

# SOBRE A ESTABILIDADE DO CONTROLE DE ROBÔS MÓVEIS VIA FUSÃO DAS SAÍDAS DE DIVERSOS CONTROLADORES

EDUARDO O. FREIRE<sup>1,2</sup>, TEODIANO F. BASTOS-FILHO<sup>2</sup>, MÁRIO SARCINELLI-FILHO<sup>2</sup>, RICARDO CARELLI<sup>3</sup>

<sup>1</sup> *Grupo de Pesquisa em Automação do Instituto de Tecnologia e Pesquisa da Universidade Tiradentes  
Av. Murilo Dantas, 300, Farolândia 49032-490 Aracaju/SE, Brasil*

<sup>2</sup> *Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Espírito Santo  
Av. Fernando Ferrari, s/n 29060-900 Vitória/ES, Brasil*

<sup>3</sup> *Instituto de Automática, Universidad Nacional de San Juan  
Av. San Martín Oeste, 1112 5400 San Juan, Argentina*

*E-mails: eduardo\_freire@unit.br, tfbastos@ele.ufes.br,  
mario.sarcinelli@ele.ufes.br, rcarelli@inaut.unsj.edu.ar*

**Resumo**— Uma nova arquitetura proposta pelos autores em artigos anteriores para o controle da navegação de robôs móveis, denominada de fusão das saídas de diferentes controladores, é retomada neste artigo, com o objetivo de analisar sua estabilidade. Tanto uma análise formal de estabilidade no sentido de Lyapunov quanto uma conjectura baseada em considerações sobre a energia do sistema é apresentada. Além disso, um supervisor é incluído na arquitetura de controle original com o objetivo de detectar mudanças nas fases de navegação do robô e garantir o cumprimento da conjectura de estabilidade. O sistema de controle assim modificado é implementado em um robô comercial e vários experimentos práticos são executados. Um deles é aqui apresentado com o objetivo de ilustrar o desempenho do sistema de controle global.

**Abstract**— A new architecture proposed by the authors in previous papers for controlling the navigation of a mobile robot, called fusion of the output of different controllers, is considered again. The novelty here included is the analysis of the stability of such control architecture. Both a formal Lyapunov-type analysis and a conjecture based on energy considerations are presented. In addition, a supervisor is included in the original control architecture in order to allow detecting changes in the robot navigation phases and ensuring the accomplishment of the stability conjecture. The control system thus modified is implemented in a commercial robot and practical experiments are run. Their results are presented in order to illustrate the system performance.

**Keywords**— Mobile robots; Robot control; Data fusion; Kalman filter; Lyapunov functions.

## 1 Introdução

Um importante aspecto no controle de robôs móveis consiste em decidir qual ação deve ser executada no instante seguinte. Este tipo de problema é conhecido como *Action Selection Problem* – ASP, ou *Behavior Co-ordination Problem* (Pirjanian, 2000). As arquiteturas de controle utilizadas para solucionar este tipo de problema, as quais são conhecidas como ASM's (*Action Selection Mechanisms*), se agrupam em duas categorias, a saber esquemas baseados em arbitração e esquemas baseados em fusão de comandos.

Esquemas baseados em arbitração são adequados para seleção de comportamentos (onde a cada momento um único comportamento tem o controle total do sistema). Eles se subdividem em três categorias, a saber *mecanismos baseados em prioridades*, *mecanismos tipo Winner-takes-all* e *mecanismos baseados em estados*. Exemplos de esquemas baseados em arbitração incluem a Arquitetura de Subsunção de Brooks (1986), Sistemas a Eventos Discretos e Redes de Ativação (Pirjanian, 2000).

Por sua vez, os esquemas baseados em fusão de comandos permitem que um conjunto de comportamentos compartilhe o controle do sistema em cada momento. Eles podem ser divididos em quatro categorias, a saber *Votação* (por exemplo, a arquitetura DAMN (Rosenblatt, 1997)), *Superposição* (por

exemplo a arquitetura AuRA (Arkin, 1997; Arkin e Balch, 1998)), *Múltiplos Objetivos* (por exemplo a arquitetura *Multiple Objective Decision-Making Control*, (Pirjanian, 2000)), *Lógica Nebulosa* (por exemplo a abordagem *Multivaluated Logic Approach*, (Saffiotti et al., 1995)).

Este artigo considera um novo ASM recentemente proposto pelos mesmos autores, o qual consiste na fusão das saídas de diferentes controladores através de um Filtro de Informação Descentralizado (DIF) (Freire et al., 2001; Freire et al., 2002), para a qual é realizada uma análise de estabilidade. Para o caso em que os controladores envolvidos no processo de fusão possuem o mesmo objetivo de controle uma análise formal da estabilidade no sentido de Lyapunov é realizada. Já no caso em que os controladores envolvidos no processo de fusão não possuem o mesmo objetivo de controle, uma conjectura de estabilidade baseada em considerações de energia é apresentada. Além disso, um *supervisor* é adicionado à arquitetura original, com o objetivo de fazer com que se cumpram as premissas nas quais está baseada tal conjectura.

Estes tópicos são abordados da seguinte forma: a Seção 2 apresenta como a arquitetura proposta em Freire et al. (2001 e 2002) é alterada para incluir o *supervisor*. A Seção 3 apresenta a análise de estabilidade propriamente dita, que é dividida em duas par-

tes. A primeira considera que os controladores envolvidos no processo de fusão possuem o mesmo objetivo de controle, e prova que a arquitetura é estável no sentido de Lyapunov. Na segunda parte considera-se a situação mais geral em que o processo de fusão envolve controladores com diferentes objetivos de controle, e é apresentada uma conjectura de estabilidade baseada em considerações de energia. Na seqüência, a Seção 4 apresenta um exemplo em que um robô móvel navega usando a arquitetura de controle considerada, com o objetivo de verificar o seu desempenho e o cumprimento da conjectura de estabilidade apresentada. Finalmente, na Seção 5 estão as principais conclusões.

## 2 A Arquitetura de Controle Modificada

A arquitetura de controle proposta em Freire et al. (2001 e 2002) é baseada na fusão das saídas de um conjunto de controladores utilizando um Filtro de Informação Descentralizado (DIF). A Fig. 1 representa uma implementação desta arquitetura de controle para solucionar o problema de um robô móvel navegando em um ambiente composto por corredores e salas de escritórios. A novidade é a presença de um sistema supervisor que é adicionado à arquitetura para fazer com que se cumpram as premissas nas quais está baseada a conjectura de estabilidade, como será discutido na Seção 3. Como mostra a Fig. 1, cada controlador recebe informações sensoriais e

produz como saídas velocidades lineares e angulares, que por sua vez são aplicadas às entradas de filtros de informação locais, os quais, junto com o filtro de informação global, definem o filtro de informação descentralizado (Freire et al., 2001).

Uma covariância medindo a confiabilidade dos dados observados é associada a cada filtro de informação local. A saída do filtro de informação global é mais próxima à saída do filtro de informação local de menor covariância. Desse modo, o sistema combina informações de velocidades linear e angular provenientes de diferentes controladores utilizando o DIF, que é um método de fusão otimizado (Mutambara, 1998).

Quando se realiza a fusão das saídas de diferentes controladores, cada covariância representa uma medição do grau de adequação de cada controlador à configuração atual do ambiente. Quanto menor for a covariância associada a um certo controlador, mais adequado ele é. Desse modo, se uma inferência adequada da configuração do ambiente estiver disponível, um grau de adequação (covariância) pode ser associado a cada controlador em cada instante. A configuração do ambiente é inferida a partir das informações provenientes dos sistemas de sensoria-mento do robô (neste caso, um conjunto de sensores ultra-sônicos), ou a partir de informações provenientes do supervisor, como será discutido na Subseção 3.2.

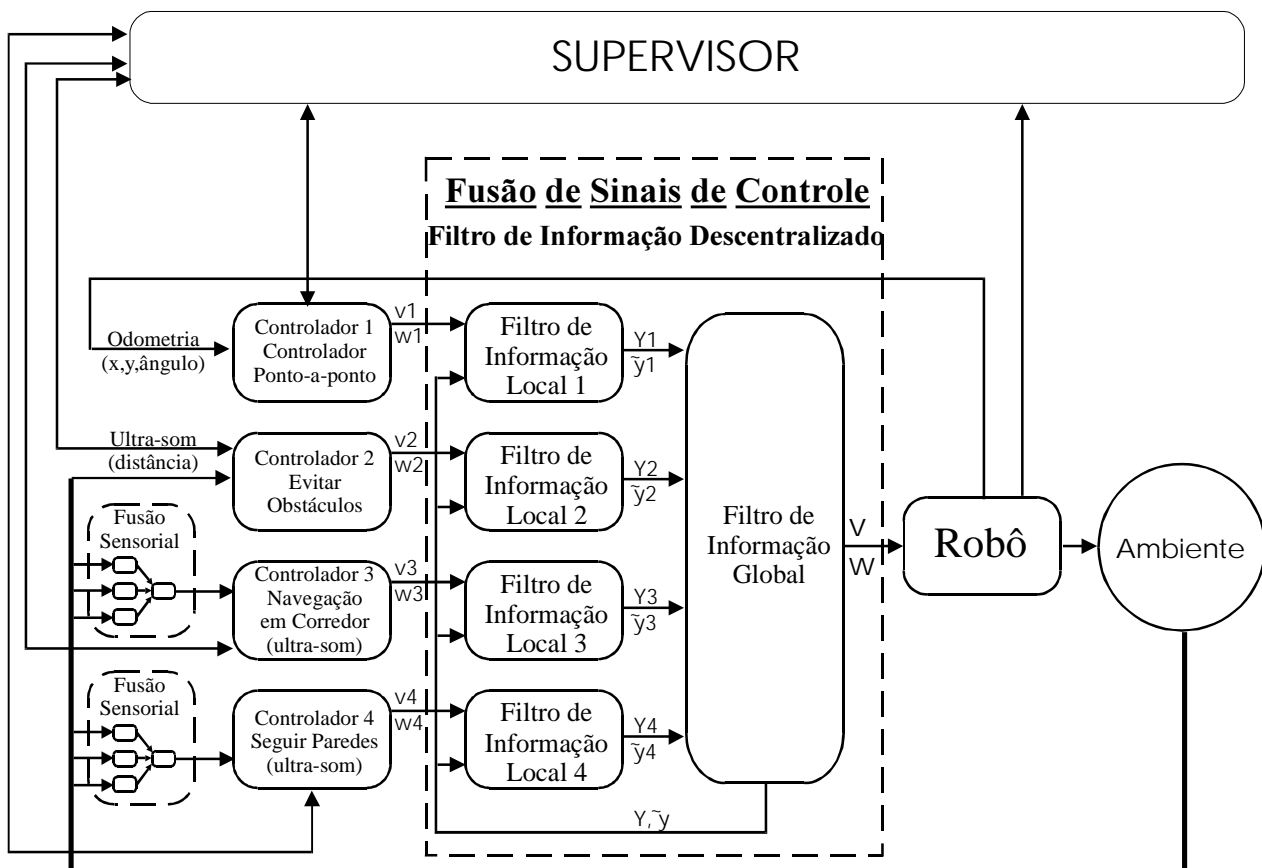


Fig. 1: A arquitetura de controle proposta, incluindo o sistema supervisor.

A maneira como as informações provenientes dos sistemas de sensoriamento são utilizadas para definir a covariância associada a cada controlador é através de lógica nebulosa, como descrito em Freire et al. (2002). Por outro lado, a maneira como o sistema supervisor atua é descrita na próxima seção.

### 3 Análise da Estabilidade da Nova Arquitetura

Para projetar um sistema de controle baseado na nova arquitetura proposta (Fig. 1) é necessário atender a alguns requisitos. Inicialmente, é necessário garantir que o sistema cumpra algumas condições, para assegurar que ele apresente um “bom comportamento”, as quais serão expressas como condições de estabilidade. Como parte destas condições, todos os controladores utilizados devem ser estáveis no sentido de Lyapunov, o que permite a atribuição de uma função energia a cada um deles (funções de Lyapunov normalizadas). Com isto, é possível definir a *função energia do sistema* como sendo a soma das funções energia associadas aos vários controladores que o integram. Em segundo lugar, o ambiente de operação deve ser parcialmente estruturado. Isto significa que o robô não tem nenhuma informação a respeito dele, exceto por condições muito gerais, como as exigências de que o ambiente seja fechado e plano. Também é necessário garantir que o ponto de destino deve estar localizado em uma área livre do ambiente.

Sob o aspecto de estabilidade, consideram-se dois casos de navegação empregando a arquitetura de controle proposta. No primeiro caso, os controladores ativos em uma certa etapa de navegação são tais que eles possuem o mesmo objetivo de controle. No segundo caso, os objetivos de controle dos controladores ativos são diferentes. Ambos os casos são analisados nas subseções seguintes. Para o primeiro caso a estabilidade é provada por meio de uma rigorosa análise do tipo Lyapunov, enquanto que para o segundo caso é proposta uma conjectura para o “bom comportamento” do sistema, baseada em funções energia. Com o objetivo de garantir o cumprimento desta conjectura, inclusive, um sistema supervisor foi incorporado à arquitetura de controle, conforme ilustra a Fig. 1.

#### 3.1 Controladores com Mesmo Objetivo de Controle

Nesta subseção, é analisada a estabilidade do sistema de controle resultante da fusão das saídas de diferentes controladores com o mesmo objetivo de controle. Por exemplo, suponha-se que estão disponíveis três controladores para executar a tarefa de navegar ao longo de corredores. O primeiro controlador é baseado em informações provenientes do sistema de sensoriamento ultra-sônico, que informa ao robô a sua posição e orientação relativa ao eixo central do corredor. O segundo controlador tenta igualar o fluxo óptico medido nas paredes à direita e à esquerda do robô. O último controlador tenta igualar os ângulos

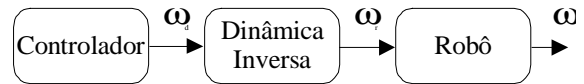


Fig. 2: Sistema com somente um controlador.

formados pela junção das paredes com o piso no plano de imagem. Cada um desses controladores produz como saída um sinal de controle de velocidade angular e, como mencionado antes, eles devem ser estáveis no sentido de Lyapunov.

Como um primeiro passo, considere-se que somente um controlador está sendo utilizado, como ilustra a Fig. 2. Considere-se, também, que a dinâmica da velocidade angular do robô pode ser modelada como

$$\frac{\omega}{\omega_r} = \frac{k}{s^2 + as + b}$$

de maneira que  $\omega_r$  pode ser calculado como

$$\omega_r = \frac{1}{k}(\ddot{\omega} + a\dot{\omega} + b\omega) \quad (1)$$

Utilizando uma lei de controle de dinâmica inversa dada por

$$\omega_r = \frac{1}{k}(\eta + a\dot{\omega} + b\omega)$$

onde

$$\begin{aligned} \tilde{\omega} &= \omega_d - \omega \\ \eta &= \dot{\omega}_d + k_d \tilde{\omega} + k_p \tilde{\omega} \quad k_p, k_d > 0 \end{aligned} \quad (2)$$

a equação de laço fechado, para o conhecimento exato da dinâmica do robô, é dada por

$$\eta = \ddot{\omega}$$

Então, substituindo a lei de controle da Eq. (2), é possível obter

$$\ddot{\tilde{\omega}} + k_d \dot{\tilde{\omega}} + k_p \tilde{\omega} = 0$$

o que implica que  $\tilde{\omega}(t) \rightarrow 0$ .

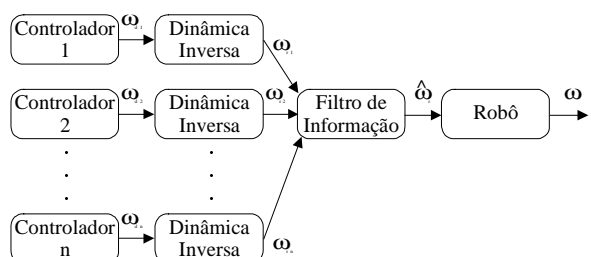


Fig. 3: Fusão das saídas de diferente controladores.

Utilizando mais de um controlador com o mesmo objetivo de controle, como ilustra a Fig. 3, e supondo que todas as variáveis de estado associadas a eles estão disponíveis em todos os instantes de tempo, é possível escrever o seguinte conjunto de equações

$$\begin{aligned}\omega_{r1} &= \frac{1}{k}(\eta_1 + a\dot{\omega} + b\omega) \\ \omega_{r2} &= \frac{1}{k}(\eta_2 + a\dot{\omega} + b\omega) \\ &\vdots \\ \omega_{rn} &= \frac{1}{k}(\eta_n + a\dot{\omega} + b\omega)\end{aligned}$$

Então, o sinal de controle fusionado é

$$\hat{\omega}_r = \frac{1}{k}(\hat{\eta} + a\dot{\omega} + b\omega) \quad (3)$$

Um sinal de controle ideal  $\omega_d = \omega_{di} + \Delta\omega_{di}$  corresponde a um  $\eta$  ideal tal que

$$\begin{aligned}\eta &= \eta_1 + \Delta\eta_1 \\ \eta &= \eta_2 + \Delta\eta_2 \\ &\vdots \\ \eta &= \eta_n + \Delta\eta_n\end{aligned}$$

o que resulta em

$$\eta = \hat{\eta} + \Delta\hat{\eta} \quad (4)$$

Igualando as Eqs. (1) e (3) obtém-se

$$\hat{\eta} = \dot{\omega}$$

e, finalmente,

$$\hat{\eta} = \eta - \Delta\hat{\eta} = \dot{\omega} \quad (5)$$

levando em conta a Eq. (4).

Para as Eqs. (2) e (5) é possível escrever a seguinte dinâmica para o erro da velocidade angular

$$\ddot{\tilde{\omega}} + k_d\dot{\tilde{\omega}} + k_p\tilde{\omega} = \Delta\hat{\eta} \quad (6)$$

Definindo o vetor de estados  $x = [\tilde{\omega} \quad \dot{\tilde{\omega}}]^T$ , a Eq. (6) pode ser escrita como

$$\dot{x} = \mathbf{A}x + \delta(x) \quad (7)$$

onde

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ -k_p & -k_d \end{pmatrix} \quad \delta(x) = \begin{pmatrix} 0 \\ \Delta\hat{\eta} \end{pmatrix}$$

É simples provar que o sistema descrito pela Eq. (7) possui uma solução limitada (*ultimately bounded solution*) (Khalil, 1996). Isto significa que existem  $b, c > 0$ , tais que para cada  $\alpha \in (0, c)$  existe uma constante positiva  $T = T(\alpha)$  tal que

$$\|x(t_0)\| < \alpha \Rightarrow \|x(t)\| \leq b \quad \forall t \geq t_0 + T(\alpha)$$

onde  $b$  é o limitante (*ultimate bound*). Tomando a seguinte função candidata de Lyapunov

$$V = x^T \mathbf{P}x, \quad \mathbf{P} = \mathbf{P}^T > 0$$

sua derivada temporal é

$$\dot{V} = -x^T \mathbf{Q}x + 2x^T \mathbf{P}\delta(x) \quad (8)$$

onde

$$\mathbf{A}^T \mathbf{P} + \mathbf{P}\mathbf{A} = -\mathbf{Q}$$

Tomando limites para os dois termos da Eq. (8)

$$\begin{aligned}-x^T \mathbf{Q}x &\leq -\lambda_{\min}(\mathbf{Q})\|x\|^2 \\ \|2x^T \mathbf{P}\delta(x)\| &\leq 2\lambda_{\max}(\mathbf{P})\|x\|\|\delta(x)\|\end{aligned}$$

é possível escrever

$$\dot{V} \leq -\lambda_{\min}(\mathbf{Q})\|x\|^2 + 2\lambda_{\max}(\mathbf{P})\|x\|\|\delta(x)\| \quad (9)$$

Da Eq. (7)

$$\|\delta(x)\| \leq |\Delta\hat{\eta}|$$

e assim, de acordo com a Eq. (9), é possível escrever

$$\begin{aligned}\dot{V} &\leq -(1-\theta)\lambda_{\min}(\mathbf{Q})\|x\|^2 - \theta\lambda_{\min}(\mathbf{Q})\|x\|^2 + \\ &\quad + 2\lambda_{\max}(\mathbf{P})\|x\|\|\Delta\hat{\eta}\|\end{aligned}$$

com  $0 < \theta < 1$ . Finalmente, obtém-se

$$\dot{V} \leq -(1-\theta)\lambda_{\min}(\mathbf{Q})\|x\|^2, \quad \forall \|x\| \geq \frac{2\lambda_{\max}(\mathbf{P})\|\Delta\hat{\eta}\|}{\lambda_{\min}(\mathbf{Q})\theta}$$

de maneira que o limitante (Khalil, 1996) é

$$b = \frac{2\lambda_{\max}(\mathbf{P})}{\lambda_{\min}(\mathbf{Q})} \sqrt{\frac{\lambda_{\max}(\mathbf{P})}{\lambda_{\min}(\mathbf{P})}} \frac{|\Delta\hat{\eta}|}{\theta}$$

Como a fusão dos sinais de controle é realizada utilizando um Filtro de Informação Descentralizado (que assim como o Filtro de Kalman é um método de fusão otimizado (Mutambara, 1998)), o limitante do desvio padrão do erro final é menor do que aqueles que correspondem aos erros produzidos por cada controlador. Isto significa que o erro entre o valor real e o valor desejado da velocidade angular converge a uma região limitada em um tempo finito (*ultimately bounded solution*), e que a dimensão de tal região é menor do que quando se utiliza separadamente cada um dos controladores envolvidos no processo de fusão.

O caso mais geral, onde os controladores envolvidos no processo de fusão possuem objetivos de controle diferentes, é abordado na próxima seção.

### 3.2 Controladores com Diferentes Objetivos de Controle

A análise de estabilidade realizada na seção anterior não tem validade quando os controladores envolvidos no processo de fusão não possuem os mesmos objetivos de controle. Um exemplo é o sistema mostrado na Fig. 1, no qual os quatro controladores envolvidos possuem objetivos de controle diferentes. Neste caso, propõe-se uma conjectura baseada em fases de navegação e na energia associada ao sistema.

Quando o robô está navegando entre um ponto de partida e um ponto de destino (objetivo final) ele passa por diversas fases de navegação. Uma fase de navegação é uma parte do caminho seguido pelo robô onde somente um objetivo de controle predomina. Se o objetivo principal de controle muda, então uma fase de navegação termina e outra se inicia. O sistema de controle detecta que ocorreu uma mudança de fase de navegação quando a função de energia associada a pelo menos um dos controladores cresce mais rápido do que cresceria em condições normais (devido ao fato de que tanto a velocidade angular quanto a linear são limitadas). A este tipo de crescimento chamaremos abrupto, enquanto que a um crescimento normal nos referiremos como gradual. Alguns exemplos de fases de navegação são seguir paredes, evitar obstáculos, seguir corredores, etc.

Desse modo, um detalhe importante ao se projetar um sistema de controle utilizando a arquitetura proposta é que deve existir pelo menos um controlador adequado a cada fase de navegação com que o robô irá se deparar ao longo do trajeto.

A respeito da estabilidade do sistema quando o processo de fusão envolve controladores com objetivos de controle diferentes, supõe-se que a função energia do sistema deve decrescer enquanto o robô permanece em uma fase de navegação. Para garantir isso, um *sistema supervisor* (ou simplesmente *supervisor*) é adicionado à arquitetura de controle (conforme ilustra a Fig. 1) para monitorar a função energia associada a cada controlador e também a função energia do sistema. Então, se a função energia do

sistema começa a crescer gradualmente, os controladores cujas funções energia estejam crescendo gradualmente serão eliminados do processo de fusão pelo supervisor (o que é equivalente a fazer a covariância associada a eles igual a infinito).

Como o ambiente de operação é desconhecido, os tipos e número de fases de navegação ao longo do trajeto do robô são desconhecidos. Além disso, é impossível determinar o momento exato em que uma mudança de fase de navegação irá ocorrer. Devido a isso, é possível considerar a mudança de fase de navegação como sendo uma perturbação. Por essa razão, permite-se que a função energia do sistema cresça na transição entre duas fases de navegação.

O supervisor também deve eliminar do processo de fusão os controladores que estiverem “fora de contexto”. Diz-se que um controlador está fora de contexto quando as suas variáveis de estado não estão disponíveis. Um exemplo desta situação é quando o robô está no centro de uma sala muito grande. Como o seu sistema de sensoriamento (neste artigo, somente sensores ultra-sônicos) não detecta nenhuma parede, o controlador de seguir parede e o controlador de seguir corredor estão ambos fora de contexto, pois não podem operar, já que o robô não consegue detectar uma parede ou um corredor para seguir.

Quando os controladores envolvidos no processo de fusão possuem diferentes objetivos de controle, não é possível uma demonstração formal da estabilidade do sistema como um todo. No entanto, os requisitos aqui apresentados para o sistema garantem que a sua função energia decresce ao longo de uma fase de navegação. Por outro lado, o sistema supervisor permite que a função energia do sistema cresça durante a transição entre duas fases de navegação, uma vez que esse evento é considerado como uma perturbação.

Para validar esta conjectura, vários experimentos foram realizados, mas, devido à limitação de espaço, somente um é apresentado na seção seguinte.

## 4 Resultados Experimentais

Para verificar o desempenho da arquitetura de controle modificada e se a conjectura de estabilidade proposta na Subseção 3.2 se cumpre, vários experimentos foram realizados. Porém, aqui são apresentados os resultados de apenas um deles, que consiste em guiar o robô a partir do ponto de coordenadas [0m, 0m] até o ponto de destino que está nas coordenadas [5m, 5.5m] em um ambiente composto por corredores e portas de acesso a vários escritórios. Este experimento foi escolhido porque permite demonstrar a capacidade que a arquitetura de controle possui de evitar pontos de mínimo local, ou seja, ela permite ao robô seguir além das coordenadas do ponto final, buscando um caminho que lhe permita acercar-se de tal ponto. A Fig. 4 mostra o trajeto percorrido pelo robô, ilustrando que ele vai mais à

direita do ponto de destino, seguindo pelo primeiro corredor, o que lhe permite alcançar o segundo e o terceiro corredores, onde está seu ponto de destino (note-se que se o robô estacionasse no primeiro corredor na altura em que está seu ponto de destino estaria configurado o atingimento de um ponto de mínimo local). Por sua vez, a Fig. 5 mostra como se comporta a função energia do sistema ao longo do percurso do robô.

Os experimentos foram executados usando um robô móvel PIONEER 2DX, o qual possui 16 sensores de ultra-som (dos quais somente 10 são efetivamente usados) e uma câmara CCD (não utilizada neste trabalho). Sua navegação é controlada por um computador de bordo (um K6-II de 500MHz) executando o sistema de controle mostrado na Fig. 1.

Para avaliar o desempenho do sistema de controle durante o experimento, três índices foram considerados (Pirjanian, 2000). A Tabela 1 mostra os valores obtidos no experimento apresentado, incluindo o valor ideal de cada índice. O índice *segurança* indica a menor distância medida pelos 16 sensores de ultra-som ao longo de todo trajeto, indicando assim o risco de colisão. O índice *velocidade média* indica a velocidade linear média do robô ao longo do trajeto. Finalmente, o índice *suavidade* é medido calculando o valor médio do módulo da diferença entre o valor atual e anterior da orientação do robô, indicando o grau de suavidade com que as manobras são executadas. A Tabela 1 também apresenta a distância percorrida no experimento e a sua duração.

Como ilustra o experimento (Fig. 4 e Tabela 1), o robô percorre um trajeto seguro e executa manobras suaves.

Tabela 1: Índices de avaliação de desempenho.

Índice	Valores Obtidos	Valores Ideais
Segurança	142 mm	500 mm
Velocidade Média	287 mm/s	300 mm/s
Suavidade	0.99°	0.31°
Distância Percorrida	18.11 m	17.50 m
Tempo	63.20 s	58.33 s

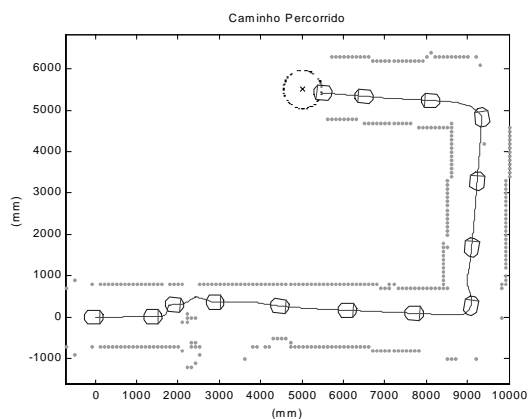


Fig. 4: Caminho percorrido pelo robô.

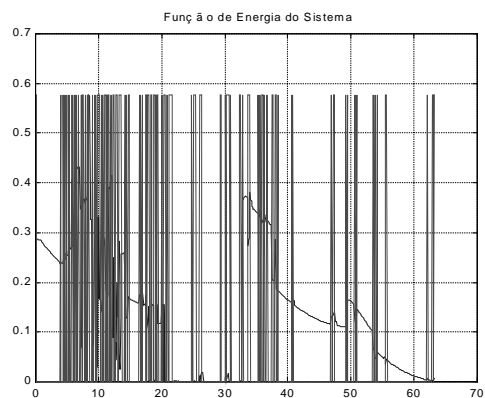


Fig. 5: Função Energia do Sistema.

A sua velocidade linear média é um pouco menor do que o valor ideal, devido ao fato de que a fusão de diferentes sinais de controle faz com que o robô navegue um pouco mais lentamente. O experimento também demonstra que a arquitetura de controle proposta, se bem projetada, permite evitar pontos de mínimo (um problema clássico) e que a conjectura de estabilidade proposta, no caso de fusão de controladores com diferentes objetivos de controle, se cumpre.

## 5 Conclusão

Neste artigo foram discutidos aspectos de estabilidade associados a uma nova arquitetura de controle para navegação de robôs móveis que foi recentemente proposta pelos autores. Tal arquitetura está baseada na fusão das saídas de diferentes controladores. Também é apresentado um exemplo de implementação de um sistema de controle baseado na arquitetura proposta, composto por um controlador para seguir corredores, um controlador para seguir paredes, um controlador para evitar obstáculos e um controlador ponto-a-ponto, que permite ao robô chegar a um ponto de destino.

O artigo apresenta uma demonstração formal de que a fusão das saídas de diferentes controladores com mesmo objetivo de controle possui uma solução limitada (*ultimately bounded solution*). Dessa forma, o sinal de controle resultante da fusão é melhor do que os sinais de controle produzidos por cada controlador separadamente, no sentido de que a variância do erro após a fusão é menor do que a variância do erro de cada controlador envolvido no processo de fusão.

O artigo também faz considerações a respeito da estabilidade da fusão das saídas de controladores com diferentes objetivos de controle. Neste caso, uma conjectura de estabilidade é apresentada e é validada através de vários experimentos, dos quais um é apresentado no artigo.

A conclusão, baseada nas análises matemáticas e nos resultados experimentais apresentados, é que a fusão das saídas de diferentes controladores efetiva-

mente apresenta um “bom comportamento” para uma aplicação como a navegação de um robô móvel em um ambiente composto por corredores e portas de acesso a escritórios, mesmo que haja obstáculos no caminho. Isto significa que o robô não perdeu o seu objetivo final, mesmo quando existiam obstáculos em seu caminho ou quando o ambiente o obrigava a desviar-se temporariamente do seu destino final.

### **Agradecimentos**

Eduardo Freire agradece à CAPES, FAP-SE e ITP-UNIT por financiarem este projeto. Dr. Ricardo Carelli agradece ao CONICET, ANPCyT e UNSJ por apoiarem esta pesquisa. Finalmente, todos os autores agradecem à fundação CAPES, do Brasil, e à SETCIP, da Argentina, pelo suporte que foi dado à cooperação entre a Universidade Federal do Espírito Santo (Brasil) e Universidad Nacional de San Juan (Argentina), cooperação esta em que este trabalho se insere.

### **Referências Bibliográficas**

- A. G. O. Mutambara. (1998). Decentralised estimation and control for multi-sensor systems. CRC Press, USA.
- A. Saffiotti, K. Konolige e E. Ruspini. (1995). “A multivaluated logic approach to integrating planning and control”, *Artificial Intelligence*, 76, pp. 481-526.
- E. O. Freire, R. Carelli, V. Mut, C. M. Soria, T. F. Bastos-Filho e M. Sarcinelli-Filho. (2001). “Mobile robot navigation based on the fusion of control signals from different controllers” *Anais da Conferência Européia de Controle de 2001 (ECC 2001)*, pp. 1828-1833. Porto, Portugal.
- E. O. Freire, T. F. Bastos-Filho, M. Sarcinelli-Filho, R. Carelli, R. e O. Nasisi. (2002). “A new mobile robot control architecture via control output fusion”, aceito para publicação nos *Anais do XV Congresso Mundial de Controle Automático do IFAC*, Barcelona, Espanha, 21-26 de julho.
- H. K. Khalil. (1996). *Non-linear systems*, Segunda Edição, Prentice-Hall, USA.
- J. Rosenblatt. (1997). DAMN: A distributed architecture for mobile navigation. Tese de Doutorado, Universidade Carnegie Melon, USA.
- P. Pirjanian. (2000). “Multiple objective behaviour-based control”, *Robotics and Autonomous Systems*, 31, pp. 53-60.
- R. A. Brooks. (1986) “Achieving artificial intelligence through building robots”, MIT A. I. Memo 899, Cambridge, MA, USA.
- R. C. Arkin and T. Balch. (1997). “AuRA: principles and practice in review”, *Experimental and Theoretical Artificial Intelligence*, 9, pp. 175-189.

R. C. Arkin. (1998). *Behaviour-based robotics*. The MIT Press, Reading, MA, USA.