

## UTILIZAÇÃO DE METODOLOGIA PRÁTICA PARA O ENTENDIMENTO DO CIRCUITO DE GREINACHER

*Helem Monyelle de Mélo Alves – helem.alves@ee.ufcg.edu.br*

*Departamento de Engenharia Elétrica, UFCG*

*Rua Aprígio Veloso, 882, bairro Universitário*

*58429-900 – Campina Grande – Paraíba*

*Felipe Barros Dantas – felipe.dantas@ee.ufcg.edu.br*

*Departamento de Engenharia Elétrica, UFCG*

*Rua Aprígio Veloso, 882, bairro Universitário*

*58429-900 – Campina Grande – Paraíba*

*William Pinheiro Silva – william.silva@ee.ufcg.edu.br*

*Departamento de Engenharia Elétrica, UFCG*

*Rua Aprígio Veloso, 882, bairro Universitário*

*58429-900 – Campina Grande – Paraíba*

*Marbyo Lopes do Nascimento – marbyo.nascimento@ee.ufcg.edu.br*

*Departamento de Engenharia Elétrica, UFCG*

*Rua Aprígio Veloso, 882, bairro Universitário*

*58429-900 – Campina Grande – Paraíba*

*Edson Guedes da Costa – edson@dee.ufcg.edu.br*

*Departamento de Engenharia Elétrica, UFCG*

*Rua Aprígio Veloso, 882, bairro Universitário*

*58429-900 – Campina Grande – Paraíba*

**Resumo:** O circuito de Greinacher é um multiplicador de tensão usual utilizado na Engenharia Elétrica para geração de alta tensão contínua em laboratório. Ele possibilita a obtenção de múltiplo inteiro do valor de crista da tensão de entrada. A compreensão do comportamento multiplicador de Greinacher torna-se dificultoso quando abordado apenas teoricamente em sala de aula, principalmente, o estágio do seu carregamento. Este trabalho apresenta três métodos empregados para ensino do circuito de Greinacher. O primeiro é o estudo teórico assimilado em sala de aula. O segundo é a simulação computacional e o terceiro é a montagem experimental do esquema em baixa tensão. Nas análises computacionais e nas simulações, o comportamento dos sinais de tensão na entrada e na saída do circuito foram aplicadas diferentes cargas, observado o carregamento em regime transitório. Efetuou-se a montagem experimental e obteve-se os registros da forma de onda. A simulação computacional, foi implementada utilizando-se o software SIMULINK®. Constatou-se a eficiência da aprendizagem quanto ao funcionamento e entendimento do referido circuito elétrico utilizando as três metodologias.

**Palavras-chave:** Abordagem prática no ensino. Geração de tensão contínua. Circuito de Greinacher.

## 1 INTRODUÇÃO

A ciência envolvendo a eletricidade e as suas aplicações práticas foram iniciadas utilizando a corrente contínua. Esta é uma opção que vem se destacando na transmissão de energia e é, também, bastante empregada em laboratório.

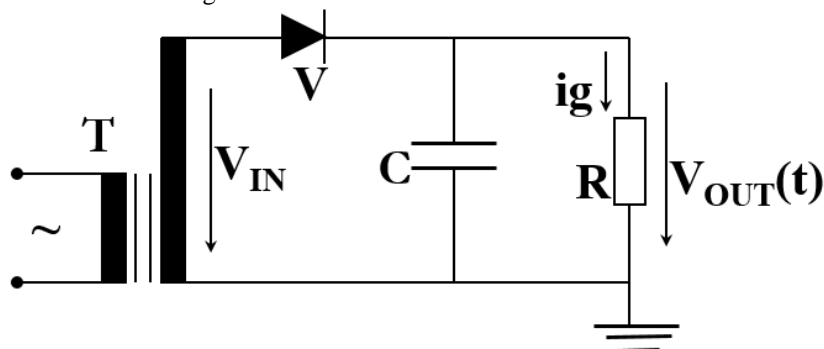
Atualmente, o uso da tensão contínua vem se destacando na transmissão de energia em grande potência a longas distâncias, na transmissão em cabos submarinos, na conexão de sistemas trifásicos e na alimentação com alta potência nas aglomerações urbanas dos grandes centros. O utilização da transmissão em corrente (CC) em média distância, com por exemplo, linhas de 400 a 500 kV já é viável economicamente.

Além das vantagens técnicas da transmissão CC, existem também vantagens de ordem econômica e ambiental oferecidas por cabos de custo mais baixo, redução de faixas de servidão e níveis mais baixos de campos eletromagnéticos. Os principais aspectos ambientais levados em consideração na implementação de transmissão a corrente contínua são relacionados ao ruído audível, ao impacto visual e aos efeitos dos campos eletromagnéticos. (ALVES, 2016)

Em laboratório, a tensão contínua é empregada em ensaios de equipamentos para sistemas CC, ensaios de isolamento, ensaios de cabos e capacitores, entre outras aplicações. Por isso, a importância de se estudar a geração de tensão contínua.

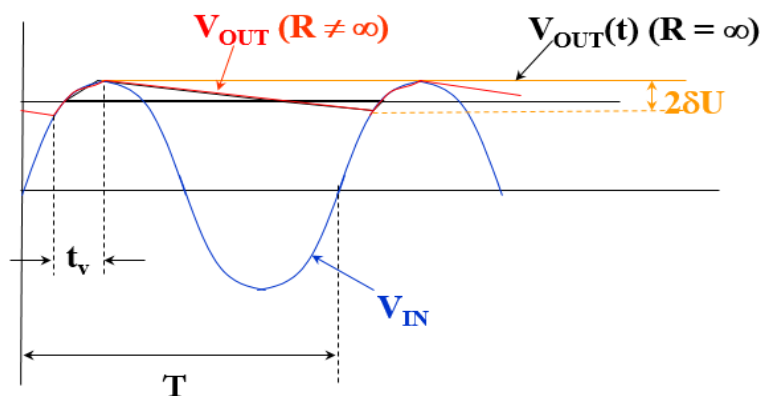
Comumente, circuitos retificadores são utilizados na geração contínua em laboratório, conforme pode ser visto na Figura 1 e seu comportamento na Figura 2. Geralmente são aplicados vários diodos semicondutores conectados em série como elementos para retificação da alta tensão alternada.

Figura 1: Circuito retificador de meia onda.



Fonte: O próprio autor.

Figura 2: Tensões em um circuito retificador de meia onda.



Fonte: O próprio autor.

Para a geração de alta tensão contínua em laboratório são empregados os circuitos multiplicadores de tensão, que são circuitos que possibilitam a obtenção de uma tensão contínua de saída cujo valor é múltiplo inteiro do valor de crista de uma tensão de entrada (senoidal ou quadrada). Esses circuitos possuem diversas aplicações em situações nas quais uma tensão superior à da alimentação principal é necessária ou nos casos em que é preciso gerar uma tensão contínua de polaridade contrária à da alimentação.

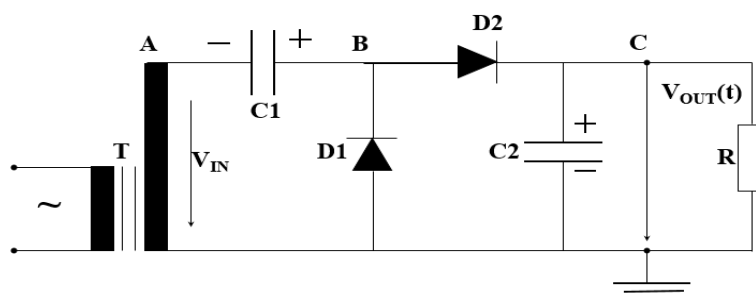
Para a Engenharia, a metodologia de ensino de novos esquemas ou circuitos deve, preferencialmente, aliar o conhecimento teórico à experimentação prática, por meio de simulações em um ambiente virtual e da montagem experimental. A prática permite que o aluno conheça detalhadamente o funcionamento do circuito e, de maneira crítica, avalie o esquema elétrico vislumbrando suas aplicações.

Nesse sentido, busca-se com o trabalho realizar um estudo do circuito de *Greinacher*, um multiplicador de tensão usual na Engenharia de Alta Tensão, por meio do estudo teórico assimilado em sala de aula, da simulação computacional e da montagem experimental do esquema em baixa tensão, obtendo os registros da forma de onda e avaliando, assim, o comportamento dos sinais de tensão na entrada e na saída do circuito para diferentes cargas, bem como o seu carregamento em regime transitório. Ademais, deseja-se comprovar a eficiência da aprendizagem dos alunos quanto ao funcionamento e entendimento do referido circuito elétrico por meio da metodologia adotada.

## 2 CIRCUITO DE GREINACHER

Os circuitos multiplicadores de tensão são bastante empregados na Engenharia Elétrica, uma vez que, além de retificar a entrada alternada, eles multiplicam a tensão contínua. Um exemplo de multiplicador de tensão muito conhecido é o circuito de *Greinacher*, que pode ser visto na Figura 3.

Figura 3: Circuito de *Greinacher*.



Fonte: O próprio autor.

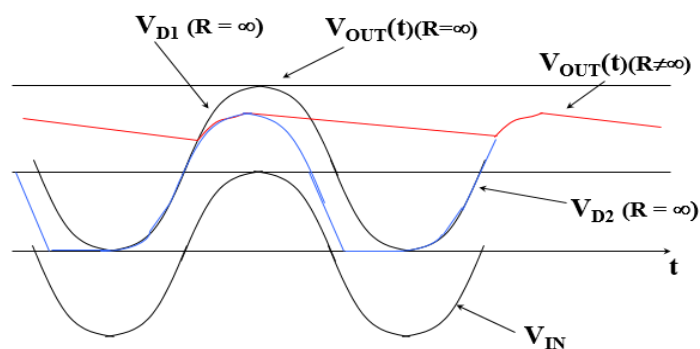
O comportamento do circuito de Greinacher, em regime permanente, pode ser dividido em duas fases. Na primeira fase, no semiciclo negativo da entrada senoidal, o diodo D2 não conduz e o capacitor C1 é carregado com uma tensão igual à amplitude do sinal de entrada, com o diodo D1 conduzindo.

A segunda fase corresponde ao semiciclo positivo, em que o diodo D1 não conduz. Quando a tensão na saída (tensão no capacitor C2) é maior que a tensão da entrada somada à tensão no capacitor C1, o diodo D2 estará em corte e o capacitor C2 será descarregado através da carga resistiva, ao mesmo tempo em que o capacitor C1 mantém a carga armazenada na fase anterior. Nesse mesmo semiciclo, quando a tensão na entrada somada à tensão no capacitor C1 ultrapassar a tensão na saída do circuito, o diodo D2 estará diretamente polarizado e o capacitor C2 será carregado através da mesma malha de circuito que contém o capacitor C1, produzindo na saída uma tensão que corresponde à soma da tensão em C1 com



a amplitude do sinal na entrada. Se não houvesse nenhuma carga resistiva na saída do circuito, a tensão obtida na saída em regime permanente corresponderia a exatamente o dobro da amplitude do sinal na entrada. O comportamento do circuito pode ser visto na Figura 4.

Figura 4: Tensões em um Circuito de *Greinacher*.



Fonte: O próprio autor.

Para a aprendizagem do funcionamento de um circuito ou de um esquema eletrônico, além do conhecimento teórico e empírico, é importante aliar a experimentação prática e a realização de simulações em um ambiente virtual. Por isso, objetivou-se com este trabalho, realizar a simulação do circuito de *Greinacher* e a montagem experimental para avaliar o comportamento dos sinais de tensão na entrada e na saída do circuito, assim como o carregamento do circuito em regime transitório. A equação que rege a tensão de saída no circuito de *Greinacher* é:

$$V_{out} = \frac{2V_A}{1 + \frac{T}{RC_1}} \quad (1)$$

Pode-se notar que na situação sem carga, ou seja,  $R \rightarrow \infty$ , tem-se:

$$V_{out} = 2V_A \quad (2)$$

Assim, para esse caso específico, a tensão na saída é duas vezes a tensão da entrada. Para o entendimento prático desse circuito, é importante a implementação física e via simulação, o que permite uma melhor fixação do seu funcionamento.

### 3 PARTE EXPERIMENTAL

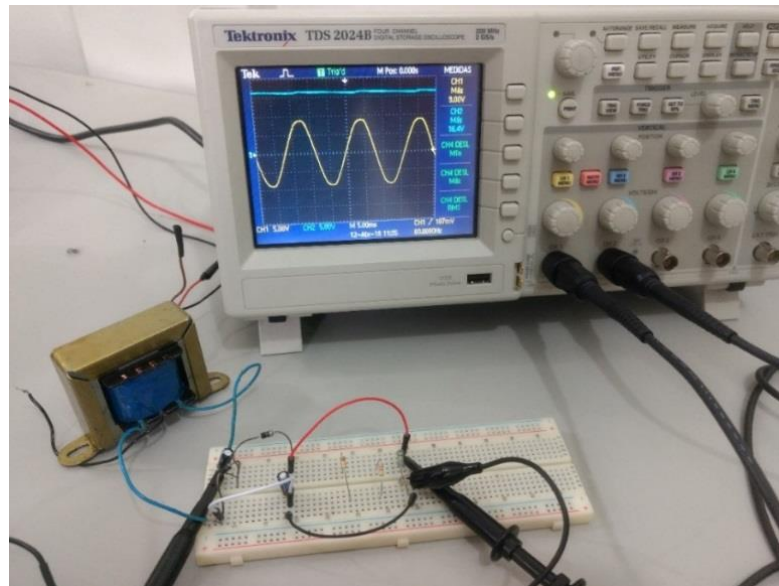
Com o intuito de promover e fixar conhecimento ou aprendizado, para o estudo do circuito de *Greinacher*, foi proposta a montagem experimental do arranjo em baixa tensão. Os materiais utilizados estão especificados na Tabela 1 e o circuito montado na Figura 5.

Tabela 1: Materiais utilizados no experimento.

Materiais
1 transformador de 220 V // 12 V
2 capacitores de 10 $\mu$ F
Resistores de 100 k $\Omega$ , 4,7 k $\Omega$ e 10 k $\Omega$
2 diodos
1 osciloscópio
2 pontas de prova
Cabos

Fonte: O próprio autor.

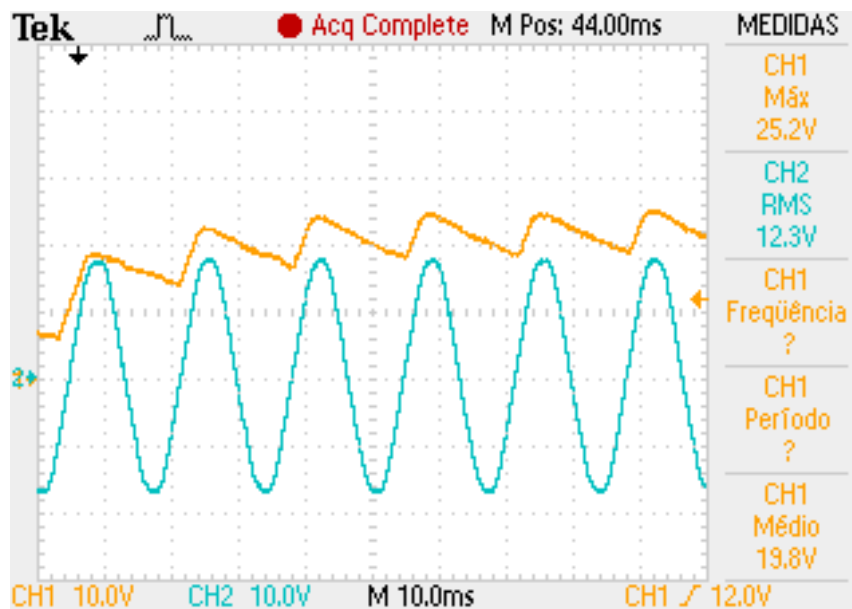
Figura 5: Circuito montado para o experimento.



Fonte: O próprio autor.

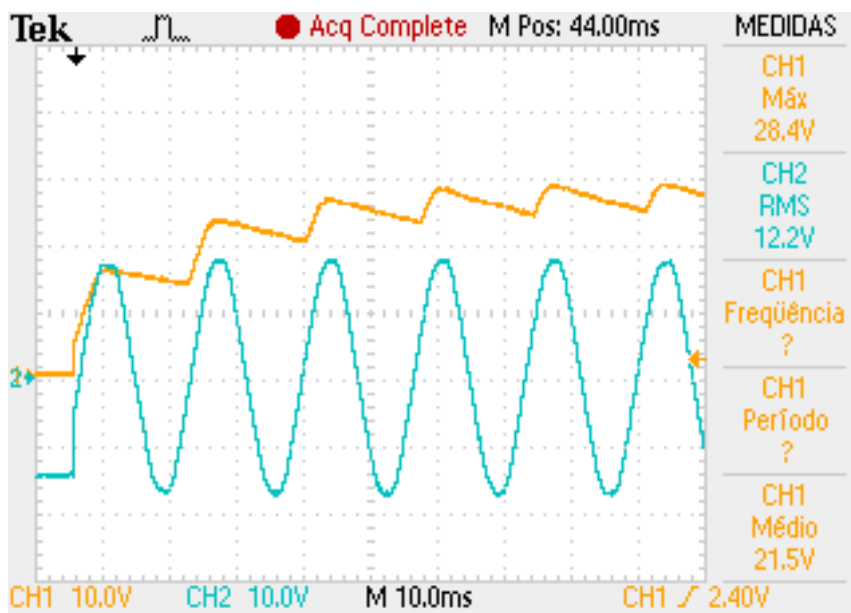
Na sequência, foram feitos ajustes no osciloscópio para que a parte transitória do circuito fosse observada. Foram utilizados os resistores especificados na Tabela 1 como cargas. Nas Figuras 6, 7 e 8 são apresentadas as formas de onda obtidas por meio do osciloscópio para os resistores de 4,7 k $\Omega$ , 10 k $\Omega$  e 100 k $\Omega$ . A forma de onda em laranja se refere a tensão medida na saída, enquanto a forma de onda em azul se refere a tensão do transformador.

Figura 6: Tensão na saída do circuito para uma carga de 4,7 k $\Omega$ .



Fonte: O próprio autor.

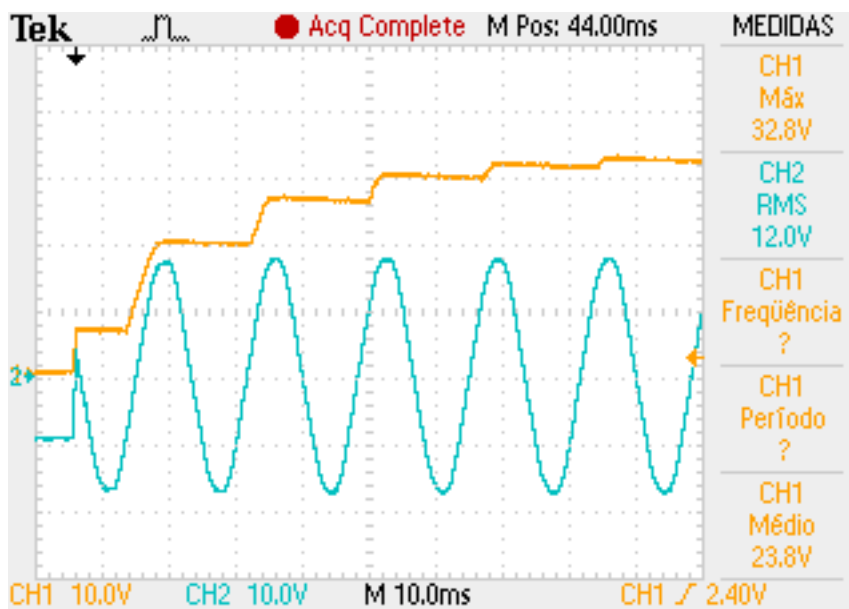
Figura 7: Tensão na saída do circuito para uma carga de 10 k $\Omega$ .



Fonte: O próprio autor.

Da análise das formas de onda obtidas no osciloscópio, é possível observar o tempo de carregamento dos capacitores após o qual a tensão contínua gerada pelo circuito se estabelece em um valor permanente. Para as cargas de 4,7 k $\Omega$  e 10 k $\Omega$ , por possuírem um tempo de carregamento muito longo, não foi possível visualizar apenas por meio das Figuras, pois não se alcançou o regime permanente.

Figura 8: Tensão na saída do circuito para uma carga de 100 k $\Omega$ .



Fonte: O próprio autor.

Para a carga de 100 k $\Omega$ , o tempo de carregamento quase se completou para alcançar o regime permanente. Sendo evidenciado bem mais rápido do que nos demais casos.

Com o objetivo de estudar a influência do valor da carga sobre o *ripple* da tensão de saída do circuito multiplicador, convencionou-se realizar algumas análises. Na Tabela 2 são



mostrados os valores calculados para o *ripple* em função dos valores dos três resistores escolhidos, utilizando o cálculo pela Equação (3).

$$V_{ripple} = \frac{V_{crista}}{2fRC} \quad (3)$$

Em que  $V_{ripple}$  é o valor da tensão de *ripple*,  $V_{crista}$  é a tensão de crista saída,  $f$  é a frequência das tensões do circuito,  $C$  é o valor do capacitor e  $R$  é o valor do resistor de carga.

Tabela 2: Resultados experimentais do circuito de *Greinacher*.

	Tensão medida na saída valor de crista (V)	<i>Ripple</i> (V)	<i>Ripple</i> relativo(%)
4,7 k $\Omega$	25,2	4,46	17,70
10 k $\Omega$	28,4	2,36	8,31
100 k $\Omega$	32,8	0,27	0,83

Fonte: O próprio autor.

Conforme esperado, verificou-se um maior valor de *ripple* para a carga que demanda maior corrente do circuito, isto é, o resistor de 4,7 k $\Omega$ . Isso significa dizer que quanto maior o valor do resistor (quanto maior o valor da carga) menor será o *ripple* na saída e o valor da tensão será mais próximo do valor teórico.

#### 4 SIMULAÇÃO

As simulações a seguir foram realizadas no SIMULINK<sup>®</sup> com o objetivo de confirmar as considerações teóricas aprendidas e verificar o funcionamento dos circuitos apresentados. O SIMULINK<sup>®</sup> é uma ferramenta para modelagem, simulação e análise de sistemas dinâmicos. O software oferece alta integração com o ambiente do MATLAB<sup>®</sup>, sendo bastante útil para análises de circuitos eletrônicos e estudos de transitório. Por sua vez, o MATLAB<sup>®</sup> é uma plataforma computacional interativo de alta performance voltado para o cálculo numérico. Para utilizar o SIMULINK<sup>®</sup> deve-se:

- Escolher os elementos;
- Atribuir os parâmetros dos elementos;
- Especificar a duração da simulação (sendo possível alterar o passo de cálculo);
- Analisar os dados e/ou gráficos obtidos através do osciloscópio, voltímetro ou amperímetro que existem no próprio SIMULINK<sup>®</sup>.

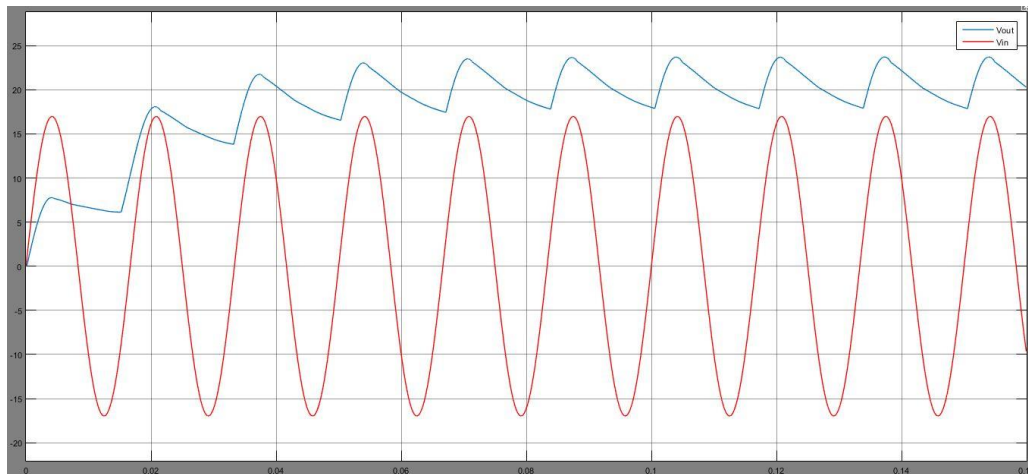
Para realizar uma simulação com as mesmas características do circuito montado, foi inserido uma tensão de entrada com valor de crista  $V_p = 12\sqrt{2}$  V, que é equivalente ao valor utilizado na montagem.

A princípio, o circuito de *Greinacher* foi simulado com os seguintes parâmetros:

- Fonte senoidal com 60 Hz e tensão de crista de  $12\sqrt{2}$  V;
- Capacitores  $C$  de 10  $\mu$ F;
- Resistor de carga  $R$  de 4,7 k $\Omega$ .

O resultado da primeira simulação pode ser visto no gráfico da Figura 9.

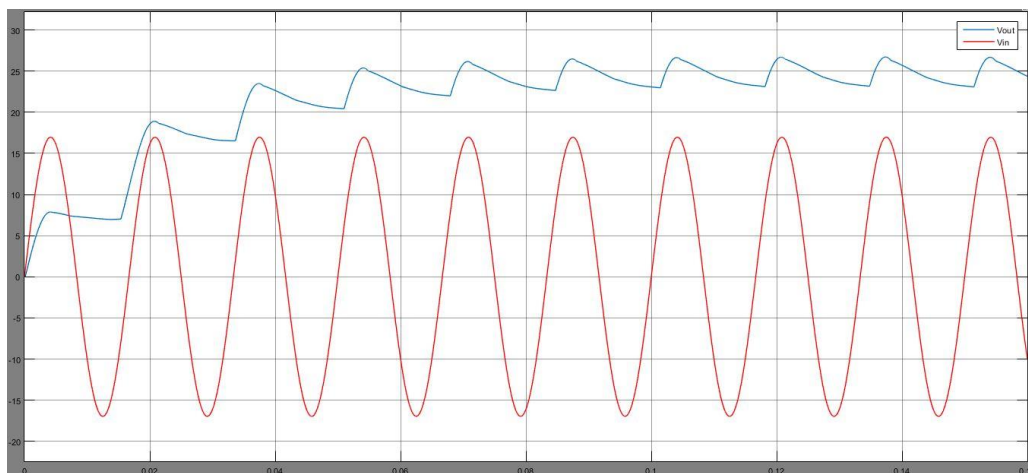
Figura 9: Tensões de entrada e saída no circuito de *Greinacher* para  $R = 4,7 \text{ k}\Omega$ .



Fonte: O próprio autor.

No gráfico da Figura 9, é possível observar o regime transitório, o regime permanente e a forma de onda na saída referente ao valor relativamente baixo de resistência da carga. As próximas simulações foram realizadas mantendo os parâmetros da fonte e dos capacitores, no entanto, o valor da resistência foi alterado para  $10 \text{ k}\Omega$  e, posteriormente, para  $100 \text{ k}\Omega$ . Os gráficos das simulações podem ser vistos nas Figuras 10 e 11, respectivamente.

Figura 10: Tensões de entrada e saída no circuito de *Greinacher* para  $R = 10 \text{ k}\Omega$ .

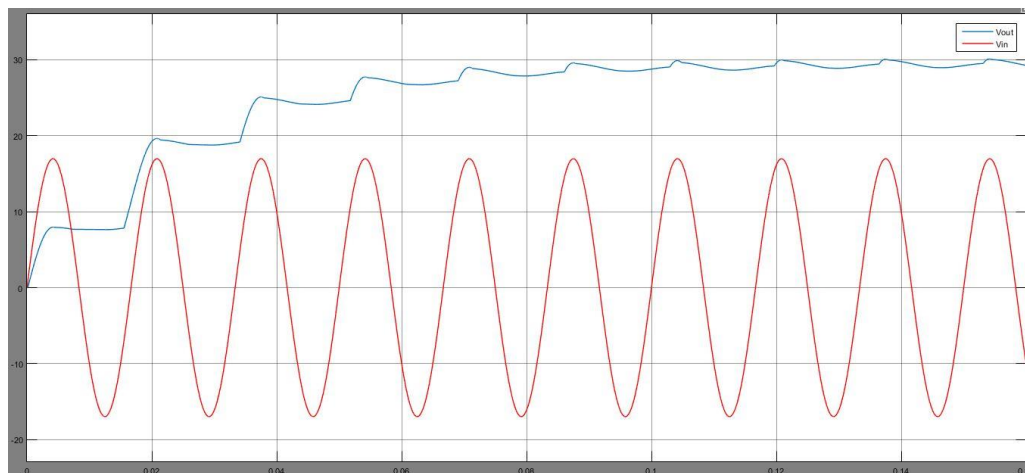


Fonte: O próprio autor.

Os resultados referentes aos desempenhos dos circuitos com as diferentes resistências podem ser facilmente resumidos na Tabela 3. Constatou-se que um acréscimo da resistência da carga implica tanto em um aumento no valor da tensão quanto em uma redução *ripple* da tensão na saída do circuito. O *ripple* foi calculado a partir da Equação (3).



Figura 11: Tensões de entrada e saída no circuito de *Greinacher* para  $R = 100 \text{ k}\Omega$ .



Fonte: O próprio autor.

Tabela 3: Resultados das simulações do circuito de *Greinacher*.

	Tensão de crista na saída (V)	<i>Ripple</i> (V)	<i>Ripple</i> relativo(%)
4,7 k $\Omega$	23,71	4,20	17,73
10 k $\Omega$	26,69	2,22	8,33
100 k $\Omega$	30,11	0,25	0,83

Fonte: O próprio autor.

Verificou-se que, conforme obtido do resultado experimental, as simulações foram próximas ao obtido com a implementação física do circuito. Ou seja, quanto maior foi o valor do resistor menor foi o *ripple* na saída e o valor da tensão foi mais próximo do valor teórico.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho descreveu a análise, em termos técnico e de aprendizado. O circuito multiplicador de tensão *Greinacher* foi utilizado, como exemplo. O foi dividido em três partes: o estudo de seu funcionamento teórico, a simulação computacional e a montagem experimental do circuito .

Em termos técnico pode afirmar que a partir da análise da simulação computacional e da montagem do experimento, pode-se inferir que o circuito multiplicador de tensão fornece um nível de tensão de saída que possui quase o dobro da tensão fornecida pela fonte, seu valor é muito próximo do valor esperado e é menor que o seu dobro devido aos elementos que compõem o circuito não serem ideais. Outra observação importante é quanto à influência da carga no valor de *ripple*, ou seja, quanto maior a carga, menor será a ondulação na saída do circuito, como já é esperado segundo a Equação (3). Além disso, os valores do *ripple* calculados por meio dos resultados experimentais e computacionais foram bastante próximos.

Em termos de aprendizagem pode afirmar que a partir os estudos teóricos, seguidos pelos estudos computacionais (simulações) e em seguida pela montagem experimental permitiu a materialização dos fundamentos teóricos no estudo de circuitos elétricos, mas também um ganho na familiarização e habilidade de montagens de circuitos, consolidando os conceitos e a formação do conhecimento. Além de ser uma ferramenta de auxílio didático simples e com baixo custo de execução.

A metodologia adota, do estudo teórico assimilado mais a utilização do ambiente computacional para simulação e da experimentação prática por meio da montagem em laboratório, constata a eficiência na aprendizagem dos alunos. *O circuito de Greinacher foi utilizado pois se caracteriza como um conceito de média complexidade quando abordado apenas por um professor com estudo exclusivamente teórico.*

#### **Agradecimentos**

Aos colegas do Grupo de Sistemas Elétricos (GSE) do Departamento de Engenharia Elétrica, onde este trabalho foi desenvolvido, pelo apoio e contribuição.

#### **REFERÊNCIAS**

ALVES, Caio Taulois. **Comparação de circuitos conversores de tensão para aplicação em sistemas coletores de energia sem fio**. 2016. Monografia – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2016.

KUFFEL, E.; ZAENGL, W. S.; KUFFEL, J. **High Voltage Engineering**. Londres. 2000.

### **USE OF PRACTICAL METHODOLOGY FOR UNDERSTANDING THE GREINACHER CIRCUIT**

**Abstract:** *The Greinacher circuit is a usual voltage multiplier used in electrical engineering to generate high voltage continuous in the laboratory, it allows obtaining a continuous output voltage whose value is an integral multiple of the peak value of the input voltage. However, the understanding of the behavior of this circuit becomes difficult when approached only theoretically in the classroom. The aim of this work was to perform a study of the Greinacher circuit by means of the theoretical study assimilated in the classroom, the computational simulation and the experimental setup of the low-voltage scheme, obtaining the waveform registers and evaluating the behavior of the voltage signals at the input and output of the circuit for different loads, as well as their loading on a transient basis. The experimental setup was performed and the circuit was implemented in simulations using SIMULINK® software. In addition, it was verified the efficiency of the students' learning about the operation and understanding of said electric circuit using the methodology adopted.*

**Keywords:** *DC voltage generation. Greinacher Circuit. Practical approach to teaching.*