

*Artigo Científico*

## USANDO UM ACELERÔMETRO PARA CORRIGIR O TRAJETO DE VEÍCULOS AUTÔNOMOS INDUSTRIAIS

Using an Accelerometer to Correct the Path of Autonomous Industrial Vehicles

Matheus Nascimento Sampaio Batista<sup>1\*</sup>, Bruna souza Sant'Anna<sup>1</sup>, Leticia Ali Ferreira, Gabriel Rodrigo de Souza Gama<sup>2</sup>, Ana Carla de Souza Gomes dos Santos<sup>1,3</sup>, Genildo Nonato Santos<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio de Janeiro (IFRJ) *campus* Nilópolis, RJ, Brasil.

<sup>2</sup> Centro Brasileiro de Pesquisas Física (CBPF). Rio de Janeiro, RJ. Brasil

<sup>3</sup>Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca (CEFET) *campus* Maracanã. Rio de Janeiro, RJ. Brasil

Submetido em: 25-01-2021. Aceito em: 05-04-2021. Publicado em: 13-04-2021.

**\*Autor para correspondência:** [matheus01rj@gmail.com](mailto:matheus01rj@gmail.com)

**Resumo:** Problemas de assimetria e perturbações no ambiente onde um veículo autônomo industrial transita podem implicar em erros no trajeto do mesmo e assim causar acidentes envolvendo humanos que coexistam com ele nesse mesmo local. Para corrigir esse tipo de erro, costuma-se utilizar sistemas de geolocalização ou dispositivos tacógrafos de posicionamento que acabam encarecendo a solução final. O presente artigo tem por objetivo apresentar uma metodologia, baseada nos dados fornecidos por acelerômetros de baixo custo instalados em veículo autônomo, capaz de corrigir erros no trajeto de veículos autônomos e baratear o custo dos mesmos. A metodologia propõe estimar os erros associados ao deslocamento do protótipo de veículo autônomo e com essa estimativa, corrigir o trajeto que foi determinado. Dados de simulações apresentadas do método proposto apontam para uma redução de quase 10 vezes o erro relacionado ao sistema de navegação do veículo em malha aberta e reduzir os custos de produção.

**Palavras-chave:** Inteligência artificial; Indústria 4.0; Assimetria; Veículo robótico.

**Abstract:** Asymmetry problems and disturbances in the environment where an autonomous industrial vehicle is in transit can lead to errors in its path and thus cause accidents involving humans who coexist with it in that same location. To correct this type of error, it is customary to use geolocation systems or tachograph positioning devices that end up making the final solution more expensive. This article aims to present a methodology, based on data provided by low-cost accelerometers installed in an autonomous vehicle, capable of correcting errors in the path of autonomous vehicles and making them cheaper. The methodology proposes to estimate the errors associated with the displacement of the autonomous vehicle prototype and with this estimate, correct the route that was determined. Simulation data presented for the proposed method point to a reduction of almost 10 times the error related to the vehicle's navigation system in open mesh and reduce production costs.

**Keywords:** Artificial intelligence; Industry 4.0; Asymmetry; Robotic vehicle.

## INTRODUÇÃO

O uso de inteligência artificial permite que máquinas realizem tarefas consideradas intelectualmente sofisticadas. Máquinas que se locomovem autonomamente por ambientes industriais, gozando de certas capacidades intelectuais, podem ser aplicadas em diversas tarefas que até então só eram executadas por humanos. Recentemente, a rede varejista Walmart tem colocado robôs autônomos para organizarem as prateleiras de suas lojas nos Estados Unidos (Bose et al, 2017).

Pôde ser acompanhado pela TV, o veículo autônomo Chinês "Yutu 2" iniciar uma nova era das explorações espaciais que tem como objetivo a disputa pelos recursos de mineração lunar. O projeto indiano, que tinha os mesmos objetivos que os chineses, não obteve sucesso com a sonda "Vikram" que desapareceu poucos instantes antes do pouso na lua (Pinto, 2019; Zhe, 2019).

Nas indústrias 4.0, o maquinário inteligente se locomove autonomamente no chão de fábrica pode desempenhar diversas tarefas, como monitorar falhas humanas no processo produtivo, fiscalizar o desperdício de tempo dos humanos em bate-papos desnecessários com os outros colaboradores, analisar falhas em outras máquinas, entre outras coisas. Isso reduz custos e maximiza o lucro nas corporações (Lee et al, 2018). Metodologias estocásticas já consolidadas, conhecidas por *Machine Learning* (treinamento de máquinas), em especial as da *Deep Learning Networks*, é excelentes para o desenvolvimento de modelos computacionais e pode fornecer algoritmos de inteligência artificial para esse tipo de veículo. O aprendizado estocástico é a técnica que os humanos usam para criar os seus modelos mentais do ambiente (Zhong, 2017). *Deep Learnings* são metodologias extremamente baseadas no funcionamento das redes neurais biológicas que são responsáveis pelo aprendizado (Hennessy, 2002). Com a evolução do maquinário inteligente, essa metodologia vêm cada vez mais desbancando as maneiras tradicionais de se desenvolver modelos computacionais complexos devido ao seu desempenho superior em ajustar grandes quantidades de dados (Shaafiee, 2017), e que são suportadas por sistemas de computação atuais de alta capacidade (Oh et al., 2006; Cadambi et al., 2009; Buck, 2007; Frenkel, 2019).

Embora existam abordagens onde a inteligência artificial é única responsável pelo deslocamento do veículo, essa não é uma prática segura pois envolve pessoas cruzando o trajeto desses veículos.

Como a abordagem da inteligência artificial é estocástica (ou seja, envolve erros de decisão), é possível que acidentes sejam originados a partir desses erros de decisão. A abordagem determinística é a mais usual para evitar acidentes, onde sensores de diversos tipos controlam e /ou gerenciam o deslocamento do veículo. Entretanto, criar abordagens determinísticas para essa tarefa não é uma tarefa trivial.

De qualquer forma, para que haja um deslocamento correto desse tipo de máquina (veículo autônomo) é necessário que o sistema de navegação usado funcione de maneira adequada e dentro das especificações exigidas para evitar eventuais problemas e /ou acidentes seja qual for a abordagem usada.

## OBJETIVO GERAL

O erro na assimetria do veículo é crítico e impossibilita o correto deslocamento dentro de um determinado trajeto. Em locais de grande circulação de pessoas, como o chão de fábrica, erros dessa natureza poderiam causar acidentes. O objetivo desse trabalho é propor uma metodologia determinística, baseada nos dados fornecidos por um acelerômetro, que possibilita estimar a correção do trajeto de um veículo autônomo, compensando assim erros de perturbação.

## FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Nos tópicos abaixo são apresentados os conhecimentos necessários para a compreensão deste trabalho.

### Veículo autônomo

Um veículo autônomo pode ser entendido como todo veículo capaz de se orientar e se locomover de maneira autônoma dentro de ambientes complexos e por essa característica são aplicados em diversas funções. Na indústria existem exemplos destes veículos organizando estoques, conferindo prateleiras, fazendo a higienização de ambientes e entregando encomendas. Um texto interessante sobre aplicações neste campo pode ser encontrado em Somayya (Somayya *et al.*, 2019). Para isso pode ser utilizado uma inteligência artificial para processar as imagens ou informações recebidas de entradas do *hardware* e transformá-las em uma classe de saída pré definida como: acelerar, frear, desviar de obstáculos da melhor forma possível, ler placas e sinais de trânsito. Na literatura são apresentados diversos protótipos de veículos autônomos, desenvolvidos com as mais diferentes configurações de *software* e *hardware* e aplicados nos mais diversos fins como a exploração de um planeta desconhecido, apagar incêndios como um robô bombeiro ou até mesmo transporte de pessoas (Jung, 2005).

### Acelerômetro

O acelerômetro é um dispositivo que mede as forças de aceleração, não somente a gravidade, mas também as forças inerciais aplicadas a um corpo. O acelerômetro permite medir a aceleração de um objeto de modo que se consiga constatar a sua localização espacial e a sua velocidade (informação disponível no site da fabricante InvenSense).

Os acelerômetros são aplicados nas mais diversas funções, como por exemplo, em sismógrafos, drones, aeronaves, smartphones e para orientação de dispositivos em geral. Existem diversos tipos de acelerômetros, de diferentes características, que podem ser implementados em diversos tipos de projetos, como exemplo temos o módulo GY-521 baseado no chip MEMS (*Micro-electro-mechanical systems*) MPU-6050. Este módulo é composto por um acelerômetro e um giroscópio cujas características de operação são mostradas abaixo na Tabela 1. São 3 eixos para o acelerômetro e 3 eixos para o giroscópio, sendo ao todo 6 graus de liberdade (6DOF). O MPU-6050 tem um recurso chamado *Digital Motion Processor* (DMP), um acelerador de *hardware* que cuida da parte dos complexos cálculos do sensor, fazendo com que essa tarefa não precise ser executada no microcontrolador (Sobrinho *et al.*, 2016).

**Tabela 1.** Especificações de operação do acelerômetro e do giroscópio do módulo GY-521

Sensibilidade do Acelerômetro	$\pm 2g, \pm 4g, \pm 8g$ e $\pm 16g$
Sensibilidade do Giroscópio	$\pm 250^\circ/s, \pm 500^\circ/s, \pm 1000^\circ/s$ e $\pm 2000^\circ/s$

## MATERIAL E MÉTODOS

Considerando o sistema de navegação de um veículo autônomo como sendo um sistema dinâmico é natural que caso esse sistema esteja operando em malha aberta, ou seja, sem informações de medição do trajeto e correção, ocorram erros nesse sentido. A seguir, será apresentada a metodologia utilizada para o tratamento desses erros.

### Erro de deslocamento no trajeto

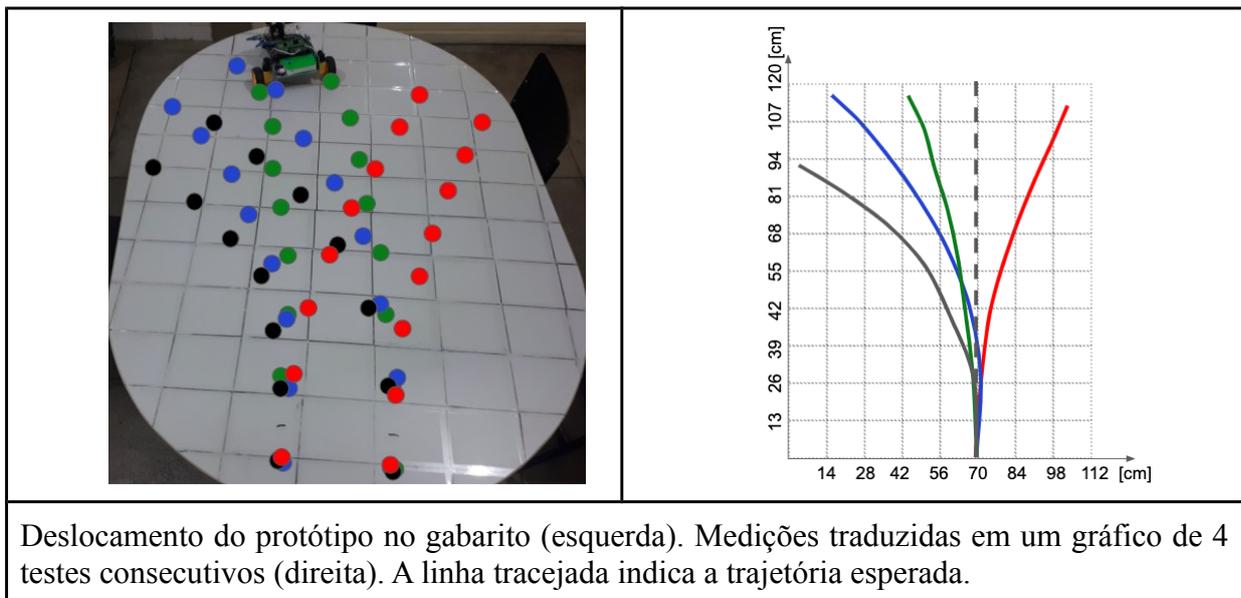
O problema de deslocamento foi detectado durante testes preliminares de movimentação, que mostraram que o veículo não conseguia, de maneira exata, se deslocar de uma posição inicial até uma posição (X, Y) determinada previamente para o trajeto. O teste consistiu em marcar gradações sobre uma mesa, alinhar o veículo baseado nessas marcações, programá-lo para seguir em uma linha reta (também baseada nessas marcações) e medir o deslocamento do veículo. Sempre havia um erro significativo acrescido ao deslocamento do veículo, (X+eX, Y+eY). Há uma estimativa baseada nas observações feitas de que o erro seja determinado pelo tipo de superfície ao qual as rodas do veículo estão apoiadas (a força de atrito distribuída de maneira irregular sobre a superfície), imperfeições e assimetrias nas partes mecânicas de suportes, engrenagens, rodas e folgas de parafusos. A Figura 1 exemplifica a marcação de uma mesa de testes e mostra resultados preliminares de vários deslocamentos do veículo e deixa evidente que existe um erro relacionado a esse deslocamento.

### Metodologia Proposta

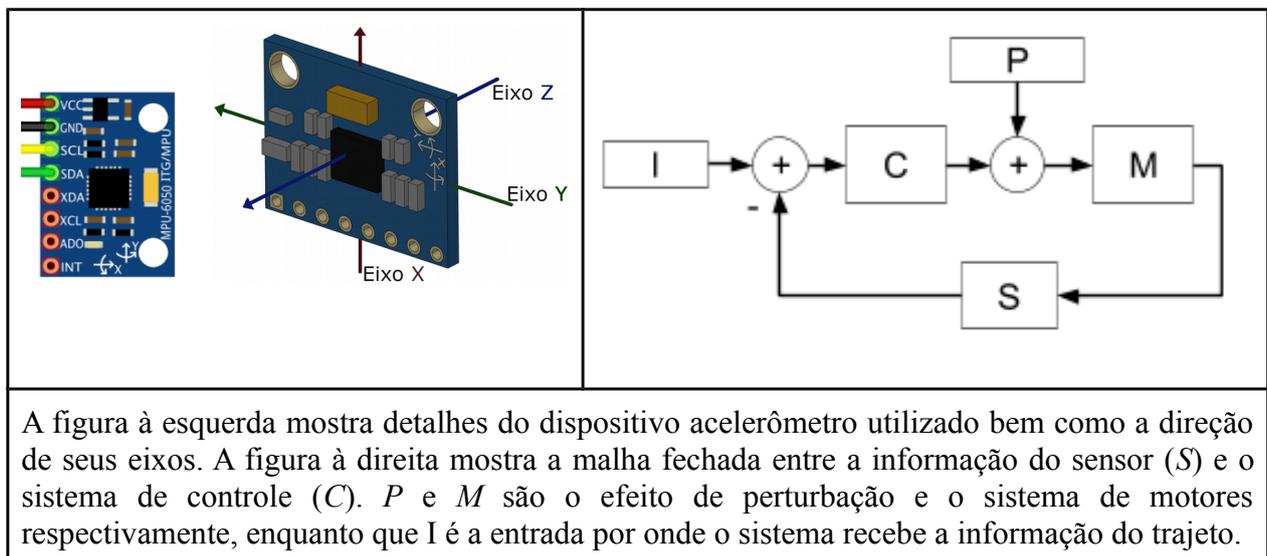
Para corrigir os erros de deslocamento no trajeto do veículo foi proposto que os dados de um acelerômetro (Figura 2, esquerda), adicionado ao conjunto, fossem usados para compensar desvios provocados por eventuais perturbações. Os dados provenientes desse acelerômetro seriam conectados em malha fechada com o sistema de controle dos motores, permitindo assim compensar possíveis desvios no trajeto (Figura 2, direita). Os dados produzidos pelo dispositivo acelerômetro, que serão apresentados nos Resultados, são diretamente afetados por perturbações produzidas por vibrações dos

motores que são usados para deslocar o veículo. Por esse motivo é necessário a utilização de um filtro de médias para atenuar os efeitos destas perturbações. Em malha fechada, o sistema de controle costuma ter um controlador conhecido como PID (Proporcional, Integral e Derivativo) que gera estímulos não-nulos para o atuador do processo (os motores) até que o erro entre a entrada do sistema de controle (I) a saída do processo (posição do veículo) seja nulo.

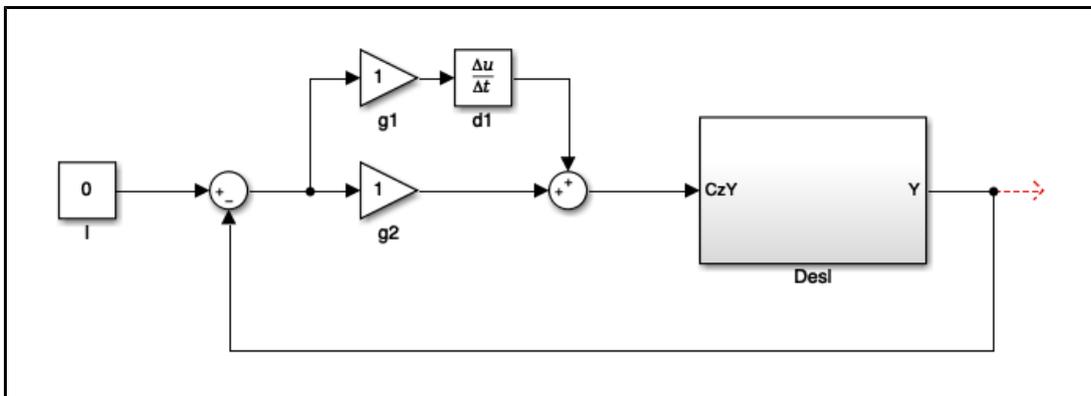
Fisicamente, o veículo possui um aparato eletrônico onde os motores e o dispositivo acelerômetro (sensor) são conectados. Esse aparato eletrônico é programável e tanto o bloco I quanto o bloco C (e suas operações) são implementados como algoritmos, programados no aparato eletrônico, que interagem com o sensor e com o sistema de motores por meio de interfaces de comunicação específicas para esse propósito.



**Figura 1.** Marcação de uma mesa de testes e resultados preliminares dos deslocamentos do veículo.



**Figura 2.** Esquematização do acelerômetro MPU6050.



**Figura 3.** Algoritmo utilizado para fazer o controle de correção de trajetória do veículo.

É importante notar que o efeito de perturbação é um fenômeno de natureza física (atrito, assimetria entre outros) e que age sobre o deslocamento do veículo. Então, só do veículo existir (ter massa) ele já sofre com o efeito de perturbação. O algoritmo consiste no uso da metodologia PID, onde um controlador do tipo PID é usado para controlar um sistema em malha fechada e que utiliza realimentação negativa (Ogata, 2009). A realimentação negativa permite sistemas de comportamento estável e que não divergem para valores de saturação com o passar do tempo. A Figura 3 descreve o algoritmo de controle utilizado. *I* é a entrada do sistema (onde os valores de posição serão inseridos) e que provoca o deslocamento do veículo em um determinado trajeto. O operador de soma implementa a conexão negativa da realimentação. Os blocos *g1*, *g2* e *d1* em conjunto com o segundo somador são a implementação do PID de ganhos proporcional igual a 1, integral igual a 0 e derivativo igual a 1. O bloco *Desl* é todo o conjunto acoplado ao algoritmo por meio de interfaces de comunicação (motores, perturbações e sensor de posição). Como o PID opera usando o erro entre a posição de entrada e a informada pelo sensor, e sendo a entrada uma posição, é necessário que o sensor também seja de posição. Contudo, com a falta de espaço físico dentro do protótipo, não foi feita a utilização de um sensor de posição e sim de um acelerômetro, por sua comercialização ser feitas no formato MEMS e disponibilizar uma fácil manipulação. O que é feito neste trabalho para corrigir essa incompatibilidade é a conversão da informação de aceleração em posição. A Equação 1 descreve o comportamento dinâmico da aceleração (*a(t)*), segundo a mecânica Newtoniana, em função da posição (Neto, 2004).

**Equação 1.** Comportamento dinâmico da aceleração

$$a(t) = \frac{d^2x(t)}{dt^2}$$

Dessa maneira a operação reversa é a integral dupla da aceleração, Equação 2.

**Equação 2.** Integral dupla da aceleração

$$x(t) = \int (\int a(t) \cdot dt) \cdot dt$$

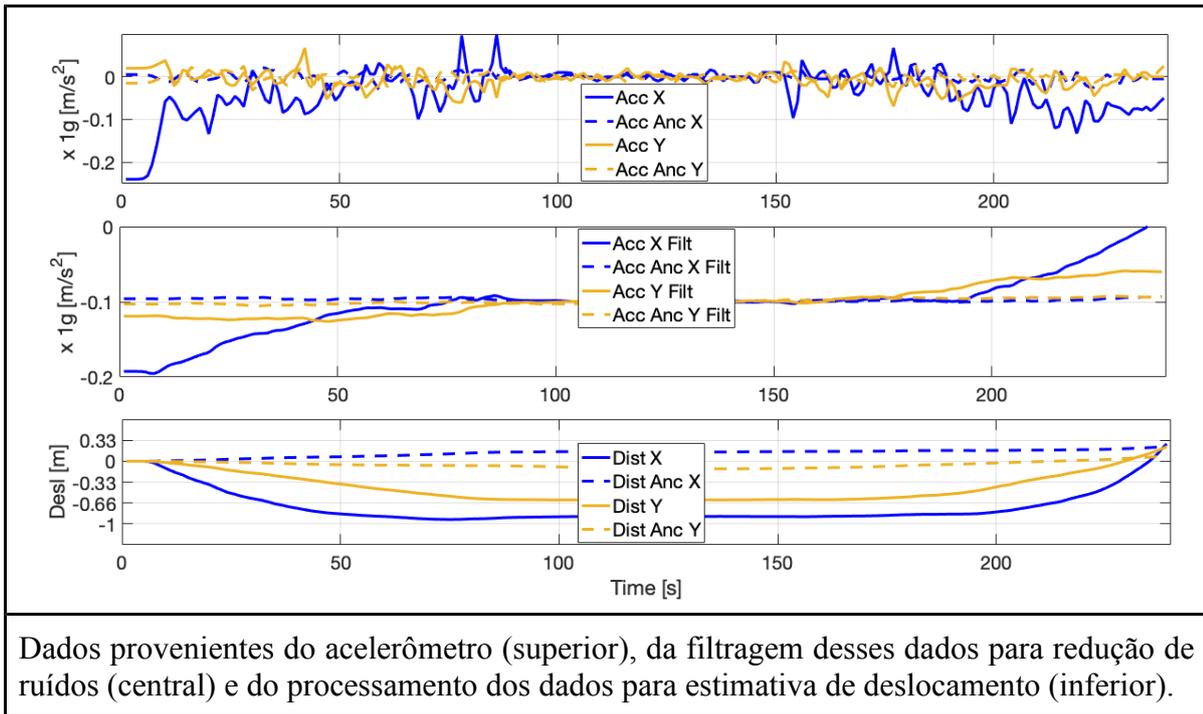
A metodologia proposta utiliza a Equação 2 para fazer a conversão da aceleração em posição. Contudo, ao ser feito a implementação de algoritmos programáveis, em vez de se fazer uso de equações contínuas são usadas as versões discretizadas dessas equações por meio do método de discretização de Euler (Neto, 2004). Antes da aplicação da Equação 2, como já foi dito, a informação de aceleração é tratada por meio de um filtro de médias de primeira ordem para que possíveis perturbações sejam atenuadas (Ogata, 2009). Vale ressaltar que o algoritmo apresentado corrige apenas um eixo de deslocamento, e que se for pretendido oferecer mais graus de liberdade para o veículo se deslocar, o algoritmo deve ser replicado na mesma quantidade de vezes que a quantidade de eixos utilizados.

## RESULTADOS

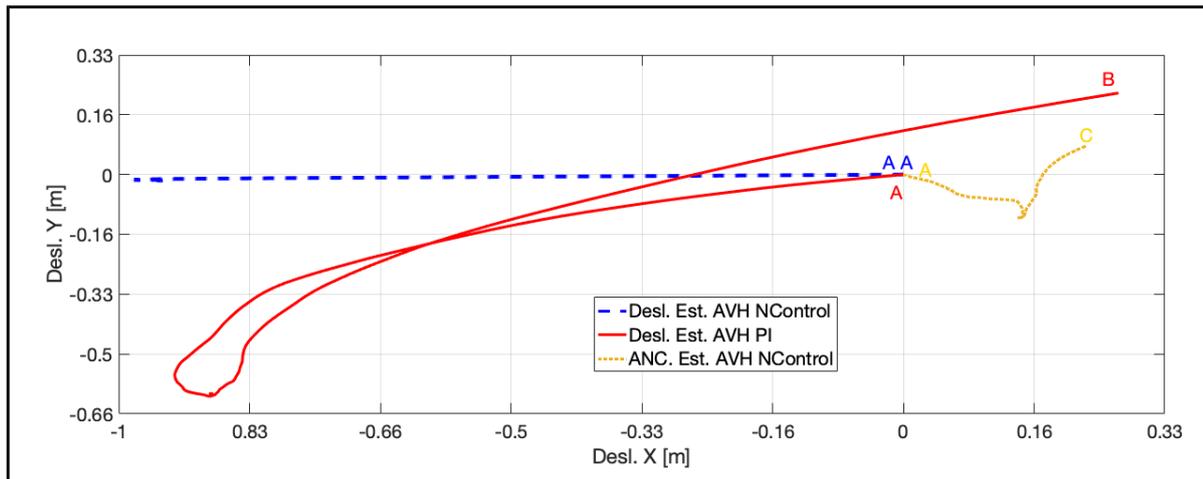
No teste, um módulo acelerômetro foi instalado no veículo e foram feitos alguns ensaios de deslocamento. Os resultados de um desses testes é mostrado na Figura 4. Na figura, o gráfico da parte superior é a aceleração medida pelo sensor instalado (curvas Acc X e Acc Y). Essas acelerações são produzidas pelo deslocamento do veículo seguindo uma trajetória em linha reta. Nos tempos de 0 até 100 s do gráfico os motores do veículo são ligados no sentido para frente, o que faz com que os registros de aceleração medidos pelo sensor aumentem. Entre os tempos 100 até 150s os motores do veículo são desligados, o que mantém ele parado e o registro medido pelo sensor em zero. Nos tempos de 150 até 250s os motores do veículo são religados, porém, dessa vez, no sentido para trás. As curvas Acc Anc X e Acc Anc Y foram produzidas considerando a mesma dinâmica que foi usada para produzir as curvas Acc X e Y. Entretanto, essas duas últimas o veículo estava ancorado (sem o contato das rodas com o piso) e assim não podia se mover mesmo com os motores ligados.

Os gráficos das partes central e inferior são a aceleração após ser processada por um filtro de média móvel, para minimizar o efeito de ruídos de perturbação presentes nessa curva, e a curva de deslocamento do veículo respectivamente. Ambas as curvas foram estimadas a partir da curva de aceleração. Em todos os gráficos, 1g representa uma vez o valor da aceleração da gravidade. Para demonstrar a funcionalidade da metodologia proposta será apresentada uma simulação que compara a abordagem em malha aberta (o trajeto do veículo não sofrerá correção) e a abordagem em malha fechada (usando os dados do acelerômetro para corrigir o trajeto). O teste foi realizado sob um plano (X, Y) e consistiu em deslocar o veículo da posição (0, 0) até a posição (-1, 0) e após isso fazer o caminho inverso, (Figura 5).

Na figura, A, B e C são os pontos de partida e de chegada de três diferentes curvas. A curva contínua representa o deslocamento ida e volta do veículo em malha aberta e a curva tracejada representa esse deslocamento feito em malha fechada. A curva pontilhada mostra a situação que o veículo foi posto de cabeça para baixo, sem a possibilidade de deslocamento, e reflete os erros de perturbação sentidos pelo sensor de aceleração ao serem acionados os motores elétricos. Comparando as duas abordagens é possível visualizar que um erro máximo de 0.6 m pode ser alcançado quando se abre mão de algum tipo de correção do trajeto. Para a abordagem proposta o erro máximo estimado foi de cerca de 0.02 m.



**Figura 4.** Dados do acelerômetro.



Dada a curva contínua, estimativa feita tomando como base as medições do acelerômetro enquanto o AVH estava se deslocando a partir do ponto A e retornando ao mesmo ponto. O AVH não tinha um algoritmo de correção da trajetória. A curva tracejada mostra o mesmo deslocamento mas dessa vez considerando o algoritmo de correção de trajetória. A curva pontilhada foi feita com o AVH ancorado, sem a possibilidade de deslocamento, e mostra um erro associado ao acelerômetro causado pela vibração produzida ao serem acionados os motores do AVH.

**Figura 5.** Simulação baseada nos dados do acelerômetro.

## CONCLUSÕES

Neste trabalho foi apresentado um estudo que mostra uma metodologia de correção do trajeto de veículos autônomos a partir dos dados adquiridos de um dispositivo acelerômetro. O método é baseado em um sistema de controle PID que consiste em reduzir o erro entre o trajeto planejado e o, de fato, realizado pelo veículo. A metodologia proposta diferencia-se de trabalhos anteriormente realizados por abordar o uso de dados reais de perturbações externas sofridas pelo sistema de tração do veículo e perturbações internas, geradas pelos motores elétricos que movem o veículo, que são sentidas pelo dispositivo sensor de aceleração instalado no mesmo. Um resultado comparativo entre o sistema em malha aberta (sem a correção dos dados do acelerômetro) e em malha fechada (usando a metodologia proposta de correção de trajeto) é mostrado na Figura 5. Os resultados apresentados da simulação comprovam que a correção proposta reduz consideravelmente o erro causado pelas perturbações externas no deslocamento do veículo. Contudo, testes complementares / sequenciais precisam ser feitos para determinar se a abordagem proposta funciona de maneira efetiva.

Em um trabalho futuro, além de utilizar os valores simulados na correção em tempo real do deslocamento do robô, será considerado o uso dos dados de um giroscópio em conjunto com os dados já utilizados de um acelerômetro para verificar a possibilidade de um provável aumento na exatidão do deslocamento do veículo dentro de um trajeto pré-determinado.

## REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, T. **Carduino - Um Carro Robô Controlado por Dispositivos Móveis Android**. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais. 2015.
- BACHUWAR, V. Monitoring the Soil Parameters using IoT and Android Based Application for Smart Agriculture. **AIP Conference Proceedings**. 1989, doi: 10.1063/1.5047679.
- BOSE, N. *et al.* **Wal-Mart's new robots scan shelves to restock items faster**. reuters, 2017. Disponível em: <<https://www.reuters.com/article/us-usa-walmart-robots/wal-marts-new-robots-scan-shelves-to-restock-items-faster-idUSKBN1CV1N4>>. Acesso em: 22 de maio de 2020.
- GARCIA-SAURA, C. **Self-calibration of a differential wheeled robot using only a gyroscope and a distance sensor**. Imperial college London. 2015, arXiv: 1509.02154.
- JUNG, CR *et al.* Computação embarcada: Projeto e implementação de veículos autônomos inteligentes. **Anais do CSBC**, 5, 1358-1406, 2005.
- LIMA, E. **Automação residencial de baixo custo com arduino Mega e ethernet shield**. Curso de Sistemas de Informação no Centro Universitário Estácio do Ceará.
- LIU, C. *et al.* Memory-Efficient Deep Learning on a SpiNNaker 2 Prototype. **Frontiers in neuroscience**. 12, 840. 16. 2018, doi: 10.3389/fnins.2018.00840.
- MAN, C. **A low cost autonomous unmanned ground vehicle**. Future University in Egypt. 2018, doi: 10.1016/j.fcij.2018.10.001.
- NETO, JB. **Mecânica Newtoniana, Lagrangiana e Hamiltoniana**. Editora Livraria da Física, 2004.
- PINTO, P. **Agência indiana perde contacto com sonda Vikram antes da alunagem**, 2019. Disponível em: <<https://pplware.sapo.pt/ciencia/sonda-vikram-falhou/>>. Acesso em: 22 de maio de 2020.

SHIMCHIK, I. *et al.* Golf cart prototype development and navigation simulation using ROS and Gazebo. **MATEC Web of Conferences**. 2016, doi: 10.1051/ mateconf/2016 7509005.

ZHE, G. **China's Yutu-2 rover sets new record for longest time working on the Moon**, 2019. Disponível em: <<https://news.cgtn.com/news/2019-12-14/China-s-Yutu-2-sets-new-record-for-longest-time-working-on-the-MoonMq1DBG4y2s/index.html>>. Acesso em: 22 de maio de 2020.

