

CADEIRA DE RODAS COM MOTORES DE INDUÇÃO TRIFÁSICOS, CONTROLE VETORIAL E COMANDO POR JOYSTICK

NUNES, Willian R. Bispo M. *, SILVA, Newton da*, GAINO, Ruberlei*, COVACIC, Márcio R. *, LEONCIO JUNIOR, Antônio P.*

* Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Estadual de Londrina, Londrina, Brasil
e-mail: willian.bispo@hotmail.com

Resumo: Atualmente grande parte dos sistemas de acionamento de cadeira de rodas motorizada utilizam motores de corrente contínua como força motriz. No entanto, o emprego de tais motores apresenta fatores desfavoráveis como elevado índice de custo e manutenção periódica e baixo fator de segurança em razão da existência de arcos e faíscas na comutação de corrente por elemento mecânico. Com base nisto, este trabalho apresenta uma proposta diferenciada e arrojada no acionamento de cadeiras de rodas, utilizando para tal de motores de indução trifásico de alto rendimento com controle vetorial. A alimentação do sistema provém de baterias, as quais são condicionadas em nível adequado para o acionamento dos motores. Com um controlador digital de sinais realiza-se a leitura dos comandos do joystick, efetuando o respectivo controle e acionamento dos motores de indução. Resultados simulados e experimentais obtidos denotam a eficiência e robustez do controle vetorial para os motores de indução e a viabilidade e funcionalidade do esquema proposto para pacientes paraplégicos.

Palavras-chave: cadeira de rodas, motor de indução trifásico, controle vetorial, pacientes paraplégicos.

Abstract: Several of the power drive wheelchair systems use DC motors as the driving force. However, the use of such motors is falling into disuse because have drawbacks aspects such as higher cost and maintenance. Therefore, this paper presents a distinctive and relevant proposition in drive motorized wheelchairs using three-phase induction motors of high performance. The system power comes from batteries, which are conditioned on appropriate level for induction motors. A digital signal controller (DSC) performs the reading the joystick, making its control and drive of three-phase induction motor. Simulated and experimental results wheelchair denote the viability and functionality of the proposed scheme for paraplegics users.

Keywords: wheelchair, three phase induction motor, vector control, paraplegics patients.

Introdução

A mobilidade oferecida por uma cadeira de rodas desempenha um papel extremamente importante na função física e social de seus usuários. A mobilidade por pela cadeira de rodas é vital para a independência de

seus usuários e é essencial para uma vida social ativa, proporcionando o desenvolvimento de suas habilidades cognitivas e comunicativas [1]. Logo, cadeira de rodas constitui um mecanismo extremamente importante, onde fatores como elevada eficiência e robustez são imprescindíveis em seu funcionamento. No que se refere à motorização, o grande parte utilizam motores de corrente contínua (CC) [2]. No entanto, tais motores apresentam fatores desfavoráveis como: elevados índices de custo e manutenção (devido aos comutadores e escovas); alto índice de peso/kW; baixo fator de segurança em razão da existência de arcos e faíscas na comutação de corrente por elemento mecânico; e uma maior escassez comercial quanto a disponibilidade de modelos de alto rendimento [3][4][5].

Uma alternativa para tais desvantagens é a utilização de motores de indução de alto rendimento, já consolidado e amplamente utilizado em aplicações industriais. É notório no decorrer dos anos que a pouca utilização de motores de indução em sistemas embarcados se deve principalmente pela alta complexidade envolvida em seu controle. Chew e Inigo [6] propuseram uma primeira tentativa nesse sentido, implementando uma simulação de um sistema de propulsão para cadeira de rodas com motores de indução. Porém, não obtiveram resultados práticos satisfatórios com os motores operando em baixa velocidade de rotação.

No entanto, vale ressaltar que nos últimos anos a área de acionamento e controle de motores elétricos sofreu uma rápida expansão, devido principalmente ao avanço nas áreas de semicondutores, eletrônica de potência e culminando com os microprocessadores. Estes avanços tecnológicos permitiram o desenvolvimento de controle de acionamento de corrente alternada (CA) mais eficiente, com menor dissipação de energia e estruturas de controle cada vez mais exatas.

Com base nisto, este projeto visou desenvolver um esquema de controle mais sofisticado e viável para cadeiras de rodas com motores de indução trifásicos, utilizando a técnica de controle vetorial. O comando da cadeira de rodas é realizado por meio de joystick.

Este trabalho apresenta nas próximas seções: o sistema proposto; o controle vetorial dos motores; o comando da cadeira por joystick; e por fim apresenta os resultados obtidos com discussão e conclusão.

Sistema proposto

O sistema embarcado proposto de acionamento dos motores de indução para a cadeira de rodas é apresentado na Figura 1.

Como o nível de tensão provindo do banco de baterias é baixo, um circuito constituído por um conversor CC/CA e retificador efetuam o condicionamento do nível de tensão para o inversor trifásico que alimenta o motor CA.

Por meio do inversor de tensão se controla o torque e a velocidade do motor utilizando-se para tal o controle vetorial e a modulação por largura de pulso em vetores espaciais (do inglês *Space Vector Pulse Width Modulation-SVPWM*).

As especificações dos blocos constituintes do sistema são as seguintes:

Baterias – Constitui-se de duas baterias ligadas em paralelo, fornecendo alimentação em 12 V e 45 Ah.

Conversor CC/CA monofásico – Trata-se um conversor CC/CA de 600 W, rendimento de 95%, que efetua a adequação do sinal CC de 12 V provinda do banco de baterias em uma tensão CA de 127 V do tipo pseudo senoidal.

Retificador não controlado monofásico com dobrador de tensão – Responsável em converter o sinal de tensão alternado do conversor para um sinal de tensão CC satisfatório para o funcionamento do inversor de tensão em dois níveis de tensão.

Inversor de tensão trifásico – Com tal pode-se efetuar o acionamento de cargas trifásicas em níveis de potencia, tensão e corrente elevados.

O acionamento do módulo IGBT é isolado do DSC através de optoacopladores. Além disto, o sistema inversor possui um circuito de detecção de falha para casos de sobrecorrente e/ou sobretensão na carga ou por sobretemperatura no módulo IGBT. Caso seja detectada uma dentre tais falhas o circuito desativa o sinais de controle de acionamento do módulo IGBT e envia um sinal de falha para o controlador de sinais digitais.

Controlador de sinais digitais – Trata-se de um DSC (do inglês, *Digital Signal Controller*) TMS320F28335, montado em uma *dock-station* da Texas Instruments®. Possui diversos periféricos disponíveis, dentre tais como: 2 módulos de conversão analógico-digital de 8 canais cada; 2 módulos de modulação por largura de pulso; 2 módulos codificadores de quadratura melhorado (eQEP); entre outros.

Aquisição e condicionamento de sinais de corrente – Efetua a aquisição dos sinais de corrente da carga, através de um sensor de efeito hall integrado. Um circuito de condicionamento ajusta a escala e o nível do sinal para o conversor analógico-digital (CAD) do DSC.

Encoder incremental – O encoder incremental exerce a função de sensor de velocidade sobre o eixo de cada máquina de indução e repassa informação relativa a rotação do motor em forma de sinais pulsados. O

modelo do encoder utilizado é o modelo 1XP8001-1 da Siemens, com uma resolução de 1024 CPR.

Driver de corrente – Responsável por fornecer um sinal com maior capacidade de corrente para acionamento dos IGBT's.

Motores de indução – São motores de alto rendimento da Siemens®, ou seja, apresenta um rendimento de até 15% maior comparado a outros modelos comerciais. Possuem 1060 RPM, 0,33CV/0,25KW, 6 pólos, carcaça 71, grau de proteção IPW55, tensões de 220V ($\Delta\Delta$), 380V (YY), 440V (Δ).

A disposição dos motores de indução e o comando pelo joystick estão ilustrados na Figura 2.

Controle vetorial dos motores

Cada motor é acionado por meio de controle vetorial, o qual é baseado nas projeções que transforma um sistema trifásico de tempo e velocidade dependentes em sistema de tempo invariante de duas coordenadas d e q .

Com esta projeção em dq a estrutura de controle do motor CA torna-se similar ao do motor CC.

O controle vetorial necessita de duas constantes como entradas de referência: a componente do torque (alinhada com a coordenada q) e a componente do fluxo (alinhada com a coordenada d). Como o controle vetorial é simplesmente baseado em projeções, a estrutura de controle instantânea permite um controle com precisão em todos os pontos de operação (transitório e regime permanente) [7].

O esquema básico de controle dos motores é apresentado na Figura 3.

Dois sinais de correntes da alimentação do motor são adquiridos, servindo de entrada para o bloco da transformada de Clarke, que efetua o cálculo das projeções $i_{s\alpha}$ e $i_{s\beta}$:

$$i_{s\alpha} = i_a \quad (1)$$

$$i_{s\beta} = \frac{1}{\sqrt{3}}i_a + \frac{2}{\sqrt{3}}i_b \quad (2)$$

Com estas duas componentes em quadratura aplica-se então a transformada de Park que resulta em um sinal de duas componentes d e q , dadas por:

$$i_{sd} = i_{s\alpha} \cos \theta + i_{s\beta} \sin \theta \quad (3)$$

$$i_{sq} = -i_{s\alpha} \sin \theta + i_{s\beta} \cos \theta \quad (4)$$

Em seguida, as componentes i_{sd} e i_{sq} são comparadas com as referências i_{sdref} (referência de fluxo) e i_{sqref} (referência de torque), gerando um sinal de erro para o controle.

Após um estágio de controle proporcional-integral PI de corrente, obtêm-se as saídas v_{sdref} e v_{sqref} .

A partir de tais sinais de saída dos controladores aplica-se então a transformada inversa de Park.

As saídas desta projeção são v_{saref} e v_{sbref} que são os componentes do vetor de tensão do estator no sistema de referência estacionária ortogonal $\alpha\beta$, conforme expressões seguintes:

$$v_{saref} = v_{sdref} \cos \theta_e - v_{sqref} \sin \theta_e \quad (5)$$

$$v_{sbref} = v_{sdref} \sin \theta_e + v_{sqref} \cos \theta_e \quad (6)$$

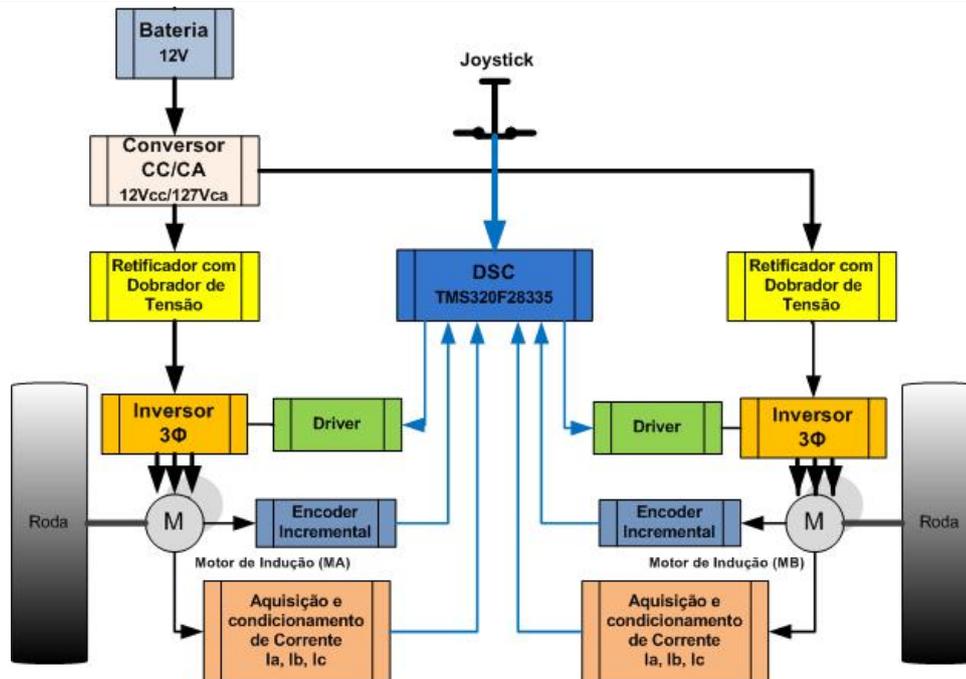


Figura 1: Esquema proposto de acionamento dos motores de indução para a cadeira de rodas.

Logo, com o sinal provindo do encoder fornecendo o valor da frequência angular do rotor ω_r , determina-se o ângulo θ_e do referencial síncrono da máquina por:

$$\theta_e = \int \omega_e dt = \int (\omega_r + \omega_{sl}) dt = \theta_r + \theta_{sl} \quad (12)$$

Comando da cadeira de rodas por joystick

O usuário possui um joystick com disponibilidade para escolha de quatro direções: avanço, retorno, direita e esquerda. O estado de acionamento do joystick é responsável em alterar no software um índice seletor num multiplexador dos sinais trifásico do motor. Assim aplicam-se os correspondentes sinais de controle e acionamento para cada motor referente à direção escolhida pelo usuário.

A partir do sinal de leitura do sinal do joystick determina-se o índice I correspondente para o novo estado desejado pelo usuário da cadeira de rodas, conforme denotado na Figura 4.

O estado inicial do sistema é o de repouso com os motores MA e MB parados. Uma vez determinado um novo estado para a cadeira define-se então o acionamento dos motores MA e MB para estabelecer uma velocidade linear V e angular Ω , conforme o estado desejado. Com a velocidade linear e angular definidas, a estrutura de controle vetorial encarrega-se de estabilizar o torque, o fluxo e a velocidade dos motores nos valores de referência a partir da realimentação dos sinais de corrente do estator e velocidade do rotor.

Resultados

Resultados de simulação

Para a simulação do controle dos motores obteve-se os parâmetros do modelo elétrico dos motores por meio de ensaios a vazio e de rotor bloqueado.



Figura 2: Protótipo desenvolvido.

Tais sinais são entradas para a inversa de Clarke:

$$v_a = v_{saref} \quad (7)$$

$$v_b = -1/2 v_{saref} + \sqrt{3}/2 v_{sbref} \quad (8)$$

$$v_c = -1/2 v_{saref} - \sqrt{3}/2 v_{sbref} \quad (9)$$

Com o sinal trifásico v_a , v_b e v_c aplica-se a modulação *PWM Space Vector*, que a partir desta produz os sinais de comando para o acionamento do módulo inversor.

Mantendo-se o fluxo do rotor $\hat{\Psi}_r$ constante em toda faixa de operação do motor tem-se:

$$\hat{\Psi}_r = L_m i_{sd} \quad (10)$$

Com a medição do valor da componente de corrente em quadratura i_{sq} determina-se a frequência do escorregamento ω_{sl} [7]:

$$\omega_{sl} = \frac{L_m R_r}{\hat{\Psi}_r L_r} i_{sq} = \frac{R_r i_{sq}}{L_r i_{sd}} = K_S \frac{i_{sq}}{i_{sd}} \quad (11)$$

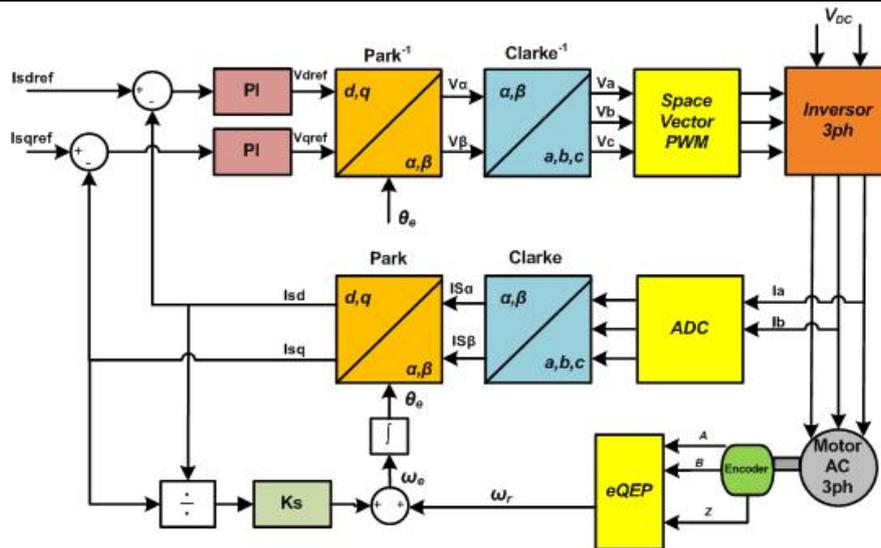


Figura 3: Esquema de controle dos motores

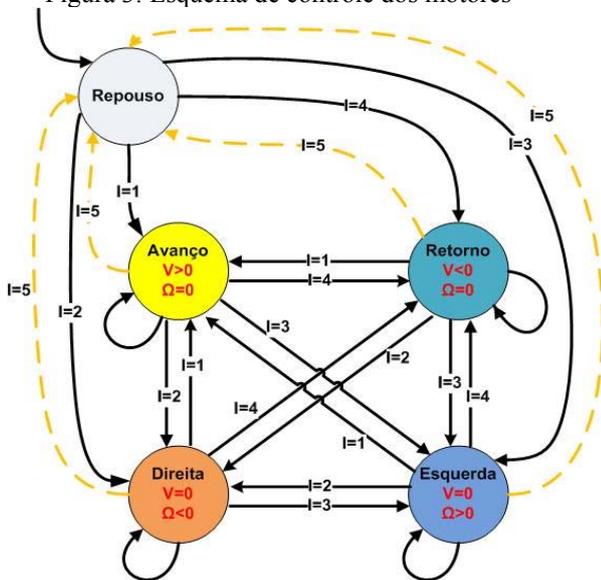


Figura 4: Diagrama de estados da cadeira de rodas por indexação do sinal do joystick.

A partir de um sinal de referência nas coordenadas dq , ajusta-se o ganho proporcional K_p para a velocidade desejada e em seguida o ganho integral K_i para diminuir as oscilações do erro em regime permanente. Os valores de sintonia obtidos na malha do torque são $K_p = 0.1$ e $K_i = 0.001$. Enquanto que na malha de controle do fluxo obteve-se $K_p = 0.05$ e $K_i = 0.01$.

O resultado obtido na simulação, conforme Figura 5, destaca o controle de velocidade do motor para uma referência de velocidade em 300 rpm.

Resultados experimentais

Na Figura 6 é apresentado a corrente da fase I_A do motor e a tensão de linha V_{AB} no instante da partida do estado de repouso para um novo estado definido pelo usuário. A corrente total de alimentação do sistema é de aproximadamente 3,5 A.

Os sinais provenientes do encoder estão expostos na Figura 7. Os dois primeiros sinais são os pulsos em quadratura A e B e o terceiro refere-se ao index, correspondendo a uma rotação completa do motor.

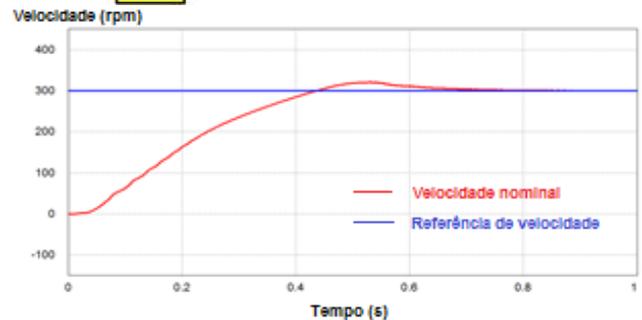


Figura 5: Controlador PI do controle vetorial.

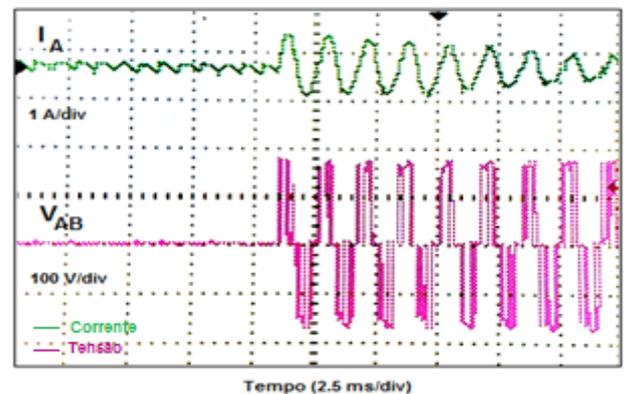


Figura 6: Sinais de corrente I_A e tensão de linha V_{AB} do motor em partida do estado de repouso do protótipo.

Com o processamento de tais sinais, obtém-se a velocidade angular do rotor e o respectivo ângulo do rotor, conforme denotado no quarto sinal da Figura 7.

Com o joystick inativo, todos os comandos de direções e os sinais PWM de acionamento do motor ficam desativados em nível lógico baixo, conforme ressaltado na Figura 8. Na qual se nota o acionamento do joystick para a direção de avanço, habilitando os sinais PWM do motor em sequência positiva.

Discussão

Embora os motores CC possuam um circuito de controle mais simples, vale ressaltar que há problemas associados à sua utilização [3].

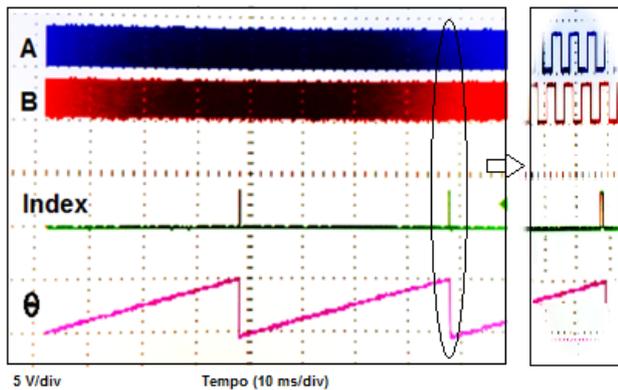


Figura 7: Sinais em quadratura e index do encoder e o respectivo ângulo do protótipo.

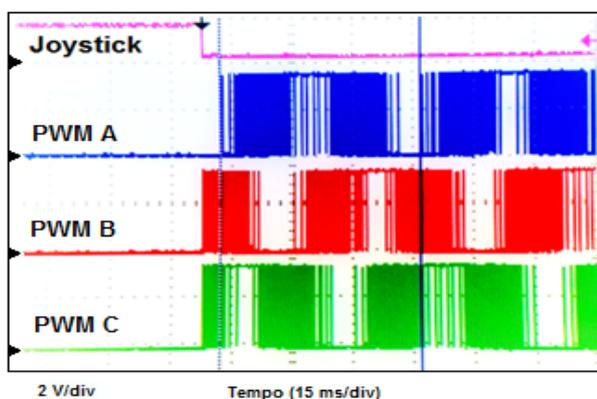


Figura 8: Sinal de avanço do joystick e sinais PWM.

O alto índice de manutenção dos motores CC proporciona a pesquisa para utilizar outros tipos de motores na propulsão de cadeira de rodas. Motor de indução é considerado neste trabalho, o qual está consolidado em aplicações industriais e por oferecer uma das tecnologias mais confiáveis para uso em veículos elétricos [5].

Além disso, não possuem escovas, são bem mais baratos, mais leves, oferecem maior eficiência, maior confiabilidade, maior densidade de potência e menor índice de manutenção comparado a um motor CC de potência equivalente [3] [4] [5].

Tendo como referência a cadeira de rodas acionada com motores CC, desenvolvida no Laboratório de Controle Avançado, Robótica e Engenharia Biomédica da UEL, sob a patente BR 10.2014.018375, o sistema eletrônico para acionamento da cadeira com motor de indução baseia-se em componentes eletrônicos de baixo custo e com alta eficiência energética, possibilitando grande viabilidade comercial para o projeto.

Por meio da técnica de controle vetorial obteve-se um sistema de controle independente e desacoplado de torque e fluxo. A complexidade de tal técnica foi minimizada com a programação do DSC através de técnica de prototipagem rápida no MATLAB/Simulink®.

Testes realizados com usuários hígidos denotam o bom funcionamento do sistema com joystick de navegação discreta, permitindo realizar curvas fechadas.

Conclusão

Este trabalho propôs um esquema de controle vetorial para motores de indução para cadeiras de rodas utilizando motores de indução de alto rendimento com controle vetorial e comando por joystick.

Por meio de técnica de controle já consolidada na literatura e aplicando-a por meio de sistemas eletrônicos e motores de alto rendimento, a eficiência energética obtida apresenta-se maior em relação aos motores CC, permitindo maior vida útil das baterias.

Com o controle vetorial, o sistema apresentou resultados satisfatórios de torque e controle de direção para a operação da cadeira de rodas em baixa rotação.

Especificamente para as pessoas que sofrem de espasmos e paralisia das extremidades, o joystick não é aplicável como elemento de manobra. Para trabalhos futuros sugere-se desenvolver um comando que permita múltiplas direções a partir da sensibilidade à variação do sopro e sucção para a cadeira com motores de indução.

Agradecimentos

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo suporte financeiro; a EletroIn-MATEC; e aos colegas do SENAI-SAP pelo apoio técnico na estrutura mecânica.

Referências

- [1] Hansen, R.; Tresse, S.; Gunnarsson, R. K. Fewer accidents and better maintenance with active wheelchair check-ups: a randomized controlled clinical trial. *Clinical Rehabilitation*, v.18, n.6, p.631-639, 2004.
- [2] Gentilho Junior, E.; Biazeto, A. R.; Kayamori, H. K.; Covacic, M. R.; Gaino, R. Controle implementado em DSP para cadeira de rodas acionada por sopro e sucção. In: *Inovação e Tecnologia*, Londrina: SENAI; 2014, p. 236-248.
- [3] Inigo, R.M.; Shafik, K. T.; Churillo, F. M.; Pence, J. R., "Advances in Electric Wheelchair Propulsion Systems," *Medical Instrument Design*, 1991. IEEE Case Studies in, pp. 204, 220, 29-30, Oct 1991.
- [4] Jordan, Howard E. *Energy-efficient electric motors and their applications*. 2nd ed., New York: Springer Science+ Business Media, 1994.
- [5] Nanda, G.; Kar, N.C., "A Survey and Comparison of Characteristics of Motor Drives Used in Electric Vehicles," *Electrical and Computer Engineering*, 2006. CCECE '06. Canadian Conference on, pp.811,814, May 2006
- [6] Chew, H.W.V.; Inigo, Rafael M., "Electric wheelchair propulsion by induction motors," In: *South-eastcon '96. Bringing Together Education, Science and Technology*, Proceedings of the IEEE, pp.37, 40, 11-14 Apr 1996.
- [7] Bose, Bimal K. "Modern Power Electronics and AC drives." Upper Saddle River: Prentice Hall, 2001. p368-78.