

CÁLCULO DO DESVIO LATERAL PARA GUIAGEM MAGNÉTICA

ANDRÉ ABRAMI¹, HENRIQUE DE SOUZA NERY¹, LEOPOLDO R. YOSHIOKA¹, JOSÉ R. CARDOSO¹

1. *LMAG/PEA/PSI, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo*
Av. Luciano Gualberto, travessa 3 n° 158 - CEP 05508-010 - São Paulo - SP
andreabrami@gmail.com, nery.henrique@gmail.com,
leopoldo.yoshioka@poli.usp.br.com, jrcardoso@poli.usp.br.com

Abstract— This article should introduce the reader to the subject of magnetic guidance, technique on autonomous navigation for means of transport. Although, its main reason is to present and compare methods for calculating lateral displacement between vehicle and magnetic marker belonging to the magnetic track.

Keywords— Autonomous Vehicles, Intelligent Transport Systems, Magnetic Guidance, Lateral Displacement, Correlation.

Resumo— Este artigo deverá introduzir o leitor ao assunto da guiagem magnética, técnica para a navegação autônoma de meios de transporte. Mas seu objetivo principal é apresentar e comparar métodos para o cálculo do desvio lateral de um veículo em relação ao ímã pertencente à trilha magnética.

Palavras-chave— Veículos Autônomos, Sistemas Inteligentes de Transporte, Guiagem Magnética, Desvio Lateral, Correlação.

1 Introdução

Nas últimas décadas, o número de veículos em circulação no mundo vem crescendo de forma acelerada, resultando em problemas como congestionamento, lentidão do trânsito, imprevisibilidade do tempo de viagem entre outros [1].

Neste contexto os Sistemas Inteligentes de Transporte (ITS) apresentam-se como uma ferramenta promissora para melhorar a mobilidade urbana [2]. Uma das linhas de estudo mais atuais é a de Guiagem Autônoma de Veículos, que busca aumentar a eficiência, confiabilidade e segurança. Alguns exemplos são os carros autoguiados da Google, em testes na Califórnia [3], ou ainda o sistema de guiagem magnética aplicado a BRTs (*Bus Rapid Transit* ou corredores expressos de ônibus) [4,5]. Os sistemas de guiagem seguem diferentes vertentes quanto ao tipo de sensoriamento de posicionamento. Neste artigo será tratada a guiagem baseado no sensoriamento de campo magnético.

A guiagem magnética consiste num sistema o qual o veículo segue uma trilha de ímãs. Para tanto, o cálculo do desvio lateral é uma função essencial para esse se manter centralizado à trilha.

2 Propósito

Este artigo tem como objetivo apresentar os métodos aplicáveis para o cálculo de desvio lateral a partir de uma referência definida por um marcador magnético (ímã). Esses serão explicados conceitualmente e comparados quando aplicados no sistema de guiagem magnética. Assim, no final do artigo, o leitor poderá concluir qual é a solução mais pertinente para o problema.

3 Conceituação

3.1 Referência Magnética

Um ímã com formato cilíndrico apresenta um perfil de intensidade de campo magnético que se aproxima de uma função gaussiana [6], como ilustrada na figura 1. Pode-se tirar vantagem desse comportamento característico, usando-o como uma referência de posicionamento.

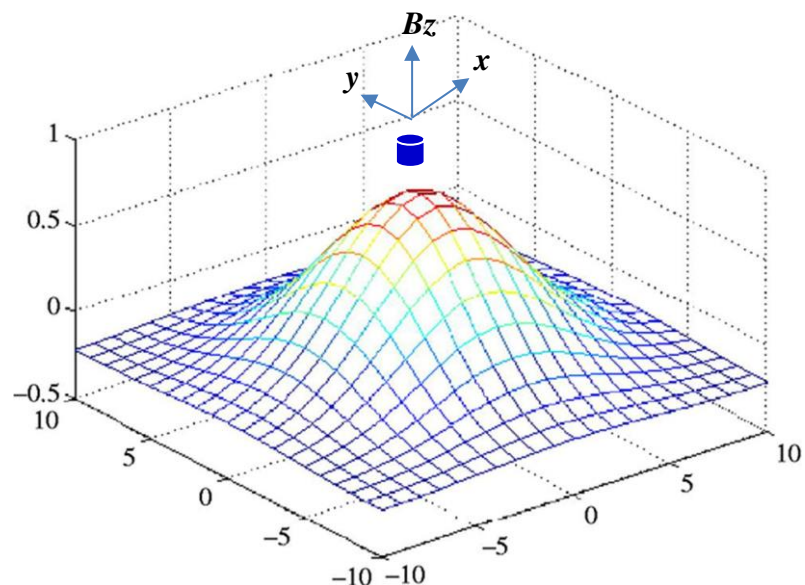


Figura 1. Perfil 3D da intensidade campo magnético de um ímã cilíndrico.

3.2 Trilha Magnética

A trilha magnética é constituída por ímãs cilíndricos, espaçados de acordo com a necessidade que se tem por um referencial de controle. Por exemplo, pode-se espaçar mais os ímãs em uma reta do que em uma curva, pois nesta o veículo não estando apontado para direção tangencial a mesma, pode-se não enxergar o próximo ímã, assim, irá sair definitivamente da trilha. Na figura 1 está a que foi usada em nosso experimento.

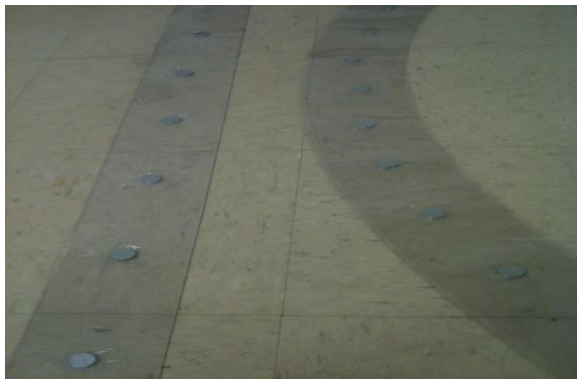


Figura 2. Trilha magnética utilizada no projeto. Foi construída em setores, constituindo retas e curvas. À esquerda, encontramos uma reta e, à direita, uma curva. Sua composição são, basicamente, ímãs de neodímio cobertos por PVC transparente.

3.3 Sensoriamento Magnético

A detecção da intensidade do campo magnético será feito por meio de uma régua constituída de três sensores Hall [7]. Conforme mostrado na figura 2, o

conjunto de sensores é instalado na parte frontal do veículo.

3.4 Controle de Posição

O diagrama da figura 4 representa o contexto do controle de posição no qual o cálculo do desvio lateral é inserido. Este irá fornecer uma saída $y(kT)$ e, assim, pode-se obter o erro em relação ao referencial "0", centro da trilha. Esse controlador é bastante básico e foi implementando para garantir o funcionamento do veículo autônomo. É composto por um ganho proporcional e um derivativo, responsável por suavizar o percurso do carro. Existe bastante espaço para melhoras aqui, como incluir um modelo interno da planta que, possibilitará o controle mesmo nos seguimentos onde não há ímãs para referência. Outra possibilidade é a navegação inercial, a qual consiste em, a partir dos últimos marcadores magnéticos, prever onde estará o próximo e, assim, ir em direção deste.

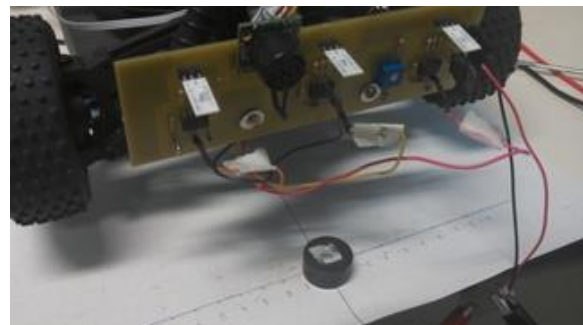


Figura 3. Régua de sensores, localizada na frente do veículo. Os três retângulos brancos, posicionados na parte superior da régua, são os sensores Hall. Abaixo, pode-se encontrar um ímã sobre uma escala representando o desvio lateral.

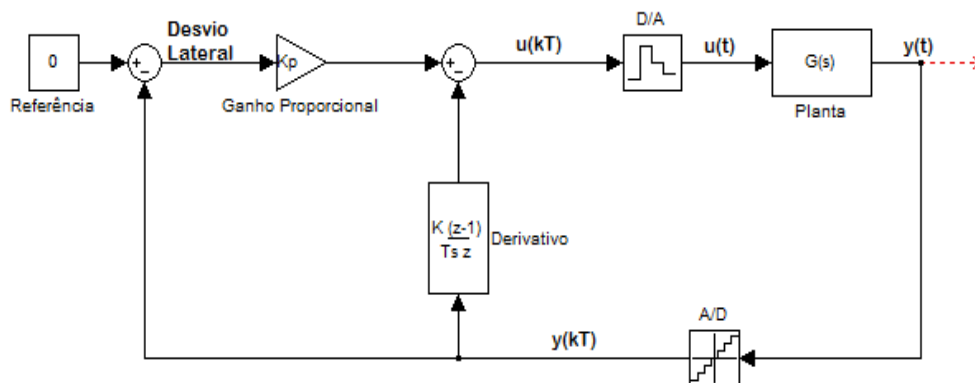


Figura 4. Diagrama do controle de posição

4 Métodos

4.1 Métodos de cálculo de desvio lateral

O grupo de guiagem magnética da Escola Politécnica existe desde 2009. E a questão do desvio lateral sempre foi bastante importante para o projeto, e evoluiu até atualmente. A primeira solução para o problema foi, simplesmente, optar entre dois estados: virar para esquerda, quando o sensor Hall da esquerda detectasse o imã ou, virar para direita, caso o mesmo acontecesse com sensor da direita.

A próxima solução consistiu em obter uma função para a intensidade do campo magnético do imã usado na trilha. Desse modo, ao recebermos as medidas dos sensores, poderíamos usá-las como argumento da função acima e, através de manipulação matemática, calculava-se o desvio. Aqui, partia-se do pressuposto que todos os imãs teriam campo magnético idêntico. Outra pressuposição é a estabilidade e a confiabilidade dos sensores. Ambos os requisitos anteriores não acontecem na prática.

A seguir, serão apresentados os últimos dois algoritmos desenvolvidos no projeto. Esperamos estar cada vez mais próximos de uma solução ótima para o assunto abordado.

4.2 Método dos Mínimos Quadrados

A solução por nós empregada para descobrirmos o desvio lateral do veículo em relação à trilha, a partir das medidas fornecidas pelos sensores Hall e suas respectivas posições horizontais, foi tirar vantagem da forma do campo magnético apresentada pelo imã cilíndrico, uma gaussiana. Assim, pudemos encaixar uma curva dessa característica em cima das medidas obtidas, através do Método dos Mínimos Quadrados [8], neste artigo referido como MMQ. A média μ da equação obtida, será o próprio desvio lateral. Pode-se encontrar essa solução, detalhadamente, em [9]. Aqui iremos apresentar uma versão resumida desse método:

A equação da gaussiana é:

$$y = ae^{\frac{-(x-b)^2}{2c^2}} \quad (1)$$

Onde:

"a" é a proporção em "y".

"b" é a posição do centro da gaussiana em "x".

"c" é a proporção em "x".

Portanto, precisamos do valor de "b" que, representa o desvio lateral do veículo em relação à trilha de referência.

Para usarmos o MMQ para interpolar uma gaussiana com as medidas dos sensores. Primeiro, precisamos manipular a equação acima para que fique em forma de polinômio. O resultado é:

$$\ln(y) = \underbrace{x^2}_{Y} \underbrace{\left(\frac{-1}{2c^2}\right)}_A + \underbrace{x}_{B} \underbrace{\left(\frac{b}{c^2}\right)}_C + \underbrace{\left(\frac{2c^2 \ln(a) - b^2}{2c^2}\right)}_C \quad (2)$$

Assim, através de mudança de variável, obtemos um polinômio do segundo grau com a forma:

$$Y = x^2 A + x B + C \quad (3)$$

Agora, já podemos aplicar o MMQ que, retornará os coeficientes "A, B e C" da gaussiana que melhor se aplica entre os pontos dados pelos sensores. Os coeficientes serão obtidos com a resolução do sistema:

$$\begin{pmatrix} \sum_{i=1}^3 x_i^0 & \sum_{i=1}^3 x_i^1 & \sum_{i=1}^3 x_i^2 \\ \sum_{i=1}^3 x_i^1 & \sum_{i=1}^3 x_i^2 & \sum_{i=1}^3 x_i^3 \\ \sum_{i=1}^3 x_i^2 & \sum_{i=1}^3 x_i^3 & \sum_{i=1}^3 x_i^4 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} C \\ B \\ A \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sum_{i=1}^3 x_i^0 Y_i \\ \sum_{i=1}^3 x_i^1 Y_i \\ \sum_{i=1}^3 x_i^2 Y_i \end{pmatrix} \quad (4)$$

Onde:

$$X_i = (-5\text{cm} ; 0 ; 5\text{cm})$$

são as posições fixas dos sensores em "x", centralizadas em relação ao meio do carro, e

$$Y_i = (\ln(y_{\text{esquerdo}}) ; \ln(y_{\text{central}}) ; \ln(y_{\text{direito}}))$$

são, devido à mudança de variável ($Y = \ln(y)$), os logaritmos naturais das medidas dos sensores.

Ao resolvermos o sistema acima, chegamos nas seguintes igualdades:

$$A = 0,02(Y_1 - 2Y_2 + Y_3) \quad (5)$$

$$B = (Y_3 - Y_1)/10 \quad (6)$$

"C" não será usado.

Se voltarmos ao passo onde manipulamos a equação da gaussiana, também veremos as seguintes relações:

$$c = \sqrt{\frac{-1}{2A}} \quad (A < 0) \quad (7)$$

$$b = c^2 B \quad (8)$$

Assim, após obtermos "c", conseguimos chegar em "b" que, é o próprio desvio lateral em centímetros.

4.3 Método da Correlação

A segunda solução consiste em levantar, manualmente, uma LookUp Table com as medidas respectivas a cada sensor, o desvio lateral e a orientação do polo norte do imã, como na figura 4. Assim, teremos um banco de dados da posição esperada do imã para um grupo de medidas de campo. Também são acrescentados a esse banco, as medidas obtidas quando não se tem nenhum imã abaixo da régua de sensores. A partir daí, a cada iteração do software, no qual esse algoritmo está implementado, onde aparecerão novas medidas provenientes dos sensores Hall, iremos passa-las pela LookUp Table procurando com qual linha elas se correlacionam mais. Essa correlação é obtida através da aplicação das duas contrapartes na expressão do chi-quadrado [10], expressa em (9).

$$X_c = \sqrt{\sum \frac{(O_i - E_i)^2}{E_i}} \quad (9)$$

Nesse caso, X_c será próximo de zero quando se tem bastante correlação, e valores altos para baixas correlações. Aqui comparamos os dois grupos, **O**, medido na iteração atual, e **E**, pertencente à LookUp Table, item por item.

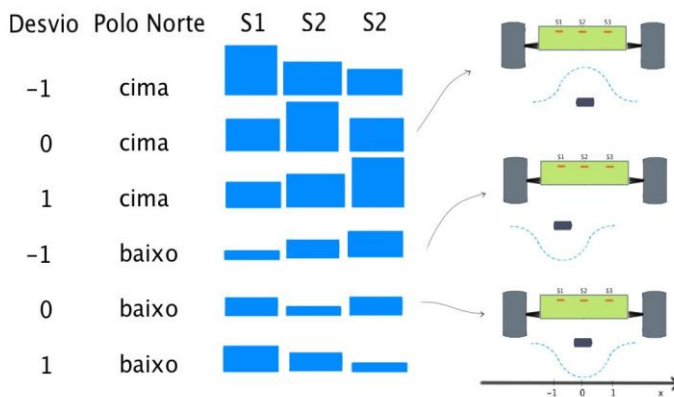


Figura 4. Ilustração do perfil de medidas para diferentes posições e polaridades do imã.

4.4 Implementações

O algoritmo de cálculo do desvio lateral foi implementado em um programa escrito em C++ e realizado por um processador ARM acoplado a uma Beagle Board [11], placa usada para aplicações embarcadas. Esse sistema controla os atuadores, o motor de tração e o servo motor (para esterçamento das rodas dianteiras direcionais), de um veículo, em escala 1/8, de modelismo.

Testou-se as soluções para obtenção do desvio lateral da seguinte forma: primeiramente, o desvio era mostrado no monitor do computador que se comunicava com o veículo através de telemetria, assim, colocávamos o imã abaixo da régua de sensores e verificávamos o que estava sendo calculado. Se o algoritmo passasse da fase anterior, o veículo era testado em nossa trilha magnética, figura 1. Aqui, observamos se o veículo conseguiu completar o percurso, e se o controle, figura 2, estava ocorrendo de forma satisfatória, considerando o sobressinal e seu tempo de acomodação, a partir do desvio lateral que lhe era oferecido.

5 Resultados

5.1 Utilizando MMQ

A solução pelo MMQ, a princípio, pareceu funcionar. Mas ao realizarmos testes mais rigorosos, considerando que esse algoritmo não deve falhar, descobrimos diversas limitações:

1. O controle, para ser eficaz, precisa de uma entrada linear. Ao observarmos o resultado da figura 5 que, apresenta uma comparação do que seria ideal para o que foi calculado, logo concluímos que a faixa de operação ficava limitada entre -3 cm e 3 cm, considerando a posição 0 cm o centro do veículo. Em nossa régua de sensores, temos três sensores Hall localizados nas posições -5 cm, 0 cm e 5 cm, respectivamente. Desse modo, ao compararmos o comprimento da régua, 10 cm, com a faixa de funcionamento, 6 cm, temos uma eficiência de 60%. Para interpolarmos uma gaussiana aos três pontos medidos, precisamos que os mesmos pertençam à curva prevista, e isso ocorre somente no seguimento de -3 cm à 3 cm.
2. O MMQ não funciona nos casos onde o polo norte do imã aponta para baixo. Para resolvermos esse impasse, tínhamos de assumir que quando um dos sensores estivesse medindo algo abaixo do offset predeterminado para o caso da ausência de algum campo magnético exceto o da terra, o polo norte do imã medido estaria para baixo. Nesse caso, aplicaríamos uma transformação, de inversão em relação ao offset, às medidas. A partir daí, já poderíamos aplicar o MMQ. Essa adaptação nem sempre satisfaz, pois o offset de cada sensor é diferente

e, além disso, variam com a temperatura e carga da bateria do sistema de alimentação.

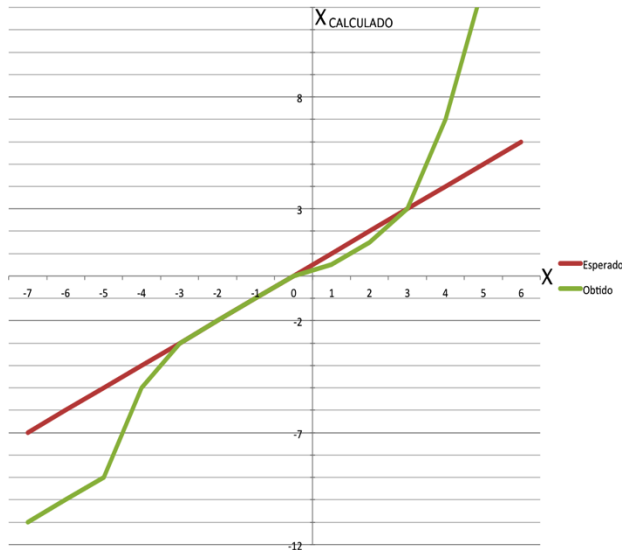


Figura 5. Gráfico para comparação do desvio real com o calculado no MMQ.

5.2 Utilizando Correlação

A partir das diversas limitações apresentadas pelo algoritmo anterior, precisávamos desenvolver uma solução que fosse menos determinística, a qual superasse os pré-requisitos para o funcionamento do MMQ. Portanto, partimos para o algoritmo que utiliza a Lookup Table, pois é essencialmente estatístico. O resultado foi totalmente satisfatório:

1. Ao contrário da solução anterior, conseguimos, dessa vez, obter o desvio lateral, exato e linear, entre -9 cm e 9 cm. Resultando em uma eficiência de 180%, ao compararmos com o comprimento de 10 cm da régua de sensores.
2. Nesse caso, já conseguimos obter um desvio lateral a partir do momento o qual os sensores Hall localizados nas extremidades da régua começam a detectar algum campo do ímã. Pois o trio de medidas para esse caso será único e fácil de ser correlacionado. Vale lembrar que essa solução pode ser implementada com apenas 2 sensores Hall, barateando a aplicação.
3. Além de termos resolvido também o caso de quando o polo norte do ímã estivesse para baixo, podemos ter novas funcionalidades como, saber seguramente se temos ou não um ímã abaixo da régua de sensores e, caso sim, confirmar se é um ímã da forma esperada, caso contrário, podemos desconsiderá-lo.
4. Outra nova funcionalidade que se pode obter nesse caso, é identificarmos a posição do ímã não só em uma dimensão, mas também no plano abaixo do veículo. Para isso ser possível, precisamos ter sensores dispostos

em um plano paralelo e acima do solo, onde estará o ímã.

6 Discussão

Ao compararmos todas as soluções, aqui apresentadas, para o cálculo do desvio lateral, observamos que quanto mais fizermos pressuposições sobre o sistema que compõe os ímãs e o sensoramento, mais sujeito a falhas será o nosso algoritmo. Seguindo essa ideia, o nosso grupo foi desenvolvendo soluções cada vez mais desapegadas ao determinismo.

Na engenharia, muitas vezes nos encontramos em momentos onde devemos escolher entre duas ou mais soluções e, normalmente, essa escolha não é simples e imediata, pois cada uma tem seus pontos positivos e negativos, portanto, precisamos ponderá-las. No assunto aqui apresentado isso não acontece, assim, concluímos que se trata de uma verdadeira evolução, onde todos os quesitos foram superados.

7 Conclusão

O objetivo desse artigo foi mostrar a superioridade das soluções probabilísticas sobre as determinísticas, em certas situações. Para o caso da obtenção do desvio lateral de uma trilha magnética através de sensores Hall, essa diferença foi bastante clara. O nosso grupo aprendeu essa lição e, atualmente, estamos estudando como migrar outras partes do nosso projeto, como o controle, para o campo probabilístico.

Agradecimentos

Gostaríamos de agradecer a todos os integrantes do LMAG, laboratório de magnetismo do departamento de energia e automação de engenharia elétrica da Escola Politécnica da USP. Ao prof. Dr. Maurício Salles, por nos prover da infraestrutura necessária para a pesquisa. Ao técnico de laboratório, Mario Sabro Sanematsu, por nos assessorar na confecção desde placas eletrônicas até mecanismos necessários ao funcionamento do nosso projeto.

Referências Bibliográficas

- [1] Yoshioka L.R., Cardoso, J.R - Comparative Analysis of Automatic Steering Technologies and Intelligent Transportation System Applied to BRT, SAE Brasil, São Paulo, 2010.
DOI: [10.4271/2010-36-0310](https://doi.org/10.4271/2010-36-0310)
- [2] Chan C.Y – Magnetic Sensing as a Position Reference System for Ground Vehicle Control, IEEE Transaction on Instrumentation and Measurement, Vol. 51, No.1, pp.43-52, 2002.
DOI:[10.1109/19.989896](https://doi.org/10.1109/19.989896)
- [3] Micoski M, Yoshioka L.R. – Lateral displacement calculation algorithm for a Magnetic Guidance System, SAE Brasil, 2007.
DOI: [10.4271/2007-01-2833](https://doi.org/10.4271/2007-01-2833)
- [4] MICOSKI, M., YOSHIOKA, L. R. “Automatic pilot for buses: a Brazilian reality”, SAE Technical Paper, 2008.
- [5] YOSHIOKA, L. R., CARDOSO, J. R. “Comparative Analysis of Automatic Steering Technologies and Intelligent Transportation System Applied to BRT”, SAE Technical Paper, 2010.
- [6] <http://www.leg.ufpr.br/~silvia/CE701/node36.html> - Universidade Federal do Paraná - acessado em 1 de junho de 2013
- [7] Ed Ramsden (2006). Hall-effect sensors: theory and applications (2, illustrated ed.). Elsevier. ISBN 0-7506-7934-4.
- [8] http://www.physics.csbsju.edu/stats/least_squares.html - College of Saint Benedict and Saint John's University
- [9] <http://sourceforge.net/p/guimag/wiki/C%C3%A1lculo%20do%20desvio%20lateral/>
Site do projeto de guiagem magnética da Escola Politécnica - acessado em 1 de junho de 2013
- [10] Bagdonavicius, V., Nikulin, M.S. "Chi-square goodness-of-fit test for right censored data". The International Journal of Applied Mathematics and Statistics, p. 30-50, 2011.
- [11] <http://beagleboard.org/> - Site oficial do desenvolvedor - acessado em 1 de junho de 2013