

AMBIENTE COMPUTACIONAL PARA O ESTUDO E ANÁLISE DE CIRCUITOS MULTIPLICADORES DE TENSÃO

Jonathan Aguiar Esperidon – jonathan@pet.ufjf.br

Universidade Federal de Juiz de Fora, Faculdade de Engenharia, Departamento de Energia.
Rua Benjamin Constant, 790 – Centro
36016.400 – Juiz de Fora – Minas Gerais

Francisco José Gomes – chico@jfnet.com.br

Universidade Federal de Juiz de Fora, Faculdade de Engenharia, Departamento de Energia.
Rua Benjamin Constant, 790 – Centro
36016.400 – Juiz de Fora – Minas Gerais

***Resumo:** O trabalho tem como objeto circuitos não lineares, mais especificamente os multiplicadores de tensão, importantes componentes dos circuitos eletrônicos com tensões contínuas elevada. A relevância deste trabalho para o estudante de engenharia se justifica, uma vez que, devido à simplicidade destes circuitos e sua fácil aplicabilidade, se tornam muito úteis para a formação do futuro projetista. Para auxiliar no processo de aprendizagem e projeto foi desenvolvida uma ferramenta computacional com foco na análise de circuitos dobradores, triplicadores e quaduplicadores de tensão.*

A metodologia adotada para o desenvolvimento do ambiente gráfico possibilitou sua divisão em duas partes distintas. Na primeira parte o aluno tem acesso a textos explicativos com de estudos teóricos para as três topologias possíveis além de alguns resultados de simulações. Na segunda parte, o usuário pode definir os parâmetros da topologia do circuito escolhido tais como: valores de resistência, de capacitância e da amplitude e frequência da fonte de alimentação CA. Como resultado dessa etapa o usuário tem acesso a uma saída gráfica da tensão resultante. Além disto o programa mostra valores de tensão e de corrente nos componentes do circuito, os quais são úteis para o dimensionamento do multiplicador analisado.

O ambiente computacional desenvolvido pode ser utilizado como uma ferramenta de suporte didático para estudo e análise de circuitos não lineares nos cursos de engenharia elétrica e eletrônica.

***Palavras-chave:** Multiplicadores de tensão, Circuitos Não lineares, Análise, Ferramentas de Ensino, Ambiente Computacional Didático.*

1. INTRODUÇÃO

1.1 Considerações Iniciais

O desenvolvimento das técnicas de ensino nas áreas de engenharia, principalmente com a introdução do computador como ferramenta de apoio didático, presente em todas as etapas de um curso de graduação e, de maneira mais geral, no meio acadêmico, abre novas possibilidades e facilidades didáticas que não devem ser desprezadas pelos docentes e discentes. Estas possibilidades incluem o computador não somente como uma ferramenta de suporte didático, mas mesmo sua utilização como um ambiente de desenvolvimento para os alunos.

A relevância deste trabalho para o estudante de engenharia se justifica pela simplicidade destes circuitos e sua fácil aplicabilidade, tornando-se muito úteis para a formação do futuro projetista. Dependendo da finalidade, esses circuitos podem ser usados com eficácia em determinadas situações, em projetos conjuntos com os transformadores, principalmente em frequências mais elevadas, permitindo a utilização de soluções simples, eficazes e de menor custo, sem perda das especificações técnicas. Adicionalmente, esta análise possibilita ao aluno uma sólida base no manejo de circuitos não lineares e nas técnicas aplicáveis aos mesmos.

Contudo, apesar da importância destes circuitos, observa-se que a literatura dedica pouco espaço aos mesmos, bem como sua abordagem e aplicabilidade, via de regra, ocorre somente de forma mais superficial nos cursos de formação.

Assim sendo, propôs-se o presente projeto, que visa o desenvolvimento de ambiente computacional capaz de apresentar ao usuário, de forma direta, um grande conjunto de informações, que podem demonstrar o mecanismo de funcionamento dos circuitos multiplicadores de tensão além de trazer resultados e possibilidades de análise desses circuitos. Dentre os vários tipos de circuitos multiplicadores de tensão, o ambiente traz três configurações básicas: dobradores, triplicadores e quadruplicadores de tensão.

Todo o trabalho foi desenvolvido em linguagem orientada a objetos que permite a criação de ambientes de interfaces amigáveis ao usuário, facilitando o seu entendimento.

O trabalho está organizado como segue: a seção 2 traz os tipos de multiplicadores; a seção 3, os métodos matemáticos utilizados para a resolução dos circuitos e a seção 4, o ambiente gráfico desenvolvido. As conclusões finais deste trabalho são apresentadas na seção 5.

2. CIRCUITOS MULTIPLICADORES

2.1 Introdução

Nesta seção, serão tratados os três tipos de circuitos multiplicadores abordados no ambiente: dobradores, triplicadores e quadruplicadores. As características de cada um serão estudadas, além de sua operação, bem como o processo de multiplicar uma tensão por um determinado fator.

Um multiplicador de tensão é formado por dois ou mais retificadores de pico que produzem um tensão média CC igual a um múltiplo da tensão de pico, (V_p), da entrada, ou seja, $2V_p$, $3V_p$, $4V_p$, assim por diante. Estas fontes de alimentação são muito usadas em cargas de alta tensão (centenas de Volts ou mais) e baixa corrente como os tubos de raios catódicos. Essa é uma alternativa interessante ao uso de transformadores, os quais teriam grande volume e peso. Contudo, uma desvantagem que esses circuitos apresentam é o aumento do fator de ondulação da tensão de saída à medida que se aumenta o fator de multiplicação.

2.2 O Dobrador de tensão

Com um circuito dobrador de tensão, obtém-se uma tensão média de saída V_L igual ao valor da tensão de pico de um retificador monofásico de meia-onda. A Figura 1 apresenta a topologia básica de um circuito dobrador de tensão.

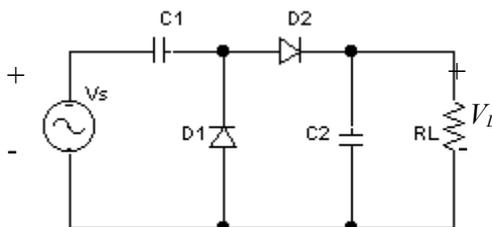


Figura 1 – Circuito dobrador de tensão.

O funcionamento deste circuito ocorre da seguinte forma: no pico do semi-ciclo negativo, D_1 está polarizado diretamente e D_2 reversamente. Idealmente, isto faz com que C_1 se carregue até a

tensão de pico V_p . No pico do semi-ciclo positivo, D_1 está com polarização reversa e D_2 polarizado diretamente. Pelo fato da fonte V_s e C_1 estarem em série, o capacitor C_2 tende a se carregar. Depois de vários ciclos, a tensão através de C_2 será igual a $2V_p$. É evidente que o capacitor C_2 é descarregado através do resistor de carga. Porém, R_1 deve ser suficientemente elevada para não descarregar totalmente o capacitor C_2 , e permitir que a tensão de saída cresça até $2V_p$ (idealmente).

O circuito é chamado dobrador de meia-onda porque o capacitor C_2 se carrega somente uma vez durante cada ciclo. Como resultado, a frequência de ondulação é a mesma frequência de oscilação da fonte CA.

2.3 O Triplicador de tensão

Caso a tensão necessária de alimentação de uma determinada carga seja maior que duas vezes a tensão da fonte, pode-se utilizar o circuito triplicador de tensão. Nessa topologia, o valor médio (V_{cc}) da tensão de saída é aproximadamente três vezes o valor de pico da tensão de entrada V_s . A Figura 2 mostra o circuito básico do triplicador de tensão.

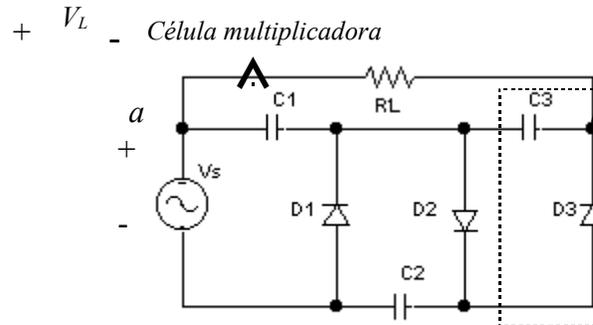


Figura 2 – Circuito triplicador de tensão.

Para a obtenção de um triplicador de tensão basta anexar outra célula multiplicadora a um dobrador, como mostrado na Figura 2. Para o entendimento do mecanismo do triplicador, parte-se da idéia que os dois primeiros retificadores de pico funcionam como um dobrador. No pico do semi-ciclo negativo, D_3 está polarizado diretamente, acarretando que C_3 seja carregado até $2V_p$. Sendo a tensão no capacitor C_1 igual a V_p , da mesma forma como apresentado para o dobrador de tensão, a tensão de saída V_L do triplicador é coletada através dos nós a e b .

2.4 O Quadruplicador de tensão

Finalmente, tem-se os circuitos quadruplicadores de tensão, onde o valor médio da tensão de saída V_L é aproximadamente quatro vezes o valor de pico da tensão de entrada. A Figura 3 exhibe a topologia estudada.

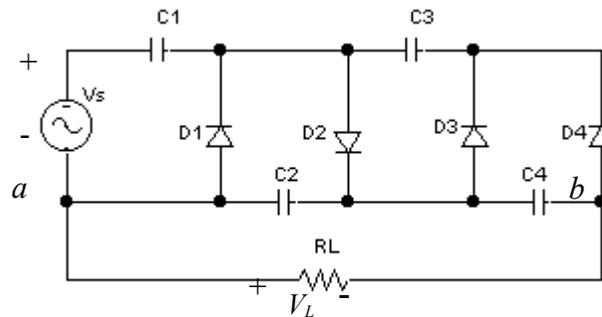


Figura 3 – Circuito quadruplicador de tensão.

Para formar um quadruplicador de tensão, são usados quatro retificadores de pico em cascata. Os três primeiros formam um triplicador, e o quarto completa o circuito do quadruplicador. O primeiro capacitor é carregado até a tensão V_p ; todos os outros carregam até $2V_p$. A saída do quadruplicador é pela ligação entre os nós a e b , que corresponde à soma das tensões sobre os capacitores C_2 e C_4 . Assim como feito para as topologias anteriormente apresentadas, é necessário um grande valor de resistência de carga para se ter uma saída aproximada de $4V_p$.

3. MODELAGEM DIGITAL DOS ELEMENTOS

3.1 Introdução

A análise transitória de circuitos não-lineares (e.g. diodos, transistores bipolares) exige o uso de modelagens matemáticas que representem às não-linearidades desses elementos. Logo, para a implementação de um algoritmo que permita simular esses circuitos digitalmente no tempo, foram utilizados o método de integração trapezoidal e o método de aproximação linear por partes (PWL).

Dessa forma, nesta seção será apresentada a modelagem digital dos elementos que compõem os circuitos multiplicadores de tensão. Será mostrado o circuito equivalente do dobrador de tensão, que é semelhante aos circuitos das outras topologias estudadas.

3.2 Método de integração Trapezoidal

Para o circuito dobrador da figura 1, a aplicação das Leis das Tensões de Kirchoff mostra que, devido a existência de dois capacitores, a equação que descreve o comportamento do circuito dobrador seria uma equação diferencial de segunda ordem, cuja solução pode ser analítica. Contudo, como o objetivo neste trabalho é implementar os circuitos multiplicadores digitalmente, e para as outras topologias a solução analítica torna-se mais complexa, é indicado o uso de métodos numéricos para solução das equações diferenciais, tendo-se optado pelo método de integração Trapezoidal, método implícito, ou seja, necessita de usar o valor da derivada do passo ATUAL para calcular a solução ATUAL.

Do ponto de vista numérico as equações diferenciais que caracterizam a tensão nos terminais da capacitância podem ser aproximadas por equações de diferenças, que dependem do algoritmo de integração numérica adotado, e modeladas por circuitos discretos equivalentes.

A Figura 4 mostra o modelo concentrado de um capacitor linear cuja equação diferencial que descreve seu comportamento conectado entre dois nós de um circuito é dada por:

$$i(t) = C \frac{dv(t)}{dt} \quad (1)$$

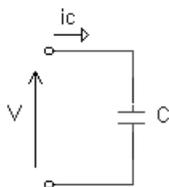


Fig. 4– Capacitor linear.

Agora usando a regra de integração trapezoidal para discretizar (1) no intervalo $(t-\Delta t)$ e t pode-se escrever:

$$v_n = v_{n-1} + \frac{\Delta t}{2} [f(v_n) + f(v_{n-1})] \quad (2)$$

Onde,

$$f(v_n) = \frac{dv_n}{dt} = \frac{i_n}{C} \quad (3)$$

$$f(v_{n-1}) = \frac{dv_{n-1}}{dt} = \frac{i_{n-1}}{C} \quad (4)$$

Substituindo (3) e (4) em (2), tem-se:

$$v_n = v_{n-1} + \frac{\Delta t}{2C} [i_n + i_{n-1}] \quad (5)$$

que resulta em :

$$i_n = \left(\frac{2C}{\Delta t}\right)v_n - \left(\frac{2C}{\Delta t}\right)v_{n-1} - i_{n-1} \quad (6)$$

Observa-se que $(2C/\Delta t)$, em (6), tem a dimensão de condutância (Siemens= $1/\Omega$). E ainda, o segundo termo pode ser visto como uma fonte de corrente que depende apenas de valores de tensão e corrente do passo de integração anterior. Desse modo, o capacitor linear pode ser representado por um circuito de acompanhamento obtido a partir de (6), mostrado na Figura 5.

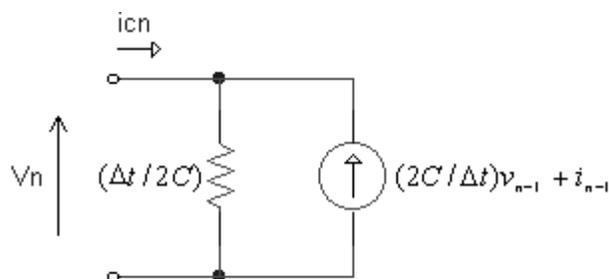


Figura 5 – Modelo de acompanhamento do capacitor linear.

3.3 Método de Aproximação Linear por Partes (PWL)

O método de aproximação linear por partes (PWL – do inglês *Piece Wise Linear*) é uma técnica que permite modelar elementos de características não-lineares. Essa técnica aproxima a característica real de tensão x corrente do elemento não-linear por uma curva linearizada. A Figura 6 mostra um esboço das características real e aproximada de um diodo. É possível observar da Figura 6 que esse método aproxima linearmente os trechos entre os pontos de quebra, que podem ser obtidos através de um ensaio para o levantamento da característica tensão x corrente do elemento a ser modelado.

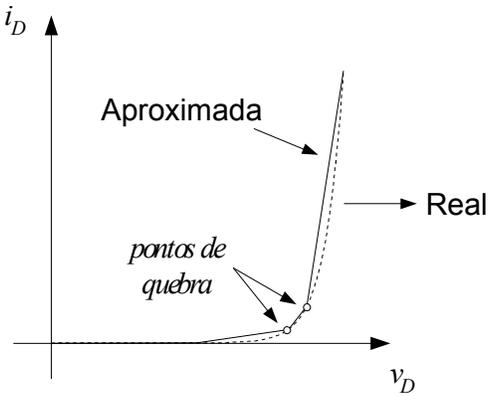


Figura 6 – Aproximação PWL.

Assim, ao aplicar-se este método pode-se resolver circuitos não-lineares com as leis clássicas de resolução de circuitos lineares.

Para o exemplo da Figura 6, a forma canônica PWL é escrita como:

$$i_D = a + b v_D + \sum_i^p c_i |v_D - v_k| \quad (7)$$

onde, i_D é a corrente pelo diodo; v_D é a tensão do de anodo para catodo; p o número de pontos de quebra, v_k é a tensão dos pontos de quebra; $i = 1, 2, 3, \dots$ a , b e c são parâmetros da aproximação PWL dados, respectivamente, por:

$$\begin{cases} a = i(0) - \sum_{k=1}^p c_k |v_k| \\ b = \frac{g_0 + g_p}{2} \\ c_j = \frac{c_j - c_{j-1}}{2} \end{cases} \quad (8)$$

onde $i(0)$ é a corrente correspondente ao primeiro ponto da curva aproximada e g_j é a inclinação entre os pontos de quebra $j-1$ e j ; expressa por:

$$g_j = \frac{i_{D_j} - i_{D_{j-1}}}{v_{D_j} - v_{D_{j-1}}} \quad (9)$$

Na solução de circuito com elementos não-lineares implica na solução de um sistema de equações não-lineares. Assim, neste trabalho foi usado o método numérico de Newton-Raphon. Logo, partindo de um valor inicial v_D^{K-1} , pode-se encontrar o valor mais próximo da solução para a corrente no diodo, por um processo iterativo. A solução na iteração K é dada por:

$$i_D^K = i_D^{K-1} + v_D^{K-1} \left. \frac{\partial i_D}{\partial v_D} \right|_{v_D^{K-1}} - v_D^K \left. \frac{\partial i_D}{\partial v_D} \right|_{v_D^K} \quad (10)$$

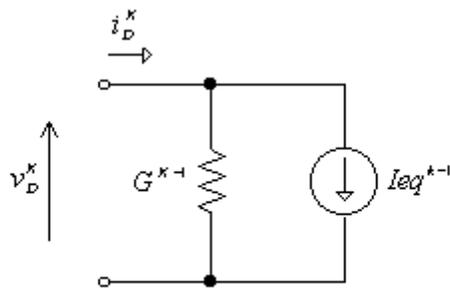


Figura 7 – Modelo equivalente do diodo obtido com o método de aproximação linear por partes PWL.

Dessa forma, é possível modelar o diodo como mostra a Figura 7:

Sendo,

$$I_{eq}^{k-1} = i_D^{k-1} + v_D^{k-1} \left. \frac{\partial i_D}{\partial v_D} \right|_{k-1} \quad (11)$$

e

$$G^{k-1} = \frac{\partial i_D}{\partial v_D} = b + \sum_{k=1}^p c_k \text{ sinal} \quad (12)$$

$|v_D - v_k|$

em que,

$$\text{sinal}|v_D - v_k| = \begin{cases} +1 & \text{se } v_D \geq v_k \\ -1 & \text{se } v_D < v_k \end{cases} \quad (13)$$

Substituindo os capacitores e os diodos da figura 1 por seus respectivos modelos equivalentes, desenvolvidos nesta seção, chega-se ao circuito resultante da figura 8.

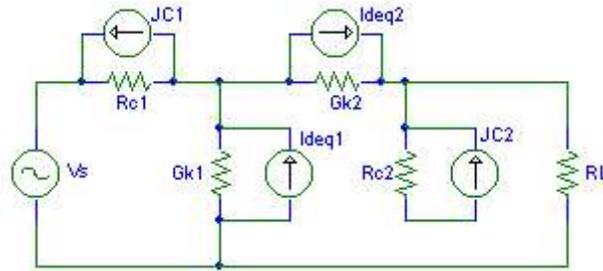


Figura 8 – Circuito equivalente do dobrador de tensão.

Onde,

$$Jc = \left(\frac{2C}{\Delta t} \right) v_{n-1} + i_{n-1} \quad (14)$$

$$Rc = \left(\frac{\Delta t}{2C} \right) \quad (15)$$

Na figura 8 tem-se ainda que G_k representa a equação 12 e I_{deq} a equação 11. Similarmente, é possível obter circuitos equivalentes para as outras topologias dos multiplicadores de tensão.

4. O AMBIENTE GRÁFICO DESENVOLVIDO

Como descrito na seção anterior, neste trabalho são abordados três tipos de multiplicadores de tensão: dobradores, triplicadores e quadruplicadores de tensão. Para essas topologias, o ambiente fornece duas interfaces gráficas principais, sendo uma de análise do e outra de estudo. Dentro da interface de estudo, o usuário tem acesso a uma outra interface denominada *Informações*, contendo dados do multiplicador selecionado.

O procedimento básico para a utilização do ambiente consiste nos seguintes passos:

- 1) Selecionar o tipo de multiplicador desejado na tela inicial do software;
- 2) Selecionado o multiplicador, optar entre as duas opções do software, análise ou estudo;
- 3) Análise: o usuário deverá fornecer os dados solicitados do circuito como valores dos resistores, de capacitores e da amplitude e frequência da fonte de alimentação CA e solicitar que o programa retorne os dados de saída;
- 4) Estudo: o ambiente trará uma série de informações a respeito do multiplicador selecionado bem como alguns resultados de simulações;

4.1 Exemplo de utilização

A figura 9 apresenta a tela inicial do programa. Nessa janela o usuário deverá selecionar uma das três opções existentes de tipos de multiplicadores de tensão. O exemplo abordado aqui será o do circuito dobrador de tensão.

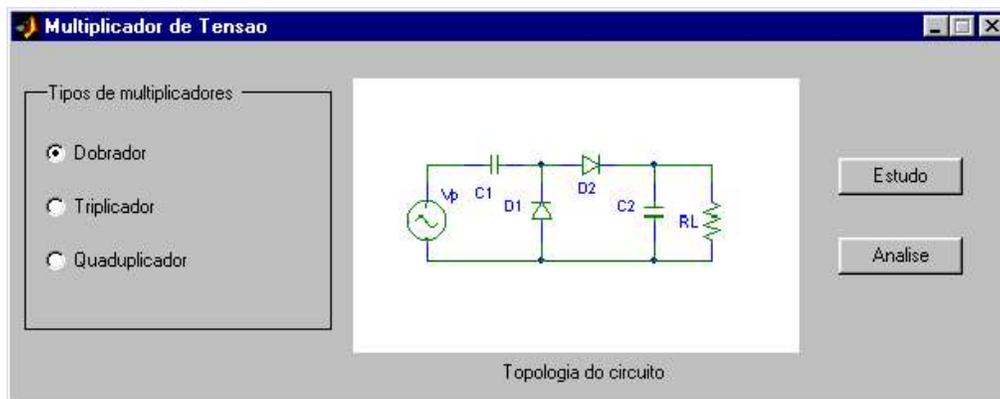


Figura 9 – Tela inicial do programa.

Ao selecionar o circuito dobrador de tensão e a opção Análise, a janela apresentada pela figura 10 é aberta. Para o exemplo, foram fornecidos os seguintes parâmetros de entrada: Amplitude da fonte: 10 Volts; Frequência da fonte: 60Hz; Valor da resistência de carga $R_L = 1.000\Omega$; Valor dos capacitores C_1 e C_2 : $460\mu F$. Neste caso, obteve-se a forma de onda da tensão sobre R_L , mostrada no gráfico a direita. Além deste, é possível obter todos os valores de tensão e corrente nos diodos, permitindo assim o dimensionamento dos mesmos.

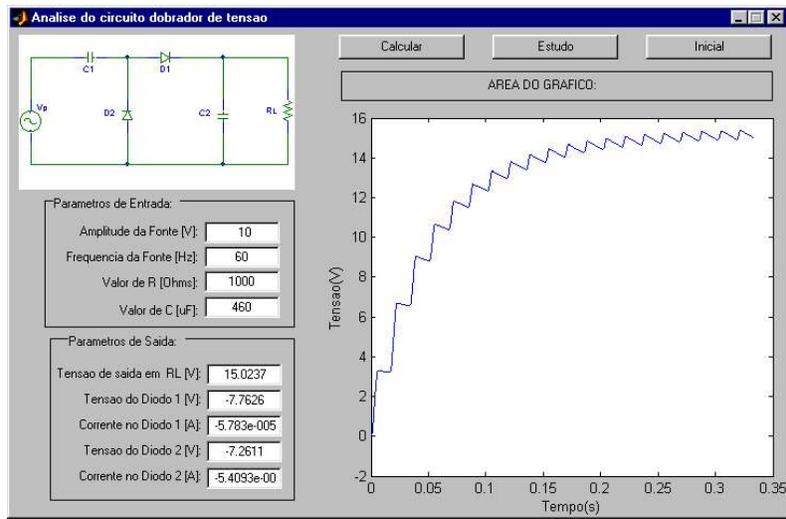


Figura 10 – Tela de análise do dobrador de tensão.

A figura 11 exibe a tela de estudo dos circuitos dobradores, onde são mostrados resultados de simulação do circuito dobrador Pspice. Além disso, a interface de estudo mostra ainda outras duas topologias possíveis, entre várias outras, de circuitos dobradores de tensão.

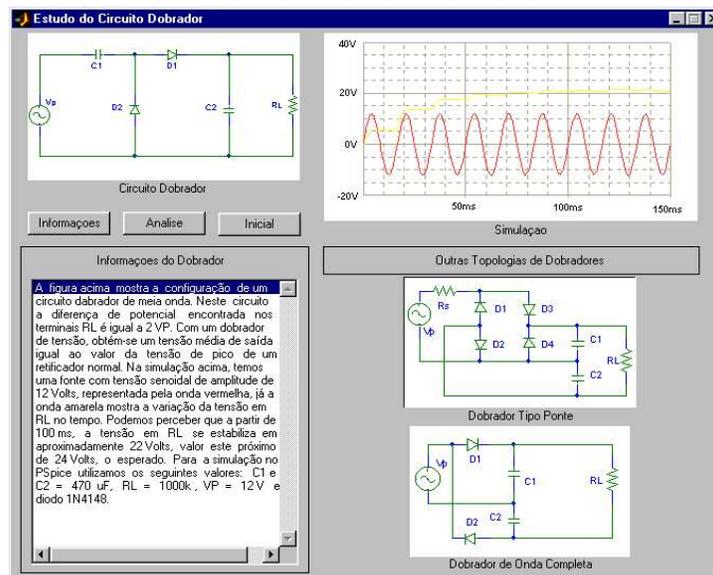


Figura 11 – Tela de estudo do dobrador de tensão.

Ainda na interface de estudo, o usuário tem acesso, através do botão *Informações*, a explicações do funcionamento dos circuitos multiplicadores de tensão. A Figura 12 apresenta a tela de *Informações* de circuitos dobradores de tensão.

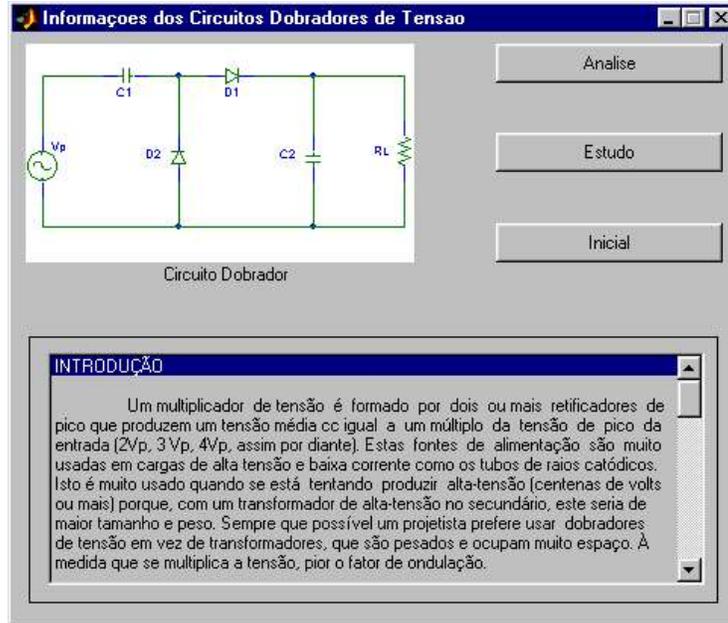


Fig. 12–Tela de informações do circuito dobrador de tensão.

5. CONCLUSÕES

O presente trabalho tratou do desenvolvimento de um ambiente gráfico para estudo e análise de circuitos multiplicadores de tensão. Este ambiente foi construído com o intuito de auxiliar no processo de ensino e aprendizagem, mais especificamente da área de Eletrônica. A relevância deste trabalho para o estudante de engenharia se justifica pela simplicidade destes circuitos e sua fácil aplicabilidade, tornando-se muito úteis para a formação do futuro projetista. Dependendo da finalidade, esses circuitos podem ser usados com eficácia em determinadas situações, em projetos conjuntos com os transformadores, principalmente em frequências mais elevadas, permitindo a utilização de soluções mais simples, eficazes e de menor custo, sem perda das especificações técnicas. Adicionalmente, o estudo destes circuitos possibilita ao aluno uma sólida base no manejo de circuitos não lineares e nas técnicas aplicáveis para análise dos mesmos.

O trabalho tratou de aspectos conceituais relativos ao equacionamento e modelagem dos circuitos multiplicadores de tensão em três configurações básicas: dobradores, triplicadores e quadruplicadores. Como produto tangível do trabalho, desenvolveu-se um ambiente de simulação com interfaces amigáveis ao usuário, facilitando sua utilização e apreensão dos conceitos e técnicas utilizadas.

A característica diferencial do ambiente é a união de uma ferramenta específica para a análise desses tipos de circuitos, com uma vasta gama de informações reunidas, o que na literatura não se encontra facilmente.

O ambiente desenvolvido apresenta-se de grande utilidade para estudos, síntese e desenvolvimento desses tipos de circuitos, haja vista a grande facilidade na utilização. Funciona também como uma poderosa ferramenta para auxílio no estudo dos circuitos não lineares, possibilitando aos usuários a realização de procedimentos, projetos e análise dos resultados destas topologias.

AGRADECIMENTOS

Ao Programa Especial de Treinamento – PET/SESu/UFJF – Engenharia Elétrica – e aos mestrandos Ricardo Lima Carletti e Luis Cláudio Gambôa Lopes pelo apoio.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BOYCE, W. E. & DIPRIMA, R. C. **Equações Diferenciais Elementares e Problemas de Valores de Contorno**. São Paulo: LTC, 1999.
- CLOSE, C. M.. **The Analysis of Linear Circuits**. New York: Harcourt Brace Jovanovich, 1967.
- MALVINO, A. P. **Eletrônica I**. São Paulo: McGraw-Hill, 1987
- BOYLESTAD, R., NASHELSKY, L., **Dispositivos eletrônicos e teoria de circuitos**. Rio de Janeiro: LTC, 1999

***Abstract:** This paper focuses on non-linear circuits, specifically the multiplier ones, important components in the area of high-voltage electronics. The importance of this work for the engineering student is self evident, for the simplicity and applicability of these components, and very useful in the future designer background. To help in the learning process a computational environment was developed, with emphasis on the design and analysis of doubling, tripling and quadrupling circuits.*

The computational environment has been divided into two segments: in the first one, the student can reach didactic texts for the three topologies utilized, together with some simulation results. For the second option, parameters related to distinct topologies can be chosen, like resistance and, capacitance value, besides amplitude and frequency of the input voltage.. As a results, the user can interacts with a graphical environment, were the output values of the circuit are displayed, allowing a correct specification of the analysed multiplier.

The proposed environment can be very useful as a didactic tool in the electric and electronic engineering courses.

***Key-words:** Voltage multipliers, Non linear circuits, Analysis, Didactic tool, Digital Environment*