

CONTROLE DE VELOCIDADE EM VEÍCULOS ROBÓTICOS ELÉTRICOS ACIONADOS POR DOIS MOTORES CC INDEPENDENTES

MAURO F. KOYAMA¹, JOSÉ R. AZINHEIRA², RAFAEL A. CORDEIRO³, JOSUÉ J. G. RAMOS¹, ELY C. DE PAIVA³, LUIZ G. B. MIRISOLA¹, HELIO AZEVEDO¹, SAMUEL S. BUENO¹

1. *Centro de Tecnologia da Informação Renato Archer – DRVC / CTI*
Rod. D. Pedro I, km 143,6 – 13081-970 – Campinas – SP – Brasil
mauro.koyama@cti.gov.br, josue.ramos@cti.gov.br,
luiz.mirisola@gmail.com, helio.azevedo@cti.gov.br,
samuel.bueno@cti.gov.br

2. *Instituto Superior Técnico - IDMEC / IST*
Av. Rovisco Pais, 1 - 1049-001 Lisboa – Portugal
jraz@dem.ist.utl.pt

3. *Universidade Estadual de Campinas – DPM / FEM*
Rua Mendeleiev, 200, Cidade Universitária Zeferino Vaz
13083-970 – Campinas – SP – Brasil
rcordeiro@fem.unicamp.br, elypaiva@fem.unicamp.br

Abstract— This article addresses the problem of speed control of a robotic all-terrain vehicle, driven by two DC electric motors that act independently on the rear wheels. From the observation and explanation that two speed control loops are not able to ensure the desired behavior of the electric motors (there are situations where a motor continues to run as a driver while the other one starts to act as a generator) two strategies are presented to solve this problem. Both strategies seek to equally distribute the torque between the motors, working on the relationship between the respective currents. One is based on heuristics, while the second one involves a PI regulator. The article presents these strategies and experimental results.

Keywords— Robotic land vehicles, electric vehicles, speed control, motor control.

Resumo— Este artigo aborda o problema de controle de velocidade de um veículo robótico todo-terreno, acionado por dois motores elétricos de corrente contínua (CC) que atuam de forma independente nas rodas traseiras. A partir da constatação e explicação de que duas malhas de controle de velocidade não são capazes de assegurar o comportamento desejado dos motores elétricos (há situações onde um motor continua a funcionar como propulsor enquanto que outro passa a atuar como gerador) são apresentadas duas estratégias para a solução do problema. Ambas buscam distribuir igualmente o torque entre os motores, atuando na relação entre as respectivas correntes. Uma delas é baseada em heurística, enquanto que a segunda envolve um regulador PI. O artigo apresenta essas estratégias e os resultados experimentais obtidos.

Palavras-chave— Veículos robóticos terrestres, veículos elétricos, controle de velocidade, controle de motores.

1 Introdução

Têm crescido o interesse e as pesquisas em veículos robóticos terrestres – ver por exemplo (Berger and Rumpe, 2012), motivado por pelo menos dois grandes cenários de aplicação. O cenário que vem recebendo maior ênfase diz respeito ao uso desses veículos em ambientes urbanos, seja como unidades de transporte sem condutor, seja no âmbito de sistemas de apoio à condução de veículos (i.e. sistemas de auxílio ao motorista) ou ainda visando sua movimentação por “estradas inteligentes”. Outro importante cenário de aplicação corresponde às diferentes possibilidades de uso desses veículos em campo - por exemplo, em robótica agrícola, veículos fora de estrada em mineração, dentre outras.

Nesse trabalho, considera-se a classe de veículos robóticos terrestres acionados nas rodas traseiras por dois motores de corrente contínua independentes, e direcionamento determinado pela orientação das duas rodas dianteiras montadas segundo mecanismo tipo Ackerman. É essa a configuração da plataforma

experimental do Projeto VERO - Veículo Robótico de Exterior (Bueno et al., 2009), (Mirisola et al. 2011), mostrada na Figura 1.



Figura 1. A plataforma robótica VERO.

A arquitetura de controle do VERO é composta por dois níveis. O nível mais baixo, baseado em microcontroladores interligados via rede CAN, é responsável pelas malhas de controle de movimentação do veículo e também pela sua utilização em modo manual de operação. Ele executa a leitura dos *encoders* e o envio dos comandos para os sistemas de potência que acionam os motores das rodas e da direção. O nível hierarquicamente superior suporta as funções mais complexas de controle e navegação (Bueno et al., 2009), (de Paiva et al. 2010), (Mirisola et al. 2011), (Martins et al. 2011), (Cordeiro et al., 2012), (Cordeiro et al., 2013). Ele congrega um conjunto sensorial (GPS, câmeras, lasers, central inercial, etc.) e dois processadores no padrão mini-ITX, interligados via barramento TCP/IP, além da funcionalidade de comunicação com uma estação de operação remota.

O presente artigo aborda a regulação das velocidades dos motores de tração do veículo, que é realizada no baixo nível segundo a arquitetura geral apresentada na Figura 2, implementada em microcontroladores PIC 18F4580 fabricados pela Microchip.

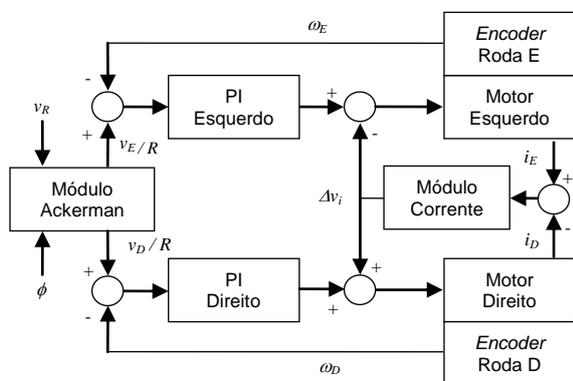


Figura 2. Arquitetura de controle básico de velocidade dos motores para a locomoção do veículo.

Primeiramente, são relembradas as restrições cinemáticas e as expressões que, dada uma velocidade desejada v_R e em função do ângulo ϕ de direção, medido por *encoder*, determinam as referências de velocidade para as rodas traseiras esquerda e direita, v_E e v_D respectivamente; essas expressões compõem o “Módulo Ackerman” da figura. Essas referências v_E e v_D , convertidas em velocidade angular pela divisão pelo raio das rodas (R), constituem as entradas para os controladores PI de velocidade dos motores, cujas saídas acionam os respectivos sistemas de potência para a alimentação de cada motor – assegurados por controlador Roboteq HDC2450 de dois canais independentes. Essas duas malhas utilizam, para realimentação, as rotações das rodas traseiras esquerda e direita - ω_E e ω_D respectivamente, fornecidas por *encoders* montados junto às rodas.

Mostra-se então que essas duas malhas de controle de velocidade não são capazes de assegurar o comportamento desejado dos motores elétricos, pois há situações onde um motor continua a funcionar

como propulsor enquanto que o outro passa a atuar como gerador; embora as duas velocidades permaneçam reguladas. Esta situação, indesejável para o funcionamento do veículo, foi detectada quando trafegando em terreno plano em boas condições de aderência; uma situação mais complexa seria a do veículo se locomovendo em terrenos de baixa aderência, sujeitos a escorregamentos (longitudinais) nas rodas motrizes.

Esse comportamento indesejado e o cenário de maior complexidade em baixa aderência, demonstram a necessidade de estratégias de controle mais elaboradas, que utilizem mais informações para as malhas fechadas do que as simples velocidades de rotação das rodas. Uma informação adicional, candidata a ser utilizada, é a corrente de cada motor, a qual caracteriza o torque em motores CC.

Assim, como um primeiro passo na busca de estratégias de controle de velocidade para veículos acionados independentemente nas duas rodas traseiras (o que poderá ser extrapolado para veículos com acionamentos elétricos individuais em cada uma das quatro rodas), é proposta a arquitetura de controle da figura 2, a qual se distingue pelo acréscimo do bloco “Módulo Corrente”, que introduz uma funcionalidade adicional, constituindo o tema principal desse artigo.

Esse módulo parte das correntes i_E e i_D , dos motores esquerdo e direito respectivamente (medidas pelo controlador Roboteq HDC2450), para gerar um termo de correção Δv_i que visa distribuir igualmente o torque entre os motores.

Considerando-se que as soluções devam ser simples o suficiente em termos de carga de processamento (para implementação nos microcontroladores PIC 18F4580 que compõem o baixo nível de arquitetura de controle do VERO), são apresentadas duas estratégias para este módulo: uma baseada em formulações heurísticas e outra implementada por um controlador PI. Resultados experimentais, utilizando a plataforma robótica mostrada na Figura 1, ilustram as situações descritas e validam as estratégias desenvolvidas.

Após essa seção introdutória, as seções subsequentes desse artigo estão organizadas segundo os temas e sequência explicitados anteriormente.

2 O “Módulo Ackerman”

Para uma velocidade desejada v_R e ângulo de direção ϕ , as relações cinemáticas que determinam as referências de velocidade esquerda (v_E) e direita (v_D) para as rodas traseiras do veículo foram apresentadas em (Martins et al., 2011).

Considerando a distância L entre os eixos e a distância D entre as rodas, essas relações compõem o “Módulo Ackerman” da Figura 2 e são dadas pelas equações:

$$v_E = v_R \left[1 - \frac{D}{2L} \tan(\phi) \right] \quad (1)$$

$$v_D = v_R \left[1 + \frac{D}{2L} \tan(\phi) \right] \quad (2)$$

As velocidades fornecidas por essas equações asseguram, em condições ideais de aderência e pela configuração cinemática do veículo, a inexistência de escorregamentos (longitudinais) nas rodas motrizes: se o ângulo de direção é nulo, as duas velocidades são iguais, pois o veículo desloca-se em linha reta; para curvas à esquerda a roda direita (externa à curva) gira mais rápido que a esquerda (interna à curva) e para curvas à direita a situação recíproca ocorre.

3 Descrição do Problema

Em algumas das movimentações do veículo em campo, foram observadas situações inesperadas, em que ele passava a locomover-se “inclinado para um dos lados”. Foi realizado então um minucioso procedimento de testes com a plotagem e análise do conjunto de dados registrados do VERO, visando identificar e compreender o que se passava.

A causa do problema deve-se a um acoplamento entre os controles de cada motor, que ocorre através da estrutura mecânica do veículo e do contato pneu-solo das rodas de propulsão. Isso fazia com que o controlador que alcançasse primeiro a referência de velocidade desejada (v_E ou v_D , segundo (1) e (2)) se acomodasse e começasse a diminuir a potência fornecida à roda de seu lado. Com isso, o outro controlador era forçado a aumentar a sua potência, pois ainda não tinha atingido a referência de velocidade especificada. O processo continuava até que um dos motores exercesse praticamente todo o esforço de tração e o outro fosse carregado, funcionando às vezes como gerador, (i.e., produzindo uma corrente “negativa”) pelo efeito regenerador adotado no sistema de energia do veículo.

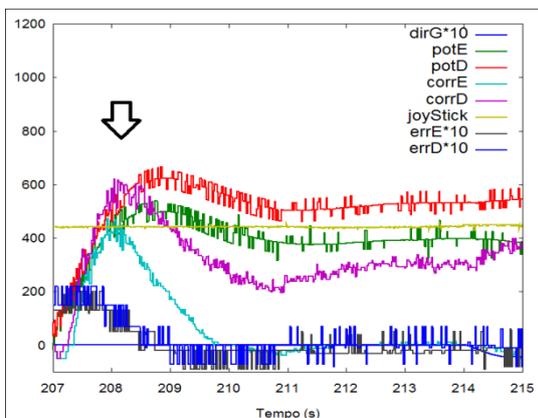


Figura 3. Evolução das correntes dos motores e dos erros de velocidades das rodas (*10)

A Figura 3 apresenta um transitório no controle de velocidade do veículo que ilustra o problema.

Observa-se o crescimento das correntes e das potências até o ponto indicado pela seta. A partir desse instante ocorre uma divergência: a corrente do motor direito (roxo) continua crescendo e a do motor esquerdo (azul claro) cai, embora as velocidades converjam para valores em torno da referência especificada (amarelo). Ou seja, o erro de velocidade do controlador esquerdo (preto) está sempre abaixo do direito (azul escuro), o que significa que o canal esquerdo atinge a referência de velocidade antes. Quando esta referência é atingida o sinal de controle vai sendo diminuído e tem-se como consequência a rápida queda da corrente desse motor esquerdo. Ele passa então a funcionar como carga, passando o outro motor (direito) a assegurar a propulsão do veículo.

4 Solução: o “Módulo Corrente”

O fato de que, com o modelo original de controle, poder haver um desequilíbrio de torque entre os lados do veículo durante seu deslocamento, certamente impacta na dirigibilidade do mesmo e em sua capacidade para executar as missões que lhe forem atribuídas. Conforme apontado por (Cordeiro et al. 2012) ao formular um modelo dinâmico para o VERO, a utilização de modelos puramente cinemáticos pode não ser suficiente para veículos robóticos de utilização em ambientes externos. Outros trabalhos também apontam a necessidade de uma modelagem da dinâmica dos veículos robóticos (Pepy et al. 2006), (Sampaio et al. 2011) e a equipe do projeto VERO já vem trabalhando nesse sentido.

No entanto, soluções de controle baseadas em dinâmica são mais complexas e precisariam ser implementadas no nível superior de controle, de maior capacidade de processamento, e não no nível operacional básico. A solução do problema está então constringida, no contexto desse trabalho, aos recursos computacionais disponíveis nos subsistemas herdados, baseados em microcontroladores.

São aqui apresentadas duas estratégias para a solução do problema descrito na seção precedente. Ambas partem do conceito geral adotado nos diferenciais mecânicos dos veículos automotivos usuais, que buscam distribuir igualmente entre as rodas tracionadas o torque advindo do motor. No nosso caso, como a propulsão é feita por dois motores elétricos de corrente contínua independentes, essas estratégias resultam na atuação sobre a relação entre as correntes dos motores. Assim, a partir da diferença das correntes i_E e i_D dos motores, o “módulo Corrente” da Figura 2 gera um termo de correção Δv_i que visa igualar os torques entre eles.

Para implementar as estratégias foi utilizado um módulo microprocessado já existente e que fazia a interface entre o módulo de potência Roboteq e o restante do nível operacional do VERO.

Uma estratégia é baseada em heurística, enquanto que a outra envolve um regulador PI, como detalhado a seguir.

4.1 Estratégia heurística

Nas equações seguintes os subscritos (E) e (D) denotam os lados esquerdo e direito do veículo.

Considerando-se o veículo movendo-se em velocidade constante no plano e sem movimento da direção, é razoável supor uma distribuição uniforme de potência entre os lados esquerdo (P_E) e direito (P_D). Considera-se que há uma distribuição uniforme de cargas entre os dois lados do veículo, de forma a que cada conjunto, controlador de velocidade e motor, seja responsável por mover metade da carga.

$$P_E = P_D \quad (3)$$

Como Potência = Torque x Velocidade Angular, tem-se:

$$T_E \cdot \omega_E = T_D \cdot \omega_D \quad (4)$$

O Torque fornecido pelos motores pode ser descrito (simplificadamente) pela equação (5), onde K_t é a constante de torque do motor e i sua corrente.

$$T = K_t \cdot i \quad (5)$$

Assim, pode-se escrever:

$$K_{tE} \cdot i_E \cdot \omega_E = K_{tD} \cdot i_D \cdot \omega_D \quad (6)$$

A relação entre as velocidades pode então ser explicitada como:

$$\omega_E = \frac{K_{tD} \cdot i_D \cdot \omega_D}{K_{tE} \cdot i_E} \quad (7)$$

Assumindo a hipótese que os motores sejam idênticos, $K_{tE} = K_{tD}$ e então:

$$\omega_E = \frac{i_D}{i_E} \cdot \omega_D \quad (8)$$

Verifica-se que, nesse caso, a relação entre as velocidades é proporcional ao inverso da relação de correntes.

Considerando-se que o controlador deveria ser implementado em um módulo microprocessado, com restrições na capacidade de processamento e de armazenamento, a utilização direta dessa relação de divisão de correntes não é interessante, devido aos problemas na passagem por zero das variáveis. Foi então proposta uma heurística baseada em diferença de correntes, com o mesmo propósito de manter as correntes próximas. Essa heurística, de caráter proporcional ponderado, é dada por:

$$\omega_M = \omega_{Ref} \cdot \left(1 + \Delta_{vi} / i_{MAX} \right) \quad (9a)$$

$$\begin{aligned} \text{Se motor esquerdo,} & \quad \Delta_{vi} = I_D - I_E \\ \text{Se motor direito,} & \quad \Delta_{vi} = I_E - I_D \\ \text{Se } \omega_{Ref} < 1 & \quad \Delta_{vi} = -\Delta_{vi} \end{aligned} \quad (9b)$$

onde i_{MAX} é o valor máximo da corrente, ω_M é o valor do controle enviado para o módulo de potência (esquerdo ou direito), ω_{Ref} é a saída do controlador de velocidade (esquerdo ou direito), Δ_{vi} é o adicional de controle de velocidade devido à heurística.

Esta heurística foi implementada no módulo microcontrolado e testada em trajetos que incluíam rampas, trechos planos e curvas.

Na Figura 4 há uma comparação entre o veículo

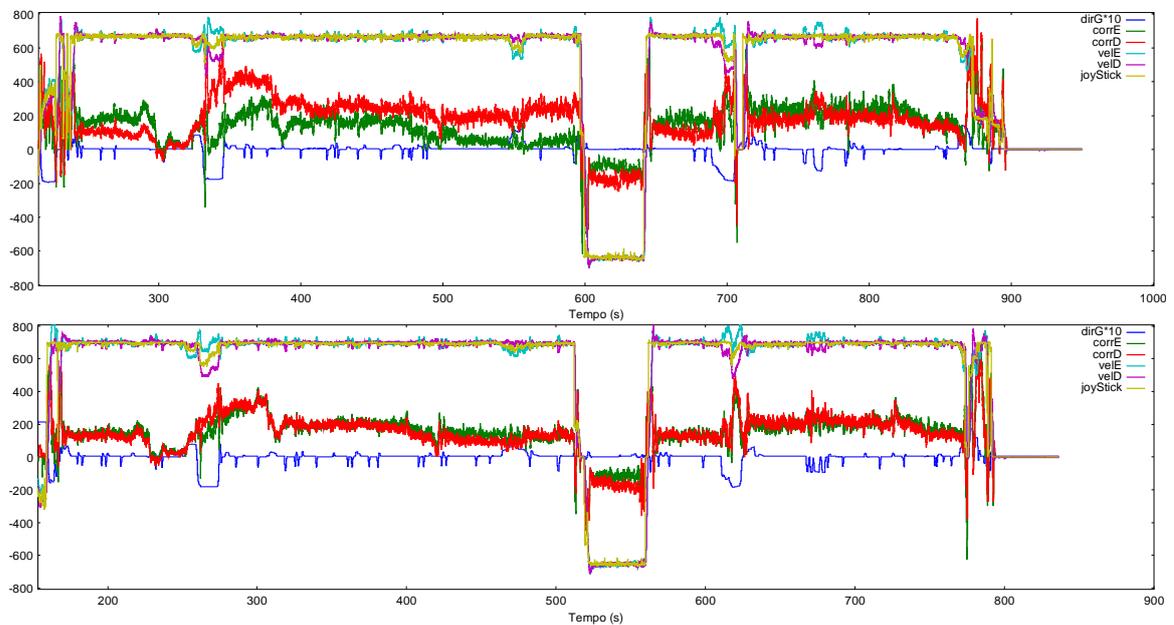


Figura 4. Acima: PIs de velocidade; Abaixo: PIs de velocidade +Controle Heurístico de Corrente.

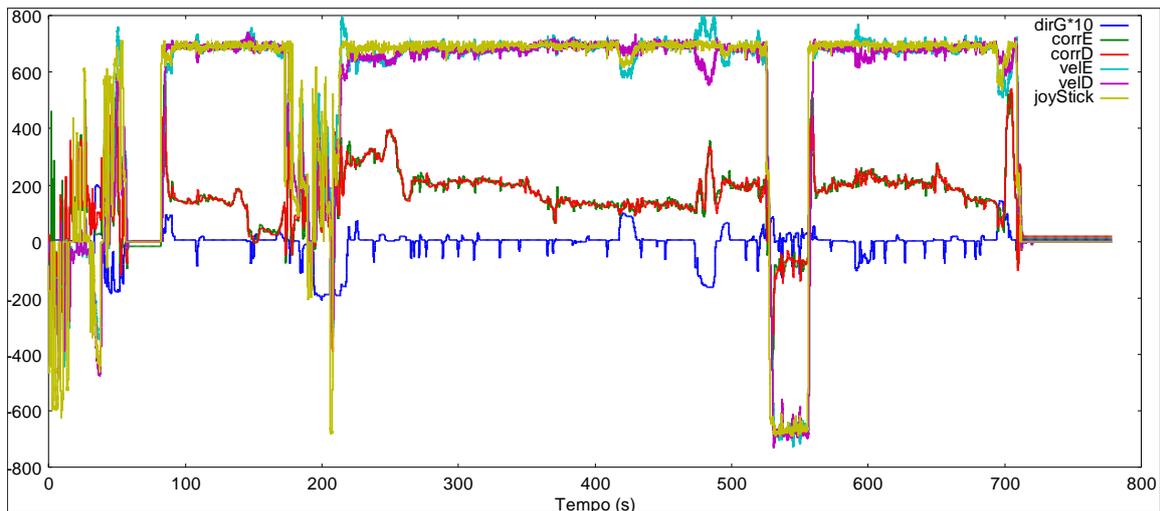


Figura 5. Controladores de Velocidade PIs + Controle de Corrente PI

com dois controladores de velocidade PI e sem módulo de correntes (parte superior) e do veículo com os mesmos controladores de velocidade PI e com o módulo de correntes (parte inferior). Este trajeto é de aproximadamente 500 metros. Primeiramente ele foi executado com os controladores PI e em seguida o controlador de correntes foi ativado, em conjunto com os controladores de velocidade PI, e o trajeto foi repetido.

Nesta figura e nas subsequentes o eixo das abscissas refere-se ao tempo em segundos e o eixo das ordenadas está normalizado com valores entre -1000 e 1000, para representar as diversas variáveis, sendo que os fatores de conversão e valores máximos são os seguintes: correntes em ampéres (1/10, 100A), velocidades das rodas em rpm (1/12,5, 80 rpm), ângulo de direção em graus (1/10, 25°).

Nota-se que sem o controle de correntes há uma diferença acentuada de correntes entre os lados direito (vermelho) e esquerdo (verde). Essa separação surge especialmente durante grandes manobras da direção, por exemplo virar esquinas, e em outras situações de carga maior (como rampas).

Com a heurística proposta o comportamento dinâmico do veículo melhora significativamente. Durante as manobras de direção há uma pequena separação de correntes, conforme esperado devido às correções feitas de acordo com o cálculo do “Módulo Ackerman”, mas o controle retorna as correntes ao equilíbrio.

4.2 Estratégia baseada em controlador PI

Como a heurística descrita acima apresentou bons resultados, decidiu-se buscar uma alternativa mais formal e ainda passível de implementação com os recursos computacionais escassos do microcontrolador usado.

Optou-se assim pela implementação de um controlador PI na forma paralela clássica dada pela função de transferência em (10) e incluindo limitações na excursão das variáveis de saída, bem como uma

limitação na acumulação da integral para evitar o efeito de “wind-up”:

$$C(s) = K_p + K_i/s \quad (10)$$

Baseando-se no desempenho do veículo em reta, antes da implementação das estratégias propostas, tais como tempo de subida e estabilização em resposta ao degrau, os controladores de velocidade PI foram ajustados.

A seguir, o “Módulo de corrente”, com controlador PI, foi ativado e ajustado manualmente.

Um trajeto semelhante aos anteriores foi executado e o resultado é mostrado na Figura 5. Nesta figura as correntes estão sendo filtradas com um filtro exponencial.

Observa-se que as correntes mantêm-se próximas na maior parte do tempo, mesmo nas manobras e situações de maior exigência, como por exemplo, nas partidas com velocidade zero.

Na Figura 6 estão apresentadas as saídas do controlador de velocidade esquerdo (amarelo) e do controlador de corrente (lilás).

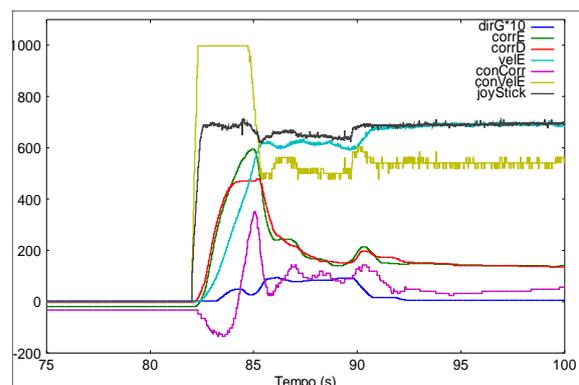


Figura 6: Saídas dos controladores de velocidade e corrente.

Verifica-se que as correções de correntes (con-Corr) variam mais rapidamente nas manobras (de-grau de velocidade em preto e giro da direção em azul).

5 Conclusão

A utilização da plataforma experimental do projeto VERO, cuja tração é realizada por dois motores de corrente contínua atuando de forma independente nas rodas traseiras, levou à constatação de que malhas independentes de controle de velocidade não são suficientes para controlar adequadamente a movimentação do veículo. Com efeito, acoplamentos introduzidos pelo contato entre os pneus e o terreno podem levar à situação indesejável em que um motor atua na propulsão enquanto que o outro motor passa a funcionar como gerador.

Como primeiro passo para solucionar o problema, foram concebidas duas estratégias simples, passíveis de implementação nos microcontroladores que compõem o baixo nível de atuação no veículo. As soluções partiram da ideia de minimizar a diferença de corrente nos motores, equalizando os torques, na suposição de que dada a simetria do veículo e semelhança dos conjuntos propulsores, a carga seria dividida igualmente entre as rodas traseiras. Assim a estratégia inicial, baseada em heurística, evoluiu para uma segunda, calcada em regulador PI. O uso dessas soluções em condições reais de locomoção, passando por rampas e curvas, mostrou um comportamento adequado e a correção dos problemas originalmente identificados.

A temática de acionamento de veículos robóticos multi-motores é uma área ainda em evolução. Na sequência dos trabalhos, uma modelagem mais complexa da dinâmica do veículo (Cordeiro et al. 2012), será usada para considerar, por exemplo, estratégias mais elaboradas para o controle de dois motores de tração como em (Sampaio et al. 2011), (Yang & Lo 2008), ou mesmo aquelas baseadas em políticas de alocação de torques.

Agradecimentos

Os autores agradecem os financiamentos dos projetos NAGUIVA (490722/2010-5 - CNPq/FCT - Portugal) e INCT-SEC (CNPq - 573963/2008-8 e FAPESP - 08/57870-9), bem como a atuação de Douglas Figueiredo no veículo e seus sistemas.

Referências Bibliográficas

Berger, C. and Rumpe, B. (2012) “Autonomous Driving – 5 Years after the Urban Challenge: The Anticipatory Vehicle as a Cyber-Physical System”; *Proc. 10th Workshop on Automotive Software Engineering (ASE 2012)*, Braunschweig, Germany, September 2012.

Bueno, S.S. (2009), Azevedo, H.; Mirisola, L.G.B.; De Paiva, E.C.; Ramos, J.J.G.; Victorino, A.C.; Azinheira, J.R.; “Uma Plataforma para Pesquisa e Desenvolvimento em Robótica Terrestre de Exterior”; *Proc. IX Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente (SBAI-2009)*, Brasília, DF, Brasil, Setembro 2009.

Cordeiro, R.A.; Azinheira, J.R.; de Paiva, E.C.; Bueno, S.S.; (2012) “Efeitos da Dinâmica Tridimensional no Controle de Trajetória de Um Veículo Robótico Terrestre com Quatro Rodas”; *Proc. XIX Congresso Brasileiro de Automática*, (CBA-2012), Campina Grande, PB, Setembro 2012.

Cordeiro, R.A.; Azinheira, J.R.; de Paiva, E.C.; Bueno, S.S.; (2013) “Controle de Trajetória de um Veículo Robótico de Exterior em Terrenos Complexos.” Submetido ao *XI Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente (SBAI 2013)*, Fortaleza, CE, Outubro de 2013.

De Paiva, E.C.; Azinheira, J.R.; Bueno S.S. (2010). “Controle de trajetória para veículos terrestres de exterior”. *Proc. XVIII Cong. Bras. de Automática (CBA2010)*, Bonito,-MS.

Martins, R.J.; Bueno, S.S.; Mirisola, L.G.B.; de Paiva, E.C.; Ferreira, P.A.V. (2011). “Cinemática e Localização em Robótica Terrestre Usando Múltiplos Encoders”; *Proc. X Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente (SBAI 2011)*, São João del-Rei, MG.

Mirisola, L. G. B.; Azevedo, H.; Ramos, J. J. G.; Bueno, S. S.; de Paiva, E. C.; Azinheira, J. R. (2011). “Validação Experimental de um Veículo Robótico Terrestre para Ambientes Externos”. *Proc. X Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente (SBAI 2011)*, São João del-Rei, MG.

Pepy, R.; Lambert, A. ; Mounier, H., (2006). “Path Planning using a Dynamic Vehicle Model,” *Information and Communication Technologies*.

Sampaio, R. C. B.; Lima, G. S.; Fernandes, V. V. M.; Hernandez, A. C., Becker, M. (2011). “Parametric vehicular simulator in the evaluation of Helvis mini-HEV EDS Control”, *Proc. of the ASME 2011 International Design Engineering Technical Conferences IDETC/CIE 2011*.

Yang, Y. P., Lo, C.P. (2008) “Current distribution control of dual directly driven wheel motors for electric vehicles.” *Control Engineering Practice* 16.11, 2008.