

PROTÓTIPO EDUCACIONAL DE UM INVERSOR MULTINÍVEL DE BAIXO CUSTO UTILIZANDO ARDUINO E L298N

Pedro Arthur Bessa Leão^{*1}, Willian Félix Souza e Silva¹, Lucas Frazão Bispo¹, Carlos Renato Borges dos Santos² e Lucas Frederico Jardim Meloni¹

¹IFMG - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais, Campus Formiga

²IFTM - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Triângulo Mineiro, Campus Paracatu

Resumo - O objetivo deste trabalho é apresentar o desenvolvimento de um protótipo de inversor de frequência multinível utilizando circuitos integrados L298N (ponte H) controlados por *Arduino*, a fim de apresentar uma alternativa de baixo custo de uma ferramenta que auxilie os estudos e a compreensão deste componente de eletrônica de potência. Para que isso fosse possível, foram desenvolvidos algoritmos para o *Arduino Mega 2560* visando o controle do sinal de entrada dos CI's L298N e validando o sistema para inversores de cinco, sete e nove níveis de tensão de saída. Verificou-se ainda o intervalo de validade do sistema em função da frequência de saída esperada, uma vez que transformadores foram utilizados nas saídas do L298N. Como resultados, foram obtidos os sinais de tensão de saída para cada um dos níveis, variando-se suas respectivas frequências e estes foram comparados com os valores apresentados na literatura para inversores ideais. O protótipo desenvolvido apresentou resultados satisfatórios para todos os níveis, evidenciando a validade do sistema para fins educacionais, considerando também seu baixo custo frente a um sistema real.

Palavras-Chave - Algoritmo, Arduino, Baixo Custo, Inversor de Frequência, L298N, Multinível.

EDUCATIONAL PROTOTYPE OF A LOW COST MULTILEVEL INVERTER USING ARDUINO AND L298N

Abstract - The purpose of this paper is to present the development of a multilevel frequency inverter prototype using arduino-controlled L298N (H bridge) integrated circuits, in order to present a low cost alternative of a tool to aid studies and understanding of this power electronics component. To make this possible, Arduino Mega 2560 algorithms were developed to control the input signal of the L298N ICs and validating the system for inverters with five, seven and nine output voltage levels. The system validity interval was also verified as a function of the expected output frequency, since transformers were used in the L298N outputs. As results, the output voltage signals were obtained for each of the levels, varying their respective fre-

quencies and compared with the values presented in the literature for ideal inverters. The developed prototype presented satisfactory results for all levels, showing the validity of the system for educational purposes, considering also its low cost compared to a real system.

Keywords - Algorithm, Arduino, Low cost, Frequency inverter, L298N, Multilevel.

NOMENCLATURA

CA Corrente alternada

CC Corrente contínua

FET *Field Effect Transistor*.

HVDC *High-Voltage Direct Current*.

IGBT *Insulated Gate Bipolar Transistor*.

PWM Modulação por largura de pulso.

SCR *Silicon Controlled Rectifier*.

I. INTRODUÇÃO

O uso de conversores baseados em eletrônica de potência permitiu que diversas aplicações pudessem surgir como, por exemplo, os sistemas de transmissão de potência em altas tensões contínuas HVDC (*High-Voltage Direct Current*) que surgem como uma alternativa vantajosa frente aos tradicionais sistemas de corrente alternada. Outras aplicações recorrentes para eletrônica de potência estão relacionadas ao controle de iluminação, aquecimento e também ao controle de velocidade de motores [1].

Em aplicações de corrente alternada, os inversores de tensão vêm sendo cada vez mais estudados. Estes conversores utilizam fontes contínuas para produzir sinais de corrente alternada (CA), funcionando como fontes controladas cujos valores de amplitude e frequência são ajustáveis [2]. É comum encontrar aplicações com inversores que exigem três tipos de saídas CA: onda quadrada, onda senoidal modificada e onda senoidal. As duas primeiras são mais fáceis de serem produzidas, sendo necessário apenas estabelecer uma sequência

*peubessaleao@gmail.com

de chaveamento e tempos de chaveamento para os semicondutores. A forma senoidal é mais trabalhosa, sendo exigidas técnicas de modulação PWM e filtros passivos [3].

Inversores multiníveis são conversores cuja topologia é atrativa para aplicações de médias tensões [4]. Para baixas tensões sua aplicação atual mais relevante é na geração distribuída, tal como a energia fotovoltaica [5], a qual é gerada em corrente contínua, sendo necessária sua conversão em CA para suprir cargas de corrente alternada [6].

Uma configuração possível para inversores multiníveis é dada pela associação de inversores de onda completa em ponte, circuito usado para conversão de CA em CC, em que sua configuração consiste em dois pares de chaves acionados alternadamente. Seu controle é feito normalmente por disparos nas chaves que o compõem, que normalmente são SCRs (*Silicon Controlled Rectifier*), FET (*Field Effect Transistor*) ou IGBTs (*Insulated Gate Bipolar Transistor*) [7].

Porém, inversores comerciais possuem custo elevado, devido aos seus componentes e a seu controle de disparo das chaves, o que inviabiliza sua aquisição, por exemplo, por faculdades de engenharia elétrica que visam o desenvolvimento de competências de eletrônica de potência dos seus alunos em aplicações práticas. Além disso, dos kits pesquisados, produzem ondas quadradas de 2 ou 3 níveis, não sendo encontrados kits de inversores multiníveis, o que impede o aprendizado prático sobre esse tipo de inversor.

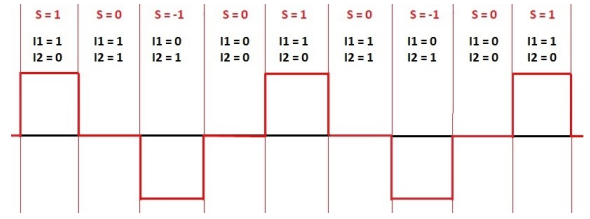
Em função do desenvolvimento dessas competências, visando a formação de profissionais na área de eletrônica de potência, bem como o elevado custo dos equipamentos didáticos utilizados em laboratórios, este trabalho apresenta uma proposta educacional como alternativa à aquisição de inversores comerciais. Nessa proposta, utiliza-se os circuitos integrados L298 (Ponte H) em substituição às chaves utilizadas usualmente, controlando seus acionamentos com o microcontrolador *Arduino*, a fim de que seja realizado um sistema de baixo custo como protótipo de um inversor real, capaz de realizar as aplicações de práticas educacionais.

II. PROTÓTIPO PROPOSTO

Inicialmente, foi avaliada a saída da Ponte H em função da variação dos dois sinais de entrada. A partir dos conhecimentos adquiridos, foi possível elaborar o esquemático de uma Ponte H (3 níveis) representado pela Figura 1. Neste esquemático, I1 e I2 são as entradas e S é o nível de saída.

Após a compreensão do funcionamento da ponte H, foram confeccionadas tabelas-verdades, com o objetivo de auxiliar na elaboração do algoritmo do microcontrolador *Arduino*, que consiste basicamente no acionamento e no desacionamento dos pinos ligados às chaves correspondentes.

Figura 1: Representação do funcionamento da ponte H.(Fonte: imagem produzida pelos autores.)



Foram elaboradas tabelas para inversores de 5, 7 e 9 níveis, sendo os pares I1 e I2; I3 e I4; I5 e I6; I7 e I8, os pinos de entrada das pontes H 1, 2, 3 e 4, respectivamente, e S a saída resultante após a soma das saídas das pontes, conforme a Tabela 1, Tabela 2 e a Tabela 3. Nessas tabelas, cada linha corresponde ao acionamento das chaves em momentos distintos. O intervalo de tempo t_d para a mudança das chaves foi calculado pela Equação 1, em que f é a frequência da onda e N é o número de níveis do inversor.

$$t_d = \frac{1}{f \cdot (2 \cdot N - 2)} \quad (1)$$

Tabela 1: Tabela-Verdade 5 níveis.

I1	I2	I3	I4	S
1	1	0	1	-1
1	1	0	0	0
1	1	1	0	1
1	0	1	0	2
0	0	1	0	1
0	0	1	1	0
0	0	0	1	-1
0	1	0	1	-2

Tabela 2: Tabela-Verdade 7 níveis.

I1	I2	I3	I4	I5	I6	S
1	1	1	1	0	1	-1
1	1	1	1	0	0	0
1	1	1	1	1	0	1
1	1	1	0	1	0	2
1	0	1	0	1	0	3
1	0	0	0	1	0	2
0	0	0	0	1	0	1
0	0	0	0	1	1	0
0	0	0	0	0	1	-1
0	0	0	1	0	1	-2
0	1	0	1	0	1	-3
0	1	1	1	0	1	-2

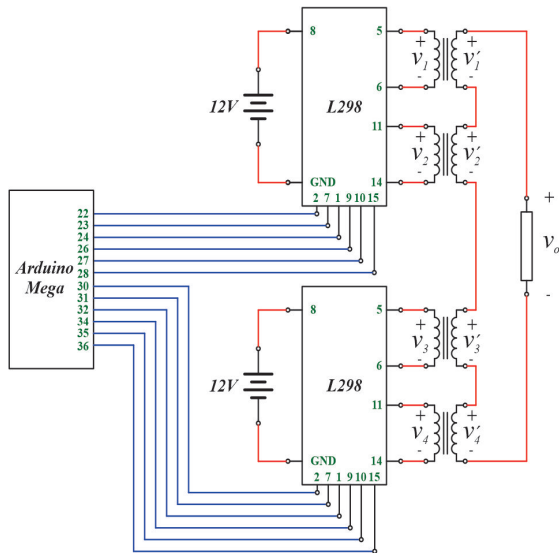
Tabela 3: Tabela-Verdade 9 níveis.

I1	I2	I3	I4	I5	I6	I7	I8	S
1	1	1	1	1	1	0	1	-1
1	1	1	1	1	1	0	0	0
1	1	1	1	1	0	0	0	1
1	1	1	0	1	0	0	0	2
1	0	1	0	1	0	0	0	3
1	0	1	0	1	0	1	0	4
0	0	1	0	1	0	1	0	3
0	0	0	0	1	0	1	0	2
0	0	0	0	0	0	1	0	1
0	0	0	0	0	0	1	1	0
0	0	0	0	0	1	1	1	-1
0	0	0	1	0	1	1	1	-2
0	1	0	1	0	1	1	1	-3
0	1	0	1	0	1	0	1	-4
1	1	0	1	0	1	0	1	-3
1	1	1	1	0	1	0	1	-2

O diagrama de conexões do inversor proposto é mostrado

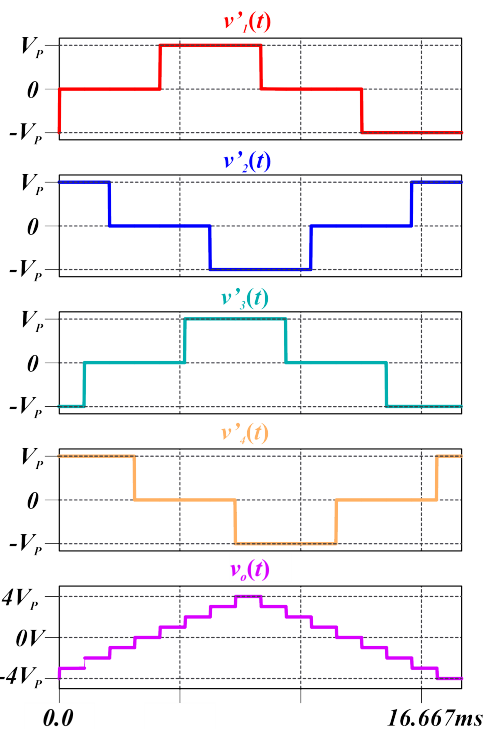
na Figura 2. A saída dos circuitos L298 foram ligadas a transformadores, cujos enrolamentos secundários foram associados em série.

Figura 2: Diagrama de conexões proposto para o Inversor multinível. (Fonte: imagem produzida pelos autores.)



A Figura 3 exemplifica o modo como a tensão de saída v_o foi produzida, para a configuração de 9 níveis. A saídas dos circuitos integrados L298 são denominadas respectivamente por v_1 , v_2 , v_3 e v_4 . A relação entre as diferenças de fase produzirá a tensão de saída v_o .

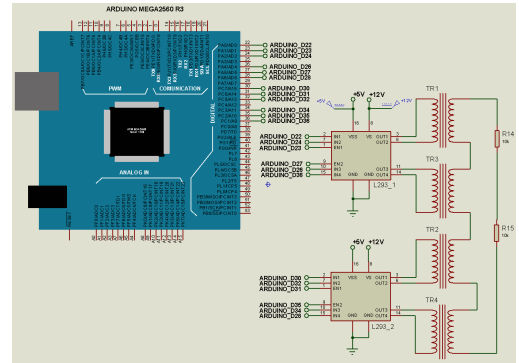
Figura 3: Composição da forma de onda da tensão de saída a partir dos transformadores. (Fonte: imagem produzida pelos autores.)



Para elaboração do algoritmo, foi adotado o mesmo tempo em cada estágio do inversor, proporcionando então um *duty cycle* de 50%, e o período de cada estágio é definido como

razão entre o período da onda resultante pela quantidade de estágio. A Figura 4 mostra o esquema utilizado para permitir os ensaios dos inversores de 5, 7 e 9 níveis, permitindo a simulação do circuito antes da montagem em bancada.

Figura 4: Simulação do circuito inversor utilizando o software Proteus. (Fonte: imagem produzida pelos autores.)



Após a elaboração do algoritmo, os circuitos foram simulados utilizando o *software Proteus*. Para que as duas saídas da ponte H pudessem ser utilizadas, foi necessária a utilização de transformadores, permitindo uma isolamento elétrica. Cada ponte H foi conectada a um transformador correspondente e o secundário desses transformadores (todos com mesmas características) foram conectados em série. Isso implica que a saída de tensão medida pelo osciloscópio será dada pela relação de espiras dos transformadores multiplicada pelo nível de tensão 'S' das tabelas multiplicado pela tensão de alimentação da Ponte L298. A tensão de alimentação da fonte foi fixada em 10 Volts para todas as medições e a relação de espiras dos transformadores é de 12/220. Essa relação de transformação é causada pela ligação dos CIs L298 ao lado de alta tensão do transformador.

A Figura 5, Figura 6 e Figura 7, representam a montagem dos circuitos inversores de 5, 7 e de 9 níveis, respectivamente.

Figura 5: Montagem do inversor de 5 níveis. (Fonte: imagem produzida pelos autores.)

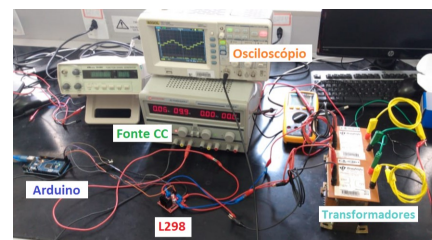


Figura 6: Montagem do inversor de 7 níveis. (Fonte: imagem produzida pelos autores.)

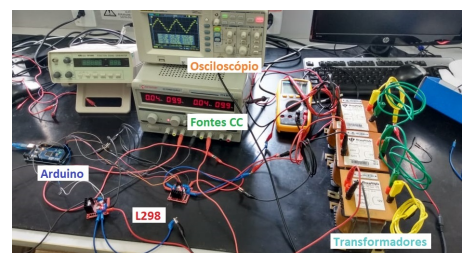
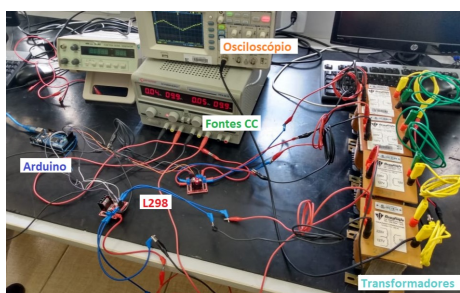


Figura 7: Montagem do inversor de 9 níveis.(Fonte: imagem produzida pelos autores.)



Após realizada a montagem, para cada configuração de inversor, as frequências do sinal de saída foram alteradas entre 20 Hz e 300 Hz.

III. RESULTADOS

Os resultados dos procedimentos descritos neste trabalho são apresentados nesta seção. Para cada configuração foram obtidos, por meio do osciloscópio, dados de tensão e frequência, como pode ser visto nas figuras a seguir, em que a frequência desejada foi de 60 Hz.

A Figura 8 mostra os dados de medição do inversor de 5 níveis. A Figura 9 mostra os dados de medição do inversor de 7 níveis. A Figura 10 mostra os dados de medição do inversor de 9 níveis.

Figura 8: Dados de tensão e de frequência de 5 níveis medidos pelo osciloscópio.(Fonte: imagem produzida pelos autores.)

Vmax= 1.24V	Vavg=52.2mV	Rise=4.100ms
Vmin=-1.28V	Vrms= 714mV	Fall=4.100ms
Vpp= 2.52V	Vovr=41.7%	+Wid=10.00ms
Vtop= 526mV	Vpre=39.3%	-Wid=6.200ms
Vbas=-1.19V	Prd=16.20ms	+Duty=61.7%
Vamp= 1.71V	Freq=61.73Hz	-Duty=38.3%

Figura 9: Dados de tensão e de frequência de 7 níveis medidos pelo osciloscópio.(Fonte: imagem produzida pelos autores.)

Vmax= 1.80V	Vavg=88.5mV	Rise=2.900ms
Vmin=-1.84V	Vrms= 1.01V	Fall=2.700ms
Vpp= 3.64V	Vovr=38.0%	+Wid=6.600ms
Vtop= 1.08V	Vpre=38.0%	-Wid=9.600ms
Vbas=-708mV	Prd=16.20ms	+Duty=40.7%
Vamp= 1.79V	Freq=61.73Hz	-Duty=59.3%

Figura 10: Dados de tensão e de frequência de 9 níveis medidos pelo osciloscópio.(Fonte: imagem produzida pelos autores.)

Vmax= 2.48V	Vavg= 220mV	Rise=7.100ms
Vmin=-2.40V	Vrms= 1.29V	Fall=7.300ms
Vpp= 4.88V	Vovr=3.3%	+Wid=8.200ms
Vtop= 2.48V	Vpre=1.6%	-Wid=8.000ms
Vbas=-2.40V	Prd=16.20ms	+Duty=50.6%
Vamp= 4.88V	Freq=61.73Hz	-Duty=49.4%

Analisando os dados, em termos da frequência ('Freq') e ciclo de trabalho (*duty*), percebe-se que quando este se aproxima de 50%, como era desejado, a frequência aproxima-se da esperada. Por ser uma relação direta, não será destacada tal comparação ao decorrer dos resultados. Porém, o olhar sobre esta análise segue idêntico para todos os casos. Lembrando

que o valor eficaz (V_{rms}) de uma onda quadrada multinível com ciclo de trabalho igual a 50 % é dado pela Equação (2).

$$V_{rms} = V_H \alpha \sqrt{\frac{1}{2(N-1)} \left(0.5(N-1)^2 + 4 \sum_{k=1}^{\frac{N-3}{2}} k^2 \right)} \quad (2)$$

Em que:

- V_H é a tensão de alimentação do L298 (Ponte H),
- α é a relação de espiras do transformador, nesse caso, 12/220,
- e N é o número de níveis do inversor.

O desvio percentual de tensão eficaz obtido para o inversor de 5 níveis na frequência de 20 Hz foi de 1,49 %, uma vez que a tensão calculada foi de 668 mV e o desvio percentual da frequência de 0,40 %.

A Tabela 4 apresenta a comparação dos resultados obtidos para todas as configurações analisadas, tendo como parâmetros os desvios percentuais de tensão eficaz e frequência. Nessa tabela, f_E é a frequência esperada, V_E é a tensão esperada, f_M é a frequência medida e V_M é a tensão medida.

Tabela 4: Comparação entre resultados esperados e obtidos.

N	f_E [Hz]	V_E [V]	f_M [Hz]	V_M [V]	%f	%V
5	20	0.668	19.92	0.678	0.40	1.49
5	30	0.668	29.94	0.691	0.20	3.44
5	40	0.668	39.68	0.692	0.80	3.59
5	50	0.668	49.50	0.707	1.00	5.83
5	60	0.668	61.73	0.714	2.88	6.88
5	70	0.668	71.43	0.695	2.04	4.04
5	80	0.668	82.64	0.728	3.30	8.98
5	90	0.668	90.91	0.705	1.01	5.53
5	100	0.668	98.81	0.711	1.19	6.43
5	200	0.668	196.90	0.711	1.55	6.43
5	300	0.668	326.80	0.710	8.93	6.28
7	20	0.971	19.84	0.989	0.80	1.89
7	30	0.971	30.12	0.995	0.40	2.51
7	40	0.971	39.68	1.000	0.80	3.02
7	50	0.971	49.50	1.010	1.00	4.05
7	60	0.971	61.73	1.010	2.88	4.05
7	70	0.971	70.42	1.000	0.60	3.02
7	80	0.971	81.97	1.030	2.46	6.12
7	90	0.971	89.29	1.040	0.79	7.15
7	100	0.971	99.21	1.000	0.79	3.02
7	200	0.971	196.90	1.000	1.55	2.82
7	300	0.971	324.70	1.030	8.23	6.12
9	20	1.279	19.69	1.290	1.55	0.84
9	30	1.279	30.12	1.310	0.40	2.41
9	40	1.279	39.68	1.310	0.80	2.41
9	50	1.279	49.50	1.340	1.00	4.75
9	60	1.279	61.73	1.290	2.88	0.84
9	70	1.279	70.42	1.330	0.60	3.97
9	80	1.279	81.70	1.320	2.13	3.19
9	90	1.279	89.61	1.300	0.43	1.63
9	100	1.279	98.43	1.330	1.57	3.97
9	200	1.279	196.10	1.340	1.95	4.75
9	300	1.279	325.70	1.350	8.57	5.53

Pode-se perceber, pela Tabela 4, que os resultados obtidos pelo protótipo apresentaram desvios menores que dez por cento.

A Figura 11, a Figura 12 e a Figura 13 representam as formas de onda para a frequência de 60 Hz. Para essa frequência, os resultados obtidos foram próximos do esperado.

Figura 11: Sinal saída 5 níveis.(Fonte: imagem produzida pelos autores.)

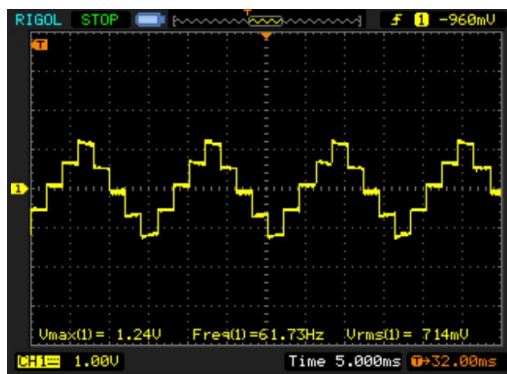


Figura 12: Sinal saída 7 níveis.(Fonte: imagem produzida pelos autores.)

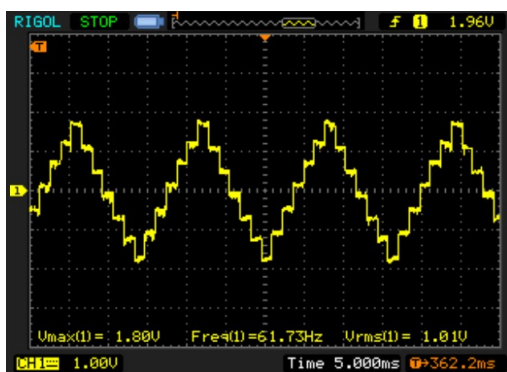
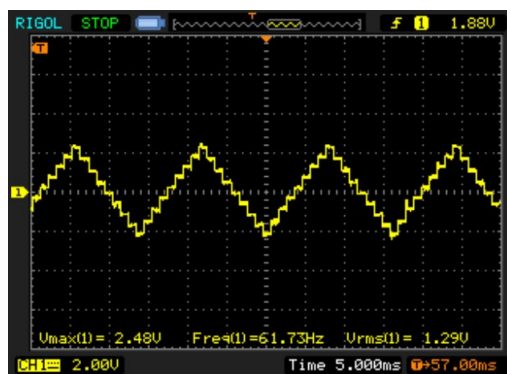


Figura 13: Sinal saída 9 níveis.(Fonte: imagem produzida pelos autores.)



IV. CONCLUSÃO

Um protótipo de inversor de frequência multinível foi desenvolvido utilizando o CI L298, controlado por *Arduino*. Os

inversores apresentaram resultados que evidenciaram a validade do sistema para fins educacionais, considerando também seu baixo custo.

Como projetos futuros, pode-se destacar a ligação das pontes ao lado de baixa tensão do transformador, com o objetivo de acionar cargas. Para isso, deverão ser trocados os transformadores por outros de menores potências, para que não ultrapassem os limites de corrente da Ponte H, visto que o lado de baixa possui menor impedância e maior corrente nos enrolamentos. Também é esperado ajustar o ciclo de trabalho da onda de saída do inversor, e com isso, regular o seu valor RMS, aproximando-se de uma onda senoidal e, consequentemente diminuir a inserção de harmônicos na rede.

REFERÊNCIAS

- [1] Ahmed, A. *Eletrônica de Potência*. Prentice-Hall, São Paulo, 2000.
- [2] Becker, F., Jamshidpour, E., Poure, P., and Saadate, S.. **Modulation strategy with a minimal number of commutations for a five-level h-bridge npc inverter**. MDPI Electronics, 8, 5. 2019.
- [3] Rashid, M.H.. *Eletrônica de Potência*. Pearson Education do Brasil. 2014.
- [4] Pires, V.F., Cordeiro, A., Foito, D., and Silva, J.F. (2019). **A STATCOM based on a three-phase, triple inverter modular topology for multilevel operation**. IEEE Transactions on Power Delivery, 34(5), 1988–1997.
- [5] Hlaili, M., Mechergui, H., Gonçalves, H., Exposto, B., and Afonso, J.L.. **Single phase npc inverter controller with integrated mppt for pv grid connection**. In 2016, 17th International Conference on Sciences and Techniques of Automatic Control and Computer Engineering (STA), 598–605. 2016.
- [6] Coelho, C.A. and Fernandes, L.G. *Estudo e Implementação de um Inversor Multinível Monofásico Controlado por FPGA para Aplicações de Ensino e Pesquisa*. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba. 2016.
- [7] Sujanarko, B., Prabowo, R.B., and Prasetyo, S.. **Single phase full bridge inverter using Arduino Uno r3 controller**. International Journal of Electrical Electronics Computer Science Engineering, 5. 2018.