | 31        |
| 4.6.2 MEDIÇÃO DA CARGA ATRAVÉS DO PRESSOSTATO.....            | 31        |

|  |           |
|--|-----------|
| <b>CONCLUSÕES.....</b>                       | <b>33</b> |
| <b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>       | <b>35</b> |
| <b>APÊNDICE A: PROGRAMA EM MATLAB® .....</b> | <b>37</b> |

## RESUMO

CORDEIRO, A. A. A. ***Estudos de métodos e alternativas para automatização da detecção de carga nas lavadoras.*** 70p. Trabalho de Conclusão de Curso – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2016.

O objetivo deste trabalho é realizar os levantamentos sobre alternativas e métodos para automatizar a detecção de carga adicionada a uma lavadora de roupas, para que a mesma possa inserir a quantidade ideal de água para a lavagem, sem a ajuda do consumidor. A máquina estudada é a de modelo de eixo vertical com tampa superior, que utiliza um motor de ímã permanente sem escovas.

As propostas aqui levantadas e estudadas levam em conta a construção atual das máquinas, de onde se tiram as análises de requisitos e as restrições em relação a cada alternativa e ferramenta que possa ser utilizada para a detecção da carga no cesto, que exige considerável exatidão e precisão para evitar o desperdício de água no processo da lavagem. Serão estudadas algumas propostas de sensores e transdutores que possam ser inseridos na máquina, sendo cada uma analisada quanto aos quesitos que cumprem ou deixam de cumprir, tendo-se a finalidade da obtenção da melhor proposta de ferramenta capaz de medir a quantidade de água a ser utilizada na lavagem, fazendo-se com que a mesma não dependa da decisão do usuário; que seja robusta e confiável, e que, ao mesmo tempo, não exija altos investimentos por parte dos fabricantes e do cliente final.

**Palavras-Chave:** Lavadora de roupas, Sensores, Transdutores, Sensores IMU, Processo de Fabricação.



## ABSTRACT

CORDEIRO, A. A. A. ***Studies of methods and alternatives for load detection automation in washers.*** 70p. Course Conclusion Work - Engineering School of São Carlos, University of São Paulo, 2016.

The objective of this work is to carry out surveys on alternatives and methods to automate load sensing added to a washing machine, so that it can enter the optimal amount of water for washing without consumer help. The study machine is the vertical axis model with top cover, which uses a permanent magnet brushless motor.

Proposals raised and studied here take into account the actual construction of the machines, which are taken the analysis requirements and restrictions for each alternative tool that can be used for load sensing the basket, which requires considerable accuracy and precision to avoid the waste of water in the washing process. Some proposals of sensors and transducers that may be inserted into the machine will be studied, and each analyzed for questions that meet or fail to meet, having the purpose of obtaining the best tool proposal capable to measure the amount of water to be used in the washings, making with that it does not depend on the user's decision; that is robust and reliable, and at the same time, does not require high investments by manufacturers and the customer.

**Keywords:** Washing machine, Sensors, Transducers, IMU Sensors, Manufacturing Process.



## INTRODUÇÃO

Muito se debate, hoje em dia, sobre o impacto das ações humanas sobre o clima e os recursos do planeta. Com a crescente preocupação quanto à sustentabilidade do planeta, instituições tentam incentivar fabricantes a lançarem produtos mais eficientes e que consigam realizar o mesmo trabalho consumindo menos energia e insumos.

No Brasil, produtos com alto consumo de energia e água não são proibidos de serem comercializados, mas existe a classificação segundo os programas de etiquetagem, dentre eles o selo PROCEL (Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica) de economia de energia, instituído por Decreto Presidencial em 8 de dezembro de 1993 [1]. Este selo tem por objetivo orientar o consumidor no ato da compra, indicando os produtos que apresentam os melhores índices de eficiência energética dentro de cada categoria, proporcionando, assim, economia na conta de energia elétrica; além de estimular a fabricação e a comercialização de produtos mais eficientes para contribuir com a sustentabilidade. Por estas razões, as empresas investem dinheiro e esforço para encontrar soluções para tornar os seus produtos mais eficientes.

Um dos eletrodomésticos que mais consomem água e energia é a máquina de lavar roupa, utilizada em muitas residências, por todo o mundo, com água e eletricidade. A Figura 1.1 mostra a lavadora de eixo vertical com tampa superior, modelo dos mais utilizados na aplicação e que será o principal objeto de estudo para o tema abordado.



Figura 1.1: Máquina de lavar com eixo vertical [1].

# 1. MOTIVAÇÃO

## 1.1 Análise de Necessidades

Uma das técnicas que contribuem para a diminuição do consumo de água é a detecção automática da quantidade de roupa, para que a própria máquina determine o nível de água adequado para cada lavagem, diferentemente do que ocorre quando o nível de água é ajustado pelo próprio usuário, onde pode haver superdimensionamento da quantidade de água necessária e acarretar desperdícios no consumo tanto de energia como no de água, ou ainda haver o subdimensionamento de água e a roupa não sair adequadamente lavada. O melhor ajuste do nível de água também contribui na qualidade da lavagem, por diluir adequadamente os insumos utilizados (e.g. sabão, alvejante e amaciante), e por ajudar na diminuição do consumo de energia elétrica nas máquinas, pois um ciclo de lavagem com um menor volume de água exige menos esforço eletromecânico do motor.

Outra vantagem que o dimensionamento automático do nível de água possui é a maior facilidade de interação do usuário com a máquina, dado que o mesmo não terá que se preocupar com as configurações desta em cada lavagem. Logo, surge a necessidade de uma ferramenta que auxilie na detecção da quantidade de carga para que a máquina possa fazer o nivelamento automático da água.

## 1.2 Análise de Requisitos

Deve-se ter uma ferramenta com boa precisão e exatidão, pois com um erro de 1 centímetro na quantidade de água, em uma coluna de água de uma máquina de 27 polegadas de diâmetro, com capacidade de aproximadamente 147 litros [1] pode representar um desvio de cerca de 2,7 litros em cada ciclo de enchimento do equipamento, podendo influenciar significativamente no consumo de água mundial.

As Figuras 1.2 e 1.3 [1] mostram a média do consumo de água e de energia por ciclo de lavagem para máquina de lavar roupa ao redor do mundo.

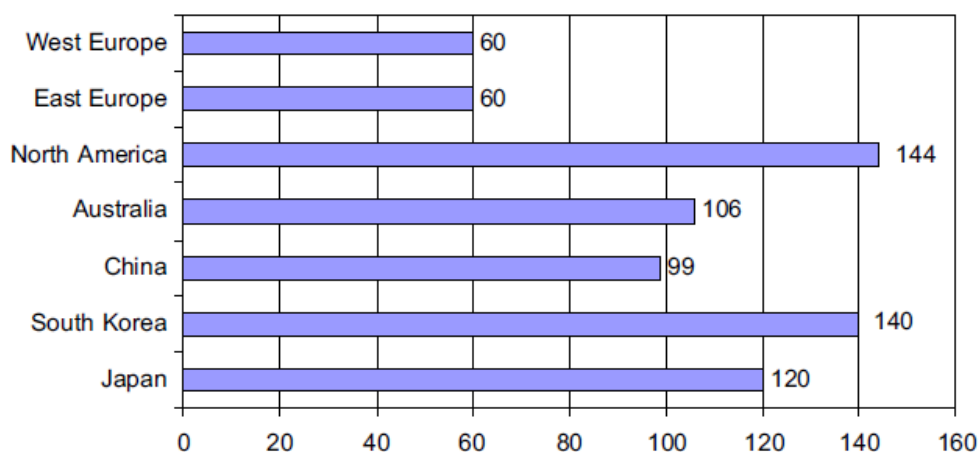


Figura 1.2: Média do consumo de água por ciclo no mundo, em litros [1].

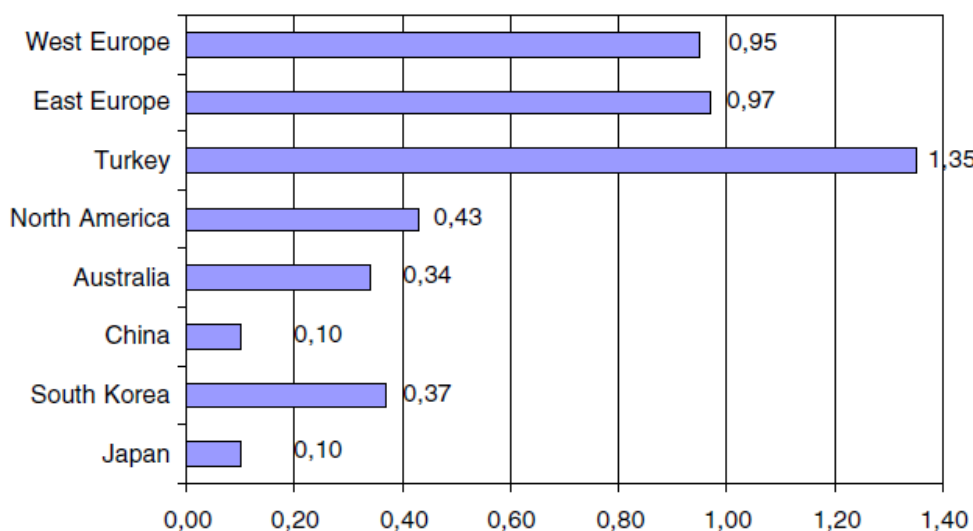


Figura 1.3: Média do consumo de eletricidade por ciclo no mundo, em kWh [1].

Pode-se definir alguns requisitos para as ferramentas que serão aqui propostas, para a estimativa automática de quantidade de carga em uma lavadora.

- Durabilidade: se a ferramenta estudada, ao ser implementada, aparenta ter alta duração ou se sofrerá desgaste em excesso;
- Confiabilidade: se os valores registrados pelos sensores transmitem confiança ou se serão suscetíveis aos ruídos;
- Robustez exigida: se a instalação precisará ser robusta, para evitar o desgaste da ferramenta;
- Precisão: se o transdutor, aparentemente, apresentará valores com baixo desvio padrão;
- Repetibilidade: se o sensor pode realizar as medições mantendo as mesmas características, e se ele é capaz de fazer uma mesma leitura de um mesmo valor após diversas leituras;

- Investimento exigido: o quanto que a implementação aparenta acrescentar nos custos de desenvolvimento, implementação e fabricação do sistema proposto;
- Eficiência energética: o quanto o equipamento propõe em questão de economia de energia e também dos recursos;
- Complexidade no processo de fabricação: o quanto que a adição de uma nova ferramenta impactará quanto ao processo de fabricação e montagem do sistema proposto. Vale destacar que as fabricantes procuram sempre desenvolver novos produtos e novas soluções que impliquem no menor impacto possível sobre o processo de fabricação dos mesmos.

## 2. ESTUDOS DO EQUIPAMENTO

### 2.1 Modelos de máquina de lavar roupas

Os modelos mais utilizados podem ser divididos, basicamente, em dois subgrupos principais [1]:

- Eixo vertical ("*Top Load*"): modelo cujo carregamento de carga é feito pela parte superior da máquina, onde também se localiza a tampa;
- Eixo horizontal ("*Front Load*"): modelo cujo carregamento de carga é feito pela parte frontal da máquina, onde também se localiza a tampa.

As máquinas de eixo vertical ainda podem ser divididas nos modelos que utilizam agitadores e as que usam impulsos (também conhecidos como "*impellers*"). A Figura 2.1 [1] mostra a divisão dos modelos, onde a linha tracejada delimita a aplicação dos estudos neste trabalho.

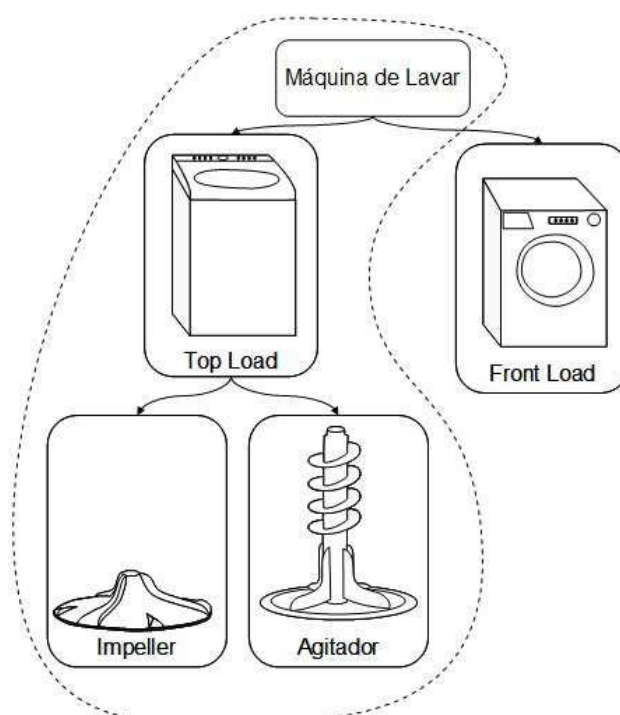


Figura 2.1: Modelos de máquinas de lavar [1].

## 2.2 Máquina estudada

A máquina utilizada para os estudos é constituída por um tanque plástico suspenso por quatro varetas de suspensão. A Figura 2.2 [1] mostra um exemplo deste tipo de suspensão. Dentro do tanque tem-se um cesto de aço inoxidável com furos para possibilitar a extração de água. Quando este cesto é rotacionado em torno do seu eixo, existe também um agitador ou um impulsor para agitar as roupas durante o processo de lavagem. Estes dispositivos são conectados diretamente, através de um eixo, à um motor DC de ímã permanente sem escovas.

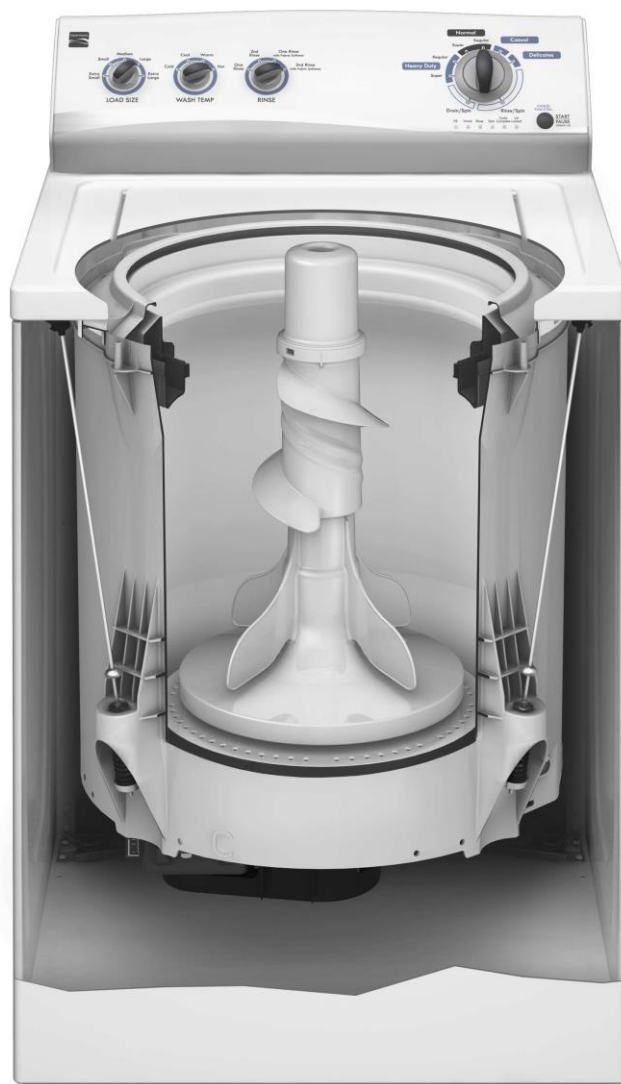


Figura 2.2: Máquina de lavar com eixo vertical em corte [1].

Para centrifugar a carga, o cesto é acoplado ao eixo do motor através de um mecanismo de engate. Existem ainda uma bomba de drenagem e válvulas para o enchimento da máquina, assim como um controle eletrônico, que controla o motor, a bomba de drenagem e as válvulas de entrada de água, contendo um micro controlador e relês.

### 2.2.1 Funcionamento da máquina estudada

O modelo estudado possui acionamento via painel, mostrado na Figura 2.3 [9], onde o usuário escolhe o regime de operação, a quantidade de ciclos de molho e lavagem, o nivelamento de água, a quantidade de enxágues, entre outros opcionais.



Figura 2.3: Painel de interface de uma máquina de lavar [9].

Ao se concluir as configurações iniciais, e tendo-se colocado os insumos a ser utilizados na lavagem, o usuário deve apertar o botão “iniciar” presente no painel. Feito isso, a máquina irá, inicialmente, inserir o volume de água correspondente ao nível selecionado (extra baixo, baixo, médio ou alto), que é verificado através do pressostato, transdutor que será explicado melhor na seção 2.4.

Tendo-se enchido o cesto, ocorre uma agitação inicial para misturar a água com a roupa e o sabão em pó, deixando-se a roupa repousar “em molho” logo em seguida. A quantidade de ciclos de agitação e intervalos de molho varia conforme a opção que o usuário selecionar com o botão girante do painel.

Após cumprir todas as etapas de agitação e molho, a máquina esvazia o cesto e faz uma centrifugação para eliminar o máximo possível da mistura de água e sabão presente nas roupas. Logo em seguida, a válvula de admissão é novamente aberta para se inserir, novamente, o mesmo volume de água correspondente ao nível selecionado. Por fim, a máquina inicia o ciclo de agitação, para que a água passe a concentrar todos os resíduos de sabão, escoar toda a água e faz a centrifugação das roupas.

### **2.2.2 Pressostato**

O Pressostato, na máquina de lavar, tem a função de identificar o nível de água no tanque da máquina de lavar. Dentro do corpo do pressostato existe um fole, que quando exercida uma pressão, aciona os contatos internos, através de chaves mecânicas internas no corpo da peça. Essa pressão é de ar, vem através de uma mangueira ligada a um orifício de entrada do pressostato, essa mangueira, é ligada na câmara de ar do tanque da máquina de lavar, quando a água vai ocupando os espaços no tanque, ela começa a entrar dentro desta câmara, empurrando o ar presente dentro dela e exercendo, assim, pressão no fole interno do pressostato, acionando os contatos eletromecânicos e informado a placa eletrônica que a água chegou no nível correspondente ao ajustado no botão.

A Figura 2.4 mostra um pressostato utilizado nas lavadoras.

Como visto na Figura 2.3, o sistema disponibiliza apenas 4 deles para o usuário poder configurar a máquina. Uma possibilidade de melhoria do equipamento também seria o aumento na quantidade de níveis de água disponibilizados pela lavadora, mas isso traria maiores custos de fabricação, aumentaria a complexidade do painel e, além disso, a poluição visual poderia confundir o usuário. Tal melhoria na quantidade de níveis pode ser estudada ao se verificar algumas ferramentas que possam fazer a medição de carga no cesto, como será visto adiante.

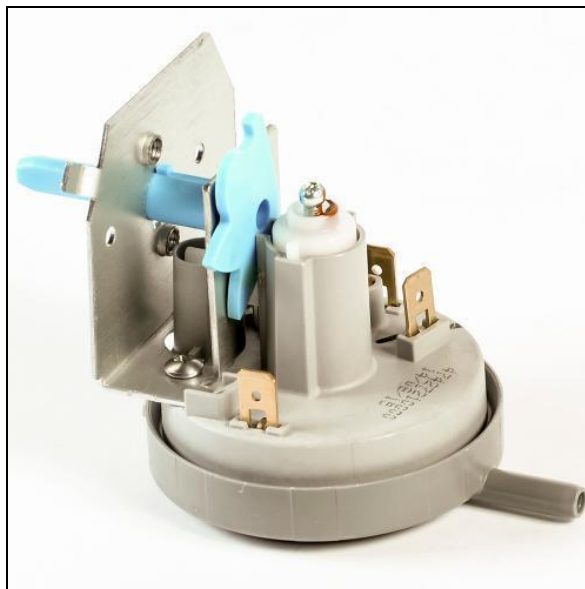


Figura 2.4: Pressostato utilizado em lavadoras [10].

### 2.2.3 Motor de Ímã Permanente

As características de torque e velocidade do motor de ímã permanente sem escovas [2] são descritas pela equações 2.1; 2.2 e 2.3.

$$\omega = \omega_0 \left[ 1 - \frac{T}{T_0} \right] \quad (2.1)$$

$$\omega_0 = \frac{V}{k\phi} \text{ rad/sec} \quad (2.2)$$

$$T_0 = k\phi I_0 \quad (2.3)$$

Sendo:

- $I_0$  = corrente do rotor travado;
- $T_0$  = torque do rotor travado;
- $\omega_0$  = velocidade angular em vazio;
- $\phi$  = fluxo magnético no entreferro do motor;
- $V$  = tensão de alimentação
- $T$  = torque do motor em carga;
- $\omega$  = velocidade angular do motor em carga.

Logo, a velocidade do motor é essencialmente controlada pela tensão de alimentação  $V$ , e assim o motor utiliza apenas a quantidade necessária de corrente para gerar o torque na velocidade desejada.

Portanto, um superdimensionamento de água no equipamento também acarretará no desperdício de energia elétrica, tornando necessária uma ferramenta com boa precisão para evitar todos os desperdícios.

A Figura 2.5 [12] mostra o motor de ímã permanente sem escovas, detalhando as componentes “rotor” e “estator”.



Figura 2.5: Constituição do motor de ímã permanente sem escovas [12].

#### 2.2.4 Chicote elétrico de lavadoras

Todos os componentes elétricos, eletrônicos e eletromecânicos são interligados através de um chicote elétrico, que em boa parte dos casos, são fornecidos prontos para as fabricantes das lavadoras os inserir durante as etapas finais de montagem. A Figura 2.6 [5] mostra um chicote utilizado em um modelo de máquina. Nota-se que, ao se acrescentar um sensor ou uma ferramenta no sistema, o leiaute do chicote terá que ser mudado para que se faça a ligação elétrica pertinente. Logo, é recomendável ter-se atenção quanto aos componentes que serão adicionados ao sistema, tanto em quantidade como em localização dos mesmos.



Figura 2.6: Chicote elétrico de uma máquina de lavar [5].

### 3. PROPOSTAS DE FERRAMENTAS PARA DETECÇÃO DE CARGA

Nesta seção, serão estudadas as propostas de ferramentas, sensores, transdutores e até mesmo algoritmos que possam detectar a carga de roupas no cesto.

#### 3.1 Algoritmos de estimativa de carga

##### 3.1.1 Algoritmo de Métodos Combinados, Petronilho e Terra (2010) [1].

O algoritmo de Métodos combinados, de Petronilho e Terra (2010) [1], faz uma combinação dos procedimentos e resultados obtidos no Planejamento de experimentos e no treinamento de *Percéptrons* multicamada (Redes Neurais). Tal algoritmo resultou na patente PI0905317-4 [11].

O Planejamento de experimentos parte do princípio mostrado na seção 2.3, que o torque gerado pelo motor é proporcional à corrente aplicada neste, e utilizou a corrente do motor como variável resposta para estimar a carga dentro do cesto, utilizando-se rampas de aceleração do cesto para imprimir ao motor uma taxa de aceleração constante, com a intenção de diferenciar a quantidade de cargas, pois as cargas maiores exigem um torque gerado maior do motor, e para uma mesma taxa de aceleração, quando comparadas com cargas menores ou com o cesto em vazio, o algoritmo do motor aplica diferentes níveis de corrente ao motor baseando-se na rampa de aceleração desejada e na quantidade de carga no cesto. Foi notado, também, que a distribuição da carga influencia bastante no resultado, fazendo-se necessária uma pequena centrifugação antes do início das medições, para melhor distribuir as cargas. Outro importante fator levado em conta foram os atritos estáticos e dinâmicos. O atrito estático levou à necessidade de se comandar o cesto para uma velocidade pequena e constante antes da rampa de aceleração constante ser iniciada. O atrito dinâmico levou à necessidade de se medir o tempo que o cesto demora para parar depois da rampa, e tal medida foi levada em consideração no cálculo da massa dentro do cesto.

Logo, foi elaborado, através do Planejamento de Experimentos [1], o Fluxograma mostrado na Figura 3.1 [1], com a lista de procedimentos iniciais para o cálculo da carga.

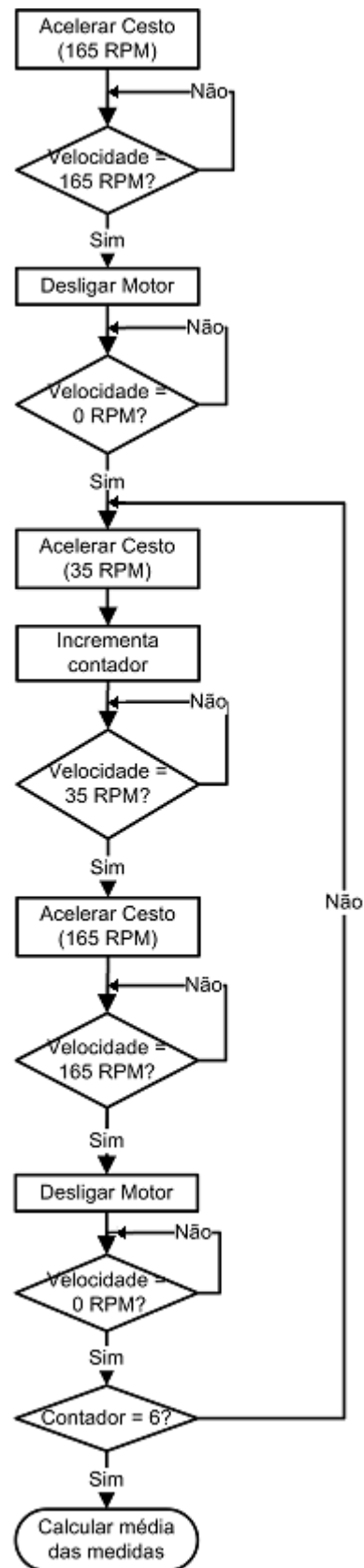


Figura 3.1: Fluxograma do algoritmo de Petronilho e Terra (2010) [1].

- 1) Acelerar o cesto até 165 RPM (Rotações Por Minuto).
- 2) Desligar o motor e esperar o cesto parar de girar (distribuição uniforme da carga).
- 3) Acelerar o cesto até 35 RPM (minimizar o efeito do atrito estático).
- 4) Medir a tensão de linha, as temperaturas do motor e do módulo de controle deste.
- 5) Acelerar o cesto até 165 RPM com uma taxa de aceleração constante.
- 6) Medir a corrente do motor entre as velocidades 55 e 155 RPM com uma taxa de aquisição constante e somar toda a corrente medida.
- 7) Desligar o motor e medir o tempo de desaceleração.
- 8) Repetir os passos 3 a 7 por mais seis vezes.
- 9) Calcular a média das seis medidas (para melhorar repetibilidade).

Como mencionado, estes procedimentos se fizeram necessários para a minimização da influência dos atritos estáticos e dinâmicos, distribuir uniformemente a carga, colher outras medidas que podem influenciar na medida de corrente, como a temperatura do motor e do módulo de controle.

A repetição do algoritmo por 6 vezes serve para filtrar ruídos que eventualmente possam interferir nas medidas, sendo um número não muito pequeno para permitir a filtragem adequada das medidas e não muito grande para que o ciclo de lavagem não se torne muito demorado. O resultado obtido no método de Planejamento de experimentos possuía um desvio padrão de 0,669 kg.

O método do treinamento das redes neurais também levou em consideração as seis medições, e o resultado apresentou desvio padrão de 0,28kg.

Aparentemente o método das redes neurais se mostrou com menor desvio padrão, mas nas ocasiões onde são introduzidos ruídos e variações de fatores, alguns resultados inaceitáveis foram produzidos, mostrando que este método não é robusto quanto aos ruídos e variações dos fatores relevantes. Daí a necessidade de se combinar os dois métodos.

O primeiro método é útil para se encontrar os fatores que influenciam o resultado desejado, para definir quais os valores de máximo e mínimo que cada variável pode assumir e definir fatores devem ser levados em consideração na hora dos testes. E o método da rede neural necessita de valores máximos e mínimos apresentados a rede durante o processo de treinamento, dado que ela desconhece o comportamento do processo fora de seus domínios de definição. Logo, foi realizada a separação do conjunto de treinamento do conjunto de teste, para garantir que os valores máximo e

mínimo de cada variável de entrada estejam presentes no conjunto de treinamento, garantindo a utilização do domínio de definição correto.

O resultado do treinamento com o novo conjunto de dados é mostrado na Figura 3.2 [1], onde o desvio padrão do erro foi de 0,303 kg; com robustez em relação às variações.

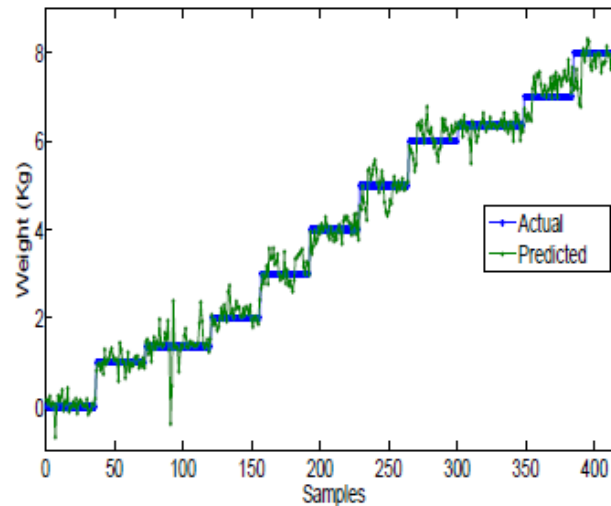


Figura 3.2: Resultado final dos métodos combinados [1].

Comparando-se com o resultado do método de Planejamento de experimentos por si só, foi obtida uma melhoria de 57% no desvio padrão do erro, representando, com a diferença de aproximadamente 0,4kg, uma quantidade de 5,9 litros de água a cada enchimento em uma máquina com capacidade de 147 litros [1].

### 3.1.2 Conclusão do algoritmo

O algoritmo apresentou uma boa proposta de ferramenta para a nivelção automática das máquinas, levando-se em consideração vários dos requisitos levantados na seção 1.2, como o investimento exigido, complexidade no processo de fabricação, robustez, repetibilidade, confiabilidade e durabilidade, além de ter se mostrado como uma ideia bem palpável e inovadora.

Infelizmente, a ideia deixa um pouco a desejar nos quesitos de eficiência energética e precisão, dado que um desvio padrão de 300 gramas não é alto, mas também não é o mais desejável dos valores, e que a máquina passaria a executar mais acionamentos do motor para as etapas iniciais de distribuição de carga e medição dos índices. Tal conceito de funcionamento faz o algoritmo não ser o mais desejável nas máquinas, dado que esse novo modelo iria gastar mais energia elétrica em cada

lavagem, comparado aos modelos mais tradicionais. Mesmo com a economia de água, o equipamento estaria passando a gastar mais energia, podendo deixar de obter os melhores selos da PROCEL e ser mal recebido pelos órgãos ambientais e de sustentabilidade.

### 3.2 Célula de peso

Serão estudadas a inserção de novas ferramentas e sensores para a detecção da quantidade de carga no cesto. A Figura 3.3 [4] mostra uma célula de peso.



Figura 3.3: Célula de peso para compressão [4].

A Célula de peso é um transdutor de força [13], o qual transforma uma grandeza física (força) em um sinal elétrico, sendo utilizada em balanças comerciais e outras aplicações que envolvem pesagem.

O princípio de funcionamento das células de carga baseia-se na variação da resistência ôhmica de um sensor denominado extensômetro, quando submetido a uma deformação. Os extensômetros são colados em uma peça metálica (alumínio, aço liga ou aço inoxidável), denominada corpo da célula de peso e inteiramente solidários à sua deformação.

A força atua, portanto, sobre o corpo da célula de peso e a sua deformação é transmitida aos extensômetros, que por sua vez medirão sua intensidade.

Outro efeito que também deve ser controlado é a “repetibilidade” ou seja, indicação da mesma deformação decorrente da aplicação da mesma carga sucessivamente, também deve ser verificada e controlada através do uso de materiais isotrópicos e da correta aplicação da força sobre a célula de peso.

Finalmente, deve-se considerar o fenômeno da “fluência”, que consiste na variação da deformação ao longo do tempo após a aplicação da carga.

### 3.2.1 Inserção de uma célula de peso sob o cesto

Para se evitar a adição de ciclos extras na lavagem da máquina, foram levantadas as possibilidades de se tentar inserir algum transdutor, como uma célula de peso, no sistema. O ponto trivial seria sob o cesto de roupas, a fim de se evitar uma alta complexidade quanto ao chicote elétrico da máquina.

A inserção de um novo sensor no sistema traria a necessidade de se alterar o leiaute do chicote, em função da adição de novos fios e/ou reposicionamento dos demais devido à alteração dos elementos do sistema. Uma ideia de incluir sensores em diversos pontos da máquina seria inviabilizada tanto pela complexidade do processo de montagem das fabricantes como pela mudança do chicote. Logo, uma primeira proposta seria de se tentar introduzir o transdutor sob o cesto, no centro.

Antes de tudo, é recomendável a atenção sobre o cesto da máquina e o sistema de amortecimento, mostrado na Figura 2.2. O cesto fica suspenso e é sustentado por varetas com molas. A adição de carga no cesto provoca um deslocamento vertical no mesmo, sendo que em alguns modelos, 1kg de carga desloca o cesto verticalmente para baixo em 2 mm. O cesto totalmente preenchido com água chega a deslocar 3 cm. Logo, a inserção de uma célula de peso sob o cesto não se torna tão simples de ser realizado, além do fato de não haver anteparos fixos sob o cesto.

A carenagem da máquina não é maciça por baixo, ou seja, o cesto não conta com nenhum outro apoio vertical a não ser as varetas. Então, para isso, seria necessária a inserção de algum braço mecânico flexível e ao mesmo tempo robusto, com molas, para servir de suporte ao transdutor e exercer a contra pressão necessária para o mesmo poder realizar a medição. Tal necessidade do braço mecânico é de natureza bem complexa, por envolver maleabilidade e amortecimento, simultaneamente, e elevaria o custo da ideia somente pelo desenvolvimento desse apoio, além de ser um potencial fator que impediria a fabricante de aderir à ideia. Mesmo esta sendo implementada com sucesso, haveria uma grande necessidade quanto aos estudos para a robustez, confiabilidade e precisão nas medições feitas pelo transdutor, pois o conjunto mecânico pode oferecer interferências, vindo tanto das molas das varetas como do próprio apoio, além de a movimentação e vibração da máquina durante o ciclo de lavagem oferecer grande ameaça à durabilidade do transdutor e exigir alta robustez por parte do mesmo. Portanto, inserir a célula de peso sob o cesto não se mostra a ideia mais viável quanto aos quesitos citados.

### 3.2.2 Inserção da célula de peso nos pés da máquina

Dadas as conclusões da seção 3.2.1, foi cogitada a tentativa de se inserir a célula de peso em outros pontos da máquina, dado que este transdutor parece o mais adequado para a aplicação, a princípio. A Figura 3.4 [6] mostra os detalhes dos pés da lavadora.



Figura 3.4: Detalhe dos pés niveladores de uma lavadora [6].

Pode-se verificar a construção do dispositivo, que consiste de um eixo com rosca para o nivelamento da lavadora em pisos e terrenos irregulares, sendo tal ajuste feito pelo usuário final.

A ideia de se inserir a célula de peso nos pés da máquina acaba sendo inviabilizada pelos seguintes fatores:

- A superfície do pé nivelador pode não ficar encostada na lataria da máquina, pois em função do ajuste de nivelamento, o usuário pode não rosquear o pé até o final da rosca. Assim sendo, a lataria poderia não exercer compressão sobre o transdutor.
- A inserção de apenas um transdutor em apenas um dos pés não seria viável pela falta de confiabilidade, dado que, além do item anterior, a medição de um canto do conjunto teria que passar por rotinas de interpolações para que se chegue no peso mais próximo do real, e eventualmente estará sujeito a erros devido às assimetrias do conjunto, dentre outros fatores.

Haveria a necessidade de se implantar um transdutor em mais de um pé, além de também tentar-se mudar o conceito e a construção deste para que a sua superfície garantidamente exerça pressão no transdutor, contra a lataria. Utilizando-se uma célula de peso em cada pé faria a ideia deixar a desejar, também, nos quesitos de investimento exigido e da complexidade de fabricação, devido à alteração numa peça utilizada pelos fabricantes e no chicote elétrico, que passaria a ter até 4 pares de fios para ser conectados nos transdutores.

Uma melhoria nessa ideia seria o de tentar implantar os sensores em pés diagonais, conforme esboço mostrado na Figura 3.5. As assimetrias do sistema e da carga podem, de maneira não muito complexa, ser compensados para que o cálculo dos valores seja confiável. Diminuindo a quantidade de dispositivos, diminui-se também o investimento e a complexidade no processo. No entanto, a mudança nos pés niveladores ainda se faria necessária, mesmo que parcialmente, e seria um potencial fator que impediria os fabricantes de aderir a essa ideia.

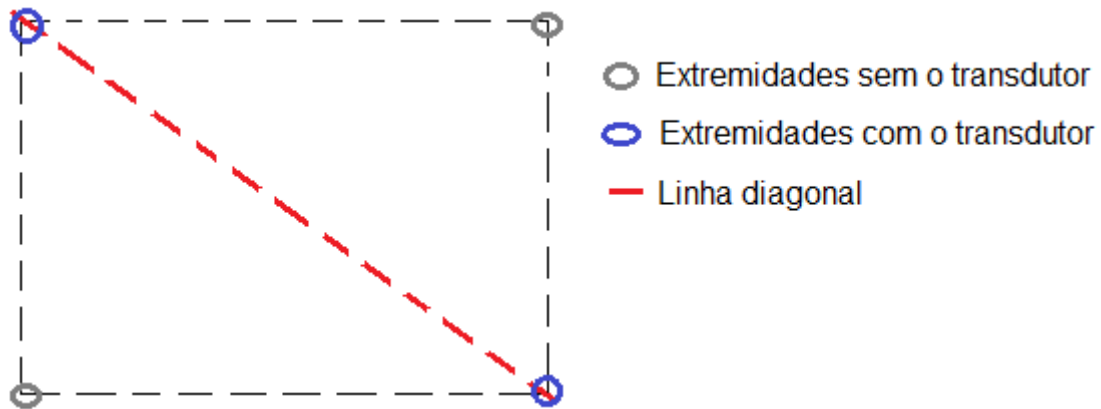


Figura 3.5: Esboço da vista superior do conjunto com transdutores na diagonal.

### 3.2.3 Inserção da célula de peso nas molas das varetas

Um outro ponto candidato a se introduzir a célula de peso seria nas varetas que mantêm o cesto suspenso. Elas são sustentadas por um anteparo fixo verticalmente.

Mas tem-se algumas das mesmas restrições presentes no item 3.2.2: introduzir-se somente um transdutor em uma das varetas deixa à desejar no quesito de confiabilidade, tornando-se necessária a inserção de mais de um transdutor.

A inserção de 4 transdutores, um em cada vareta, passa a perder no quesito da complexidade de fabricação, devido às alterações no leiaute do chicote e também por tornar a montagem mais complexa, com mais etapas.

Mas uma possibilidade seria a de se introduzir 2 transdutores, em varetas que formem uma extremidade diagonal, conforme o esboço mostrado na Figura 3.5. Esta ideia não fere o requisito da complexidade de fabricação tanto quanto a proposta de se colocar 4 deles, e a interpolação dos valores devido às assimetrias do conjunto também não parece ser difícil. O problema passaria a ser a confiabilidade e a durabilidade, pois as molas podem dar interferências nos valores medidos e o conjunto estaria sujeito ao desgaste, dado que as varetas vibram e se movimentam conforme o ciclo de lavagem. Ou seja, a ideia exige uma robustez por parte do transdutor exposto às vibrações e um estudo complexo para que os ruídos das molas não venham a interferir na medição.

### 3.3 Inserção de um dinamômetro nas molas das varetas

Dado que a célula de peso possa sofrer desgaste com as vibrações e a movimentação nas molas das varetas, foi cogitada a proposta do transdutor dinamômetro, mostrado na Figura 3.6 [7].



Figura 3.6: Dinamômetro [7].

Apesar de o dispositivo ser mais robusto quanto às vibrações e de maior confiabilidade, o alto custo do equipamento inviabiliza os estudos, além da alteração no processo de montagem quanto às molas das varetas, altura das molas e a fixação do transdutor em si.

### 3.4 Inserção de um sensor de referencial inercial

Dado que os transdutores anteriores não se mostraram os mais adequados para todos os requisitos desta aplicação, chega-se à ideia de se inserir uma unidade de referência inercial IMU (sigla do inglês *Inertial Measurement Unit* ).

Uma *unidade de medição inercial* ( IMU ) [8] é um dispositivo eletrônico que mede e relata uma força específica de um corpo , velocidade angular, e às vezes o campo magnético em torno do corpo, usando uma combinação de acelerômetros e giroscópios , por vezes, também magnetômetros . IMUs são normalmente utilizados para manobrar aeronaves , incluindo veículos aéreos não tripulados, entre muitos outros, e naves espaciais , incluindo satélites e sondas . Recentes desenvolvimentos permitem a produção de IMU habilitados para dispositivos GPS. Um IMU permite que um receptor GPS trabalhe quando os sinais de GPS não estão disponíveis, como em túneis, no interior de edifícios, ou quando interferência eletrônica está presente.

A Figura 3.7 mostra a imagem de um módulo IMU GY-87.

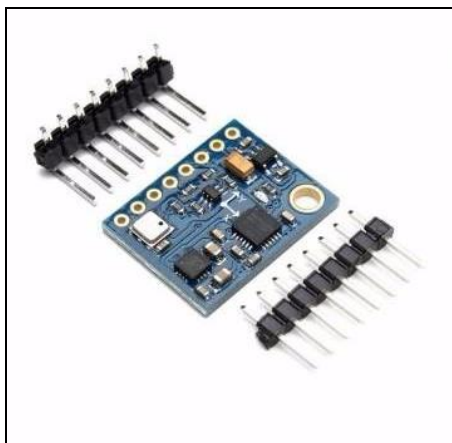


Figura 3.7: Módulo IMU GY-87 [16]

A ideia de se implementar o sensor sob o cesto da máquina fica um tanto interessante, dado que sua implementação pode implicar na substituição do pressostato, atual transdutor que mede o nível de água no cesto em função da pressão da coluna de água sobre o mesmo.

O sensor IMU não necessita de um apoio, como no caso da célula de peso da sessão 3.2.1, dado que o mesmo não necessita de um contra apoio para receber a compressão exercida pelo cesto com carga, além de poder medir tanto o deslocamento causado pela carga de roupas no cesto quanto pelo volume de água inserido no cesto. Ou seja, o transdutor pode cumprir a função do pressostato e também permitir que a máquina consiga dimensionar a quantidade de água automaticamente e verificar se o volume de água inserido está correto.

Atualmente, algumas máquinas possuem nivelamento discretizados de água, conforme mostrado na Figura 2.3 [9]. Estes níveis compreendem determinadas percentagens da capacidade total do cesto, e o volume de água em cada máquina pode variar em função do tamanho de cada uma delas.

Como visto na Figura 2.3, apesar de o pressostato poder mensurar diversos níveis de volume de água, o sistema disponibiliza apenas 4 deles para o usuário poder configurar a máquina. Uma possibilidade de melhoria do equipamento também seria o aumento na quantidade de níveis de água disponibilizados pela lavadora, mas isso traria maiores custos de fabricação, aumentaria a complexidade do painel e, além disso, a poluição visual poderia confundir o usuário.

No entanto, tal melhoria seria possível com a inserção do IMU, dado que, para cada nível de carga de roupa no cesto, o sistema interpretaria o valor medido para, assim, inserir o volume de água proporcional a essa carga, fazendo-se com que o domínio de níveis de água deixe de ser discretizado em poucos estados; e sem proporcionar a poluição visual ao usuário.

E sabendo-se do deslocamento vertical que o cesto faz para cada kg de carga no cesto, citado na seção 3.2.1, mesmo que isso varie de modelo para modelo, pode-se elaborar um sistema automatizado que não exige altos investimentos, não oferece alta complexidade no processo de fabricação, possua boa confiabilidade e repetibilidade, não exija robustez quanto ao desgaste e também não exige altos investimentos, uma vez que o custo adicional do sensor IMU e do chicote elétrico possam ser parcialmente compensados pelo custo do pressostato, que poderia deixar de ser utilizado.

Tal proposta, devidamente implementada, garante a economia de água e energia elétrica, aumentando a eficiência dos equipamentos e trazendo conforto para o usuário, que não mais terá que se preocupar em configurar alguns parâmetros da máquina antes da lavagem.

Se a fabricante quiser manter as opções de níveis de água tradicionais, ainda será possível fazê-lo sem ter que utilizar o pressostato na montagem, dado que bastaria definir os valores de deslocamento do sensor conforme os volumes conhecidos de água, e assim, o usuário poderia optar tanto na configuração de nivelamento automático tanto como pelo nivelamento tradicional, utilizado atualmente. Tal modificação faria o equipamento agregar um bom valor sob a ótica do cliente e possui execução palpável, havendo a necessidade de tentar-se baratear o módulo IMU.

## 4. RESULTADOS

### 4.1 Análise de preço

Diversas ferramentas foram abordadas e analisadas quanto aos outros requisitos.

Os preços médios das mesmas foram agrupados na Tabela 1, para fins comparativos.

Conforme pesquisas feitas [18], foram levantados os dados da Tabela 1, que mostra os preços médios de cada ferramenta.

O Pressostato atualmente utilizado possui preço médio de R\$ 19,00, aproximadamente [17].

A célula de peso estudada e mostrada na Figura 3.3 possui um preço médio de R\$ 14,00 [18]. Ela possui fundo de escala de 50kg, ficando restrita somente em medir a carga de roupas, não podendo medir o peso do cesto cheio de água. E necessita de um módulo amplificador para converter os dados para a linguagem do processador, fazendo o conjunto ter um custo na faixa de R\$ 26,00, aproximadamente. Um dos pontos de melhoria seria tentar-se baratear o conjunto, principalmente a parte da interface amplificadora. Uma célula de carga com capacidade superior a 136 kg possui preços superiores a R\$ 100,00 [18].

O dinamômetro digital, que é mais caro, possui preços superiores a R\$ 20,00 [18]; podendo trabalhar com cargas de até 40 kg, tendo restrições semelhantes ao da célula de peso de 50 kg.

Já o módulo IMU abordado, que é o GY-87, teria custos superiores a R\$ 50,00. Entretanto, pode trabalhar com os deslocamentos de fundo de escala de qualquer modelo, dado que os mesmos não atingem valores muito altos, podendo tanto medir a carga de roupas como também o deslocamento do cesto com o volume máximo de água, não possuindo as restrições de fundo de escala do dinamômetro e da célula de peso. As melhorias consistem em tentar-se baratear o conjunto para torná-lo mais viável, dado que o preço deste, sendo consideravelmente superior ao do pressostato atualmente utilizado (R\$ 19,00) [17], faria com que os fabricantes, a princípio, rejeitassem esta proposta.

Tabela 1: Comparativo de preços entre as ferramentas.

| Componente             | Preço médio |
|------------------------|-------------|
| Pressostato 4 níveis   | R\$ 19,00   |
| Célula de peso         | R\$ 14,00   |
| Interface Conversor    | R\$ 12,00   |
| Dinamômetro digital    | > R\$ 20,00 |
| Módulo IMU GY-87       | R\$ 50,00   |
| Célula de carga 150 kg | R\$ 50,00   |

## 4.2 Resultados das análises

Algumas propostas se mostraram interessantes, e outras não muito viáveis. O objetivo do estudo é de comparar possíveis propostas de implementação e fazer uma análise crítica quanto a cada uma delas, fazendo uma comparação, mostrando os aspectos positivos e negativos, o cumprimento dos requisitos da seção 1.2 e, eventualmente, servir de ponto de partida para a montagem de protótipos e criação de novas patentes.

As Tabelas 2 e 3 mostram o comparativo de todas as propostas aqui levantadas, resumindo todos os estudos e apresentando os pontos mais importantes de cada uma delas.

Tabela 2: Comparativo das propostas versus os requisitos do projeto.

| Proposta   | Confiabilidade | Precisão | Robustez exigida | Durabilidade |
|--|----------------|----------|------------------|--------------|
| Algoritmo de métodos combinados                      | Alta           | Média    | Baixa            | Alta         |
| Célula de peso sob o cesto                           | Média          | Média    | Alta             | Baixa        |
| Célula de peso sobre os pés niveladores (1 unidade)  | Baixa          | Baixa    | Alta             | Média        |
| Célula de peso sobre os pés niveladores (2 unidades) | Média          | Média    | Alta             | Média        |
| Célula de peso sobre os pés niveladores (4 unidades) | Alta           | Alta     | Alta             | Média        |
| Célula de peso nas varetas de suspensão (1 unidade)  | Baixa          | Baixa    | Alta             | Média        |
| Célula de peso nas varetas de suspensão (2 unidades) | Baixa          | Baixa    | Alta             | Média        |
| Célula de peso nas varetas de suspensão (4 unidades) | Média          | Média    | Alta             | Média        |
| Dinamômetro nas varetas de suspensão                 | Alta           | Alta     | Média            | Alta         |
| Sensor IMU   | Alta           | Média    | Baixa            | Alta         |

Tabela 3: Continuação do comparativo das propostas.

| Proposta   | Eficiência energética | Investimento exigido | Complexidade no processo de fabricação | Repetibilidade |
|--|-----------------------|----------------------|--|----------------|
| Algoritmo de métodos combinados                      | Baixa                 | Baixo                | Baixa                                  | Alta           |
| Célula de peso sob o cesto                           | Alta                  | Médio                | Alta                                   | Média          |
| Célula de peso sobre os pés niveladores (1 unidade)  | Alta                  | Médio                | Média                                  | Média          |
| Célula de peso sobre os pés niveladores (2 unidades) | Alta                  | Alto                 | Alta                                   | Média          |
| Célula de peso sobre os pés niveladores (4 unidades) | Alta                  | Alto                 | Alta                                   | Média          |
| Célula de peso nas varetas de suspensão (1 unidade)  | Alta                  | Médio                | Média                                  | Média          |
| Célula de peso nas varetas de suspensão (2 unidades) | Alta                  | Alto                 | Alta                                   | Média          |
| Célula de peso nas varetas de suspensão (4 unidades) | Alta                  | Alto                 | Alta                                   | Média          |
| Dinamômetro nas varetas de suspensão                 | Alta                  | Médio                | Alto                                   | Médio          |
| Sensor IMU   | Alta                  | Médio                | Baixa                                  | Alta           |

Nota-se, nas tabelas, que de todos os desdobramentos sobre a inserção da célula de peso, são citadas as possibilidades que compreendem o emprego de um, dois e de quatro unidades do transdutor na aplicação. No caso da célula de peso nas varetas de suspensão, foi levado em consideração somente o caso de se ter 4 unidades.

A proposta do sensor IMU nas lavadoras se mostrou bem interessante, quando comparada com as demais ideias mostradas neste trabalho, sendo um aparente potencial ponto de partida para a montagem de protótipos de detecção automática de carga em máquinas de lavar.

Todas as ideias podem substituir o pressostato, fazendo-se a medição do volume de água em função do peso ou do deslocamento vertical do cesto. Mas algumas ideias perdem em diversos requisitos das tabelas, em relação ao sistema utilizado atualmente.

### 4.3 Testes práticos

Foram executados testes práticos e medições iniciais sobre a máquina estudada para se fazer a checagem e a validação das análises discutidas na seção 3. De primeira análise, tem-se o estudo do deslocamento vertical provocado por uma carga no cesto da lavadora.

A Figura 4.1 mostra as especificações do modelo estudado em específico, via etiqueta, que leva ao site do fornecedor [14], onde foram verificadas as especificações técnicas mostradas na Figura 4.2 [14], além das especificações técnicas de consumo, mostradas na Figura 4.3 [15].

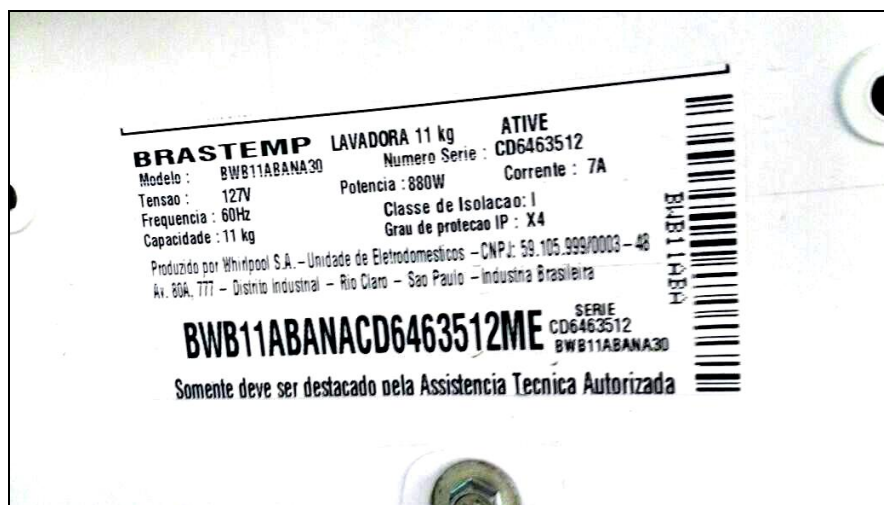


Figura 4.1: Especificações do modelo de lavadora estudado.

| Especificações técnicas |                    |                     |  |                                      |
|-------------------------|--------------------|---------------------|--|--------------------------------------|
| LARGURA                 | ALTURA             | PROFUNDIDADE        | PESO   |                                      |
| 62.3cm                  | 102cm              | 64.5cm              | 37.56kg  |                                      |
| <b>TIPO</b>             | Lavadora de Roupas | <b>ITENS</b>        |  | <b>DOWNLOADS</b>                     |
| <b>CONSUMO</b>          | 0,3                | Capacidade (Kg)     | 11   | <b>Classificação Energética 110v</b> |
| <b>EFICIÊNCIA</b>       | A                  | Abertura da Tampa   | Superior   |                                      |
| <b>COR</b>              | Branco             | Pés Niveladores     | Sim  | <b>Classificação Energética 220v</b> |
| <b>GARANTIA</b>         | 12 meses           | Temperatura da Água | Ambiente   |                                      |
|                         |                    | Ciclos de Lavagem   | 24 combinações - 3 programas combinados com ciclo normal e turbo, com enxágue simples, duplo e com função amaciante. |                                      |
|                         |                    | Display             | Eletrônico   |                                      |
|                         |                    | Funções             | Lava, enxágua e centrifuga.  |                                      |
|                         |                    | Filtro              | Sim  |                                      |
|                         |                    | Marca               | Brastemp   |                                      |
|                         |                    | Água Quente         | Não  |                                      |
|                         |                    | Cesto               | Inox   |                                      |

Figura 4.2: Especificações técnicas do equipamento [14].

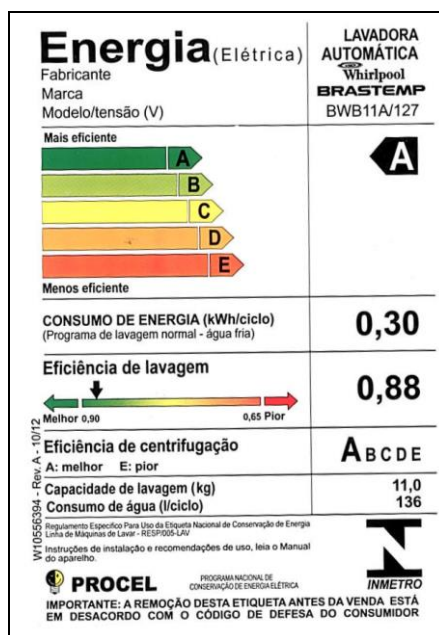


Figura 4.3: Especificações técnicas de consumo [15].

Para o modelo estudado, nota-se o consumo de 136 litros por ciclo, isto é, a máquina chega a consumir 136 litros de água para cada vez que se enche o cesto de água no nível alto. E sabendo-se que o nivelamento de água é discretizado em apenas 4 níveis diferentes, conforme o painel da Figura 2.3; pode-se verificar a necessidade de um equipamento cujo nivelamento possa ter maior domínio de valores e, ao mesmo tempo, seja automatizado.

Primeiramente, deve-se verificar o deslocamento vertical do cesto conforme as cargas e os volumes de água.

A Tabela 4 mostra as medições de carga e deslocamento vertical do cesto, em relação à tampa superior, em quilogramas (kg) e em centímetros (cm).

Tabela 4: Medições de carga e deslocamento do cesto.

|                   |      |      |      |      |      |      |      |      |
|-------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Carga [kg]        | 0    | 1    | 2    | 3    | 4    | 5    | 6    | 7    |
| Deslocamento [cm] | 3,67 | 3,85 | 4,00 | 4,12 | 4,28 | 4,43 | 4,52 | 4,63 |
| Carga [kg]        | 8    | 9    | 10   | 11   | 12   | 13   | 14   | 15   |
| Deslocamento [cm] | 4,72 | 4,85 | 4,94 | 5,02 | 5,15 | 5,25 | 5,35 | 5,45 |

Tendo-se estes resultados, foi impressa a curva dos pontos via MATLAB<sup>®</sup>, mostrada na Figura 4.4. A codificação que gerou a curva e o desvio padrão pode ser encontrada no Apêndice. O experimento foi realizado através da adição de blocos de 1kg dentro do cesto, e medindo-se a distância entre a sua extremidade e a tampa superior da máquina, conforme cota do esboço mostrado na Figura 4.5.

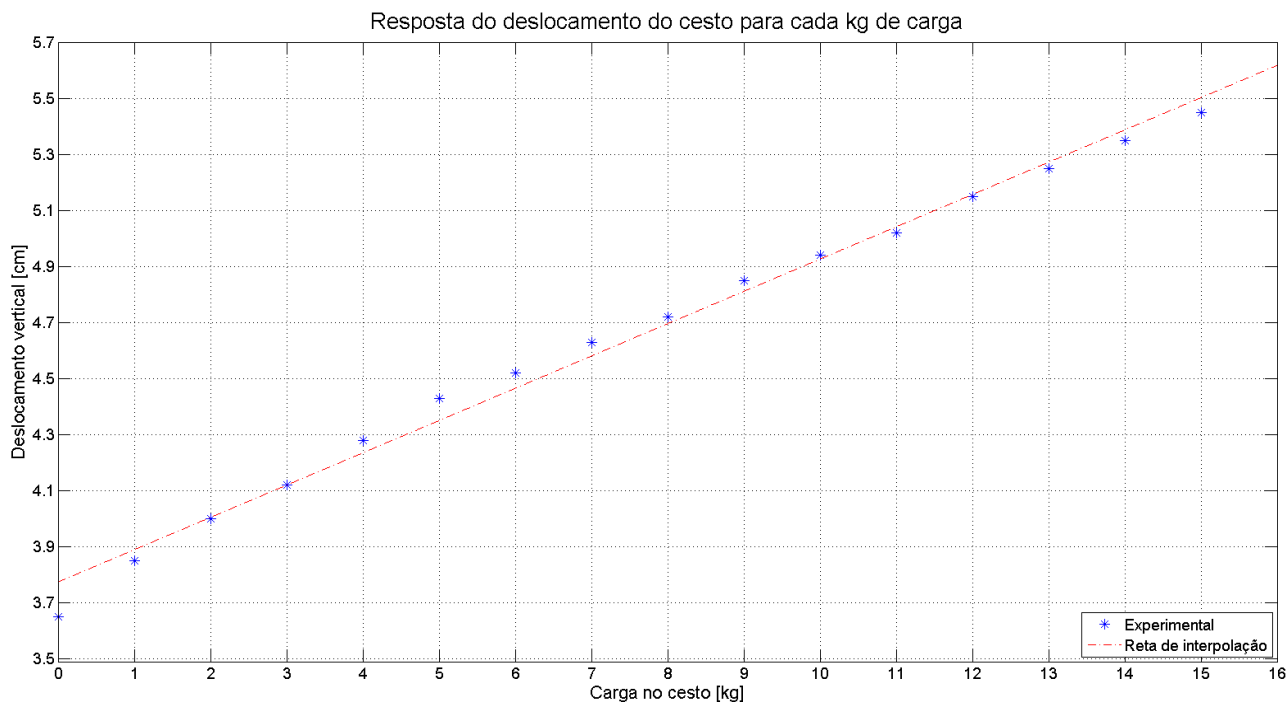


Figura 4.4: Curva do deslocamento vertical do cesto.



Figura 4.5: Esboço do procedimento experimental.

A curva mostrada na Figura 4.4 mostra o comportamento bem próximo do linear quanto ao deslocamento do cesto para cada valor de carga inserida no cesto. Logo, a inserção de um módulo IMU se torna possível e palpável, bastando-se calibrar o equipamento para trabalhar com essa faixa de valores. A equação 4.1 mostra a relação entre as grandezas. O desvio padrão obtido, entre a reta de interpolação e os pontos da curva, foi de 0,0313cm.

$$y = 0,1152 \cdot x + 3,7742 \quad (4.1)$$

Onde:

- $y$  é o deslocamento vertical do cesto, em centímetros;
- $x$  é a carga inserida no cesto, em quilogramas.

Realizando-se uma medição da máquina com uma carga de aproximadamente 3,5kg de roupa úmida, e variando-se os níveis de água conforme o painel da Figura 2.3, foram obtidos os valores de deslocamento mostrados na Tabela 5.

Tabela 5: Medições de deslocamento com os níveis de água e uma carga.

| Carga                            | Deslocamento    |
|----------------------------------|-----------------|
| Somente Roupa: 3,5kg             | 4,2 cm          |
| Roupa + Água – Nível Extra baixo | 6,6 cm          |
| Roupa + Água – Nível Baixo       | 7,2 cm          |
| Roupa + Água – Nível Médio       | 8,3 cm          |
| Roupa + Água – Nível Alto        | 8,6 cm (Máximo) |

Nota-se o impacto maior dos níveis de água sobre o deslocamento do cesto, dado que o volume da mesma pode chegar a 136 litros, dando-se um acréscimo de 136 quilogramas na carga. Foi verificado que, ao se encher o cesto com o nível mais alto, o deslocamento vertical chega a um fundo de escala, que na medição deu 8,6cm em relação à tampa superior.

Para a carga de roupa utilizada, o nível de água mais adequado estaria entre os níveis Baixo e Médio, mas como o usuário é obrigado a escolher entre um deles, neste caso o nível selecionado para a lavagem foi o Médio. Para se resolver este problema de desperdício, bastaria ser determinada uma relação de água por quilograma de roupa ao se implementar o sistema de medição da carga, ou também substituir o pressostato atual por um de maior quantidade de níveis.

#### 4.4 Restrições

Os valores de deslocamento e fundo de escala variam de modelo para modelo de máquina, em função das dimensões e do volume máximo de água acrescentado na lavagem. Por exemplo, em um outro modelo, cuja etiqueta é mostrada na Figura 4.6, foram obtidos diferentes valores de deslocamento por quilograma e fundo de escala.



Figura 4.6: Etiqueta de outro modelo de lavadora.

Enquanto no modelo estudado na seção 4.2 foi obtido um deslocamento de 0,1152cm/kg e um fundo de escala de 8,6cm; neste modelo, o deslocamento foi de 0,201cm/kg e o fundo de escala foi 7cm.

Pode-se notar a diferença nas capacidades dos cestos e da quantidade de roupa permitida por ciclo, em relação ao modelo da seção 4.2. Logo, para cada modelo, é necessário estudar-se as taxas de deslocamento e os demais valores pertinentes.

#### 4.5 Fluxograma do modelo proposto

Para o equipamento ser capaz de detectar a carga instalada, é proposto o fluxograma do processo resultante, podendo ser estendido para os demais casos de transdutores abordados. A Figura 4.7 mostra o fluxograma da etapa de admissão de água, após a leitura do valor registrado pelo transdutor. O restante das etapas de lavagem permanece inalterado, dado que a proposta influencia somente na etapa pertinente à admissão de água no cesto.

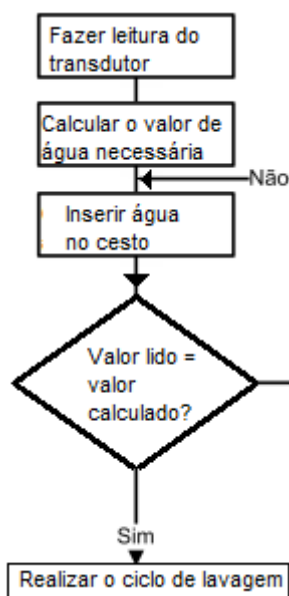


Figura 4.7: Fluxograma proposto para o sistema.

## 4.6 Outras possibilidades com o pressostato

Conforme mencionado na seção 2.2.2; o transdutor utilizado para medição da água é o pressostato, que mede a pressão da coluna de água sobre o tubo de entrada, e realiza o chaveamento conforme o nível de água selecionado pelo usuário, conforme mostrado na Figura 2.3.

### 4.6.1 Pressostato com mais níveis de seleção

Uma outra possibilidade de melhoria seria a substituição por um pressostato com mais níveis de chaveamento, para tentar sanar o desperdício descrito no fim da seção 4.2. Fazendo-se a cotação dos componentes, tem-se a Tabela 6, que mostra o comparativo dos preços médios entre os pressostatos de 4 e 5 níveis.

Tabela 6: Comparativo de preços médios entre pressostatos [17].

| Componente                             | Preço médio |
|--|-------------|
| Pressostato de 4 níveis de chaveamento | R\$ 19,00   |
| Pressostato de 5 níveis de chaveamento | R\$ 37,00   |

Tal diferença de preços pode ser explicada pelo fato de que uma adição de nível de chaveamento implica numa adição de variados componentes no equipamento, fazendo o seu custo ficar elevado; além do fato de o pressostato de 4 níveis ser amplamente utilizado na indústria, tendo-se incentivo à produção em maior escala e maior disponibilização do mesmo para reposição. Logo, tal mudança de componente, a princípio, não se mostra muito viável.

### 4.6.2 Medição da carga através do pressostato

Partindo do princípio de funcionamento do próprio pressostato, que é a medição da pressão em função da coluna de água do cesto em seu tubo de entrada, verifica-se a possibilidade de o próprio pressostato fazer a estimativa da carga inserida pelo usuário. A Figura 4.8 mostra um esboço de um recipiente com água e com um objeto adicional.

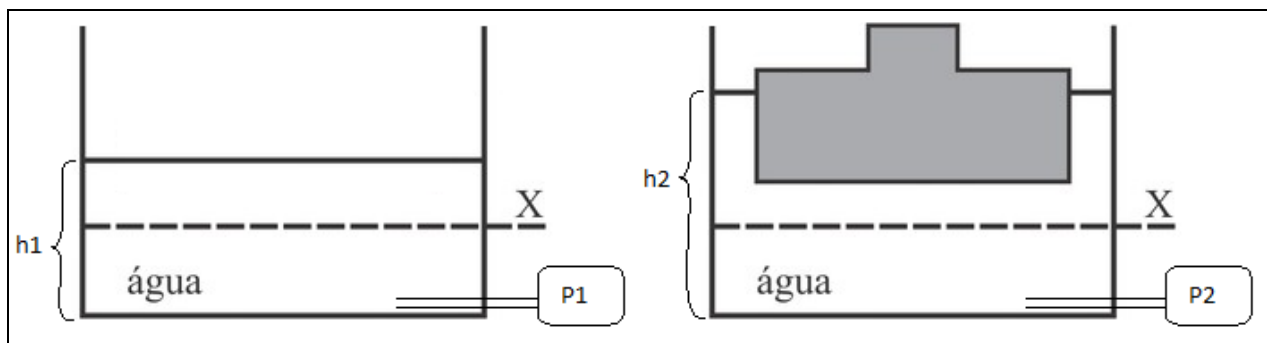


Figura 4.8: Esboço de um reservatório com água e objeto adicional [19].

Como pode ser visto na Figura 4.8, a coluna de água aumenta com o objeto. Sendo  $h_2 > h_1$ , tem-se de imediato que  $P_2 > P_1$ . Logo, é possível fazer-se uma estimativa da carga de roupas em função do aumento da coluna de água que a mesma provoca. As restrições ficariam nos procedimentos que o usuário e a máquina passariam a ter, dado pelos passos:

- 1) Com o cesto completamente vazio, inserir um volume inicial de água;
- 2) Fazer-se a leitura do valor registrado pelo pressostato;
- 3) Inserir a roupa no cesto;
- 4) Fazer-se a nova leitura do valor registrado,
- 5) Calcular a quantidade de água total necessária para a lavagem;
- 6) Inserir a quantidade restante de água, até atingir a quantidade calculada;
- 7) Realizar o ciclo de lavagem;
- 8) Ao esvaziar o reservatório, inserir a mesma quantidade calculada de água para o enxágue;
- 9) Realizar o restante do ciclo.

Apesar de ser uma opção que também atende bem aos requisitos levantados, o equipamento passaria a exigir uma interação maior da parte do usuário, havendo uma tendência de o mesmo poder rejeitar o equipamento com esta proposta. No entanto, esta também pode ser um bom ponto de partida para estudos e melhorias para se obter um equipamento capaz de estimar a carga que não exija altos investimentos e que seja capaz de proporcionar economia de recursos e algum conforto ao usuário.

Para esta nova proposta, uma substituição do atual pressostato por um outro que faça uma medição contínua da carga, ou até mesmo por um sensor de pressão integrado.

## CONCLUSÕES

Através de diversos estudos e análises do equipamento de estudo, foi possível avaliar e elaborar um comparativo das propostas de ferramentas para implementação de uma máquina de lavar capaz de detectar a carga no cesto, recurso que possibilita ganhos tanto em eficiência energética como também em conforto para o usuário final. Diversos requisitos foram levados em consideração, mostrando que nem sempre uma solução aparentemente trivial possa ser a melhor de todas, e dando uma visão do que uma fabricante procura quanto ao desenvolvimento de novos equipamentos.

Foi mostrado que é possível e palpável realizar-se estudos aprofundados da implementação de um sensor IMU sob o cesto, dado que este apresenta um deslocamento linear em relação à carga instalada, servindo de ponto de partida sólido para implementações futuras e até mesmo montagem de protótipos, bem como a abordagem de possíveis estudos futuros sobre outras possibilidades com o pressostato e melhorias quanto aos preços de algumas ferramentas abordadas.

Ao longo de toda a graduação e também do estágio supervisionado, foi possível adquirir uma visão crítica em relação a propostas de melhorias de equipamentos, empregada ao longo de todo o trabalho e incentivando, também, a visão crítica de quem quiser propor patentes para alguma fabricante, ressaltando-se a importância de todos os requisitos que possam influenciar na aprovação de alguma proposta.



## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Petronilho, A. e Terra, M. H. (2010). Aplicação de Controles Inteligentes em Eletrodomésticos. 2010 IEEE Multi-Conference on System and Control, Yokohama (Petronilho e Terra (2010)).
- [2] Miller, T. J. E. (1993). *Brushless Permanent-Magnet and Reluctance Motor Drives*. Oxford University Press, Oxford.
- [3] Petronilho, A. e Dias, M. A. (2009). PI0905317-4 - Método de estimação de carga em máquina de lavar roupas (Petronilho e Dias (2009)).
- [4] <http://www.usinainfo.com.br/sensores-para-arduino/sensor-de-peso-celula-de-peso-50kg-para-arduino-2573.html>, acessado em 30/10/2016.
- [5] [http://www.refriarparts.com.br/produtos/0,69563\\_chicote-de-fios-para-lavadora-brastemp-rede-eletrica-inferior](http://www.refriarparts.com.br/produtos/0,69563_chicote-de-fios-para-lavadora-brastemp-rede-eletrica-inferior), acessado em 30/10/2016.
- [6] <http://www.engedom.com.br/site/pes-para-maquinas-de-lavar-roupas.html>, acessado em 30/10/2016.
- [7] <http://www.solucoesindustriais.com.br/empresa/prestadores-de-servicos/calibrario-servicos-de-calibracao/produtos/servicos/calibracao-de-dinamometro>, acessado em 30/10/2016.
- [8] [http://www.starlino.com/imu\\_guide.html](http://www.starlino.com/imu_guide.html), acessado em 30/10/2016.
- [9] <http://www.brastemp.com.br/produto/lavadora-brastemp-15kg-bwn15/>, acessado em 30/10/2016
- [10] [http://www.shoptime.com.br/produto/14155394/pressostato-emicol-compativo-lavadora-cwl08-4-niveis-47427210000?WT.srch=1&opn=GOOGLEXML&loja=9316105000129&epar=&epar=b\\_p\\_pl\\_00\\_go\\_ed\\_lavadora\\_todas\\_geral\\_gmv&gclid=CKma65qOz9ACFcUJkQodNZEbBQ](http://www.shoptime.com.br/produto/14155394/pressostato-emicol-compativo-lavadora-cwl08-4-niveis-47427210000?WT.srch=1&opn=GOOGLEXML&loja=9316105000129&epar=&epar=b_p_pl_00_go_ed_lavadora_todas_geral_gmv&gclid=CKma65qOz9ACFcUJkQodNZEbBQ), acessado em 30/10/2016.
- [11] Petronilho, A. e Dias, M. A. (2009). PI0905317-4 - Método de estimação de quantidade de carga em máquina de lavar roupas (Petronilho e Dias (2009)) - patente.

[12] <http://www.dronetrest.com/t/brushless-motors-how-they-work-and-what-the-numbers-mean/564>, acessado em 30/10/2016.

[13] [http://www.celuladecarga.com.br/portal/?page\\_id=8](http://www.celuladecarga.com.br/portal/?page_id=8), acessado em 30/10/2016

[14] <http://loja.brastemp.com.br/lavadora-brastemp-ative-11kg-com-cesto-smart-wave-bwb11ab/p>, acessado em 30/10/2016

[15] [http://whirlpool.vteximg.com.br/arquivos/BWB11A\\_-127.png](http://whirlpool.vteximg.com.br/arquivos/BWB11A_-127.png), acessado em 30/10/2016.

[16] <http://www.arduinoecia.com.br/2014/09/sensor-gy-80-acelerometro-bussola-barometro.html>, acessado em 30/10/2016.

[17] Cotação feita em 30/10/2016, nos sites

[http://www.americanas.com.br/produto/14155394/pressostato-emicol-compativel-lavadora-cwl08-4-niveis-47427210000?WT.srch=1&condition=NEW&epar=&epar=bp\\_pl\\_00\\_go\\_ed\\_lavadoras\\_tod as\\_geral\\_gmv&gclid=CJvQ9tCOz9ACFUWAKQodrHwBjQ&opn=YSMESP&sellerId=9316105000129](http://www.americanas.com.br/produto/14155394/pressostato-emicol-compativel-lavadora-cwl08-4-niveis-47427210000?WT.srch=1&condition=NEW&epar=&epar=bp_pl_00_go_ed_lavadoras_tod as_geral_gmv&gclid=CJvQ9tCOz9ACFUWAKQodrHwBjQ&opn=YSMESP&sellerId=9316105000129);  
[http://produto.mercadolivre.com.br/MLB-790586888-pressostato-5-niveis-electrolux-ltr15-lt15-\\_JM](http://produto.mercadolivre.com.br/MLB-790586888-pressostato-5-niveis-electrolux-ltr15-lt15-_JM).

[18] Cotação feita em 30/10/2016, nos sites

[http://produto.mercadolivre.com.br/MLB-796746967-celula-de-carga-50-kg-sensor-de-peso-para-projetos-arduino-\\_JM](http://produto.mercadolivre.com.br/MLB-796746967-celula-de-carga-50-kg-sensor-de-peso-para-projetos-arduino-_JM)  
[http://produto.mercadolivre.com.br/MLB-778727009-hx711-amplificador-para-celula-de-carga-balanca-arduino-\\_JM](http://produto.mercadolivre.com.br/MLB-778727009-hx711-amplificador-para-celula-de-carga-balanca-arduino-_JM)  
[http://produto.mercadolivre.com.br/MLB-770860798-balanca-digital-bolso-gancho-dinammetro-pesca-10g-ate-40kg-\\_JM](http://produto.mercadolivre.com.br/MLB-770860798-balanca-digital-bolso-gancho-dinammetro-pesca-10g-ate-40kg-_JM)  
[http://produto.mercadolivre.com.br/MLB-705925263-modulo-sensor-voo-mpu6050-gy-87-gy87-10dof-\\_JM](http://produto.mercadolivre.com.br/MLB-705925263-modulo-sensor-voo-mpu6050-gy-87-gy87-10dof-_JM)

[19] <http://educacao.globo.com/fisica/assunto/mecanica/pressao-hidrostatica.html>, acessado em 30/10/2016

## APÊNDICE A

### Programa em MATLAB®

A imagem no anexo apresenta o código utilizado para imprimir a curva, de deslocamento do cesto versus a variação na carga, implementada via MATLAB®.

```
% Programa para plotar as curvas de carga
clear all
close all
clc
% Rotina de limpeza de variáveis e telas

carga=[0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15];
deslocamento = [3.65 3.85 4 4.12 4.28 4.43 4.52 4.63 4.72 4.85 4.94...
    5.02 5.15 5.25 5.35 5.45 ];
% Valores experimentais de carga [kg] e deslocamento do cesto [cm]

plot (carga,deslocamento,'*');
% Imprime a curva num gráfico

yinf=3.45;
ysup=5.7;
xinf=0;
xsup=16;
% Definição de valores de limites do gráfico

ylim([yinf ysup]);
xlim([xinf xsup]);
% comando para aplicar os limites nos eixos

P = polyfit(carga,deslocamento,1)
% função para encontrar o polinômio da melhor reta na função

%0.1152    3.7742
% Valores da reta  $y = 0,1152x + 3,7742$ 
x=0:1:15;
% Definindo um vetor espacial
y=0.1152*x + 3.7742;
% Aplicando o polinômio
hold on
plot(x,y,'-r');
grid
% imprime a curva da reta sobreposta à curva dos pontos, com grade

ylabel('Deslocamento vertical [cm]');
xlabel('Carga no cesto [kg]');
title 'Resposta do deslocamento do cesto para cada kg de carga'
legend('Experimental','Reta de interpolação','Location','SouthEast')
% definição de rótulos, títulos e legendas

ybarra=abs(y-deslocamento);
desviop=std(ybarra)
% calcula-se o desvio padrão
% FIM
```

