

Módulo de disparo e controle de motor à relutância variável

Variable reluctance motor trip and control module

Erick de Araújo Silva

Graduando do Curso de Engenharia Elétrica (UNIPAM)

E-mail: ericksilva@unipam.edu.br

João Marcos de Andrade

Graduando do Curso de Engenharia Elétrica (UNIPAM)

E-mail: joaomarcos1@unipam.edu.br

Thiago Vieira da Silva

Professor orientador (UNIPAM)

E-mail: thiagovs@unipam.edu.br

Resumo: O mercado de engenharia elétrica é bastante diversificado e possui inovações a todo instante. Consonante a isso, na área de motores elétricos, surgiu a necessidade de se criar um motor de alto rendimento, aliado a uma alta velocidade de rotação e um torque satisfatório para atuar em diversas aplicações. Surge, então, o Motor a Relutância Variável (MRV). Entretanto, existem condições especiais para funcionar este motor, visto que ele não pode ser conectado diretamente à tomada de energia convencional. Para tanto, deve se utilizar de conceitos eletrônicos para alimentar, alternadamente, cada bobina desse motor, utilizando-se de corrente contínua. Este trabalho apresenta um módulo eletroeletrônico capaz de rotacionar um motor à relutância variável.

Palavras-chave: Acionamento de um MRV. Máquina à Relutância Variável. Disparo de motor a relutância variável. PWM.

ABSTRACT: The electrical engineering market is quite diverse and has innovations at all times. Accordingly, in the area of electric motors, the need arose to create a high-performance motor, combined with a high speed of rotation and a satisfactory torque to operate in various applications. Then, the Variable Reluctance Motor (MRV) appears. However, there are special conditions for running this engine, as it cannot be connected directly to the conventional power outlet. To do so, electronic concepts should be used to alternately power each coil of this motor, using direct current. This work presents an electro-electronic module capable of rotating a motor at variable reluctance.

KEYWORDS: MRV drive. Variable Reluctance Machine. Variable reluctance motor trip. PWM.

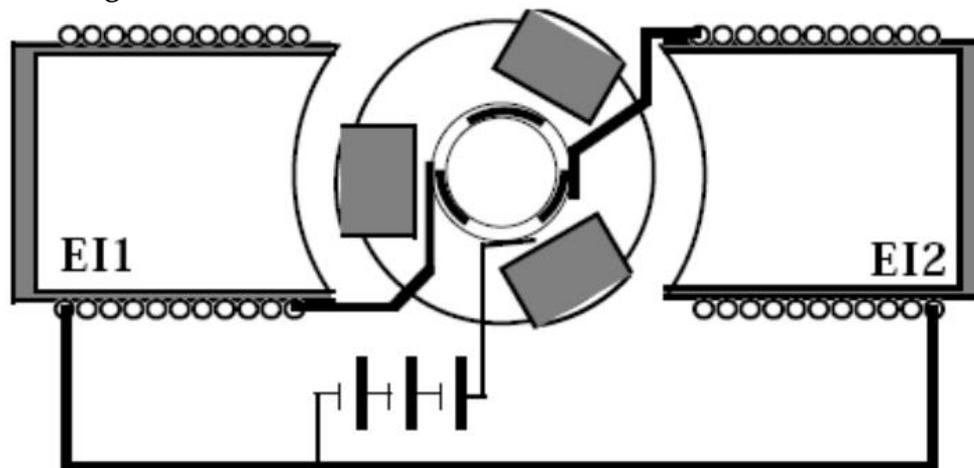
1 INTRODUÇÃO

Durante a evolução humana, industrial ou científica, os processos de automação se intensificaram após a descoberta da eletricidade. Desde a criação do primeiro motor elétrico no século XIX, que possuía uma perda energética significativamente menor em relação ao motor a vapor, por exemplo, a busca por novas formas de partida e rotação não cessou (COELHO *et al.*, 2011).

Diversas formas de partida e rotação foram desenvolvidas. É possível notar um grande avanço desses módulos e componentes eletromotrizes ao longo dos anos. Existe uma variedade imensa dessas máquinas, cada uma destinada a uma finalidade específica.

Em setembro de 1842, Robert Davidson (1804-1899) criou um motor elétrico capaz de movimentar uma locomotiva de 6 toneladas, visando a uma alternativa à locomotiva a vapor e seus transtornos causados a passageiros mais exigentes. Seu princípio de construção consistia em dois eletroímãs justapostos em lados opostos, um rotor de madeira no centro com três barras de ferro fixadas na periferia e duas baterias. Ao todo, foram utilizados quatro motores desse modelo na locomotiva. O motor construído em questão é o motor a relutância variável comutado (PINTO, 2010).

Figura 1 – Cilindro Rotórico com três barras de ferro encastradas



Fonte: Miguel; Pinto, 2010.

Atualmente, existem diversas formas de se controlar esse motor a relutância variável, porém há métodos mais eficazes. Para tanto, se faz necessário um estudo direcionado para encontrar a melhor configuração que permita uma máxima eficiência desse módulo controlador bem como do Motor a Relutância Variável (PINTO, 2010).

Devido às suas características, o motor a relutância necessita de um controle específico e preciso. Visando a isso, foi realizado um estudo sobre métodos de controle e acionamento da máquina. Como objetivo primário, buscou-se o controle de velocidade do motor a relutância, o que possibilita aplicações precisas e específicas.

O objetivo específico foi desenvolver um circuito de controle, baseado no microprocessador ATMEGA328P. Após isso, construir um circuito de potência que recebe os sinais provenientes da placa de controle, atendendo, de fato, à demanda de potência do motor a relutância variável. Conforme o circuito de potência receba o sinal,

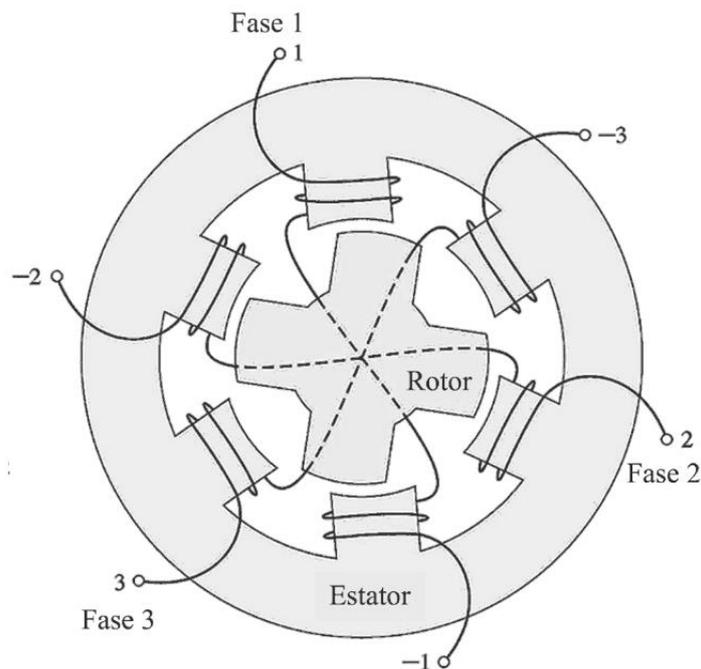
ele será o responsável por dosar a quantidade de corrente e a frequência de alternância entre a ativação das bobinas.

Tendo em vista o descrito anteriormente, têm-se como objetivos gerais o acionamento e controle de velocidade do motor a relutância. Este projeto desenvolve um método para o acionamento e controle de velocidade de um motor a relutância. Este estudo pode resultar em futuros trabalhos, como a extração de dados do processo utilizado.

2 REVISÃO LITERÁRIA

O Motor a Relutância Variável é uma máquina com um custo de fabricação extremamente baixo, em relação a outras máquinas eletromotrizes e possui um rendimento significativamente alto e um modelo de construção simples. Isso se justifica pelo seu princípio de funcionamento. É, basicamente, composto por um rotor e um estator, ambos compostos por lâminas de material ferromagnéticas. Possuem polos que são justapostos de forma uniforme entre si, e os polos do estator devem ficar mais próximos quanto possíveis dos polos do rotor, durante o movimento de rotação do rotor. Nesse caso específico, o objeto de estudo é o Motor a Relutância Variável com configuração 6x4, ou seja, possui 4 polos em seu rotor e 6 polos em seu estator (OLIVEIRA, 2015). A Figura 1 representa a estrutura física do motor supracitado.

Figura 2 – Vista transversal de um Motor a Relutância Variável



Fonte: Rocha *et al.*, 2012.

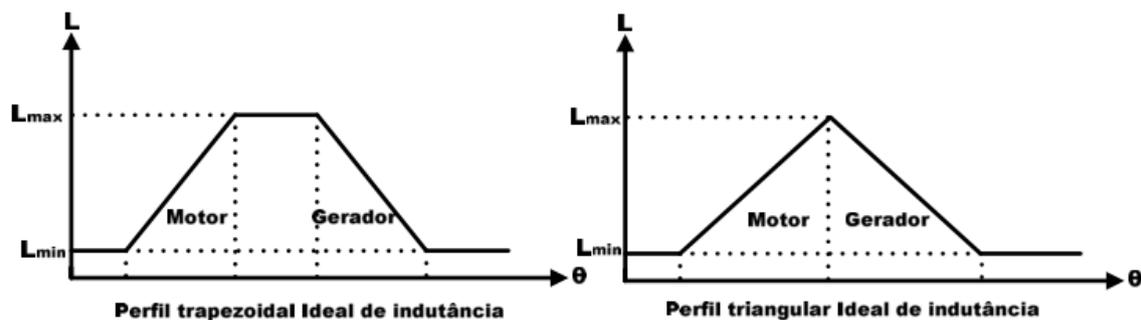
Este outro exemplo mostra que os polos do rotor ficam exatamente a 90° de distância entre si, enquanto as bobinas do estator ficam a uma distância angular de 60° , portanto a energia e o tempo necessários para que haja um deslocamento do rotor serão iguais, independentemente de qual será a próxima bobina acionada. Isso explica o porquê de a única diferença na sequência de acionamento de fases ser o sentido de rotação (OLIVEIRA, 2015).

2.1 PERFIL DE INDUTÂNCIA

Quando os polos de indutor estão maximamente alinhados com as bobinas do estator, o fluxo que percorre o rotor é máximo, dada as limitações da relutância e consequentemente a indutância também é máxima. Isso faz com que a relutância seja mínima, pois, evidentemente, a relutância é uma propriedade física de oposição à passagem de fluxo magnético (OLIVEIRA, 2015).

Há situações em que a indutância perde seu valor fixo. Essas situações ocorrem sempre que o eixo do rotor está com os pares de polos desalinhados com os pares de bobinas do estator. Este é o momento mais adequado para o acionamento das bobinas subsequentes. Se os arcos polares, isto é, as dimensões dos polos, possuírem o mesmo tamanho, a máxima indutância será obtida somente em um instante de tempo, todavia existe a possibilidade de os arcos polares do rotor serem maiores que os arcos polares do estator e vice-versa. Nesse caso, o perfil de indutância irá gerar um formato de curva trapezoidal. Em ambas as situações, o perfil de indutância mostra que, quando o nível de indutância começa a decair, o par de polos começa a ter a função gerador.

Figura 4 – Perfis idealizados de indutância trapezoidal triangular



Fonte: Oliveira, 2015.

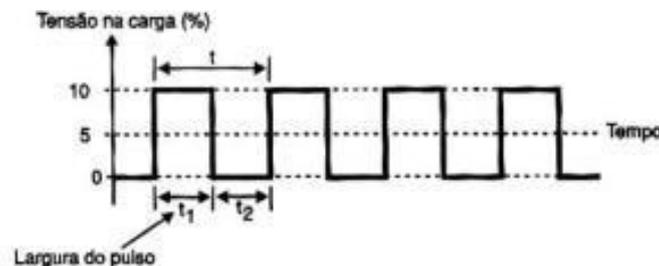
O perfil de indutância idealizado é um perfil didático que ilustra a variação da indutância conforme o rotor rotacional. É um perfil distante do real, porém é didático e fácil para se trabalhar com ferramentas computacionais (OLIVEIRA, 2015).

A Figura 4 representa com clareza que, quando existe uma disparidade de arcos polares entre o estator e o rotor, o momento máximo de indutância é estendido, visto que o alinhamento entre o par de polos e o par de bobinas é prolongado (OLIVEIRA, 2015).

2.2 O CONTROLADOR

Para a realização do controle, estima-se a utilização de um circuito que gere um sinal PWM em conjunto com um trio de MOSFET para o controle do motor. O PWM, ou seja, modulador de largura de pulso, tem como objetivo realizar alterações na forma de onda quadrada, definindo assim por quanto tempo a onda permanecerá em nível lógico alto como também baixo.

Figura 5 – Tensão na carga x tempo.



Fonte: Ghirardelo, [s. d.].

Assim é o funcionamento de um PWM, varia-se a largura de pulso para controlar o sinal aplicado a uma carga, conseqüentemente a sua potência.

2.3 ATMEGA328P

O ATmega328P é um microcontrolador tipo chip único criado pela Atmel na família megaAVR. Possui uma memória de somente leitura programável e eletricamente apagável (EEPROM) e uma memória de somente leitura (RAM). Este microcontrolador necessita de oscilação externa para obter seu ciclo de *clock*. Normalmente, utiliza-se de um oscilador de cristal de quartzo que, ao ser excitado, vibra em até 16 milhões de vezes por segundo, dando assim uma referência para a frequência de trabalho (FERRONI, 2018).

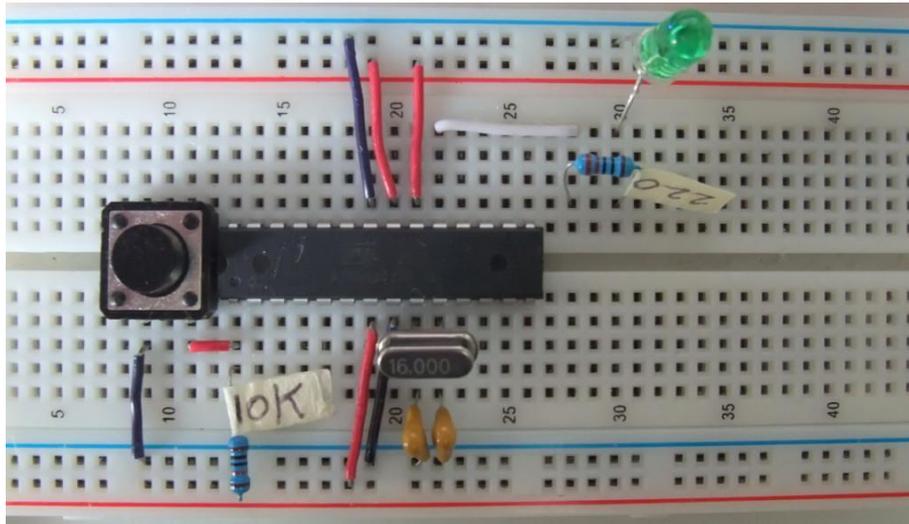
O ATMEGA foi projetado para ser utilizado juntamente com um circuito auxiliar que serve para alimentar, oscilar e permitir a sua comunicação com outros dispositivos externos.

Este dispositivo possui diversas conexões digitais – que são conexões de entrada e saída, conexões analógicas – que normalmente são utilizadas para recepção de sinais analógicos, conectores de tensão – entrada e saída de tensões DC, um conector de referência (GND) e um RESET que reinicia o microcontrolador.

é chamado de *Arduino standalone*, que nada mais é que a confecção de um circuito auxiliar relativamente simples frente ao Arduino convencional. Os fatores que levam a essa utilização são diversos: menor uso de componentes, redução no preço dos componentes e eliminação de pinos inutilizados no projeto.

O *Arduino standalone* possui uma configuração circuital simples, como demonstrado na figura a seguir:

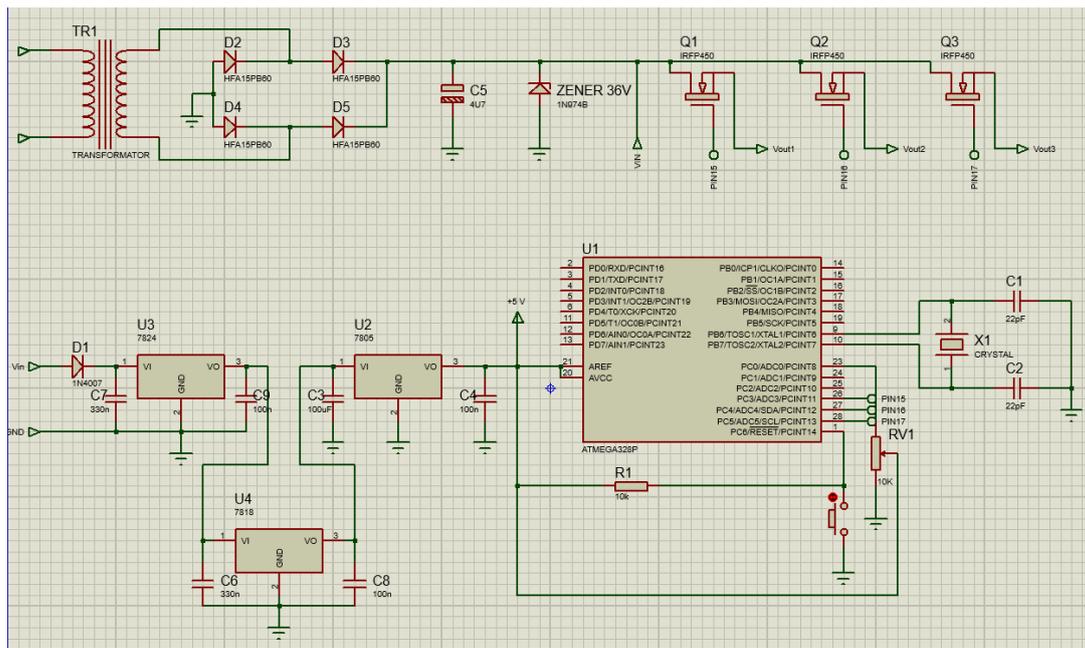
Figura 7 – Arduino standalone em protoboard



Fonte: <http://www.martyncurrey.com/arduino-on-a-breadboard/>, 2014.

O primeiro passo foi a tentativa de simulação. Utilizando-se do software Proteus, foi montado um esquemático inicial que demonstra o propósito do projeto.

Figura 8 – Esquemático do circuito controlador



Fonte: Elaborado pelos autores, 2019.

Após adquirir informações prévias do motor, como tensão e potência nominal, foi possível desenvolver e dimensionar o circuito de potência de maneira correta. Foi montada uma fonte retificadora DC. Essa fonte disponibilizará 36 VDC para as chaves semicondutoras (MOSFET's).

A fonte utiliza um transformador de potencial de formato toroidal que reduz a tensão da rede para 50 VAC. É utilizada uma ponte retificadora de diodos com 4 terminais que entregam a corrente retificada; um capacitor de 2200 uF/100 V fica responsável por linearizar a corrente, enquanto um diodo zener de 36V reduz a tensão para a nominal do motor. Após isso, são utilizadas três chaves semicondutoras MOSFET's IRFP450, que chaveam o sinal do circuito de controle fornecendo uma corrente maior para a carga.

O circuito que alimenta o arduino é uma adaptação do circuito do Arduino *standalone*. Foram adicionados reguladores de tensão para aproveitar a tensão provinda da fonte retificadora DC. O microprocessador é alimentado com 5 VDC e manda 3 sinais PWM, que funcionam alternadamente entre si, para as chaves semicondutoras que, por sua vez, interpretam o sinal no seu terminal de *gate* e ligam ou desligam conforme o nível lógico em seu terminal de *gate*. Quando o nível lógico é alto, a chave conduz; quando o nível lógico é baixo, a chave desliga. Os três terminais de saída serão conectados ao motor, bem como o GND do circuito.

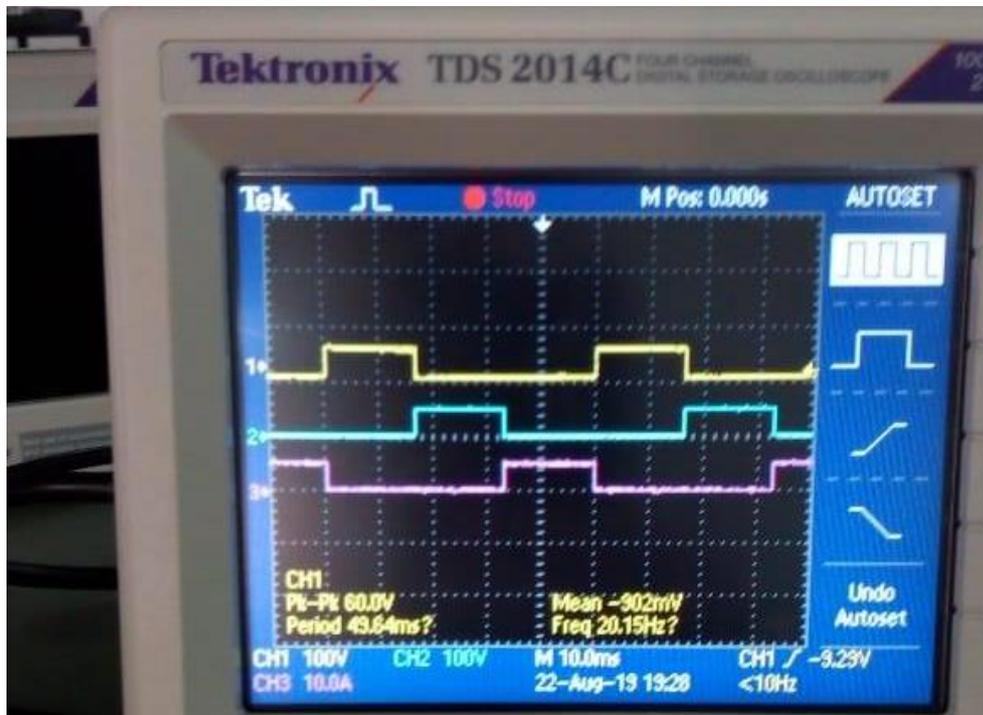
As chaves semicondutoras reproduzem a mesma forma de onda que receberem em seu terminal *gate*. Para formar 3 ondas PWM que se alternam no tempo, foi utilizada a plataforma de programação Arduino IDE para simular as formas de onda PWM.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Após as pesquisas, foi possível definir componentes e esquemas, assim como uma abordagem prática. Foi possível dimensionar e projetar o circuito esquemático do protótipo, porém ainda não foi possível realizar simulações específicas, pois a parte de simulação no software está em processo de aprendizagem. Porém, o próprio software auxiliou na escolha do modelo de MOSFET, pois foi feita uma busca no banco de dados do software.

Com os estudos acerca do microcontrolador, foi possível finalizar o circuito *standalone* e, conseqüentemente, determinar as demais conexões que, até então, eram desconhecidas para as necessidades do projeto. A última versão do esquemático está disponível na Figura 8.

A parte de programação foi trabalhada conforme os conhecimentos já adquiridos de programação desse tipo de microcontrolador e auxílio de informações no endereço eletrônico da própria fabricante. Foram testadas em uma matriz de contatos e aferidas as 3 saídas com o auxílio de um osciloscópio de 4 canais. O resultado pode ser conferido na Figura 9.

Figura 9 – Aquisição dos sinais PWM do microcontrolador

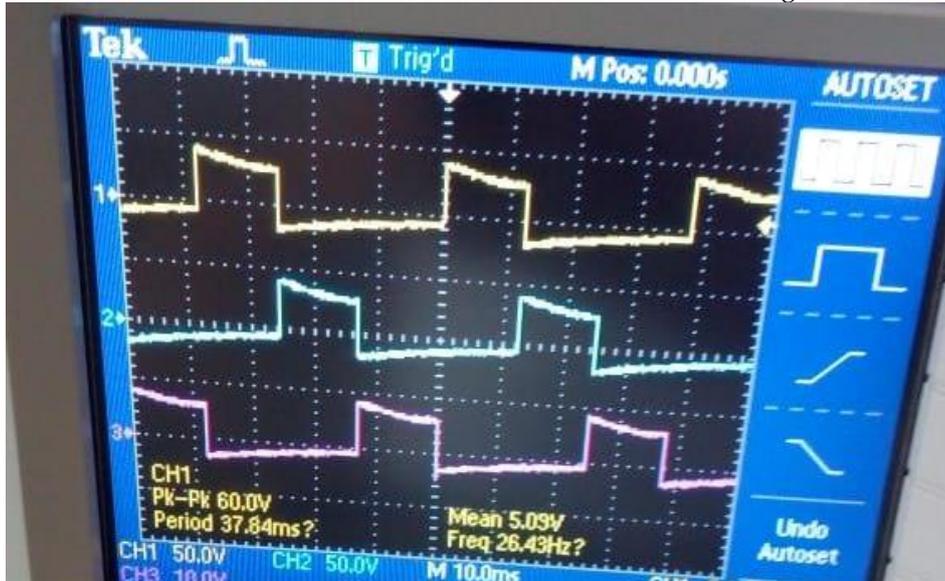
Fonte: Dados da pesquisa, 2019.

Após isso, utilizou-se de um potenciômetro multivoltas conectado ao microcontrolador para realizar a variação da frequência das ondas PWM. Potenciômetro é alimentado com tensão de 5 V e sua saída conectada ao microcontrolador. Na programação, é feita uma transformação do valor do resistor para uma variável de tempo. Essa variável de tempo é transformada em valor de frequência e é alterado o número de ciclos de onda por minuto na saída.

A Figura 9 retrata o módulo de disparo operando a vazio, isto é, sem carga, porém, para se certificar de que este projeto será capaz de rotacionar um motor com carga, foi feita uma simulação de carga no dispositivo, apenas para tentar simular sua corrente próxima da nominal. Para isso, utilizou-se de cargas resistivas de potência. Foi medido o valor de corrente e as formas de onda no osciloscópio de 4 canais.

Porém, o sinal do microcontrolador foi ainda amplificado pelos MOSFETs e só então foi realizado o teste com carga. Nota-se que a figura abaixo representa as ondas geradas pelo sistema de acionamento amplificado por MOSFETs e com carga acoplada.

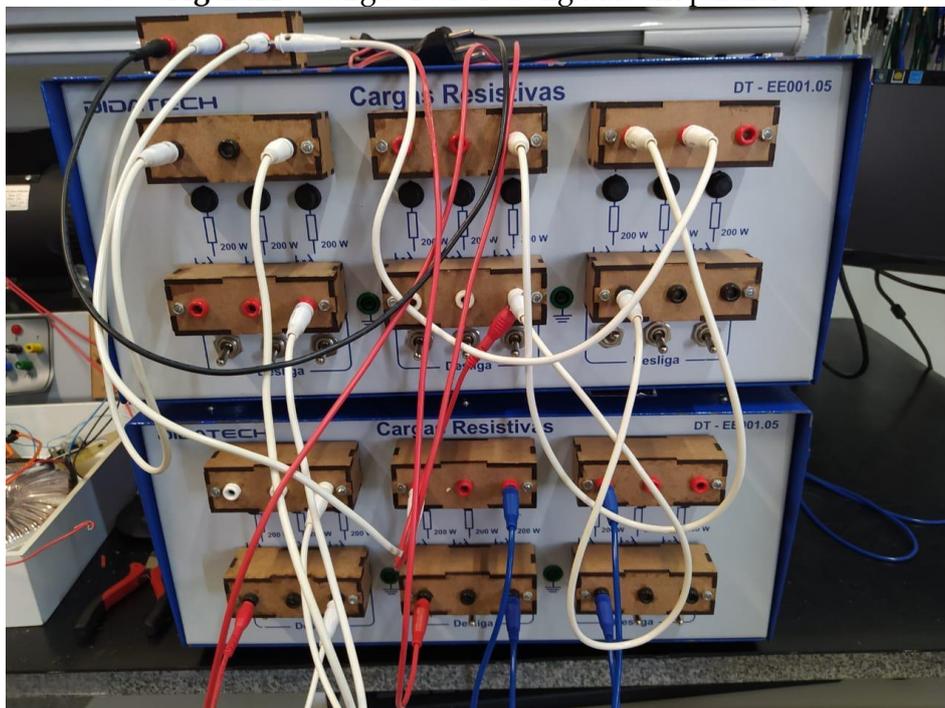
Figura 10 – Sinal de tensão na saída do sistema de acionamento com carga resistiva acoplada



Fonte: Dados da pesquisa, 2020.

As cargas resistivas foram conectadas em paralelo com o intuito de diminuir a resistência equivalente e, assim, aumentar a potência demandada. Foram conectadas a cada fase 6 cargas resistivas de 257 Ω , todas conectadas em paralelo entre si, totalizando cerca de 42,83 Ω por fase. Todas as cargas foram conectadas com o terminal negativo do dispositivo. Portanto, a potência demandada por fase foi de 29 Watts. A Figura 11 mostra o esquema de ligação das cargas.

Figura 11 – Cargas resistivas ligadas em paralelo



Fonte: Elaborado pelos autores, 2020.

Novamente, foram medidas as formas de onda de saída do equipamento no osciloscópio. Notou-se que não houve alterações quanto a distorções ou perdas de corrente, se comparadas com as formas de onda da Figura 9. Vale ressaltar que as cargas resistivas simulam a demanda de potência do motor.

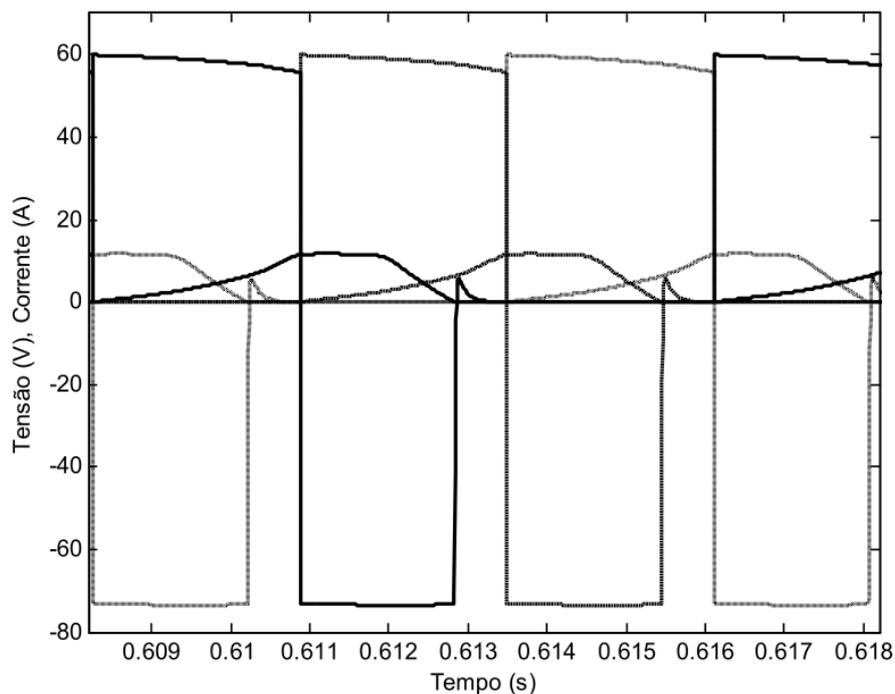
5 CONCLUSÃO

Após estudar e entender melhor o funcionamento dos microcontroladores, foi possível perceber que há uma vasta aplicabilidade em projetos. A esquematização do circuito lógico demandaria um maior tempo em relação à utilização do microcontrolador.

O microcontrolador ATMEGA328P consegue reproduzir de maneira eficiente o modelo de onda que o motor a relutância variável demanda para seu funcionamento. O circuito poderia ser aplicado diretamente ao motor, não fossem as limitações de corrente do microcontrolador. Diante disso, a aplicação dos conhecimentos de eletrônica de potência permitiu a utilização dos MOSFETs que, por se tratar de componentes não ideais, modificou ligeiramente as formas de onda de saída quando comparadas com as formas de onda advindas diretamente das portas do microcontrolador, porém sem comprometer sua funcionalidade.

Ocorreu um funcionamento satisfatório do equipamento quando comparamos a Figura 11 com o projeto de outros autores. O projeto da Figura 12 analisa as formas de onda de um GRC (gerador a relutância chaveada).

Figura 12 – Dinâmica de funcionamento das três fases do GRC



Fonte: Oliveira, 2015.

Percebe-se que, apesar de valor diferentes de tensão, por se tratar de projetos diferentes, a dinâmica de acionamento de fases é a mesma. Portanto, apesar de utilizar métodos diferentes, foi possível chegar ao mesmo resultado e garantir a rotação do Motor a Relutância Variável.

REFERÊNCIAS

ANDRADE, D. A. *et al.* Comparative study between a Single-phase and a Three-phase switched reluctance machine. **International Electric Machines and Drives Conference**, v. 1, n. 9, p. 1391-1396, 2011. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/5994810>.

COELHO, Alexandre *et al.* Comparação de um gerador a relutância chaveado trifásico e um gerador a relutância chaveado monofásico. **Proceedings and Book of Abstracts**. Guaratinguetá: FUNDEB, 2011.

FERRONI, Eduardo Henrique *et al.* **A Plataforma Arduíno e suas aplicações**. 2018. Disponível em: <file:///C:/Users/Geovane/AppData/Local/Temp/14354-Texto%20do%20Trabalho-44895-1-10-20180522.pdf>.

GHIRARDELO, Ariovaldo. Curso Técnico em Eletrônica Eletrônica Industrial. **Apostila sobre Modulação PWM**. Prof. Ariovaldo Ghirardello. [s.d.].

PINTO, Nuno Miguel Fernandes. **Desenvolvimento do enrolamento estatórico de um motor de relutância variável**. 2010. 80 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Electrotécnica e de Computadores - Automação e Electrónica) – Universidade Da Beira Interior, Covilhã, Portugal, 2010.

ROCHA, Fabiana *et al.* Modelo do motor a relutância variável com base na energia magnética armazenada. *In*: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SISTEMAS ELÉTRICOS - SBSE, 4., 2012, Goiânia. **Anais [...]** Goiânia, 2012. p. 1-5. Disponível em: <http://www.swge.inf.br/anais/sbse2012/PDFS/ARTIGOS/97038.PDF>.

OLIVEIRA, Eduardo Sylvestre Lopes de. **Sistemas inteligentes aplicados no controle e na obtenção de indutância de um gerador a relutância chaveado**. 2015. 148 f. Tese (doutorado em Engenharia Elétrica) – Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, 2015.