

MODULAÇÃO PWM PARA ACIONAMENTO DE UMA LÂMPADA TUBULAR DE LED UTILIZANDO O SOFTWARE ATP

Raul V. A. Monteiro

Universidade Federal de Uberlândia / Departamento de Engenharia Elétrica, Uberlândia – MG,
raulvm@terra.com.br

Geraldo C. Guimarães

Universidade Federal de Uberlândia / Departamento de Engenharia Elétrica, Uberlândia – MG,
gcaixetag@gmail.com

André L. A. Fonseca

Instituto Federal de Mato Grosso / Departamento de Eletrotécnica, Cuiabá – MT, aluizfonseca@globocom

Resumo: Com o avanço de pesquisas que visam a eficiência elétrica de equipamentos elétricos, no setor de iluminação as lâmpadas tubulares de LED vêm se destacando com grande aceitação de consumidores residenciais e comerciais. Dessa forma estudos sobre a qualidade da energia elétrica quando da introdução desses equipamentos no sistema se tornam imprescindíveis, bem como possuir ferramentas que possibilitem a simulação das mesmas em sistemas de distribuição de energia elétrica. Este artigo tem como objetivo modelar computacionalmente um *driver* de uma lâmpada tubular de LED bivolt com tensão de entrada entre 100V e 240V RMS. Para isso foi realizada a confecção de um dispositivo que realizasse modulação PWM no ATP – *Alternative Transiente Program*.

Palavras-chave: Lâmpada tubular LED. Drivers de lâmpadas LED. Modulação PWM. Simulação computacional.

PWM MODULATION TO DRIVE A TUBULAR LED USING ATP SOFTWARE

Abstract: With the advancement of research aimed at the electrical efficiency of electrical equipment in the lighting industry tubular LED lamps have stood out with great acceptance of residential and commercial consumers. Thus studies on the quality of electric power when the introduction of such equipment in the system become indispensable, and have tools that allow the simulation of the same in electric power distribution systems. This paper aims to computational modelling a driver of a bivolt tubular LED lamp with input voltage between 100V and 240V RMS. For this it is made an device that realizes a PWM modulation in ATP – *Alternative Transient Program*.

Keywords: LED tubular lamp. Drivers LED lamps. PWM modulation. Computer simulation.

I. INTRODUÇÃO

LED (*lighting emitting diode*) ou diodos emissores de luz, vem sendo utilizados e aprimorados desde a década de 60.

Apesar disso, somente nos últimos 10 anos é que este dispositivo atraiu maior interesse devido ao fato de suas características luminosas terem sido consideravelmente aumentadas [1], como o aumento do fluxo luminoso emitido pelos LED's. Para além do seu uso em displays de aparelhos eletrônicos, semáforos de trânsito e calculadoras, com valores de fluxo luminoso e eficiência elétrica superiores aos de lâmpadas convencionais, os LED's começaram a competir com tais lâmpadas [2], como por exemplo, substituindo lâmpadas de vapor de sódio utilizadas em iluminação pública [3]. Estudos comprovam que a substituição de lâmpadas de vapor metálico por lâmpadas LED também resultam em uma eficiência elétrica de 70% [4].

Componentes – transistores, que comumente funcionam como chaves em circuitos de dispositivos eletrônicos, de outro lado, podem causar efeitos indesejáveis nos sistemas elétricos de distribuição, quando do seu uso massivo. Como exemplo pode-se citar as distorções na forma de onda de tensão e corrente da rede elétrica, denominadas distorções das formas de onda.

Na última década, para além das preocupações com a preservação do meio ambiente, o aumento da eficiência de todo tipo de equipamento foi estabelecido como meta de governos, de pesquisadores e de fabricantes. Dessa forma, a lâmpada incandescente, apesar de seu passado brilhante, passou a ter contagem regressiva para sua substituição por outras mais eficientes energeticamente.

Nesse contexto, nos anos 60 é que surgem as primeiras lâmpadas LED, que passam por inúmeras melhorias até que, nos anos 2000, se apresentam como uma promessa de substituição às lâmpadas fluorescentes, compactas e/ou tubulares, com menor consumo de energia elétrica e maior vida útil. Além desta característica, as lâmpadas de LED atendiam o apelo de preservação do meio ambiente, por não precisar, em sua fabricação, de substâncias prejudiciais ao meio ambiente, como por exemplo, o mercúrio utilizado em lâmpadas fluorescentes e vapor de mercúrio, tornando-se por isso atrativa do ponto de vista da preservação do meio ambiente, quando do descarte das mesmas. Além de possuir maior vida útil do que as demais lâmpadas convencionais (fluorescentes compactas e tubulares e, incandescentes) as lâmpadas de LED comparadas às fluorescentes compactas ou tubulares, não necessitam de reator adicional para o seu acionamento, no entanto, necessitam de um circuito de acionamento denominado *driver*.

O *driver* é um dos estágios no circuito de operação das lâmpadas LED, que tem o papel de interface entre a rede elétrica e o LED propriamente dito. Dessa forma, depreende-se

que existem diversas topologias de *drivers* de lâmpadas de LED, em suma dotados de transistores funcionando como chave o que ocasiona distorções nas formas de onda de tensão e corrente. O *driver* completo é constituído de um circuito retificador mais o conversor *Buck*.

As topologias mais comuns são *Buck*, *Boost*, *Buck – Boost*, *Buck Quadrático*, *SEPIC*, *Cúk*, *Zeta*, *Flyback*, e os *Conversores Lineares*. Ainda são divididas em duas partes: Isolados e não isolados. Existem ainda as topologias *resistor série* e *capacito série*, porém não são utilizados devido a sua baixa eficiência [5].

II. METODOLOGIA

Para este estudo foram feitas algumas análises laboratoriais imprescindíveis para obterem-se alguns dados necessários para a modelagem matemática do *driver* de uma lâmpada tubular de LED T8, como por exemplo o ciclo de trabalho do circuito integrado do conversor utilizado no funcionamento do *driver* da lâmpada tubular de LED T8 analisada, que será explicado na seção 3 deste artigo.

A partir daí se fez necessário identificar qual o tipo de *driver* se utiliza para o acionamento dessa lâmpada. Através de uma análise prática e visual, chegou-se a conclusão que o *driver* utilizado era do tipo *Buck* conforme ilustra a Fig.1.



Fig. 1. Circuito interno da lâmpada L2.

Para que fosse realizada a simulação computacional foram necessárias algumas medições de alguns sinais do circuito de *driver*, como os pulsos para chaveamento e de tensão de saída do *Buck*. Para isso foi utilizado o osciloscópio Tektronix TDS 2004B, de quatro canais, frequência de 60 MHz. A Fig. 2 ilustra a tela do osciloscópio, por ocasião do registro da forma de onda dos pulsos do circuito integrado.



Fig.2. Osciloscópio mostrando a forma de onda dos pulsos do circuito integrado do driver da lâmpada LED

III. MODELAGEM MATEMÁTICA

Visualmente constatou-se que o circuito de *driver* utilizado é do tipo *Buck*, uma vez que este circuito deve alimentar um conjunto de LEDs e os mesmos tem tensão individual nominal

baixa, entre 1V a 3.05 V. De maneira a evitar erros, foi medida a tensão de saída do *Buck* e encontrada uma tensão de 60,3 V. Dessa maneira pode-se afirmar que para lâmpadas tubulares de LED o circuito de *driver* utilizado é o do tipo *Buck*, uma vez que se tem 127 V de entrada e o medido na saída do conversor foi 60,3 V aplicados em toda *string* de leds, Fig. 3.

O circuito apresenta uma ponte retificadora de onda completa e após se retificar tensão e corrente um conversor CC-CC do tipo *Buck* abaixa o nível de tensão para os valores desejados pelo projetista.

Este circuito apresenta um estágio de filtro de entrada para o conversor *Buck*, um circuito de controle através de circuito integrado para o MOSFET do *Buck*, um estágio de filtro de saída do *Buck* e resistores para limitar a corrente nos LEDs.

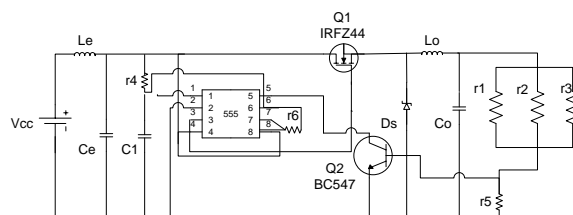


Fig.3. Conversor Buck

Onde:

Vcc = Fonte de tensão retificada;

Le = Indutor do filtro de entrada do Buck;

Ce = Capacitor do filtro de entrada do Buck;

C1 = Capacitor do CI 555;

r4, r6 = Resistores do CI 555;

r5 = Resistor de controle do sinal de saída do CI 555 (rsense);

r1, r2 e r3 = Resistores limitadores de corrente nos LEDs.

Q1 = MOSFET;

Q2 = Transistor TJB;

Ds = Diodo Schottky;

Lo = Indutor do filtro de saída do Buck;

Co = Capacitor do filtro de saída do Buck.

O *driver* encontrado tem seu chaveamento controlado através de modulação por largura de pulso, ou seja, aplicando – se um pulso positivo na base do MOSFET (Q1) este entra em condução.

A lâmpada estudada é bi-volt, ou seja, opera tanto com tensões de 127V e 220V. Dessa maneira é necessário que se controle o tempo ligado (Ton) do pulso do circuito integrado para que assim se estabilize a tensão de saída do *Buck*. Essa alteração em Ton do CI altera o ciclo de trabalho “d” do *Buck*, o que garante uma tensão de saída constante em aproximadamente 60V. Outros circuitos integrados podem ser utilizados neste caso.

O ciclo de trabalho (d) de um conversor CC/CC *Buck* nada mais é do que a razão entre o tempo ligado do CI e a largura do pulso do mesmo (1):

$$d = \frac{T_{on}}{T} \quad (1)$$

Sendo,

Ton = Tempo ligado do pulso aplicado no MOSFET do *Buck*;

T = Período ou largura do pulso aplicada no MOSFET do *Buck*.

Como o objetivo é disponibilizar uma tensão contínua, porém, menor do que a tensão de entrada para os LEDs, devido às ondulações provocadas pela operação do conversor *Buck*, se faz necessária a introdução de filtros de entradas (L_e e C_e) e saída (L_o e C_o) para diminuir as ondulações de tensão e corrente aplicadas nos LEDs.

O arranjo de LEDs é feito através de 132 LEDs conectados em 3 grupos de 44 LEDs em série e cada grupo em paralelo entre si e com a saída do *Buck*, garantindo assim uma tensão aproximadamente 1,36V por LED.

Para que se assegure a corrente necessária em cada grupo de LED, são utilizados resistores em série com cada grupo de 44 LEDs, Fig. 4.

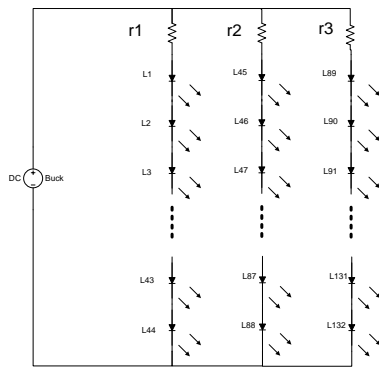


Fig. 4. Arranjo dos LEDs no circuito

Como os conversores CC/CC funcionam como transformadores em corrente contínua, para obter-se a corrente de saída para um conversor *Buck* basta multiplicá-la pelo ciclo de trabalho do *Buck* [6]. Assim, se te por meio de (2):

$$I_{L_o} = I_{L_e} \times d \quad (2)$$

Sendo,

I_{L_o} = Corrente na entrada do *driver*;

I_{L_e} = Corrente na saída do *driver*.

Observa-se então, que para a parametrização do conversor *Buck* se faz necessário saber o ciclo de trabalho (d) do conversor. Para isso foram feitas análises em laboratório com auxílio do osciloscópio mencionado no tópico “metodologia” deste artigo.

Através dessa análise laboratorial, conseguiu-se determinar a frequência de chaveamento para a lâmpada tubular LED sendo acionada em 127V e em 220V, bem como ambos os ciclos de trabalho para cada nível de tensão. As Fig. 5 e 6, respectivamente, ilustram os pulsos do circuito integrado em 127V e em 220V.

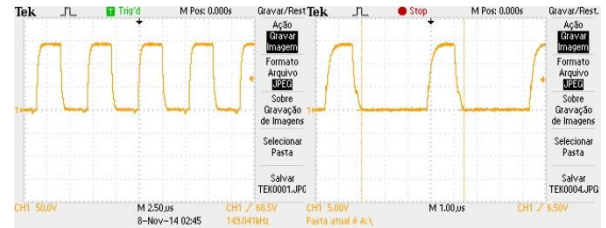


Fig. 5. Pulsos para acionamento da lâmpada LED em 127 e 220 volts

Tem-se então 2 ciclos diferentes de trabalho, como esperado, para cada nível de tensão aplicado a lâmpada. Vale lembrar que automaticamente o circuito integrado que gera esses pulsos se adapta ao nível de tensão de alimentação.

Conforme ilustram as figuras anteriores, a frequência de chaveamento para o 127V foi de 150 kHz com T_{on} de 3,33 μ s e, para 220V foi de 250 kHz com T_{on} de 1,08 μ s. Assim foram obtidos ambos os ciclos de trabalho através de (1), resultando em um ciclo de trabalho de 0,5 para o acionamento em 127V e 0,27 para o acionamento em 220V. Esses dados obtidos se tornam compatíveis com o nível de tensão medido anteriormente em 60V na saída do *Buck*. Assim como aplicado o ciclo de trabalho para se determinar o valor da corrente de saída no *Buck*, a mesma relação pode ser utilizada para se determinar a tensão aplicada na saída do *Buck* [6]. Assim através de (3) pode-se chegar ao resultado desejado para a tensão:

$$V_{out} = V_{in} \times d \quad (3)$$

Sendo,

V_{out} = Tensão de saída desejada no *Buck*;

V_{in} = Tensão aplicada na entrada do *Buck*.

A partir desse ponto se tem os dados necessários para a modelagem matemática e computacional.

Tendo em vista as elevadas frequências de chaveamento dos circuitos de controle da lâmpada LED, tanto para a tensão de 127V quanto para 220V, o simulador ATP utilizado necessita fazer o chaveamento do transistor (MOSFET) e os cálculos necessários para esse chaveamento. Esta operação resulta em um tempo de simulação extremamente elevado, cerca de 7500 segundos, o que deixaria os trabalhos de simulação exaustivos e pouco atrativos.

Dessa maneira, como forma de contornar essa questão, sem não entando comprometer os resultados, optou-se por diminuir em 1/3 as frequências de chaveamento na simulação, desta forma reduzindo o tempo de simulação para cerca de 1500 segundos, tornando a simulação menos cansativa e demorada.

O filtro de entrada é composto pelo indutor L_e e pelo capacitor C_e e é empregado para corrigir os efeitos de harmônicos devido à corrente pulsada da fonte que alimenta o conversor e, se houver indutância em série com a chave, no momento de sua abertura pode ser produzida uma sobretensão e destruir essa chave [7]. Segundo estes mesmos autores, “nas aplicações onde o conversor *Buck* deve produzir uma tensão contínua de baixa ondulação, é necessário adicionar um filtro

de saída passa-baixa constituído de um indutor e um capacitor”. O filtro de saída é composto pelo indutor L_o e pelo capacitor C_o .

Antes de se calcular os filtros de entrada e saída deve – se, primeiramente, definir qual a variação de tensão e corrente (ondulação) desejada na saída do *Buck*. Uma vez que se deseja corrente e tensão de saída o mais próximo possível de sinais contínuos, atribui-se o limite de 1% de ondulação para essas grandezas elétricas. Para a execução dos cálculos aqui propostos é utilizada a metodologia proposta por [7]

IV. IMPLEMENTAÇÃO COMPUTACIONAL

Para a implementação computacional se fez necessário a confecção de um dispositivo que realizasse a modulação PWM no ATP. Vale ressaltar que a lâmpada em estudo é bivolt e pode operar em uma faixa de 100 - 240V RMS.

Essa implementação foi realizada através de TACS (*Transient Analysis of Control Systems*) que no ATP fazem o papel dos componentes dos sistemas de controle de dispositivos elétricos se tornando um recurso muito útil dentro do ATP. Basicamente para esta implementação foram utilizadas TACS do tipo 60 e TACS FORTRAN.

As TACS 60 utilizadas serviram para comparação dos sinais entre a onda triangular portadora e a referência de tensão para a modulação. A onda triangular foi modelada de acordo com a equação apresentada por [8] e foi inserida na TACS FORTRAN. Essa TACS tem como uma de suas funções realizar cálculos matemáticos, desde que programados e inseridos nela, e traduzir o resultado desses cálculos em uma forma de onda que o ATP consiga interpretar e plotar para o usuário. A equação utilizada para modelar a onda triangular é apresentada em (4) e a sua inserção no FORTRAN é ilustrada pela Fig. 6.

$$\text{TRIANG} = (1 - 2 * \text{ACOS}(\text{COS}(2 * \text{PI} * \text{FREQ} * \text{TIMEX}))/\text{PI}) * \text{AMPLI} \quad (4)$$

Sendo,

FREQ1 = Frequencia da onda triangular (chaveamento);

TIMEX = Tempo de simulação do ATP;

AMPL1 = Amplitude da onda triangular.

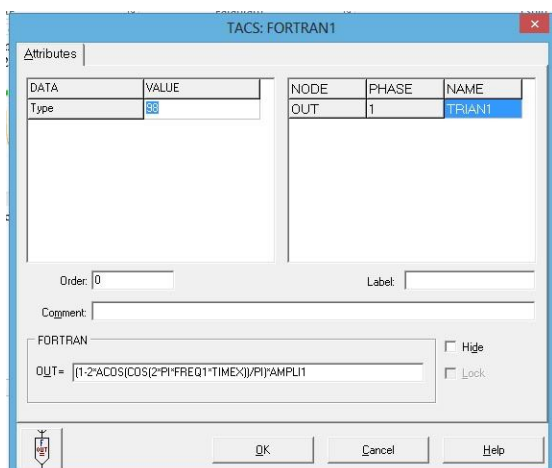


Fig. 6. Equação da onda triangular inserida no FORTRAN

Modulações por largura de pulso comparam uma onda portadora com um sinal de referência gerado pelo próprio circuito integrado (geralmente utilizado uma onda senoidal). Variando-se a frequência da onda senoidal gerada, ou seja, a largura do seu pulso, compara-se a onda triangular com a onda gerada. Nessa comparação se a onda triangular tem amplitude maior do que o sinal gerado então o sinal de saída será negativo ou zero. Quando o sinal gerado tiver amplitude maior do que a onda triangular, então o sinal de saída será positivo.

Para que fosse obtido o sinal de saída modulado pela largura do pulso, lançou-se mão da TACS 60, que nada mais é do que uma chave comparadora do tipo SE (IF). Esta chave possui possibilidades de comparação entre 2 sinais. De acordo com a relação entre amplitudes desses sinais de entrada esta chave disponibiliza em sua saída 1 sinal pré-determinado pelo usuário, por exemplo, se o sinal do pino de entrada 1 for menor do que o sinal de entrada do pino 2, então o sinal de saída será o definido para essa situação. Assim, foi possível que se gerasse um sinal PWM na saída da TACS 60. A Fig. 7 ilustra as formas de ondas envolvidas na modulação simulada para a tensão de 127V RMS.

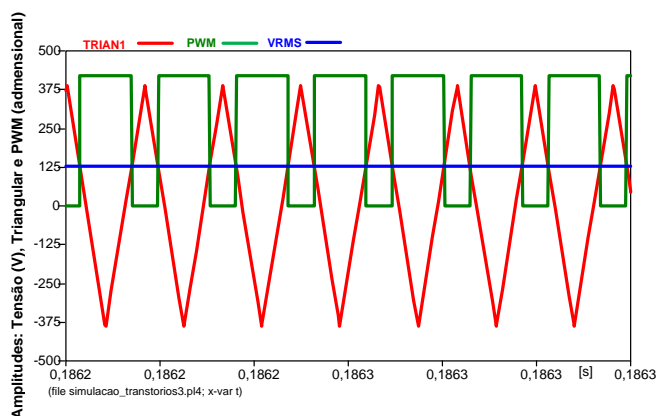


Fig. 7. Formas de onda da modulação PWM para tensão de entrada igual a 127V RMS.

Vale ressaltar que a amplitude do sinal de saída precisa ser apenas 1, porém, foi fixada em 420 apenas para poder comparar com a onda triangular e o sinal de referência RMS.

Uma vez que a referência utilizada para a modulação PWM neste estudo foi a tensão eficaz verdadeira (RMS) de entrada, se fez necessário que a amplitude da onda triangular variasse, bem como sua frequência, de acordo com a tensão RMS de entrada. Para isso, como mostrado em (4) a equação da onda triangular inserida na TACS FORTRAN foi multiplicada por um valor denominado AMPLI, que nada mais é do que a própria amplitude da triangular desejada. O valor de AMPLI é calculado automaticamente da mesma forma que a onda triangular, porém a equação que o representa foi encontrada através de interpolação linear após terem sido encontrados os valores das amplitudes necessárias para a correta modulação em função das respectivas tensões RMS de entrada. Estas relações foram encontradas através de métodos iterativos.

Como explicado anteriormente as frequências de chaveamento encontradas, através de análises laboratoriais foram apenas as frequências de chaveamento para as tensões da rede em 127V e 220V. Dessa maneira tornou-se necessário, através de métodos iterativos, definir as frequências de

chaveamento necessárias para as tensões de entrada em uma faixa de 100V a 240V.

Feito isso, para que o ajuste da frequência fosse o mais fino possível, desenvolveu-se uma equação correspondente ao termo **FREQ**, que modula a frequência da onda triangular, através de um método estatístico denominado regressão linear.

Entende-se por regressão o ajuste de uma curva (função matemática) a uma série de pontos observados. Primeiro observam-se a relação entre os dados coletados e se define uma equação que os represente. A partir daí faz-se o tratamento estatístico através da regressão linear para que se tenha o melhor ajuste dos dados obtidos em função de uma entrada. A equação encontrada para a variação da frequência da onda triangular, comparando-se as frequências encontradas por métodos iterativos com as respectivas tensões de entrada RMS é representada por (5) na linguagem do ATP:

$$90500 * ((VRMS/240) ** 0.930067) \quad (5)$$

Sendo,

VRMS = Tensão RMS de entrada;

** = Representa a função “exponencial” no ATP.

Uma vez que a relação de frequências de chaveamento e amplitudes da onda triangular encontradas não são lineares, foram feitas duas lógicas para que a simulação desse certo, linearizando assim essas relações. Foi feita uma equação de frequência e amplitude para uma faixa de tensão RMS de entrada de 100V a 126V e outras duas equações do mesmo tipo para uma faixa de tensão RMS de entrada de VRMS > 126V a 240V. A Fig. 8 ilustra todos os componentes envolvidos na modelagem da modulação PWM e ilustra o bloco criado através da compressão desses componentes em 1 bloco só.

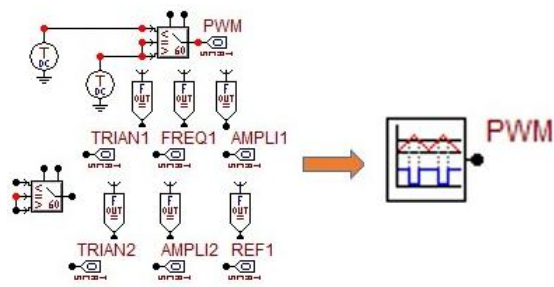


Fig. 8. Componentes envolvidos na modelagem do modulador PWM.

Devido à alta frequência de chaveamento e consequentemente da onda triangular, a simulação resultava em uma onda triangular disforme. Para solucionar esse problema foi necessário aumentar o passo de integração, ou seja, a quantidade de pontos que o *software* utiliza para fazer os devidos cálculos no circuito. Porém, a TACS utilizada para ler o sinal RMS existente no ATP tem o limite de 1E-6 para o passo de integração. Dessa maneira foi necessário modelar um dispositivo que calculasse e fornecesse este valor da tensão RMS de entrada, aceitando assim um passo de integração maior. Este dispositivo foi modelado e criado em MODELS.

A MODELS funciona como a TACS, porém traz mais simplicidade no equacionamento matemática e pode vir a simplificar uma simulação que se deseja realizar. O dispositivo

criado para a leitura do valor RMS da tensão de entrada é ilustrado pela Fig. 9 bem como o bloco criado através da compressão dos componentes envolvidos.

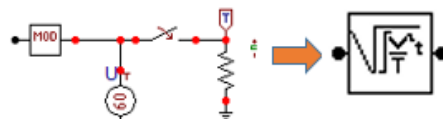


Fig. 9. Medidor RMS monofásico implementado em MODELS.

V. RESULTADOS

Como resultado são apresentados aqui as formas de onda de tensão e corrente de saída do conversor *Buck*, tensão RMS de entrada e forma de onda de saída do sinal modulado para as tensões de 100V, 127V e 240V (RMS).

A Fig. 10 ilustra as formas de onda participantes da modulação PWM para uma tensão de entrada de 100V RMS.

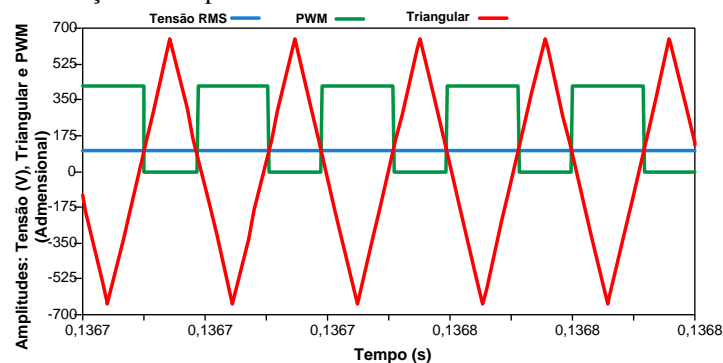


Fig. 10. Formas de onda da modulação PWM para tensão de entrada igual a 100V RMS.

A Fig. 11 ilustra o sinal de tensão de saída para uma tensão RMS de entrada em 100V.

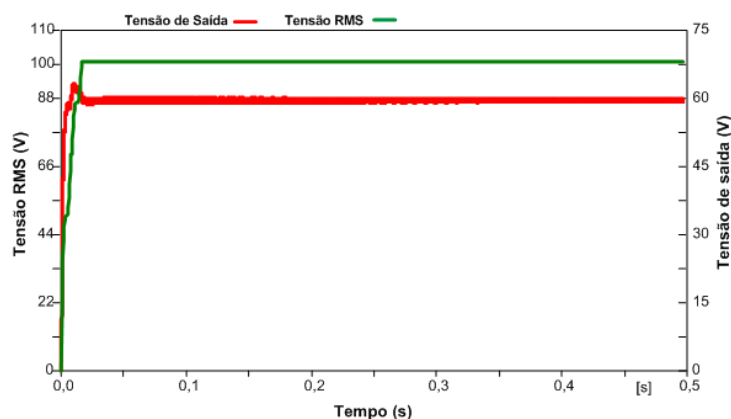


Fig. 11. Tensão de entrada 100V RMS e tensão de saída em corrente contínua.

As formas de onda participantes da modulação PWM para a tensão de entrada de 127V RMS estão ilustradas na Fig. 7. A Fig. 12 ilustra o sinal de tensão de saída para uma tensão RMS de entrada em 127V.

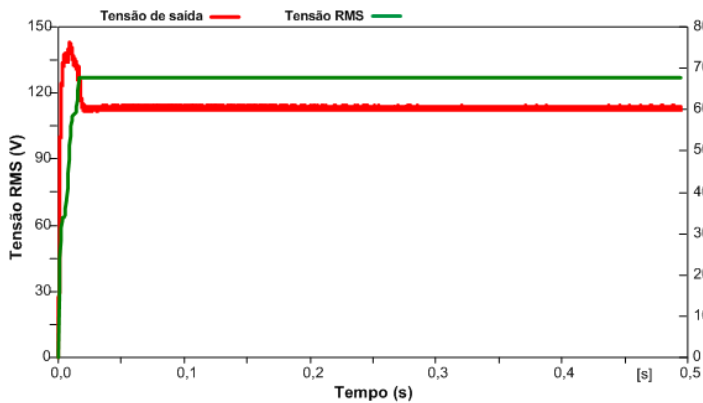


Fig. 12. Tensão de entrada 127V RMS e tensão de saída em corrente contínua.

As Figs. 13 e 14 ilustram as formas de onda das grandezas envolvidas na modulação PWM (Fig.13) e das tensões de entrada e saída para tensão de entrada em 220V RMS (Fig. 14).

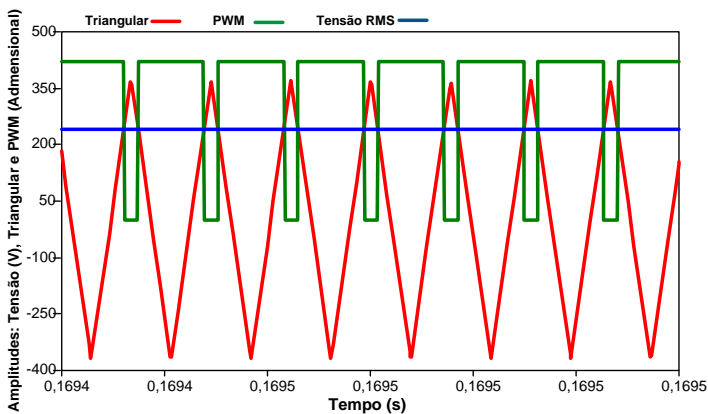


Fig.13. Formas de onda da modulação PWM para tensão de entrada igual a 220V RMS.

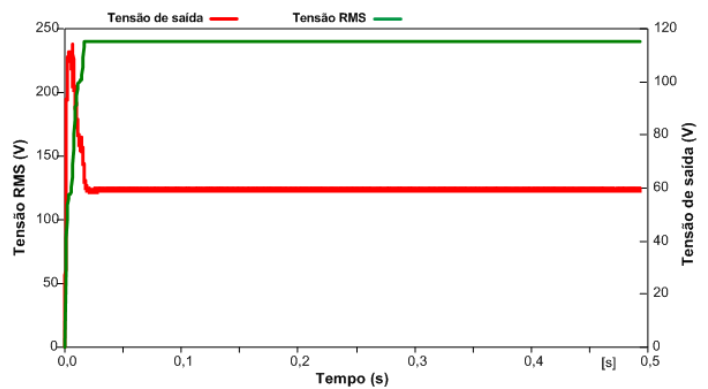


Fig. 14. Tensão de entrada 240V RMS e tensão de saída em corrente contínua.

O circuito implementado, completo, é ilustrado pela Fig. 15.

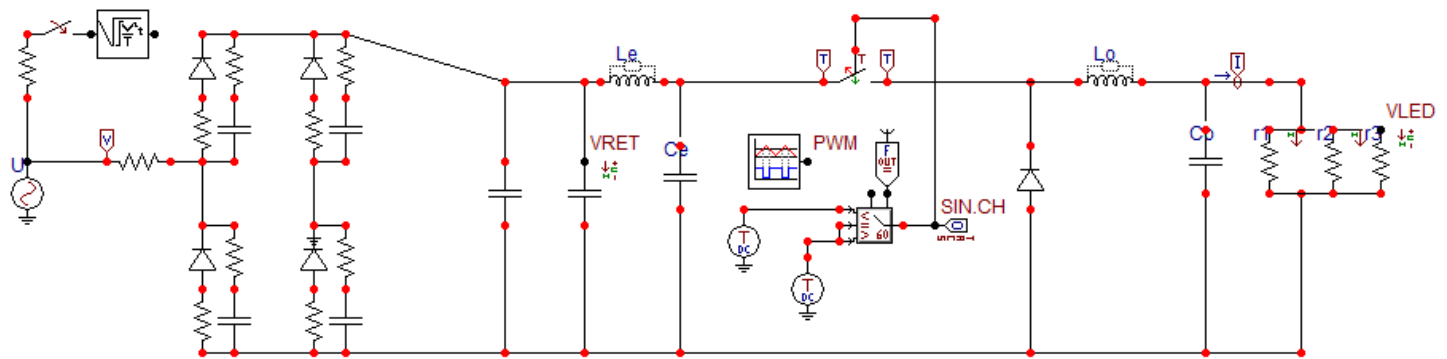


Fig. 15. Circuito implementado computacionalmente com o software ATP

VI. CONCLUSÃO

Neste artigo foi apresentada a modelagem computacional de um circuito de *driver* de uma lâmpada tubular LED T8 com modulação PWM.

A simulação feita através do *software* ATP se mostrou bastante completa, uma vez que para que fosse possível acionar a lâmpada em estudo em uma faixa de 100V e 240V RMS,

conforme a lâmpada real, se fez necessário o uso de modulação PWM e a mesma foi implementada com sucesso no ATP.

A conclusão deste trabalho teve como resultado uma ferramenta criada para as devidas análises da inserção dessas lâmpadas em sistemas elétricos residenciais, comerciais e industriais.

REFERÊNCIAS

- [1] Bullough, J. D. "Lighting Answers: Led Systems". *National Lighting Product Information Program, Lighting Research Center, Rensselaer Polytechnic Institute*. Vol. 7, Issue 3, 2003.
- [2] Knoop, M.. "Medidas para qualidade da iluminação interna com sistemas a LEDs". *Revista Eletricidade Moderna*. Ed. 459. págs. 50 – 59. Jun. 2012.
- [3] Castro, A. G.; Muños, A. M.; Bollen, M.. "Estudo de harmônicos em lâmpadas com uso da norma IEC 61000-3-6". *Revista Eletricidade Moderna*. Ed. 479. págs. 110 – 117. Fev. 2014.
- [4] Marcili, F. N.. "Estudo de caso: iluminação a LED em um posto de combustível". *Revista Eletricidade Moderna*. Ed. 471. págs.38 – 45. Jun. 2013.
- [5] YU, L.; YANG, J.. "The Topologies of White LED Lamps' Power Drivers". *IEEE. 3rd International Conference on Power Electronics Systems and Applications*. 2009.
- [6] Ahmed, A.. **Eletrônica de potência**. Editora Prentice Hall, São Paulo, trad., 479 pags. 2000.
- [7] Martins, D. C.; Barbi, I.. "Eletrônica de potência: conversores CC – CC básicos não isolados". Ed. dos Autores, Florianópolis, Segunda edição revisada, 377 pags. 2006.
- [8] Chaves, M. L. R.; Rodrigues, A. R.; Rodrigues, J. F.. "Implementação de um módulo para simulação de um inversor PWM no software ATPDraw utilizando a rotina TACS". *IV Conferência de Estudos em Engenharia Elétrica – CEEL*. Nov. 2005.