

## **APLICAÇÃO DE UM ALGORITMO RECURSIVO DE ESTIMATIVA DE MASSA A UM SISTEMA AUTOMÁTICO DE TRANSPORTE URBANO**

**Carlos Arthur Carvalho Sarmanho Jr., sarmjunior@hotmail.com<sup>1</sup>**  
**Eduardo André Perondi, perondi@mecanica.ufrgs.br<sup>1</sup>**  
**Mário Roland Sobczyk Sobrinho, sobzique@yahoo.com.br<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Rua Sarmiento Leite, 425. CEP: 90050-170, Porto Alegre-RS, Brasil.

**Resumo:** Neste trabalho, discute-se a utilização de um algoritmo recursivo de estimativa de massa na operação de um sistema automático de transporte urbano de pessoas denominado Aeromóvel. A estrutura matemática do algoritmo é apresentada, incluindo-se uma análise de suas propriedades de convergência. Um estudo detalhado de seu procedimento experimental de validação é igualmente desenvolvido. A efetividade do algoritmo de estimativa em estudo é ilustrada por meio de resultados tanto de simulação como obtidos experimentalmente.

**Palavras-chave:** sistemas automáticos de transporte urbano, identificação de parâmetros, estimador de massa.

### **1. INTRODUÇÃO**

O Aeromóvel é um sistema de transporte de passageiros que se move sobre trilhos dispostos sobre vigas suspensas. Seu funcionamento se baseia na propulsão pneumática, inspirada em barcos veleiros, o que permite que o sistema de potência seja instalado no solo, separado do veículo. A principal vantagem deste arranjo consiste na significativa redução do peso do veículo, de modo que a estrutura civil tanto da via como das suas estações podem apresentar dimensões relativamente reduzidas. Dessa forma, é possível manter as vantagens de um sistema de transporte em via exclusiva sem que isso implique um impacto urbanístico significativo. Finalmente, devido à sua tecnologia “limpa” de propulsão, este sistema não apresenta problemas diretos de emissão de elementos nocivos para a atmosfera.

O sistema foi concebido em meados de 1960, tendo seus primeiros protótipos desenvolvidos na década de 1970. No início da década de 1980 foi construída uma linha experimental na cidade de Porto Alegre – RS. Hoje, esta linha piloto conta com 960m de extensão, com duas estações separadas por 655m e com o sistema de potência situado entre elas. A referida linha é ilustrada na Figura (1). Atualmente, o Sistema Aeromóvel encontra-se em estudo como uma alternativa de baixo impacto ambiental para o transporte automático de passageiros em centros urbanos.



**Figura 1. Linha piloto do sistema Aeromóvel.**

Dentre os diversos aspectos pertinentes à operação automatizada do sistema Aeromóvel, existem dois de especial importância: **(i)** a eficiência energética do sistema de propulsão, **(ii)** a confiabilidade dos sistemas de controle do veículo tanto em termos discretos (cumprimento de horários de partida e chegada) como contínuos (controle dos perfis de aceleração e frenagem). No entanto, uma vez que tal massa varia proporcionalmente ao número de passageiros presentes em cada viagem do veículo transportador, o valor da mesma precisa ser monitorado constantemente. Uma possível solução para este problema consiste na determinação da massa transportada por meio de medição direta (utilizando de células de carga abaixo do vagão de transporte, por exemplo). No entanto, esta alternativa demanda um

alto custo de implantação, e ainda implica a necessidade de paralisar o veículo regularmente para fins de calibração do sistema de medição.

Neste trabalho, apresenta-se a aplicação de um método indireto de obtenção do valor da massa transportada pelo veículo do sistema Aeromóvel. Tal método se baseia na utilização de um estimador, que calcula recursivamente o valor da referida massa a partir do conhecimento de outras variáveis do sistema monitorado e da utilização de um modelo matemático que descreve as relações entre essas variáveis e o parâmetro de interesse. O conhecimento da massa transportada possibilita a elaboração de algoritmos mais eficazes para diversas finalidades, tais como a avaliação da eficiência energética do sistema e o controle da operação do mesmo.

Neste estudo são discutidos os aspectos principais do algoritmo utilizado, incluindo-se uma análise das propriedades de convergência do mesmo. Também são apresentados resultados de simulações que corroboram tais propriedades. Finalmente, a efetividade do algoritmo proposto é avaliada por meio de resultados experimentais.

Este trabalho está estruturado como segue. Na Seção 2, apresenta-se o modelo matemático utilizado para a determinação da força resultante aplicada ao veículo em movimento, cujo valor é necessário ao algoritmo estimador. Na Seção 3, descreve-se do algoritmo de estimativa propriamente dita. A Seção 4 é dedicada ao estudo por meio de simulação das propriedades do algoritmo em questão, enquanto a avaliação experimental do mesmo é discutida na Seção 5. Finalmente, as principais conclusões são delineadas na Seção 6.

## 2. EQUAÇÕES DINÂMICAS DO VEÍCULO

O equacionamento da dinâmica do sistema é baseado no sistema de coordenadas ilustrado na Fig. (2), onde  $x$  é a direção de deslocamento translacional do veículo, e  $y$  é o deslocamento no eixo perpendicular a  $x$  no mesmo plano da figura. As variáveis  $\dot{x}$  e  $\ddot{x}$  representam respectivamente a velocidade e a aceleração do veículo. O diagrama de equilíbrio de forças na direção da coordenada  $x$  é apresentado na Figura (2).

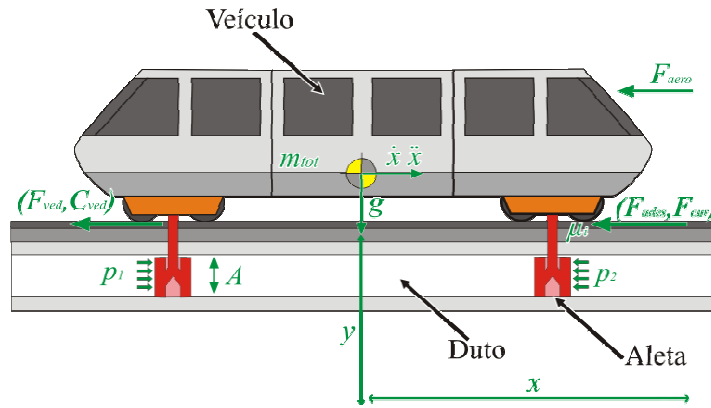


Figura 2. Diagrama de equilíbrio dinâmico do veículo Aeromóvel.

O estudo da dinâmica do veículo destina-se a modelar o valor da força resultante que determina o movimento do mesmo. Conforme Britto (2008), essa força resultante é dada por:

$$F_{tot} = A_{al}(p_2 - p_1) - (F_{ved} + c_{ved}(\dot{x})) - F_{aero} - F_{ades} - F_{cur} \quad (1)$$

onde  $F_{tot}$  é a força resultante aplicada ao veículo,  $x$  é posição do veículo na via,  $A_{al}$  é a área da aleta,  $p_1$  e  $p_2$  são as pressões aplicadas nas aletas do veículo,  $F_{ved}$  é a força de atrito das vedações,  $c_{ved}$  é o coeficiente de atrito linear dinâmico entre borracha/mastro,  $F_{aero}$  é a força de arrasto aerodinâmico e  $F_{ades}$  é a força de adesão roda/trilho. A modelagem destas forças será desenvolvida a seguir.

Para o cálculo da força de atrito translacional das vedações é utilizado o modelo de atrito estático de Coulomb, conforme descrito em Armstrong-Hélouvy *et al.*, (1994). Para as vedações transversais, a força normal aplicada é resultado da diferença entre a pressão no interior do duto e a pressão atmosférica multiplicada pela área de contato entre as borrachas e o mastro de fixação da aleta. Assim, pode-se expressar a força de atrito imposta pelas vedações por:

$$F_{ved} = f_{bor}A_{bor}(p - p_{atm}) \quad (2)$$

onde  $f_{bor}$  é uma constante referente ao contato entre a borracha de vedação longitudinal e o material do mastro,  $A_{bor}$  é a área de contato local da vedação,  $p$  é a pressão no interior do duto e  $p_{atm}$  é a pressão atmosférica.

Segundo Gillespie (1992), a equação da força de arrasto aerodinâmico para um veículo em movimento é:

$$F_{aero} = \frac{c_D A_{eq} \rho}{2} (v_{ar} + \dot{x})^2 \quad (3)$$

onde  $c_D$  é coeficiente de arrasto aerodinâmico do veículo,  $A_{eq}$  é a área transversal equivalente do mesmo,  $\rho$  é a massa específica do ar e  $v_{ar}$  é a velocidade do vento.

Em Polach (2005), é apresentado um estudo referente à interface de contato roda/trilho que possibilita o cálculo, de forma interativa, das forças e áreas que compõem a região de contato. Segundo o autor, o valor do coeficiente de atrito  $\mu_{solo}$  é dado pela da Equação (4):

$$\mu_{solo} = \mu_i \left[ (1 - A) e^{-B|\dot{x} - \dot{\theta}_{roda} r_{roda}|} + A \right] \quad (4)$$

onde,  $\dot{\theta}_{roda}$  e  $r_{roda}$  são, respectivamente, a velocidade angular e o raio da roda do veículo. Os coeficientes referentes às condições de contato  $k_{aa}$ ,  $k_{ad}$ ,  $\mu_i$ ,  $A$ ,  $B$  e  $G$  são parâmetros específicos deste modelo. Seus valores são dados na Tab. (1).

**Tabela 1. Parâmetros de contato roda/trilho.**

Condição de contato	$k_{aa}$	$k_{ad}$	$\mu_i$	$A$	$B$	$G$
Seco	1,00	0,40	0,55	0,40	0,60	$8,27 \cdot 10^{10}$
Molhado	0,30	0,10	0,30	0,40	0,20	$8,27 \cdot 10^{10}$

A força de resistiva tangencial ao movimento da roda é dada através do seguinte conjunto de equações:

$$F_{ades} = \frac{2m_{tot} g n_{roda} \mu_i \cos(\phi_z) \left[ (1 - A) e^{-B|\dot{x} - \dot{\theta}_{roda} r_{roda}|} + A \right]}{\pi} \left( \frac{k_{aa} \varepsilon}{1 + (k_{aa} \varepsilon)^2} + \arctan(k_{aa} \varepsilon) \right) \quad (5)$$

$$\varepsilon = \frac{1}{4} \frac{G \pi a b c_{11} n_{roda} (\dot{x} - \dot{\theta}_{roda} r_{roda})}{m_{tot} g \mu_{solo} \cos(\phi_z) |\max(\dot{x}, \dot{\theta}_{roda} r_{roda})|} \quad (6)$$

onde  $n_{roda}$  é o número de rodas do veículo,  $g$  é a aceleração da gravidade,  $\phi_z$  é o ângulo de inclinação do veículo em relação ao eixo  $z$  (perpendicular ao plano da base do veículo),  $a$  e  $b$  são semi-eixos da elipse formada pela área de contato e  $c_{11}$  é uma constante determinada na teoria linear de Kalker para deslocamento longitudinal, conforme Polach (1999).

O veículo do Aeromóvel possui rodas independentes, ou seja, suas rodas movimentam-se autonomamente como ocorre em automóveis. Assim, efeitos de deslizamentos transversais e giros não necessitam ser modelados para este sistema. No caso da presença de curvas, entretanto, a força resistiva devido ao contato entre o friso da roda e o trilho não pode ser desprezada. Para representação matemática desta força utilizou-se o modelo de atrito de Coulomb, em que a mesma é expressa por:

$$F_{cur} = \mu_{cur} m_{tot} \frac{\dot{x}^2}{r_{cur}} \quad (7)$$

onde  $\mu_{cur}$  é o coeficiente de atrito na curva e  $r_{cur}$  é o raio da curva.

### 3. O ALGORITMO ESTIMADOR DE MASSA

Devido à própria natureza de sua operação, sistemas de transporte sobre trilhos se caracterizam por uma alteração constante na massa transportada de acordo com o número de passageiros presentes em cada trecho de seu trajeto. No caso do sistema Aeromóvel, essas alterações podem fazer com que a massa total chegue a ser duplicada entre uma viagem e outra. Uma vez que essa variável exerce influência significativa sobre o desempenho dos sistemas de propulsão e controle do veículo, é desejável que a informação referente ao valor da mesma seja atualizada em cada novo trecho da viagem, de modo que suas flutuações sejam levadas em consideração de forma adequada.

Em geral, a obtenção do valor da massa através de medições diretas esbarra em dificuldades relativas aos custos de instalação e manutenção dos sistemas de instrumentação pertinentes. Além disso, os procedimentos de calibração de tais aparatos de medição podem requerer a parada do sistema para sua execução. Uma vez que tal calibração precisa ser executada periodicamente, essa necessidade de parada implica uma séria limitação prática na utilização de tal solução.

Uma alternativa consiste na utilização de um algoritmo recursivo de estimativa *online* da massa do veículo, baseado na obtenção de outras variáveis do sistema cuja monitoração seja mais acessível. Alguns exemplos de algoritmos dessa natureza aplicados a veículos de passageiros e de carga podem ser encontrados em Bae *et al.*, (2001), Breen (1996), Fathy *et al.*, (2008) e Vahidi *et al.*, (2003). Neste contexto, é possível fazer-se uso de um algoritmo originalmente descrito em Slotine e Li (1991), cujo é utilizado no presente trabalho.

O algoritmo proposto por Slotine e Li se utiliza do conhecimento da aceleração do veículo e da força resultante sobre o mesmo para calcular sua massa de forma recursiva, utilizando o método dos mínimos quadrados. Definindo-se  $\hat{m}(t)$  como o valor estimado da massa transportada pelo veículo, o erro de predição entre o produto massa estimada versus aceleração e a força resultante instantânea (calculada conforme a Eq. (1)) é dado por:

$$e = \hat{m}\ddot{x} - F_{tot} \quad (8)$$

Adicionalmente, define-se o termo auxiliar  $P(t)$ :

$$P(t) = \left[ \int_0^t \ddot{x}^2 dr \right]^{-1} \quad (9)$$

Com base nas definições acima, a lei de atualização da estimativa da massa transportada é a seguinte:

$$\dot{\hat{m}} = -P(t)\ddot{x}e \quad (10)$$

A principal vantagem deste algoritmo em relação a outros encontrados na literatura é a existência de garantias a respeito das propriedades de convergência de suas estimativas. Na literatura pesquisada, existem poucos exemplos em que garantias dessa natureza podem ser encontradas. No caso do algoritmo aqui utilizado, se o sistema for persistentemente excitado, a estimativa realizada pelo mesmo converge assintoticamente para o valor real da massa transportada pelo veículo. A seguir, desenvolve-se a prova analítica dessa importante propriedade. Tomando-se a derivada temporal do inverso do termo auxiliar  $P(t)$ , obtém-se:

$$\frac{d}{dt} P(t)^{-1} = \ddot{x}^2(t) \quad (11)$$

Definindo-se o desvio de estimativa de massa como  $\tilde{m} = \hat{m} - m$ , sendo  $m$  o valor real da massa transportada, e combinando-se as Eq. (10) e (11), é possível mostrar que:

$$\frac{d}{dt} [P(t)^{-1} \tilde{m}(t)] = 0 \quad (12)$$

Desta forma, separando as variáveis e integrando a Eq. (12), tem-se:

$$\tilde{m}(t) = \frac{\tilde{m}(0)}{P(0)} P(t) \quad (13)$$

Através da Eq. (9), pode-se ver que, se o sistema possui uma excitação permanente, o termo  $P(t)$  tende a zero quando  $t \rightarrow \infty$ . Assim, pela Eq. (13), tem-se que  $\|\tilde{m}\| \rightarrow 0$  à medida que  $t \rightarrow \infty$ , o que completa a prova.

#### 4. SIMULAÇÃO DO ALGORITMO DE ESTIMATIVA DE MASSA

De modo a facilitar todas as tarefas pertinentes ao estudo de viabilidade do sistema Aeromóvel, Britto (2008) desenvolveu um modelo analítico para a descrição do comportamento dinâmico do mesmo. Com o fim de simular o desempenho do sistema diante das diversas condições de teste desejadas, o referido modelo foi também implementado no ambiente computacional Matlab-Simulink®, utilizando-se os parâmetros identificados na linha piloto de Porto Alegre. O modelo assim desenvolvido é capaz de representar a maioria dos fenômenos não-lineares de maior influência sobre o comportamento do sistema real, tais como as variações na dinâmica das pressões no interior da via devido à compressibilidade do ar, as perdas de carga ao longo da linha e os vazamentos de ar nas válvulas e vedações.

A fim de se verificar o comportamento do algoritmo de estimativa de massa, o mesmo foi testado por meio de simulações baseadas no modelo matemático. Os parâmetros utilizados pelo algoritmo de estimativa de massa foram apresentados em Silva et al. (2008), onde se descrevem os experimentos realizados na Linha Piloto do Aeromóvel com o fim de validar e calibrar o modelo de simulação desenvolvido em Britto (2008). Com base nesses levantamentos experimentais, os valores dos referidos dos parâmetros relativos os coeficientes de atrito das vedações são apresentados na Tabela (2). Ainda nesta os parâmetros das variáveis  $A_{al}$ ,  $A_{eq}$ ,  $n_{roda}$ ,  $r_{roda}$  foram obtidas em Aeromóvel (2007). O coeficiente de arrasto  $c_D$  foi obtido em Fox e McDonald (2001). O parâmetro  $p_{atm}$  e  $\rho$  são apresentados em Van Wylen et al. (1995), enquanto que os parâmetros  $F_{ved}$ ,  $c_{ved}$ ,  $g$  e  $\mu_{cur}$  são apresentados em Britto (2008).

Tabela 2. Parâmetros utilizados no modelo do sistema.

Variável	Valor	Descrição
$A_{al}$ (m <sup>2</sup> )	0,98	Área da aleta do veículo
$A_{eq}$ (m <sup>2</sup> )	6	Área equivalente da seção transversal do veículo
$c_D$	1,5	Coefficiente de arrasto para barra quadrada
$c_{vedF-G}$ (N.s/m)	55	Coefficiente de atrito dinâmico linear da vedação
$c_{vedG-F}$ (N.s/m)	80	Coefficiente de atrito dinâmico linear da vedação
$F_{vedG-F}$ (N)	450	Coefficiente de atrito estático
$F_{vedF-G}$ (N)	290	Coefficiente de atrito estático
$g$ (m/s <sup>2</sup> )	9,81	Aceleração da gravidade
$n_{roda}$	8	Número de rodas
$r_{roda}$ (m)	0,2546	Raio da roda
$p_{atm}$ (Pa)	101325	Pressão atmosférica
$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	1,204	Massa específica do ar
$\mu_{cur}$	0.025	Coefficiente de atrito na curva

$F \rightarrow G$  indica o deslocamento da estação Fazenda para Gasômetro.  
 $G \rightarrow F$  indica o deslocamento do Gasômetro para Fazenda.

A Figura (3) apresenta o comportamento simulado do estimador de massa à medida que o veículo se desloca ao longo da linha, transportando uma massa de 7735kg.

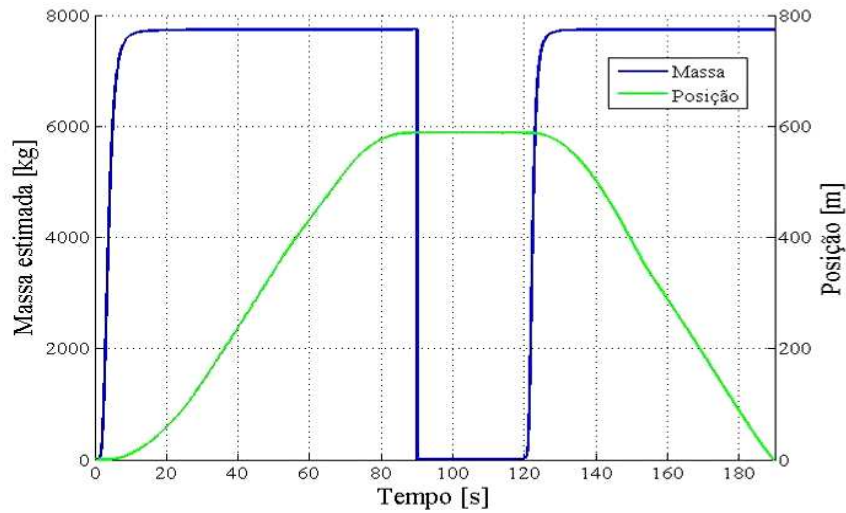


Figura 3. Simulação da estimativa de massa durante uma viagem ida-volta (massa transportada: 7735kg).

Na Figura (4), tem-se uma vista detalhada dos mesmos resultados ilustrados na Fig. (3), apresentando o comportamento transiente da estimativa da massa transportada em cada trecho da viagem de ida e volta entre as duas estações da linha piloto (Fazenda e Gasômetro).

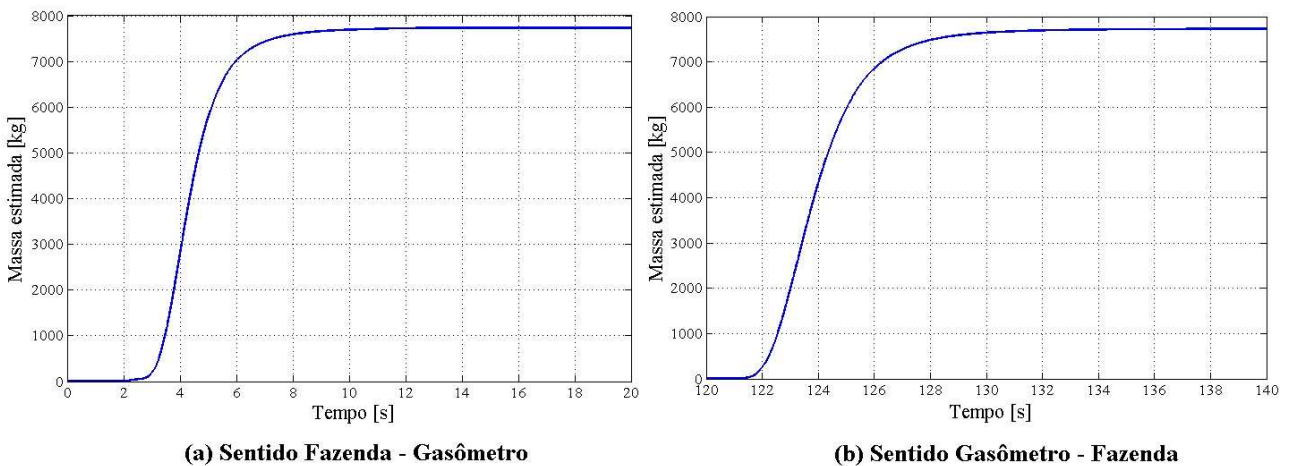


Figura 4. Vista em detalhe da estimativa de massa (simulações).

Nas Figuras (3) e (4), é possível observar que as estimativas obtidas convergem satisfatoriamente para o valor da massa efetivamente transportada, e que o tempo necessário para a convergência (de cerca de 10 s) é relativamente curto frente ao tempo total de viagem. Também convém ressaltar o fato de que o valor da massa estimada é reinicializado (*reset*) no início de cada viagem, de modo que essa convergência ocorre mesmo quando nenhum conhecimento sobre a massa transportada é assumido *a priori*. Dessa forma, esses resultados indicam que o método de estimativa utilizado apresenta características de convergência satisfatórias.

## 5. AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DO ESTIMADOR DE MASSA

Para a aplicação experimental do estimador de massa no Aeromóvel, desenvolveu-se um sistema dedicado de controle e aquisição de dados. O referido sistema foi planejado para operações embarcadas, de modo a possibilitar a aplicação do algoritmo de estimativa em tempo real. Uma descrição detalhada deste sistema pode ser encontrada em Sarmanho Jr. (2009).

Os dados referentes ao deslocamento do veículo foram obtidos por meio de um *encoder* incremental indutivo, que foi acoplado à roda. O *encoder* possui 50 fendas, igualmente espaçadas em 32mm. Os sinais de velocidade e aceleração do veículo foram obtidos a partir do sinal de deslocamento, por meio de derivação numérica.

Além dos dados referentes às variáveis de translação do veículo, o algoritmo de estimativa da massa transportada também requer o conhecimento da diferença entre as pressões aplicadas às aletas do mesmo para que a força resultante seja determinada. Por essa razão, o veículo também foi dotado de um transmissor de pressão diferencial de -20 à +20 kPa acoplado às aletas. Uma vez que o sinal de saída deste sensor é dado sob a forma de uma corrente elétrica, o mesmo precisa ser convertido em termos de uma tensão elétrica equivalente para que sua leitura pelo módulo de conversão analógico-digital ocorra de forma adequada.

Os sinais de todos os sensores acima mencionados estão sujeitos a ruído eletromagnético, o que prejudica muito a caracterização das variáveis de interesse. Por essa razão, foi necessário utilizar mecanismos de filtragem para estes sinais. Os filtros foram implementados digitalmente, tendo por base a topologia de *butterworth* para filtros tipo *passa-baixa*. As frequências de corte e as ordens dos filtros utilizados são dadas na Tabela (3).

**Tabela 3: Filtros digitais utilizados no programa.**

Sinais	Ordem do filtro	Frequência de corte [rad/s]
Posição	2	350
Velocidade	3	15
Aceleração	8	3
Sensor de pressão diferencial	3	15

O hardware utilizado para controle e aquisição de dados é uma placa da empresa alemã Dspace®, modelo DS1103. Esta é uma placa dedicada ao desenvolvimento de algoritmos de controle em tempo real, independente das características do computador em que está acoplada. Por essa razão, a Dspace® apresenta unidades próprias de processamento e memória, bem como um grande número de entradas e saídas (tanto digitais como analógicas) para sensores e atuadores. Além disso, sua interface de programação se dá por meio do pacote computacional Matlab-Simulink®, e os dados coletados ao longo dos experimentos também são armazenados em arquivos compatíveis com o mesmo *software*. Dessa forma, as tarefas de programação do sistema e análise posterior dos dados obtidos podem ser feitas de uma forma muito facilitada, devido ao grande número de blocos e funções “prontas” que são oferecidas por este pacote computacional. O período de aquisição e de ciclo de processamento utilizado durante os testes foi de  $2 \cdot 10^4$ s.

### 5.1. Testes e Resultados

Os testes foram realizados na linha piloto de Porto Alegre, utilizando-se um veículo especial destinado a experimentos. De acordo com Aeromóvel (2007), este veículo experimental possui uma massa aproximada de 5620kg. Esta massa é pouco inferior a de um veículo “real” de transporte (com todos os itens destinados ao conforto dos passageiros, tais como bancos e sistema de ar condicionado). Desta forma, foram usados vinte e cinco barris contendo água para simular o peso extra devido aos demais componentes e acessórios que o veículo completo possui. Os barris foram pesados com uma balança analógica e cada um possui massa de 75 kg  $\pm 3\%$ .

Para simular a presença de passageiros, também foram utilizados barris com água. Nos testes de avaliação do algoritmo de estimativa de massa, foram colocados os valores de 7735kg (25 barris), 9610kg (50 barris), 11485kg (75 barris) e 13360kg (100 barris).

Para a avaliação da estimativa de massa, utilizou-se o procedimento padrão de operação do sistema Aeromóvel para a linha piloto de Porto Alegre. Esta linha é do tipo *Shuttle*, com dois pontos de parada: Estação Gasômetro e Estação Fazenda. Este procedimento de operação consiste na aplicação dos seguintes passos:

- O veículo Aeromóvel é colocado em um ponto de partida (definido como  $x = 0$ ) na estação Fazenda. Este ponto é o local onde o veículo deve parar no retorno a esta estação.

- O veículo se desloca até a estação Gasômetro. Durante esta fase, o procedimento de estimativa de massa é efetuado.
- O veículo pára na estação por aproximadamente 30s antes de iniciar o trajeto de retorno. Neste período, o algoritmo de estimativa de massa é reinicializado (*reset*).
- O veículo se desloca para a estação Fazenda. Durante esta fase, o procedimento de estimativa de massa é efetuado novamente.
- Após a parada, os dados coletados ao longo do teste são gravados em arquivos “permanentes”, isto é, são transferidos do *buffer* do sistema de aquisição para o disco rígido de um computador.

Este procedimento de teste foi repetido três vezes para cada valor de massa transportada, de modo a se verificar a repetibilidade dos resultados obtidos. Na Figura (5) são apresentadas fotografias dos procedimentos experimentais realizados na linha piloto, onde o veículo encontra-se carregado com diferentes níveis de massa.



Figura 5. Veículo experimental sob diferentes condições de carregamento.

A Tabela (4) apresenta o comportamento da estimativa de massa constatado durante os testes realizados.

Tabela 4. Resultados experimentais do algoritmo de estimativa de massa.

Experimento	Massa nominal [kg]	Massa estimada [kg] Sentido F→G	Desvio [%]	Massa estimada [kg] Sentido G→F	Desvio [%]
1	7735	7712	-0,30	7805	0,90
2	7735	7646	-1,15	7786	0,66
3	7735	7686	-0,63	7905	2,20
Média		7681	-0,70	7832	1,25
Desvio		27,15		52,20	
1	9610	9390	-2,29	9432	-1,85
2	9610	9404	-2,14	9433	-1,84
3	9610	9365	-2,55	9512	-1,02
Média		9386	-2,33	9459	-1,57
Desvio		16,13		37,48	
1	11485	11128	-3,11	10953	-4,63
2	11485	11235	-2,18	11049	-3,80
3	11485	11262	-1,94	11093	-3,41
Média		11208	-2,41	11031	-3,95
Desvio		57,86		58,45	
1	13360	13109	-1,88	12586	-5,79
2	13360	13253	-0,80	12945	-3,11
3	13360	13385	0,19	13132	-1,71
Média		13249	-0,83	12887	-3,54
Desvio		112,71		226,56	

F→G indica o deslocamento da estação Fazenda para Gasômetro.

G→F indica o deslocamento do Gasômetro para Fazenda.

Na Tabela (4), é possível verificar que os valores de massa estimados diferem no máximo em 5,79% em relação aos valores nominais transportados. Contudo, analisando-se as diferenças entre cada grupo de mesma massa, nota-se que o desvio entre as médias dos valores estimados e o valor nominal de massa transportada em cada caso é de aproximadamente 2%. Esses resultados são compatíveis com o nível de incerteza da massa de água transportada pelos barris de teste, o que confirma as propriedades que foram previstas de forma analítica e por meio de simulação para a convergência das estimativas realizadas pelo algoritmo utilizado.

Nas Figuras (6), (7) e (8), são ilustrados os resultados obtidos experimentalmente para o caso em que a massa transportada é de 7735 kg. A exemplo do que foi feito na Seção 4, a Fig. (6) ilustra o comportamento do estimador de massa ao longo de um ensaio completo de ida e volta, enquanto as Figuras (7) e (8) apresentam visões em detalhe dos períodos transientes das estimativas realizadas. As defasagens temporais constatadas entre os diferentes testes ilustrados nestas figuras ocorrem porque o procedimento de estimativa de massa é ativado somente quando o veículo inicia seu deslocamento ( $\dot{x} \neq 0$ ). Para o sistema real, isto ocorre em diferentes instantes de tempo.

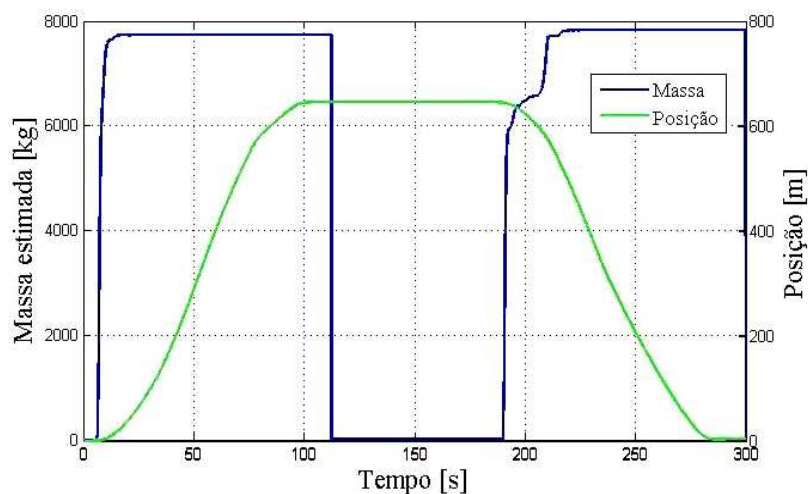


Figura 6. Levantamento experimental da estimativa de massa durante uma viagem ida-volta (massa transportada: 7735kg).

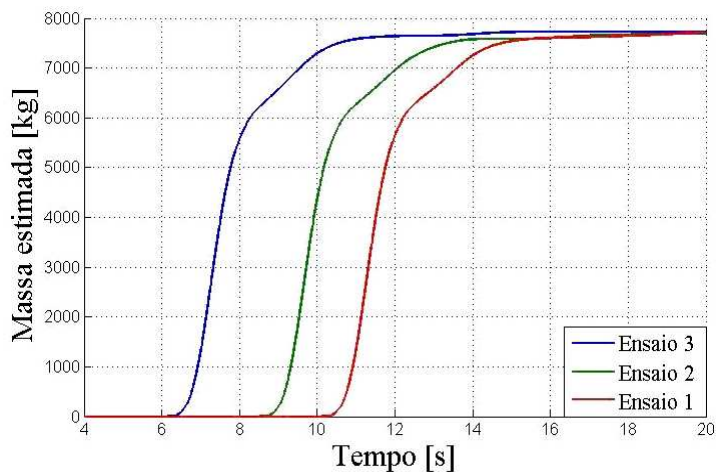


Figura 7. Estimativas de massa no sentido Fazenda - Gasômetro (massa transportada: 7735kg).

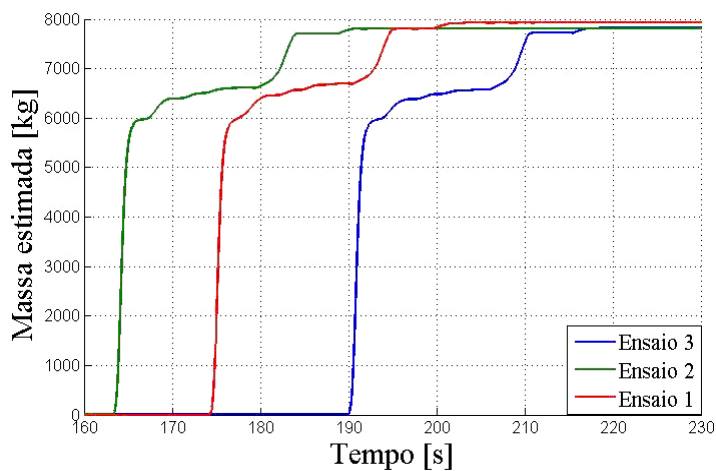


Figura 8. Estimativa de massa no sentido Gasômetro - Fazenda (massa transportada: 7735kg).



Na Figura (8), constata-se que o comportamento do estimador de massa durante o percurso no sentido Gasômetro-Fazenda é significativamente diferente tanto daquele observado no sentido Fazenda - Gasômetro (Fig. (7)) como daquilo que era de se esperar com base nas simulações (Fig. (4.b)). Isto ocorre porque, no início do deslocamento sentido Gasômetro - Fazenda, a via apresenta um declive. Assim, a aceleração do veículo é influenciada pelas forças gravitacionais, sendo, por um curto período, a principal força atuante sobre o veículo. Este efeito é bastante diferente do que ocorre no sentido Fazenda - Gasômetro, onde a principal força que age sobre o veículo é sempre advinda da diferença de pressão entre as aletas. Desta forma, o valor da força resultante aplicada ao veículo é influenciado pelo efeito da gravidade durante o período em que o veículo percorre o declive, o que afeta o valor da estimativa feita para a massa transportada. Posteriormente, sem o efeito do declive, o comportamento da força resultante volta a ser influenciado predominantemente pela dinâmica das pressões no interior da via, de modo que o valor da estimativa de massa volta a ser atualizado continuamente até convergir para valores próximos ao da massa nominal efetivamente transportada.

## 6. CONCLUSÕES

Neste trabalho, foi proposta a utilização de um algoritmo recursivo para a estimativa *online* da massa transportada pelo sistema Aeromóvel. Os elementos principais que caracterizam a aplicação do método de estimativa foram apresentados, incluindo-se equacionamento da força resultante aplicada ao veículo. Em particular, foi demonstrado que o método de estimativa utilizado assegura que o valor dessa estimativa deve convergir assintoticamente para o valor real da massa transportada se o sistema for excitado de forma persistente, resultado que é corroborado pelos testes de simulação realizados.

O desempenho do algoritmo de estimativa aqui utilizado também foi avaliado experimentalmente. Nessa avaliação, verificou-se que os valores obtidos por meio de tal estimador são compatíveis com o nível de incerteza presente nas massas de teste utilizadas. Além disso, os resultados obtidos apresentaram um grau satisfatório de repetibilidade. Dessa forma, pode-se concluir que o algoritmo utilizado se apresenta como uma alternativa vantajosa para obtenção do valor da massa transportada pelo sistema Aeromóvel, evitando-se, assim, a utilização de aparatos de instrumentação dispendiosos ou que necessitem regularmente de procedimentos complexos de calibração e manutenção.

Trabalhos futuros estarão voltados à utilização do algoritmo de estimativa de massa aqui proposto em diferentes aplicações, tais como o controle de trajetória e de frenagem precisa e a otimização de sua eficiência energética para diferentes condições de operação.

## 7. REFERÊNCIAS

- Aeromóvel, 2007. "Relatório Sobre as Condições Técnicas da Linha Piloto", Relatório Interno, Porto Alegre, Brasil.
- Armstrong-Hélouvy, B., Dupont P., Canudas de Wit, C., 1994, "A Survey of Models, Analysis Tools, and Compensation Methods for Control of Machines with Friction". *Automatica*, Vol. 30, n° 7, pp.1083-1138.
- Bae, H. S., Ryu, J., e Gerdes, J. C., 2001, "Road Grade and Vehicle Parameter Estimation for Longitudinal Control Using GPS", *IEEE Intelligent Transportation Systems Conference Proceedings*, Oakland, CA, USA.
- Breen, M. T., 1996, "System and Method for Determining Relative Vehicle Mass", U.S. Patent # 5,482,359.
- Britto, J. F. F. H., 2008. "Modelo Computacional do Sistema Aeromóvel de Transportes", Dissertação, UFRGS, Porto Alegre, Brasil.
- Fathy H. K., Kang D., Stein J. L., 2008. "Online Vehicle Mass Estimation Using Recursive Least Squares and Supervisory Data Extraction" *American Control Conference*, Seattle, WA, USA
- Fox, R. W., McDonald, A. T., 2001. "Introdução à Mecânica dos Fluidos", LTC, Rio de Janeiro.
- Gillespie, T. D., 1992. "Fundamentals of Vehicle Dynamics", Warrendale, Society of Automotive Engineers, Inc.
- Polach, O., 1999. "A Fast Wheel-Rail Forces Calculation Computer Code", *ADTranz*, Winterthur.
- Polach, O., 2005. "Creep Forces in Simulations of Traction Vehicles Running on Adhesion Limit". *Wear*, vol. 258. pp. 992-1000.
- Sarmanho Jr., C. A. C., 2009. "Aplicação do Algoritmo de Gain Schedule Baseado na Estimativa de Massa no Controle do Sistema de Freios do Sistema Aeromóvel", Dissertação, UFRGS, Porto Alegre, Brasil.
- Silva, N. S., Barbieri, G. W., Rohenkohl, P., 2008. "Relatório dos Experimentos Realizados na Linha Piloto", UFRGS, Porto Alegre, Brasil.
- Slotine, J.-J. e., Li, W., 1991. "Applied Nonlinear Control". Prentice-Hall, Inc., USA.
- Vahidi, A., Druzhinina, M., Stefanopoulou, A., e Peng, H., 2003, "Simultaneous Mass and Time-Varying Grade Estimation for Heavy-Duty Vehicles", *Proceedings of the American Control Conference*, Denver, CO, USA.
- Van Wylen, Gordon J., 1995. "Fundamentos da Termodinâmica Clássica", 4. ed. Edgard Blücher. São Paulo.

## 8. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído no seu trabalho.

## APPLICATION OF A RECURSIVE ALGORITHM FOR MASS ESTIMATION TO AN AUTOMATIC URBAN TRANSPORT SYSTEM

Carlos Arthur Carvalho Sarmanho Jr., sarmjunior@hotmail.com<sup>1</sup>

Eduardo André Perondi, perondi@mecanica.ufrgs.br<sup>1</sup>

Mário Roland Sobczyk Sobrinho, sobzique@yahoo.com.br<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Federal University of Rio Grande do Sul, Rua Sarmento Leite, 425. CEP: 90050-170, Porto Alegre-RS, Brazil.

**Abstract:** *This paper discusses the application of a recursive mass estimating algorithm to the operation of an automated people mover system called Aeromovel. The mathematical structure of the algorithm is presented, including an analysis of its convergence properties. A detailed description of the experimental procedure employed in the validation of the algorithm is also given. The effectiveness of the studied estimator is illustrated by means of simulation as well as experimental results.*

**Keywords:** *automated people mover, parameter identification, mass estimator.*

### RESPONSIBILITY NOTICE

The authors are the only responsible for the printed material included in this paper.