

Fernando Henrique Lonzetti

**INSTRUMENTAÇÃO ELETRÔNICA E ALGORITMO DE CONTROLE PARA
UM PROTÓTIPO DE SUSPENSÃO ATIVA VEICULAR**

Trabalho de Conclusão de Curso
submetido ao Departamento de
Engenharia Elétrica e Eletrônica da
Universidade Federal da Santa Catarina
para obtenção do título de Bacharel em
Engenharia Eletrônica

Orientador: Prof. Dr. Márcio Holsbach
Costa

Florianópolis

2018

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Lonzetti, Fernando Henrique
Instrumentação eletrônica e algoritmo de controle
para um protótipo de suspensão ativa veicular /
Fernando Henrique Lonzetti ; orientador, Márcio
Holsbach Costa, 2018.
107 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) -
Universidade Federal de Santa Catarina, Centro
Tecnológico, Graduação em Engenharia Eletrônica,
Florianópolis, 2018.

Inclui referências.

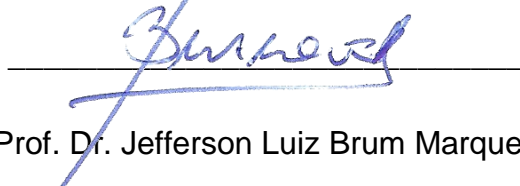
1. Engenharia Eletrônica. 2. Sistemas de
Controle. 3. Controlador PID. 4. Suspensão Ativa.
5. Instrumentação Eletrônica. I. Costa, Márcio
Holsbach. II. Universidade Federal de Santa
Catarina. Graduação em Engenharia Eletrônica. III.
Título.

Fernando Henrique Lonzetti

INSTRUMENTAÇÃO ELETRÔNICA E ALGORITMO DE CONTROLE PARA UM PROTÓTIPO DE SUSPENSÃO ATIVA VEICULAR

Este Trabalho foi julgado adequado para obtenção do Título de “Engenheiro Eletrônico”, e aprovado em sua forma final pelo Curso de Engenharia Eletrônica.

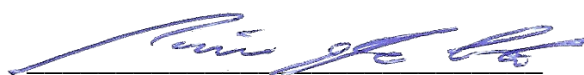
Florianópolis, 09 de março de 2018



Prof. Dr. Jefferson Luiz Brum Marques

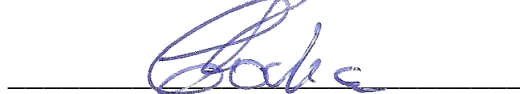
Coordenador do Curso de Engenharia Eletrônica

Banca Examinadora:



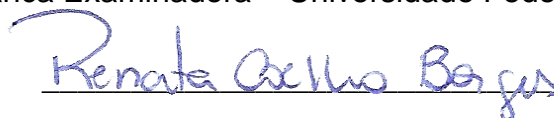
Prof. Dr. Márcio Holsbach Costa

Orientador – Universidade Federal de Santa Catarina



Prof. Dr. Carlos Aurélio Faria da Rocha

Participante da Banca Examinadora – Universidade Federal de Santa Catarina



Profª. Drª. Renata Coelho Borges

Participante da Banca Examinadora – Universidade Federal de Santa Catarina

A minha família.

Agradecimentos

Inicio minhas palavras de gratidão mencionando o Professor Márcio Holsbach Costa, por me orientar ao longo do trabalho, sendo uma pessoa pela qual adquiri profunda admiração e respeito por todo seu profissionalismo e competência.

Agradeço a toda minha unida família, em especial a meus pais Simone e Alexandre, por todo esforço que fizeram para que eu pudesse realizar esse sonho.

A meu tio Ricardo, pelo apoio incondicional, pelo companheirismo e por enxergar além do que meus olhos poderiam ver. Também à minha tia Cintia, que me acolheu como um filho quando fui para Florianópolis.

À mulher da minha vida, Suzana, por ser a luz da minha motivação e acreditar em mim até mesmo quando eu não acreditava.

Aos bons professores que tive por toda sua dedicação.

A meus colegas e amigos por todos os divertidos segundos que passamos juntos.

Ao povo brasileiro, pela possibilidade de estudar em uma instituição de qualidade.

"Labor omnia vincit improbus"

-Vergilius

Resumo

A suspensão automotiva é um sistema mecânico que tem como objetivo aumentar a estabilidade de um veículo, diminuindo vibrações e oscilações e, conseqüentemente, melhorar o conforto e desempenho do passageiro. Neste trabalho é apresentado o aprimoramento de um protótipo de suspensão ativa veicular para o estudo de técnicas de controle. São apresentadas as etapas de melhoramento mecânico, eletrônico e de processamento de um sistema previamente desenvolvido. Em seqüência, é apresentado um exemplo de aplicação de um controlador PID para verificar o desempenho global do sistema resultante. Finalmente, são apresentados os resultados de experimentos e a discussão do trabalho.

Palavras-chave: Sistema de Controle; Suspensão Ativa; Controlador PID.

Abstract

The active suspension is a mechanical system geared towards to increase vehicle stability, decreasing vibrations and oscillations that, consequently, improves passenger comfort and performance. In this work is presented an active suspension prototype enhancement for the study of control technics. The improving stages of mechanical, electronical and processing of a previous developed system are exposed. Then, a PID controller example is applied to verify the global performance of the resulting system. Ultimately, the results and the discussion of the work are presented.

Keywords: Control system; Active suspension; PID controller.

Lista de Figuras

| | |
|---|----|
| Figura 1 - Efeito Rolagem de Carroceria. Retirado de [7]. | 2 |
| Figura 2 - Protótipo Construído. Retirado de [6]. | 4 |
| Figura 3 - Controle em malha aberta - Retirado de [11]. | 5 |
| Figura 4 - Controle em malha fechada. Retirado de [11]. | 6 |
| Figura 5 - Diagrama de blocos de um controlador PID. Retirado de [13]. | 7 |
| Figura 6 - Configuração emissor-comum para o transistor npn. Retirado de [14]. | 8 |
| Figura 7 - Transistor em um circuito de chaveamento. Retirado de [14]. | 9 |
| Figura 8 - Protótipo inicial. Retirado de [9]. | 11 |
| Figura 9 - Anel elástico instalado. | 12 |
| Figura 10 - Parafusos novos e porcas travantes (esq.) e parafusos antigos com porcas normais (dir.). | 13 |
| Figura 11 - Novos parafusos e porcas instalados. | 13 |
| Figura 12 - Mecanismo biela-manivela. Retirado de [15]. | 13 |
| Figura 13 - Mecanismo biela-manivela desenhado em SOLIDWORKS. | 15 |
| Figura 14 - Sistema construído na máquina de corte a água. | 16 |
| Figura 15 - Peças após o processo de refinamento. | 16 |
| Figura 16 - Acoplamento dos rolamentos circulares. | 17 |
| Figura 17 - Mecanismo biela-manivela. | 17 |
| Figura 18 - Suspensão com o mecanismo biela-manivela instalado. | 19 |
| Figura 19 - Suspensão antes da última modificação. | 20 |
| Figura 20 - Suspensão depois da última modificação. | 20 |
| Figura 21 - Placa GY-521 com o circuito integrado MPU-6050. Retirado de [20]. | 22 |
| Figura 22 - SHARP IR GP2Y0A41SK0F. Retirado de [21]. | 23 |
| Figura 23 - LM317 utilizado. Retirado de [22]. | 23 |
| Figura 24 - Circuito integrado 4N25. Retirado de [23]. | 24 |
| Figura 25 - TBJ BC548. Retirado de [24]. | 25 |
| Figura 26 - Regulador de tensão DC/DC Booster. Retirado de [25]. | 25 |
| Figura 27 - VNH2SP30 integrado ao shield. Retirado de [26]. | 26 |
| Figura 28 - Fonte Hayonik FTE1210. Retirado de [27]. | 27 |
| Figura 29 - Arduino MEGA 2560. Retirado de [28]. | 28 |
| Figura 30 - Diagrama de blocos da versão inicial do projeto. Retirado de [9]. | 29 |
| Figura 31 - Diagrama de blocos do novo circuito eletrônico. | 31 |
| Figura 32 - Regulador de tensão abaixador projetado. | 33 |
| Figura 33 - Canal Optoacoplado 1 | 34 |
| Figura 34 - Bloco eletrônico do protótipo. | 36 |
| Figura 35 - Tomada de conexão entre o bloco eletrônico e o protótipo eletrônico. | 36 |
| Figura 36 - Novo diagrama de blocos do algoritmo de processamento. | 38 |
| Figura 37 - Tensão de saída pela distância medida. Retirado de [21]. | 41 |
| Figura 38 - Gráfico com os desvios padrões encontrados. | 46 |
| Figura 39 - Gráfico com as médias dos valores de máximo sobrepasso encontrados. | 47 |
| Figura 40 - Gráfico com as médias dos tempos de estabilização da aceleração observados em cada experimento. | 48 |
| Figura 41 - Gráfico com as médias dos tempos de estabilização da distância observados em cada experimento. | 49 |
| Figura 42 - Gráfico comparando a eficiência de ambas as técnicas sobre grandes variações de amplitude e tempo de estabilização até o regime permanente. | 50 |

| | |
|---|-----------|
| Figura 43 - Projeto da peça inferior do mecanismo biela-manivela..... | 61 |
| Figura 44 - Projeto da peça central do mecanismo biela-manivela..... | 62 |
| Figura 45 - Projeto da peça superior do mecanismo biela-manivela..... | 63 |
| <i>Figura 46 - Experimento 1 - Aceleração.....</i> | <i>65</i> |
| Figura 47 - Experimento 1 - Distância..... | 65 |
| <i>Figura 48 - Experimento 2 - Aceleração.....</i> | <i>66</i> |
| Figura 49 - Experimento 2 - Distância..... | 66 |
| Figura 50 - Experimento 3 - Aceleração..... | 67 |
| Figura 51 - Experimento 3 - Distância..... | 67 |
| Figura 52 - Experimento 4 - Aceleração..... | 68 |
| Figura 53 - Experimento 4 - Distância..... | 68 |
| Figura 54 - Experimento 5 - Aceleração..... | 69 |
| Figura 55 - Experimento - Distância..... | 69 |
| Figura 56 - Experimento 6 - Aceleração..... | 70 |
| Figura 57 - Experimento 6 - Distância..... | 70 |
| Figura 58 - Experimento 7 - Aceleração..... | 71 |
| Figura 59 - Experimento 7 - Distância..... | 71 |
| Figura 60 - Experimento 8 - Aceleração..... | 72 |
| Figura 61 - Experimento 8 - Distância..... | 72 |
| Figura 62 - Experimento 9 - Aceleração..... | 73 |
| Figura 63 - Experimento 9 - Distância..... | 73 |
| Figura 64 - Experimento 10 - Aceleração..... | 74 |
| Figura 65 - Experimento 10 - Distância..... | 74 |
| Figura 66 - Experimento 11 - Aceleração..... | 75 |
| Figura 67 - Experimento 11 - Distância..... | 75 |
| Figura 68 - Experimento 12 - Aceleração..... | 76 |
| Figura 69 - Experimento 12 - Distância..... | 76 |
| Figura 70 - Experimento 13 - Aceleração..... | 77 |
| Figura 71 - Experimento 13 - Distância..... | 77 |
| Figura 72 - Experimento 14 - Aceleração..... | 78 |
| Figura 73 - Experimento 14 - Distância..... | 78 |
| Figura 74 - Experimento 15 - Aceleração..... | 79 |
| Figura 75 - Experimento 15 - Distância..... | 79 |
| Figura 76 - Experimento 16 - Aceleração..... | 80 |
| Figura 77 - Experimento 16 - Distância..... | 80 |
| Figura 78 - Experimento 17 - Aceleração..... | 81 |
| Figura 79 - Experimento 17 - Distância..... | 81 |
| Figura 80 - Experimento 18 - Aceleração..... | 82 |
| Figura 81 - Experimento 18 - Distância..... | 82 |
| Figura 82 - Experimento 19 - Aceleração..... | 83 |
| Figura 83 - Experimento 19 - Distância..... | 83 |
| Figura 84 - Experimento 20 - Aceleração..... | 84 |
| Figura 85 - Experimento 20 - Distância..... | 84 |
| Figura 86 - Experimento 21 - Aceleração..... | 85 |
| Figura 87 - Experimento 21 - Distância..... | 85 |
| Figura 88 - Experimento 22 - Aceleração..... | 86 |
| Figura 89 - Experimento 22 - Distância..... | 86 |
| Figura 90 - Experimento 23 - Aceleração..... | 87 |

| | |
|---|----|
| Figura 91 - Experimento 23 – Distância. | 87 |
| Figura 92 - Experimento 24 - Aceleração. | 88 |
| Figura 93 - Experimento 24 - Distância. | 88 |
| Figura 94 - Experimento 25 - Aceleração. | 89 |
| Figura 95 - Experimento 25 - Distância. | 89 |
| Figura 96 - Experimento 26 - Aceleração. | 90 |
| Figura 97 - Experimento 26 - Aceleração. | 90 |
| Figura 98 - Experimento 27 - Aceleração. | 91 |
| Figura 99 - Experimento 27 - Distância. | 91 |

Lista de Tabelas

| | |
|--|----|
| Tabela 1 - Tabela verdade dos sinais de controle enviados para o driver. | 42 |
| Tabela 2 - Constantes kP , kI e kD escolhidas. | 45 |
| Tabela 3 - Comparação dos desvios padrões de alguns experimentos em relação ao experimento com o controle desativado. | 46 |
| Tabela 4 - Comparação das médias dos valores de sobrepico de alguns experimentos em relação ao experimento com o controle desativado. | 47 |
| Tabela 5 - Comparação dos tempos de estabilização da aceleração de alguns experimentos em relação ao experimento com o controle desativado. | 48 |
| Tabela 6 - Comparação dos tempos de estabilização da distância de alguns experimentos em relação ao experimento com o controle desativado. | 49 |
| Tabela 7 - Comparação entre a técnica PID e a técnica proporcional. | 50 |
| Tabela 8 - Tempos de estabilização da aceleração da primeira versão do protótipo. Retirado de [9]. | 51 |
| Tabela 9 - Comparação da melhor média dos tempos de estabilização obtida na nova versão com a da versão anterior. | 51 |
| Tabela 10 - Custos envolvidos no projeto. | 51 |

Lista de Abreviaturas, Siglas e Símbolos

| | |
|----------|---|
| A | Ampére(s) |
| AC | Corrente Alternada |
| DC | Corrente Contínua |
| GND | Tensão de Referência |
| Hz | Hertz |
| IR | Infravermelho |
| LED | Diodo Emissor de Luz |
| m | Mili |
| n | Junção dopada majoritariamente com portadores do tipo N |
| p | Junção dopada majoritariamente com portadores do tipo P |
| PCB | Placa de Circuito Impresso |
| PID | Controlador Proporcional-Integral-Derivativo |
| RISC | Computador com um conjunto reduzido de instruções |
| TBJ | Transistor Bipolar de Junção |
| V | Volt(s) |
| VCC | Tensão positiva de alimentação à 5V |
| UART | Receptor/Transmissor Universal Assíncrono |
| W | Watt(s) |
| μ | Micro |
| Ω | Ohm(s) |

Sumário

| | | |
|-----------|--|----|
| 1. | INTRODUÇÃO | 1 |
| 1.1. | Objetivo | 3 |
| 2. | FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA..... | 5 |
| 2.1. | Sistemas de Controle..... | 5 |
| 2.1.1. | Desempenho em regime transitório de sistemas de controle..... | 7 |
| 2.2. | Transistores Bipolares de Junção | 8 |
| 2.2.1. | Método de chaveamento com TBJ..... | 8 |
| 3. | MATERIAIS E MÉTODOS | 10 |
| 3.1. | Aspectos Mecânicos..... | 10 |
| 3.1.1. | Versão inicial do protótipo mecânico | 10 |
| 3.1.2. | Desenvolvimento dos aspectos mecânicos..... | 11 |
| 3.2. | Aspectos Eletrônicos | 20 |
| 3.2.1. | Materiais utilizados | 21 |
| 3.2.1.1. | Acelerômetro MPU-6050 | 21 |
| 3.2.1.2. | Sensor de distância Sharp IR GP2Y0A41SK0F..... | 22 |
| 3.2.1.3. | Regulador de tensão LM317T | 23 |
| 3.2.1.4. | Optoacoplador 4N25..... | 24 |
| 3.2.1.5. | Transistor TBJ BC548C..... | 24 |
| 3.2.1.6. | Circuito UC3844 e conversor de tensão DC/DC <i>Booster</i> | 25 |
| 3.2.1.7. | Driver de potência para motor DC | 26 |
| 3.2.1.8. | Fonte de tensão DC 12V Hayonik FTE1210 | 26 |
| 3.2.1.9. | Placa de prototipagem Arduino MEGA 2560 | 27 |
| 3.2.1.10. | Outros componentes..... | 28 |
| 3.2.2. | Versão inicial do circuito eletrônico..... | 28 |
| 3.2.3. | Desenvolvimento dos aspectos eletrônicos..... | 30 |
| 3.2.3.1. | Circuito eletrônico..... | 32 |
| 3.2.3.2. | Placa de circuito impresso..... | 34 |
| 3.3. | Aspectos de Processamento | 36 |
| 3.3.1. | Versão inicial do algoritmo de processamento..... | 36 |
| 3.3.2. | Desenvolvimento dos aspectos de processamento..... | 37 |
| 4. | RESULTADOS | 44 |
| 4.1. | Algoritmo de Controle PID | 44 |
| 4.2. | Custos do Projeto | 51 |
| 5. | DISCUSSÃO | 52 |

| | | |
|------|--|----|
| 6. | CONCLUSÃO | 55 |
| 6.1. | Sugestões para Trabalhos Futuros | 55 |
| 7. | BIBLIOGRAFIA | 57 |
| | APÊNDICES | 60 |
| | APÊNDICE A – BLOCOS DESENVOLVIDOS EM SOLIDWORKS..... | 60 |
| | APÊNDICE B – RESULTADOS PARA OUTROS AJUSTES DO CONTROLADOR PID | 64 |

1. INTRODUÇÃO

A suspensão automotiva é um dispositivo mecânico que une duas partes de um automóvel, tendo como objetivo aumentar a estabilidade do sistema, diminuir vibrações e conseqüentemente melhorar o conforto e desempenho do veículo.

Nos primórdios das construções dos carros, as suspensões, quando presentes, eram pouco desenvolvidas e ineficientes. Um ponto importante na história desse dispositivo foi o desenvolvimento do sistema MacPherson, que foi implantado em um veículo pela primeira vez em 1949, no Ford Vedette [1]. O modelo desenvolvido por Earle Steele MacPherson é composto basicamente por uma mola helicoidal e um amortecedor telescópico, que unem o chassi do veículo à bandeja do mesmo.

O sistema de MacPherson trata-se de um dispositivo passivo, no qual a mola age na absorção dos impactos de baixa frequência recebidos pelo conjunto pneu-roda. O amortecedor contém a ação da mola, evitando a propagação de qualquer balanço desnecessário para o chassi.

Muito se estudou e se avançou nessa tecnologia com a finalidade de melhorar cada vez mais a qualidade de transporte dos automóveis [2]. Os aspectos construtivos foram muito melhorados, com novas topologias físicas e novos materiais de absorção e amortecimento [3] [4]. Todavia, o sistema passivo de amortecimento não permite o controle adequado dos impactos, de maneira que sempre ocorrerá um balanço significativo no chassi do veículo.

Além disso, o sistema passivo, após instalado no veículo, muda muito pouco suas características. Isso faz com que a suspensão passiva não consiga atuar adequadamente em situações diferentes daquelas para as quais foi projetada [5]. Nesse tipo de modelo, também ocorre o efeito de rolagem de carroceria, como pode ser visto na Figura 1. Esse efeito diminui a aderência dos pneus em relação ao solo, fazendo com que o veículo perca tração e aumente seu tempo de frenagem, podendo até mesmo ocasionar um capotamento.

Carros esportivos possuem, em geral, suspensões mais rígidas, que oferecem maior dirigibilidade ao condutor, com perda de conforto. Já carros de luxo possuem suspensões mais suaves, provendo mais conforto aos passageiros e perdendo dirigibilidade. Observa-se um compromisso entre esses dois aspectos, que não pode ser superado por suspensões passivas [6].



Figura 1 - Efeito Rolagem de Carroceria. Retirado de [7].

Uma possível solução para esses problemas é a implantação de uma suspensão ativa veicular, onde a ação de amortecimento ocorre mediante a leitura dos parâmetros cinéticos e dinâmicos do sistema, como a aceleração do chassi, a distância entre o chassi e a bandeja do automóvel e até mesmo o mapeamento do terreno que o veículo percorre. Desse modo, o sistema ativo tem a capacidade de se ajustar continuamente para diferentes condições de estrada, monitorando as condições do percurso e se regulando constantemente [5].

Para que seja possível controlar a suspensão de acordo com os parâmetros acima citados, o amortecedor hidráulico passivo pode ser substituído por um motor elétrico controlado por um microprocessador.

Com uma suspensão ativa ainda existe a possibilidade do motorista regular diferentes modos de direção com simplicidade, visando conforto ou

esportividade [8]. Também é possível corrigir o efeito de rolagem de carroceria e ainda adicionar um sistema preditivo de amortecimento, algo que diminuiria mais ainda os efeitos ocasionados pelos desníveis de solo transmitidos para a carroceria do automóvel.

Cabe frisar que a palavra veículo remete, na maior parte das vezes, a um carro, quando na verdade pode ser um avião, um trem ou até mesmo um navio. Neste trabalho visa-se desenvolver um protótipo simplificado, mas que proporcione diferentes aplicações, tendo em vista que todos os veículos automotores são passíveis de sofrer perturbações vibratórias.

1.1. Objetivo

O presente trabalho trata do desenvolvimento e implementação de um protótipo funcional para estudo de técnicas de controle em sistemas de suspensão ativa veicular. Partindo-se de um sistema inicial, anteriormente desenvolvido em [9] (Figura 2), foram realizadas melhorias e adaptações nos aspectos mecânicos, eletrônicos e de processamento, com a finalidade de obter um sistema para experimentação e demonstração dos princípios envolvidos. Os principais pontos abordados no presente trabalho foram:

- a. Implementação de um sistema de controle proporcional-integral-derivativo (PID) para expansão do controlador proporcional existente;
- b. Instalação de novos sensores para monitoração do sistema de controle;
- c. Implementação de um novo mecanismo para simulação de desníveis de piso, que será instalado no modelo de quarto de carro;
- d. Desenvolvimento de uma nova conexão entre o amortecedor elétrico e a plataforma superior do protótipo;
- e. Otimização mecânica do protótipo, eliminando folgas e tornando-o o mais representativo possível de uma suspensão real.

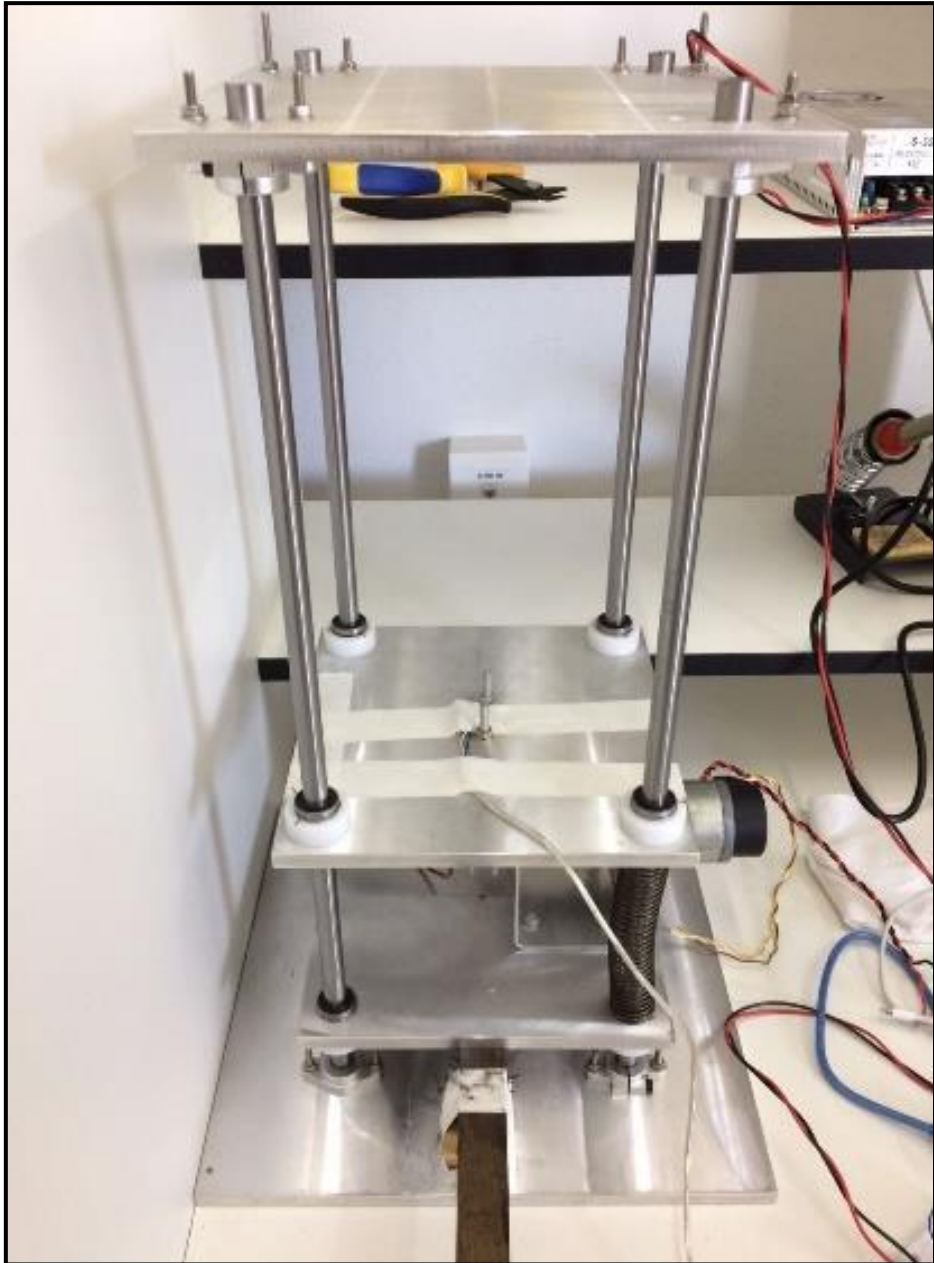


Figura 2 - Protótipo Construído. Retirado de [6].

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo será realizada a descrição teórica dos métodos e dispositivos utilizados para a realização deste trabalho. Será apresentada uma noção sobre sistemas de controle, com direcionamento a controladores proporcionais-integrais-derivativos (PID). Em sequência será apresentada uma breve explicação sobre o funcionamento dos transistores, especialmente na parcela relacionada ao modo de chaveamento.

2.1. Sistemas de Controle

Um sistema de controle é composto por um conjunto de dispositivos que coordena a ação de outro dispositivo [10]. Um exemplo de um sistema de controle pode ser um motorista conduzindo a aceleração de um automóvel. Nesse caso, comparando a situação com o sistema descrito pela Figura 3, a força com que o motorista pisa no acelerador pode ser tomada como a entrada “x” e velocidade do veículo pode ser tomada como a saída “y”. A parte mecânica do veículo é um conjunto de sistemas, que pode ser chamado de “sistema S”, o qual transforma a força exercida pelo motorista em velocidade.

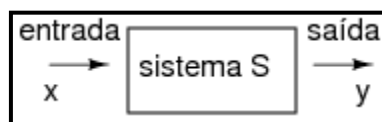


Figura 3 - Controle em malha aberta - Retirado de [11].

Todavia, no sistema descrito pela Figura 3 não é possível interpretar qual é a velocidade do veículo para que seja possível corrigi-la, caso necessário. É como se o mesmo não possuísse velocímetro. No caso da existência desse dispositivo de monitoração o motorista pode corrigir a força exercida sobre o acelerador para que a velocidade do veículo se mantenha constante. Nessa situação, fazendo uma analogia ao sistema da Figura 4, o motorista é o “controlador”, o acelerador é o “atuador”, o conjunto motor e rodas pode ser descrito como o “equipamento” e o velocímetro é o “sensor”.

Na Figura 4 ainda pode-se observar a presença do “distúrbio”, responsável por variações imprevisíveis da saída do sistema. Um combustível

de má qualidade pode ser tratado como um distúrbio, pois afetará a transmissão da energia do motor para as rodas. O “ruído” pode ser interpretado como influência externa decorrente de vibrações das rodas, que interferem no processo de medida da velocidade, fornecendo ao motorista uma interpretação imprecisa. A “referência” é a velocidade que o motorista deseja manter, a qual ele comparará com a velocidade que será mostrada no velocímetro. O resultado dessa comparação ocasionará o sinal de “erro”, que é a diferença entre a velocidade desejada e a velocidade em que o automóvel se encontra [10].

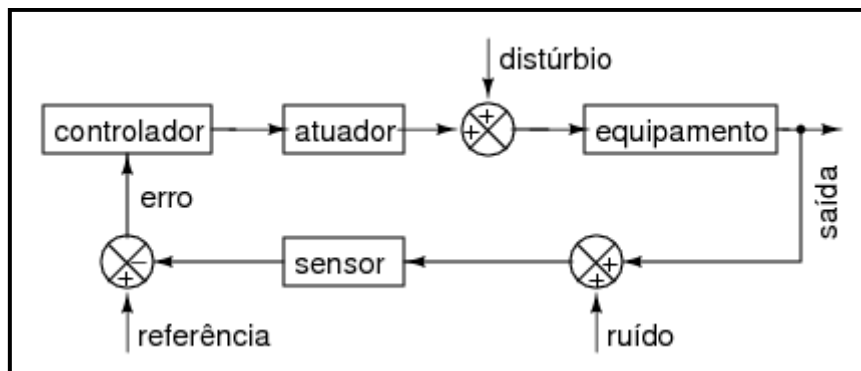


Figura 4 - Controle em malha fechada. Retirado de [11].

Um método bastante utilizado para a implementação de estratégias de controle é o controlador PID. Esse método utiliza um sinal proporcional ao erro, integral ao erro e derivativo ao erro. Este método é vastamente usado na indústria, principalmente em sistemas de controle industriais. O seu desempenho robusto e a sua funcionalidade fazem jus à sua popularidade.

A utilidade dos controladores PID está na sua aplicabilidade à maioria dos sistemas de controle. Em particular, quando o modelo matemático da planta (atuador e equipamento) não é conhecido e, portanto, métodos de projeto analítico não podem ser utilizados, controladores PID se mostram muito úteis [12].

A ação proporcional reage ao erro presente, o que permite uma atuação imediata em relação a variações de grande magnitude. A ação integral é capaz de eliminar erros em regime permanente, enquanto a ação derivativa permite a antecipação na correção de comportamento do processo. Na Figura 5 pode ser

visto o diagrama de blocos de um sistema de controle PID. O sinal de controle gerado pelo controlador PID pode ser apresentado através da equação 1.

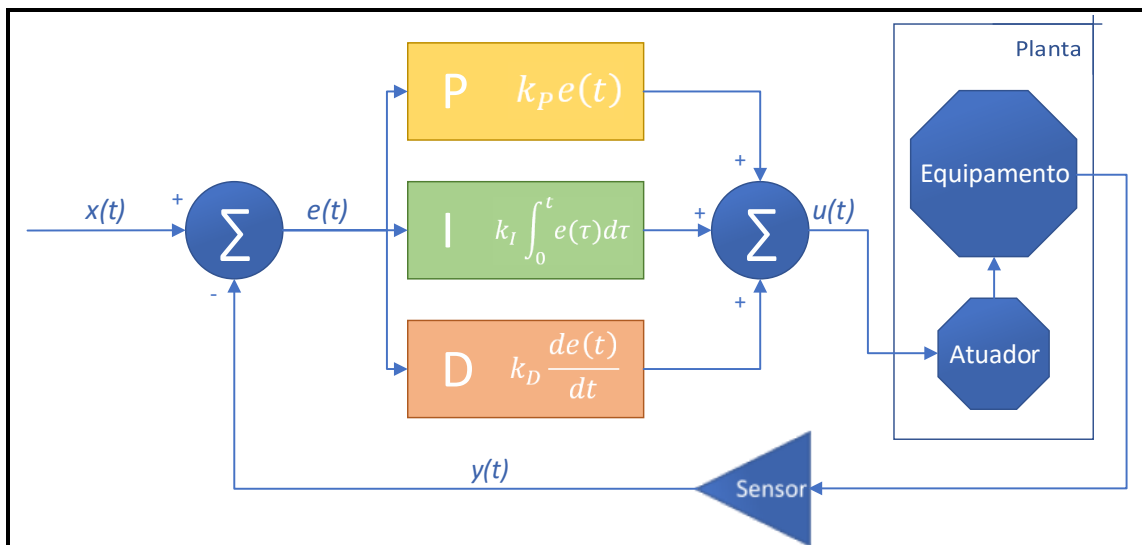


Figura 5 - Diagrama de blocos de um controlador PID. Adaptado de [13].

$$u(t) = k_p e(t) + k_I \int_0^t e(\tau) d\tau + k_D \frac{de(t)}{dt} \quad 1$$

O sinal $u(t)$ pode ser representado como o sinal enviado pelo controlador para o atuador na Figura 4.

2.1.1. Desempenho em regime transitório de sistemas de controle

A avaliação de desempenho de um sistema de controle em regime transitório pode ser feita por meio da análise de alguns parâmetros, como o máximo sobrepico e o tempo de estabilização [12].

O valor de máximo sobrepico é a máxima diferença entre a saída do sistema e o seu valor de entrada, sendo o valor onde o maior erro em relação ao ponto de referência ocorre. Em geral, é apresentado em valor percentual em relação ao ponto de referência, sendo um indicativo de estabilidade relativa do sistema. Quanto maior o seu valor, mais próximo o sistema estará da instabilidade [10].

O tempo de estabilização é o tempo em que o sistema se encontra definitivamente dentro de determinada margem em torno do valor de referência. A margem é habitualmente definida em termos percentuais em relação ao valor de referência, sendo frequentemente igual a 2% ou a 5% [12][14].

Transistores Bipolares de Junção

O transistor bipolar de junção (TBJ) é um dispositivo semiconductor de três camadas que consiste em duas camadas do material do tipo n e uma do tipo p , ou em duas camadas do tipo p e uma do tipo n [14]. A principal característica de um semiconductor é a sua capacidade de conduzir portadores de cargas elétricas. No modo de funcionamento conhecido como “chaveamento”, pode ora funcionar como um material condutor, ora como um material isolante

O transistor possui, em sua forma mais usual, três terminais, conectados a cada uma das junções. Esses terminais são chamados de coletor, base e emissor.

Na Figura 6 pode ser vista uma forma de polarização do transistor npn de forma que, segundo a Lei de Kirchhoff:

$$I_E = I_C + I_B \quad 2$$

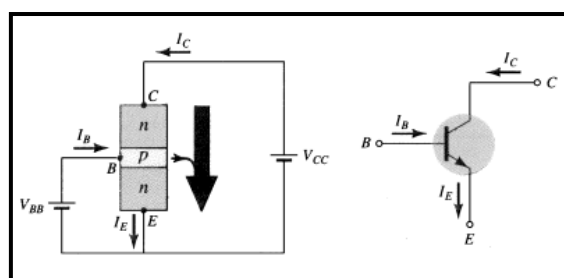


Figura 6 - Configuração emissor-comum para o transistor npn . Retirado de [14].

As tensões entre o coletor e base, coletor e emissor, e base e coletor são chamadas de V_{CB} , V_{CE} e V_{BE} , respectivamente.

2.1.2. Método de chaveamento com TBJ

O transistor pode ser configurado para atuar como chave. Esse modo de trabalho é interessante em aplicações que requerem apenas dois valores de interesse (booleanos), sendo um descrito como verdadeiro ou em nível lógico alto e o outro descrito como falso ou em nível lógico baixo. Na Figura 7 pode ser visto um TBJ funcionando como inversor, no qual a tensão de 5V representa um sinal verdadeiro ou um nível lógico alto, enquanto a tensão de 0V representa um sinal falso ou um nível lógico baixo.

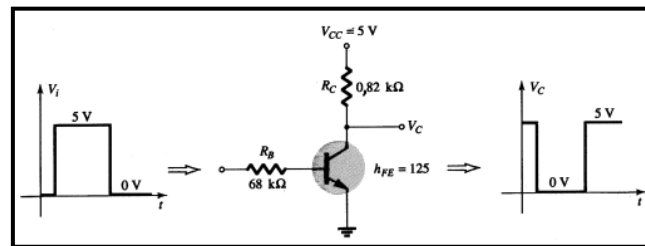


Figura 7 - Transistor em um circuito de chaveamento. Retirado de [14].

Quando é aplicada uma tensão de nível lógico baixo no terminal esquerdo do resistor R_B , a junção coletor-emissor comporta-se como um isolante, impedindo a condução de corrente elétrica do coletor para o emissor. Deste modo, a queda de tensão sobre o resistor R_C é nula, de maneira com que a tensão no coletor seja igual à tensão de alimentação V_{CC} . Neste momento, o TBJ opera em corte.

No momento em que a tensão aplicada no terminal esquerdo de R_B , V_i , é igual a 5V, a junção coletor-emissor comporta-se como um material condutor, ocorrendo a passagem de corrente elétrica do coletor para o emissor. Como resultado, a tensão V_{CE} é muito pequena (próxima de zero). Por consequência, a tensão no coletor é também aproximadamente zero.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

No presente capítulo, será apresentado o desenvolvimento detalhado do projeto proposto em relação a três aspectos, sendo estes: mecânicos, eletrônicos e de processamento. Em cada uma dessas seções será apresentada a condição do protótipo desenvolvido anteriormente em [9] e as contribuições realizadas no presente trabalho, bem como os materiais utilizados.

3.1. Aspectos Mecânicos

Neste tópico serão tratados os assuntos pertinentes aos aspectos mecânicos do projeto, como a suspensão estava construída e os trabalhos de melhoria que foram realizados.

3.1.1. Versão inicial do protótipo mecânico

O primeiro protótipo de suspensão [9] foi todo construído em alumínio (Figura 8). Conta com 4 plataformas do material: a superior e a inferior são para sustentação do modelo; a central-inferior simula a bandeja do automóvel e a central-superior simula o chassi. Existem quatro eixos, os quais guiam o movimento das plataformas centrais. As plataformas externas estão fixadas nesses mesmos eixos. Entre as plataformas centrais está disposta a suspensão, composta por duas molas, um motor elétrico fixo na plataforma central-inferior e uma conexão entre o eixo do motor e a plataforma central-superior.

Para que o movimento das plataformas centrais ocorra de maneira correta, existem rolamentos lineares em cada uma delas. Os rolamentos são fixos através de anéis presos nas plataformas. Os anéis foram feitos manualmente em arame, algo que não fornece segurança no manuseio do conjunto, pois podem se desprender com facilidade.

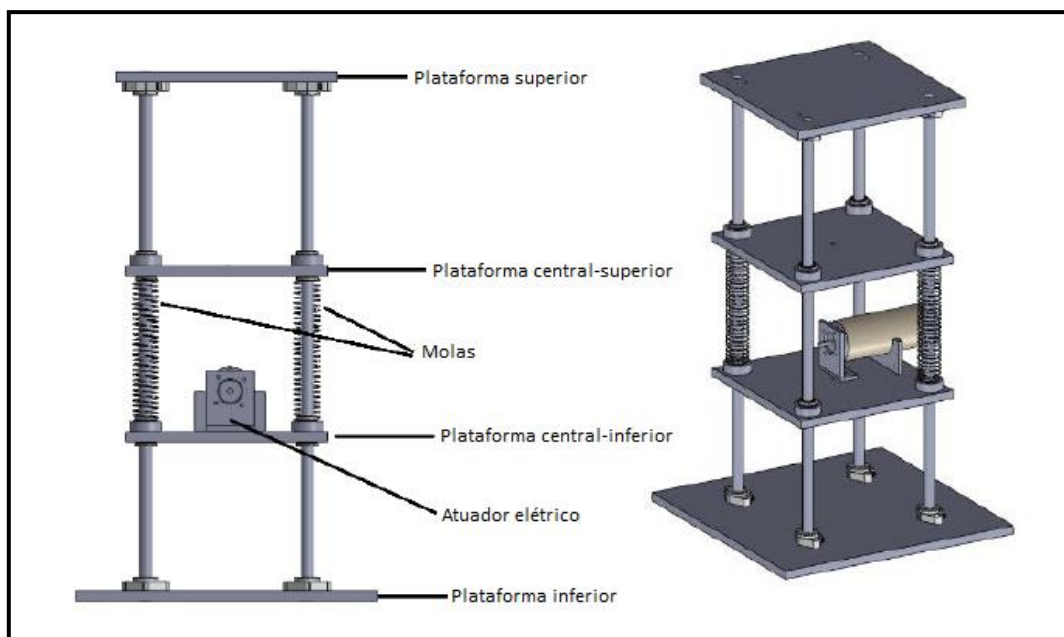


Figura 8 - Protótipo inicial. Retirado de [9].

A conexão do eixo do motor com a plataforma central-superior foi feita através de uma corda de pequena espessura unida a uma peça plástica circular pouco resistente. Isso restringe o amortecimento do sistema em somente um sentido, algo que não é desejável pois aumenta o tempo de estabilização do sistema. Além disso, o uso de plástico não é sugerido para a aplicação, pois a vida útil do mesmo em contato com peças metálicas é pequena e o material não suporta a aplicação de forças ligeiramente elevadas, algo que acarretaria na quebra do mecanismo de amortecimento em algum momento.

O acionamento da suspensão era realizado mediante a ativação de uma alavanca mecânica, composta por madeira, a qual não estava fixa ao protótipo. Isso ocasionava gerações de desníveis de solo pouco similares, o que dificultava a avaliação de desempenho.

3.1.2. Desenvolvimento dos aspectos mecânicos

No presente trabalho, os anéis de arame construídos manualmente foram todos substituídos por anéis elásticos de pressão, construídos em aço. Isso aumentou a confiabilidade do sistema, tendo em vista que estes dispositivos são elaborados especificadamente para esse tipo de função e, uma vez instalados

só podem ser removidos por uma ferramenta específica de remoção. O anel elástico instalado pode ser visto na Figura 9.



Figura 9 - Anel elástico instalado.

Os parafusos e porcas que fixavam as plataformas nos eixos também foram substituídos por parafusos simétricos e porcas com travas de borracha. Isso evita o afrouxamento do sistema decorrente da utilização frequente. Os parafusos utilizados são sextavados, com cabeça de 7 milímetros de largura e 30 milímetros de comprimento. Sua rosca é do tipo M3, possuindo 3 milímetros de diâmetro.

Além de evitar o afrouxamento, a substituição dos parafusos dissemelhantes utilizados por um conjunto idêntico melhorou a estética do protótipo. É importante ressaltar que a estética é de suma importância para um produto, sendo interessante para tornar agradável a apresentação do projeto. Uma amostra dos novos parafusos e porcas pode ser vista na Figura 10 em comparação com os antigos. Já na Figura 11 é possível ver os novos itens instalados.



Figura 10 - Parafusos novos e porcas travantes (esq.) e parafusos antigos com porcas normais (dir.).

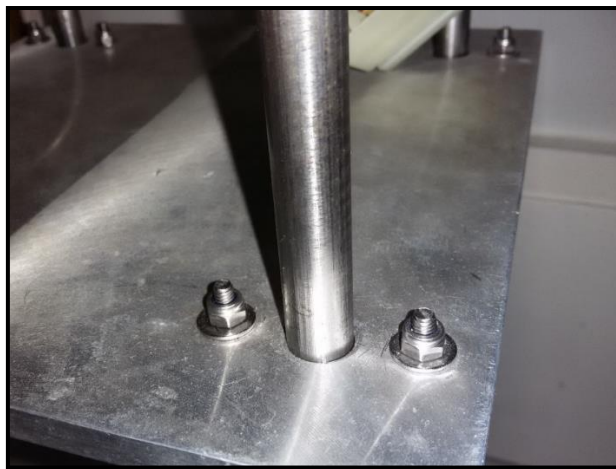


Figura 11 - Novos parafusos e porcas instalados.

Com a finalidade de sofisticar o sistema de amortecimento, foi elaborado um mecanismo de biela-manivela, de maneira que o sentido de rotação do motor possa diminuir ou aumentar a distância entre as plataformas centrais. Esse modelo é composto por um eixo fixo ao motor e uma biela fixa ao eixo e à plataforma central-superior. Na Figura 12 pode ser visto um modelo do mecanismo de biela-manivela em que o sistema desenvolvido foi baseado.

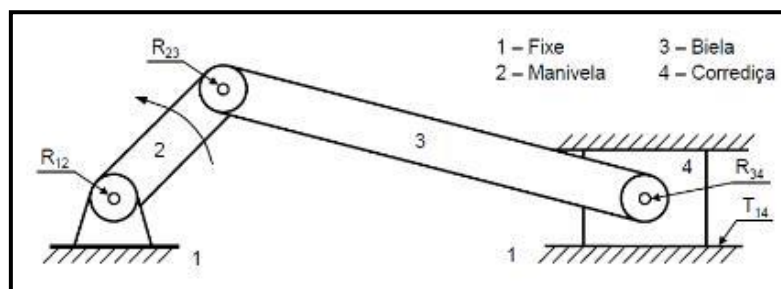


Figura 12 - Mecanismo biela-manivela. Retirado de [15].

Para aumentar a precisão na elaboração das peças, a parte central do protótipo de suspensão foi modelada no SolidWorks, uma ferramenta de design, análise e simulação de projetos mecânicos, que é vastamente usada pela indústria [16]. As chapas centrais da suspensão foram reproduzidas em software, a partir do protótipo real. Foi feita a medida da distância entre ambas as chapas com o sistema em repouso, obtendo um valor de aproximadamente 6 centímetros. Essa distância foi usada como base para a projeção do mecanismo biela-manivela. O eixo do motor foi simulado por uma peça retângulo-circular.

O sistema de biela-manivela é composto por três peças, dois rolamentos e um eixo de acoplamento. A peça inferior fica anexada ao eixo do motor, respondendo aos movimentos de amortecimento. Além disso, a peça foi elaborada de maneira que seja possível vincular um rolamento circular à mesma. No rolamento é fixado um eixo que une a peça inferior à peça central. A peça central possui dois furos circulares para que também seja possível acoplar rolamentos. Com isso, o rolamento superior é acoplado à peça superior, através de um eixo vinculado à própria peça. O conjunto reproduzido pode ser visto na Figura 13¹.

A peça inferior e a peça central possuem 8 milímetros de espessura, de maneira que o rolamento fique dentro do furo. O rolamento escolhido é um 608 ZZ, possuindo 8 milímetros de espessura, 22 milímetros de diâmetro externo e 8 milímetros de diâmetro interno. O ZZ representa uma dupla vedação metálica, restringindo a entrada de impurezas entre as esferas, o que aumenta a durabilidade do equipamento [17]. Este rolamento é o mesmo utilizado em skates, e o motivo da sua escolha foi o baixo custo e a facilidade de obtenção.

A fixação do rolamento nas peças é feita por meio de interferência. Isso significa que o diâmetro do furo onde o rolamento será instalado deve ser ligeiramente menor do que o diâmetro do rolamento. Neste caso, o diâmetro do furo é de 21,95 milímetros, 50 micrômetros menor do que o do rolamento. Após a instalação, realizada por martelo ou prensa, o material da peça comprime o rolamento dentro do furo, mantendo-o imóvel por tempo indeterminado.

¹ Os modelos projetados de cada peça com todas as medidas podem ser vistos no Apêndice A.

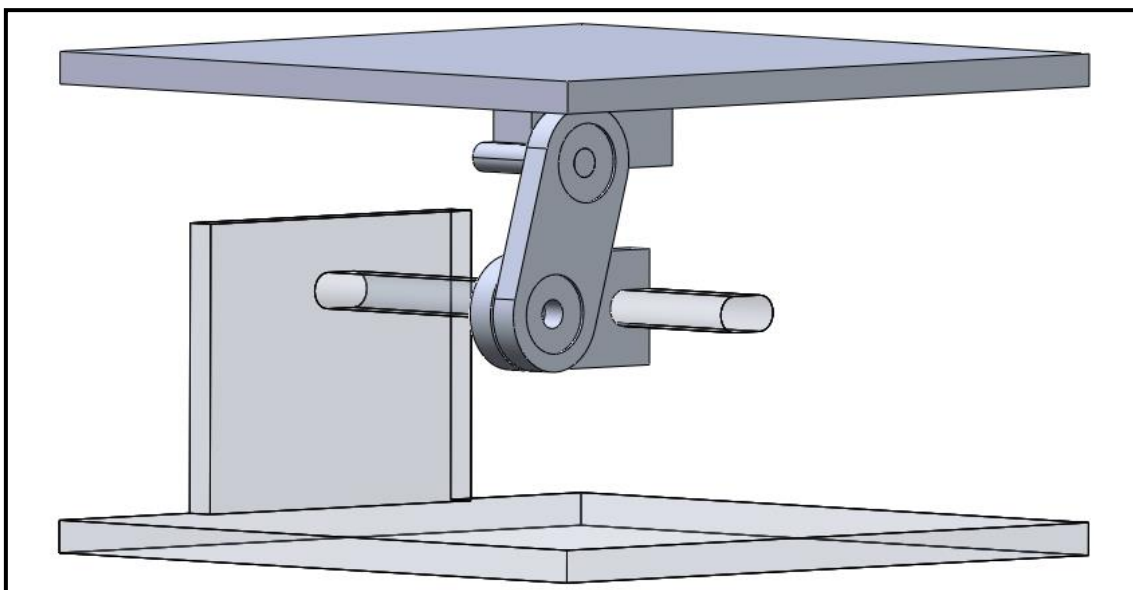


Figura 13 - Mecanismo biela-manivela desenhado em SOLIDWORKS.

Feito isto, foi realizado um orçamento por uma empresa especializada em cortes e dobras, para a construção das peças através de uma máquina de corte a jato de água. Cabe frisar que o corte a água só é capaz de fabricar peças que possam ser desenhadas em duas dimensões. Assim, foram fabricadas três peças, sem os dois eixos. A desvantagem do corte a água é a falta de precisão para o caso, pois a máquina de corte à água tem uma precisão de corte que varia de acordo com a espessura da peça que se deseja fabricar. Após a fabricação, foram efetuadas medidas para comparar a peça fabricada com a peça projetada em software. A maior imprecisão foi verificada em uma peça com um furo de diâmetro de 21,75 milímetros, a qual apresentava 200 micrômetros a menos do que o projetado, com um desvio de aproximadamente 0,92%. O conjunto de peças após a fabricação pode ser visto na Figura 14.

Todavia, após o processo de corte foi realizado um processo de refinamento no equipamento, feito em uma empresa de usinagem, com a finalidade de alinhar os diâmetros internos, fabricar o eixo inferior e soldar um eixo na peça superior. Ademais, também foi desenvolvida uma peça retângulo-circular em alumínio que foi acoplada ao eixo do motor, com a finalidade de possibilitar o acionamento mecânico da biela-manivela. Também foram adicionadas duas roscas na peça inferior, para possibilitar a fixação da peça no eixo do motor através de dois parafusos.

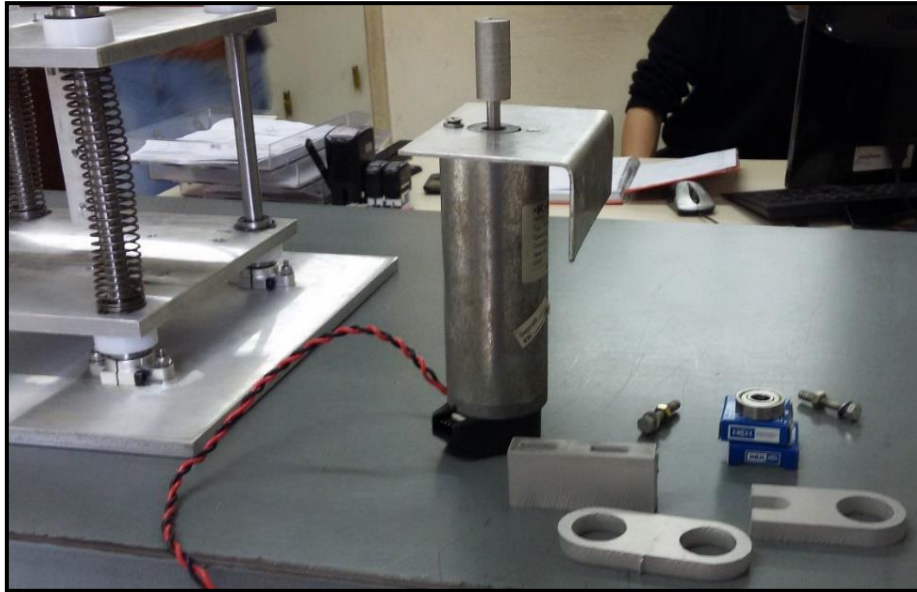


Figura 14 - Sistema construído na máquina de corte a água.

As peças fabricadas após o processo de refinamento podem ser vistas na Figura 15.

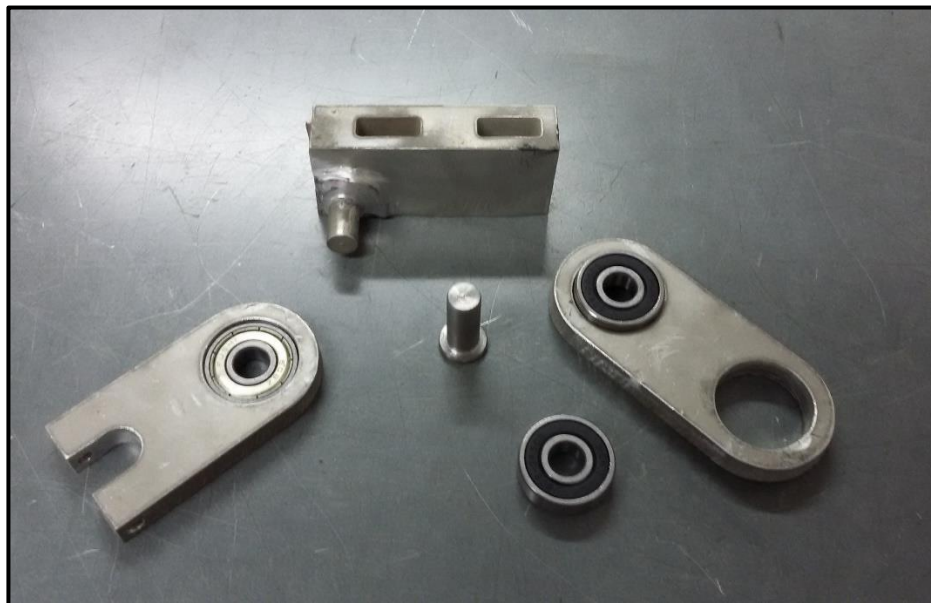


Figura 15 - Peças após o processo de refinamento.

Após o processo de refinamento, foi realizado o acoplamento dos rolamentos nas peças, com o uso de um martelo de unha. Durante o processo foi adicionada cola anaeróbica² nas paredes dos furos, para manter os

² A cola anaeróbica preenche as microtrincas existentes no material e só seca após a aplicação, com a ausência de oxigênio.

rolamentos presos às peças da melhor maneira possível. O processo de acoplamento pode ser visto na Figura 16.



Figura 16 - Acoplamento dos rolamentos circulares.

Feito isto, foi procedida a conexão entre as peças, por meio dos eixos. Assim como com o acoplamento dos rolamentos, a introdução dos eixos nos rolamentos também foi feita com o uso de um martelo de unha. O resultado pode ser visto na Figura 17.



Figura 17 - Mecanismo biela-manivela.

O mecanismo foi construído com dois graus de liberdade. O primeiro fica na peça superior, sendo um furo em corte que permite o deslocamento da peça superior em dois sentidos, o que torna possível a regulação para manter o mecanismo centrado, com a peça inferior completamente na horizontal. O segundo é o acoplamento do eixo do motor com a peça inferior, que através de

uma junção retângulo-circular, possibilita uma variação de ângulo de aproximadamente $\pm 45^\circ$.

Posteriormente, foi iniciada a montagem da suspensão com o novo mecanismo, no Laboratório de Usinagem e Comando Numérico da UFSC. Nesse estágio foi alterada a altura do motor elétrico, a instalação do mecanismo entre as chapas centrais e o parafusamento dos dispositivos. A suspensão com o mecanismo biela-manivela instalado pode ser vista na Figura 18. Em um primeiro momento, foi verificado o funcionamento com a eletrônica embarcada desligada, não sendo encontrado atrito que impedisse a movimentação livre do sistema. Entretanto, foram encontradas algumas restrições de funcionamento na ativação do motor pelo sistema eletrônico, como a deformação da chapa que sustenta o motor elétrico, ocasionando travamento do sistema.

Com isso, foi desenvolvido um novo processo de melhoria na parte mecânica. Foram adicionados dois braços metálicos no suporte do motor, aumento a resistência em relação à atividade do mesmo; foi implementado um sistema de regulagem de altura do suporte, que adiciona um novo grau de liberdade no sistema, dessa vez na altura do motor elétrico; foi desenvolvido um sistema de acionamento com uma alavanca fixa, feita de aço e madeira, algo que proporciona deslocamentos mais regulares em relação ao sistema previamente instalado. Com essa regularidade é possível averiguar o comportamento do sistema com mais precisão, observando com mais facilidade o funcionamento do amortecedor ativo.



Figura 18 - Suspensão com o mecanismo biela-manivela instalado.

Além disso, novamente foi verificado o comportamento do sistema sem a ação da eletrônica embarcada, obtendo uma oscilação livre e sem interferências. Uma comparação entre o protótipo antes e depois da última melhoria pode ser vista na Figura 19 e na Figura 20.

A suspensão também foi submetida a um exame de estresse, sendo devidamente ajustada no porta-malas de um veículo, no qual foi realizado um trajeto de aproximadamente 1 hora e 30 minutos, revezando entre estradas intermunicipais – trajetos de alta velocidade – e intramunicipais – trajetos de baixa velocidade – e com uma distância percorrida de aproximadamente 120 quilômetros. Após o percurso, não foi verificado nenhum tipo de folga no equipamento, estando este apto a entrar em funcionamento assim como estava antes do teste.

Além disso, foram adicionadas mais duas molas nos eixos que não possuíam molas. Estas, possuem menor rigidez em relação às que já estavam instaladas. A adição foi necessária para compensar a instalação do novo sistema

de amortecimento, que ficou mais pesado do que o anterior. Dessa maneira, a distância entre as plataformas centrais se manteve a mesma.

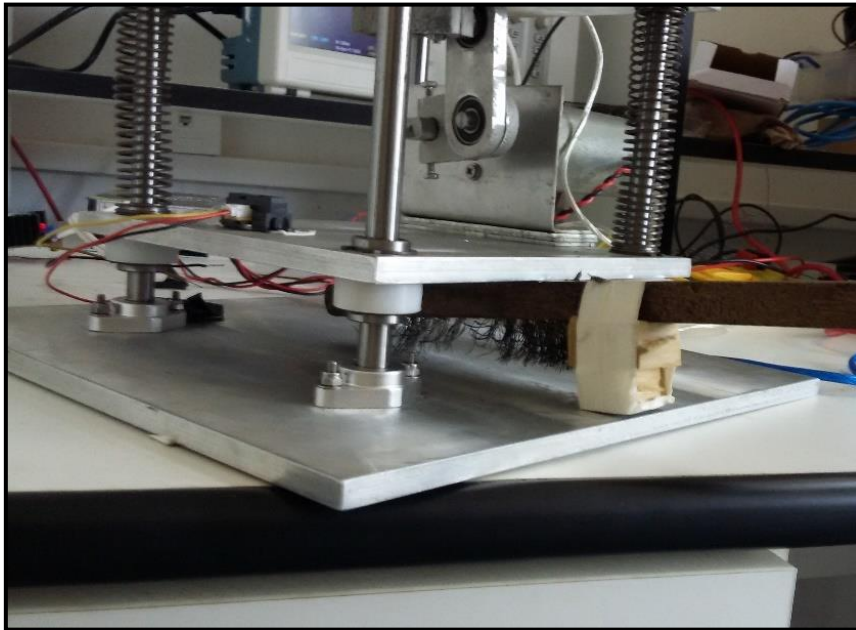


Figura 19 - Suspensão antes da última modificação

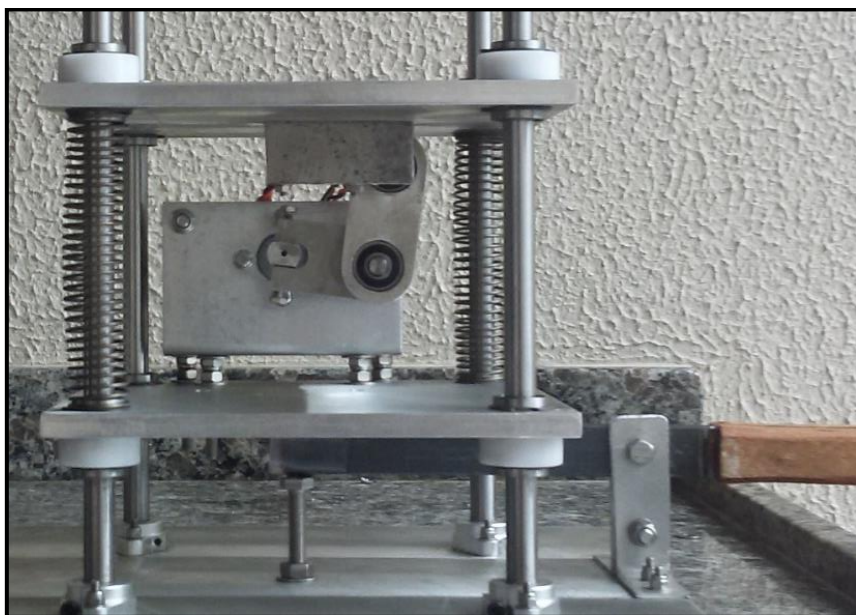


Figura 20 - Suspensão depois da última modificação.

3.2. Aspectos Eletrônicos

Nesta subseção serão tratados os assuntos pertinentes aos aspectos eletrônicos do projeto, sobre como o circuito funcionava em sua versão inicial e os avanços que foram impostos a partir daquele.

3.2.1. Materiais utilizados

Aqui serão apresentados os componentes eletrônicos que foram utilizados no projeto e suas características básicas.

3.2.1.1. Acelerômetro MPU-6050

O MPU-6050 foi o primeiro acelerômetro e giroscópio integrado que atua em três eixos em conjunto com um *Digital Motion Process* – DMP – em um circuito integrado de 4x4x0.9mm [18]. O dispositivo possui uma conversão analógica-digital de 16 bits, sendo possível programar a escala de aceleração e rotação para diversas aplicações. Além disso, o sensor também infere a temperatura interna, que é armazenada em registradores para ser processada posteriormente.

A comunicação com o dispositivo é feita pelo protocolo I²C, desenvolvido pela *Phillips* no início dos anos 1980 [19]. É uma comunicação simplificada, usada para conectar dispositivos de baixa velocidade do tipo mestre-escravo. No caso do MPU-6050, a comunicação é feita através de duas linhas, bidirecionais, *Serial Clock* e *Serial Data* (SCL e SDA, respectivamente). A linha SCL determina a frequência de operação do sensor, definida pelo microcontrolador, enquanto a linha SDA transmite os dados, byte a byte. O MPU-6050 suporta uma comunicação I²C à uma frequência máxima de 400kHz.

Este chip já está integrado a uma placa com um regulador de tensão, LEDs, resistores e capacitores. A tensão de alimentação aplicada pode estar entre 3,3V e 5V, e a conexão com o microcontrolador é feita através de 4 fios, sendo eles: (a) VCC; (b) GND; (c) SCL; e (d) SDA.

Na Figura 21 pode ser vista a placa com o circuito integrado MPU-6050.

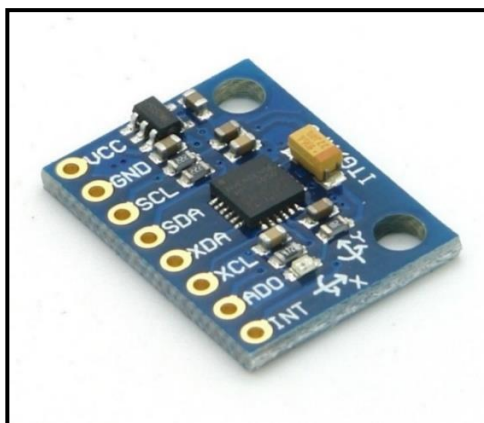


Figura 21 - Placa GY-521 com o circuito integrado MPU-6050. Retirado de [20].

3.2.1.2. Sensor de distância Sharp IR GP2Y0A41SK0F

O sensor SHARP IR GP2Y0A41SK0F é um sensor de distância, que realiza o cálculo através do atraso de propagação e reflexão de uma onda infravermelha. É composto por um LED infravermelho (IR), um receptor sensível à IR e um circuito de processamento de sinais. Empregando o método de triangulação, características como reflexão do objeto, temperatura do ambiente e atraso de propagação não alteram com facilidade a sua precisão [21]. O dispositivo possui 29,5x13x13,5mm de tamanho.

A comunicação com o microcontrolador é feita por meio de três canais, sendo eles: (a) VCC; (b) GND; e (c) Vout.

A alimentação pode ser aplicada dentro do intervalo de 4,5 V a 5 V e é possível calcular distâncias de 4cm a 30cm, com uma resolução de até 5 milímetros. A saída do sensor é uma tensão inversamente proporcional à distância medida. O sensor amostra sinais em sua saída a cada $16,5 \text{ ms} \pm 3,7 \text{ ms}$, fornecendo uma frequência de amostragem máxima de 49,5 Hz. O sensor pode ser visto na Figura 22.



Figura 22 - SHARP IR GP2Y0A41SK0F. Retirado de [21].

3.2.1.3. Regulador de tensão LM317T

O LM317T é um regulador de tensão capaz de fornecer uma corrente de até 1,5 A a uma tensão de 1,25 V até 35 V. É composto por três terminais, um de entrada, um de saída e um de ajuste. Possui limitador de corrente e proteção contra sobretensões. O modelo utilizado é o LM317KCT, encapsulamento TO-220, com as dimensões de 10,16x8,59x3,33mm. O ajuste é feito por meio de um circuito resistivo entre o pino de saída e de ajuste. Também é recomendável o uso de capacitores de entrada para redução de interferências e oscilações, respectivamente.

Na sua carcaça existe uma chapa que permite a conexão de dissipadores de calor, necessários para quando a potência média dissipada é superior à 500 mW. Na Figura 23 pode ser visto o dispositivo.

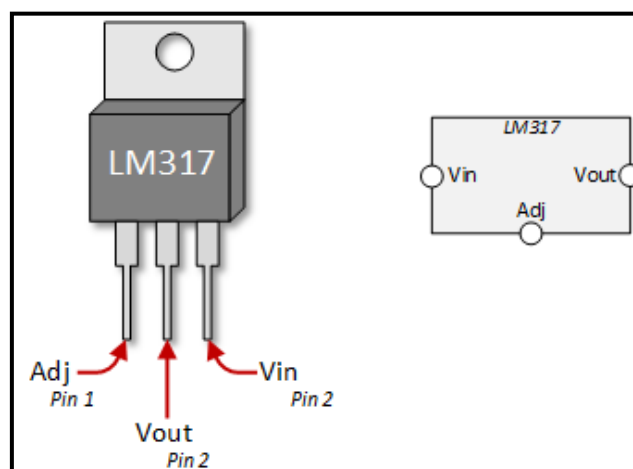


Figura 23 - LM317 utilizado. Retirado de [22].

3.2.1.4. Optoacoplador 4N25

O 4N25 é um circuito integrado composto por um transistor optoacoplado de um canal. A base do transistor é sensível à luz, sendo excitada por um LED infravermelho, sendo que ambos estão dentro do circuito integrado.

É capaz de fornecer uma corrente máxima de 60 mA à carga, com uma tensão máxima entre o coletor e emissor de 30 V. Pode dissipar até 120 mW, sendo ideal em aplicações de controle as quais se deseja desacoplar fisicamente dois circuitos, evitando que possíveis correntes de retorno ou outros problemas elétricos possam queimar microcontroladores ou microprocessadores de alto custo. Não funciona como amplificador, tendo como principal finalidade o acoplamento óptico de sinais digitais ou sinais PWM. Na Figura 24 pode ser visto o circuito integrado e seu esquemático elétrico externo.

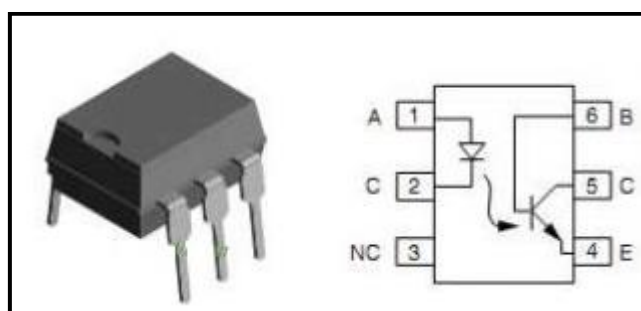


Figura 24 - Circuito integrado 4N25. Retirado de [23].

3.2.1.5. Transistor TBJ BC548C

O transistor bipolar de junção BC548C foi escolhido pelo seu baixo custo e disponibilidade comercial, tendo sido vastamente usado em diversas situações ao longo do curso. É um TBJ *npn*, construído com silício dopado.

Pode fornecer uma corrente de até 100 mA à carga, operando numa tensão máxima entre coletor e emissor de 30 V, e sendo capaz de dissipar até 500 mW. Pode ser usado tanto para aplicações onde se deseja o chaveamento ou amplificação. No seu limite de fornecimento de corrente, possui um ganho estático de corrente igual a aproximadamente 300. Na Figura 25 pode ser visto o TBJ e sua pinagem.

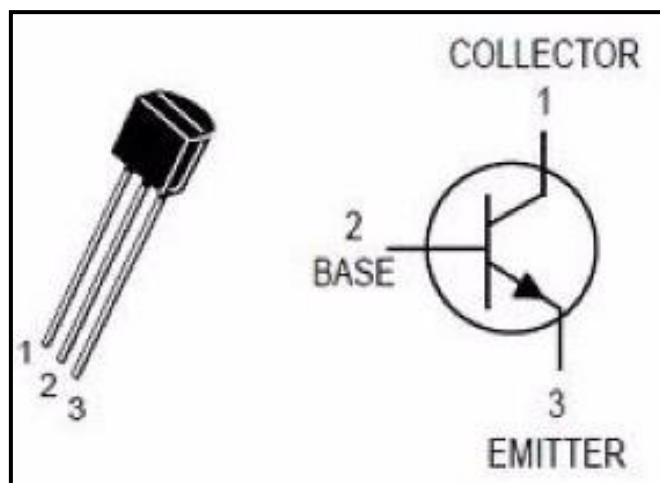


Figura 25 - TBJ BC548. Retirado de [24].

3.2.1.6. Circuito UC3844 e conversor de tensão DC/DC *Booster*

O UC3844 é um circuito integrado de controle PWM em modo corrente, que aplicado a um circuito adicional (com capacitores, indutores e resistores) forma um elevador de tensão DC/DC do tipo *booster*. O sistema pode fornecer até 100 W de saída, aceitando uma tensão de entrada entre 12 V e 32 V, podendo ser elevada de 12 V até 35 V a no máximo 6A. Suas dimensões são 65x65,5x23mm, possuindo dois dissipadores laterais para resfriamento. A regulação da tensão de saída é feita com o uso de um potenciômetro. O conversor pode ser visto na Figura 26.

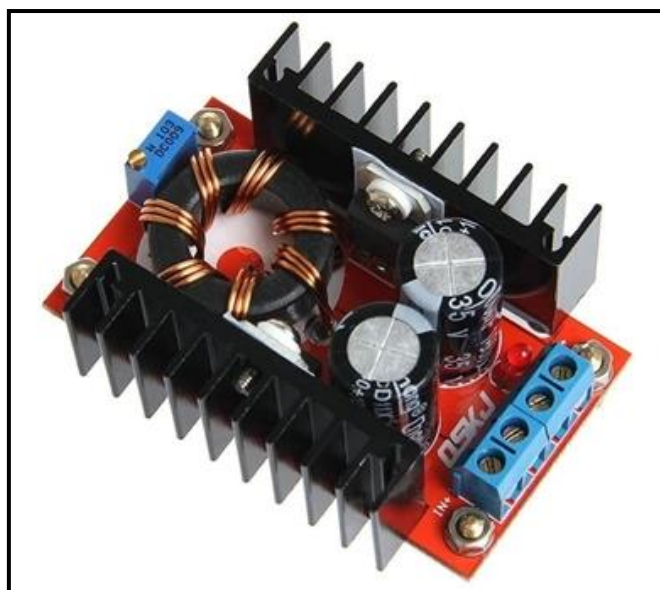


Figura 26 - Regulador de tensão DC/DC *Booster*. Retirado de [25].

3.2.1.7. Driver de potência para motor DC

O driver de acionamento do motor DC é constituído por um *shield*³ integrado com o driver de motor ponte-H VNH2SP30. Este sistema é capaz de alimentar um motor com 18 V à 30 A, suportando um sinal PWM de até 20 kHz. O acionamento é feito através de dois sinais digitais de entrada e um sinal PWM, todos de 5 V. O driver consome, em cada uma de suas entradas de controle, 10 mA. Na Figura 27 pode ser visto o driver e o *shield* utilizados. Os canais que são conectados ao microcontrolador são: (a) Vcc; (b) GND; (c) InA (entrada digital 1); (d) InB (entrada digital 2); e (e) PWM.

Além destes, existem mais 4 terminais de potência, dois de alimentação e dois de saída, sendo eles: (a) +V (entrada); (b) GND (entrada); (c) +V (saída, conectada ao motor); e (d) GND (saída, conectada ao motor).

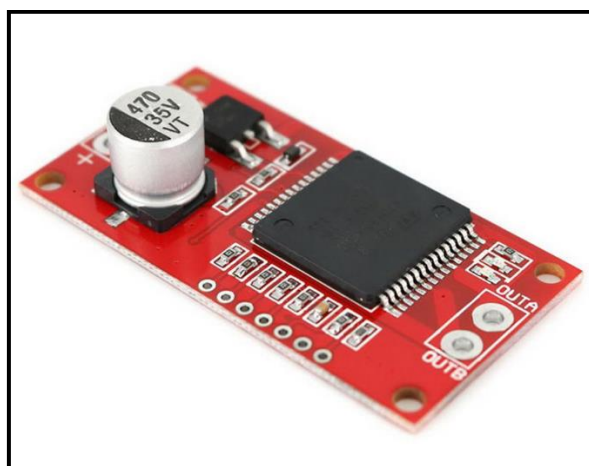


Figura 27 - VNH2SP30 integrado ao shield. Retirado de [26].

3.2.1.8. Fonte de Tensão DC 12V Hayonik FTE1210

A fonte de tensão chaveada colmeia Hayonik FTE1210 é capaz de suprir 120 W de potência à uma corrente máxima de 10 A. A tensão de saída pode ser ajustada de 11 V a 13 V, e o equipamento possui dimensões de 42x98x198mm [27]. Na Figura 28 pode ser visto o aparelho.

³ Shields são placas de extensão de hardware que se conectam em placas de desenvolvimento, como o Arduino, por exemplo.



Figura 28 - Fonte Hayonik FTE1210. Retirado de [27].

3.2.1.9. Placa de prototipagem Arduino MEGA 2560

O Arduino Mega 2560 é uma placa de prototipagem com um microcontrolador Atmega 2560, da Atmel. O microcontrolador é baseado em uma arquitetura RISC de 8 bits e opera na frequência de 16MHz. Este modelo de placa oferece 54 pinos de entrada e saída, dos quais 15 podem ser usados como saídas PWM, 16 como portas analógicas, 4 UARTs e um oscilador na frequência de 16 MHz.

Este modelo pode ser programado com simplicidade através de seu ambiente de desenvolvimento integrado. A programação é feita em uma linguagem própria do Arduino, semelhante à linguagem C. O funcionamento de um código no microcontrolador ocorre através de ciclos. Todavia, antes de entrar na sua fase cíclica, são incluídas no cabeçalho do código as bibliotecas, bem como definidas as portas de entrada e saída do Arduino e configuradas as variáveis globais do código.

Esse microcontrolador possui um grande fórum online [29] e muitos componentes prontos para serem conectados à placa, de maneira que o uso deste dispositivo é prático e eficaz para a maioria dos projetos nos quais o processamento precisa ser simples e ágil. Na Figura 29 pode ser visto o equipamento.

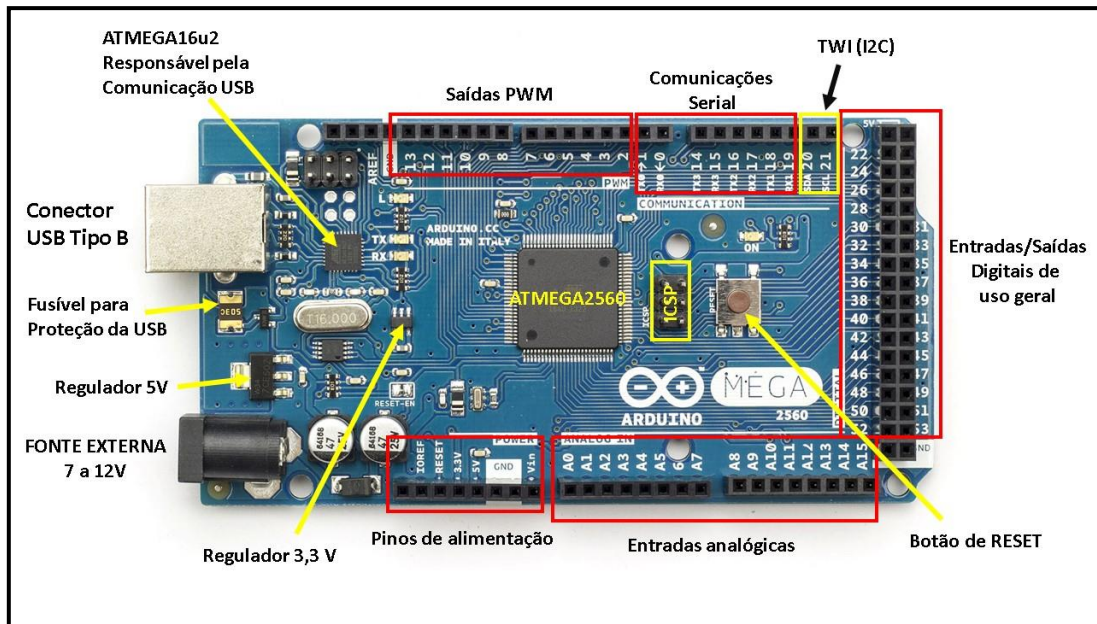


Figura 29 - Arduino MEGA 2560. Retirado de [28].

3.2.1.10. Outros Componentes

Além dos componentes que foram citados nas subseções anteriores, também foram utilizados outros componentes elétricos e eletrônicos, que por serem de maior simplicidade, dispensam maiores explicações:

- a. Resistores;
- b. Capacitores;
- c. Bornes de conexão;
- d. Protoboard;
- e. Jumpers;
- f. Motor elétrico DC de 18V e três ímãs de campo permanente.

3.2.2. Versão inicial do circuito eletrônico

O sistema eletrônico inicial era composto por um microcontrolador Arduino Mega 2560, um acelerômetro MPU-6050, transistores optoacoplados 4N25, um driver de acionamento VNH2SP30, um regulador de tensão LM7805, uma fonte de tensão, um motor elétrico DC e resistores [9].

Basicamente, o acelerômetro fazia a leitura da aceleração da plataforma central-superior do veículo, enviava os dados para o microcontrolador, onde estes eram tratados e processados. Posteriormente, o microcontrolador enviava os sinais de acionamento para o driver do motor através dos optoacopladores, que os transmitia com alta potência para ativar a rotação do motor. O circuito em diagrama de blocos pode ser melhor representado através da Figura 30.

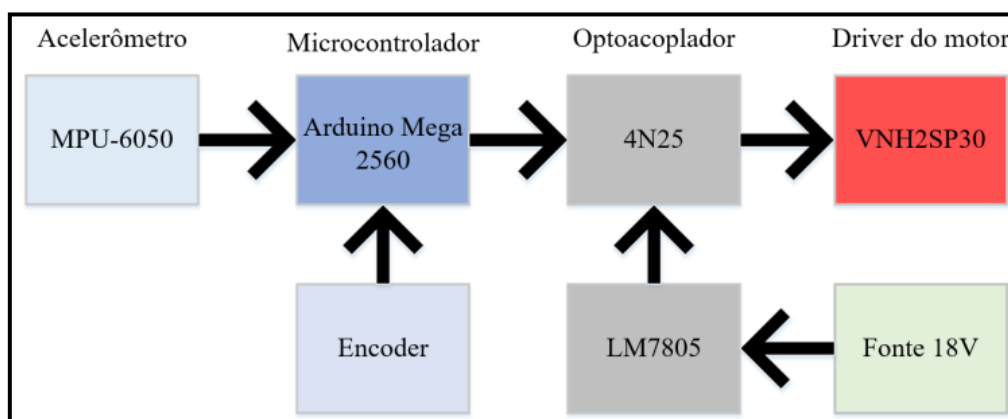


Figura 30 - Diagrama de blocos da versão inicial do projeto. Retirado de [9].

O regulador de tensão LM7805 pode fornecer uma corrente de saída máxima de 1 A, o que é um valor relativamente pequeno, levando em consideração que o regulador deve fornecer corrente suficiente para a alimentação do driver, dos transistores bipolares de junção e dos transistores optoisolados. O fator se agrava caso no futuro sejam adicionados novos componentes, de maneira que o regulador acabaria por não conseguir suprir a necessidade de consumo dos demais componentes do circuito e acabaria por queimar. Além disso, seria interessante o conhecimento da posição da plataforma central-superior para verificar qual é o impacto que a mesma sofre diante de perturbações na plataforma central-inferior, facilitando a análise de desempenho do protótipo.

A corrente máxima que pode ser transferida para a carga pelo optoacoplador é de 60 mA [23]. A corrente requerida para acionamento do driver VNH2SP30 pode chegar até 10 mA [29], tanto para as entradas *booleanas*, que controlam o sentido de rotação, quanto para a entrada do sinal PWM, que controla a intensidade e a velocidade de rotação.

A configuração do circuito em placa de prototipagem também não é a melhor opção para um circuito estável, principalmente porque os cabos e os componentes podem se desconectar com facilidade, podem ocasionalmente gerar curtos-circuitos, inversões de polaridade e até mesmo conexões equívocas.

3.2.3. Desenvolvimento dos Aspectos Eletrônicos

Baseando-se nesse esquema, algumas mudanças foram efetuadas, com o objetivo de melhorar a robustez do sistema eletrônico. As mudanças realizadas foram as seguintes:

- a. Instalação da fonte de tensão de 12V;
- b. Implantação do regulador de tensão DC/DC booster;
- c. Adição de 3 novos canais optoacoplados;
- d. Adição de transistores bipolares de junção *npn* na saída dos optoacopladores;
- e. Troca do regulador de tensão LM7805 para o LM317T;
- f. Introdução do sensor de posição absoluta;
- g. Fabricação de uma placa de circuito impresso.

O diagrama de blocos do sistema desenvolvido pode ser visto na Figura 31.

A fonte de tensão foi instalada com a necessidade de atender à necessidade energética do circuito com margem de segurança. Além da fonte de tensão, foi adicionado o conversor DC-DC do tipo booster, que agrega ao sistema a possibilidade da troca dos drivers e dos motores elétricos, tendo em vista que é possível regular a tensão em uma faixa de 12 V (tensão de entrada) até 35 V e fornecer uma corrente máxima de 6,5 A.

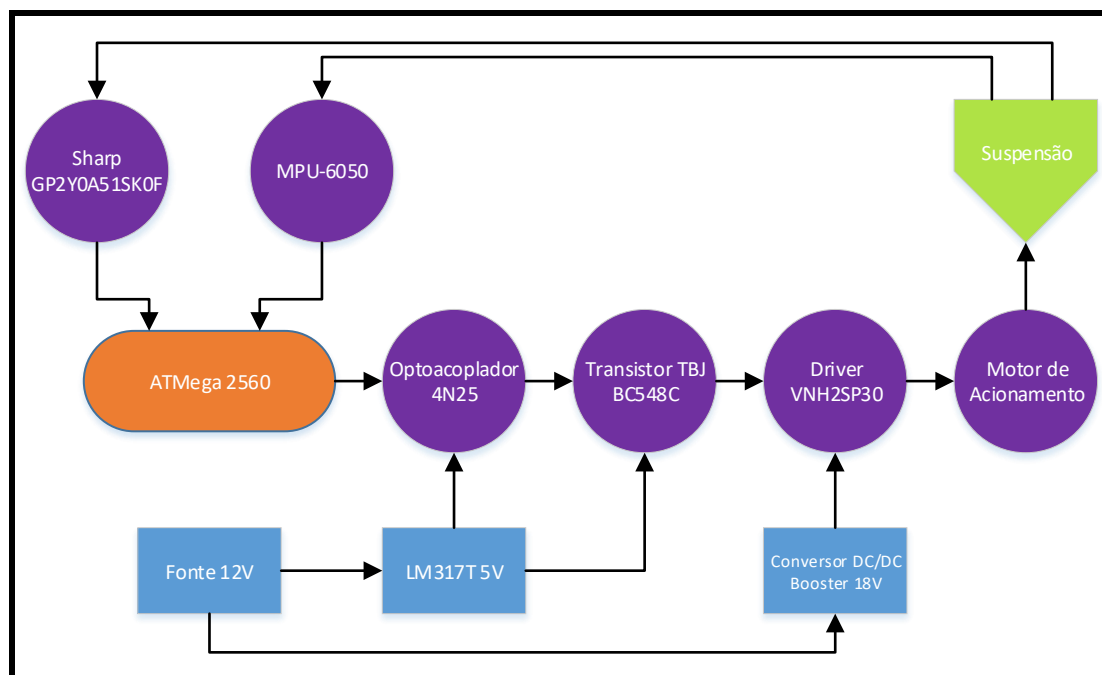


Figura 31 - Diagrama de blocos do novo circuito eletrônico.

É desejado que em novos aprimoramentos da suspensão se adicione um outro motor elétrico para simular as variações do terreno, ou ainda, para auxiliar no processo de amortecimento. Desta maneira, foram adicionados mais três canais optoacoplados que permitem a implantação de outro *driver* semelhante no circuito.

Na saída dos optoacopladores foram instalados transistores bipolares de junção, com o objetivo de evitar a sobrecarga dos transistores fotosensíveis, tendo em vista que a capacidade de fornecimento de corrente desse dispositivo é 40% menor do que o TBJ. Com o uso dos transistores, aumenta-se a confiabilidade do sistema, evitando qualquer desgaste prematuro de algum circuito integrado instalado.

A troca do regulador de tensão LM7805 para o LM317T também tem como finalidade aumentar a capacidade de suprimento de energia ao sistema. O regulador de tensão LM317T pode fornecer até 1,5 A, o que aumenta a margem de segurança na aplicação do dispositivo.

A introdução de um sensor de posição absoluta foi realizada com o objetivo de adicionar uma nova informação para avaliação de desempenho do sistema ou ainda, no futuro, fornecer um novo sinal para o sistema de controle

utilizado. O sensor fica localizado na plataforma superior fixa e realiza o cálculo da distância desta plataforma em relação à plataforma central-superior.

3.2.3.1. Circuito eletrônico

Foi implementado um novo circuito que integra os componentes e os subsistemas eletrônicos. Para tanto foi utilizado o software ISIS, da suíte Proteus. Destarte, o projeto foi feito com a inclusão de três novos canais fotoacoplados, contando com optoacopladores, transistores bipolares de junção, capacitores, resistores e um regulador de tensão, sendo todos os componentes baseados em valores disponíveis no mercado. Também foram desenvolvidos todos os terminais de entrada e saída, possibilitando, posteriormente o design de um circuito impresso (printed circuit board – PCB).

O projeto do regulador de tensão, que abaixa a tensão de entrada de 12 V para aproximadamente 5 V pode ser visto na Figura 32. O Capacitor C1 é colocado com a intenção de remover ruídos da fonte, enquanto o capacitor C2 evita a oscilação do sinal de saída [30]. Os resistores R2 e R1 definem a tensão de saída do dispositivo, de forma que:

$$V_{cc} \cong 1,25 * \left(1 + \frac{R1}{R2}\right) \quad 3$$

Como deseja-se uma saída próxima de 5 V, foi escolhido o valor de R2 como 470 Ω e R1 como 1,5 k Ω . Desse modo, o valor da tensão de saída é dado por:

$$V_{cc} \cong 1,25 * \left(1 + \frac{1500}{470}\right) = 5,24 V \quad 4$$

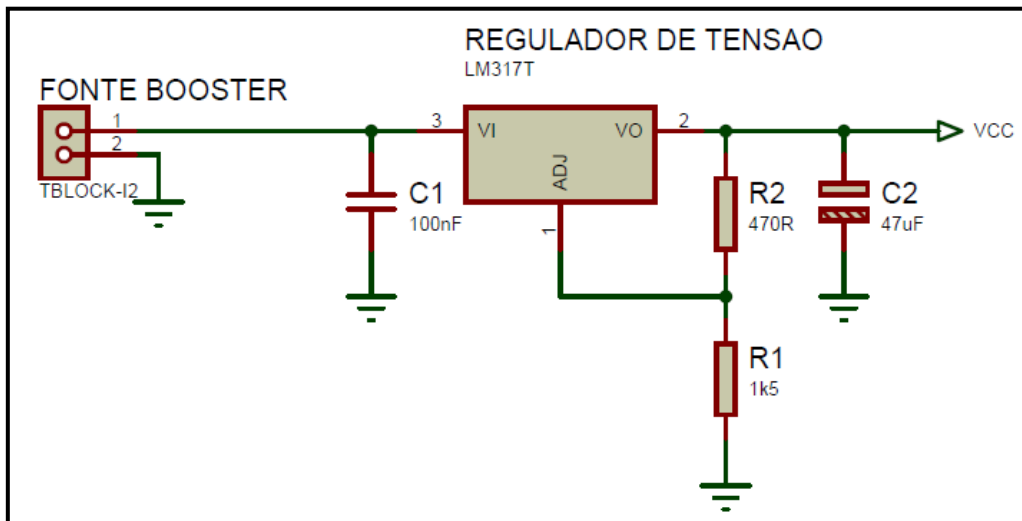


Figura 32 - Regulador de tensão abaixador projetado

O desenvolvimento do canal optoacoplado foi feito usando as informações encontradas no *datasheet* do dispositivo [23], e pode ser visto na Figura 33. A corrente suportada pelo LED infravermelho interno é de 10 mA a uma tensão de operação típica de 1,3V. Com isso, chega-se à conclusão que o resistor conectado ao pino 1 do 4N25 deve ser de 370Ω, conforme pode ser visto na Equação 5.

$$R_{Bopt} = \frac{V_{in} - V_{led}}{I_{led}} = \frac{5 - 1,3}{10 * 10^{-3}} = 370 \Omega \quad 5$$

Entre a alimentação e o coletor do optoacoplador foi instalado um resistor de 3,3 kΩ. O emissor está ligado diretamente ao GND. O coletor do transistor optoacoplado está conectado a um resistor de 68 kΩ, que se conecta à base do TBJ. O cálculo da corrente de base do TBJ quando o sinal de entrada do optoacoplador é 5 V pode ser visto na Equação 6.

$$V_{CC} - I_B * R_3 - I_B * R_{21} - V_{BE} = 0 \rightarrow I_B = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_{21} + R_3} = 60,31 \mu A \quad 6$$

Conforme o *datasheet* do transistor *npn* BC548C [30], o valor do ganho estático de corrente pode variar de 270 a 800 à temperatura de 25°C. Utilizando como referência o menor ganho do dispositivo e supondo que a tensão V_{CE} é aproximadamente zero, tem-se que a corrente de base do transistor bipolar de junção satisfaz a condição para que o dispositivo esteja na região de saturação [14], conforme pode ser visto na Equação 7.

$$I_B = 60,31 \mu A > \frac{I_{Csat}}{H_{fe}} A = \frac{V_{CC}/R_3}{H_{fe}} = \frac{4,17 * 10^{-3}}{270} = 15,44 \mu A \quad 7$$

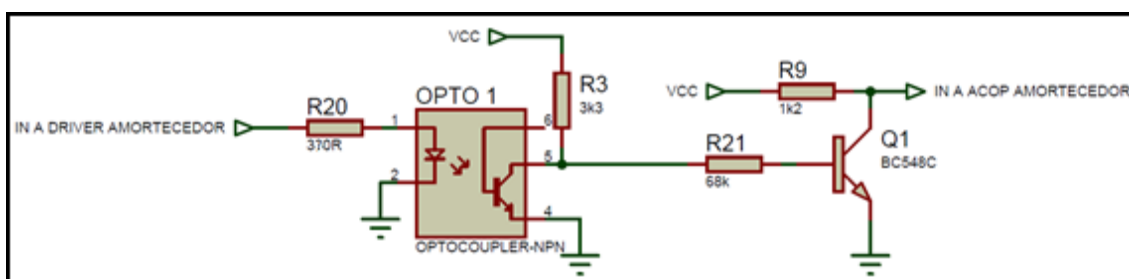


Figura 33 - Canal Optoacoplado 1

3.2.3.2. Placa de circuito impresso

Finalizadas as simulações, iniciou-se a produção da placa de circuito impresso. A placa foi feita através do processo de transferência térmica, no qual as trilhas são impressas em papel fotográfico através de uma impressora a laser, e o *tonner* é transferido à placa de fenolite cobreado por meio da sobreposição do papel em alta temperatura. Posteriormente, a placa de fenolite cobreado fica submersa em perclorato de ferro, dado pela fórmula $FeCl_3$, dissolvido em água.

A porção da placa não coberta por *tonner* tem sua camada de cobre extraída no processo de corrosão, pois os sais de cobres são solúveis na substância e, portanto, são removidos da placa. Já a parte coberta pela tinta não

sofre alterações, pois o percloroeto de ferro diluído não ataca o material. Dessa maneira, o cobre sob o pigmento fica protegido [32].

Terminado o processo de corrosão, que leva em torno de quinze minutos, a placa de fenolite cobreado é removida da solução, lavada e lixada, de maneira a remover o *tonner* sobre as trilhas.

Como o sistema eletrônico possui vários blocos, foi utilizada uma chapa de acrílico retangular com espessura de 6 milímetros, com a finalidade de oferecer suporte aos vários blocos elétricos e eletrônicos que compunham o sistema eletrônico do protótipo. Os blocos foram colados na chapa de acrílico com o uso de fita dupla face para fixação extrema, que é mais simples que a implantação de parafusos e oferece resistência mais do que suficiente.

Adicionalmente, foram inseridos bornes no circuito, com a finalidade de simplificar e centralizar a comunicação do sistema eletrônico com a parcela mecânica do protótipo. Desta maneira, foi desenvolvido um cabo elétrico com o comprimento de 1,2 metro, isolado e agregado pelo uso de tubo isolante termo retrátil, que se conecta à suspensão através de uma tomada. O circuito com o cabo de conexão e a tomada podem ser vistos nas Figura 34 e Figura 35. O cabo possui 8 canais, sendo eles:

- a. Alimentação +5 V;
- b. Terra;
- c. Acionamento do motor 1;
- d. Acionamento do motor 2;
- e. COM1 – Acelerômetro;
- f. COM2 – Acelerômetro;
- g. COM3 – Sensor de distância;
- h. COM4 – Extra.

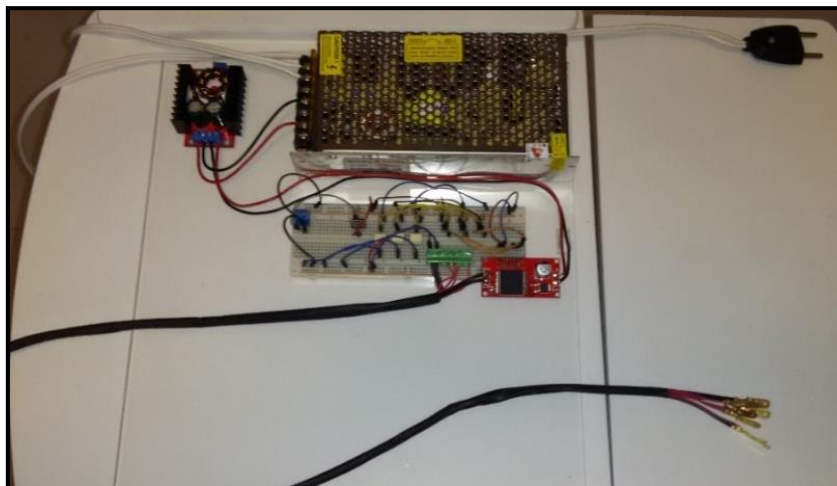


Figura 34 - Bloco eletrônico do protótipo.

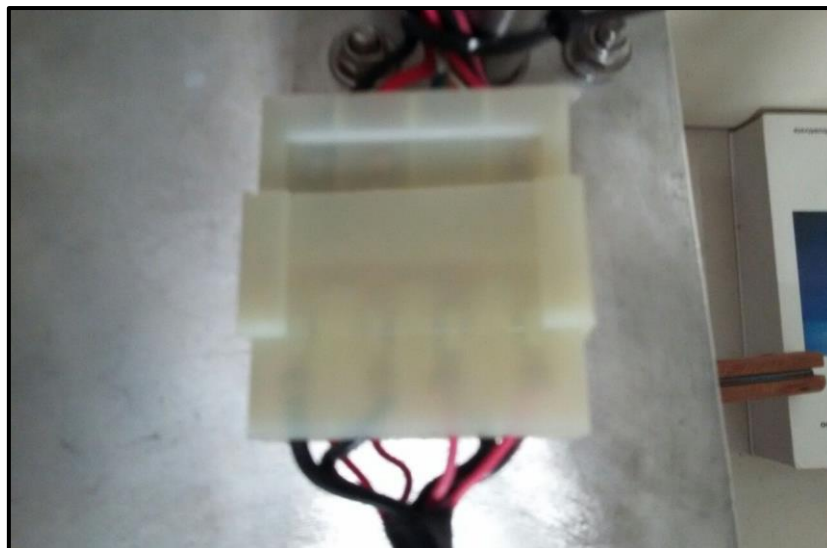


Figura 35 - Tomada de conexão entre o bloco eletrônico e o protótipo eletrônico.

3.3. Aspectos de Processamento

Nesta subseção serão apresentados os assuntos relativos à parcela de processamento do projeto, abordando a primeira versão do algoritmo e as evoluções desenvolvidas.

3.3.1. Versão Inicial do Algoritmo de Processamento

O controle elaborado na primeira etapa [9] era constituído basicamente de um sistema de controle proporcional, onde o sinal de controle é proporcional ao sinal de erro detectado pelo acelerômetro.

O algoritmo de controle utilizava apenas a informação da aceleração vertical, embora fosse realizada a varredura de todos os 14 registradores do MPU-6050. A leitura desnecessária aumenta o atraso de cada ciclo e por consequência aumenta o período de amostragem, deixando a frequência de amostragem do sistema menor.

Além disso, na primeira versão do protótipo não existia nenhum tipo de filtragem do sinal do acelerômetro, permitindo a captação de ruídos indesejados.

3.3.2. Desenvolvimento dos aspectos de processamento

O novo algoritmo de controle foi desenvolvido na própria IDE do Arduino, com a introdução da leitura do sensor de distância, um algoritmo de filtragem, e um controlador PID com as suas três parcelas atuando. Na Figura 36 pode ser visto o novo diagrama de blocos do algoritmo.

Primeiramente, no cabeçalho do código são incluídas as bibliotecas que serão utilizadas, bem como definidas as portas de entrada e saída do Arduino e configuradas todas as variáveis globais de código.

No próximo estágio ocorre uma fase de configuração inicial, que é realizada apenas uma vez, na qual são feitos os ajustes iniciais do sistema. Nesta fase, a biblioteca *Wire* do Arduino é iniciada, permitindo a comunicação I2C, necessária para leitura do acelerômetro. O microcontrolador é inicializado como mestre e o MPU-6050 como escravo. Ainda nesta fase, o acelerômetro é removido do modo *sleep*, configurando o registrador de *sleep mode* do dispositivo para zero. Também aqui são zerados ambos vetores que armazenam os valores lidos, para filtragem em tempo real dos sinais lidos, e definidas as portas de saída para o driver de acionamento e a porta geradora do sinal PWM de saída.

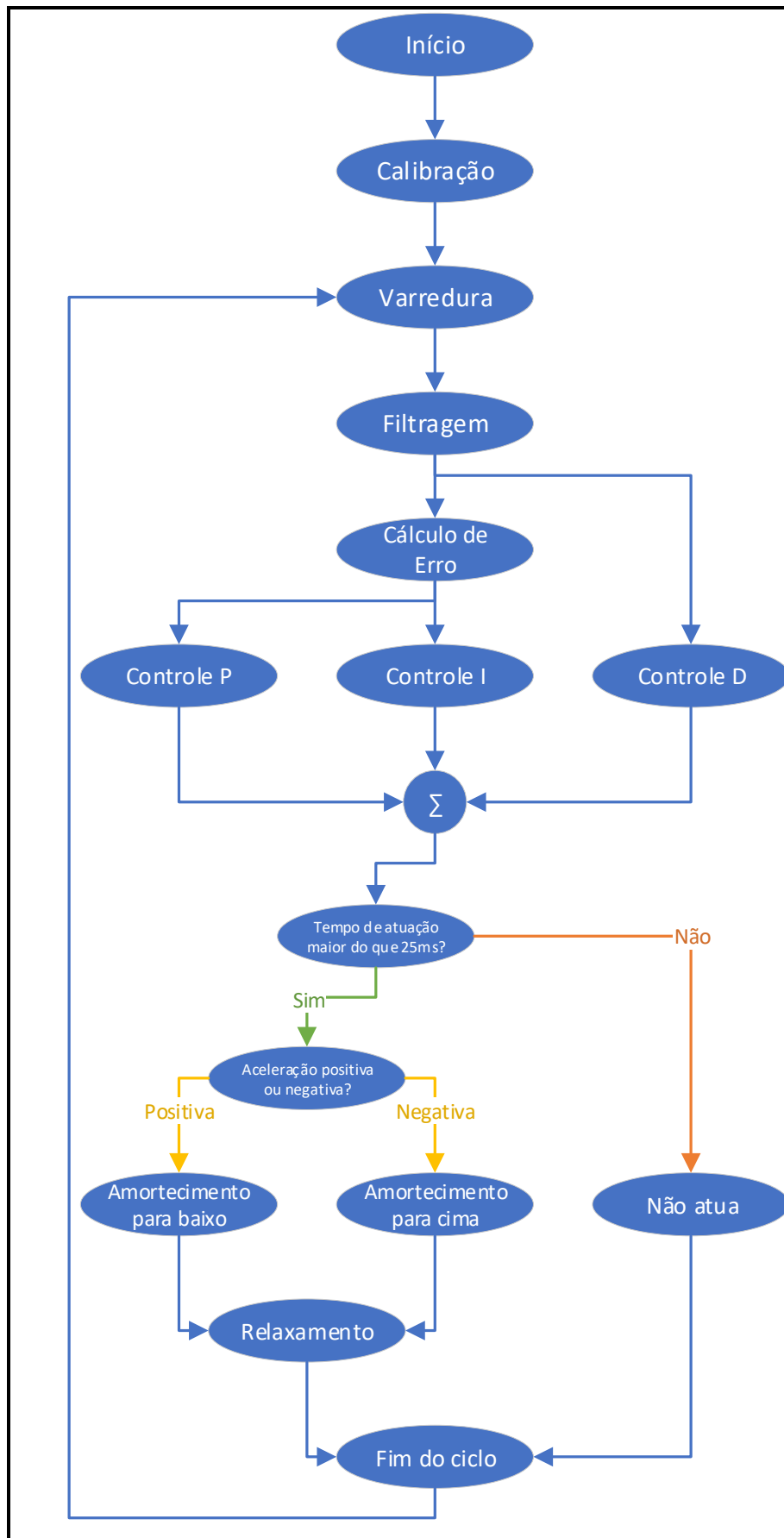


Figura 36 - Novo diagrama de blocos do algoritmo de processamento.

O último passo da fase de configuração é a calibração do valor de repouso da aceleração lida pelo acelerômetro, que deve ser a aceleração gravitacional sobre o aparelho. A calibração se faz necessária pelo fato de que interferências eletromagnéticas e até mesmo distorções sensíveis de alimentação alteram o valor lido pelo dispositivo, de maneira que o valor associado ao repouso lido em um momento pode ser diferente do de outro, o que torna inviável fixar o valor de repouso. O novo ponto de operação é encontrado através da média de 100 valores de aceleração.

Concluída a fase de configuração, o processo entra no modo *loop*, no qual o código é executado de maneira repetitiva. A primeira função desta fase se chama *Sweep*, e nela é realizada a varredura de ambos sensores instalados no protótipo de suspensão. O MPU-6050 possui 14 registradores, sendo 2 para cada variável lida pelo aparelho: 3 variáveis de giroscópio, 3 variáveis de aceleração e uma variável que armazena o valor de temperatura do ambiente. Foram alterados os endereços de leitura dos registradores, de maneira a ler somente os dois nos quais está contido o valor da aceleração vertical. Isso diminui o atraso na varredura do sensor, o que significa uma diminuição de tempo em cada ciclo do processo e conseqüentemente uma frequência de amostragem maior pelo microcontrolador, tornando mais precisa a leitura dos valores obtidos pelos transdutores.

Além disso, agora também é realizada a leitura do sensor de distância, que será usado para análise do comportamento oscilatório do protótipo. Para isso, é feita a leitura da tensão fornecida pelo sensor através de uma porta analógica de entrada do Arduino. Após, é feita a conversão do valor em tensão para o valor em distância, dado em centímetros, usando a Equação 8.

$$cmValue = 13 * pow(sensorValue * 0.0048828125, -1) \quad 8$$

A função pode ser obtida através do gráfico da Figura 37, retirado do *datasheet* do sensor [21], que fornece a tensão de saída pela distância mensurada.

Com a finalidade de remover o ruído associado aos sinais obtidos, foi elaborado um filtro de resposta finita ao impulso, no domínio do tempo, através do método de média móvel, que neste caso extrai a média das últimas três amostras como resultado. O intuito dessa aplicação é suavizar o sinal em tempo real, evitando o acionamento desnecessário do amortecedor pelo sistema de controle. Para isso, filtragem é feita tanto para a aceleração quanto para a distância. O que determinou o uso do filtro de média móvel foi a sua simplicidade de aplicação e velocidade de filtragem, apresentando pouco impacto no desempenho do sistema em tempo real.

Posterior à execução da função de varredura e filtragem, o laço entra na função *Control*, na qual o algoritmo de controle PID é aplicado. Primeiramente, é preciso calcular o intervalo de tempo entre as duas últimas amostras, pois essa medida é necessária para os cálculos da parte integral e da parte derivativa da operação. Após isso, é feito o cálculo do erro, mediante a subtração do valor lido instantaneamente do valor de ponto de operação, que foi calculado antecipadamente pela função de calibração do código.

Em seguida, entra em ação o algoritmo de controle efetivamente. Inicialmente, é calculada a parcela proporcional, na qual a constante proporcional k_P multiplica o valor de erro. O objetivo dessa fração do controle é minimizar o erro e aproximar o valor de aceleração lido ao valor de referência. As variações bruscas são corrigidas majoritariamente pela atuação da parte proporcional do controlador. Todavia, a parcela proporcional não atua de maneira eficiente em regime de repouso, de maneira que a resposta da atuação proporcional faz com que o valor lido em tempo real oscile em relação ao *setpoint*. Para corrigir esta oscilação, utiliza-se a parcela integral.

Na ação integral, na qual uma variável é incrementada em cada ciclo pelo valor do erro multiplicado pela constante integral k_I e pelo intervalo de tempo decorrido desde o último ciclo. O objetivo dessa parte é corrigir o erro em regime estável, não só minimizando o erro, mas o eliminando quase completamente.

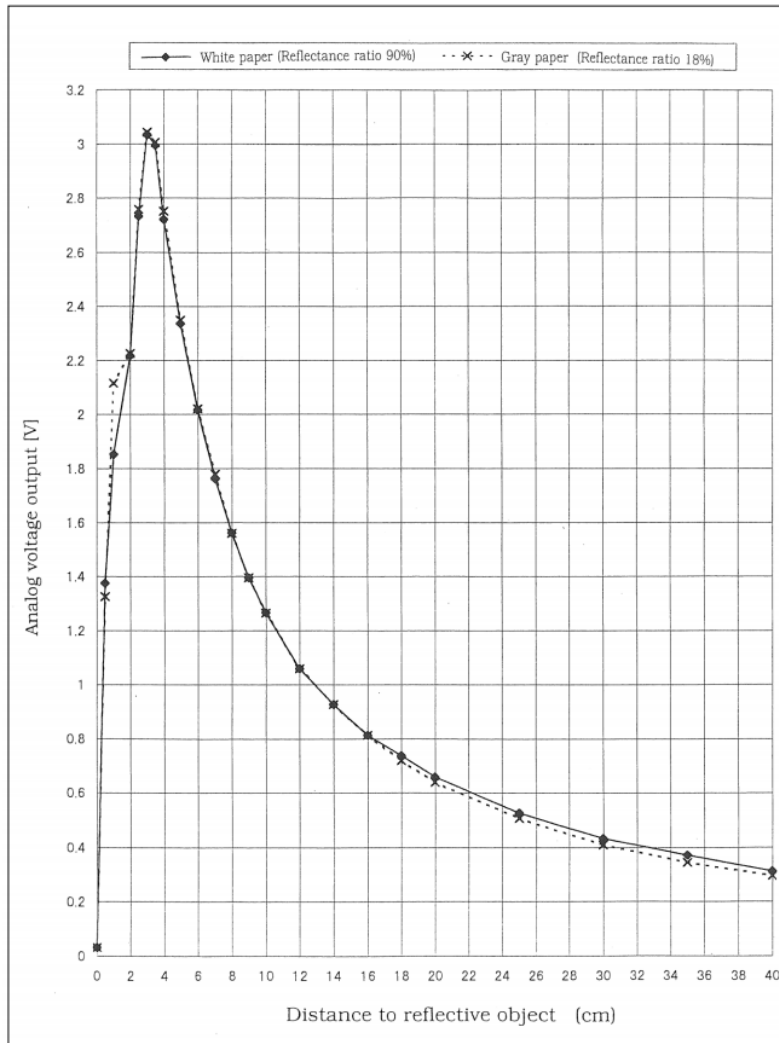


Figura 37 - Tensão de saída pela distância medida. Retirado de [21].

Para completar o controlador PID, é calculada a parcela derivativa. Diferente das outras duas, nesta não se utiliza o *setpoint* como valor de referência, e sim a leitura anterior, calculando-se qual é a diferença entre as duas últimas amostras. Do valor obtido, multiplica-se a constante derivativa k_D e divide-se pelo intervalo de tempo passado. A finalidade dessa porção de controle é antecipar a ação ao erro, agindo de maneira preditiva. Depois de calculados, os três valores de controle são somados em uma só variável, chamada *Hummingbird*⁴.

⁴ A inspiração do nome veio do pássaro beija-flor – *hummingbird*, em inglês – que impressiona as pessoas com a sua agilidade e autocontrole, sendo a única ave capaz de parar no ar para recolher o néctar das flores.

A próxima função da fase cíclica é a de ativação, chamada *Trigger*. Esta função ativa o motor no sentido horário ou anti-horário, através do envio de um sinal booleano de dois bits e um sinal PWM para o controlador. Na Tabela 1 pode ser vista a ação do *driver* no motor dependendo dos sinais enviados pelo microcontrolador.

A ação do controle ocorre por tempo de atuação, onde o tempo é o próprio valor armazenado na variável *Hummingbird*, em milissegundos. Após a ação do motor, existe uma janela de relaxamento no sistema, na qual não ocorre atuação do motor elétrico. O objetivo disso é permitir a atuação do amortecimento, evitando que o motor fique acionando indefinidamente pelo controlador, o que traria instabilidade ao protótipo.

| Tabela Verdade | | |
|----------------|-----|---------------------------------|
| InA | InB | Resultado |
| 0 | 0 | Break GND |
| 0 | 1 | Rotação no sentido horário |
| 1 | 0 | Rotação no sentido anti-horário |
| 1 | 1 | Break VCC |

Tabela 1 - Tabela verdade dos sinais de controle enviados para o *driver*.

O motor atua com um pulso PWM de 980Hz com um *duty cycle*⁵ de 25,1%. Esse valor foi escolhido pois o motor do sistema conta com somente três ímãs permanentes, de maneira que o uso do *duty cycle* para atuar no controle da suspensão não funciona de maneira correta. Somente alguns valores de *duty cycle* foram encontrados de maneira com que o motor seja capaz de amortecer o sistema, que foram valores acima de 86% e valores entre 24% e 25,5%. Valores acima de 86% não foram utilizados pois acionam o motor de maneira muito brusca, levando o sistema à instabilidade.

O uso de motores de corrente contínua com sinais PWM é conveniente porque o torque do motor é mantido, visto que a tensão de acionamento sempre é máxima. Além disso, as perdas nos transistores são minimizadas, pois o ponto de operação do dispositivo varia entre a saturação e o corte.

⁵ A taxa de *Duty cycle* corresponde à largura do PWM em nível lógico alto.

Finalizada a função *Trigger*, o sistema retoma a função *Sweep* e inicia mais um ciclo de controle. O tempo médio entre cada ciclo é de 8 milissegundos, chegando raramente em alguns casos a 10 milissegundos. Partindo do pior atraso cíclico obtido, temos uma frequência de amostragem de 100 Hz, conforme pode ser visto na Equação 9.

$$f_s = \frac{1}{T_s} \text{ hertz} = \frac{1}{10 * 10^{-3}} \text{ hertz} = 100 \text{ hertz} \quad 9$$

4. RESULTADOS

Nesta seção serão apresentados os resultados obtidos do sistema projetado. Na primeira parte, será apresentado o comportamento da suspensão para diferentes ajustes do controlador PID e na segunda parte serão apresentados os valores financeiros associados ao projeto.

4.1. Algoritmo de Controle PID

O algoritmo de controle foi ajustado através de um processo heurístico. Foram feitos 27 experimentos com diferentes valores para as constantes proporcional, integral e derivativa, os quais podem ser vistos na Tabela 2. Para todos os experimentos, o valor da janela de relaxamento escolhido foi de 65 milissegundos, o *duty cycle* foi de 25,09% e o tempo mínimo de acionamento foi de 25 milissegundos. Cada teste durou aproximadamente 55 segundos, nos quais foram feitos 5 deslocamentos para cima e 5 deslocamentos para baixo, com intervalos de 5 segundos entre si. Os valores extraídos para análise foram o tempo, a aceleração e a distância em relação ao prato superior fixo. O MPU-6050 foi configurado para ler acelerações de aproximadamente $\pm 2g$.

Os valores para cada coeficiente foram escolhidos dentro de um intervalo considerado ótimo através de diversos experimentos realizados durante o desenvolvimento do algoritmo de processamento. Para o coeficiente proporcional, foram escolhidos os valores entre 1,45 e 1,75, a um passo de 0,15; para o coeficiente integral foram escolhidos os valores entre 0,05 e 0,15, a um passo de 0,05; para o coeficiente derivativo foram escolhidos os valores entre 0,01 e 0,03, a um passo de 0,01. Foram testadas todas as possibilidades de ajuste dentro desse conjunto de valores.

Além dos testes com o controlador ativo, foi realizado o mesmo teste sem a ação da técnica de controle, para que fosse possível avaliar a eficiência da técnica de controle⁶.

⁶ No Apêndice B podem ser vistos os gráficos dos resultados obtidos para todos os testes com o amortecedor ativo, em comparação com o teste sem amortecimento.

Feito isto, os dados foram analisados através do programa MATLAB. Primeiramente, foi calculado o desvio padrão das amostras de aceleração obtidas. Como o desvio padrão representa a dispersão das amostras em relação à média, um valor pequeno de desvio padrão exprime que a aceleração na chapa central-superior pouco se afastou da média. O gráfico com os valores obtidos, em ordem decrescente, pode ser visto na Figura 38.

| Valores de coeficientes escolhidos | | | | | | | |
|------------------------------------|------|---------|------|---------|------|---------|------|
| Exp. 0 | | Exp. 1 | | Exp. 2 | | Exp. 3 | |
| k_P | 0 | k_P | 1,45 | k_P | 1,45 | k_P | 1,45 |
| k_I | 0 | k_I | 0,05 | k_I | 0,05 | k_I | 0,05 |
| k_D | 0 | k_D | 0,01 | k_D | 0,02 | k_D | 0,03 |
| Exp. 4 | | Exp. 5 | | Exp. 6 | | Exp. 7 | |
| k_P | 1,45 | k_P | 1,45 | k_P | 1,45 | k_P | 1,45 |
| k_I | 0,1 | k_I | 0,1 | k_I | 0,1 | k_I | 0,15 |
| k_D | 0,01 | k_D | 0,02 | k_D | 0,03 | k_D | 0,01 |
| Exp. 8 | | Exp. 9 | | Exp. 10 | | Exp. 11 | |
| k_P | 1,45 | k_P | 1,45 | k_P | 1,6 | k_P | 1,6 |
| k_I | 0,15 | k_I | 0,15 | k_I | 0,05 | k_I | 0,05 |
| k_D | 0,02 | k_D | 0,03 | k_D | 0,01 | k_D | 0,02 |
| Exp. 12 | | Exp. 13 | | Exp. 14 | | Exp. 15 | |
| k_P | 1,6 | k_P | 1,6 | k_P | 1,6 | k_P | 1,6 |
| k_I | 0,05 | k_I | 0,1 | k_I | 0,1 | k_I | 0,1 |
| k_D | 0,03 | k_D | 0,01 | k_D | 0,02 | k_D | 0,03 |
| Exp. 16 | | Exp. 17 | | Exp. 18 | | Exp. 19 | |
| k_P | 1,6 | k_P | 1,6 | k_P | 1,6 | k_P | 1,75 |
| k_I | 0,15 | k_I | 0,15 | k_I | 0,15 | k_I | 0,05 |
| k_D | 0,01 | k_D | 0,02 | k_D | 0,03 | k_D | 0,01 |
| Exp. 20 | | Exp. 21 | | Exp. 22 | | Exp. 23 | |
| k_P | 1,75 | k_P | 1,75 | k_P | 1,75 | k_P | 1,75 |
| k_I | 0,05 | k_I | 0,05 | k_I | 0,1 | k_I | 0,1 |
| k_D | 0,02 | k_D | 0,03 | k_D | 0,01 | k_D | 0,02 |
| Exp. 24 | | Exp. 25 | | Exp. 26 | | Exp. 27 | |
| k_P | 1,75 | k_P | 1,75 | k_P | 1,75 | k_P | 1,75 |
| k_I | 0,1 | k_I | 0,15 | k_I | 0,15 | k_I | 0,15 |
| k_D | 0,03 | k_D | 0,01 | k_D | 0,02 | k_D | 0,03 |

Tabela 2 - Constantes k_P , k_I e k_D escolhidas.



Figura 38 - Gráfico com os desvios padrões encontrados.

Na Tabela 3 podem ser vistos os valores de desvio padrão obtidos com o controle desligado (Experimento 0) e com o controle ligado (Experimentos 1 a 27), para o melhor e o pior caso, bem como os percentuais de redução encontrados em relação ao experimento com o controle desativado.

| Comparação dos desvios padrões obtidos | | |
|--|---------------|-----------------------|
| | Desvio Padrão | Percentual de Redução |
| Controle Desligado (Exp. 0) | 19,10% | |
| Melhor Caso (Exp. 12) | 0,99% | 94,82% |
| Pior Caso (Exp. 22) | 2,40% | 87,43% |

Tabela 3 - Comparação dos desvios padrões de alguns experimentos em relação ao experimento com o controle desativado.

Feito isto, foi realizado o cálculo do valor médio de máximo sobrepico. Para isso, foi calculada a média dos 10 valores observados em cada experimento, através da função *max()* do MATLAB em cada intervalo de tempo onde ocorre uma oscilação. Como a aceleração oscila em torno do valor de referência durante um acionamento, o máximo sobrepico é a maior diferença observada em relação ao valor de referência, em módulo, durante o regime transitório. Na Figura 39 pode ser visto um gráfico das médias dos valores para todos os experimentos, em ordem decrescente. Na Tabela 4 podem ser vistos os valores encontrados para o experimento com o controle desativado

(Experimento 0), para o Experimento 10 e para o Experimento 26, bem como o percentual de redução.



Figura 39 - Gráfico com as médias dos valores de máximo sobrepasso encontrados.

Comparação com o Controle Desativado

| | Máximo Sobrepasso | Percentual de Redução |
|-----------------------------|-------------------|-----------------------|
| Controle Desligado (Exp. 0) | 146,30% | |
| Melhor Caso (Exp. 10) | 81,60% | 44,22% |
| Pior Caso (Exp. 26) | 120,31% | 17,77% |

Tabela 4 - Comparação das médias dos valores de sobrepico de alguns experimentos em relação ao experimento com o controle desativado.

Foi elaborado também o cálculo do tempo médio de estabilização da aceleração para cada experimento. Para tanto, foi calculado o intervalo de tempo constatado desde início de uma oscilação até o seu fim. Foi considerado como tempo inicial o instante em que o valor da aceleração é 2% maior ou menor do que o valor de referência, e como tempo final o instante em que o valor da aceleração se estabiliza em relação ao valor de referência, com uma tolerância de 2%. Na Figura 40 pode ser visto o gráfico com os valores médios encontrados para todos os experimentos, em ordem decrescente.

Na Tabela 5 podem ser vistos os tempos de estabilização da aceleração encontrados para o experimento com o controle desativado (Experimento 0), para o Experimento 10 e para o Experimento 26, que apresentaram o menor e o maior valor, respectivamente. Também é possível observar o percentual de redução dos experimentos com o controle ativado em relação ao experimento sem a técnica de controle.



Figura 40 - Gráfico com as médias dos tempos de estabilização da aceleração observados em cada experimento.

Comparação com o Controle Desativado

| | Tempo de Estabilização [s] | Percentual de Redução |
|-----------------------------|----------------------------|-----------------------|
| Controle Desligado (Exp. 0) | 1,034 | |
| Melhor Caso (Exp. 10) | 0,749 | 27,57% |
| Pior Caso (Exp. 26) | 1,467 | -41,81% ⁷ |

Tabela 5 - Comparação dos tempos de estabilização da aceleração de alguns experimentos em relação ao experimento com o controle desativado.

Além das análises feitas com a aceleração, foi feita uma comparação do comportamento da distância da chapa central-superior em relação à chapa

⁷ O valor negativo representa um aumento no tempo de estabilização em relação ao experimento sem a técnica de controle.

superior fixa. A média dos tempos de estabilização da distância para cada experimento foi realizada. Os valores podem ser vistos no gráfico da Figura 41.

Na Tabela 6 pode ser vista a comparação dos tempos de estabilização da distância para o melhor e pior caso em relação ao experimento com o controle desativado, bem como os percentuais de redução.



Figura 41 - Gráfico com as médias dos tempos de estabilização da distância observados em cada experimento.

Comparação com o Controle Desativado

| | Tempo de Estabilização [s] | Percentual de Redução |
|-----------------------------|----------------------------|-----------------------|
| Controle Desligado (Exp. 0) | 1,011 | |
| Melhor Caso (Exp. 10) | 0,707 | 30,09% |
| Pior Caso (Exp. 26) | 1,385 | -36,94% ⁸ |

Tabela 6 - Comparação dos tempos de estabilização da distância de alguns experimentos em relação ao experimento com o controle desativado.

Feito isto, foi realizada uma comparação para analisar os efeitos da inclusão das parcelas integral e derivativa para um mesmo valor do coeficiente proporcional. Para isso, foi realizada uma comparação do Experimento 10 com um experimento onde foi aplicada a técnica de controle proporcional com

⁸ O valor negativo representa um aumento no tempo de estabilização em relação ao experimento sem a técnica de controle.

coeficiente igual a 1,6. A média dos valores e o percentual de redução podem ser vistos na Tabela 7. Na Figura 42 é possível observar uma comparação de ambos os experimentos, na qual os gráficos apresentam um acionamento. O tracejado em vermelho representa o intervalo de $\pm 2\%$ em relação ao valor de referência.

Comparação da Atuação do controlador P com o controlador PID

| | P | PID | Percentual de Redução |
|--|-------|-------|-----------------------|
| Média dos tempos de est. da aceleração [s] | 0,885 | 0,749 | 15,38% |
| Média dos máximos sobrepicos | 1,222 | 0,816 | 33,24% |
| Média dos tempos de est. da distância [s] | 0,926 | 0,707 | 23,64% |

Tabela 7 - Comparação entre a técnica PID e a técnica proporcional.

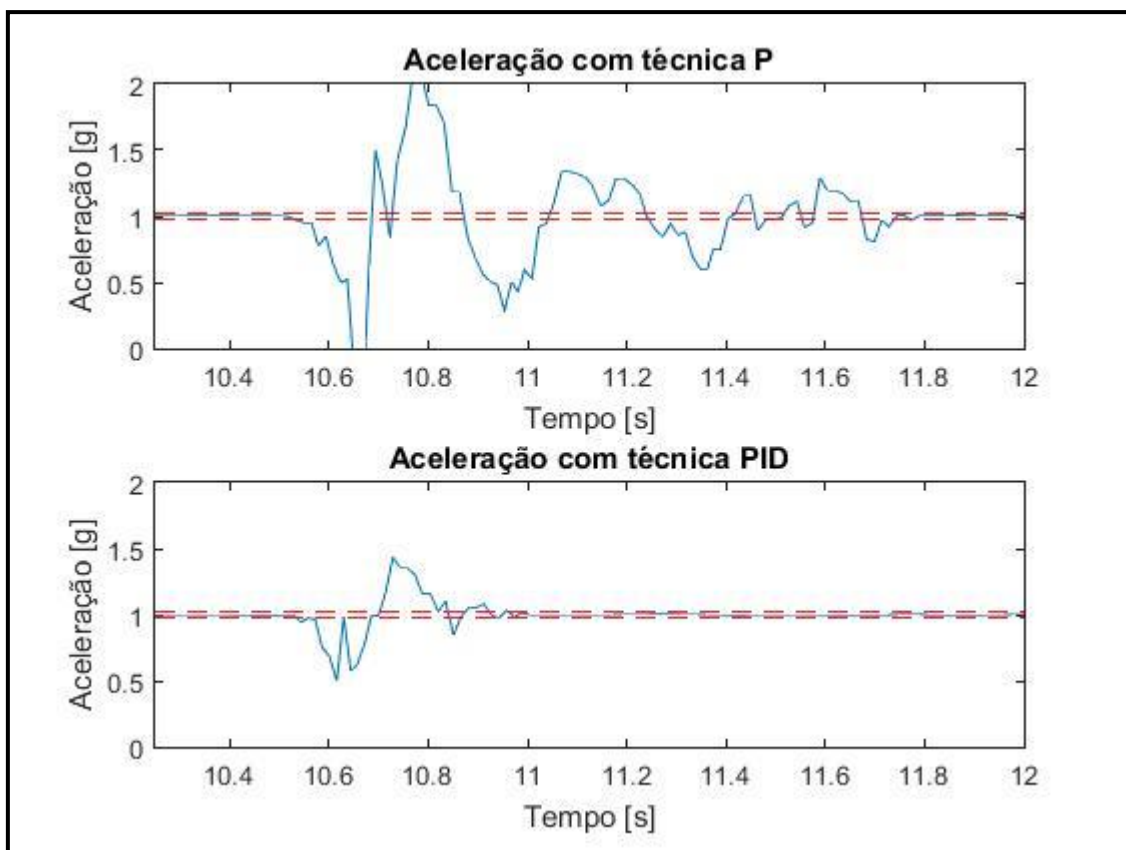


Figura 42 - Gráfico comparando a eficiência de ambas as técnicas sobre grandes variações de amplitude e tempo de estabilização até o regime permanente.

Na Tabela 8 podem ser vistos os tempos de estabilização da aceleração observados na versão anterior do protótipo e descritos originalmente em [9]. O melhor caso apresentou um tempo de 1,32 segundos, enquanto o pior caso foi de 2,08 segundos. Na Tabela 9 é apresentada uma comparação das melhores

médias dos tempos de estabilização para as duas versões, bem como o percentual de redução encontrado nesta versão em relação à anterior.

| Teste | 1º(s) | 2º(s) | 3º(s) | 4º(s) | 5º(s) | 6º(s) | Média(s) |
|--------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|----------|
| Sem controle | 2,04 | 2,77 | 2,46 | 3,07 | 2,15 | 3,27 | 2,63 |
| 1 | 1,79 | 2,22 | 1,25 | 1,89 | 1,97 | 1,87 | 1,88 |
| 2 | 1,45 | 1,44 | 1,51 | 2,51 | 2,05 | 2,05 | 1,78 |
| 3 | 1,64 | 1,61 | 1,55 | 2,31 | 1,9 | 2,28 | 1,77 |
| 4 | 1,82 | 1,56 | 1,7 | 2,13 | 1,59 | 2,75 | 1,76 |
| 5 | 1,21 | 1,12 | 1,82 | 1,75 | 1,57 | 1,46 | 1,51 |
| 6 | 1,59 | 1,98 | 2,18 | 2,74 | 2,79 | 1,86 | 2,08 |
| 7 | 1,47 | 1,56 | 1,34 | 1,21 | 1,3 | 1,04 | 1,32 |

Tabela 8 - Tempos de estabilização da aceleração da primeira versão do protótipo. Retirado de [9].

| Média dos tempos de estabilização da aceleração | | |
|---|-------|-----------------------|
| | | Percentual de Redução |
| Melhor caso da versão anterior [s] | 1,320 | |
| Melhor caso da nova versão [s] | 0,749 | 43,26% |

Tabela 9 - Comparação da melhor média dos tempos de estabilização obtida na nova versão com a da versão anterior.

4.2. Custos do Projeto

Na Tabela 10 podem ser vistos os custos dos componentes adquiridos para o projeto, bem como o valor total desembolsado.

| Custo do Projeto | |
|--|-------------------|
| Fabricação do mecanismo biela-manivela | R\$ 240,00 |
| Parafusos e porcas | R\$ 30,00 |
| Rolamentos | R\$ 15,00 |
| Cola Anaeróbica | R\$ 9,90 |
| Sensor Sharp IR | R\$ 73,95 |
| Optoacopladores | R\$ 3,00 |
| Fonte de Tensão 12 V à 10 A | R\$ 95,00 |
| Regulador Booster | R\$ 45,39 |
| Fios | R\$ 9,85 |
| Espaguete Termoretrátil | R\$ 8,00 |
| Tomadas e conectores | R\$ 14,50 |
| Total | R\$ 544,59 |

Tabela 10 - Custos envolvidos no projeto.

5. DISCUSSÃO

Através dos resultados apresentados no Capítulo 4 é possível notar a eficácia do sistema de amortecimento controlado digitalmente quando os parâmetros do controlador são escolhidos adequadamente. Caso a suspensão fosse um conjunto real, aplicado em um veículo sem amortecedores, o condutor e os passageiros passariam a ser submetidos a até 27,57% menos da aceleração vertical. Além disso, os testes com o máximo sobrepico de aceleração, com o controlador ligado, apresentaram uma redução para praticamente a metade do valor observado quando o amortecedor estava desativado. Também foi possível verificar uma redução de 30,09% no tempo de estabilização da distância da chapa superior em relação a um ponto fixo. Isso significa que a inclusão do controlador fez com que a chapa móvel superior chegasse ao seu ponto de equilíbrio com mais rapidez.

A introdução das parcelas integral e derivativa possuem significativo impacto no sistema, conforme se vê na Tabela 7 e na Figura 42. Na Figura 42, inclusive, é possível observar com clareza a ação da parte derivativa, diminuindo as acelerações ocasionadas por movimentos bruscos, e a ação da parcela integral, fazendo com que o dispositivo atinja a estabilidade mais rapidamente, de acordo com a teoria de controladores PID.

A alavanca fixa permitiu uma simulação mais precisa e regular dos desníveis de solo, tornando as ativações entre os experimentos mais similares, de maneira com que as variações de estímulo são menores em relação ao sistema previamente desenvolvido. A remoção de folgas e as trocas dos parafusos e porcas deixaram o dispositivo mais robusto, de maneira que em nenhum experimento foi observada alteração mecânica por estresse.

Observou-se um ruído intenso na captura da distância pelo sensor infravermelho, o que dificultou a análise da movimentação da chapa superior. Foram feitos testes no escuro para diminuição de interferência, porém sem sucesso.

O mecanismo de biela-manivela permitiu a ação de amortecimento em dois sentidos, o que não era possível na primeira versão do protótipo, algo que

tornou o protótipo mais representativo de uma suspensão real. Na Tabela 8 observa-se que a suspensão sem controle oscilava por 2,63 segundos, enquanto que o melhor tempo de estabilização da primeira versão do protótipo foi de 1,32 segundos. Nesta versão o tempo de estabilização sem controle foi de 1,03 segundos, enquanto o tempo de estabilização com controle, no melhor caso, foi de 0,75 segundos. Observa-se uma redução de tempo até mesmo no experimento sem controle, o que pode ser explicado pelo fato de que com a introdução do novo mecanismo de acionamento existe uma dissipação de energia maior, principalmente ocasionada pela ação constante do campo magnético interno do motor.

Mesmo com a PCB feita, continuou-se utilizando a placa de prototipagem. O motivo para isto foi que o método caseiro de construção de PCB por transferência térmica não foi suficientemente preciso, e com isso acabaram ocorrendo problemas como curto circuito ou circuito aberto em determinadas trilhas.

Embora tenha sido projetado um sistema com o uso de 6 canais optoacoplados, na protoboard foram instalados somente 3. Isso se deu pelo fato de que ainda não existe um segundo motor instalado no sistema. Entretanto, a alimentação do sistema já está apta a suprir novos dispositivos introduzidos.

A instalação do cabo com a tomada facilitou a conexão dos sistemas, ficando mais simples ligar e desligar a parte mecânica da parte eletrônica. Também previne o erro humano, que poderia ocorrer caso conexões fossem trocadas. O conjunto de componentes eletrônicos foi integrado em um único bloco, simplificando o transporte do conjunto.

O acionamento por intervalo de tempo não é o mais adequado, pois não permite o controle do torque do motor. Isso foi necessário pelo fato de que o motor possui apenas três ímãs permanentes para geração de campo magnético interno, de maneira que não seria possível utilizar algumas faixas de torque do motor pela alteração do *duty cycle*.

Os custos envolvidos no trabalho foram baixos, tendo em vista que foram desenvolvidos avanços nessa versão que poderão ser usados inúmeras vezes no futuro para o estudo de técnicas de controle em suspensões ativas.

6. CONCLUSÃO

Neste trabalho foi apresentado, em detalhes, o desenvolvimento em três aspectos de uma segunda versão de um protótipo de suspensão ativa veicular. Em sequência, foi realizada uma bateria de experimentos com diferentes ajustes, com a finalidade de encontrar o melhor conjunto de coeficientes do controlador PID para o controle da suspensão montada.

Ao comparar a suspensão ativa com a suspensão sem amortecimento pode-se observar uma redução considerável no tempo de estabilização do sistema em relação à aceleração e à distância, bem como uma intensa diminuição dos valores de sobrepico de aceleração encontrados no prato móvel superior.

Como se não bastasse, foi realizada uma comparação do controlador proporcional com a técnica de controle PID, obtendo resultados melhores com a técnica PID em relação ao tempo de estabilização e ao máximo sobrepico, em concordância com a literatura da área de sistemas de controle.

Finalizando, discutiram-se os resultados encontrados e quais foram os aspectos positivos do projeto, bem como os pontos negativos, para que seja mais fácil dar continuidade ao trabalho.

Em relação aos aspectos mecânicos, foram eliminadas as folgas, um novo mecanismo de amortecimento foi projetado e construído e um novo mecanismo de acionamento foi instalado. Na parcela eletrônica foram feitas melhorias nos circuitos. Em relação ao processamento, foi implementado um controlador PID, funcional e eficaz, usando uma placa de prototipagem simples e de baixo custo. Deste modo, destaca-se que os objetivos foram atingidos, visto que se alcançou a melhoria que era desejada.

6.1. Sugestões para Trabalhos Futuros

Para a próxima versão do projeto seria importante a fabricação de uma placa de circuito impresso, através de um método mais preciso do que este realizado. A placa de prototipagem não é adequada para o funcionamento repetitivo, de maneira que são observados mal contatos em alguns momentos.

Embora o método heurístico tenha apresentado bons resultados, não substitui uma modelagem correta da planta do sistema, o que traria um ajuste mais certo dos coeficientes do controlador PID, principalmente se fosse realizada em conjunto com a substituição do microcontrolador por outro mais potente.

Além disso, substituir o motor DC por um servomotor que proporcionasse um controle melhor do torque permitiria a ação mais eficaz da técnica de controle, especialmente se fosse possível atuar com a variação do *duty cycle*.

O método de medição de distância poderia ser alterado, de maneira que a distância do prato superior em relação a um ponto fixo fosse menos sujeita a interferências e ruídos.

7. BIBLIOGRAFIA

1. 4CAR. **100 Greatest Innovations**. Disponível em:
<<https://web.archive.org/web/20061104223423/http://www.channel4.com/4car/100-greatest/innovations/suspension.html>>.
2. CITROËNÉT. **A Short Histoty of Suspension**. Disponível em:
<<http://www.citroenet.org.uk/miscellaneous/suspension/suspension1.html>>.
3. EMANUELE, G.; STAMMERS, T. S. C. W.; GIUCLEA, G. G. M. **Semi-active Suspension Control: improved veichle ride and road friendliness**. London: Springer, 2008.
4. REIMPELL, J.; STOLL, H.; BETZLER, J. W. **The Automotive Chassis: Engineering Principles**. Oxford: Elsever Science, 2001.
5. MEMMER, S. EDMUNDS. **Suspension III: Active Suspension Systems**. Disponível em:
<<https://www.edmunds.com/car-technology/suspension-iii-active-suspension-systems.html>>.
6. ALY, A. A.; SALEM, F. A. Vehicle Suspension Systems Control: A Review. **Internation Journal of Control, Automation and Systems**, v. 2, n. 2, Julho 2013.
7. BARATA, J. **Que segredos possui este Astra GSi para fazer curvas como um superesportivo?**, 2014. Disponível em: <<https://www.flatout.com.br/que-segredos-possui-este-astra-gsi-para-fazer-curvas-como-um-superesportivo/>>.
8. **The New Porsche 911 Carrera T: The Unfiltered Truth**. Disponível em:
<<https://files.porsche.com/filestore/download/multimedia/en/991-2nd-c2-t-catalogue/default/53684ef5-b593-11e7-b591-0019999cd470/911-Carrera-T-Catalogue.pdf>>.
9. ROSA, R. D. **Desenvolvimento de um Modelo de Quarto de Carro para Estudo de Controle em Suspensões Ativas [Trabalho de Conclusão de Curso]**. Florianópolis: UFSC, 2017.
- 10 BAZANELLA, A. S.; SILVA JR, J. M. G. D. **Sistemas de Controle: princípios e método de . projeto**. Porto Alegre: UFRGS, 2005.
- 11 **Sistemas de Controle**, 2008. Disponível em:
. <https://web.archive.org/web/20170627175534/http://www.mspc.eng.br/contr/ctrl_0110.shtml>.
- 12 OGATA, K. **Engenharia de Controle Moderno**. 5ª. ed. São Paulo: Pearson, 2011.
- 13 SIERRA, R. **Ajuste o PID em impressoras 3D**, 2014. Disponível em:
. <<http://www.mibqyyo.com/pt-artigos/2014/11/27/ajuste-o-pid-em-impressoras-3d/>>.
- 14 BOYLESTAD, R. L.; NASHELSKY, L. **Dispostivos Eletrônicos e Teoria de Circuitos**. 11ª. ed. . São Paulo: Pearson, 2013.

- 15 **Sistemas Mecânicos: Máquinas e Mecanismos.** Disponível em:
. <<http://www.ebah.com.br/content/ABAAABM6YAJ/aula2-2010-projeto-mecanismos>>.
- 16 LIU, W. et al. A Convenient Part Library Based On SolidWorks. **International Journal of Aerospace and Mechanical Engineering**, v. 8, n. 12, 2014. Disponível em:
<<https://web.archive.org/web/20061104223423/http://www.channel4.com/4car/100-greatest/innovations/suspension.html>>.
- 17 **ISO Dimensional System and Bearing Numbers.** Disponível em:
. <http://www.nsk.com.br/upload/file/nsk_cat_e728g_1.pdf>.
- 18 **MPU-6000 and MPU-6050 Product Specification.** Disponível em:
. <https://store.invensense.com/datasheets/invensense/MPU-6050_DataSheet_V3%204.pdf>.
- 19 **I2C BUS.** Disponível em: <<https://www.i2c-bus.org>>.
- 20 **Módulo GY-521 MPU6050 - Acelerômetro e Giroscópio.** Disponível em:
. <<https://www.vidadesilicio.com.br/modulo-gy-521-acelerometro-giroscopio.html>>.
- 21 **Sharp GP2Y0A41SK0F Datasheet.** Disponível em: <http://www.sharp-world.com/products/device/lineup/data/pdf/datasheet/gp2y0a41sk_e.pdf>.
- 22 **LED Current Control and The Arduino: Tutorial.** Disponível em:
. <<http://henrysbench.capnfatz.com/henrys-bench/arduino-output-devices/led-current-control-and-the-arduino-tutorial/>>.
- 23 **4N25, 4N26, 4N27, 4N28 Datasheet.** Disponível em:
. <<https://www.vishay.com/docs/83725/4n25.pdf>>.
- 24 **Introduction to Transistors.** Disponível em:
. <http://spolearninglab.com/curriculum/workshops/physical_computing/2012/summer/night_light.html>.
- 25 **CONVERSOR DC-DC ELEVADOR DE TENSÃO BOOST 150W 6A.** Disponível em:
. <<http://www.pontodaeletronica.com.br/Produto-PRODUTOS-Arduino--Raspberry-CONVERSOR-DC-DC-ELEVADOR-DE-TENSAO-BOOST-150W-6A-versao-14785-14785.aspx>>.
- 26 **Mini VNH2SP30 Monster Moto Shield Module for Arduino, Robotic.** Disponível em:
. <<https://www.lelong.com.my/mini-vnh2sp30-monster-moto-shield-module-arduino-robotic-littlecraft-184084498-2018-10-Sale-P.htm>>.
- 27 **Fonte Colmeia 10A Bivolt Chaveada FTE-1210 HAYONIK.** Disponível em:
. <<http://www.hayonik.com/fonte-colmeia-10a-bivolt-chaveada-fte-1210-hayonik#link-description>>.
- 28 SOUZA, F. **Arduino MEGA 2560**, 2014. Disponível em:
. <<https://www.embarcados.com.br/arduino-mega-2560/>>.

29 **VNH2SP30-E Datasheet**. Disponível em:

. <<https://www.elecrow.com/download/VNH2SP30%20Datasheet.pdf>>.

30 **LM317 3-Terminal Adjustable Regulator Datasheet**. Disponível em:

. <<http://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm317.pdf>>.

31 **BC546, BC546A, BC546B, BC547, BC547A Datasheet**. Disponível em:

. <http://pdf.datasheetcatalog.com/datasheets/150/128380_DS.pdf>.

32 NEWTON C Braga. **A Química da Placa de Circuito Impresso**. Disponível em:

. <<http://www.newtoncbraga.com.br/index.php/home/38-newton-c-braga/conversando/10519-a-quimica-da-placa-de-circuito-impresso-art2410>>.

APÊNDICES

APÊNDICE A – BLOCOS DESENVOLVIDOS EM SOLIDWORKS

Na Figura 43, Figura 44 e Figura 45 podem ser vistos os projetos desenvolvidos em SolidWorks com todas as medidas, as quais foram reproduzidas a partir do modelo real.

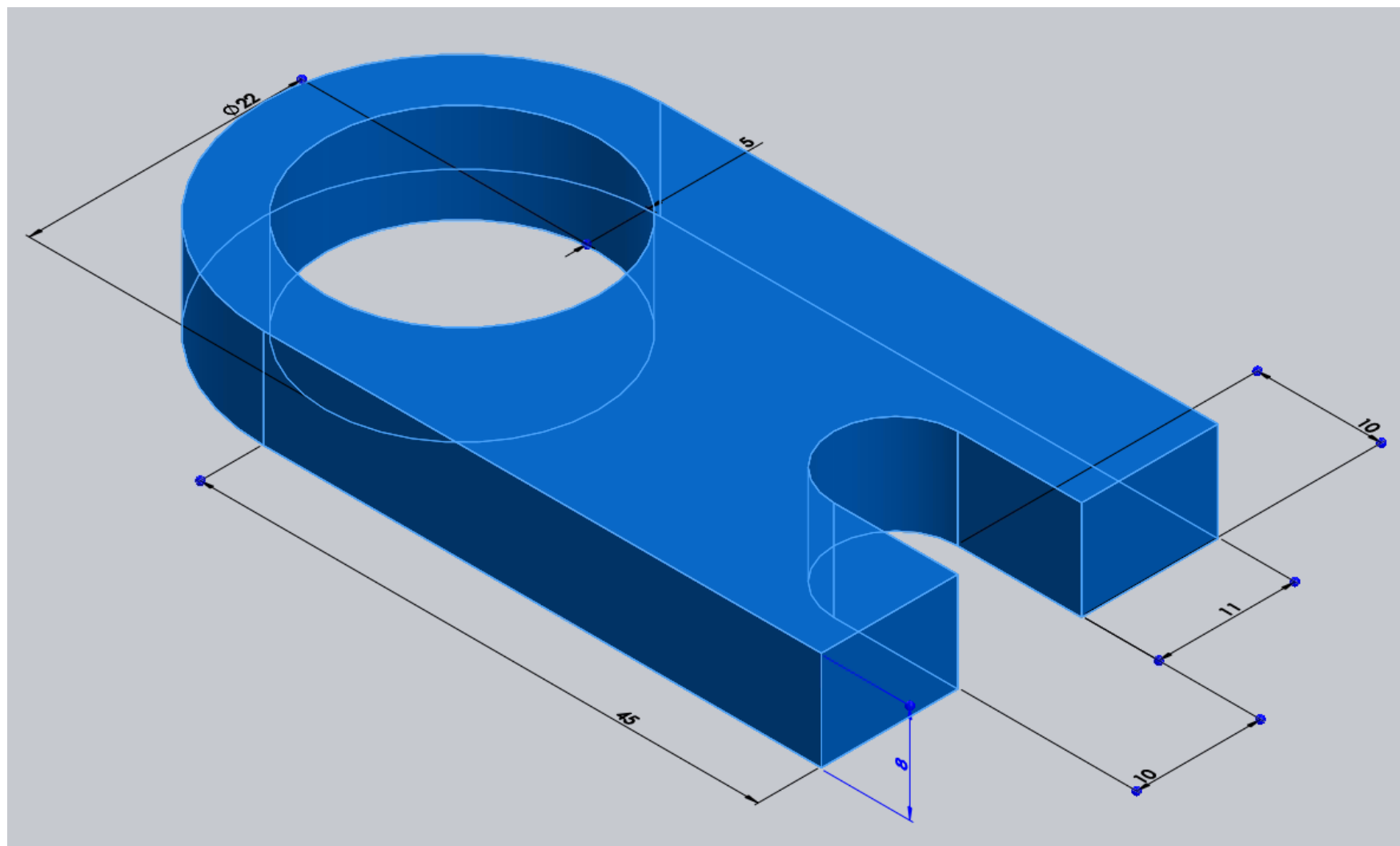


Figura 43 - Projeto da peça inferior do mecanismo biela-manivela.

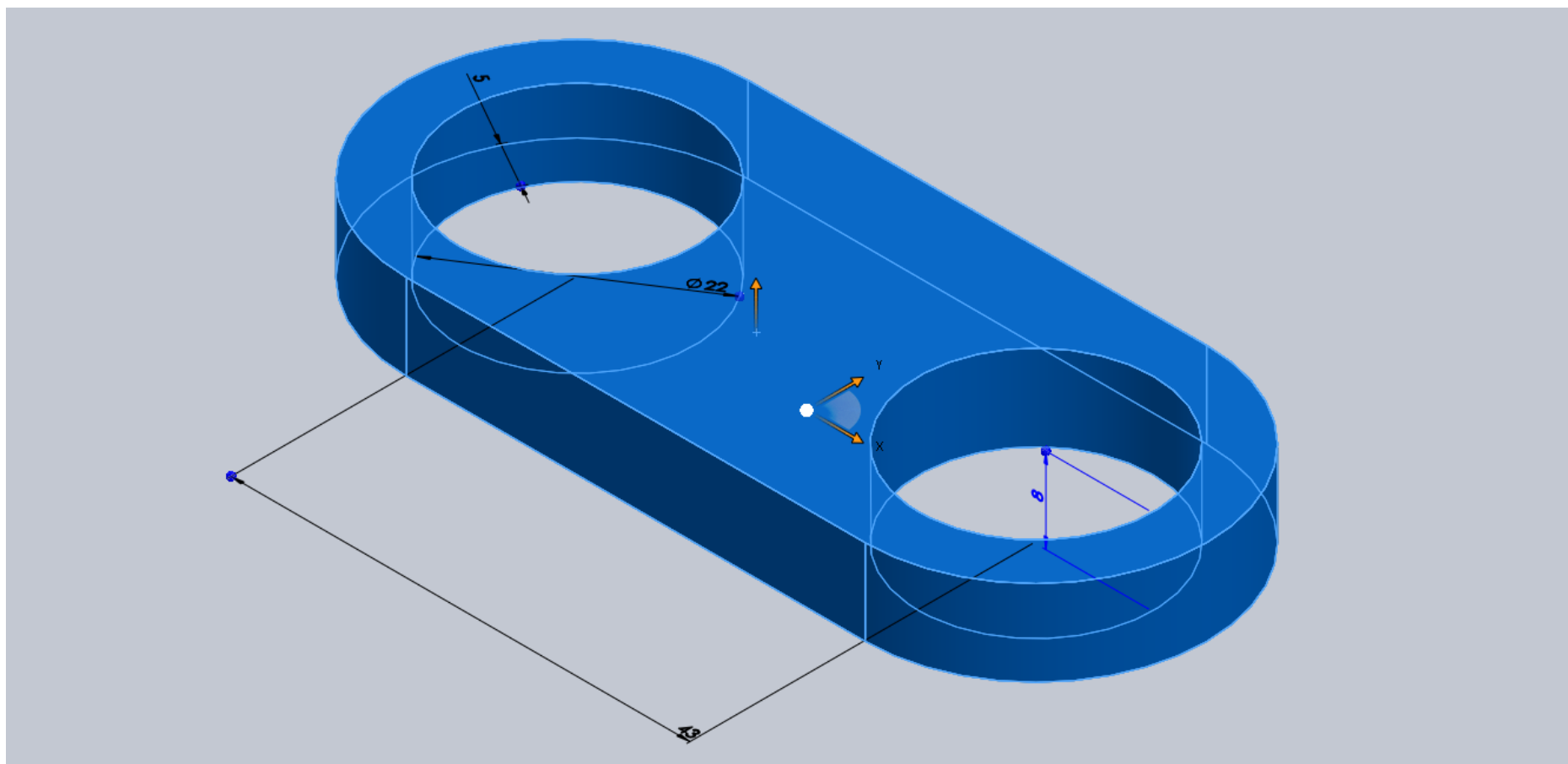


Figura 44 - Projeto da peça central do mecanismo biela-manivela.

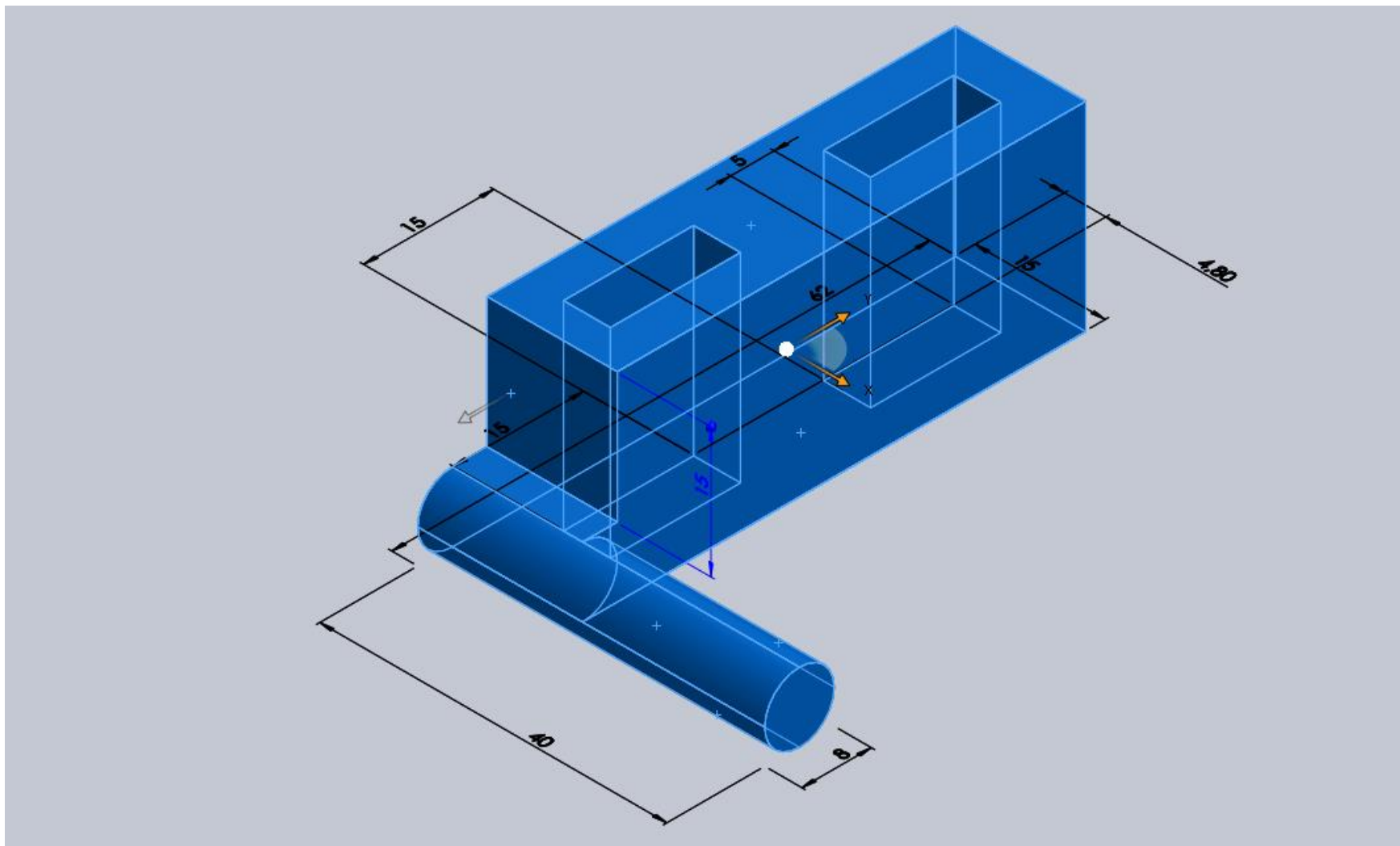


Figura 45 - Projeto da peça superior do mecanismo biela-manivela.

APÊNDICE B – RESULTADOS PARA OUTROS AJUSTES DO CONTROLADOR PID

Foram feitos diversos testes com diversos valores de coeficientes para o controlador PID. A seguir, é apresentado um conjunto de 54 figuras, com os resultados obtidos para aceleração e distância em cada um dos experimentos realizados, em comparação com os valores encontrados com o controlador desligado.

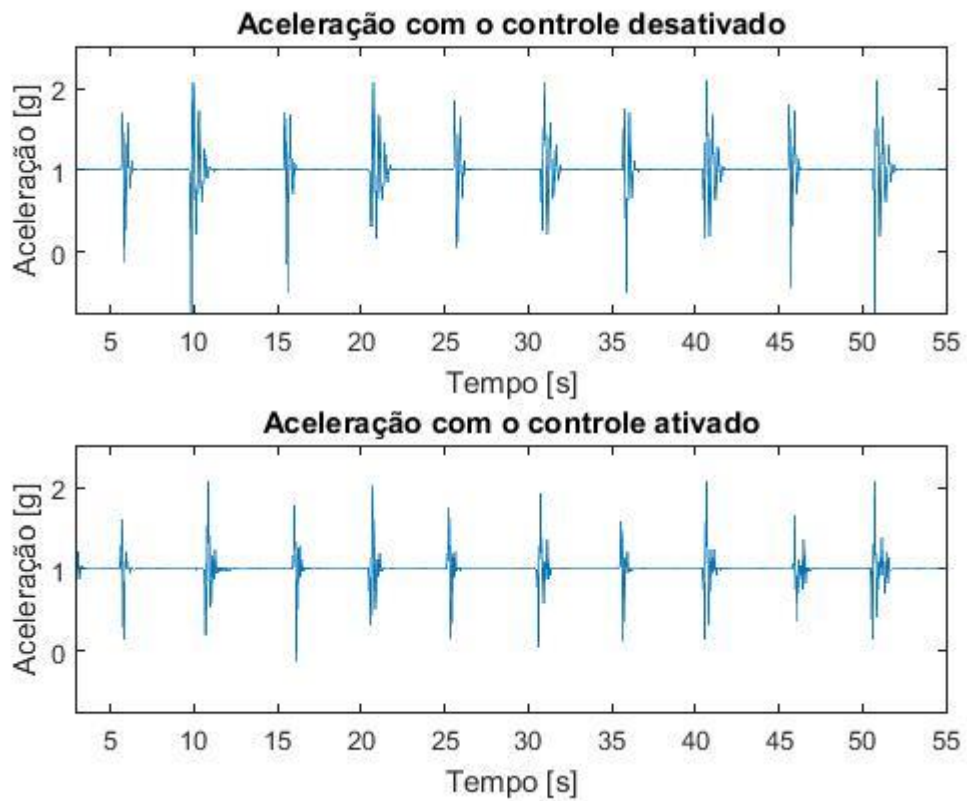


Figura 46 - Experimento 1 - Aceleração.

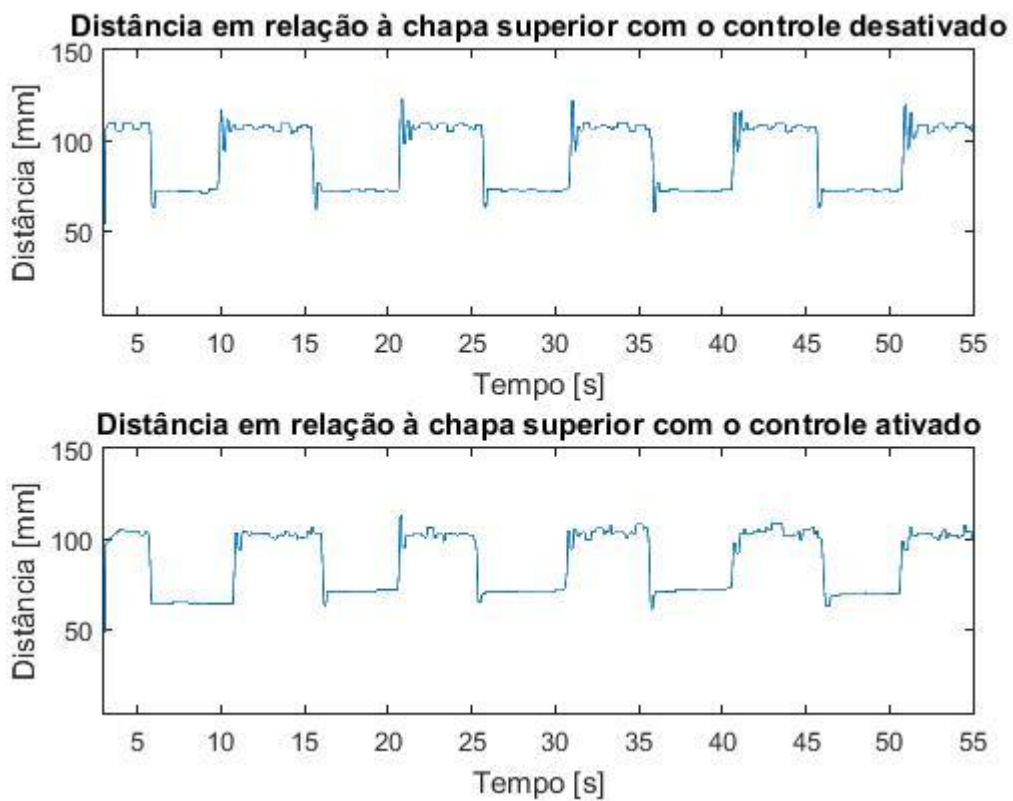


Figura 47 - Experimento 1 - Distância.

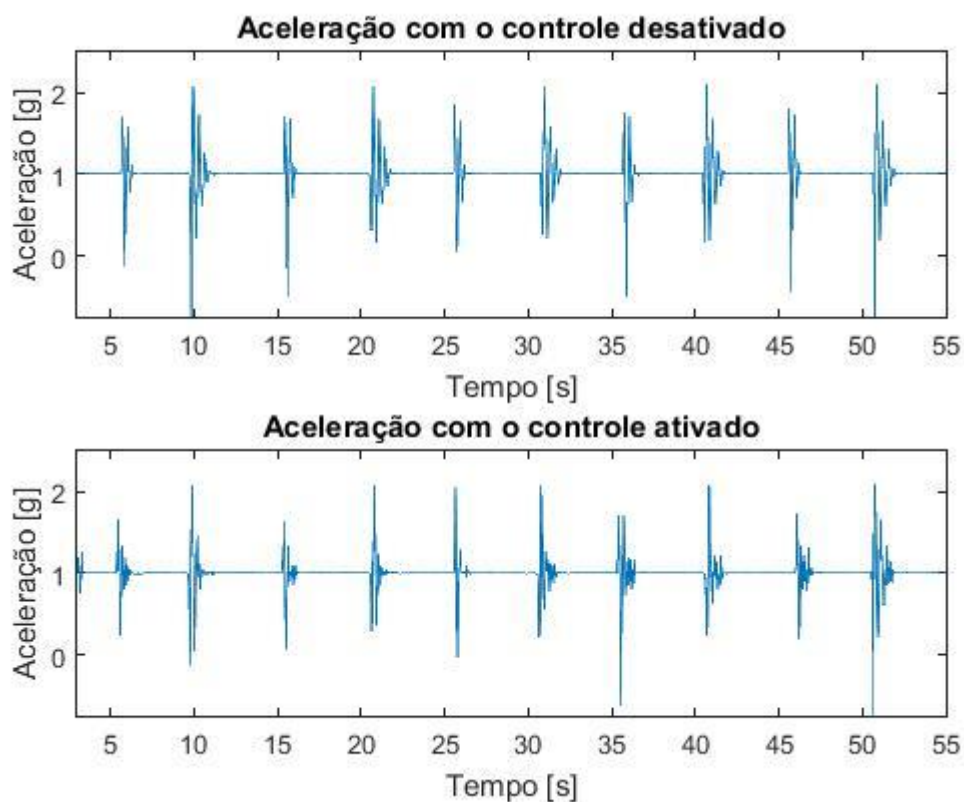


Figura 48 - Experimento 2 - Aceleração.

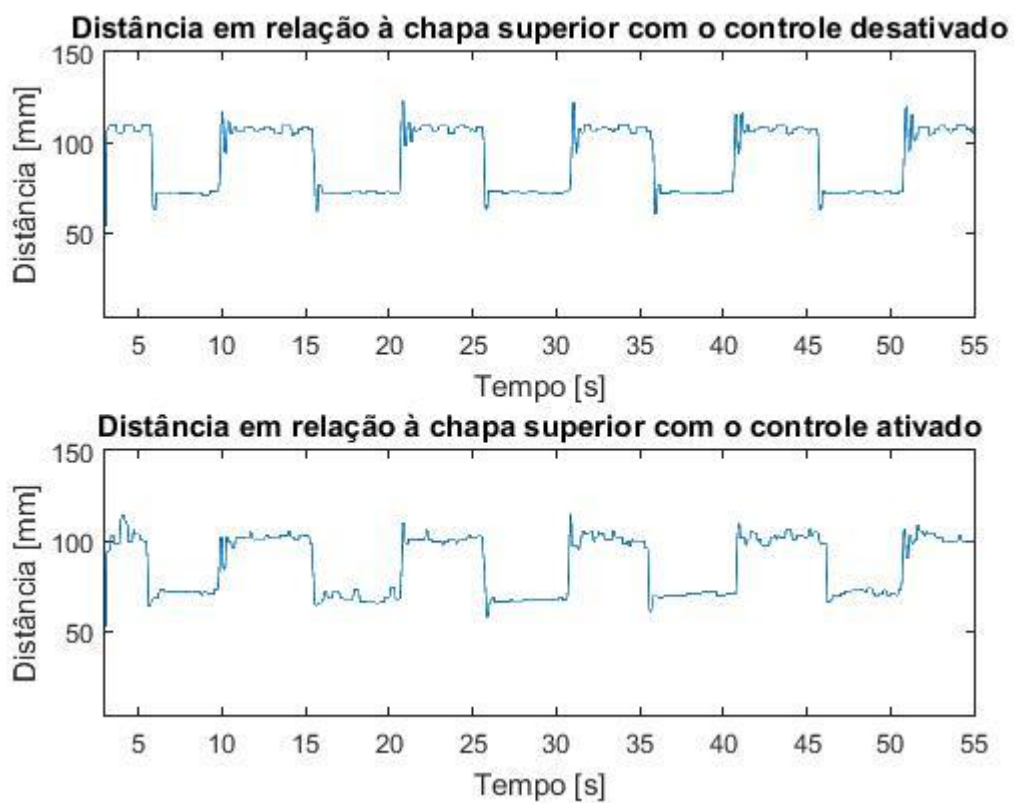


Figura 49 - Experimento 2 - Distância.

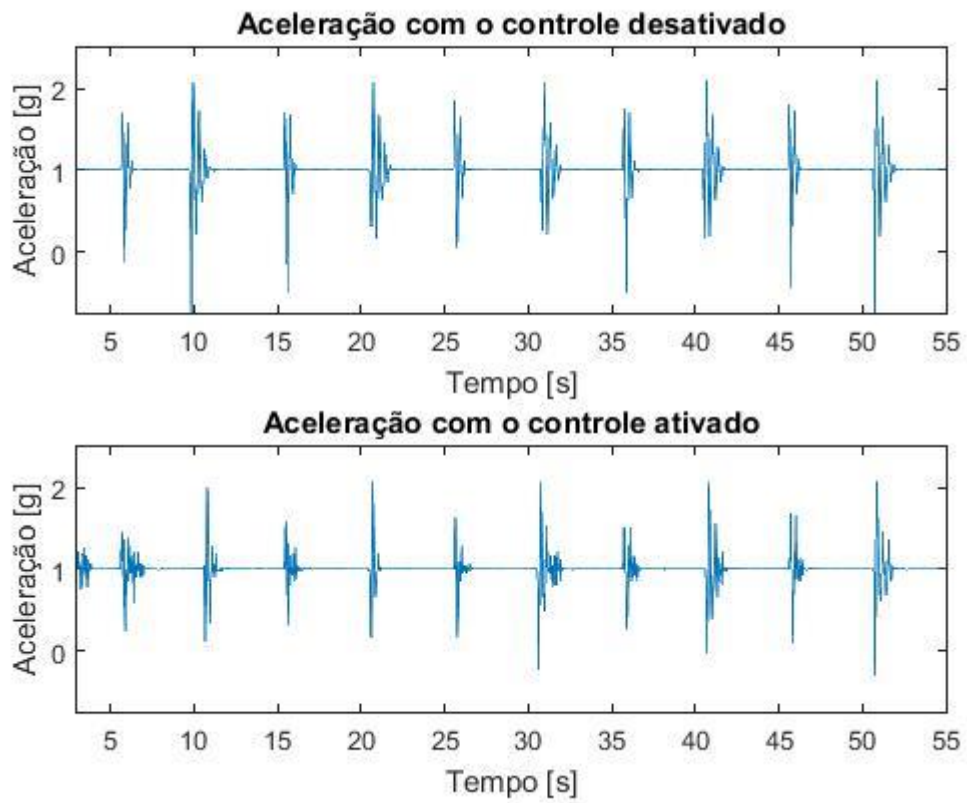


Figura 50 - Experimento 3 - Aceleração.

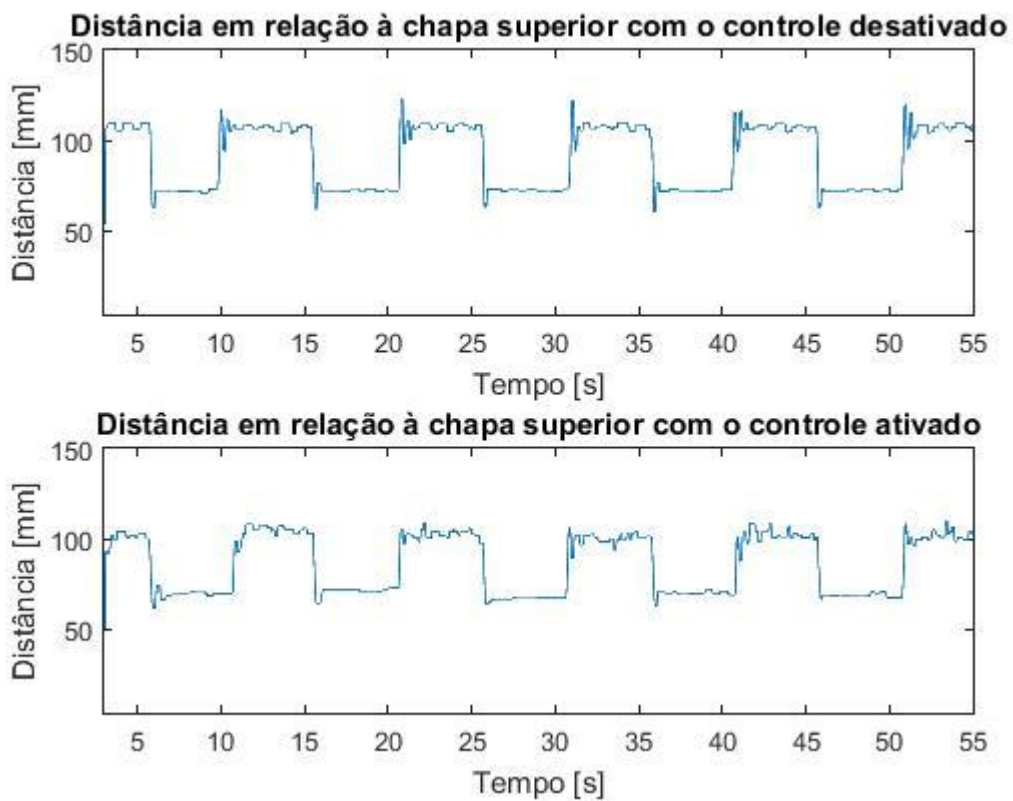


Figura 51 - Experimento 3 - Distância.

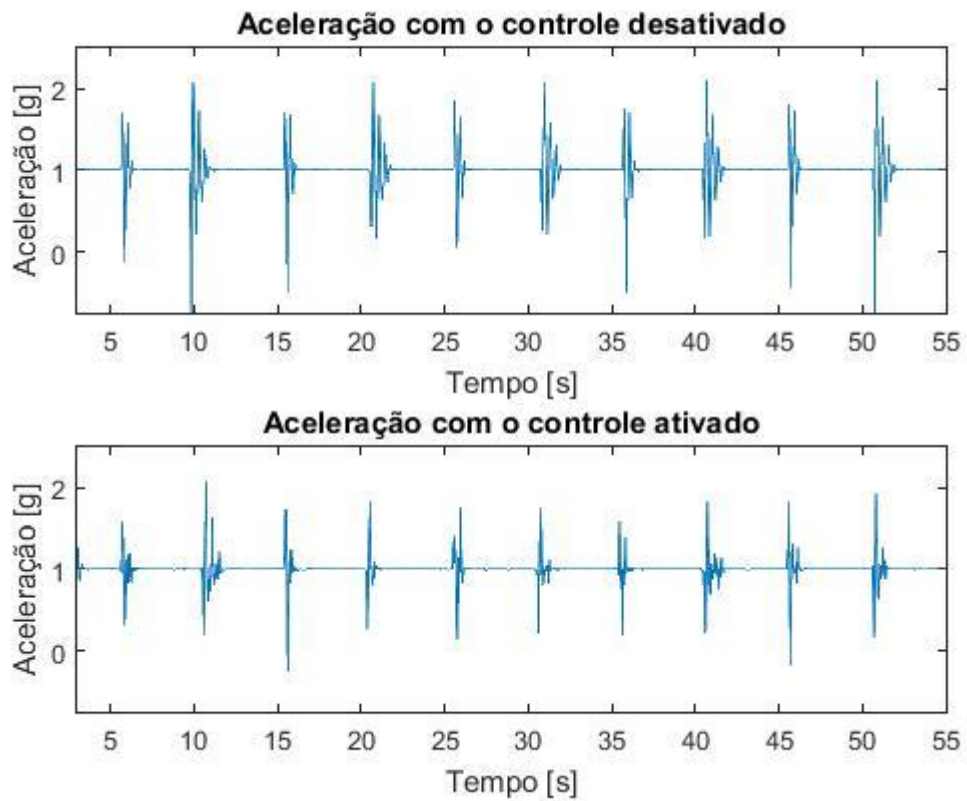


Figura 52 - Experimento 4 - Aceleração.

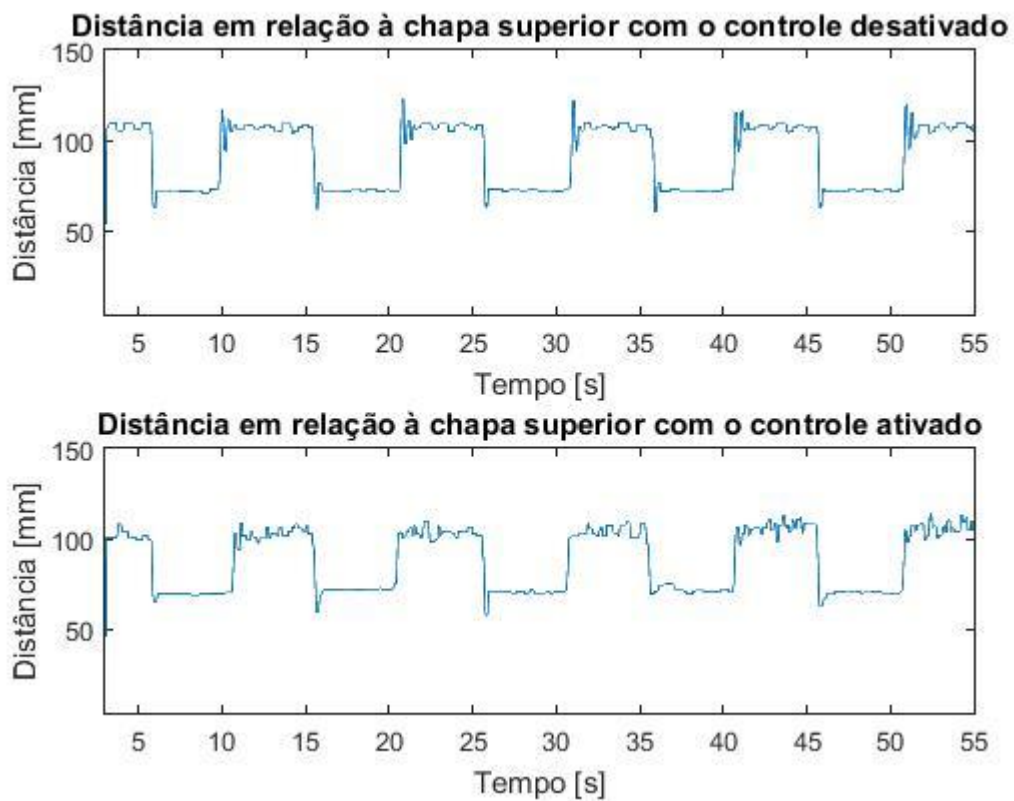


Figura 53 - Experimento 4 - Distância.

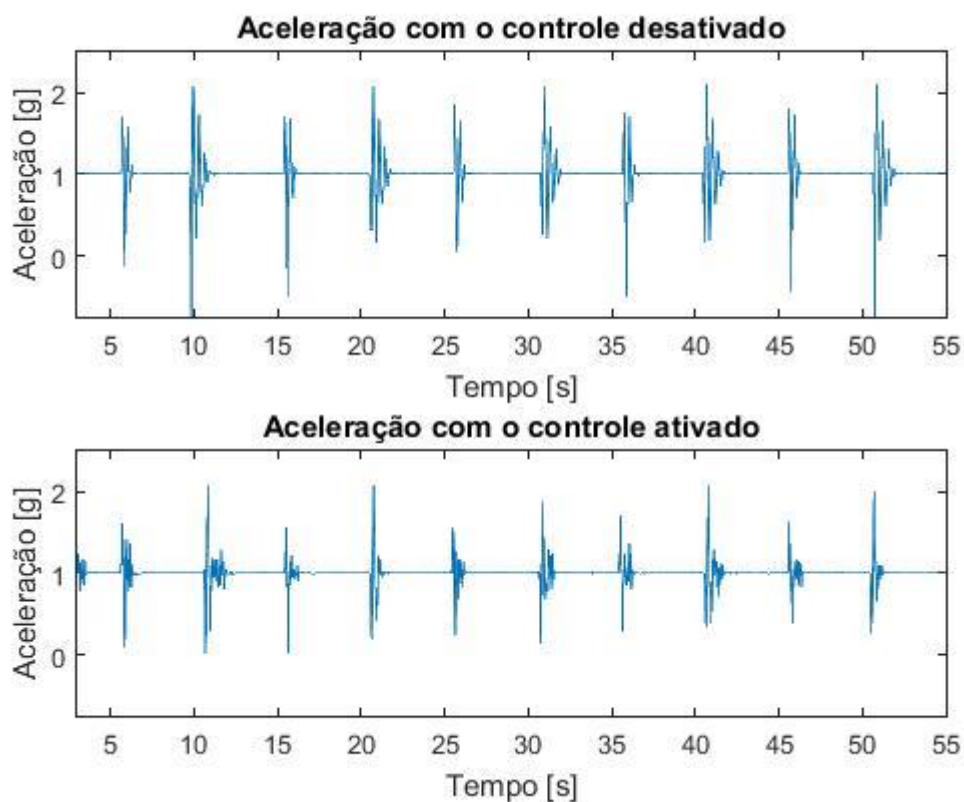


Figura 54 - Experimento 5 - Aceleração.

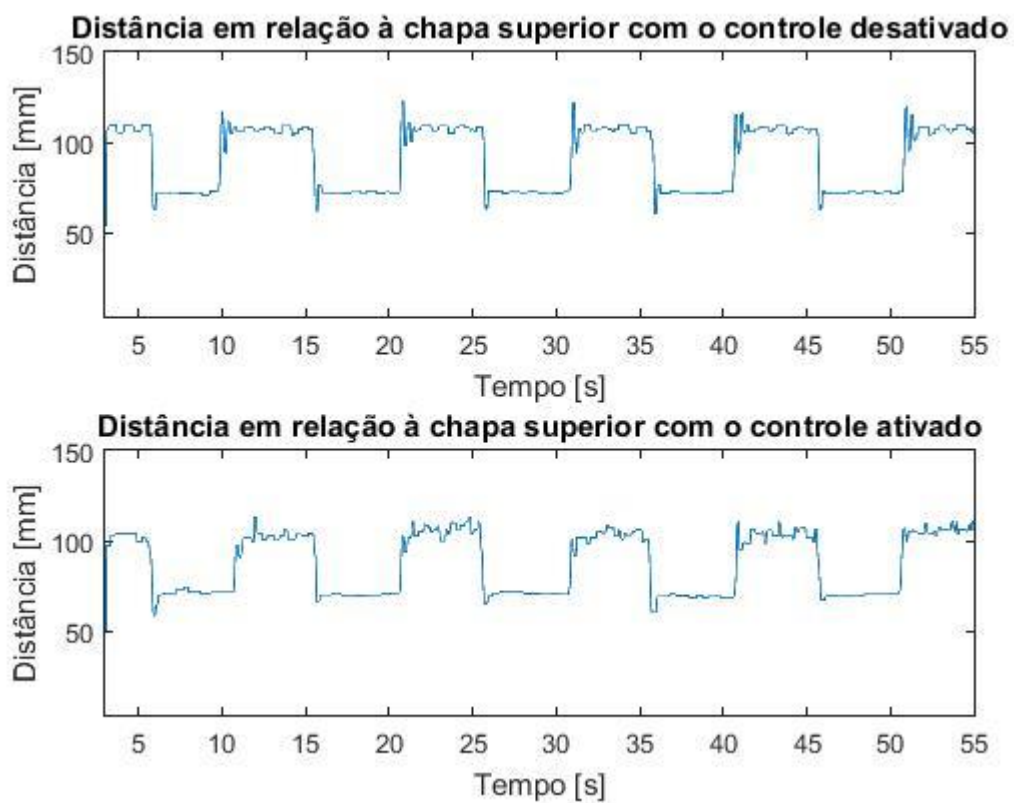


Figura 55 - Experimento - Distância.

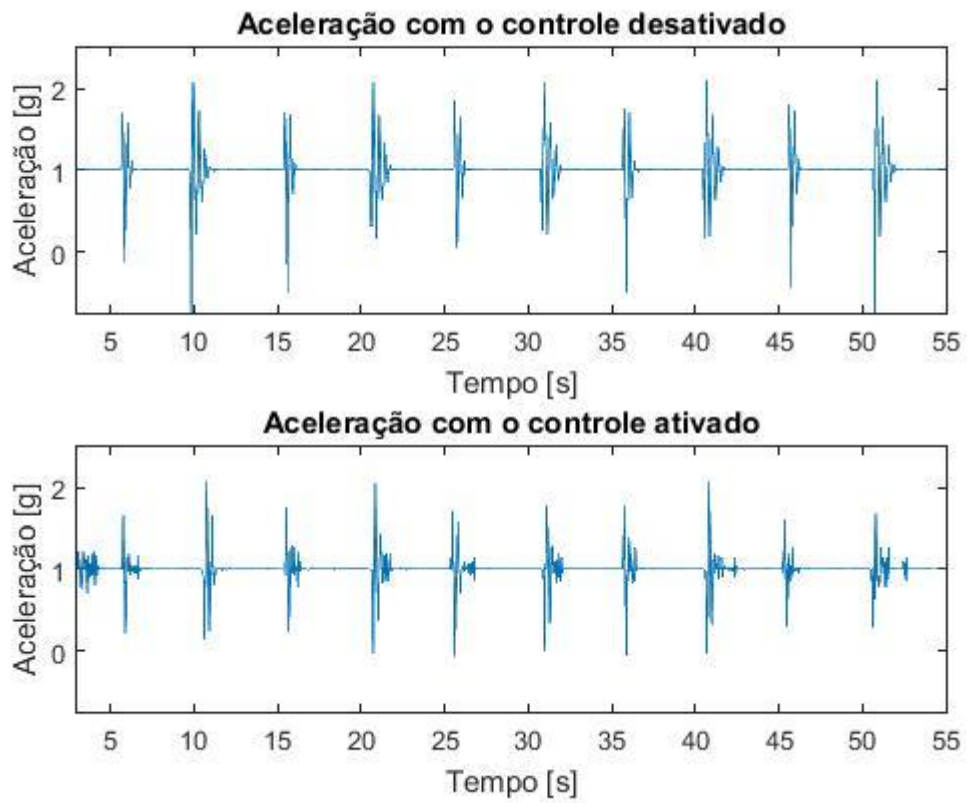


Figura 56 - Experimento 6 - Aceleração.

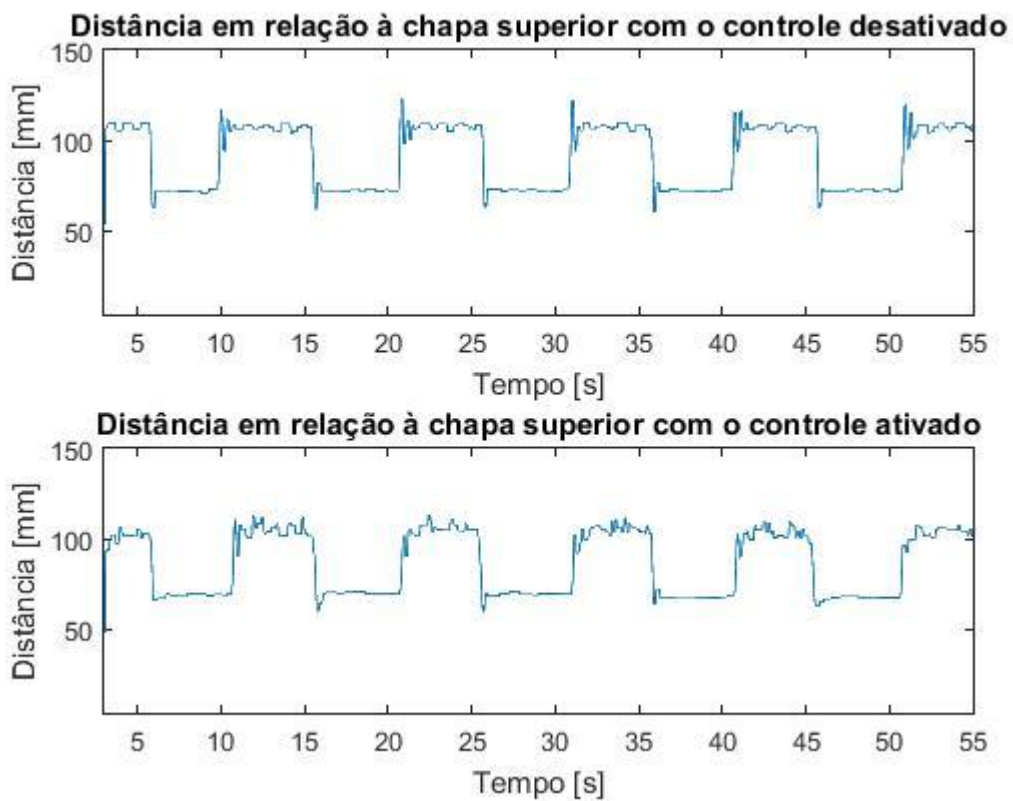


Figura 57 - Experimento 6 - Distância.

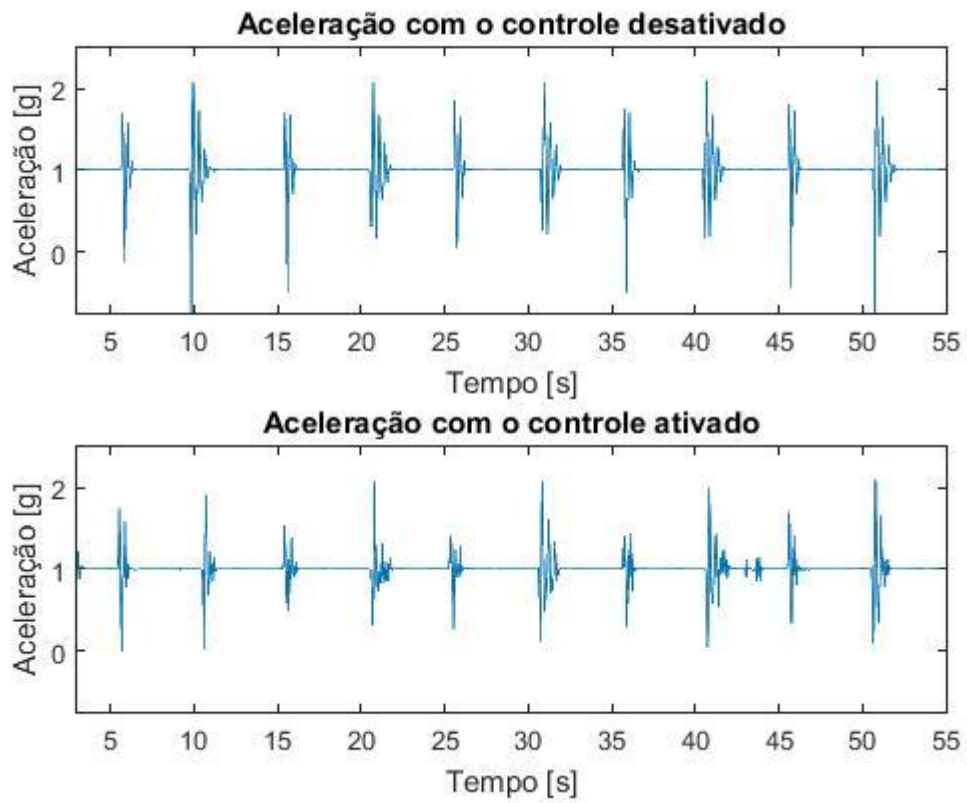


Figura 58 - Experimento 7 - Aceleração.

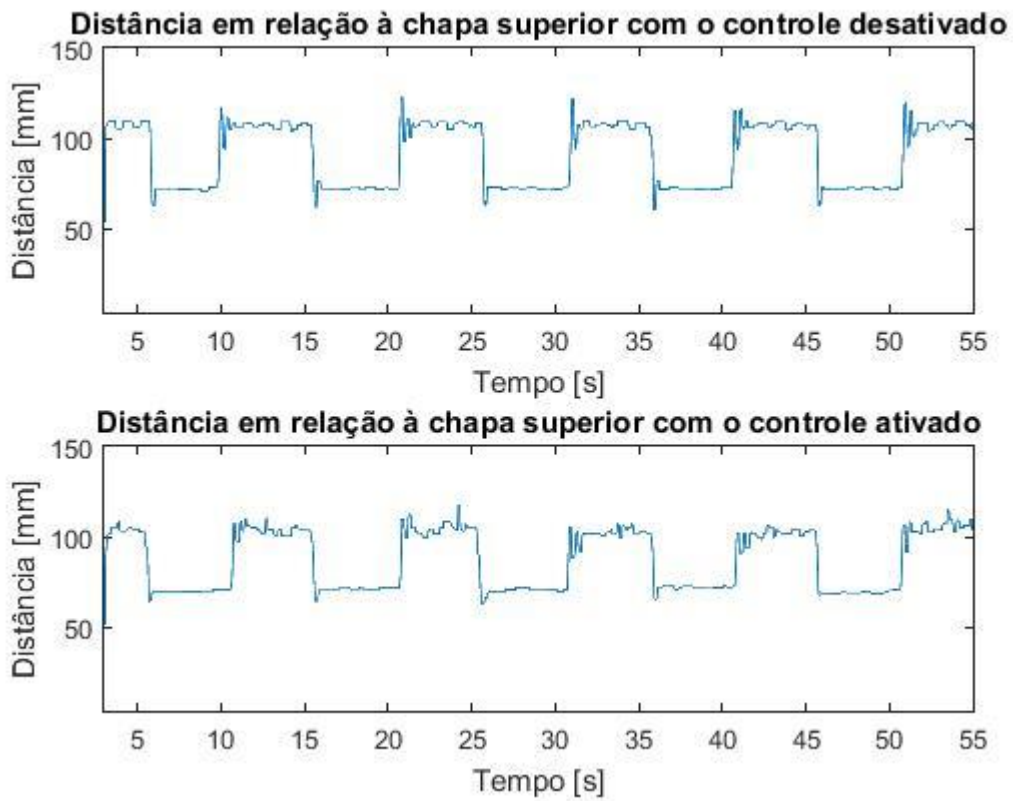


Figura 59 - Experimento 7 - Distância.

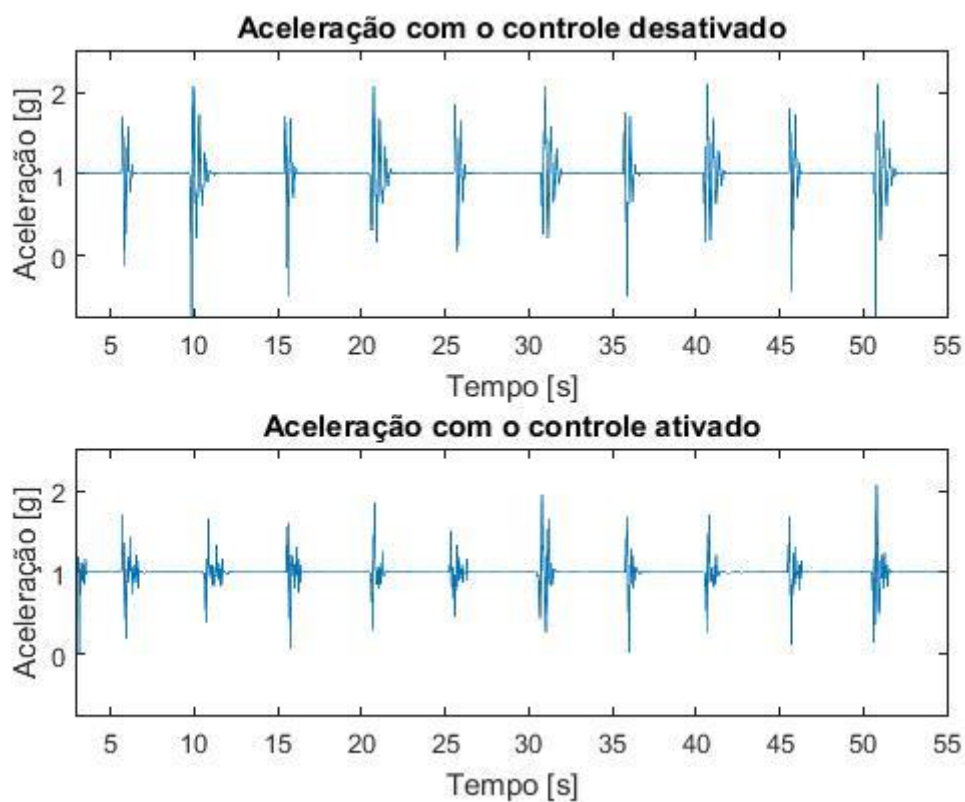


Figura 60 - Experimento 8 - Aceleração.

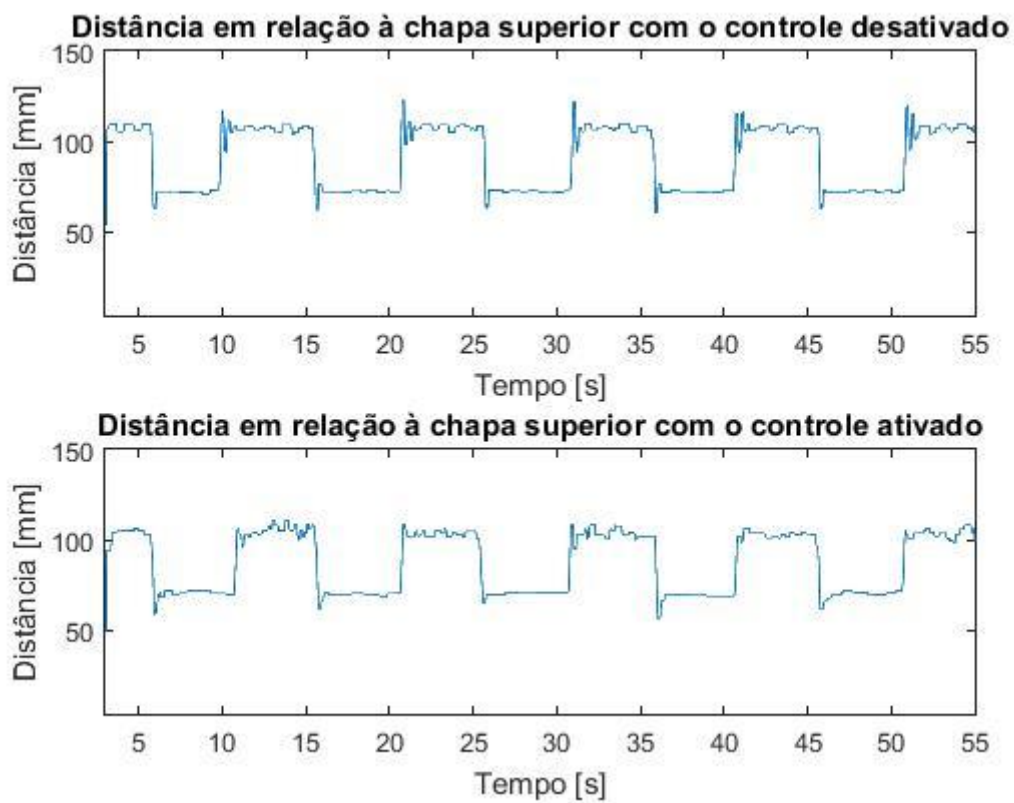


Figura 61 - Experimento 8 - Distância.

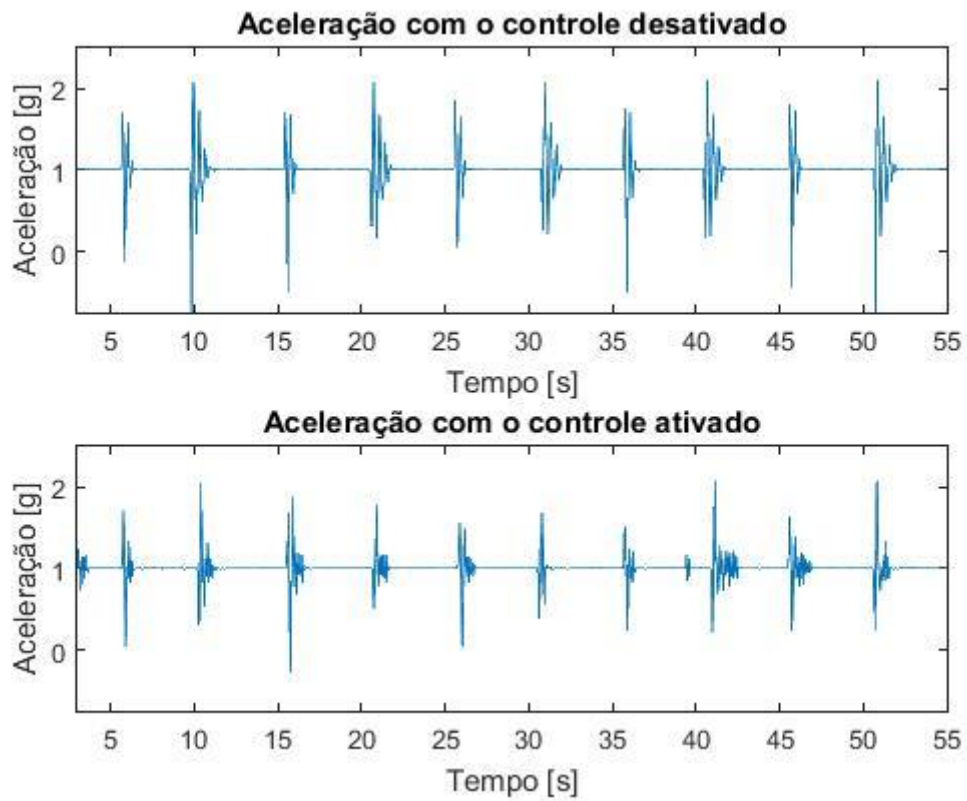


Figura 62 - Experimento 9 - Aceleração.

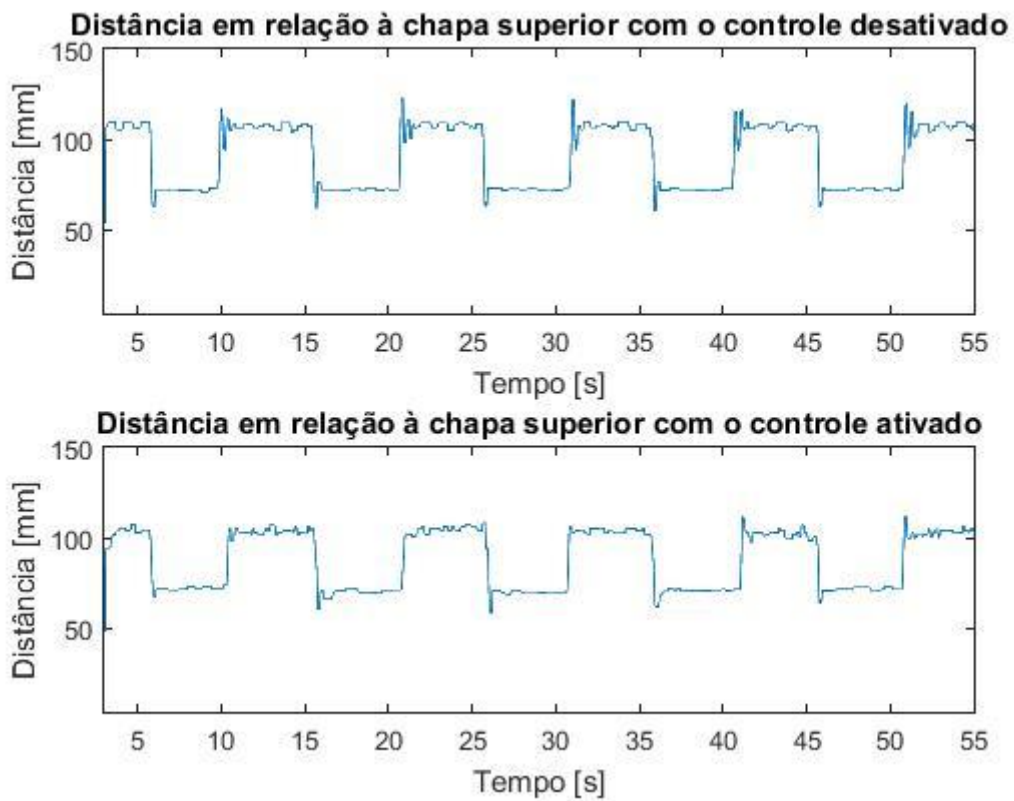


Figura 63 - Experimento 9 - Distância.

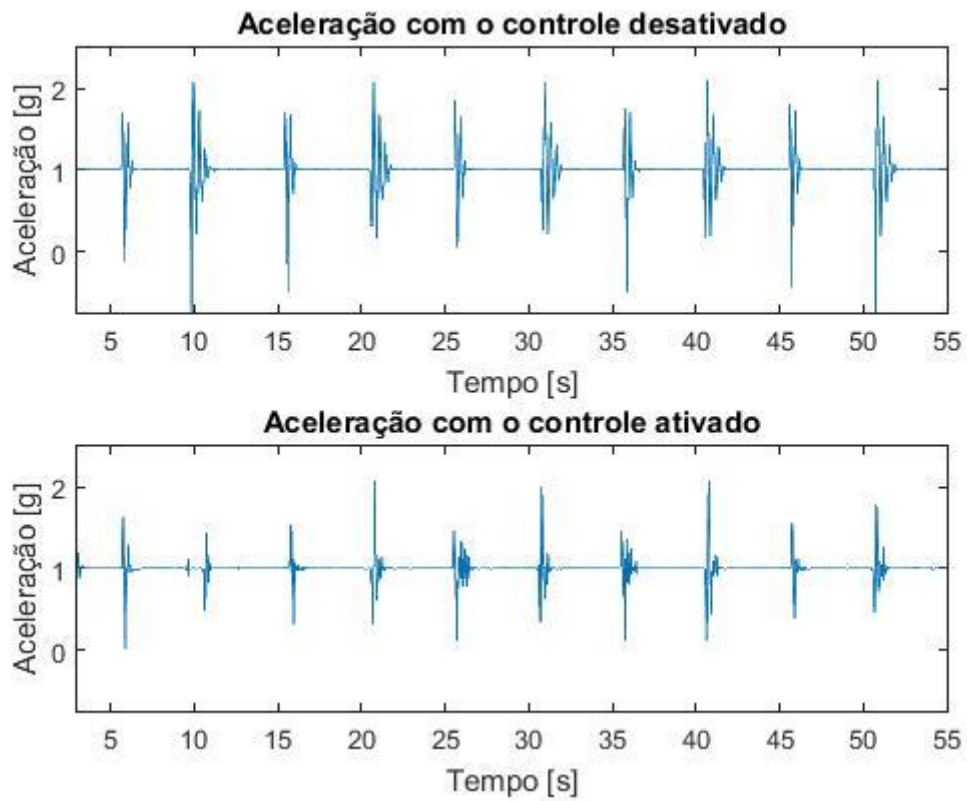


Figura 64 - Experimento 10 - Aceleração.

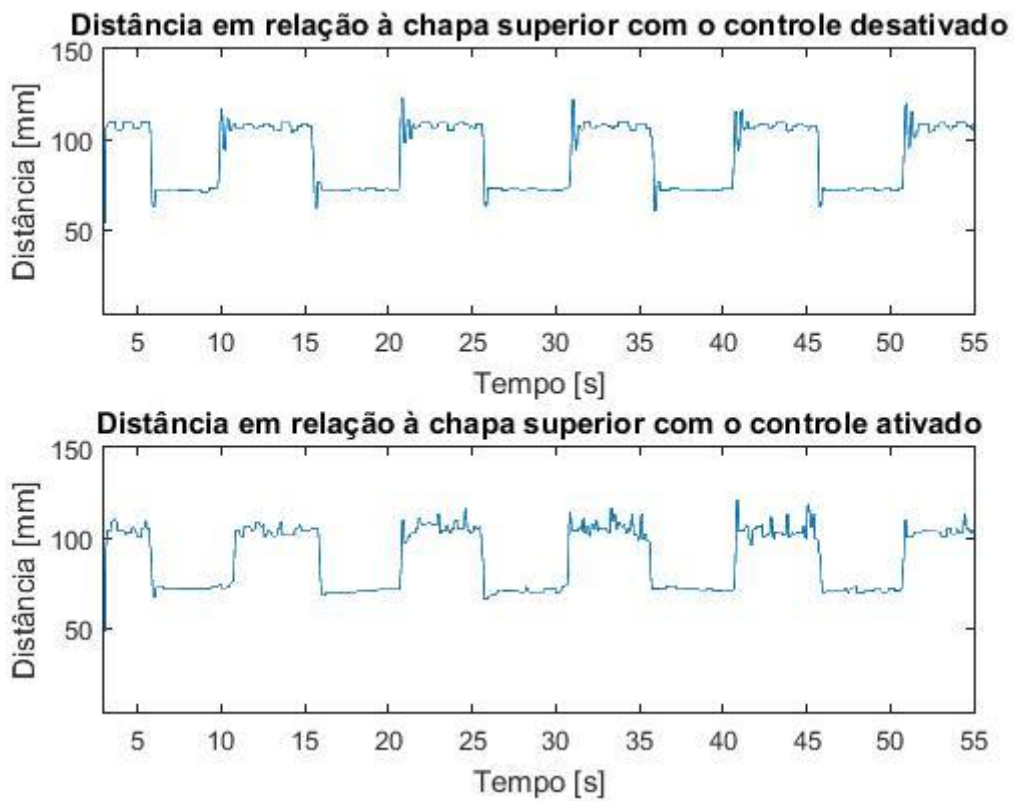


Figura 65 - Experimento 10 - Distância.

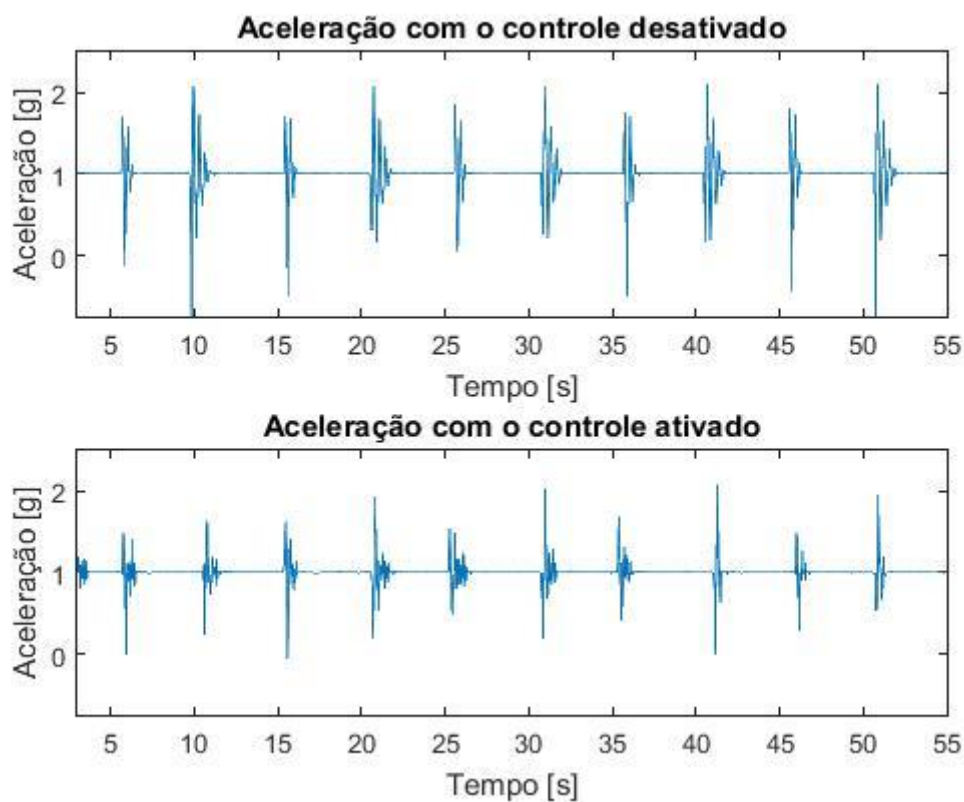


Figura 66 - Experimento 11 - Aceleração.

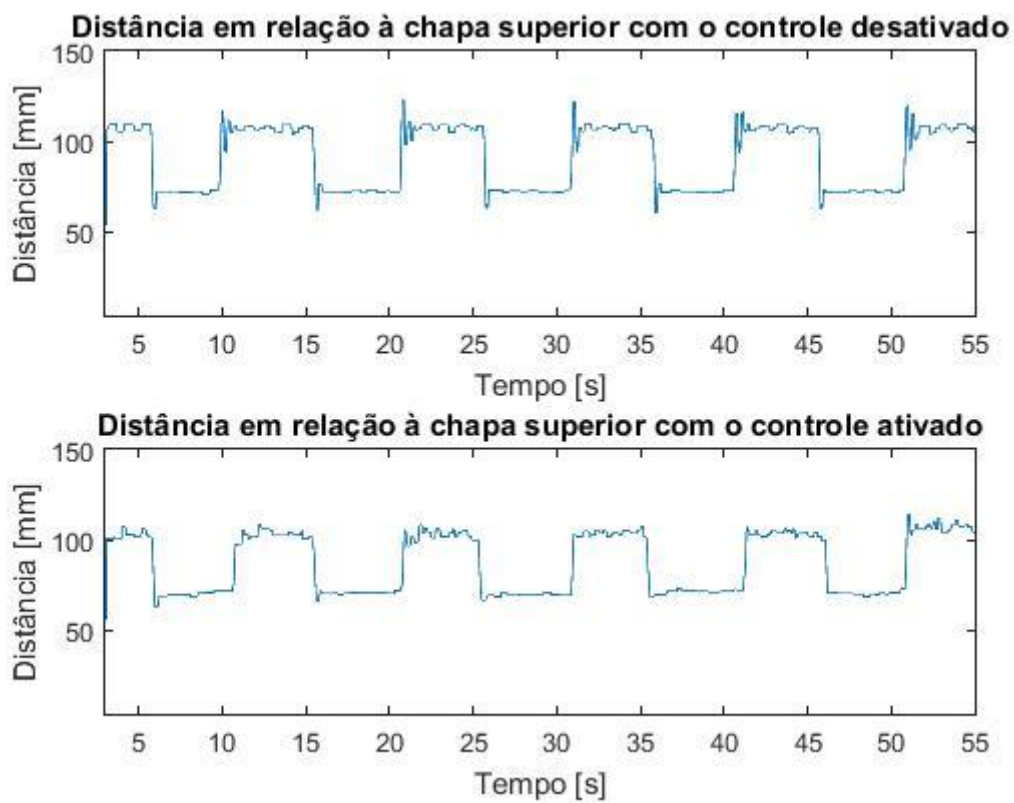


Figura 67 - Experimento 11 - Distância.

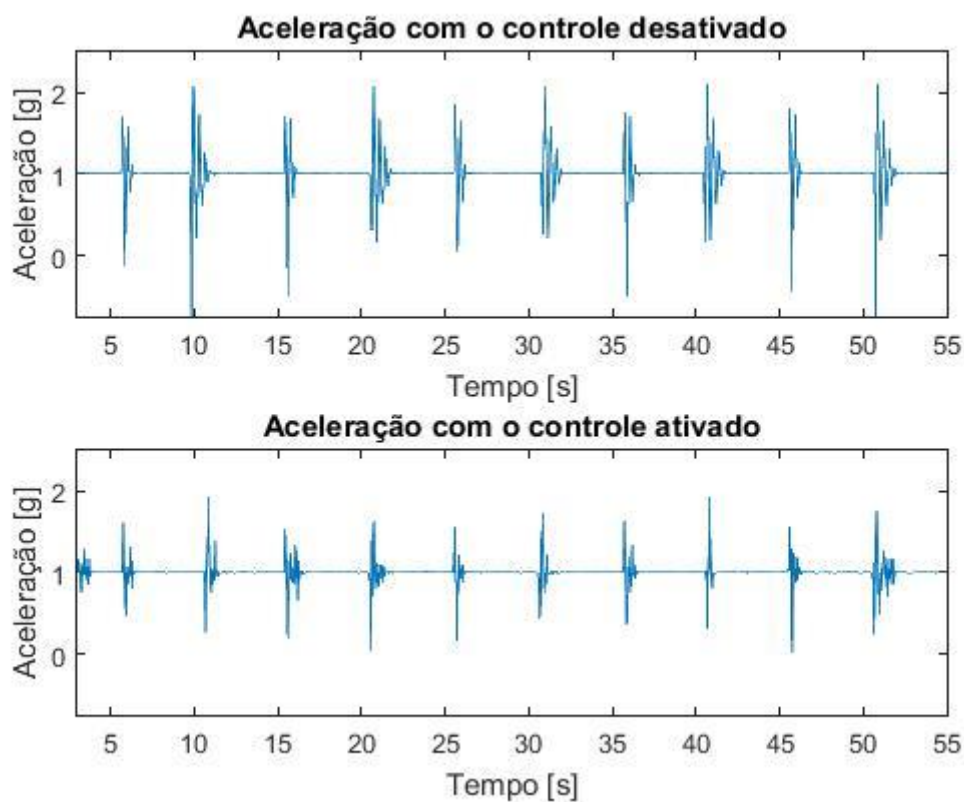


Figura 68 - Experimento 12 - Aceleração.

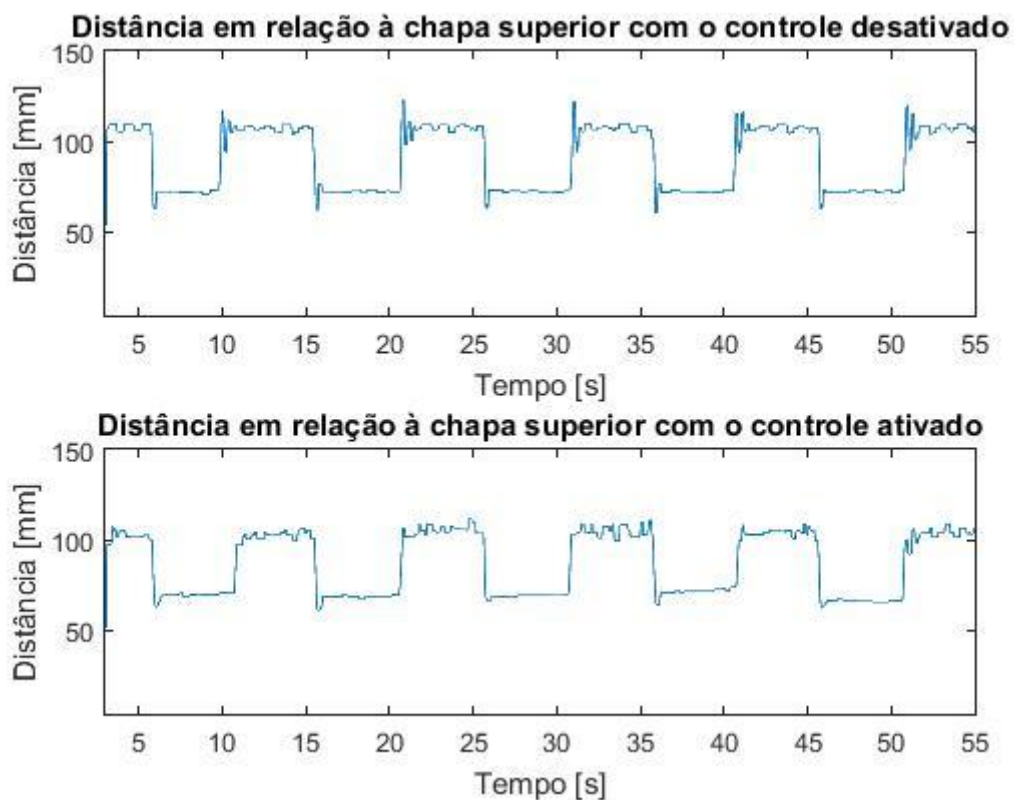


Figura 69 - Experimento 12 - Distância.

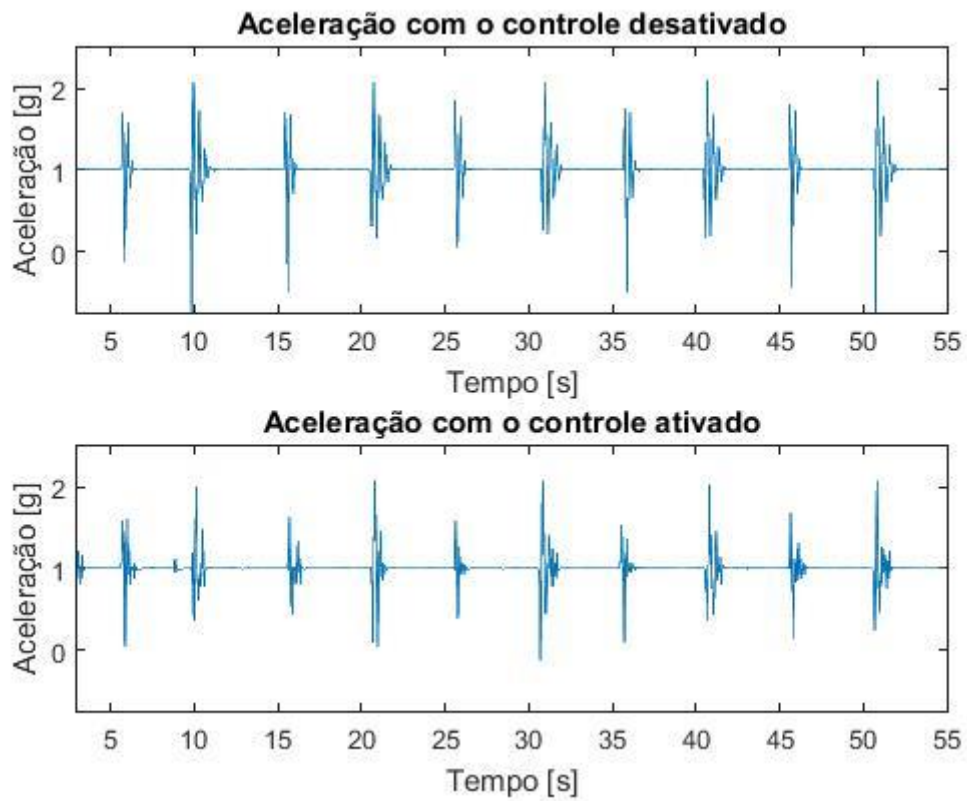


Figura 70 - Experimento 13 - Aceleração.

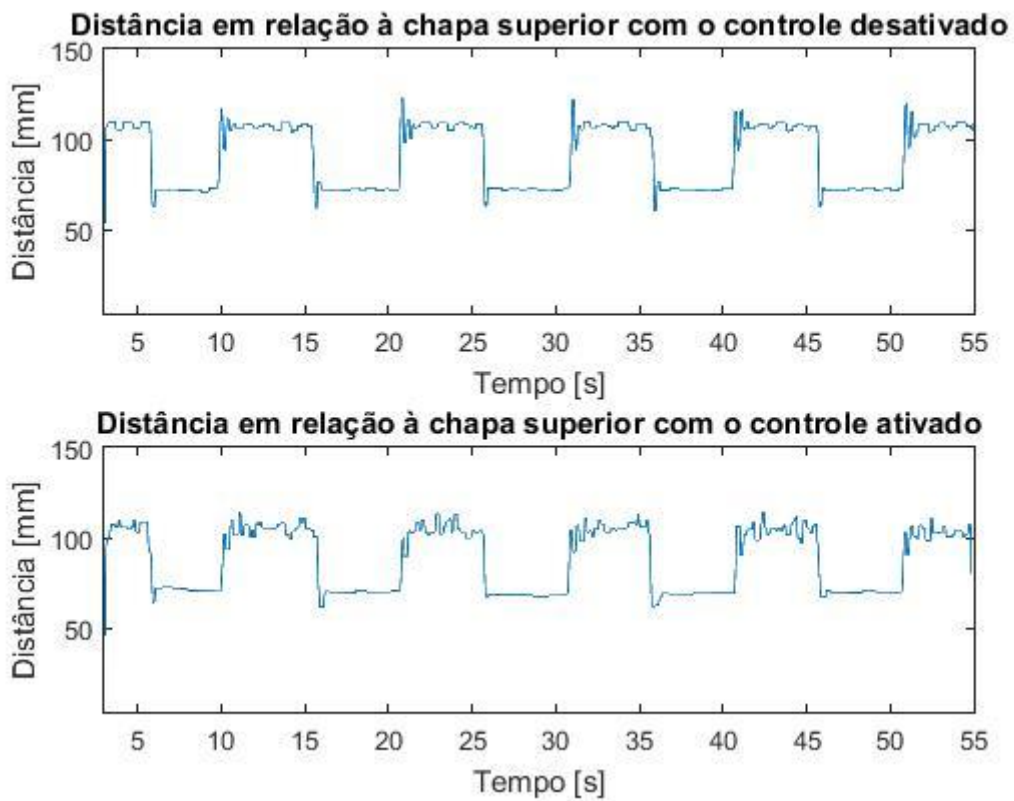


Figura 71 - Experimento 13 - Distância.

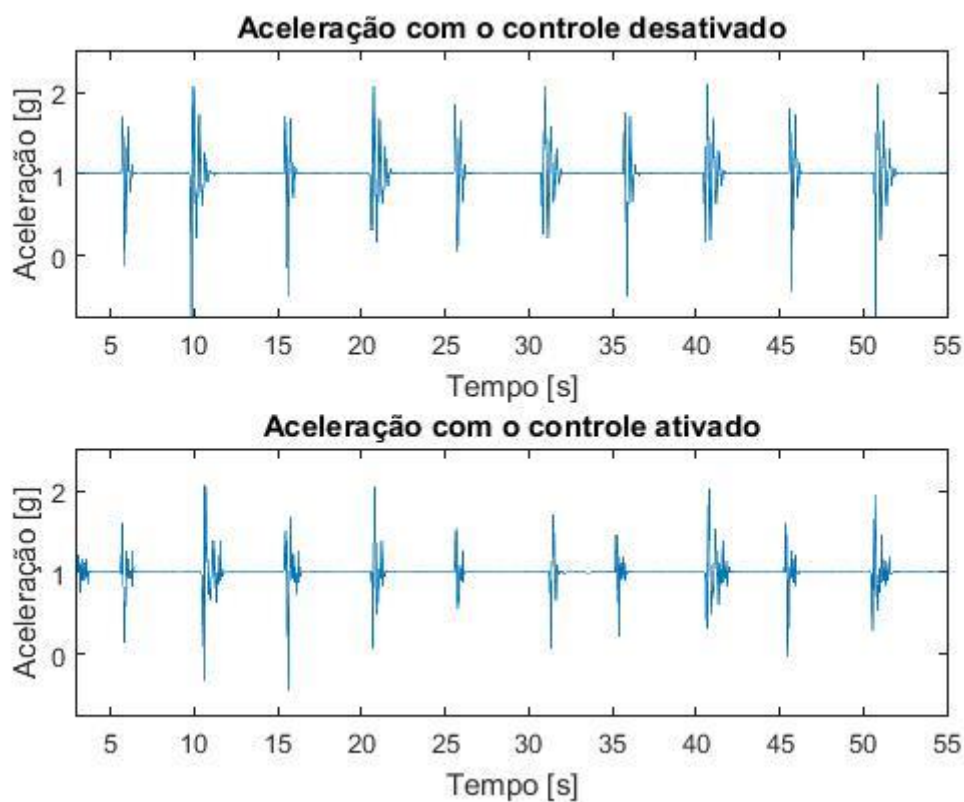


Figura 72 - Experimento 14 - Aceleração.

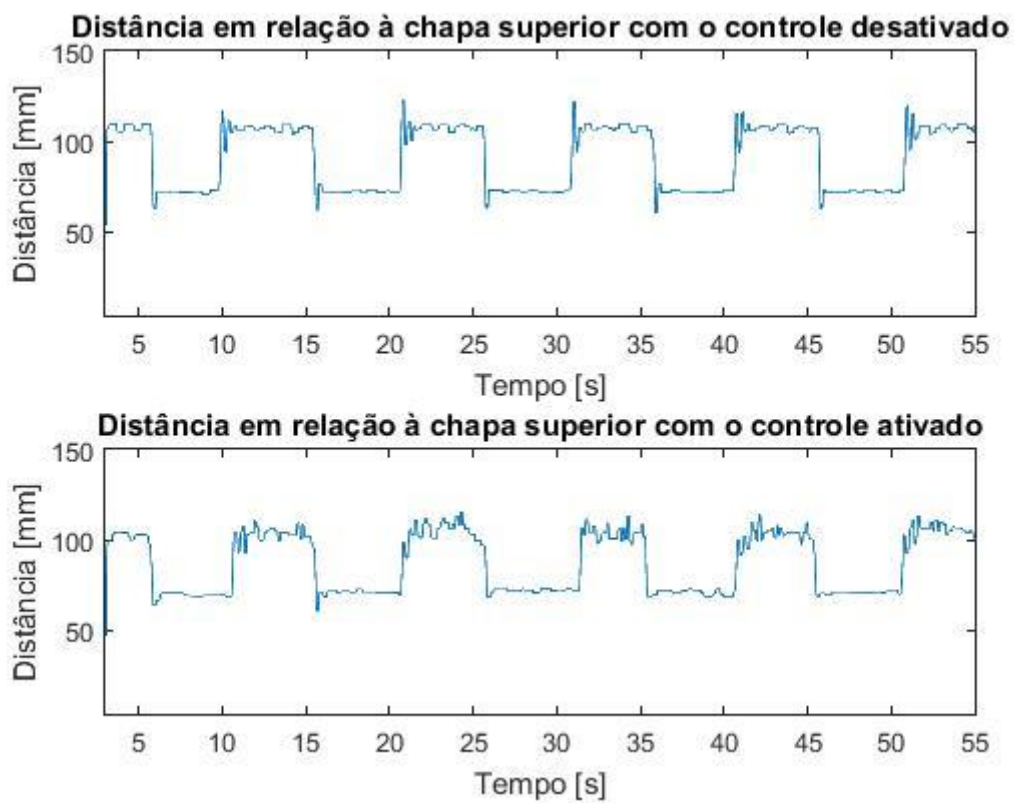


Figura 73 - Experimento 14 - Distância.

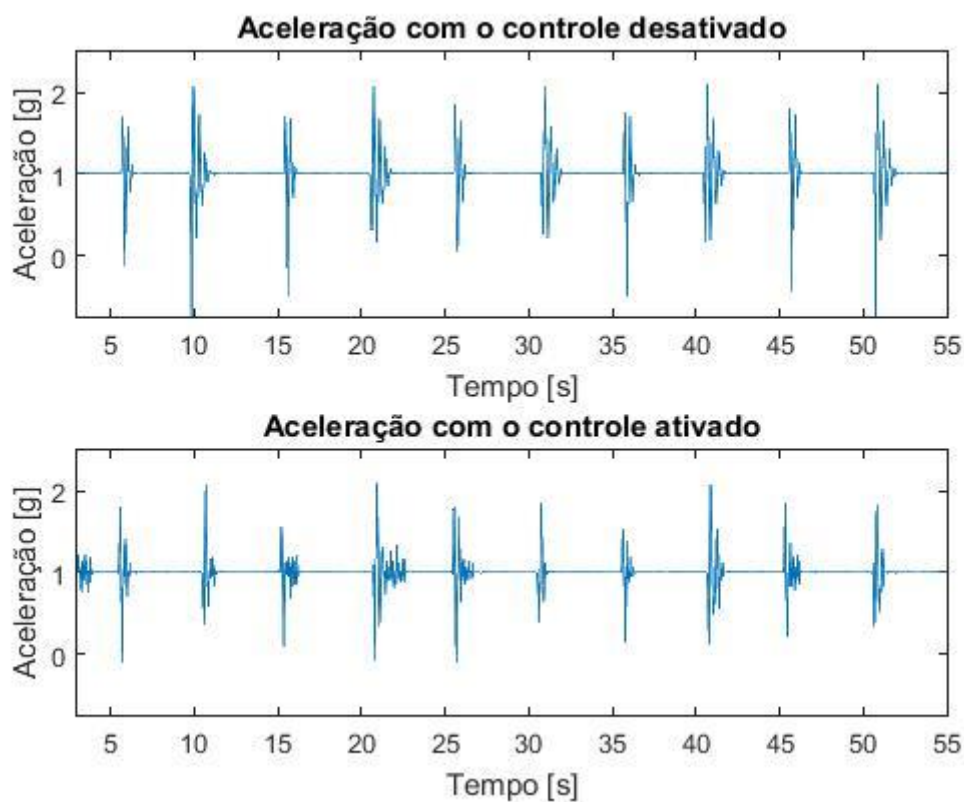


Figura 74 - Experimento 15 - Aceleração.

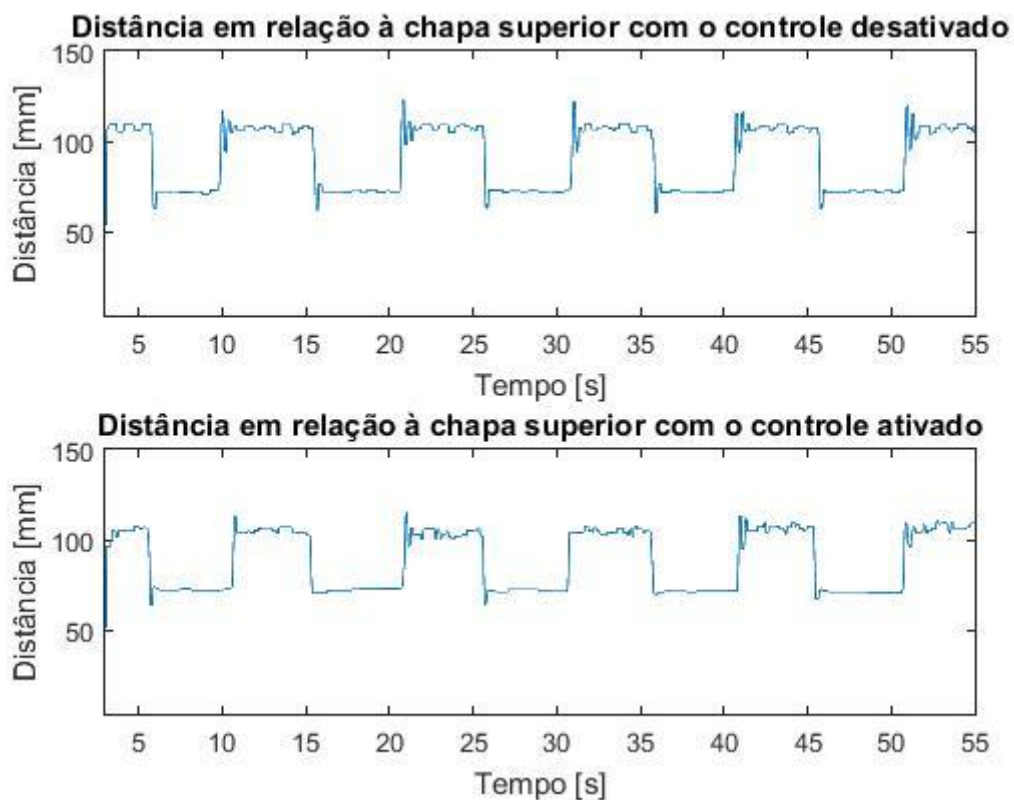


Figura 75 - Experimento 15 - Distância.

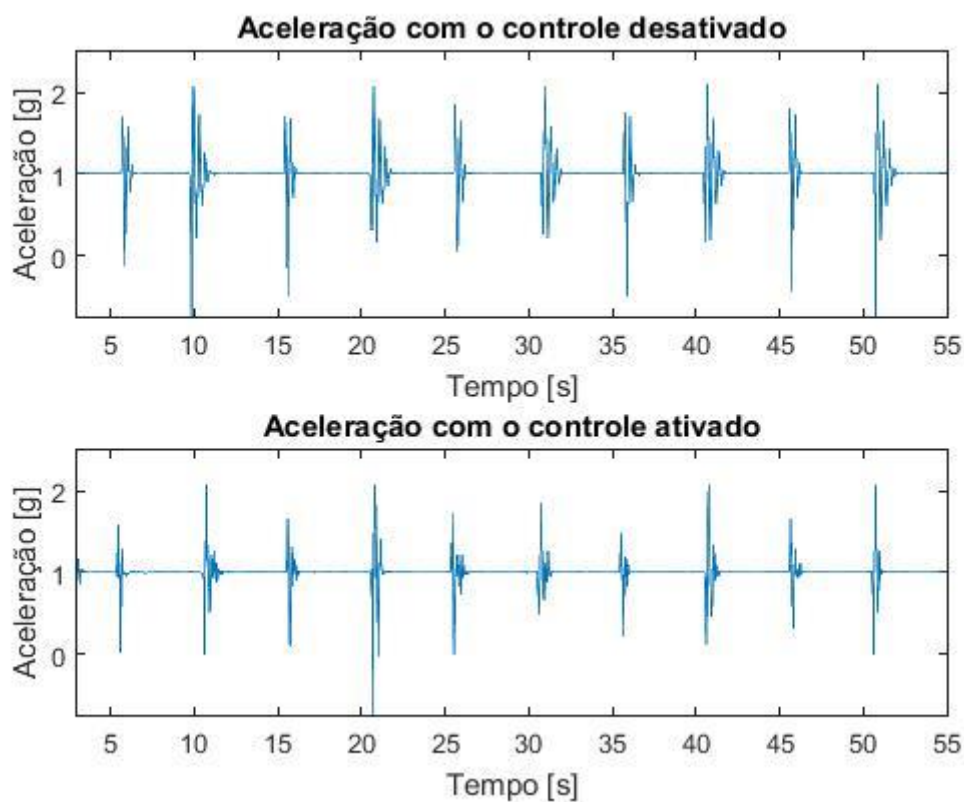


Figura 76 - Experimento 16 - Aceleração.

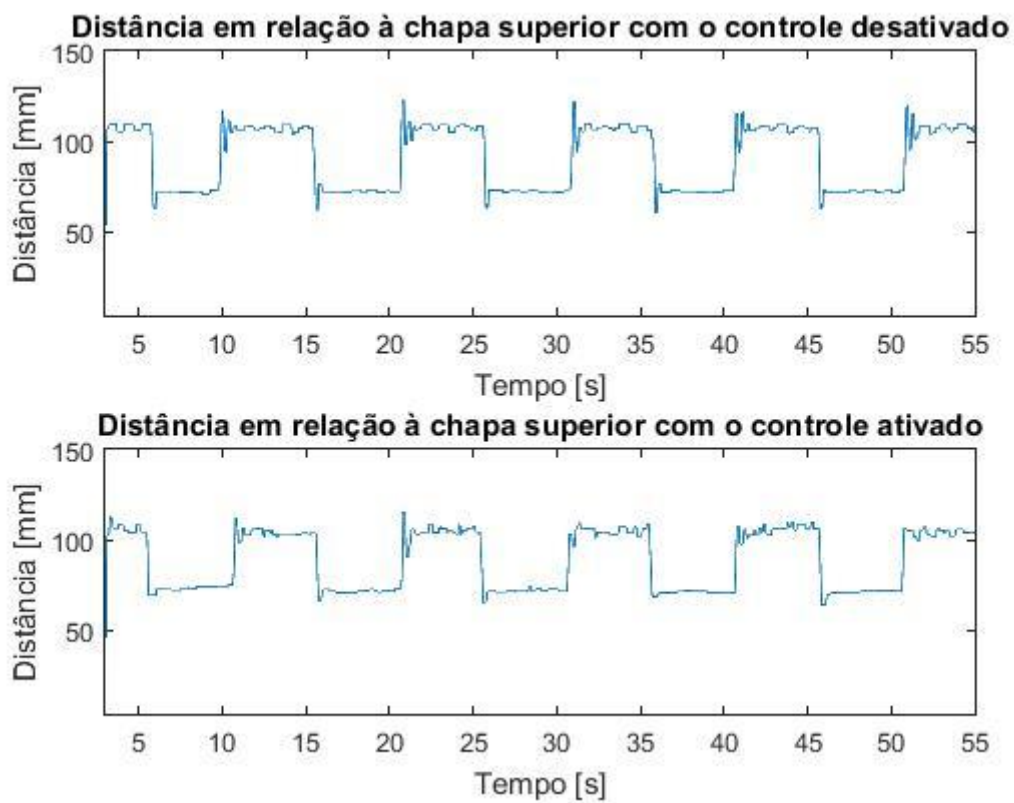


Figura 77 - Experimento 16 - Distância.

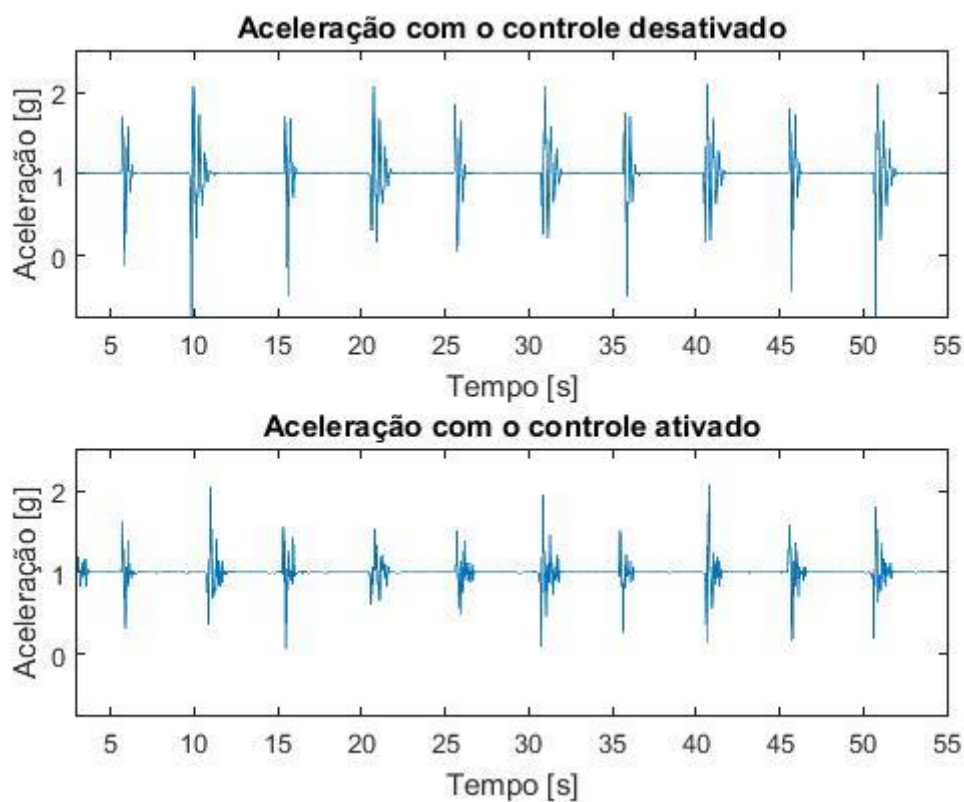


Figura 78 - Experimento 17 - Aceleração.

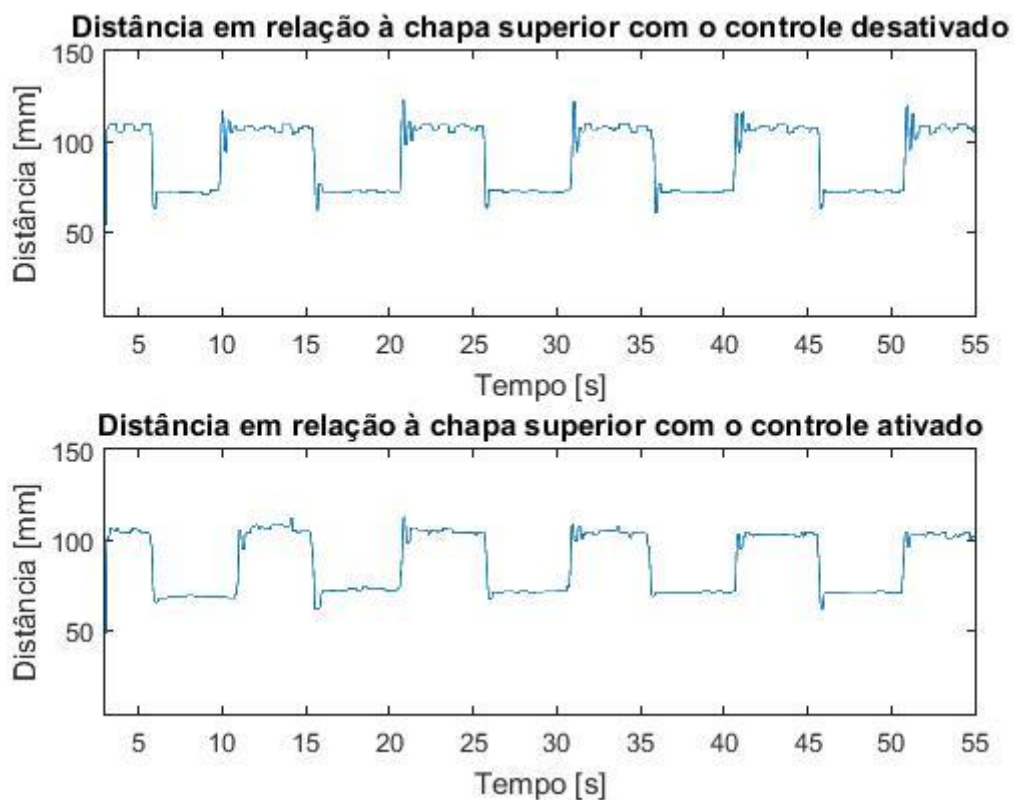


Figura 79 - Experimento 17 - Distância.

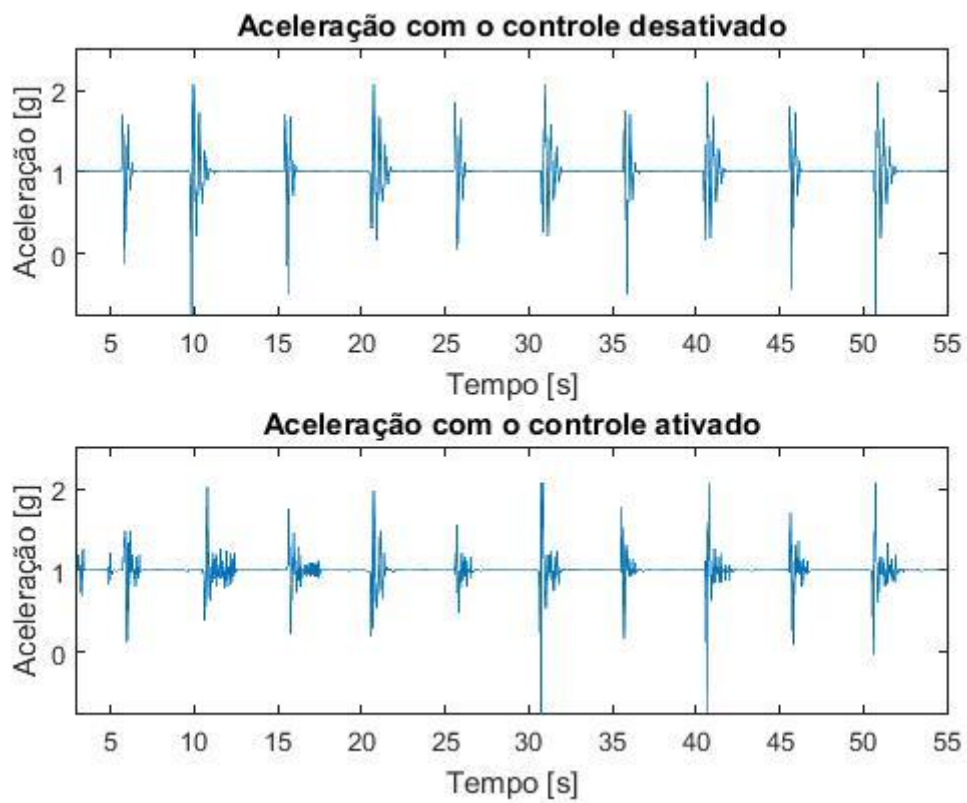


Figura 80 - Experimento 18 - Aceleração.

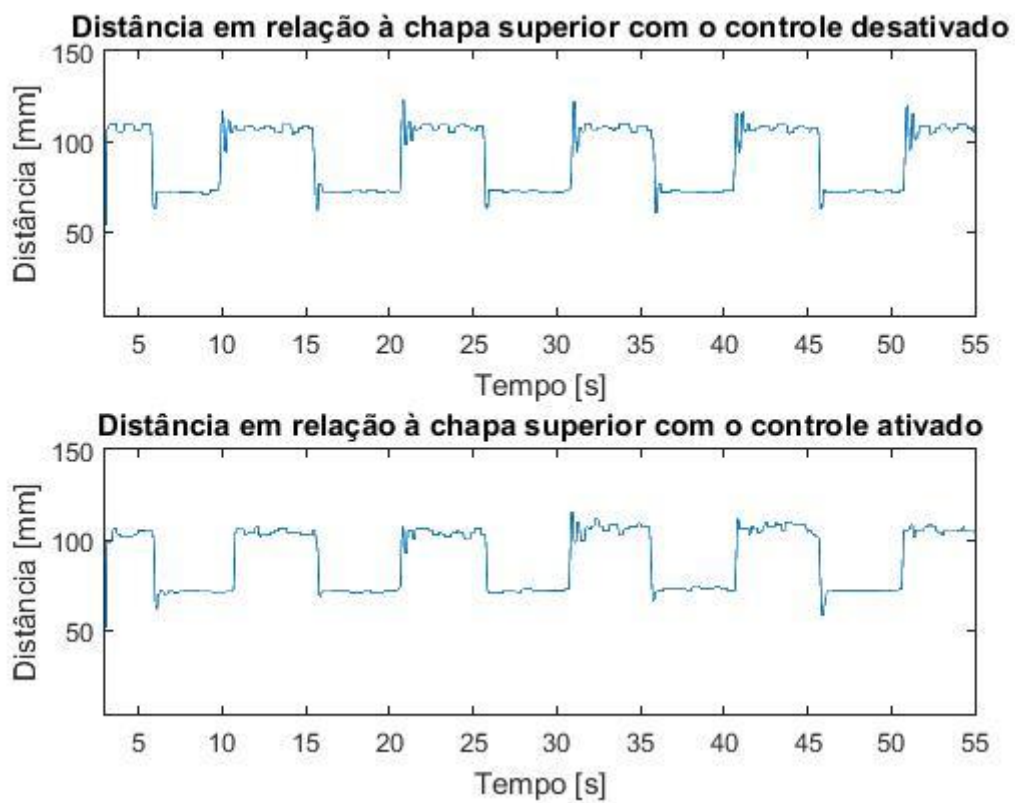


Figura 81 - Experimento 18 - Distância.

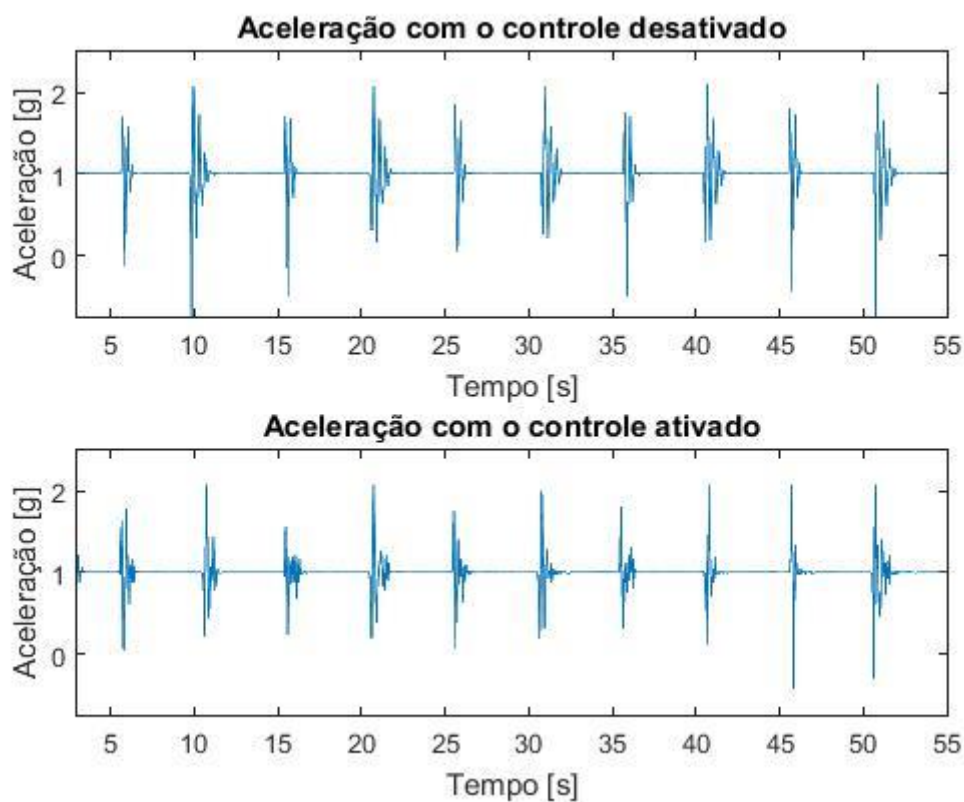


Figura 82 - Experimento 19 - Aceleração.

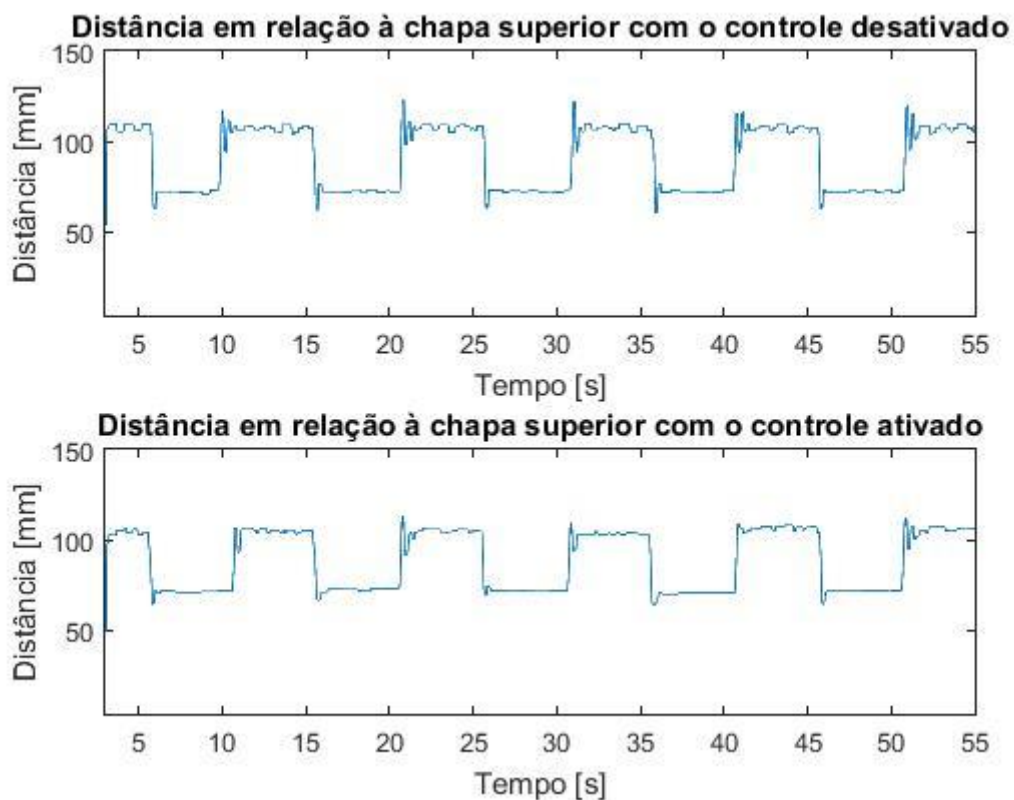


Figura 83 - Experimento 19 - Distância.

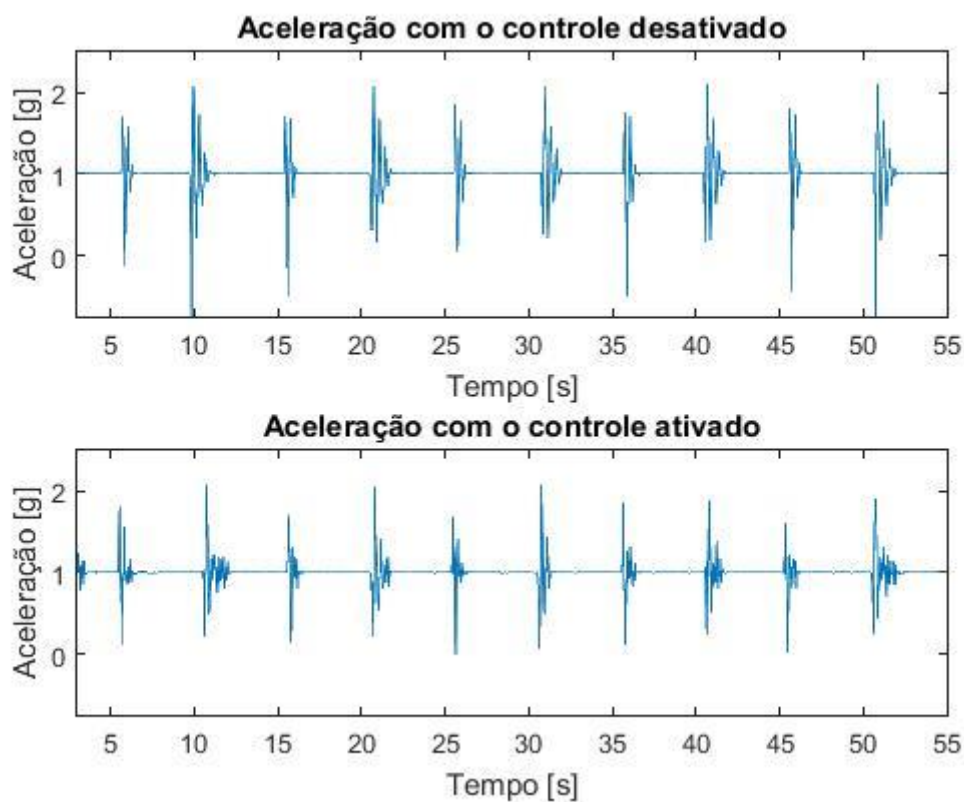


Figura 84 - Experimento 20 - Aceleração.

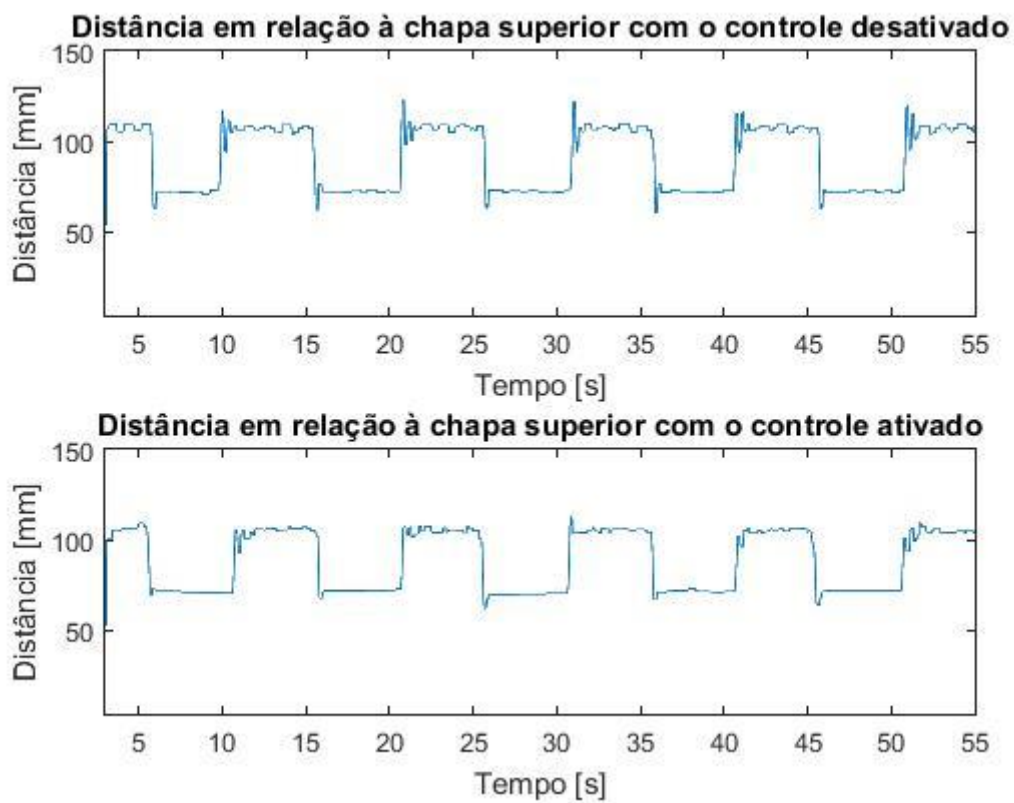


Figura 85 - Experimento 20 - Distância.

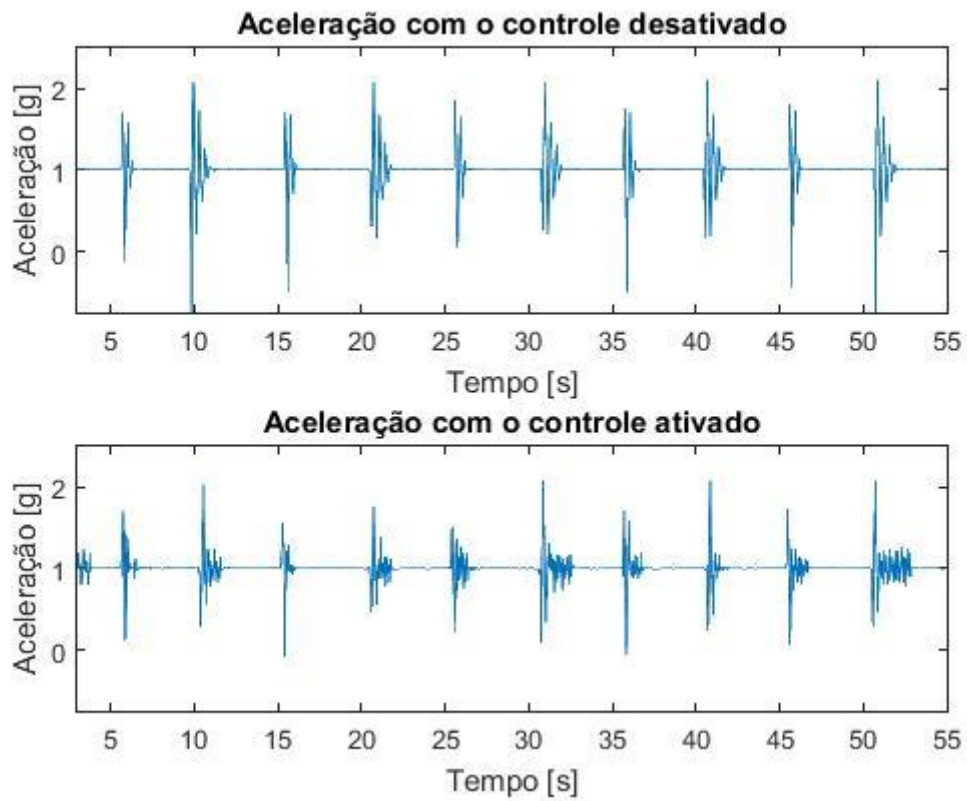


Figura 86 - Experimento 21 - Aceleração.

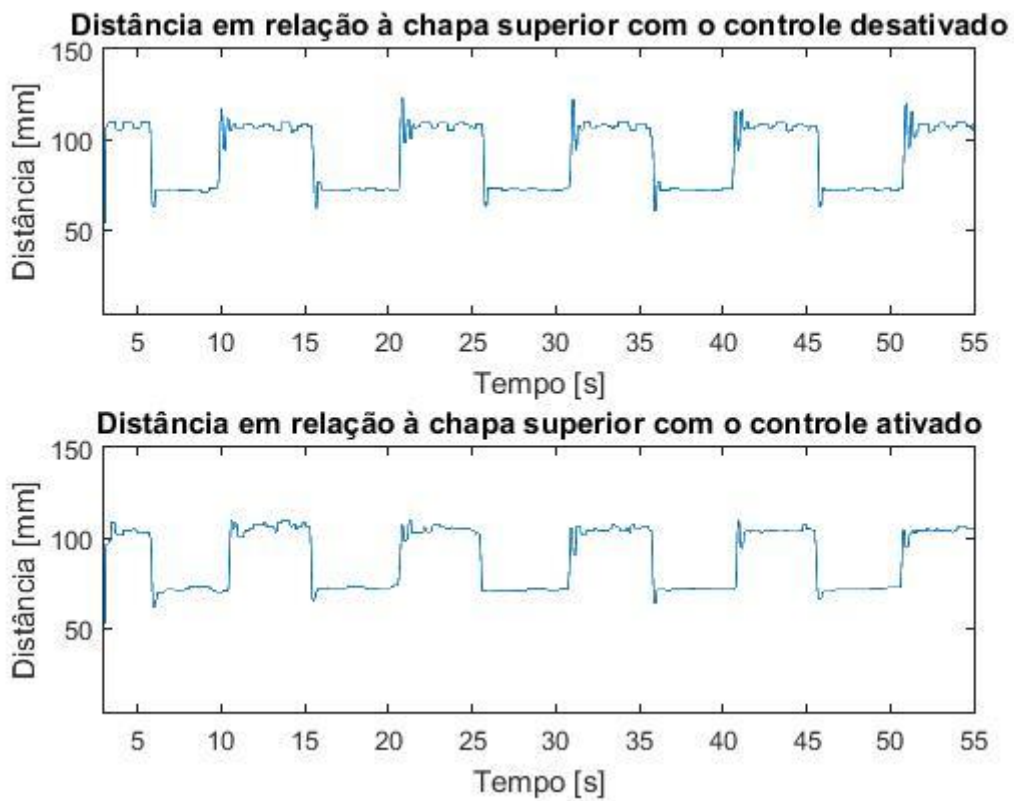


Figura 87 - Experimento 21 - Distância.

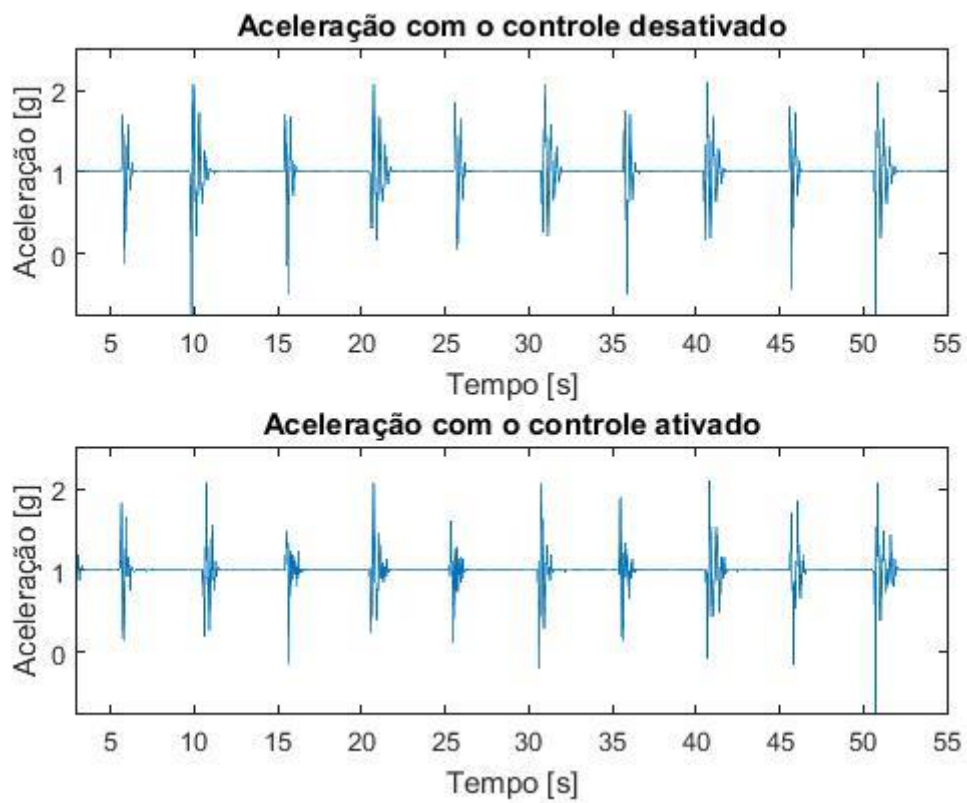


Figura 88 - Experimento 22 - Aceleração.

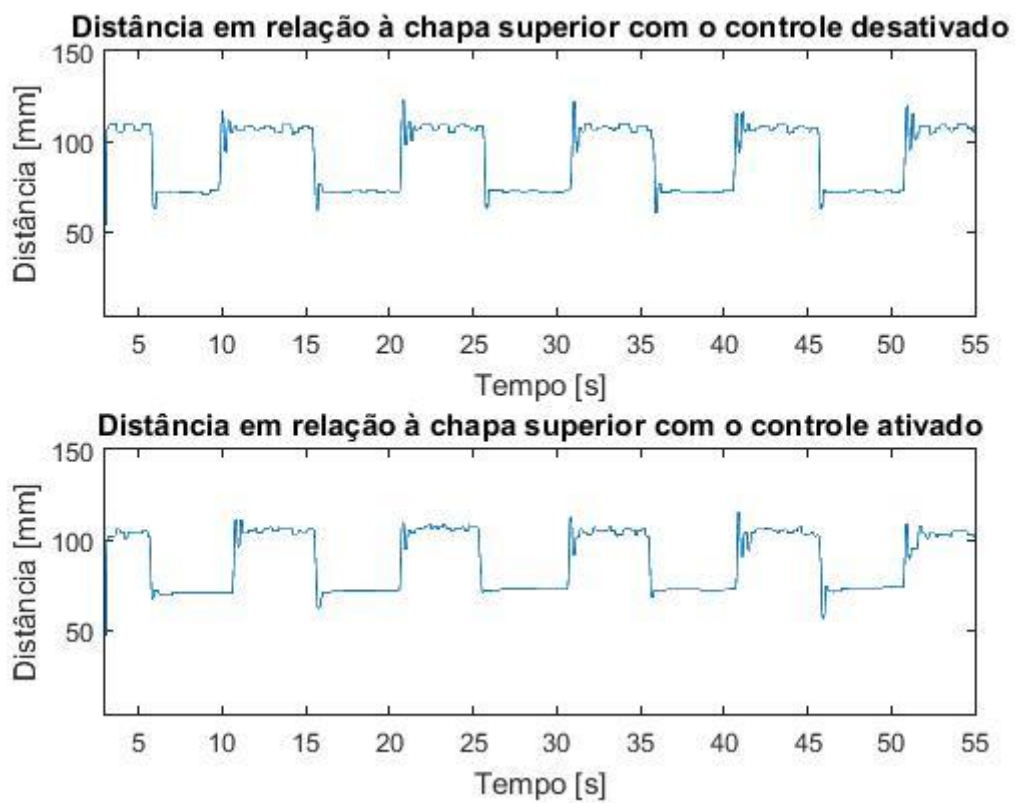


Figura 89 - Experimento 22 - Distância.

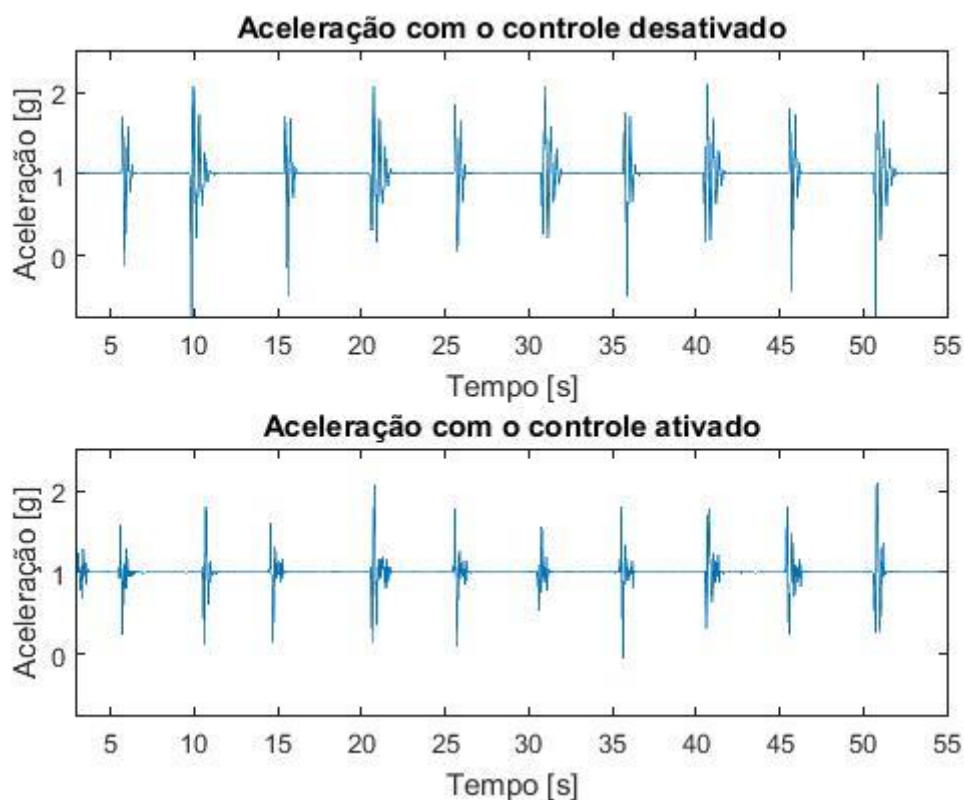


Figura 90 - Experimento 23 - Aceleração.

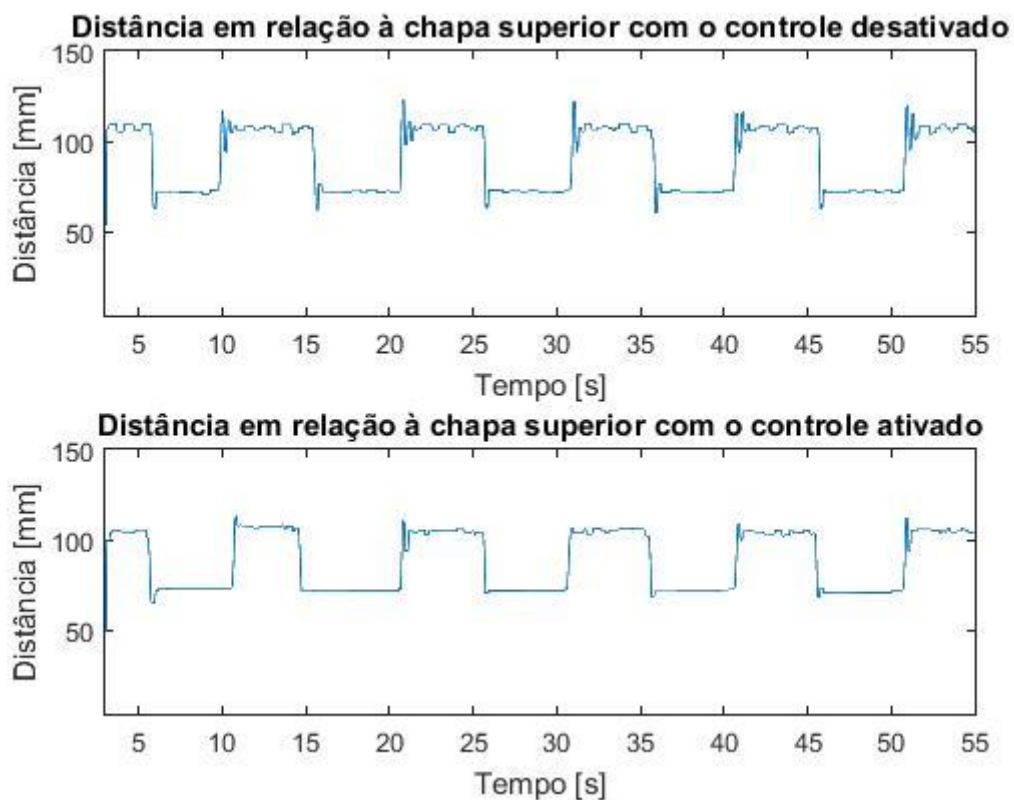


Figura 91 - Experimento 23 - Distância.

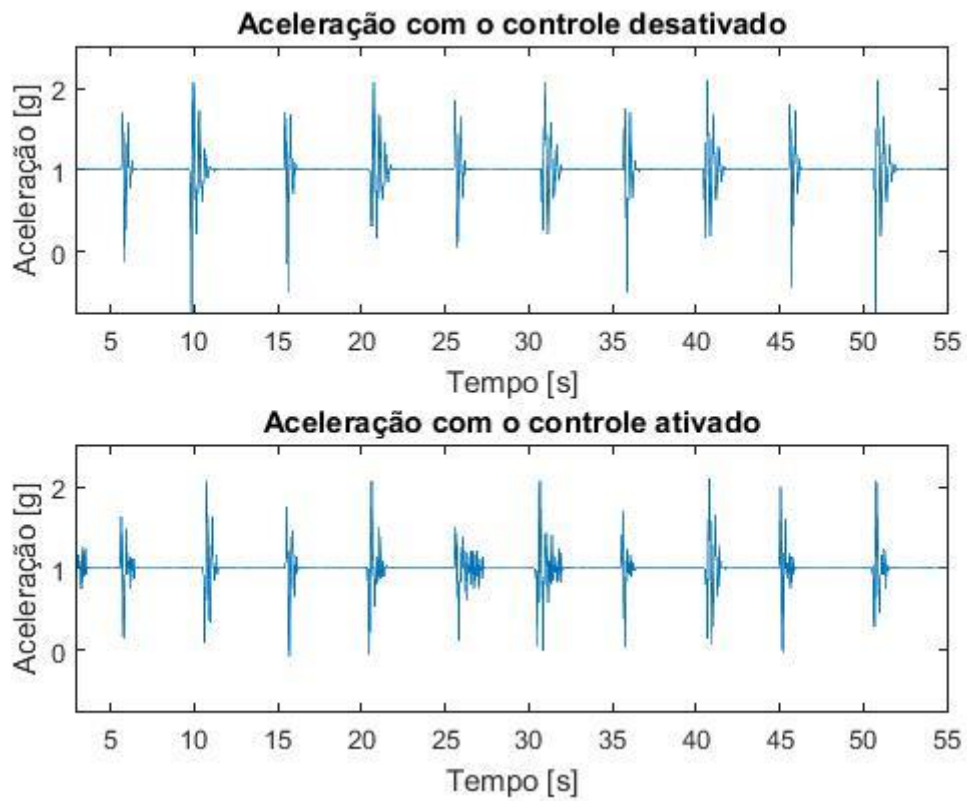


Figura 92 - Experimento 24 - Aceleração.

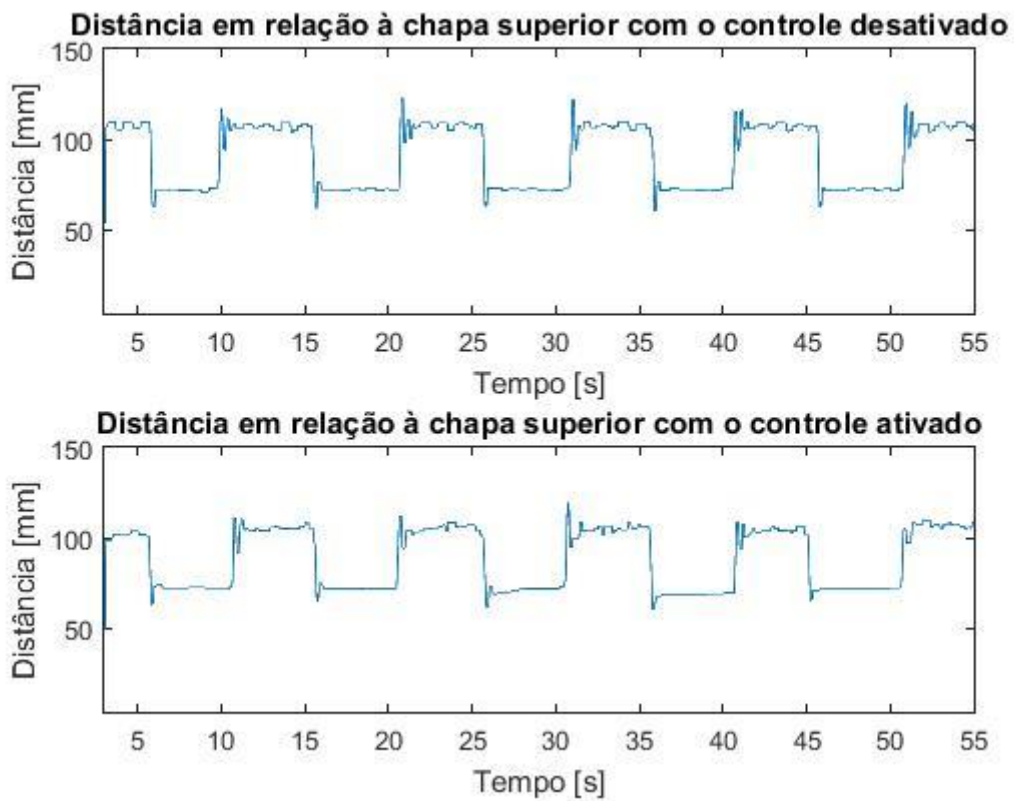


Figura 93 - Experimento 24 - Distância.

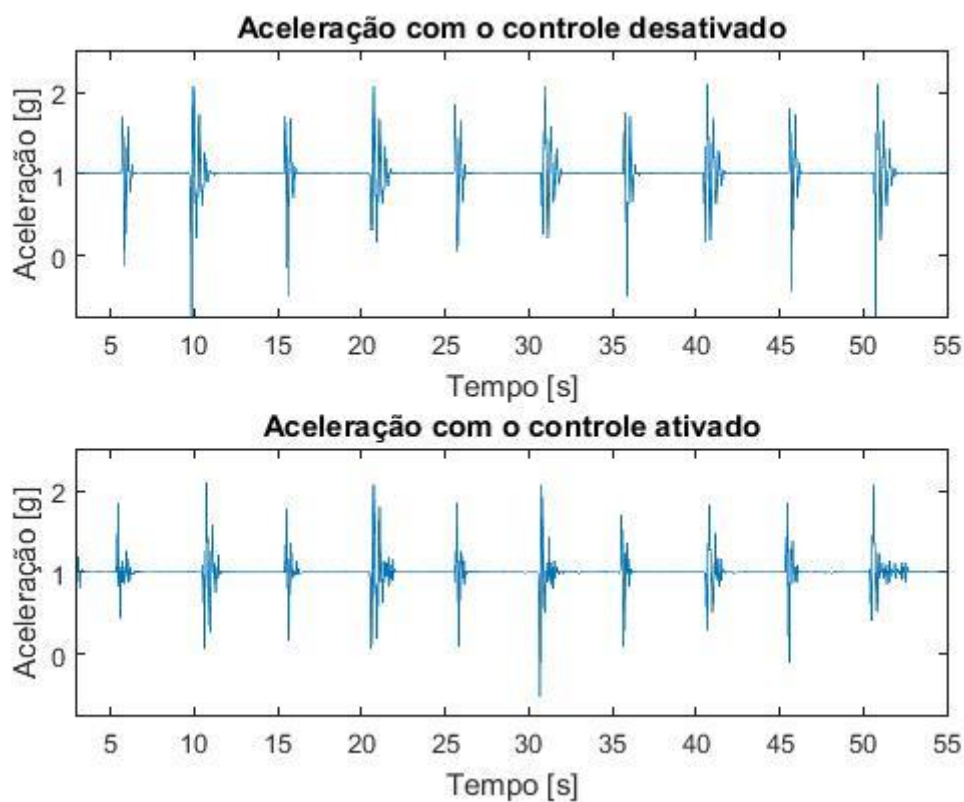


Figura 94 - Experimento 25 - Aceleração.

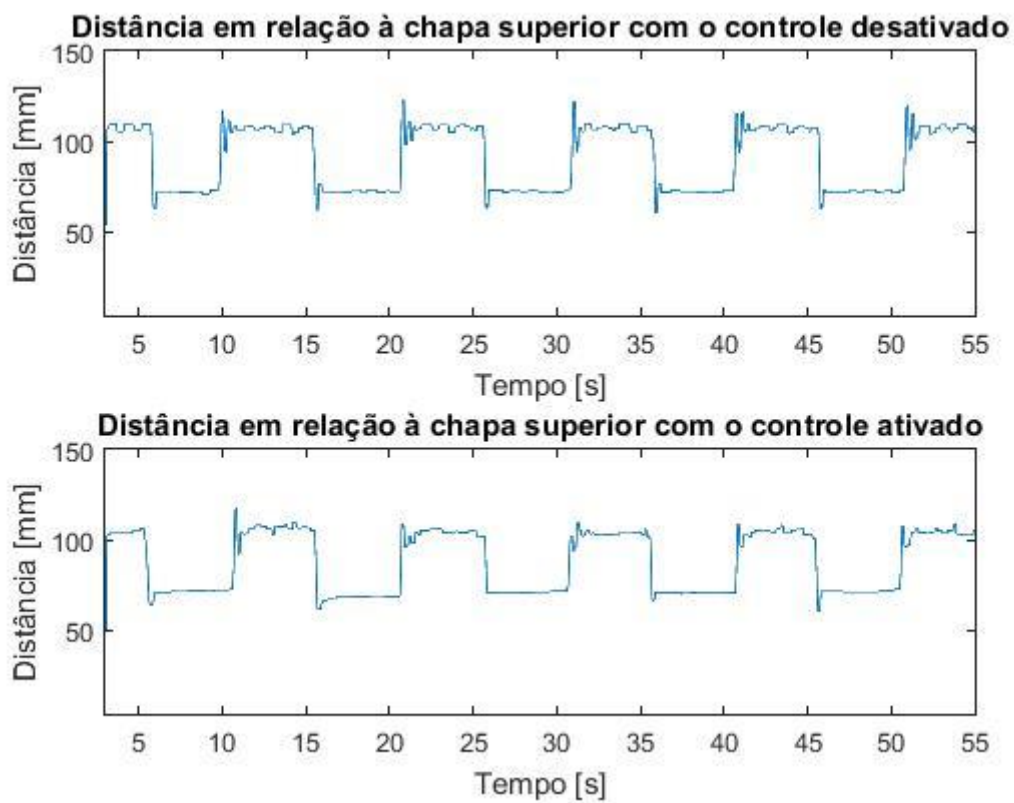


Figura 95 - Experimento 25 - Distância.

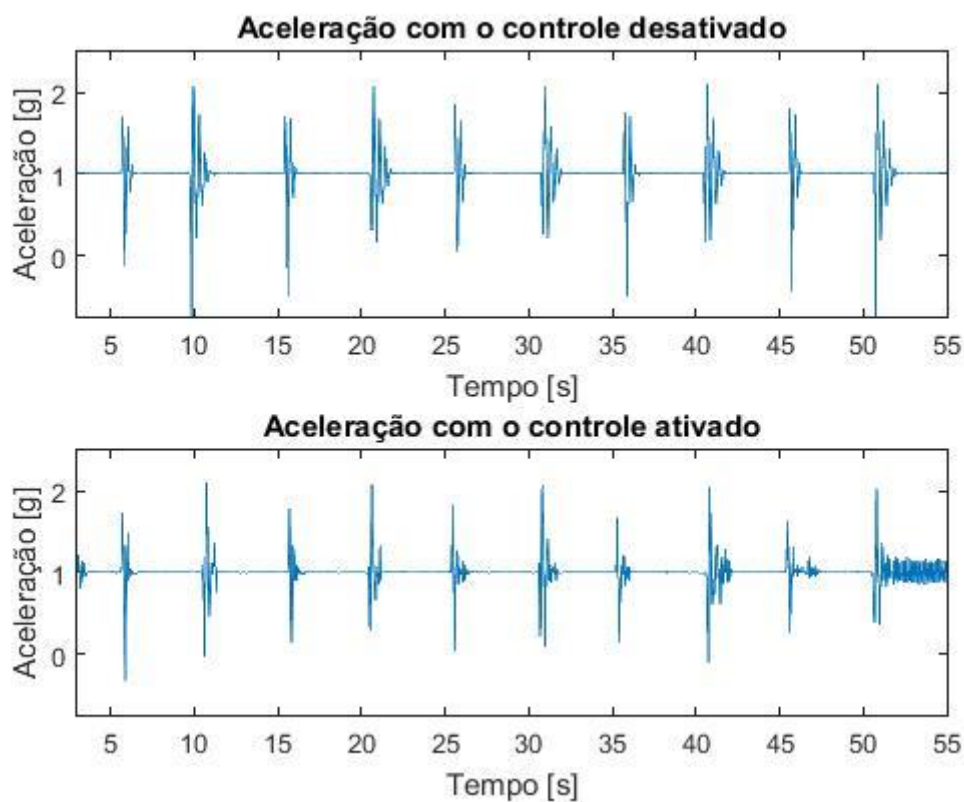


Figura 96 - Experimento 26 - Aceleração.

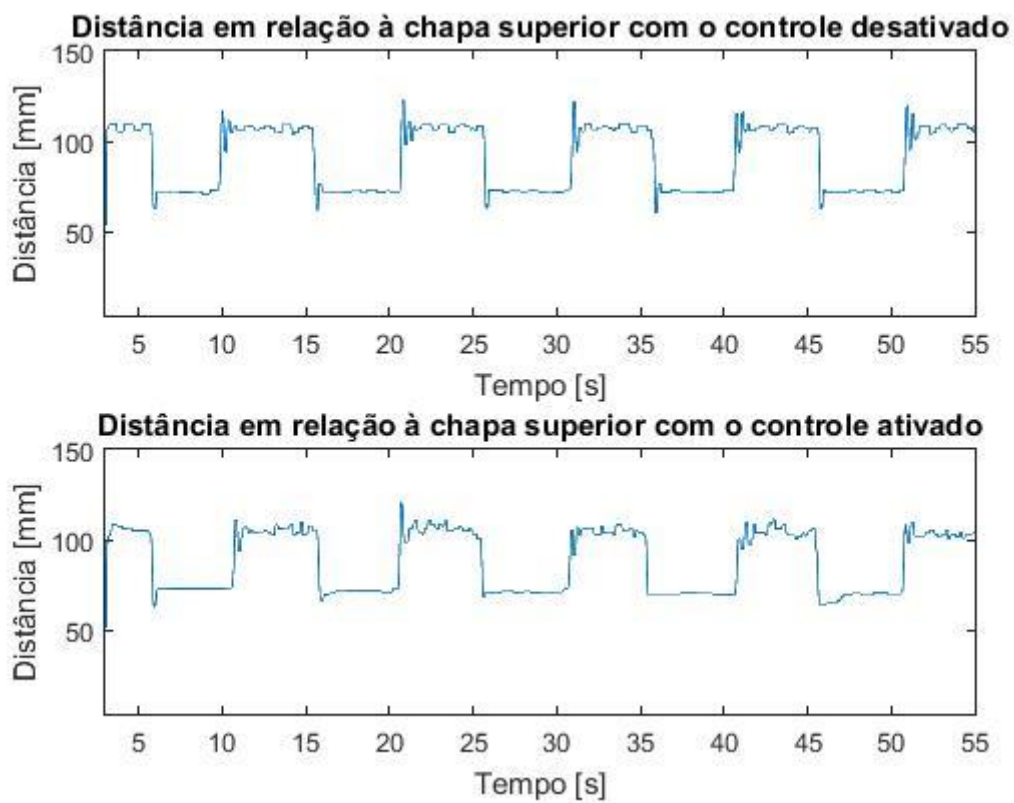


Figura 97 - Experimento 26 - Aceleração.

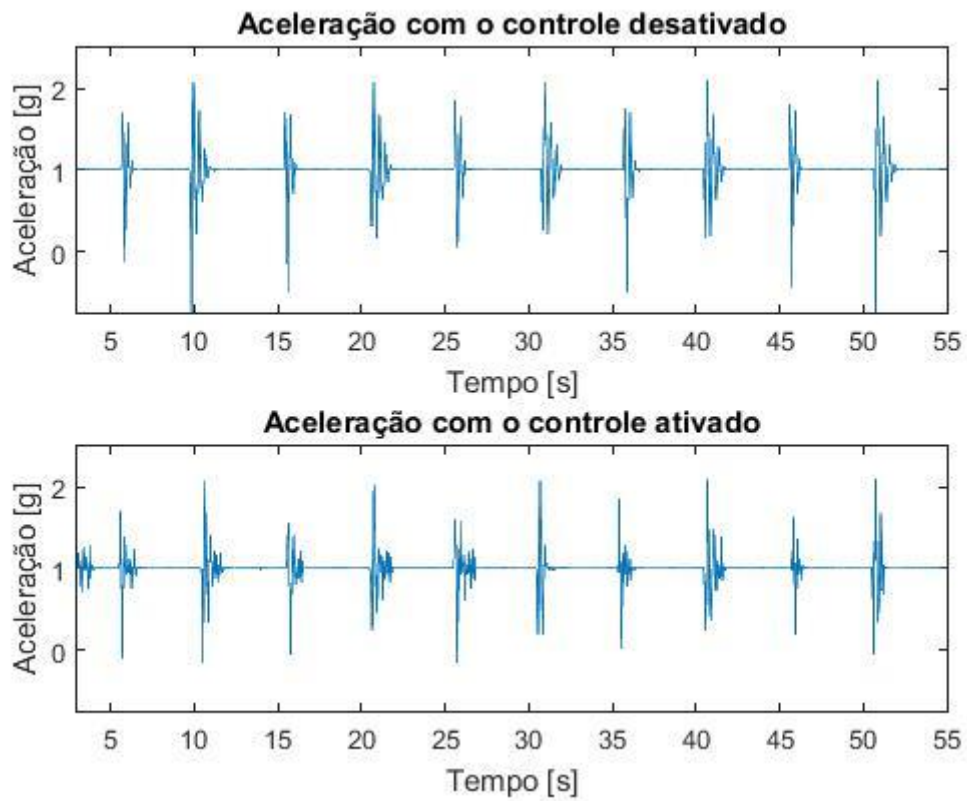


Figura 98 - Experimento 27 - Aceleração.

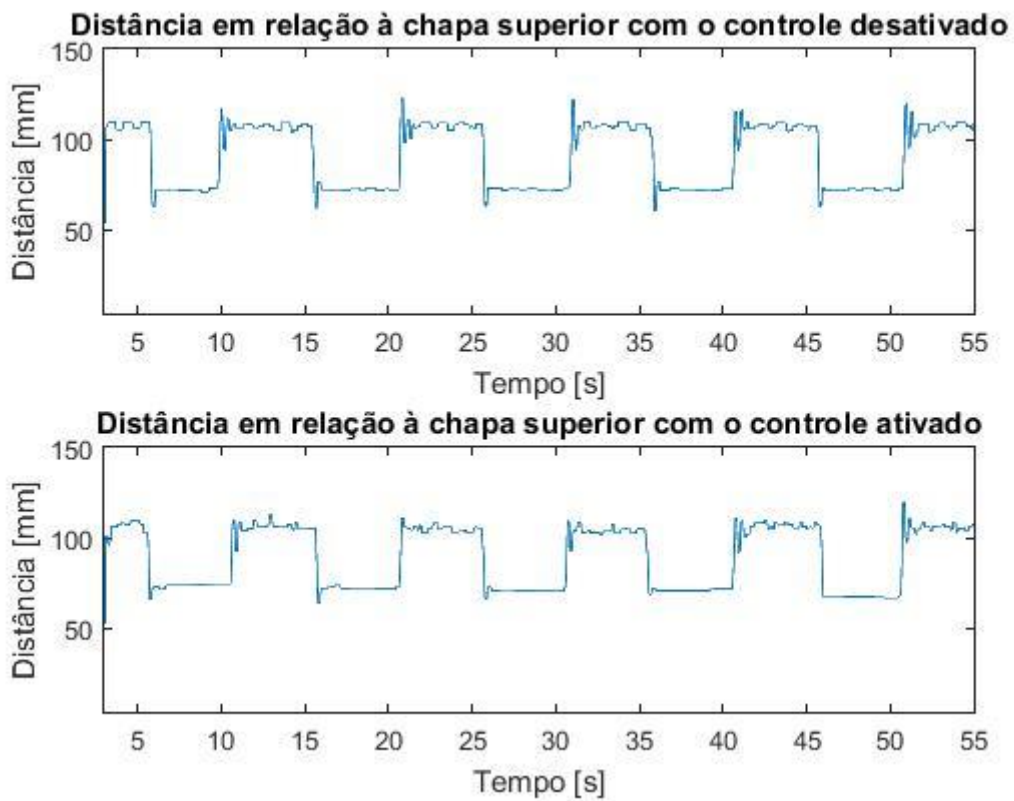


Figura 99 - Experimento 27 - Distância.