

## **SISTEMA DE SUSPENSÃO HÍBRIDA ATIVA PARA VEÍCULOS AGRÍCOLAS**

**HUGO R. FERNANDES<sup>1</sup>, ANGEL P. GARCIA<sup>2</sup>, FABRÍCIO T. SOARES<sup>3</sup>, ANTÔNIO H. B. RIBEIRO<sup>4</sup>**

<sup>1</sup> Engenheiro Agrícola, Mestrando em Engenharia Agrícola, Faculdade de Engenharia Agrícola UNICAMP, (19) 3521-1746, hugo.fernandes@feagri.unicamp.br

<sup>2</sup> Engenheiro Agrícola, Prof. Dr., Faculdade de Engenharia Agrícola, UNICAMP, Campinas SP (19) 3521-1076, angel.garcia@feagri.unicamp.br

<sup>3</sup> Tecnólogo Mecânico, Mestre em Engenharia Agrícola, Faculdade de Engenharia Agrícola UNICAMP, (19) 3521-1746, fabricio.soares@feagri.unicamp.br

<sup>4</sup> Engenheiro de Controle e Automação, Mestrando em Engenharia Agrícola, Faculdade de Engenharia Agrícola UNICAMP, (19) 3521-1746, antonio.ribeiro@feagri.unicamp.br

Apresentado no

XLIV Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola - CONBEA 2015  
13 a 17 de setembro de 2015- São Pedro- SP, Brasil

**RESUMO:** Em projetos de veículos não tripulados, seja ele autônomo ou controlado remotamente, é relevante a utilização de um sistema de suspensão eficiente que possibilite o livre trânsito do veículo em terrenos irregulares, como é o caso do agrícola. O presente trabalho apresenta o desenvolvimento e a simulação de um sistema de suspensão ativa para máquinas agrícolas, destinadas a operações como tratos culturais de culturas permanentes, monitoramento de culturas e coleta de solo. Nele foi proposto um sistema de suspensão articulada ativa que possibilitasse o trânsito do veículo em terreno acidentado de forma estável, respeitando critérios como altura do chassi em relação ao solo e espaçamento entre as rodas. Para isso foi utilizado o ambiente de simulação do MatLab/Simulink onde foi possível observar o comportamento do mecanismo e sua forma de atuação. Como entrada do sistema se simulou perfis de solo, representados por funções senoidais de diferentes amplitudes e frequências. As respostas avaliadas foram os erros da altura das extremidades e o ângulo de inclinação da plataforma, ambos em relação ao solo. Por meio das simulações, pode-se definir as relações geométricas mais apropriadas às condições de projeto e ajustar os parâmetros do sistema de controle do mecanismo de suspensão ativa.

**PALAVRAS-CHAVE:** máquinas agrícolas, simulação, controle.

### **WHEEL-LEGGED SUSPENSION SYSTEM FOR AGRICULTURAL MACHINES**

**ABSTRACT:** In unmanned vehicles, autonomous or remotely controlled, it's relevant to use an efficient suspension system that makes it possible to transit in irregular surfaces, such as agricultural ones. This project presents the development and simulation of an active suspension system for agricultural machines that are used in cultivation of permanent crops, crop monitoring and soil collection. This project proposed an articulated active suspension system that would make it possible for the vehicle to transit stably in a rough terrain and respecting important criteria, such as the height of the chassis in relation to the ground and the space between the wheels. In order to achieve this, the simulation software of MatLab/Simulink was used as a tool to observe the mechanism's behavior and its operation. Different soil profiles were simulated and used as an entry data of the system, represented by sinusoidal functions of different amplitudes and frequencies. The evaluated answers were the error of the height between the gravity center and the platform's parallelism both in relation to the ground. Through the simulations it was possible to define the appropriable geometric

relations that respected the project's conditions and adjust the system's parameters.

**KEYWORDS:** agricultural machines, simulation, control

## **INTRODUÇÃO**

A crescente demanda por maiores densidades de produção aliada ao uso consciente de insumos agrícolas e redução de custos inerentes à produção têm fomentado o avanço de estudos relativos à agricultura de precisão, que faz uso de uma série de recursos para o melhor aproveitamento de todos os insumos e equipamentos utilizados na atividade produtiva.

No que tange ao maquinário agrícola, observa-se um esforço na automação de sistemas e uso de veículos não tripulados (VTNT) a fim de obter uma redução da necessidade de mão de obra, de custos e aumento da qualidade dos processos produtivos.

A partir da década de 1960, pesquisas relacionadas ao uso de VTNT's na agricultura receberam destaque (FOUNTAS et al., 2007), contudo os trabalhos realizados não proporcionaram grandes resultados em condições reais devido à dificuldade de se projetar um veículo que opere nas diversas condições agrícolas.

Alguns estudos apresentam como objetivo a adaptação de veículos que operam sob estilos industriais no meio agrícola, outros utilizam-se de máquinas agrícolas modificadas para a implantação de plataformas não tripuladas, como em Reid et al. (2000), tais abordagens, porém, tornam o projeto limitado e deficiente pois fazem uso de equipamentos que não foram concebidos inicialmente para a utilização como veículos não tripulados.

Nesse cenário, intensifica-se o interesse no desenvolvimento de um veículo terrestre não tripulado específico para aplicação agrícola, pois este obteria um aumento da eficiência das operações bem como melhores resultados, quando comparado ao uso de grande tratores e acessórios tradicionais (BLACKMORE et al., 2007).

Porém, para que possa abrir mão de seus tripulantes, faz-se necessário que o veículo possua a habilidade de se locomover em terrenos acidentados mantendo seu chassi estável e amenizando a influência do terreno nos implementos e sensores presentes. Devido a isso, a locomoção possui um papel chave na performance do veículo, pois é a interface do veículo com o ambiente.

As pesquisas relativas à mobilidade de tais veículos apresentam basicamente duas abordagens distintas: veículos dotados de rodas ou veículos dotados de pernas. Estes são superiores àqueles quanto à capacidade de transpor obstáculos e se adaptar ao ambiente, porém, veículos dotados de rodas apresentam maior velocidade de locomoção e simplicidade mecânica (SUZUMURA & FUJIMOTO, 2012).

Em veículos dotados de rodas, a suspensão pode possuir duas configurações diferentes – passiva e ativa. A primeira apresenta somente elementos passivos em sua configuração, como por exemplo molas, amortecedores e demais componentes mecânicos que permitem a suavização dos efeitos do terreno no chassi. Já a segunda configuração faz uso de elementos ativos, como por exemplo atuadores lineares e motores de passo, além de uma malha de controle para que esses elementos atuem de forma a adaptar a configuração da suspensão para atingir o objetivo do sistema. Embora suspensões passivas apresentem uma configuração mecânica mais simplificada e menor custo, as suspensões ativas possuem melhores respostas e maior adaptabilidade.

Além das abordagens citadas anteriormente, há pesquisas que direcionam ao uso de pernas e rodas em conjunto (são chamados de veículos de suspensão híbrida) que permitem as vantagens de ambos em um único veículo.

No caso agrícola, um veículo deve apresentar uma boa estabilidade em terrenos acidentados e declivosos, boa dirigibilidade, boa manobrabilidade e capacidade de manter a altura do chassi em relação ao solo constante, dessa forma a configuração de suspensão mais adequada para aplicações agrícolas seria a híbrida, pois é a única que permite que todos os atributos citados sejam contemplados.

Dessa forma, o presente trabalho tem por objetivo desenvolver e simular bidimensionalmente em ambiente computacional um sistema de suspensão híbrida ativa para um veículo destinado a aplicações agrícolas que atue no controle da altura do chassi e na variação do ângulo da plataforma com o plano horizontal.

## MATERIAL E MÉTODOS

O modelo proposto para o sistema de suspensão foi o duplo pantográfico (ou quatro barras duplo) por permitir maior mobilidade da altura do chassi e da distância entre rodas simultaneamente. O chassi foi acoplado a dois mecanismos de cada lado, mostrado na Figura 1.

A atuação foi feita por atuadores lineares ligados à diagonal de cada mecanismo de quatro barras, possibilitando quatro pontos de atuação distintos, nos quais foram implementados um sistema de controle do tipo proporcional integral (PI) independente para cada atuador cuja variável controlada foi a altura nas extremidades da plataforma em relação ao plano horizontal. O controle da altura nas extremidades da plataforma garante, indiretamente, o controle da inclinação da mesma.

Para as simulações foi desenvolvido um protótipo virtual bidimensional contendo as projeções ortogonais do chassi e das pernas (mecanismo de quatro barras). Neste protótipo pode-se observar a geometria da estrutura bem como os pontos de atuação e as variáveis controladas.

A força de reação do solo foi considerada perfeitamente viscoelástica com alto coeficiente de restituição, ou seja, a resposta do solo mediante aplicação de uma força é rápida e é pouco influenciada pela taxa de aplicação da força. O perfil do solo foi considerado senoidal com amplitude de 0,1m e independente para cada lado do sistema. Dessa forma, simulou-se três diferentes cenários para o perfil do solo: ambos os lados em fase, defasados  $90^\circ$  e defasados  $180^\circ$ .

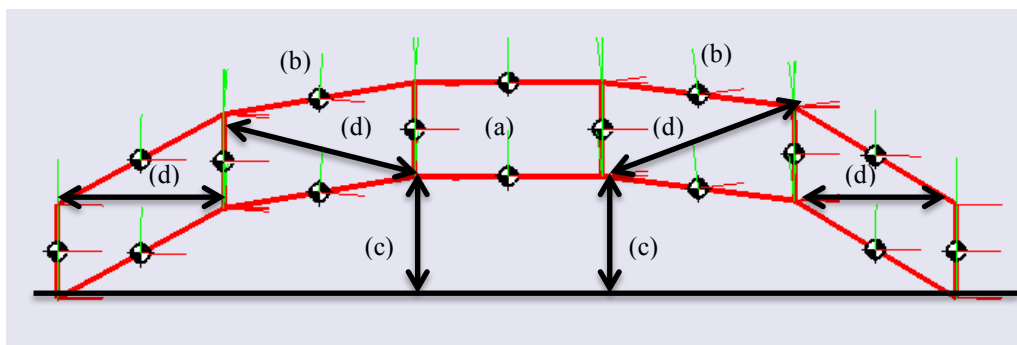


FIGURA 1. Simulação do sistema de suspensão ativa proposto; (a) plataforma; (b)

mecanismos de quatro barras; (c) alturas controladas, (d) atuadores.

Para simular diferentes velocidades de avanço da máquina em um mesmo perfil de solo, foi considerada uma variação na frequência do perfil senoidal do solo, sendo utilizadas duas frequências diferentes ( $\pi/3$  e  $\pi/5$ ).

A fim de mensurar a efetividade do controle efetuado no sistema, avaliou-se o erro ( $e$ ), caracterizado pela diferença entre o referencial e a posição real do chassi, de três diferentes formas: erro absoluto integral (IAE), erro quadrático integral (ISE) e erro absoluto integral ponderado pelo tempo (ITAE).

O erro absoluto integral expressa a magnitude do erro acumulado e pode ser calculado por meio da formula 1.

$$IAE = \int_0^{\infty} |e(t)| dt \quad (1)$$

O erro quadrático integral pode ser calculado pela integral do quadrado do erro, conforme formula 2.

$$ISE = \int_0^{\infty} e^2(t) dt \quad (2)$$

A magnitude do erro acumulado ponderado pelo tempo pode ser calculado por meio da formula 3.

$$ITAE = \int_0^{\infty} t|e(t)| dt \quad (3)$$

Dessa forma, calculou-se o erro nas três formas citadas para cada velocidade de avanço utilizada na simulação.

Foi utilizado o software MatLab® Simulink e a toolbox SimMechanics para a confecção do protótipo virtual bem como simulações.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados obtidos nas simulações para velocidade de avanço da plataforma de  $\pi/3$  são apresentados nas figuras 2 a 4. A figura 2 apresenta as posições da plataforma com e sem controle submetido a um perfil de solo em fase para ambas as rodas. Nela pode-se observar que a plataforma sem atuação da suspensão acompanhou o perfil do solo, conforme esperado, e houve uma significativa redução no movimento da plataforma após a aplicação do controle PI.

A figura 3 apresenta as posições da plataforma efetuando-se controle bem como as posições de contato do solo com cada roda. Na figura 3a, os perfis de solo estão defasados  $90^\circ$ , já na figura 3b, os perfis estão defasados  $180^\circ$ . Em ambos pode-se observar uma significativa redução no movimento da plataforma devido ao controle.

A figura 4 apresenta o ângulo da plataforma em relação ao plano horizontal com e sem controle para perfis de solo defasados  $90^\circ$  e  $180^\circ$  onde se observa que o controle reduziu significativamente o ângulo de inclinação da plataforma em relação ao plano horizontal.

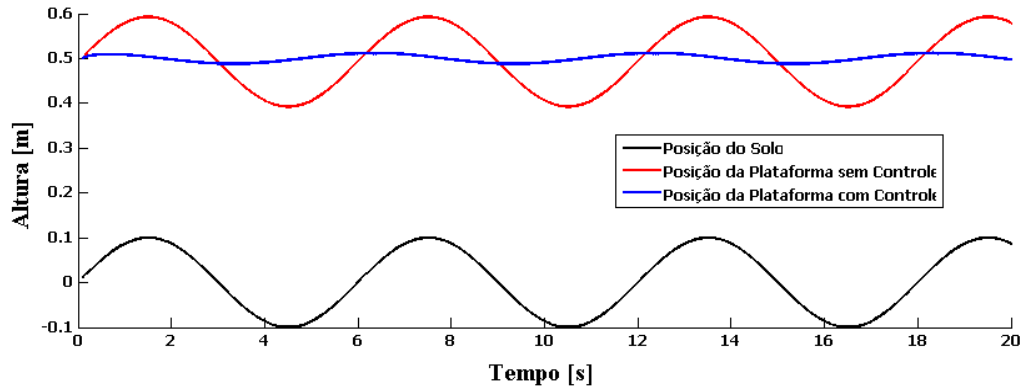


FIGURA 2. Posições da plataforma com e sem controle submetido a um perfil de solo em fase para ambas as rodas.

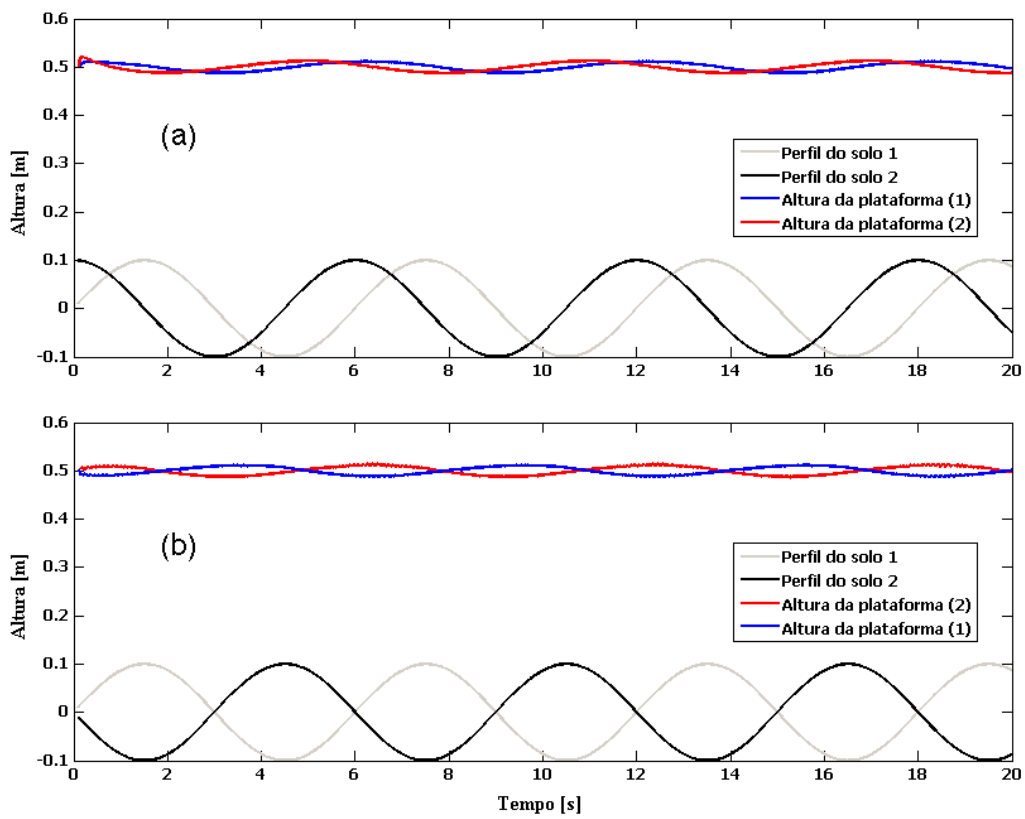


FIGURA 3. Posições da plataforma com controle submetido a um perfil de solo defasado  $90^\circ$  (a) e posições da plataforma com controle submetido a um perfil de solo defasado  $180^\circ$  (b).

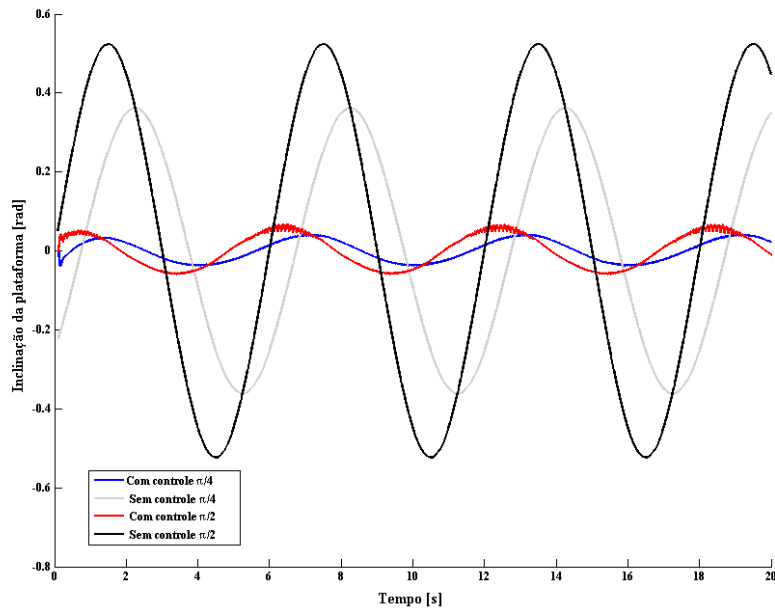


FIGURA 4. Ângulo da plataforma em relação ao plano horizontal com e sem controle para perfis de solo defasados  $90^\circ$  e  $180^\circ$ .

Os resultados obtidos nas simulações para velocidade de avanço da plataforma de  $\pi/5$  são apresentados nas figuras 5 e 6. A figura 5 apresenta as posições da plataforma efetuando-se controle bem como as posições de contato do solo com cada roda. Na figura 5a, os perfis de solo estão defasados  $90^\circ$ , já na figura 5b, os perfis estão defasados  $180^\circ$ . Em ambos pode-se observar uma significativa redução no movimento da plataforma devido ao controle.

A figura 6 apresenta o ângulo da plataforma em relação ao plano horizontal com e sem controle para perfis de solo defasados  $90^\circ$  e  $180^\circ$  onde se observa que o controle reduziu significativamente o ângulo de inclinação da plataforma em relação ao plano horizontal.

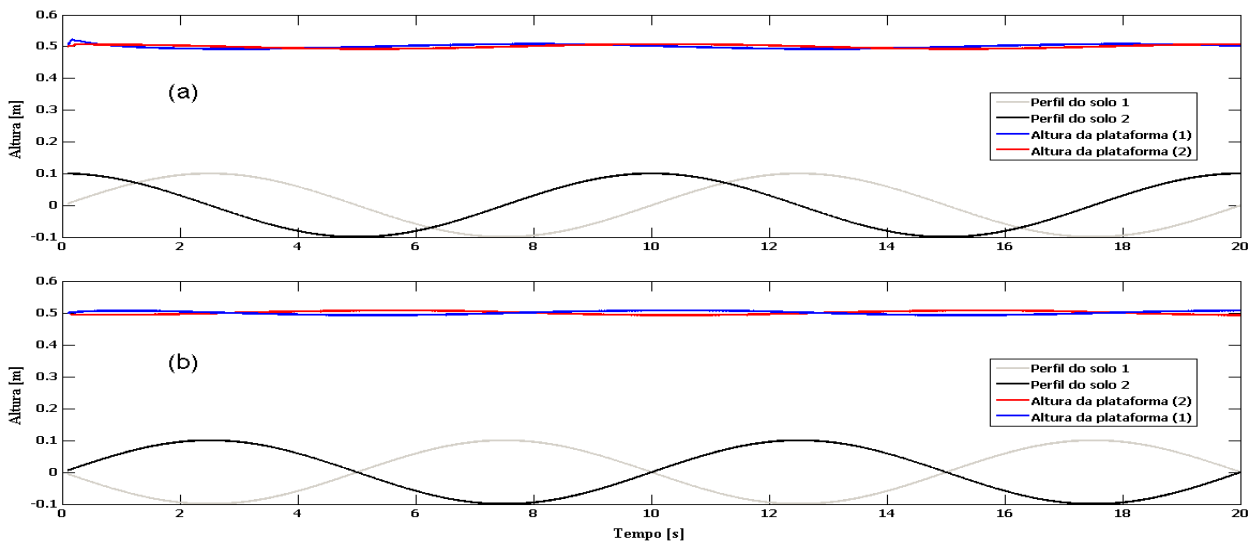


FIGURA 5. Posições da plataforma com controle submetido a um perfil de solo defasado  $90^\circ$  (a) e posições da plataforma com controle submetido a um perfil de solo defasado  $180^\circ$  (b).

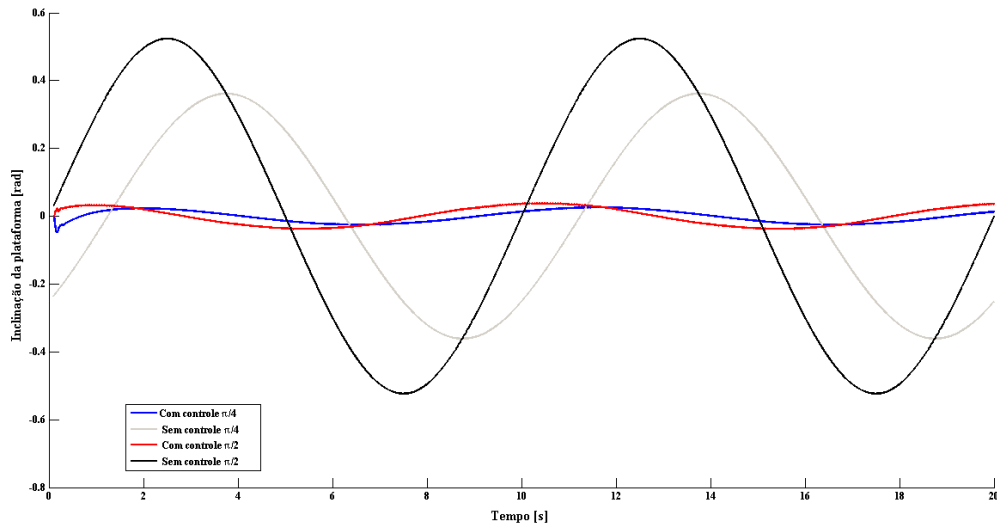


FIGURA 6. Ângulo da plataforma em relação ao plano horizontal com e sem controle para perfis de solo defasados 90° e 180°.

A tabela 1 apresenta os erros da altura da plataforma em relação a altura de referência, nela observa-se uma diminuição significativa do erro quando aplicado o controle para corrigir a posição da plataforma para as duas velocidades simuladas. Podemos inferir também que o sistema de controle proporcional integral (PI) mostrou-se adequado a aplicação em questão pois houve uma redução de pelo menos 13 vezes no erro apresentado.

TABELA 1. Erros entre a posição da plataforma e a posição de referência para diferentes velocidades de avanço.

Velocidade [rad.s <sup>-1</sup> ]	$\pi/3$		$\pi/5$			
	Sem controle	Controlado	Sem controle	Controlado		
Defasagem [°]	0°	90°	0°	90°	180°	
ISE	4,9346	0,0015	0,0013	0,1012	0,0006	0,0005
ISAE	9,8077	0,1532	0,1468	1,2768	0,0990	0,0936
ITAE	196,1547	3,0641	2,9365	25,5356	1,9796	1,8727

## CONCLUSÕES

De acordo com o trabalho apresentado, podemos concluir que o sistema de suspensão composta por mecanismos de quatro barras e atuação ativa proposto é efetivo no controle da altura da plataforma e no paralelismo em relação ao plano horizontal. Pode-se observar que a estratégia de controle proporcional integral (PI) é efetiva no controle da suspensão.

## REFERÊNCIAS

APOSTOLOPOULOS, D. S. **Analytical configuration of wheeled robotic locomotion**, 2001. Disponível em: <[http://www.ri.cmu.edu/pub\\_files/pub2/apostolopoulos\\_dimitrios\\_2001\\_1/](http://www.ri.cmu.edu/pub_files/pub2/apostolopoulos_dimitrios_2001_1/)> . .

BLACKMORE, B. S.; GRIEPENTROG, H. W.; FOUNTAS, S.; et al. A SPECIFICATION FOR AN AUTONOMOUS CROP PRODUCTION MECHANIZATION SYSTEM B.S. Blackmore, S. Fountas, T.A. Gemtos. **Life Sciences**, v. IX, n. 2000, p. 1–24.

FOUNTAS, S.; BLACKMORE, B. S.; VOUGIOUKAS, S.; et al. Decomposition of Agricultural tasks into Robotic Behaviours. **Agricultural Engineering International - The CIGR Ejournal**, v. IX, p. 1–15, 2007.

REID, J. F.; ZHANG, Q.; NOGUCHI, N.; DICKSON, M. Agricultural automatic guidance research in North America. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 25, n. 1-2, p. 155–167, 2000.

SUZUMURA, A.; FUJIMOTO, Y. High mobility control for a wheel-legged mobile robot based on resolved momentum control. International Workshop on Advanced Motion Control, AMC. **Anais...** . p.25–27, 2012.