

# Projeto de Sistema de Acionamento e Controle de Máquinas Elétricas Baseado no Módulo IRAM

Débora Debiaze de Paula, Andreyra Sárila Ramos Ferreira, Odair dos Santos Silva,  
Paulo Jefferson Dias de Oliveira Evald, Cláudio Dornelles Mello Jr., Rodrigo Zelir Azzolin  
Centro de Ciências Computacionais, Universidade Federal do Rio Grande, Rio Grande, 96201-900  
Email: (deboradebiaze, andreynasrf, rodrigoazzolin)@gmail.com

**Resumo**—Este trabalho apresenta o projeto de um sistema de acionamento de máquinas elétricas baseado no módulo IRAM. Trata-se de um módulo de baixo custo, contendo três braços inversores, capaz de acionar tanto motores CC quanto CA. Graças ao isolamento do circuito de disparo das chaves aliado às proteções de sobrecorrente, sobretensão, sobretemperatura, entre outras, este módulo torna-se atrativo para o desenvolvimento de protótipos que envolvam controle de máquinas. Dessa forma, o mesmo pode ser utilizado no ensino, por exemplo, de disciplinas de eletrônica de potência em cursos de engenharia, bem como em aplicações industriais que requeiram tal função. Em se tratando do ambiente acadêmico, sabe-se que existe um grande aprendizado e solidificação do conhecimento quando o conteúdo ministrado nas salas de aula é implementado em bancada experimental. Isso é intensificado principalmente para disciplinas como eletrônica de potência. Porém, devido à falta de recursos, nem sempre há disponibilidade de aquisição de materiais para realização de experimentos. Portanto, visando contribuir para o aprendizado com um viés experimental, neste trabalho é apresentado o projeto de construção e implementação de uma placa genérica de acionamento de máquinas. Serão apresentadas as etapas de projeto conceitual, confecção das placas, bem como resultados de testes práticos em bancada.

**Palavras-Chave** – Eletrônica de Potência, Sistema de Acionamento, Ensino em Engenharia, IRAM.

## I. INTRODUÇÃO

No decorrer dos anos, o uso de sistemas de controle de energia elétrica para acionamento de máquinas elétricas e aplicação de controles industriais vem crescendo cada vez mais. Com isso, a concepção de controle de potência para conversão de energia e para acionamentos de máquinas elétricas tem se transformado relevantemente [1]. Circuitos eletrônicos de potência realizam a conversão de potência elétrica de uma forma de energia para outra, fazendo uso de dispositivos eletrônicos [2]. De modo geral, a aplicação da eletrônica de potência é muito abrangente, visto que engloba circuitos que operam com potências desde *milliwatts* até *megawatts* [2].

De maneira generalizada, os circuitos baseados em eletrônica de potência operam empregando dispositivos semicondutores como chaves, alterando ou controlando o valor da corrente ou tensão do circuito [2]. Assim, a eletrônica de potência lida com as áreas de potência, eletrônica e controle, sendo que a potência está relacionada a equipamentos de potência estáticos e rotativos para geração, transmissão e distribuição de energia elétrica. Já a eletrônica aborda instrumentos e circuitos

para processamento de sinais. Finalmente, o controle refere-se às propriedades dinâmicas e de regime permanente dos sistemas em malha fechada [1].

Um dos módulos provenientes dessa evolução é o IRAM. No trabalho de [3] foi apresentada uma alternativa ao conversor *back-to-back* convencional, utilizado em aplicações de acionamento de motores. Conforme [4] e [5], este conversor ajusta os níveis de tensão e frequência, para realizar a conexão à rede de maneira correta. A abordagem apresentada propõe a utilização do módulo eletrônico IRAM no desenvolvimento do estágio de potência.

O módulo IRAM foi elaborado para aprimorar a aplicação de acionamento e controle de velocidade de motores, comumente empregado em aplicações industriais, devido a sua versatilidade [6]. Assim, destaca-se a importância de ter contato com tal ferramenta durante o aprendizado de sistemas de potência nos cursos de engenharia [7]. O desenvolvimento de experimentos em sala de aula facilita a aprendizagem, tornando a aula prática e contribuindo para a solidificação do conhecimento. Dessa forma, as aulas tornam-se mais dinâmicas, o que pode aumentar o interesse dos estudantes pela disciplina, pois se vai além das barreiras tradicionais de sala de aula. Sendo assim, o ensino híbrido entre teoria e prática contribui positivamente para que os estudantes obtenham uma maior absorção dos conteúdos ministrados, quando são utilizados materiais auxiliares no aprendizado, aproximando a teoria da realidade [8]. Em [9], o autor complementa que, tanto o laboratório didático como materiais didáticos, proporcionam aos estudantes uma experiência de ensino maior, através do manuseio de instrumentos nas atividades propostas, pois causam curiosidade e estimulam o aprendizado.

Portanto, o objetivo desse trabalho é desenvolver um módulo didático de acionamento de motores, de baixo custo, para que estudantes possam utilizar e desenvolver seus conhecimentos em controle e acionamentos elétricos de máquinas, apresentando o esquemático e *layout* de um circuito utilizando o módulo IRAM. Além disso, as dificuldades enfrentadas no projeto são expostas e as suas soluções discutidas. Também, os resultados experimentais são apresentados e discutidos. Desta forma, a organização do trabalho é dada da seguinte maneira: a Seção II apresenta o módulo de potência IRAM e suas principais características e a Seção III apresenta, de forma detalhada, o desenvolvimento do projeto de acionamento, mostrando todos os esquemáticos e *layouts* construídos. Por

fim, os resultados experimentais obtidos são mostrados na Seção IV e as conclusões são dadas na Seção V.

## II. MÓDULO IRAM

O módulo IRAMS10UP60A-2 é um circuito integrado de potência desenvolvido pela empresa fabricante *International Rectifier*. Este módulo é utilizado para o controle eletrônico de motores, podendo ser aplicado em máquinas de lavar, refrigeradores, entre outras máquinas. As características do módulo abordado a seguir são descritas em seu *datasheet* [10]. A Figura 1 apresenta o encapsulamento do módulo IRAMS10UP60A-2.

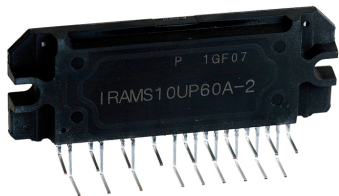


Figura 1. Módulo IRAMS10UP60A-2 da *International Rectifier*, adaptado de [11]

Este módulo é um circuito integrado híbrido ou HIC (*Hybrid Integrated Circuit*), ou seja, possui tanto circuitos analógicos quanto digitais no interior de seu invólucro. A sua tecnologia proporciona um *driver* de motor CA (Corrente Alternada) de grande desempenho, sendo extremamente compacto. O módulo IRAM consiste em seis transistores bipolares de porta isolada IGBT (*Insulated Gate Bipolar Transistor*) ligados em uma ponte inversora trifásica. Os transistores IGBTs são geralmente usados no controle de dispositivos de potência, como no controle de solenoides, motores e outras aplicações importantes nas quais se necessita controlar altas correntes.

O módulo utilizado neste trabalho, modelo IRAMS10UP60A-2, atende tensão de até 600 V e corrente eficaz de até 10  $A_{RMS}$ , com temperatura máxima de 100°C. A sua corrente de pico máxima é de 15 A e a frequência de PWM (*Pulse Width Modulation*) tem valor máximo de 20kHz. Sendo um dispositivo altamente confiável, possui um monitor de temperatura incorporado, baseado em um termistor NTC (*Negative Temperature Coefficient*) e proteção contra sobretensão/sobrecorrente. Além disso, conta com uma função integrada de bloqueio de tensão insuficiente, o que oferece alto nível de proteção e segurança ao circuito.

### A. Tipos de acionamento

O módulo IRAM dispõe de três braços inversores para o acionamento (ou três pares de chaves/transistores) de motores que são controlados por meio de sinais PWM. Essa configuração permite que haja acionamento de motores de corrente contínua (CC), de corrente alternada (CA) monofásicos ou trifásicos, dentre outros. Abaixo é descrito o modo de ligação para cada tipo de motor.

1) *Motor CC*: Para o controle da velocidade de um motor CC, varia-se o *Duty Cycle* do PWM, permitindo obter valores médios de tensão contínua dentro do limite de alimentação do barramento do módulo. Além disso, pode-se realizar a ligação de um motor CC com acionamento do tipo *full-bridge* ou dois motores CC com acionamento *half-bridge* neste módulo. Ressalta-se que no acionamento *half-bridge*, é necessário que haja um ponto médio para a ligação dos motores. Idealmente, isto é feito com a utilização de dois capacitores, gerando um ponto médio que será comum entre os motores. Este ponto médio também pode ser criado com um braço auxiliar configurado com padrão PWM em 50%.

2) *Motor CA Monofásico*: A partir do controle dos transistores através de um sinal de PWM, pode-se criar uma onda senoidal com o IRAM. Utilizando este módulo com o inversor, é possível que uma fonte de corrente contínua converta-se em uma tensão alternada para a alimentação de um motor CA. Para a alternância da direção de giro desse motor, é necessária a mudança do sentido da alimentação do capacitor de partida. Dessa forma, o IRAM pode acionar até três motores monofásicos simultaneamente.

3) *Motor CA Trifásico*: Analogamente ao acionamento do motor CA monofásico, o motor CA trifásico necessita de três sinais senoidais (um para cada fase), que são gerados através de sinais PWM, a partir de um microcontrolador. Nesse caso é necessário que haja uma defasagem de 120° entre cada uma das fases para que o motor seja acionado corretamente. Sendo assim, como o IRAM possui três braços inversores, pode acionar um motor CA trifásico, sendo este acionamento do tipo *half-bridge*.

## III. PROJETO DO SISTEMA DE ACIONAMENTO

Para o projeto do sistema de acionamento, primeiramente foi feita a construção do esquemático, *layout* e placa física. Para tal, foi utilizado como base a conexão típica para uma aplicação com o IRAMS10UP60A-2, descrita no *datasheet* [10] do componente e as ligações foram realizadas obedecendo o padrão disponibilizado pelo fabricante. O protótipo construído é mostrado na Figura 2 e o seu esquema é apresentado na Figura 3, que foi montado em uma matriz de contatos (*proto-board*).

Vale a pena destacar que, neste primeiro momento de testes na *proto-board* foram utilizados motores diferentes, em relação ao motor empregado na obtenção dos resultados experimentais.

Durante esse primeiro experimento, foi identificado que o módulo IRAM não funciona com tensão abaixo de 12 V, sendo necessária a verificação do valor de tensão de saída do conversor DC-DC. Sendo assim, é recomendado manter a alimentação sempre um pouco acima dos 12 V necessários para alimentação do módulo IRAM. Outro ponto a ser observado é que qualquer mau contato presente no sistema prejudica o giro para ambos os lados do motor (giro para direita, giro para esquerda). Além disso, a presença de um capacitor mau conectado também pode alterar o giro do motor.

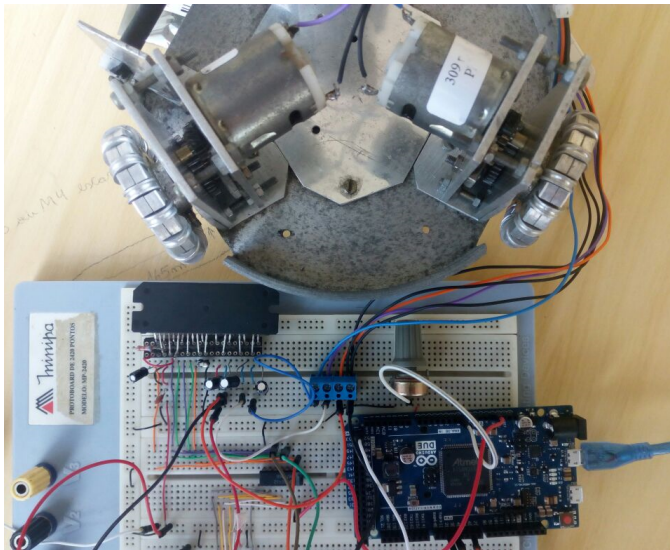


Figura 2. Experimento com *protoboard*

O esquema desenvolvido é composto de um módulo regulador de tensão *LM2596*, que opera como um conversor DC-DC, onde a tensão de saída pode ser ajustada através de um potenciômetro, entre 1,5 a 35 V, tendo como entrada de 3,2 a 40 V. Seu objetivo é alimentar, com 12 V, o IRAM (pino 22 *VCC*) e o *Arduino Due* (pino *Vin*). Há também capacitores de desacoplamento, cuja função é evitar que ruídos de alta frequência influenciem na entrada de alimentação da porta lógica *NOT* ou no módulo IRAM, deixando então suas respectivas saídas mais estáveis.

Na Figura 3 é possível ver na entrada de alimentação dos dois circuitos integrados, já mencionados, um conjunto de capacitores, um cerâmico e outro eletrolítico. Existe também uma porta lógica *NOT* visto que, como parâmetro da Modulação PWM utiliza-se uma geração de sinal complementar. Segundo [12], quando dois semicondutores estão dispostos em braço, a geração de um sinal complementar torna-se necessária. O acionamento das chaves é realizada de forma inversa, ou seja, quando *S1* conduz, *S2* não está conduzindo e vice-versa, sendo um comportamento sucessivo [12]. Para que o sinal modulador (PWM) seja invertido, tornando-se em um sinal complementar, pode-se usar uma porta *NOT* [12]. Os bornes presentes no circuito possuem as seguintes finalidades:

- *borne* ALIM\_BARRA\_CC: entrada de alimentação, até 600 V, do barramento CC;
- *borne* ALIM\_DE\_12\_PARA\_ARD: saída da alimentação de 12 V para o *Arduino*;
- *borne* MOTOR: ligação dos terminais de dois motores CC ou um motor CA;
- *borne* ARD\_PWM: entrada dos sinais de PWM;
- *borne* ENTRADA\_5V\_PORTA\_NOT: entrada de alimentação de 5 V, vinda do *Arduino*, para a porta lógica *NOT*.

Tendo em vista a otimização do projeto, optou-se por alimentar o circuito inversor 7404 com o próprio *Arduino*. Após a construção do esquemático, foi desenvolvido o *layout*

do circuito, para posterior confecção da placa física de circuito impresso. O *layout*, conforme mostrado na Figura 4, é composto de duas camadas, pois as trilhas vermelhas (*Top*) representam as trilhas na parte superior da placa e as trilhas azuis (*Bottom*) representam as trilhas na parte inferior da placa.

Algo importante a se destacar é que foi elaborada uma fronteira, entre o circuito de potência e o circuito de controle. A parte de potência está sem plano terra (em preto), e a parte de controle possui o plano de terra (em azul), sendo essa uma estratégia para blindar o circuito e tentar evitar ruído eletromagnético. Tanto o esquemático, quanto o *layout* foram desenvolvidos no *Software Eagle* versão de estudante.

O módulo IRAM possui duas linhas de pinos curvados a 90°, o que dificulta sua estabilidade quando conectado diretamente à placa. Visto que tal fato poderia interferir no funcionamento do sistema de acionamento, foi feito um adaptador para o módulo com o objetivo de melhor fixá-lo na placa do sistema. Dessa forma, o adaptador do IRAM consiste em um barramento único de 19 pinos, os quais se conectam aos pinos do módulo em si. O esquemático do adaptador foi também realizado no *Software Eagle*, e é mostrado na Figura 5. O *layout* do circuito, por sua vez, é apresentado na Figura 6.

Tanto a placa principal, como a placa do adaptador do IRAM foram fabricadas artesanalmente, em laboratório, sendo o resultado da placa do adaptador mostrado na Figura 7.

O adaptador facilitou a conexão do módulo. Através do barramento único, o módulo é conectado à placa, possibilitando uma conexão mais firme e tornando a transmissão de sinais mais robusta e confiável. Ademais é possível ver na Figura 3, abaixo do esquema geral do circuito, um barramento de pinos (1 a 19). Esse barramento é correspondente a sequência de pinos resultante do adaptador, onde pode-se visualizar o nome de cada pino, em relação ao barramento do IRAM no circuito geral.

#### A. *Software Eagle*

Segundo [13], o *software Eagle* é um dos *softwares* mais utilizados e conhecidos para projeto e desenvolvimento de PCI (Placas de Circuito Impresso). Por ser de fácil utilização, possuir uma grande biblioteca de componentes prontos e também permitir que o usuário crie novos componentes ou altere os componentes existentes, esse *software* tem alcançado notoriedade no meio de projetistas de circuitos impressos e, principalmente, entre estudantes e *hobbistas* de eletrônica [13], [14]. Além disso, esse *software* abrange todas as etapas do ciclo de desenvolvimento de uma PCI, desde a concepção do esquemático do circuito até a geração dos arquivos *gerber* para fabricação da placa [14].

## IV. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

A plataforma utilizada para a aplicação do sistema de acionamento proposto foi um robô soldador da companhia *Bug-O Systems* [15]. É um robô que realiza cortes e soldas lineares e possui dois graus de liberdade, ou seja, possui módulos responsáveis pelos movimentos longitudinal e transversal ao

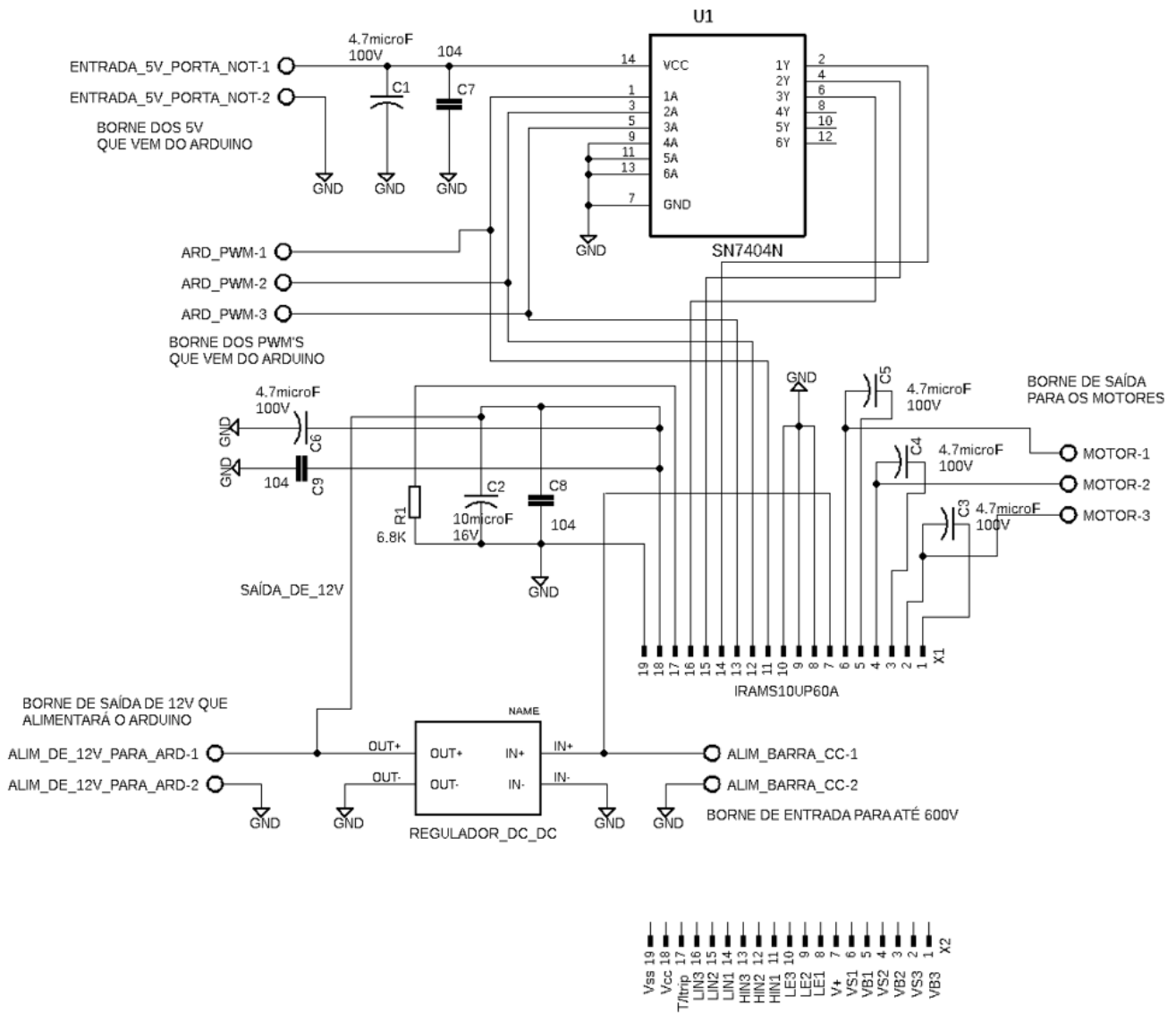


Figura 3. Esquemático do circuito de acionamento, juntamente com a identificação dos pinos do adaptador

trilho de soldagem, sendo estes independentes entre si. Este robô possui hardware original de alto custo, e por requerer um sistema de acionamento robusto, se tornou a plataforma adequada para testes.

Desta forma, o módulo utilizado neste trabalho foi o que proporciona o movimento longitudinal do robô soldador, sendo este provido de um motor CC. Para controle do acionamento do motor, foi utilizado o microcontrolador da placa *Arduino Due* [16]. A Figura 8 apresenta a bancada utilizada para testes do sistema de acionamento aplicado ao robô.

Nos testes realizados, foi aplicada uma tensão de barramento igual a 24 V. Além disso, o acionamento realizado foi do tipo *half-bridge*, o que significa que a tensão máxima aplicada ao robô foi de 12 V.

Inicialmente, foram feitos testes em que se aplicou valores de tensão de armadura numa faixa entre 0 a 10 V. Aplicados

tais valores, foi medida a tensão nos terminais do motor e percebeu-se uma variação entre a mesma e a tensão aplicada. Sendo assim, se tornou necessária a realização de uma calibração. A Figura 9 apresenta as curvas ideal e real entre tensões de armadura aplicada e medida.

A equação que representa a curva real obtida através do teste descrito é dada por:

$$V_{amed} = 0,9594V_a + 0,0894, \quad (1)$$

onde  $V_a$  é a tensão de armadura aplicada e  $V_{amed}$  é a medida.

Desta forma, esta equação foi utilizada para corrigir a diferença entre tensões de armadura aplicada e medida, sendo uma solução adequada.

Para maior verificação do comportamento do motor quando acionado pelo sistema proposto, foram feitos testes em que se aplicou degraus de tensão de valores diferentes em curto



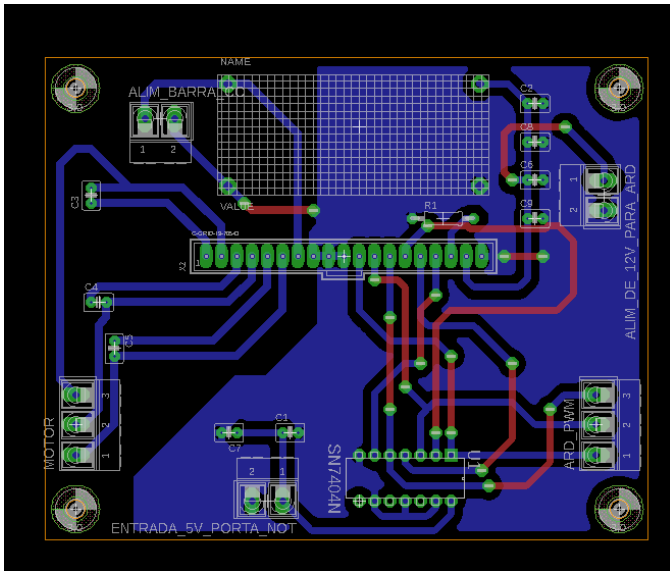


Figura 4. *Layout* do circuito de acionamento

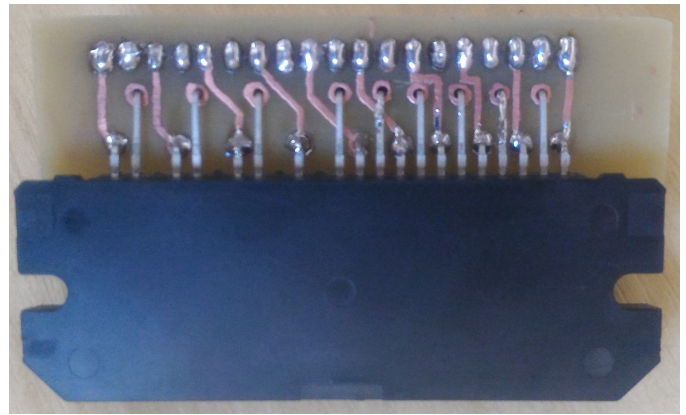


Figura 7. Adaptador construído para o módulo IRAM

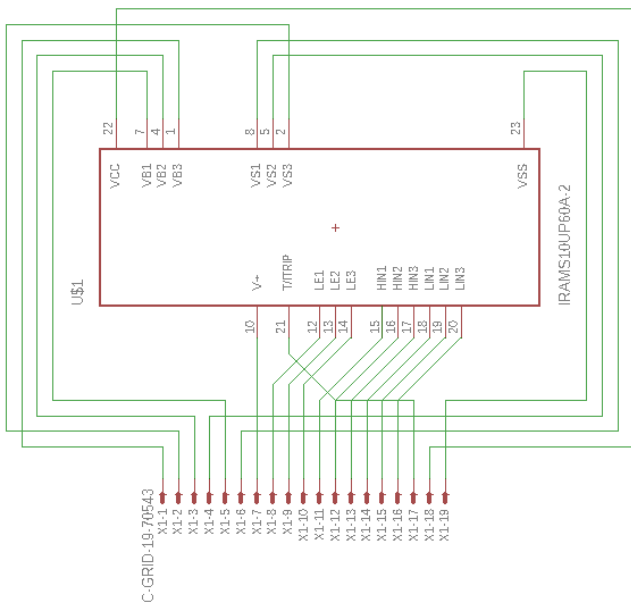


Figura 5. Esquemático do adaptador para o módulo IRAM

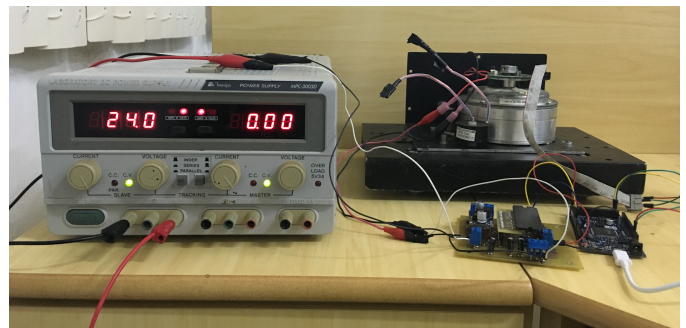


Figura 8. Bancada de testes experimentais

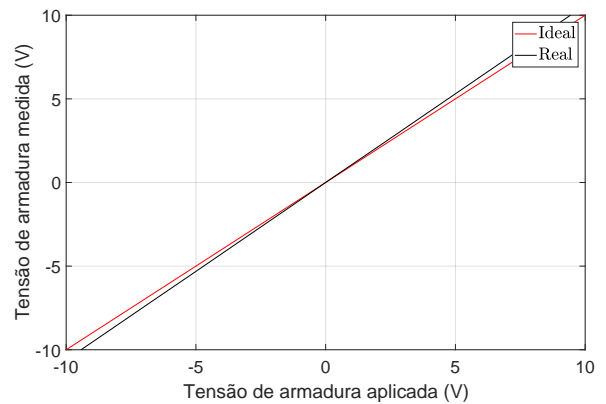


Figura 9. Curva para calibração da tensão de armadura

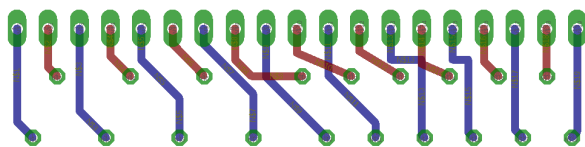


Figura 6. *Layout* do adaptador para o módulo IRAM

espaço de tempo. O resultado apresentado a seguir representa um teste no qual foram aplicados degraus de tensão de armadura iguais a 5 e 10 V. Este teste foi realizado durante 10 s, sendo o degrau de 5 V aplicado no instante de 2 s, e o de 10 V no instante de 6 s. Para melhor visualização do comportamento do robô durante o instante transitório, foram também coletados valores de velocidade em mm/s. Para a medição de velocidade, foi utilizado um *encoder* incremental, parte do hardware original do robô. A Figura 10 apresenta as curvas de tensão de armadura ( $V_a$ ) e velocidade ( $V$ ) coletadas

durante este testes.

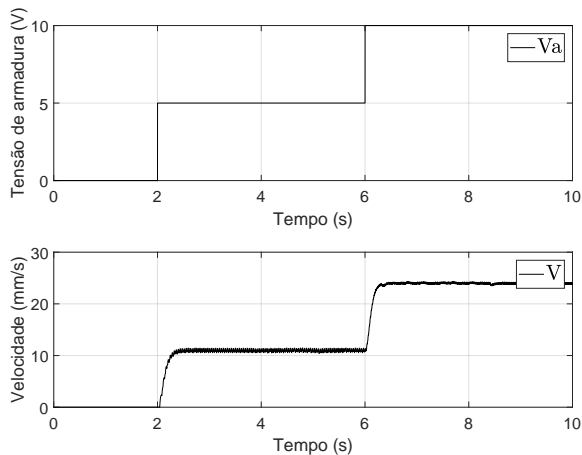


Figura 10. Resultados obtidos na aplicação de degraus de tensão

Como pode ser visto, o sistema proposto possibilitou um acionamento robusto, resultando em respostas rápidas aos degraus de tensão aplicados. Ressalta-se que as variações apresentadas na curva de velocidade são devidas aos ruídos no sensor de velocidade, além de outras dinâmicas não relevantes para este trabalho, sendo estas facilmente corrigidas pela aplicação de técnicas de controle.

## V. CONCLUSÃO

Neste trabalho foi proposto e implementado um protótipo de Módulo IRAM para aplicações industriais e didáticas. Ao longo do projeto, as dificuldades e suas soluções foram discutidas, tais como: a necessidade de emular um banco de capacitores com um dos braços do módulo IRAM, e a complexidade na integração entre módulo IRAM, *Arduino*, portas lógicas e motores. Além disso, resultados experimentais foram apresentados para demonstrar o desempenho do protótipo proposto para acionamento de motores.

## REFERÊNCIAS

- [1] M. H. Rashid, *Eletrônica de potência: circuitos, dispositivos e aplicações*. Pearson, 2014.
- [2] D. W. Hart, *Eletrônica de Potência: análise e projetos de circuitos*. McGraw Hill Brasil, 2016.
- [3] D. O. Neacsu, "Towards an all-semiconductor power converter solution for the appliance market," in *IECON 2010-36th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society*. IEEE, 2010, pp. 1677–1682.
- [4] L. T. Soares, C. M. Pimenta, S. I. Junior, and S. R. Silva, "Modelagem e controle de um conversor back-to-back para aplicação em geração de energia eólica," in *IV Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos*. SBA, 2012, pp. 1–6.
- [5] K. Huang, S. Huang, F. She, B. Luo, and L. Cai, "A control strategy for direct-drive permanent-magnet wind-power generator using back-to-back pwm converter," in *Electrical Machines and Systems, 2008. ICEMS 2008. International Conference on*. IEEE, 2008, pp. 2283–2288.
- [6] R. R. Riehl, "Uma metodologia para determinação das capacitâncias parasitas de motores de indução trifásicos de rotor em gaiola. 2010. 127p," tese de Doutorado. Departamento de Sistemas de Controle de Energia. Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação.

- [7] S. A. Almouloud and M. J. F. da Silva, "Engenharia didática: evolução e diversidade didactic engineering: evolution and diversity," *Revmat: Revista Eletrônica de Educação Matemática*, vol. 7, no. 2, pp. 22–52, 2012.
- [8] L. P. Maia, "Sosim: Simulador para o ensino de sistemas operacionais," *Rio de Janeiro*, 2001.
- [9] N. A. Grandini and C. R. Grandini, "A importância e utilização do laboratório didático na visão de alunos recém saídos do ensino médio," *XVII Simpósio Nacional de Ensino de Física*, pp. 01–06, 2007.
- [10] *Plug N Drive Integrated Power Module for Appliance Motor Drive - IRAMS10UP60A Series 10A 600V*, International Rectifier, El Segundo, California, USA, 2012, pp. 1–17.
- [11] PLATAN. *Irams10up60a-2*. [Online]. Available: <http://www.platan.ru/shop/part/IRAMS10UP60A-2.html>
- [12] N. A. Ahmed, K. Amei, and M. Sakui, "A new configuration of single-phase symmetrical pwm ac chopper voltage controller," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 46, no. 5, pp. 942–952, 1999.
- [13] E. L. d. M. MEHL, "Projeto de placas de circuito impresso com o software eagle," *Apostila da UFPR, s/d. Disponível em: < http://www.eletrica.ufpr.br/mehl/pci/apostila/cc.pdf >* Acesso, vol. 15, 2012.
- [14] P. EAGLE, "Software. disponível em <https://www.autodesk.com/products/eagle/overview>," *Acessado em 01 de Julho de 2018*.
- [15] *Instructions and parts manual: modular drive system*, 1st ed., Bug-O Systems Corporation, Canonsburg, PA, 2014, pp. 1–57.
- [16] *Arduino. Placa arduino due*. [Online]. Available: <https://store.arduino.cc/usa/arduino-due>