



# ENSAIOS SOBRE INVERSORES MULTINÍVEL COM ÊNFASE NO CÁLCULO DA TENSÃO DE SAÍDA

Carlos Renato Borges dos Santos<sup>\*1</sup>, Lucas Frederico Jardim Meloni<sup>2</sup> e Lauro Silva Rocha<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Instituto Federal do Triângulo Mineiro - IFTM câmpus Paracatu

<sup>2</sup>Instituto Federal de Minas Gerais - IFMG - *campus* Formiga

**Resumo** - O presente trabalho apresenta um estudo sobre a tensão de saída de inversores multiníveis formados pela associação em cascata de inversores monofásicos ponte completa. É mostrada uma metodologia para cálculo do valor eficaz (RMS) para tensões de saída de 2 a 13 níveis, bastando apenas o número de níveis e a razão cíclica de acionamento de cada inversor monofásico. Inicialmente é feita uma análise matemática, da qual é obtida uma expressão genérica que relacionará o valor RMS em função dos tempos de duração de cada nível. Por fim, são mostrados resultados de simulações para os inversores, de modo a comprovar a eficácia do método proposto.

**Palavras-Chave**- inversores, multinível, harmônicos, valor eficaz.

## TESTS ON ISOLATED OUTPUT MULTILEVEL INVERTERS WITH EMPHASIS ON OUTPUT VOLTAGE CALCULATION

**Abstract** - This work presents a study on multilevel inverters. At this stage, the developed research carried out a computational investigation of the 2, 3, 5, 7, 9, 11 and 13-level inverters, regarding the calculation of the output RMS value as a function of the duty cycle of each bridge H of the inverters multilevel. For this, simulations are presented that allow the development of multilevel inverters through the addition of bridge inverters in series, whose outputs are isolated with transformers.

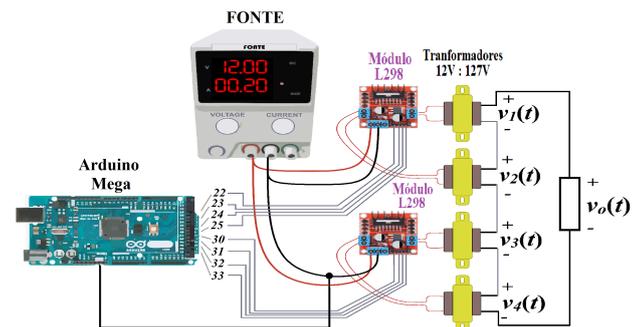
**Keywords** - inverters, multilevel, harmonics, rms.

## I. INTRODUÇÃO

Inversores de tensão são circuitos estáticos que convertem potência DC em potência AC com a frequência e tensão de saída desejada [1]. Os inversores multinível são muito usados quando é necessário produzir tensões alternadas com elevada amplitude e baixa distorção harmônica total (THD - *Total Harmonic Distortion*) [2, 3]. Em livros didáticos, como [4], é comum encontrar a descrição de topologias como a associação em cascata de inversores monofásicos em ponte completa

ou configurações com ponto neutro grampeado (NPC) [5]. A maior quantidade de níveis na tensão de saída possibilita maior redução na THD através da eliminação seletiva de componentes harmônicas, feita através da escolha adequada do tempo de permanência de cada nível [2]. Logo, utilizando-se frequências baixas de chaveamento é possível obter tensões alternadas de alta qualidade, sem a necessidade de uso de técnicas de modulação por largura de pulso [6].

Figura 1: Topologia adotada para o estudo dos inversores multinível.



A topologia cascata permite a produção de saídas de tensão com amplitude elevada, através da associação em série de inversores monofásicos alimentados por fontes independentes [7]. Topologias utilizando diodos e capacitores são muito utilizadas, mas aumenta-se a complexidade dos circuitos à medida em que se aumenta o número de níveis do inversor [3, 8]. Também é possível utilizar uma única fonte de tensão contínua e transformadores, como mostrado na Figura 1. Nesta imagem, os módulos L298 representam inversores monofásicos em ponte completa, cujas saídas são ligadas ao primário de transformadores elevadores. Neste caso, a tensão de saída  $v_o(t)$  é a associação em série das tensões  $v_1(t)$  a  $v_4(t)$ . Em [9], foi desenvolvido e implementado um protótipo de inversor multinível de baixo custo, com saídas isoladas por transformadores e configuração semelhante a da Figura 1. O acionamento dos módulos L298 era feito por uma placa Arduino Mega, sendo possível alcançar tensões com até 9 níveis. Entretanto, as formas de onda apresentadas tinham formato triangular, haja vista que os intervalos entre os acionamentos dos módulos eram iguais. Dessa forma, a equação do valor RMS

\*carlosrenato@iftm.edu.br

determinada naquele trabalho é restrita ao padrão de onda triangular.

Neste trabalho são mostradas equações para o valor RMS da tensão de saída para formas de onda com intervalos de duração diferentes para cada nível, podendo ser aplicada para diferentes formatos de tensão. Além disso, são mostradas simulações de inversores de 2, 3, 5, 7, 9, 11 e 13 níveis, para comparar os valores de tensão RMS calculados pelas equações e pelos valores medidos por meio do simulador PSIM Demo.

## II. CÁLCULO DA TENSÃO DE SAÍDA

Nesta sessão são mostradas as equações que podem ser utilizadas para inversores multiníveis, no que tange o cálculo do valor RMS. Será realacionado o valor RMS em função do ciclo de trabalho ou do ângulo de acionamento das chaves, parâmetro que relaciona os períodos de permanência de cada nível de tensão, em função do período total da forma de onda.

O número máximo de níveis em que um inversor com  $H$  pontes H pode ser calculado pela equação 1.

$$N = 2 \cdot H + 1 \quad (1)$$

Onde:

$H$  - número de pontes H do inversor.

$N$  - número de níveis da tensão de saída.

A equação 2 mostra a relação entre o ângulo de acionamento de uma ponte H e o ciclo de trabalho.

$$d_i = 0,5 - \frac{\alpha_i}{\pi} \quad (2)$$

Onde:

$d_i$  - Ciclo de trabalho.

$\alpha_i$  - Ângulo de acionamento, em radianos.

Na equação 3 é mostrado como calcular o valor RMS para um inversor multinível.

$$V_{RMS} = V_{CC} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \sum_{i=1}^{H-1} i^2 \cdot (\alpha_{i+1} - \alpha_i) + H^2 \cdot (\pi - 2 \cdot \alpha_H)}{\pi}} \quad (3)$$

Onde:

$H$  - Número de pontes H.

$V_{CC}$  - Tensão do barramento CC.

$\alpha_i$  - Ângulo de acionamento da ponte H, em rad.

$i$  - Índice da ponte H.

A equação 4 mostra como calcular a tensão RMS em função do ciclo de trabalho, uma vez convertidos os ângulos de acionamento, como visto na equação 2.

$$V_{RMS} = V_{CC} \cdot \sqrt{2 \cdot \sum_{i=1}^H (2 \cdot i - 1) \cdot d_i} \quad (4)$$

Por meio da equação 4, podem ser encontradas as tensões para inversores testados neste trabalho.

### A. Inversor de 2 níveis

Os inversores de 2 níveis utilizam uma ponte H ( $H = 1$ ) e  $d_1 = 0,5$ . A equação 4 é reduzida à equação 5.

$$V_{RMS} = V_{CC} \cdot \sqrt{2 \cdot 0,5} = V_{CC} \quad (5)$$

Uma onda de 2 níveis é conhecida como onda quadrada ou onda retangular, em que a tensão RMS da saída corresponde ao valor da tensão de entrada CC.

### B. Inversor de 3 níveis

Assim como os inversores de 2 níveis, os inversores de 3 níveis utilizam 1 ponte H, em que o ciclo de trabalho  $d_1$  pode ser ajustado com valores entre 0 e 0,5. A diferença do inversor de 2 e de 3 níveis consiste basicamente no circuito de controle, uma vez que nos inversores de 2 níveis, o circuito de controle é mais simples. A tensão de saída da equação 4 pode ser reduzida para a equação 6.

$$V_{RMS} = V_{CC} \cdot \sqrt{2 \cdot d_1} \quad (6)$$

Em que  $0,5 > d_1 > 0$ .

### C. Inversor de 5 níveis

Para 5 níveis, com 2 pontes H, o valor RMS da equação 4 pode ser reduzido para a equação 7.

$$V_{RMS} = V_{CC} \cdot \sqrt{2 \cdot (d_1 + 3 \cdot d_2)} \quad (7)$$

Em que  $0,5 > d_1 > d_2 > 0$ .

### D. Inversor de 7 níveis

Para 7 níveis, com 3 pontes H, o valor RMS da equação 4 pode ser reduzida para a equação 8.

$$V_{RMS} = V_{CC} \cdot \sqrt{2 \cdot (d_1 + 3 \cdot d_2 + 5 \cdot d_3)} \quad (8)$$

Em que  $0,5 > d_1 > d_2 > d_3 > 0$ .

### E. Inversor de 9 níveis

Para 9 níveis, com 4 pontes H, o valor RMS da equação 4 pode ser reduzida para a equação 9.

$$V_{RMS} = V_{CC} \cdot \sqrt{2 \cdot (d_1 + 3 \cdot d_2 + 5 \cdot d_3 + 7 \cdot d_4)} \quad (9)$$

Em que  $0,5 > d_1 > d_2 > d_3 > d_4 > 0$ .

#### F. Inversor de 11 níveis

Para 11 níveis, com 5 pontes H, o valor RMS da equação 4 pode ser reduzida para a equação 10.

$$V_{RMS} = V_{CC} \cdot \sqrt{2 \cdot (d_1 + 3 \cdot d_2 + 5 \cdot d_3 + 7 \cdot d_4 + 9 \cdot d_5)} \quad (10)$$

Em que  $0,5 > d_1 > d_2 > d_3 > d_4 > d_5 > 0$ .

#### G. Inversor de 13 níveis

Para 13 níveis, com 6 pontes H, o valor RMS da equação 4 pode ser reduzida para a equação 11.

$$V_{RMS} = V_{CC} \cdot \sqrt{2 \cdot (d_1 + 3 \cdot d_2 + 5 \cdot d_3 + 7 \cdot d_4 + 9 \cdot d_5 + 11 \cdot d_6)} \quad (11)$$

Em que  $0,5 > d_1 > d_2 > d_3 > d_4 > d_5 > d_6 > 0$ .

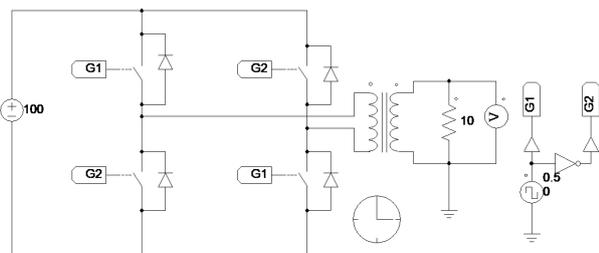
### III. RESULTADOS

Nesta seção são mostrados os circuitos simulados e as formas de onda da tensão de saída. Também são mostrados os valores de ciclo de trabalho, tensões medidas e tensões calculadas pelas equações descritas neste trabalho.

#### A. Inversor 2 níveis

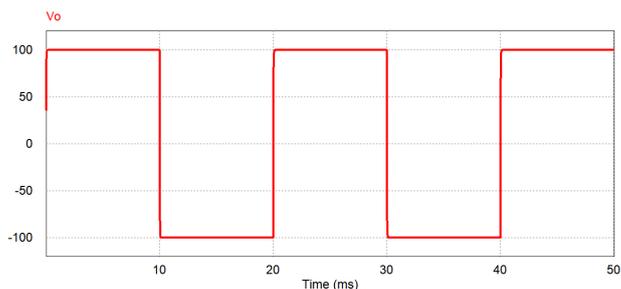
O circuito do inversor de tensão de 2 níveis pode ser visto na Figura 2.

Figura 2: Tensão de saída de um inversor de 2 níveis.



A tensão de saída de um inversor de 2 níveis pode ser vista na Figura 3. A tensão RMS da saída medida foi de 99,95 V. A tensão calculada pela equação 5 é de 100 V.

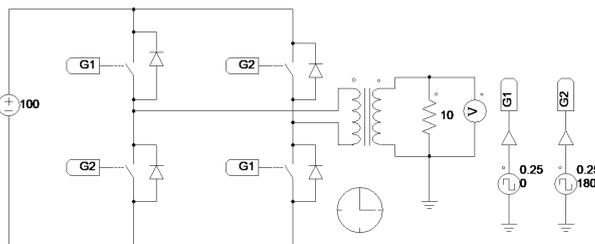
Figura 3: Tensão de saída de um inversor de 2 níveis.



#### B. Inversor de 3 níveis

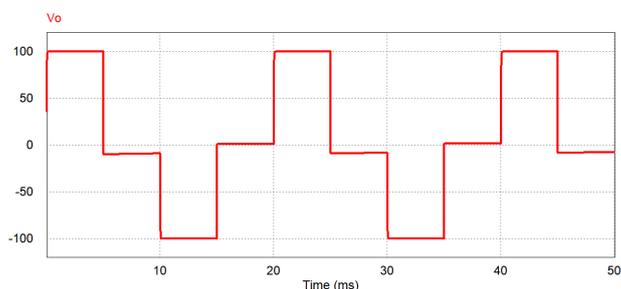
O circuito do inversor de 3 níveis pode ser visto na Figura 4.

Figura 4: Tensão de saída de um inversor de 3 níveis.



A forma de onda da saída para o inversor de 3 níveis pode ser vista na Figura 5. O ângulo de acionamento  $\alpha_1 = 45^\circ$ , cujo ciclo de trabalho, obtido pela equação 2, é de  $d_1 = 0,25$ . A tensão de saída medida é de 70,35 V, ao passo que a tensão calculada pela equação 6 é de 70,71 V.

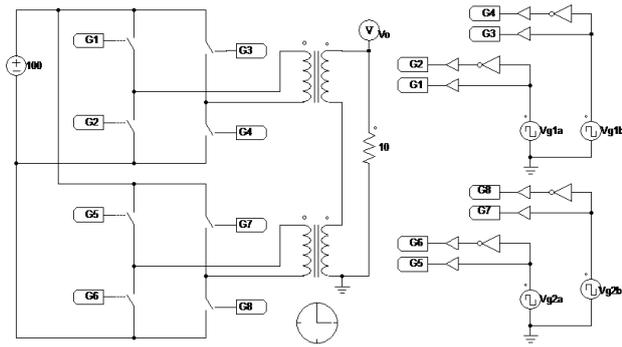
Figura 5: Tensão de saída de um inversor de 3 níveis.



#### C. Inversor de 5 níveis

O circuito inversor de 5 níveis pode ser visto na Figura 6.

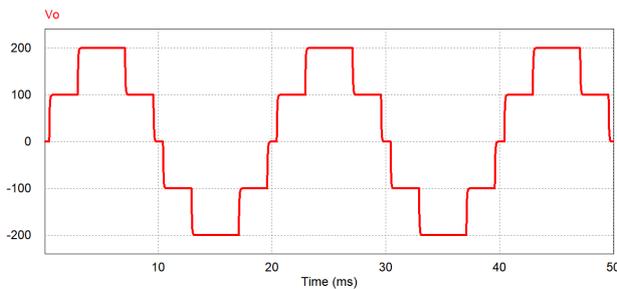
Figura 6: Inversor de 5 níveis com acoplamento a transformador.



A Figura 7 mostra a tensão de saída para um inversor de 5 níveis para ciclos de trabalho  $d_1 = 0,458$  e  $d_2 = 0,208$ , com ângulos de acionamento  $\alpha_1 = 7,48^\circ$  e  $\alpha_2 = 52,52^\circ$ .

O valor medido da tensão RMS da forma de onda mostrada na Figura 7 é de 146,7 V. Já o valor obtido pela equação 7 é de 147,1 V.

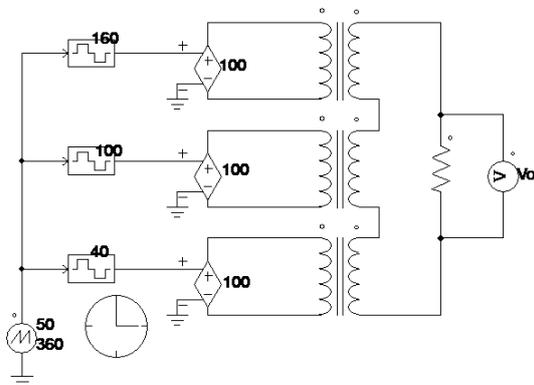
Figura 7: Tensão de saída de um inversor de 5 níveis.



#### D. Inversor de 7 níveis

Devido a restrições do número de elementos que podem ser utilizados no PSIM, versão *Demo*, não foi possível montar circuitos com 3 pontes H. Dessa forma, para simular circuitos com mais de 5 níveis, foi necessária a construção de circuitos mais simples, como o visto na Figura 8.

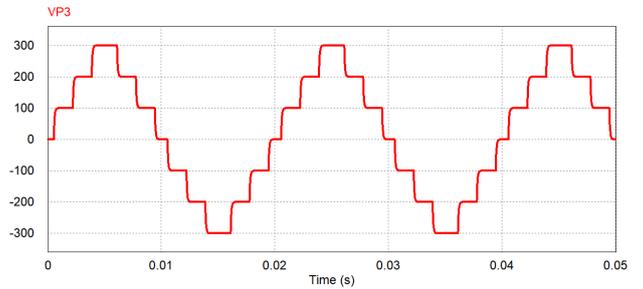
Figura 8: Inversor de 7 níveis com acoplamento a transformador.



A forma de onda da saída do inversor de 7 níveis pode ser vista na Figura 9. Os ângulos de acionamento são  $\alpha_1 = 10^\circ$ ,

$\alpha_2 = 40^\circ$  e  $\alpha_3 = 70^\circ$ , cujos valores dos ciclos de trabalho obtidos pela equação 2 são:  $d_1 = 0,4444$ ,  $d_2 = 0,2778$ ,  $d_3 = 0,1111$ . O valor de tensão calculado utilizando a equação 8 é de 191,48 V. O valor medido na simulação foi de 190,94 V.

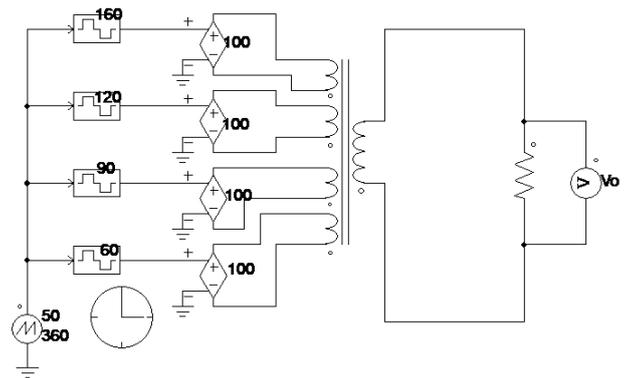
Figura 9: Tensão de saída de um inversor de 7 níveis.



#### E. Inversor de 9 níveis

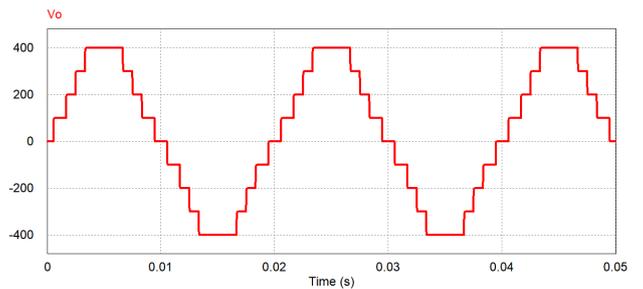
O circuito simulado no PSIM, versão *Demonstration*, para o inversor de 9 níveis, pode ser visto na Figura 10.

Figura 10: Inversor de 9 níveis com acoplamento a transformador.



A forma de onda da saída do inversor de 9 níveis pode ser vista na Figura 11. Os valores dos ângulos de acionamento são:  $\alpha_1 = 10^\circ$ ,  $\alpha_2 = 30^\circ$ ,  $\alpha_3 = 45^\circ$ ,  $\alpha_4 = 60^\circ$ , cujos ciclos de trabalho obtidos pela equação 2 são:  $d_1 = 0,444$ ,  $d_2 = 0,3333$ ,  $d_3 = 0,25$  e  $d_4 = 0,1667$ . O valor calculado pela equação 9 da tensão de saída é de 277,89 V, ao passo que o valor medido foi de 277,75 V.

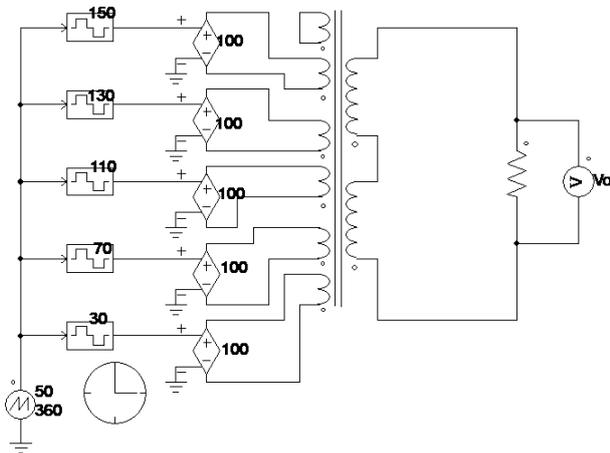
Figura 11: Tensão de saída de um inversor de 9 níveis.



### F. Inversor de 11 níveis

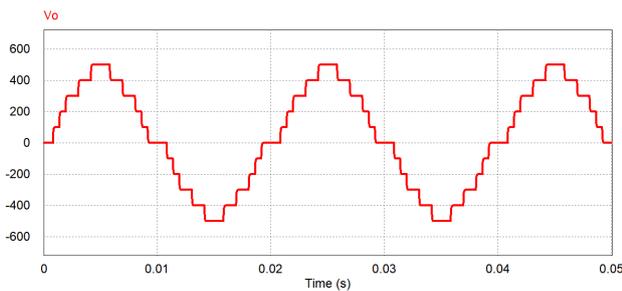
O circuito simulado no PSIM, versão *Demonstration*, para o inversor de 11 níveis, pode ser visto na Figura 12.

Figura 12: Inversor de 11 níveis com acoplamento a transformador.



A forma de onda da saída do inversor de 11 níveis pode ser vista na Figura 13. Os valores dos ângulos de acionamento são:  $\alpha_1 = 15^\circ$ ,  $\alpha_2 = 25^\circ$ ,  $\alpha_3 = 35^\circ$ ,  $\alpha_4 = 55^\circ$  e  $\alpha_5 = 75^\circ$ , cujos ciclos de trabalho obtidos pela equação 2 são:  $d_1 = 0,4167$ ,  $d_2 = 0,3611$ ,  $d_3 = 0,3055$ ,  $d_4 = 0,1945$  e  $d_5 = 0,0833$ . O valor calculado pela equação 9 da tensão de saída é de 320,58 V, ao passo que o valor medido foi de 320,40 V.

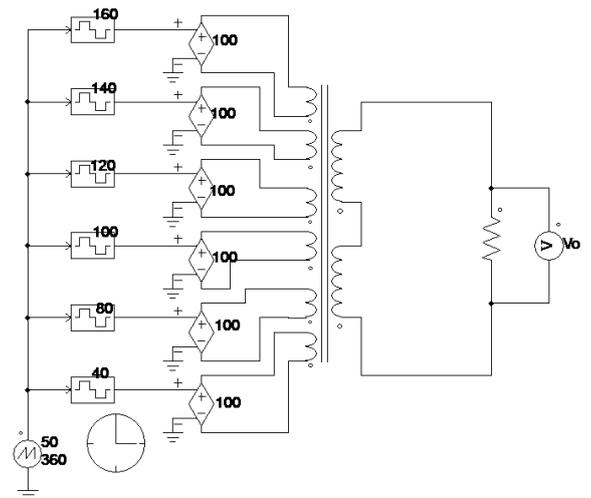
Figura 13: Tensão de saída de um inversor de 11 níveis.



### G. Inversor de 13 níveis

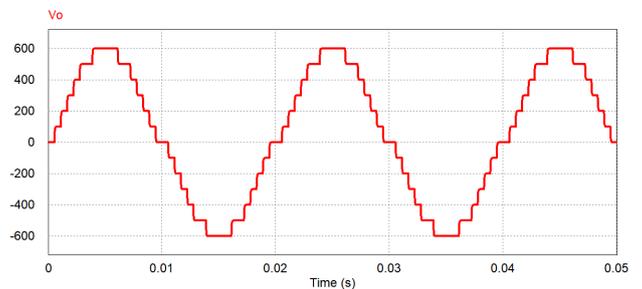
O circuito simulado no PSIM, versão *Demonstration*, para o inversor de 13 níveis, pode ser visto na Figura 14.

Figura 14: Inversor de 13 níveis com acoplamento a transformador.



A forma de onda da saída do inversor de 13 níveis pode ser vista na Figura 15. Os valores dos ângulos de acionamento são:  $\alpha_1 = 10^\circ$ ,  $\alpha_2 = 20^\circ$ ,  $\alpha_3 = 30^\circ$ ,  $\alpha_4 = 40^\circ$ ,  $\alpha_5 = 50^\circ$  e  $\alpha_6 = 70^\circ$ , cujos ciclos de trabalho obtidos pela equação 2 são:  $d_1 = 0,4444$ ,  $d_2 = 0,3889$ ,  $d_3 = 0,3333$ ,  $d_4 = 0,2778$ ,  $d_5 = 0,2222$  e  $d_6 = 0,1111$ . O valor calculado pela equação 11 da tensão de saída é de 410,92 V, ao passo que o valor medido foi de 410,79 V.

Figura 15: Tensão de saída de um inversor de 13 níveis.



### H. Comparando os valores de tensão

A tabela 1 mostra os valores de tensão calculados, medidos e o erro percentual. Nota-se que mesmo que a saída seja conectada a um transformador, os valores calculados são próximos aos valores simulados.

Tabela 1: Comparação entre valores calculados e simulados.

Níveis	Valor calculado	Valor simulado	Erro %
2	100	99,5	0,50
3	70,71	70,35	0,51
5	147,1	146,7	0,27
7	191,48	190,9	0,30
9	277,89	277,5	0,14
11	320,58	320,04	0,17
13	425,57	410,79	0,03

#### IV. CONCLUSÕES

Neste trabalho foram apresentadas as equações do valor da tensão eficaz de saída de inversores multinível, validando-a por meio de simulações de inversores com 2, 3, 5, 7, 9, 11 e 13 níveis, mostrando as equações do cálculo do valor RMS de cada inversor multinível. Inversores com até 5 níveis podem ser testados com apenas um módulo L298N. Com dois módulos, podem ser testados até inversores de 9 níveis, podendo ser testados inversores de até 13 níveis com apenas 3 módulos L298N. Todavia, para a proposta também devem haver, respectivamente, 2, 4 e 6 transformadores para isolar as saídas dos módulos L298N.

A Tabela 1 mostra os resultados entre os valores de simulação e teóricos dos inversores testados. Mesmo com suas saídas isoladas por transformadores, os valores simulados e calculados são satisfatórios, indicando que a etapa de montagem está pronta para ser inicializada.

Mesmo com limitações no que tange a quantidade de elementos de simulação, o PSIM versão *demo* permitiu a montagem e simulação de todos os circuitos apresentados. Devido à atual situação sanitária que o mundo está convivendo, não foi possível realizar montagens práticas do sistema.

#### REFERÊNCIAS

- [1] A. Ahmed. **Eletrônica de Potência**. Prentice-Hall, São Paulo, 2000.
- [2] D. W. Hart. **Eletrônica de Potência**. Editora Mcgraw hill artmed, 2011.
- [3] M. DERAKHSHANFAR. **Analysis of different topologies of multilevel inverters**. Göteborg, Sweden, 2010.
- [4] M. H. Rashid. **Eletrônica de Potência**. Pearson Education do Brasil. 2014.
- [5] Vahedi, Hani and Al-Haddad, Kamal. **Half-bridge based multilevel inverter generating higher voltage and power**. 2013 IEEE Electrical Power Energy Conference, 2013.
- [6] G. R. Kiran; M. Jaffar; K. Sasidhar. *Analysis of Multilevel Inverter with Different Topologies*. **International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)**. ISSN 2278-0181. Vol 6, 2017.
- [7] H. Taghizaden, M. Tarafdar Hagh. **Harmonic Elimination of Multilevel Inverters using Particle Swarm Optimization**. 2008 IEEE International Symposium on Industrial Electronics, 2008.
- [8] C. Rech, et al. **Uma metodologia de projeto generalizada para inversores multiníveis híbridos**. *Revista Controle & Automação*, Vol.15 no.2/Abril, Maio e Junho 2004. <https://doi.org/10.1590/S0103-17592004000200008>.
- [9] P. A. B. Leão, W. F. S. Silva, L. F. Bispo, C. R. B. Santos, L. F. J. Meloni. **Protótipo educacional de um inversor multinível de baixo custo utilizando Arduino e L298N**, CEEL, 2020. DOI: 10.14295/2596-2221.xviiiiceel.2020.564