

MODELAGEM E CONTROLE CONCEITUAL DE UM SISTEMA ANTI- QUEDA EM VEÍCULOS DE DUAS RODAS

MODELING AND CONCEPTUAL CONTROL OF A FALL ARREST SYSTEM IN TWO-WHEEL VEHICLES

Simoni Maria Gheno[I]
Ranielle Barbosa de Souza[II]
Luana Caroline Moschegni[III]
Marcello Cláudio de Gouvêa Duarte[IV]

Área: A1. Gestão de Operações e Processos de Manufatura (GOPM)
Subárea: S6: Elementos de Máquina e Simulação da Produção

RESUMO

Veículos de duas rodas são muito procurados pelas facilidades operacionais e custos diminutos envolvidos. As questões de segurança no trânsito inerentes a esse equipamento, constituem um problema a ser resolvido. Este trabalho propõe o projeto de um controlador automático antiqueda em veículos de duas rodas. Desenvolveu-se estudos de modelagem do ângulo de rolagem em um grau de liberdade e a proposta de controladores para permitir o auxílio dinâmico durante o movimento. Realizou-se o fechamento de malha por meio de sensores inerciais, com giroscópios. Apresenta-se também, a proposta de um atuador capaz de gerar a ação de controle obtida na modelagem. Os resultados foram testados em ambiente simulado e construiu-se um modelo em réplica miniatura a fim de validar o controle proposto.

Palavras-chave: Modelagem. Dinâmica. Controle. PID.

ABSTRACT

Two-wheeled vehicles are highly sought after due to the operating facilities and low costs involved. The traffic safety issues inherent to this equipment constitute a problem to be solved. This work proposes the design of an automatic fall arrest controller for two-wheeled vehicles. Studies were developed to model the roll angle in one degree of freedom and the proposal of controllers to allow dynamic assistance during the movement. The mesh was closed using inertial sensors, with gyroscopes. It is also presented the proposal of an actuator capable of generating the control action obtained in the modeling. Results were tested in a simulated environment and a miniature replica model was built in order to validate the proposed control.

[I] Prof. Pós-Dra. da Faculdade de Tecnologia (FATEC) de Sertãozinho – São Paulo – Brasil. E-mail: simoni.gheno@cps.sp.gov.br
[II] Estudante do curso de Engenharia Mecânica da UNIP Ribeirão Preto – Ribeirão Preto – Brasil. E-mail: raniellebarbosas@gmail.com
[III] Estudante do curso de Engenharia Mecânica da UNIP Ribeirão Preto – Ribeirão Preto – Brasil. E-mail: luanamoschegni@hotmail.com
[IV] Prof. Dr. da UNIP Ribeirão Preto – Ribeirão Preto – Brasil. E-mail: marcello.duarte@docente.unip.br



Keywords: Modeling. Dynamics. Control. PID.

Data de submissão do artigo: 27/07/2022.
Data de aprovação do artigo: 28/09/2022.
DOI: 10.33635/sitefa.v5i1.216

1 INTRODUÇÃO

Estudos apontam que a procura por motocicletas tem aumentado. Diferentes são os motivos, podendo-se citar o consumo menor de combustível, agilidade no trânsito e investimento inicial. O crescimento na circulação de motos produziu um aumento na taxa de acidentes, os quais em 2013 estavam na faixa de 369 mortos apenas no estado do Rio de Janeiro. Diversas tentativas de evitar a morte do condutor por queda foram realizadas. A mais acessível é a utilização de coletes e capacetes especializados para minimizar os efeitos da queda. Outras implementações buscam inserir sistemas no veículo para compensar desbalanceamentos que levem à queda. Algumas empresas estão desenvolvendo sistemas com duas rodas na dianteira que, ao se inclinarem para contornar curvas, impedem a queda do veículo. Outros sistemas são os do controle automático de orientação da motocicleta. Seu funcionamento se dá através de um sistema robótico, capaz de movimentar a roda dianteira para evitar que a motocicleta caia até mesmo em velocidades mais baixas. Os sistemas existentes levam em consideração o esterçamento do guidão em relação ao chassi para evitar quedas, mas desconsideram uma resposta robusta durante curvas em velocidades mais altas. Uma mudança abrupta do guidão pode levar o sistema a condições de instabilidade, provocando a queda ao invés de evitá-la. (GOGOI *et al*., 2017).

Este trabalho propõe a utilização de um sistema automático de controle de orientação de motocicletas em curvas de alta velocidade, ao implementar um sistema de controle com realimentação por giroscópio (ORSINO, 2011). Apresenta-se um mecanismo atuador de compensação dinâmica no momento angular, desenvolvido para o projeto conceitual de acoplamento em uma motocicleta comercial. Por fim, um protótipo em escala reduzida será construído para validação dos dados.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Os conceitos de modelagem estão atrelados a quatro principais ramificações: (i) as hipóteses, geralmente usadas para simplificar soluções matemáticas ou para que a modelagem alcance um resultado padrão; (ii) a aplicação de leis básicas do conhecimento científico, responsável por gerar as equações do modelo; (iii) a relação entre as variáveis, todas as expressões que estabelecem funções entre as envolvidas; (iv) e a validação do modelo, processo em que a modelagem é verificada por comparação com o comportamento do sistema real modelado, usando processo experimental. Uma modelagem realmente só termina após a verificação experimental (FELÍCIO, 2010).

Nos conjuntos instáveis em malha aberta o sistema de pêndulo invertido tem sido empregado para exemplificar as relações explicação do equilíbrio e estabilidade a partir do conceito de imobilização, no qual um corpo rígido está em equilíbrio quando o somatório de forças e seu momento resultante é equivalente a zero. Caso o corpo sofra uma pequena



perturbação e volte à sua condição normal, ele se encontra em estado de equilíbrio neutro, no caso do aumento da irregularidade, o corpo se encontra em estado de equilíbrio instável ou com estabilidade negativa. (RAMBELY; HALIM; AHIMAD, 2012).

No passado, a modelagem mecânica foi mais bem aplicada em robôs e naves espaciais. Com o desenvolvimento de novas teorias para o pêndulo invertido a modelagem mecânica tornou-se uma área de pesquisa fértil e favorável. Pode-se destacar o Cubli, inicialmente desenvolvido pelo cientista Mohanarajah Gajamohan, no Institute for Dynamic Systems and Control (ETH Zurich); por conta do seu controle não linear nos cantos a resultante é o balanceamento, comportando-se como um pêndulo invertido 3D (Artigo A Review on Cubli and Non Linear Control Strategy). O Cubli, é um cubo de 15x15x15 cm que pode saltar e se equilibrar em um de seus cantos. Rodas de momento montadas em três faces do cubo giram em altas velocidades angulares e então freiam repentinamente, fazendo com que o Cubli salte para cima. Quando o Cubli estiver na posição vertical do canto, torques controlados do motor são aplicados para equilibrá-lo (GAJAMOHAN, 2012).

2.1 Método de Kane

A metodologia de Kane está baseada nos conceitos de velocidades e velocidades angulares parciais. Basicamente tais conceitos estão relacionados com os movimentos efetivamente possíveis que o sistema realiza obedecendo a todos os seus vínculos e basicamente trabalha com o equilíbrio entre forças de inércia e forças ativas projetadas sobre tais velocidades (KANE, 1985).

Um ponto com coordenadas conhecidas em um sistema de coordenadas, é representado pela matriz coluna (matriz 4×1), sendo um referencial obtido por meio de translação de origens retratada pela matriz coluna (3x1) e de rotações descritas pela matriz (3x3). Essas coordenadas do ponto em (matriz 4x1) são obtidas por uma transformação (4x4) aplicada sobre as coordenadas (dadas por 4x1), (ORSINO, 2011).

Kane (1985) propõe que um sistema holonômico com coordenadas redundantes (com número maior que o de graus de liberdade do sistema) pode ser tratado como se fosse um sistema não-holonômico simples, não havendo perda de generalidade alguma em se fazer tal identificação. Tendo as velocidades e velocidades angulares parciais não-holonômicas, pode-se definir as forças ativas generalizadas não-holonômicas e as forças de inércia generalizadas não-holonômicas.

A força ativa generalizada não-holonômica de um sistema é definida como sendo a somatória dos produtos escalares entre forças resultantes sobre cada partícula que compõe o sistema e as respectivas i-ésimas velocidades parciais não-holonômicas (FEATHERSTONE, 1987).

Pela natureza das forças de vínculo e das velocidades parciais não-holonômicas demonstra-se que essas forças não têm efeito algum no cálculo das forças ativas generalizadas, de tal forma que não há necessidade de conhecê-las para equacionar a dinâmica do sistema. Em particular esta é uma vantagem também observada na aplicação do formalismo de Lagrange, sendo ambas as metodologias vantajosas nesse particular quesito com relação a métodos anteriores tais como Newton-Euler, por exemplo (KANE, 1985).

2.2 O Controle

O pêndulo invertido é um modelo de controle de processos com inúmeras aplicações e seu principal objetivo é manter o equilíbrio da estrutura de um pêndulo sobre duas rodas dispostas no mesmo eixo, sendo este um sistema instável, dado que ele tende a afastar-se da posição de equilíbrio. O sistema deve analisar qual lado o distúrbio está ocorrendo, assim calcular aceleração da movimentação do giro e acionar a correção desse desequilíbrio. Na posição vertical o pêndulo invertido é instável devido ao centro de gravidade está situado acima do ponto de articulação, com isso, a haste tende a girar para uma direção, a não ser que uma força for aplicada na base móvel que sustenta a haste. (OGATA, 2010)

2.3 Dinâmica da Motocicleta

A potência é equacionada como a taxa de variação da energia. No contesto deste trabalho pode ser medida por meio do comportamento de alguns sistemas da motocicleta por exemplo, funcionamento do pistão e do motor. Desta forma equaciona-se a potência como o resultado da multiplicação entre o trabalho realizado e o torque dos sistemas envolvidos. Com o aumento de uma determinada rotação temos um movimento oscilatório nas curvas de torque e então a potência é máxima; o que relaciona-se com o desempenho do motor, sua eficiência volumétrica, isto é, a quantidade de ar injetado.

À altas temperaturas a combustão é mais completa pelo aumento da pressão no cilindro. Consequentemente, o pistão dispende mais energia o que otimiza o consumo de combustível (STACK EXCHANGE, 2018).

Quanto a forças de resistências. Quanto menor for a inclinação, maior será o contato do pneu com o solo e resultará em uma melhor aderência. De forma geral, o movimento de inclinação é composto por uma força gravitacional e uma força centrifuga, as quais devem ser equivalentes até o ponto de equilíbrio para que a curva seja realizada com segurança.

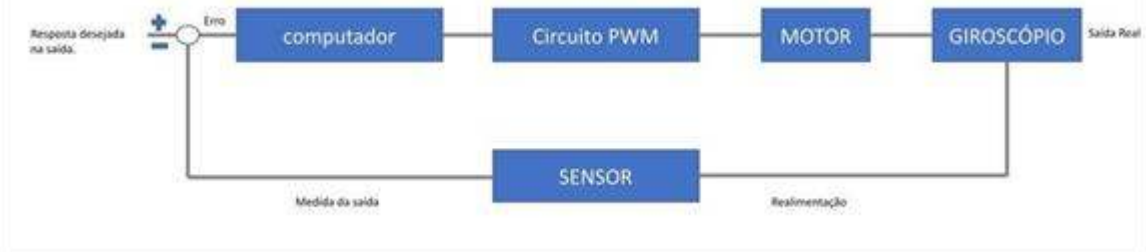
3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Os aspectos metodológicos deste trabalho referem-se a um sistema de controle automático de orientação de motocicletas em curvas de alta velocidade, com realimentação por giroscópio.

3.1 Materiais e Métodos

Na Figura 1 apresenta-se o diagrama físico do sistema modelado.

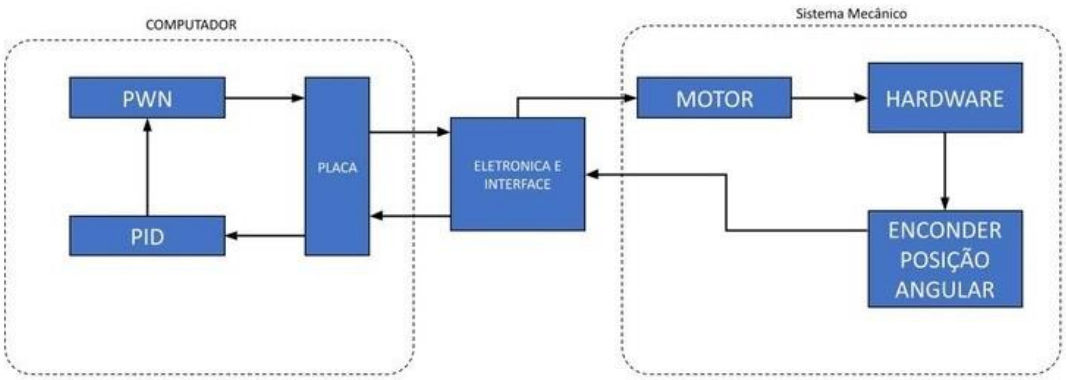
Figura 1 – Diagrama de blocos físico do sistema



Fonte: os autores (2022)

Na Figura 2, apresenta-se a necessária junção dos sistemas mecânico e computacional para a configuração final do sistema de controle em malha fechada.

Figura 2 – Diagrama de blocos do sistema em malha fechada



Fonte: os autores (2022)

Estudou-se métodos heurísticos (Ziegler-Nichols, Cohen-Coon e IMC) para o ajuste dos controladores baseados em ensaios práticos para a obtenção de leituras da planta processo a ser controlado e a partir dessas informações construiu-se o projeto do controlador. O desempenho do controlador utilizando esses métodos tem como vantagem a simplicidade e facilidade de implementação.

Em relação à planta faz-se as seguintes considerações. Ao redor do eixo de direção existe o equilíbrio dos momentos que permite uma avaliação do torque que o condutor deve aplicar ao guidão em uma curva. Este parâmetro serve de base em curvas constantes, isto é, velocidade e raio de rotações constantes. Em uma curva com velocidades e raio de curvatura variáveis, o torque que o piloto deve desempenhar é diferente do calculado. O torque aplicado pelo piloto tende a ser igual, mas com sinais opostos à resultante gerada por todos os movimentos da força atuante na seção frontal.

Essa resultante é composta por seis termos. Influência desalinhada (sinal +) devido à força do peso da seção frontal; Influência de alinhamento (sinal -) devido à força centrífuga da seção frontal; Influência desalinhada a (sinal +) devido à carga normal na roda dianteira; Influência de alinhamento (sinal -) devido à força lateral na roda dianteira; Influência de alinhamento (sinal -) devido ao efeito giroscópio do soro dianteiro; Influência de desalinhamento (sinal +) devido ao torque de torção do pneu dianteiro.

É útil lembrar que o torque exercido pelo piloto é positivo e tende a aumentar o ângulo de direção na curvatura. Durante a fase inicial da pesquisa, avaliou-se diferentes atuadores visando um estudo de viabilidade. Pode-se citar volantes de alta inércia e pêndulos controlados como maneiras de alterar a inércia resultante do sistema, portanto, alterar o equilíbrio do momento angular.

3.2. Modelagem



Utilizou-se softwares de modelagem de corpos rígidos para simulação e escolha inicial dos valores de ganho do sistema. A escolha dos softwares foi realizada por meio de um teste comparativo entre o software MuJoCo, um simulador completo com computação algébrica intensa, controle ideal aplicando a sistemas dinâmicos complexos; e o Gazebo, um software de robótica 3D com código aberto, para simulação de sensores e atuadores para avaliação da facilidade de construção, acionamento e validação do modelo de controle. Ambos os softwares permitem a implementação de controladores PID e outros controladores mais avançados.

A modelagem foi realizada com um único grau de liberdade ao longo do ângulo de rolagem. Uma análise comparativa entre modelos reais em escala foi realizada para adaptar os parâmetros de massa, inércia e atrito de juntas.

Na etapa inicial de modelagem da planta referente ao ângulo de rolagem, explorou-se o uso de controladores PID (Proporcional mais Integral mais Derivativo) e suas variações PD e PI. Tais controladores possuem estabilidade necessária para a seleção apropriada dos ganhos do sistema. Utilizou-se para tanto métodos como o do Lugar das Raízes. As técnicas implementadas basearam-se no trabalho de GAJAMOHAN et al. (2012).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A seguir apresentam-se alguns dos resultados alcançados levando-se em conta a escolha de um modelo clássico massa-mola-amortecedor.

4.1 Controladores

No sistema de malha fechada utiliza-se geralmente o bloco compensador para aferir-se a resposta e controle de determinada variável. Numa modelagem por controle PID, tem-se:

(P): ação proporcional, fornecerá uma resposta mais rápida do sistema em função da variação no sinal de entrada;

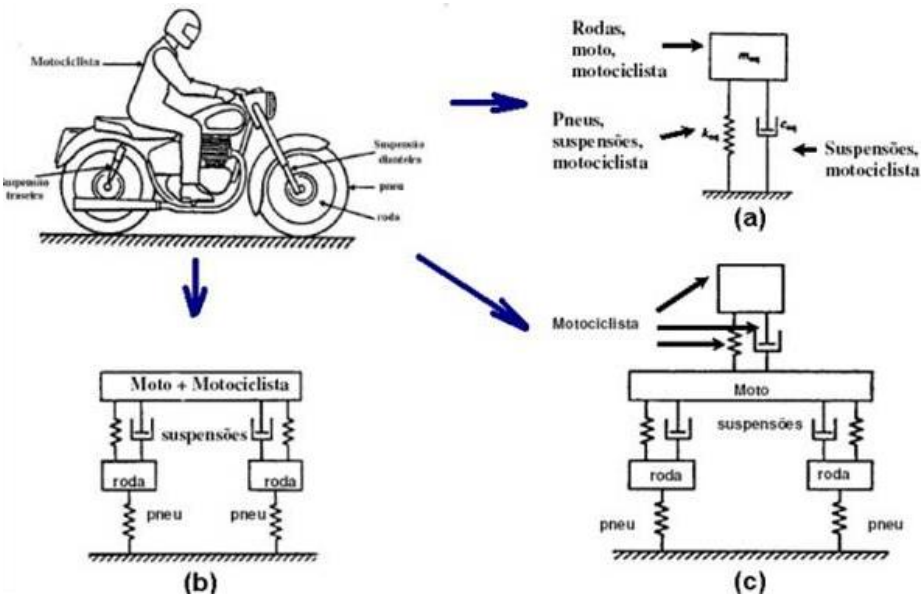
(I): ação integrada, tem como objetivo eliminar o erro do estado estacionário, assim, quando no estado estável seja o esperado no sinal de entrada;

(D): ação derivativa, tem o efeito de antecipar a correção do valor de saída, melhorando a velocidade de resposta do sistema e diminuindo a quantidade acima do previsto do sinal de saída.

O modelo de estudo baseia-se num sistema massa-mola-amortecedor, como apresentado na Figura 3.

V SITEFA
Simpósio de Tecnologia da Fatec Sertãozinho

Figura 3 – Sistema massa-mola-amortecedor aplicado a uma motocicleta



Fonte: SOEIRO (2008)

Considera-se os componentes elementares do sistema vibratório, categorizados em sistemas discretos ou com parâmetros concentrados, com cada uma das suas partes possuindo número de graus de liberdade finito.

Na Figura 3, apresentam-se as três modelagens diferentes do sistema: (a) um modelo com apenas 1GDL (graus de liberdade), que seria o somatório do deslocamento da massa total do conjunto na vertical; (b) 4 GDL, resultantes das massas e sua rotação em torno do eixo na horizontal ao plano, com referência ao centro de massa; (c) acrescenta mais um 1 GDL, o deslocamento vertical do corpo do condutor. No total tem-se 5GLD, um modelo mais realista (SOEIRO, 08/2008).

Desta forma a saída da planta u(t) pode ser dada equação (1),

$$u(t) = m\ddot{y} + b\dot{y} + ky \qquad (1)$$

A saída do sistema u(t) é igual o produto da massa pela aceleração ($m\ddot{y}$) somado com o produto do coeficiente de amortecimento pela velocidade ($b\dot{y}$) somado com o produto da rigidez pelo deslocamento (ky).

A função de transferência do controlador, uma relação entre as transformadas de Laplace da entrada do controlador E(S), o sinal de erro atuante e a saída do controlador U(S), o sinal de controle propriamente dito, como o apresentado na equação 2.

Essa relação se dá através do sinal de saída U(s) e entrada E(s) que significa o sinal de erro entre a referência e o sinal de saída. A ação do controle proporcional é dada:

$$\frac{U(S)}{E(S)} = K_p + \frac{K_p}{T_i s} + K_p T_d s \qquad (2)$$

Na equação 2, tem-se, K_p como a constante proporcional; T_i como o tempo integral e T_d como o tempo derivativo.

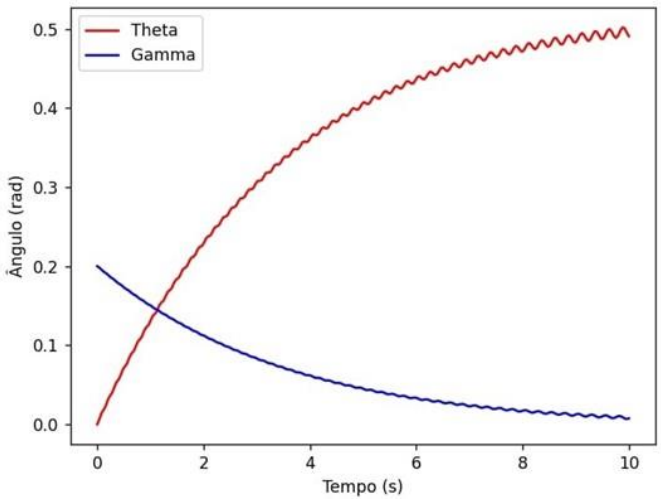
O ajuste dos parâmetros K_p, T_i e T_d tem a função da redução dos erros no sistema. Este erro de desempenho deve-se ao fato de ajustes feitos por um sistema de controle leva um instante de tempo para sua conclusão, então, no decorrer deste intervalo, os erros são acumulados (SEBORG; EDGAR; MELLICHAMP, 2016).

4.2 Simulação

Após o aprendizado de alguns métodos, como Kane e Lagrange, foi necessário o estudo do controlador PID, tipo de controle com variações que aceitam até três respostas e que agem sobre o erro presente em um sistema. Controlar um sistema instável, como um veículo de duas rodas, exige uma programação bem estruturada. A programação do controlador foi escrita em Python e executada por meio do *Google Colab.* Para o comportamento do sistema plotou-se algumas amostragens do erro e da posição angular da resposta do sistema trabalhando com o auxílio de um giroscópio.

A Figura 4 apresenta a relação angular no tempo para dois graus de liberdade do sistema. O ângulo Theta representa a atuação livre do giroscópio e, portanto, a relação angular sempre aumenta no tempo. O ângulo Gamma representa a relação angular do sistema (a moto) no tombamento; considerou-se um pequeno ângulo inicial representando a moto com alguma inclinação simulando uma curva e então a relação angular sempre diminui até o tombamento, isto é, ângulo Gamma nulo.

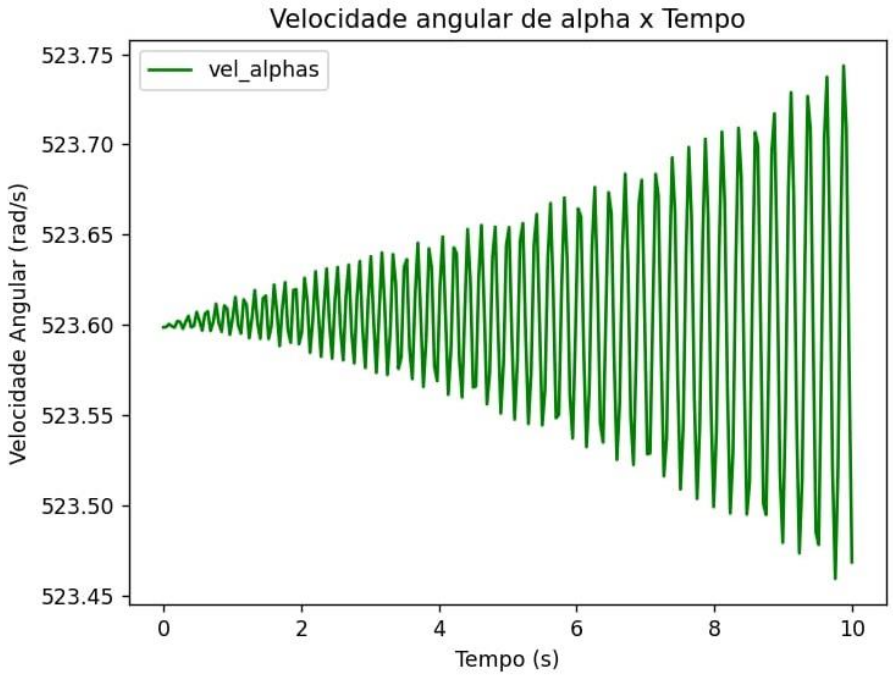
Figura 4 – Relação angular do sistema em função do tempo.



Fonte: os autores (2022)

A Figura 5 apresenta o terceiro grau de liberdade do sistema, a relação entre a velocidade angular do giroscópio em função do tempo. Este gráfico demonstra a variação da velocidade angular no tempo referente à tentativa de correção angular do giroscópio visando impedir o tombamento da moto.

Figura 5 – Relação da velocidade angular do giroscópio em função do tempo



Fonte: os autores (2022)

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho procurou investigar os aspectos das forças envolvidas no movimento do sistema, isto é, focou na dinâmica do sistema. Investigou-se o comportamento das forças envolvidas, estabilidade direcional, manobrabilidade, velocidades e ângulos, utilizando como referência, o clássico livro de COSSALTER (2006), Dinâmica da Motocicleta.

As análises das simulações foram consideradas satisfatórias, por refletirem o comportamento esperado do sistema. O giroscópio mostrou-se bem adequado – ao menos nas simulações matemáticas – para servir como referência de correção angular no sentido de aumentar a segurança dos veículos de duas rodas.

Pode-se apontar como uma das causas e gravidade de acidentes com motocicletas sua velocidade. Inicialmente a questão é definir como realizar a frenagem, qual velocidade máxima permitida para realizar a curva. A modelagem permitiu o estudo destes aspectos. Do ponto de vista da física considerou-se as forças resistivas, inerciais e do conjunto (motocicleta e condutor). O acoplamento de um controlador no sistema, como o PID, permite combina respostas e com atuação no erro do sistema, que é a diferença entre o valor de referência e sua variável de saída instantânea.

Para manter o equilíbrio e mensurar a orientação do movimento do veículo de duas rodas, a ideia é integrar o controlador com um dispositivo giroscópio, devido à capacidade do giroscópio de se desprender espontaneamente em qualquer direção.

O cerne deste trabalho foi a aplicação do controle automático de equilíbrio de uma motocicleta com auxílio de um giroscópio. Definiu-se um controlador do tipo PD (proporcional mais derivativo) pela sua simplicidade e aderência à problemas de velocidade.



O estudo da dinâmica do conjunto foi fundamental para a estabilidade e controle do sistema. O trabalho teve objetivo principal alcançado.

REFERÊNCIAS

COSSALTER, Vittore. **Motorcycle Dynamics.** 2. ed. Lulu: Raleigh, 2006.

FEATHERSTONE, Roy. **Robot Dynamics Algorithms**. The Springer International Series in Engineering and Computer Science (SECS, volume 22), New York: Springer, 1987.

FELÍCIO, Luís Carlos. **Modelagem da Dinâmica de Sistemas e Estudos da Resposta**. 2ª. ed. São Paulo: RiMa, 2010.

GAJAMOHAN, M. **The Cubli: A Cube that can Jump Up and Balance**. In: ARTIGO, 2012/07, Vilamoura, Algarve, Portugal. IEEE/RSJ INTERNATIONAL CONFERENCE ON INTELLIGENT ROBOTS AND SYSTEMS. VILAMOURA, Algarve, Portugal, 2012/07. p. 3722 – 3727.

GOGOI, P.; NATH, M.; DOLEY, B.T.; BORUAH, A., BARMAN, H.J. Design and Fabrication of Self Balancing Two Wheeler Vehicle Using Gyroscope. **International Journal of Engineering and Technology (IJET)**, v.9, n.3, julho 2017.

KANE, T. R.; LEVINSON, D. A. **Dynamics: Theory and Applications**. McGraw-Hill Series in Mechanical Engineering. McGraw-Hill Publishing Company. USA: New York, 1985.

OGATA, Katsuhico. **Engenharia de Controle Moderno**. 5ª ed. São Paulo: Pearson, 2010.

ORSINO, R. M. M. **Metodologia Para Elaboração De Um Modelo Dinâmico De Um Mecanismo Paralelo Com Três Graus De Liberdade**. 2011. Trabalho de Graduação-Departamento de Engenharia Mecânica, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.

RAMBELY, A. S.; HALIM, N. A.; AHIMAD, R. R. A Numerical comparison of Lagrange and Kane's Methods of an arm segment, International Conference. **International Conference Mathematical and Computational Biology**, **International Journal of Modern Physics: Conference**, EUA, v. 9, p. 68 – 78, 2012.

SEBORG, Dale E.; EDGAR, Thomas.; MELLICHAMP, Duncan A. **Process Dynamics and Control**. Paperback, 4ª ed. New York: Wiley, 2016.

SOEIRO, N. **Curso de Fundamentos de Vibrações e Balanceamento de Rotores**. 2008. Disponível em: https://engematico:webnode:com/_files/200000017-7fc6780c07/Fundamentos%20de%20%20Vibracao:pdf . Acesso em: 20 fev. 2022.

STACK EXCHANGE. **Relationship between torque, power, specific fuel consumption, and AFR**. 2018. Disponível em: https://mechanics.stackexchange.com/questions/58229/relationship-between-torque-power-specific-fuel-consumption-and-afr . Acesso em: 07 dez. 2021.