



## KIT DIDÁTICO PARA O ENSINO DE INVERSORES DE FREQUÊNCIA

**Hélder C. G. Feitosa** – heldercruzgouveia@gmail.com

**Ricardo A. Leite** – ricardoaleite@gmail.com

**Vinícius A. T. Lima** – vinicius.atlima@gmail.com

**Tiago E. T. de Araújo** – tiagoemerson@gmail.com

**Marcílio A. F. Feitosa** – marcilio@poli.br

Escola Politécnica da Universidade de Pernambuco – POLI/UPE  
Rua Benfica, 455 – Madalena  
50720-001 – Recife – PE

**Resumo:** Na tentativa de minimizar carências no ensino de Eletrônica de Potência, mais especificamente sobre os Inversores de Frequência, surgiu a ideia de se montar um kit didático que permita aos estudantes acompanhar o processo de transformação de sinais de uma frequência em outra. Em pesquisas realizadas nas ementas das disciplinas relacionadas ao tema das principais Universidades da área, observou-se que, quando existente, as práticas são voltadas ao uso de Inversores e não ao detalhamento do seu princípio de funcionamento. O kit proposto é parte de um kit maior que abordará dois tipos de geração de energia (eólica e fotovoltaica) e a ação do inversor em transformar os sinais provenientes dessas gerações (contínuo ou alternado com uma frequência qualquer) no sinal de frequência desejada, podendo ser monofásico ou trifásico. A parcela do kit alvo desse trabalho aceita como entrada um sinal alternado proveniente de um motor síncrono (simulando a geração eólica), com saída monofásica (60Hz), gerada pela técnica da Modulação por Largura de Pulsos. Foram utilizados materiais de fácil aquisição e baixo custo, como um motor do prato de um micro-ondas e um Arduino para a geração dos pulsos de controle das chaves estáticas.

**Palavras-chave:** Kit didático, Inversor de frequência, Modulação por Largura de Pulso (PWM), Arduino, Eletrônica de Potência.



## 1. INTRODUÇÃO

Nos cursos de Engenharia Elétrica têm-se observado, de forma global, uma grande carência no que diz respeito ao ensino dos Inversores de Frequência. Foram analisadas as ementas disponibilizadas online por 10 dos principais cursos de Engenharia Elétrica (Eletrotécnica e Eletrônica) indicados como sendo 4 ou 5 estrelas pelo Guia do Estudante 2016, além dos cursos ofertados pelas duas Universidades Públicas em Pernambuco e observou-se que o tema é, na grande maioria das vezes, ministrado como um tópico de uma disciplina de 60 horas que trata também de diversos outros conteúdos (geralmente na disciplina Eletrônica de Potência). Além disso, quase não se têm aulas práticas sobre o assunto e, quando existem tais práticas, tratam da programação de algum Inversor comercial e sua aplicação no controle da velocidade de motores. Não encontramos nenhuma prática associada ao princípio de funcionamento dos Inversores.

Em contraste com a pouca importância dada nos cursos, os inversores têm relevante destaque na atualidade, principalmente nas indústrias, nas mais diversas aplicações como, por exemplo, no controle da velocidade de motores, na conversão de tensão contínua em alternada nos sistemas fotovoltaicos, etc. Entender seu princípio de funcionamento, independente da plataforma ou fabricante utilizado, é essencial para consolidar os conceitos de conversão DC/AC.

Diante do exposto e com o objetivo de contribuir para o melhoramento da abordagem prática do ensino dos inversores de frequência, foi desenvolvido neste artigo, uma plataforma didática que exemplifica a aplicação dos inversores na geração eólica, através da conversão da tensão de saída do gerador eólico para tensão alternada com frequência de 60Hz, normalmente utilizada em nossa rede de distribuição.

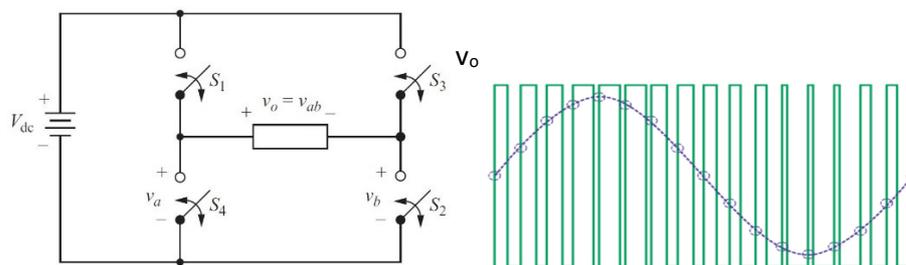
## 2. INVERSORES DE FREQUÊNCIA

A velocidade de rotação dos motores de corrente contínua pode ser facilmente controlada através da tensão aplicada à armadura do motor. Já a velocidade dos motores de corrente alternada é função da frequência da tensão aplicada ao mesmo. Como a frequência disponível na nossa rede elétrica é fixa (60Hz), se faz necessário um circuito que, alimentado por essa tensão alternada de frequência constante, gere outro sinal alternado de frequência desejável. Essa é a função dos inversores de frequência. Outra grande aplicação é na conversão de tensões contínuas em tensões alternadas, como é necessário nos sistemas alimentados pela geração fotovoltaica. São amplamente utilizados na indústria e trazem diversos benefícios como por exemplo a diminuição da manutenção dos equipamentos por substituir variadores mecânicos e eletromagnéticos, além de diminuir, pelo ajuste suave da velocidade, impactos em partes móveis como engrenagem e correias, e permitir automatizar processos com alta precisão.

Existem diversos métodos para realizar a transformação de um sinal de tensão contínuo em alternado. Os tipos de inversores mais comuns são: Monofásico em Meia Onda, Monofásico em Onda Completa, Monofásico de Múltiplos Níveis, Trifásico PWM e Trifásico Múltiplos Níveis (Método dos Seis Passos) (HART, 2011). No desenvolvimento desse trabalho decidiu-se iniciar o kit pela construção de um Inversor Monofásico em Onda Completa com Modulação por Largura de Pulsos (PWM), que é o indicado na Figura 1.



Figura 1 – Inversor Monofásico em Onda Completa com Modulação por Largura de Pulsos (HART, 2011).



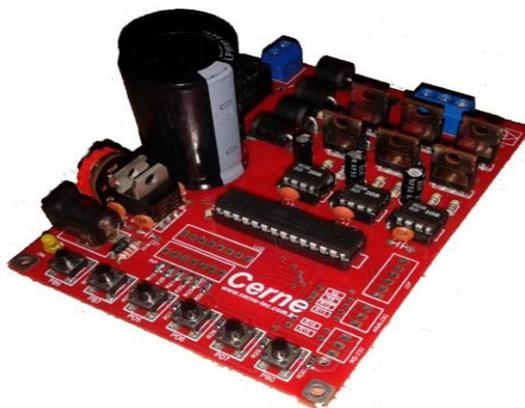
Através do chaveamento correto das chaves (S1 a S4), a tensão contínua ( $V_{DC}$ ) é aplicada à carga diretamente ou com polaridade invertida. A largura dos pulsos determina o tempo de fechamento das chaves e o tempo onde a carga estará submetida à tensão DC. A onda aplicada na carga é quadrada com pulsos de largura variável mas, com a aplicação de filtros a tensão na carga assume característica senoidal (MOHAN, 2002). Um inversor trifásico pelo método dos seis passos a ser usado com geração fotovoltaica é alvo de outro trabalho em desenvolvimento. Na continuidade dos trabalhos serão desenvolvidos os outros tipos de inversores até que o kit esteja completo.

### 3. METODOLOGIA

Inicialmente foi realizada uma pesquisa em busca de kits educacionais similares disponíveis comercialmente. De acordo com a pesquisa, existem poucos kits voltados para o ensino de inversores de frequência. Dos poucos encontrados, a maioria se baseia em inversores comerciais, de fabricantes conhecidos, como a WEG e a ABB, que não dão acesso pelos alunos às chaves estáticas, nem tampouco aos circuitos de disparo. São kits voltados ao ensino do uso dos inversores e de como instalá-los e programá-los. Esses kits não focam no ensino do princípio de funcionamento dos inversores.

Além disso, os kits encontrados apresentam preços que, muitas vezes, inviabilizam sua aquisição pelas instituições de ensino. De todos os kits pesquisados, o que mais se assemelhou ao objeto deste artigo foi o produto da empresa CERNE Tecnologia® (Figura 2), que custa em torno de R\$ 1000,00.

Figura 2 – Kit Inversor Monofásico CERNE (CERNE, 2017).

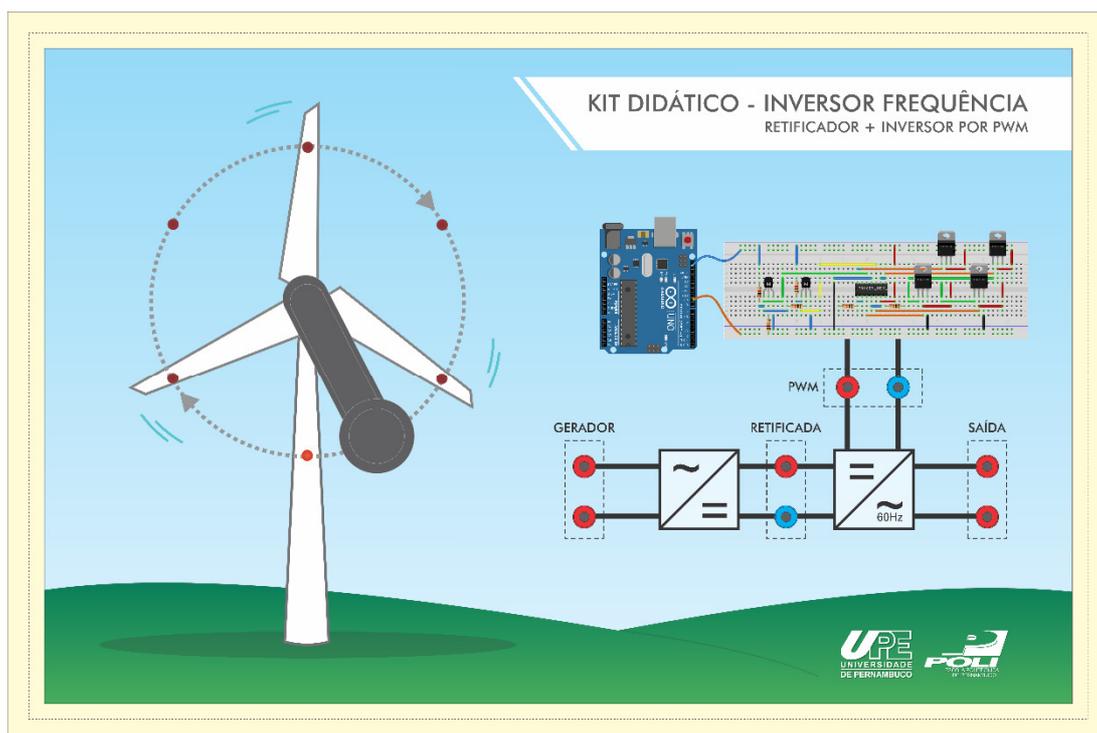




### 3.1. Kit Educacional Proposto

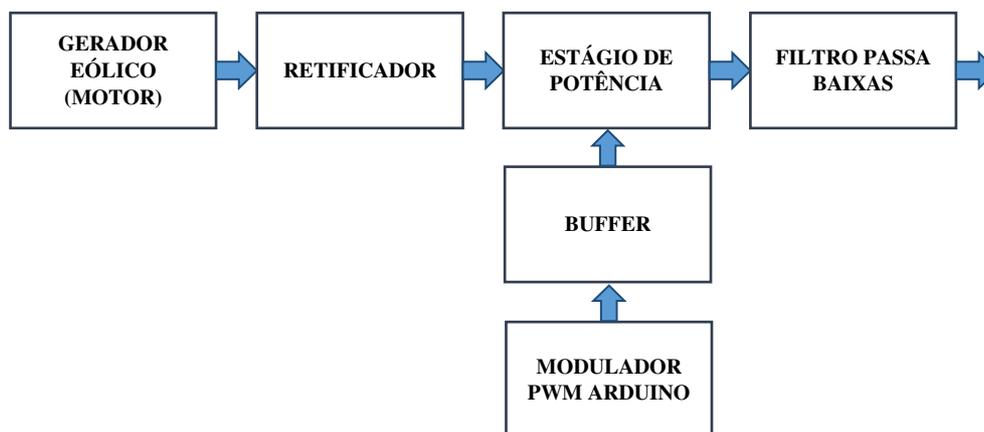
O kit proposto foi desenvolvido com componentes de baixo custo, de fácil aquisição no mercado e alguns materiais que a própria universidade já possuía. A Figura 3 representa o diagrama digital do kit. Todo o custo com material ficou abaixo de R\$150,00, evidenciando a viabilidade econômica do projeto.

Figura 3 – Kit Educacional Proposto (dimensões reais: 60 x 40cm).



Como já comentado, nessa primeira etapa do kit optamos por mostrar a aplicação de um inversor de frequência na conversão de um sinal alternado de frequência qualquer num sinal de frequência desejada. Para simular a geração eólica foi utilizado um motor síncrono de prato de micro-ondas (Modelo: 49TYJ). A onda senoidal gerada será então retificada e novamente convertida para senoidal pelo circuito de potência controlado pelos pulsos PWM gerados pela plataforma de desenvolvimento Arduino®. O diagrama da Figura 4 mostra cada etapa do processo de geração.

Figura 4 – Diagrama de blocos do circuito



Organização

Promoção



Para evitar que o estudante gire a alavanca muito rápido (o que, além de se distanciar da velocidade de rotação imposta pela ação dos ventos, poderia danificar o motor), LEDs são acionados no painel indicando a sequência e a velocidade que se deve girar a alavanca. Por todo o painel foram dispostos pontos de acesso onde o estudante pode, com o auxílio de um osciloscópio, visualizar as formas de onda em cada etapa do sistema, seja a senoide de entrada, a onda retificada, os pulsos PWM ou a senoide controlada de saída.

Todo o circuito foi simulado utilizando-se o software Proteus Design Suite 8.5<sup>®</sup>. O diagrama esquemático completo do circuito pode ser visto na Figura 5. Na Figura 6 temos o resultado da simulação exibido no componente osciloscópio do Software Proteus. Na parte inferior tem-se os pulsos de controle (PWM) gerados pelo Arduino enquanto na parte superior pode-se visualizar a saída senoidal aplicada à carga. A mesma apresenta uma tensão de pico de aproximadamente 11V e frequência 60Hz.

Figura 5 – Diagrama esquemático do circuito do Inversor.

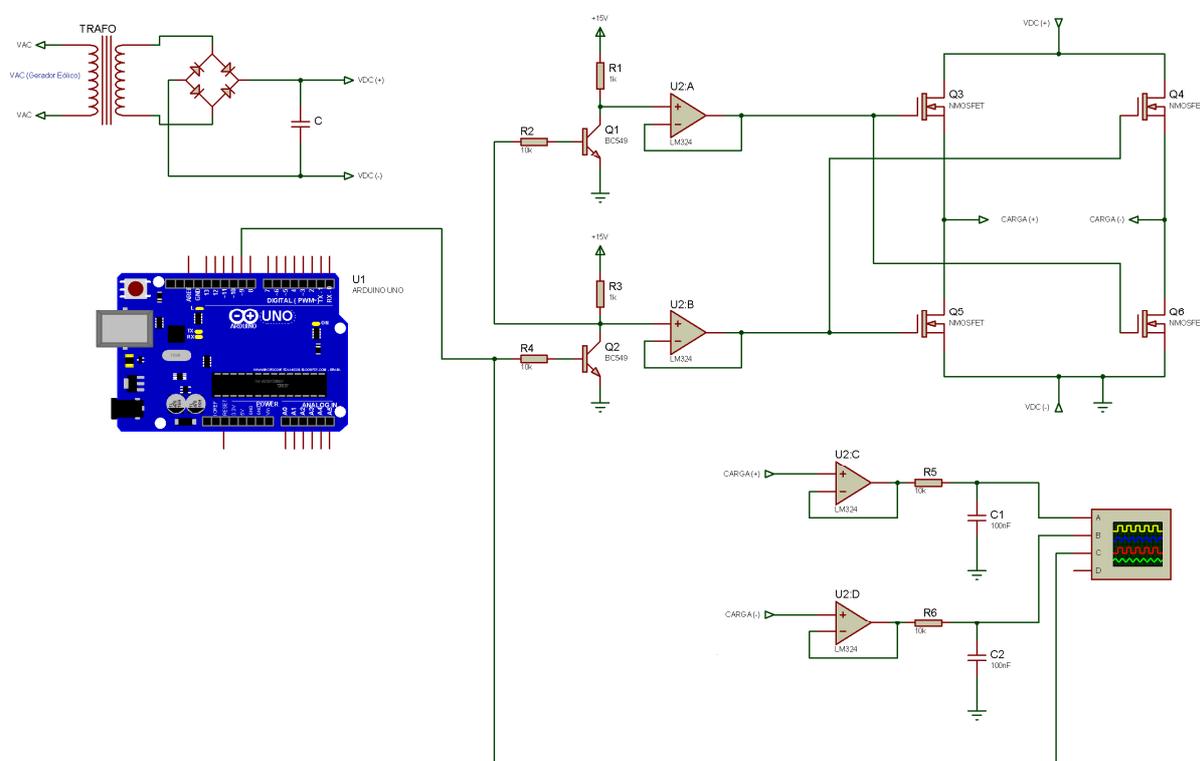
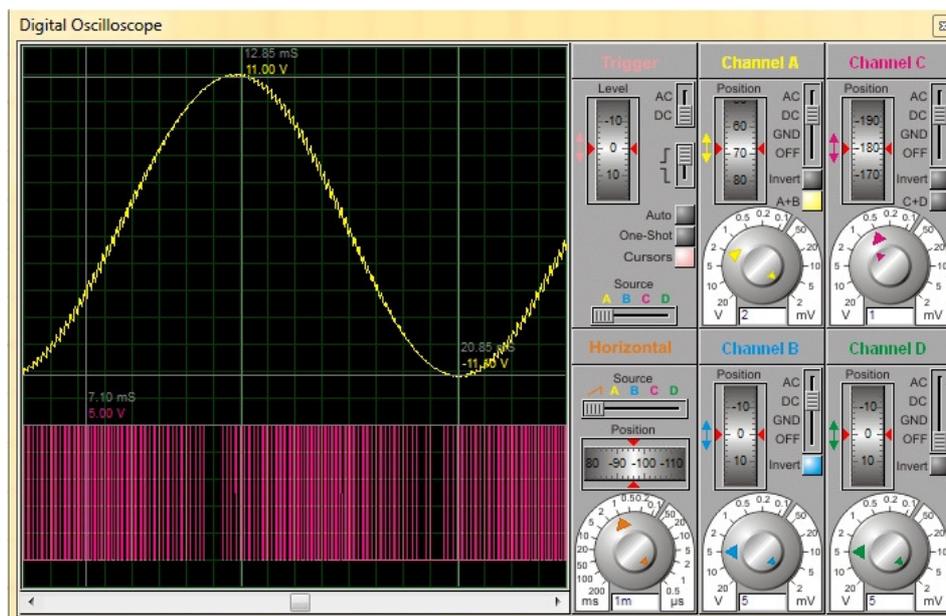




Figura 6 – Resultado da simulação. Na parte inferior os pulsos de controle (PWM) e na parte superior a saída senoidal aplicada à carga.



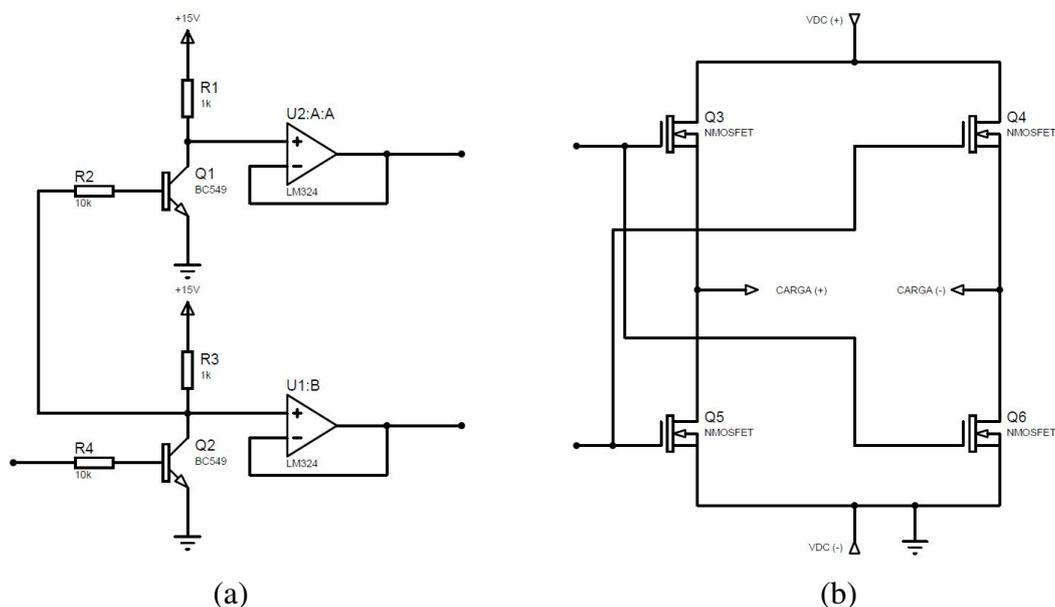
O estágio de entrada é composto pelo motor síncrono de prato de micro-ondas (4W para 5-6 rotações por minuto), pelo transformador de tensão (220V/12+12V) e pela ponte de retificação em onda completa com filtro capacitivo que forma o barramento DC.

Para implementação do modulador PWM foi utilizado a plataforma de desenvolvimento Arduino Uno. Nessa etapa do projeto, foi programado para fornecer os pulsos de controle dos transistores MOSFET e gerar na carga uma tensão monofásica de 60Hz. Nos próximos trabalhos, serão acrescentados um teclado e um display de forma que o usuário possa programar o inversor para gerar uma outra frequência desejada.

Foram utilizados transistores BC549 para a inversão do sinal pois as chaves eletrônicas funcionam defasadas de 180° entre si. Os amplificadores operacionais LM324 fazem o acoplamento do sinal gerado aos *gates* dos transistores MOSFET do estágio de potência. A Figura 7a apresenta o circuito do *buffer* e a Figura 7b detalha o estágio de potência, composto pelos quatro MOSFET canal N (Modelo: FQP55N06). Considerando que o kit foi desenvolvido para fins educacionais, e não será aplicado a cargas indutivas, não se faz necessário o uso de diodos de livre circulação, necessários para proteção da chave eletrônica.

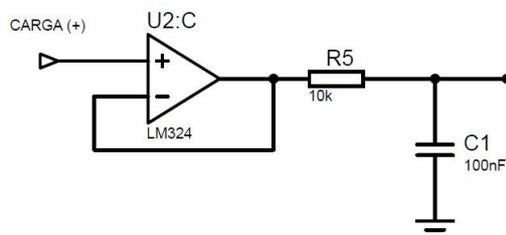


Figura 7 – (a) Circuito para inversão do sinal e polarização dos transistores MOSFET. (b) Estágio de potência.



Completando o circuito tem-se ainda dois filtros passa-baixas ativos, de primeira ordem, projetados para uma frequência de corte de 150Hz (Figura 8). O circuito é utilizado para exibir o sinal presente na carga, filtrando as altas frequências para ressaltar a componente de 60Hz.

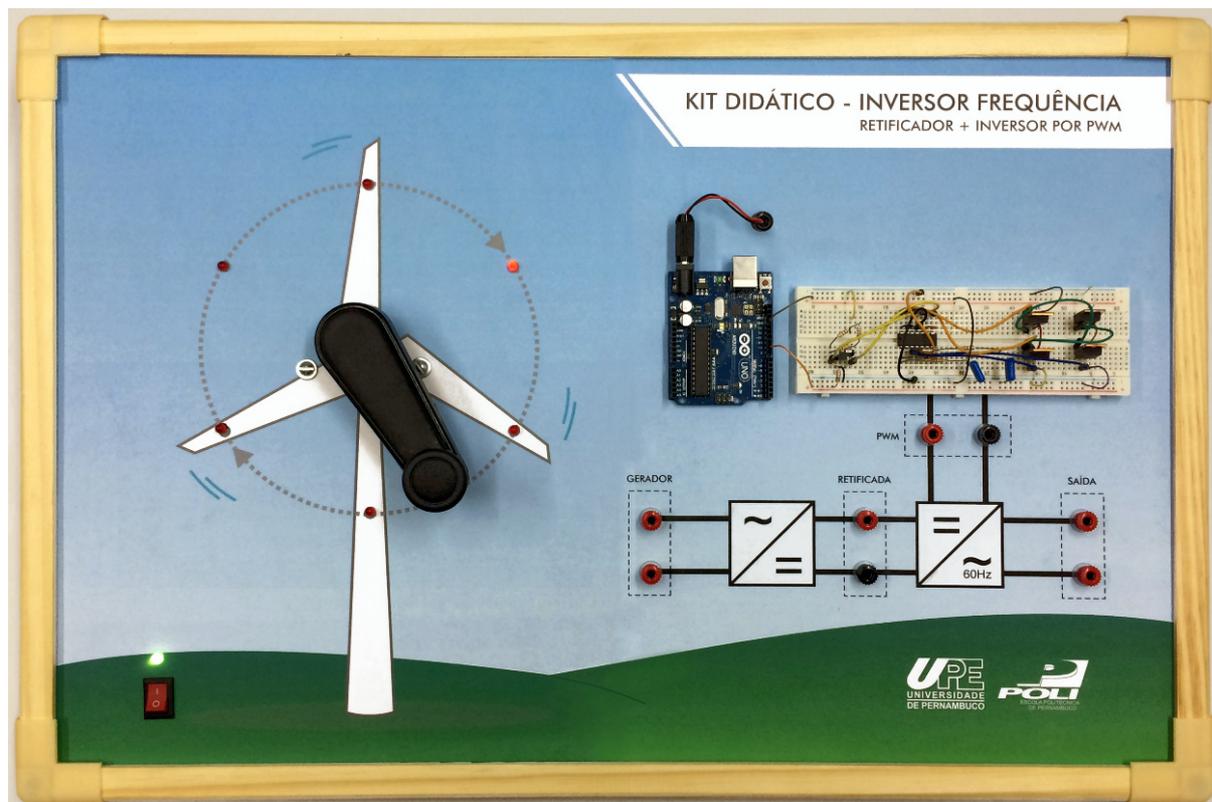
Figura 8 – Circuito do filtro passa-baixa ativo.



Para a montagem do protótipo foram utilizadas algumas ferramentas computacionais. Para o layout da placa de protoboard que aparece no painel digital (Figura 3) e da PCB (que ainda será produzida) usou-se o software, de código aberto, Fritzing<sup>®</sup>. Para desenvolvimento do layout da versão final do protótipo foi usado o software Corel Draw<sup>®</sup> a fim de ter as dimensões adequadas para o adesivo que será fixado no painel didático. Na Figura 9 temos a versão final desse primeiro protótipo do kit educacional.



Figura 9 – Protótipo do Kit Educacional sobre Inversores de Frequência.



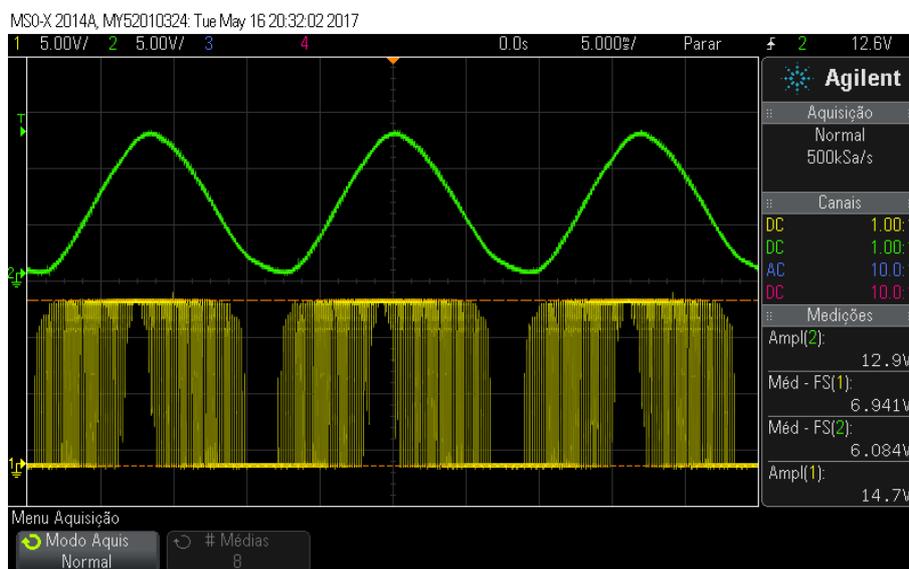
#### 4. RESULTADOS OBTIDOS

Após a montagem do protótipo, testes foram realizados para verificar o funcionamento do mesmo. A manivela foi girada a uma velocidade de aproximadamente 30 rotações por minuto (rpm), o que equivale a um vento fraco, valores típicos vão de 15 a 220 rpm. (SANTOS, 2006). Mesmo com rotações mais rápidas, não ocorreram problemas e a saída permaneceu estável.

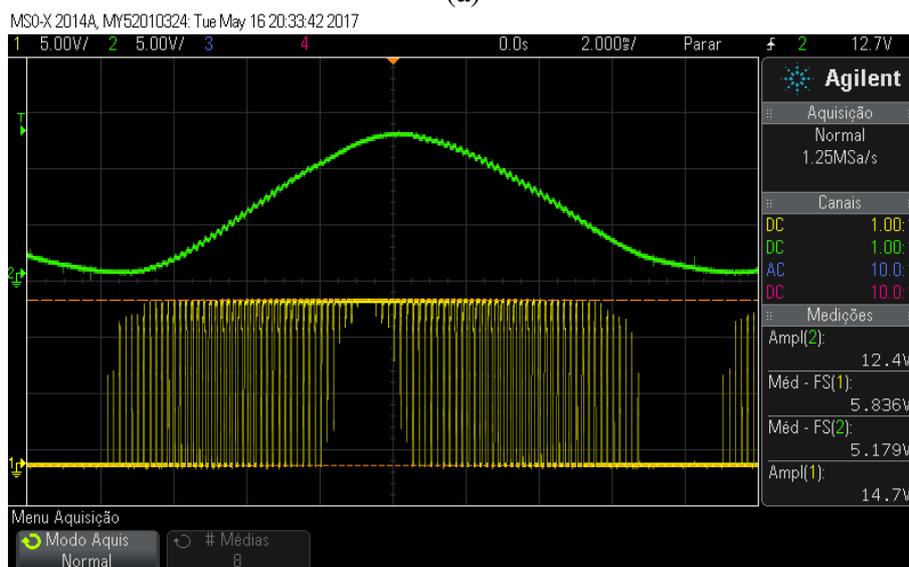
Os sinais, tanto de saída como os pulsos de controle do PWM, foram observados com o auxílio de um osciloscópio digital Agilent® (MSOX2014A - 100 MHz, 4 canais analógicos). Na Figura 10, podem-se observar os dois sinais (pulsos de controle e senoide após o filtro) simultâneos.



Figura 10 – (a) Sinal PWM de 6kHz na saída do Arduino e saída senoidal após filtro passa-baixas. (b) Mesmos sinais visualizados em outra base de tempo.



(a)



(b)

## 5. CONCLUSÕES

Como pode ser observado comparando-se as Figuras 6 e 10, o inversor funcionou exatamente como projetado. O kit permite ao estudante acompanhar todas as etapas desde a geração eólica (simulada pelo motor assíncrono) até a geração da saída senoidal, monofásica, com frequência fixa 60Hz. Os LEDs piscando de forma cíclica no painel indicam a velocidade com que se deve girar a manivela, simulando corretamente velocidades de ventos usuais e permitindo se observar o que acontece à medida que as correntes de vento mudam. Pontos de acesso possibilitam o uso de um osciloscópio para se monitorar a tensão alternada gerada, a tensão contínua do barramento DC (após o retificador), os pulsos de controle das chaves eletrônicas gerados pelo Arduino e a saída senoidal após o filtro passa-baixas. Em trabalhos futuros o kit será expandido até se ter um sistema completo para o ensino de Inversores de



Frequência, utilizando-se técnicas diferentes de geração, gerando-se saídas monofásicas e trifásicas, e permitindo, através de teclados e display, a programação do inversor pelo estudante. Com isso espera-se cobrir essa lacuna no ensino dos Inversores de Frequência, que vêm a cada dia tomando maior destaque nas indústrias, nas plantas fotovoltaicas e na área de eficiência energética.

## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS¶

CERNE Tecnologia; Kits de Instalações Elétricas. Disponível em: <<http://www.cerne-tec.com.br/kitavrinversordefrequencia.htm>> Acesso em: 15/05/2017.

HART, Daniel W. Power Electronics. Ed. Mc Graw Hill, 2011, 544p.

MOHAN, Ned. Power Electronics: Converters, Applications and Design. Ed. John Wiley & Sons, 2002, 3rd Ed. 824p.

SANTOS, Alison; RAMOS, Daniel; SANTOS, Nilson; OLIVEIRA, Pedro. UNIVERSIDADE SANTA CECÍLIA. Projeto de geração de energia eólica, 2006. 75p, il. Dissertação (Graduação).

## LEARNING KIT FOR POWER ELECTRONICS TEACHING

**Abstract:** *Trying to get over the weakness in power electronics teaching, specifically about inverters, an idea came up: make a didactic kit that allows students to get in touch with the entire process of transformation from a signal to another one. Researches made in the discipline syllabus of the main Universities in the surrounding show that, even when it has, nothing about the principle of working of Inverters is taken in the practical classrooms. This learning kit is part of a bigger one that includes two types of power generation (wind and photovoltaic) and shows the way that the inverter transforms the signals coming from that generators (continuous or alternated with any frequency) in another desired frequency, can be either single-phase or three-phase. The objective of this article is the input of an alternated signal provided by a synchronous motor (in a simulation of a wind generator), with single-phase signal as output (60Hz), generated by PWM technique. All the kit was built with the easy to acquire materials with low cost, as a microwave oven turntable synchronous motor and an Arduino microcontroller to generate the pulses to get control of the static switches.*

**Key-words:** *learning kit, inverter, pulse width modulation, PWM, Arduino, power electronics.*

Organização



Promoção

