



APLICAÇÃO DE TÉCNICAS DE MODELAGEM DE UM SISTEMA BIOLÓGICO NAS DISCIPLINAS DE INTRODUÇÃO À ANÁLISE DE CIRCUITOS ELÉTRICOS

Duaymy B. R. Góes – duaymy@gmail.com

Danielle L. Guedes – dani.lguedes@hotmail.com

Gabriela H. L. Farinha – gabi.farinha@hotmail.com

Rafael D. Santos – rafaderiggi@hotmail.com

Renan L. P. de Medeiros - renanlandau@yahoo.com.br

Rodrigo O. de Miranda - rodrigo_oliveirademiranda@yahoo.com.br

Orlando Fonseca Silva – orfosi@ufpa.br

Universidade Federal do Pará, Faculdade de Engenharia Elétrica

Rua Augusto Corrêa, 01 – Guamá

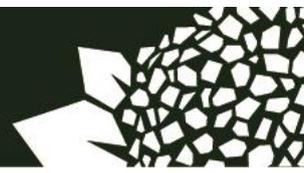
CEP 66075-110 – Belém – Pará

Resumo: *Este trabalho apresenta uma ferramenta didática que se propõe a incrementar o ensino das disciplinas introdutórias à teoria de circuitos elétricos com base na modelagem do Sistema Cardiovascular Humano (SCVH) por meio de componentes elétricos. Primeiramente, foram analisadas as equações matemáticas de um circuito equivalente de 3ª ordem do SCVH e a partir destas foi construído um diagrama de blocos para simulação do modelo em ambiente Simulink/MATLAB. Em seguida, foi desenvolvido um roteiro com simulações referentes aos mecanismos empregados na elaboração do diagrama. O roteiro foi aplicado em uma aula, assistida por acadêmicos do curso de Engenharia Elétrica, na qual se buscou explicar o comportamento dos componentes eletrônicos e das propriedades biológicas correspondentes com base nos resultados das simulações, bem como familiarizar os alunos com a ferramenta Simulink/MATLAB. A avaliação de desempenho da ferramenta foi feita por meio da análise, tanto dos sinais obtidos nas saídas dos circuitos, como dos questionários respondidos pelos estudantes após o término das atividades.*

Palavras-chave: *Circuitos Elétricos, Analogias Elétrico-Biológicas, Modelagem em Blocos, Simulink/MATLAB.*

1. INTRODUÇÃO

Uma das grandes barreiras que costuma surgir no processo de ensino-aprendizagem nas disciplinas teóricas da Engenharia é a aparente distância entre os conceitos trabalhados em sala de aula e suas aplicações práticas. A causa disso, muitas vezes, está na falta de recursos tecnológicos e ferramentas pedagógicas que permitam aproximá-las mais das aulas de laboratório. Neste sentido, os *softwares* de simulação podem ser de



fundamental importância para tornar mais claro o significado físico das ferramentas matemáticas vistas na teoria.

Uma maneira de melhorar o entendimento dos modelos matemáticos trabalhados nas disciplinas de circuitos elétricos é o uso de analogias entre sistemas físicos. Este recurso permite ao aluno fazer conexões com outras áreas do conhecimento, algumas delas de abstração mais acessível. E ainda, possibilita enxergar uma gama maior de aplicações práticas, uma vez que as equações matemáticas que relacionam as grandezas elétricas podem ser utilizadas para representar sistemas análogos de forma mais simplificada.

Um exemplo importante desta abordagem encontra-se na modelagem de sistemas biológicos, cujas propriedades físicas podem ser descritas a partir das relações constitutivas de componentes eletrônicos. Este princípio pode ser empregado para relacionar as variáveis associados ao fluxo de sangue no sistema cardiovascular humano (SCVH), que é o responsável pela circulação de nutrientes entre as células e cuja deficiência tem como efeito um elevado índice de óbitos.

Neste trabalho, desenvolveu-se um simulador didático em ambiente Simulink constituído de um diagrama de blocos baseado nas equações de um circuito equivalente de 3ª ordem do SCVH. Então, foi preparado um roteiro descrevendo o referencial teórico e os mecanismos utilizados na elaboração do simulador. O conteúdo do roteiro foi direcionado para reforçar alguns conceitos básicos da teoria de circuitos elétricos e fez-se sua aplicação numa aula, na qual se abordou a teoria juntamente com as simulações.

2. ANALOGIAS ELÉTRICO-BIOLÓGICAS

As características das grandezas elétricas permitem modelar o funcionamento básico do sistema cardiovascular por meio de um circuito elétrico equivalente. No modelo resultante, foi estabelecida uma equivalência entre carga elétrica e volume que permitiu representar o fluxo sanguíneo por meio da corrente elétrica, cuja intensidade passou a corresponder à vazão do sangue. Assim como em um circuito a existência de uma tensão ocasiona passagem de corrente, na circulação o sangue é forçado a fluir entre regiões de diferentes pressões. Devido a isso, o potencial elétrico foi utilizado para representar a pressão sanguínea de determinada região, de modo que uma tensão no circuito corresponde a uma diferença de pressão.

Sendo a viscosidade do sangue uma oposição ao fluxo sanguíneo que resulta na dissipação de energia térmica, de maneira análoga à resistência em relação à corrente elétrica, seu efeito foi modelado por meio de resistores. Ao considerar-se a passagem do sangue pelos capilares dos tecidos fez-se uso de um resistor variável, pois neste caso a atividade física influencia no valor da resistência. Já o efeito de elasticidade dos vasos e cavidades foi simulado através de capacitores por estes serem dispositivos armazenadores de carga. Quanto maior a capacitância, maior o volume de sangue armazenado para determinada pressão. Dessa forma, foi feita uma analogia entre a energia potencial elástica armazenada em uma câmara ou conduto sanguíneo com a energia potencial elétrica armazenada num capacitor.

Para haver maior proximidade entre o circuito e o sistema circulatório, fez-se o uso de diodos para exercerem o papel das válvulas, pois estes impedem o contra-fluxo da corrente elétrica, grandeza análoga à corrente sanguínea. Foram considerados, também, indutores como uma forma de modelar o efeito de inércia na circulação periférica, pois nesta situação a velocidade do sangue não pode sofrer grandes variações, assim como a

corrente em um indutor, cuja energia magnética armazenada representa a energia cinética do fluido sanguíneo. Com base nesta comparação, a indutância pode ser vista como a quantificação desta inércia.

3. CIRCUITO EQUIVALENTE DO SCVH

Se a modelagem objetivasse um alto nível de exatidão e detalhamento, seria necessária a utilização de um circuito de 11ª ordem. Para o propósito deste trabalho, no entanto, foi mais conveniente a criação de um modelo simplificado, o circuito de 3ª ordem mostrado na Figura 1. Este modelo dá ênfase ao bombeamento realizado pelo ventrículo esquerdo, o qual concentra a maior parte do trabalho cardíaco, e, por possuir três elementos armazenadores de carga, pode ser descrito matematicamente através de uma equação de diferencial de 3ª ordem. Seu dimensionamento teve como base as condições fisiológicas de uma pessoa saudável (WU *et al.*, 2007).

Os potenciais PVE, PA, PVc e PVp, representam as pressões sanguíneas, respectivamente, no ventrículo esquerdo, na artéria aorta, nas veias oriundas da circulação periférica (pressão venosa central) e nas veias pulmonares (pressão venosa pulmonar). As fontes de tensão FM e FP indicam, respectivamente, o aumento de pressão ocasionado pelo trabalho muscular e aquele ocorrido na circulação pulmonar, que faz PVp ser maior que PVc. Os resistores RV e RVE indicam, respectivamente, a viscosidade do sangue nas veias e na válvula aórtica. Já o resistor variável RPT indica a resistência periférica total, ou seja, a oposição ao fluxo existente nos tecidos, variável com a atividade física (CORDEIRO, 2010).

As válvulas aórtica e mitral estão sendo representadas no circuito pelos diodos DA e DM, respectivamente, impedindo que haja contra-fluxo de corrente. O capacitor CA indica a elasticidade da artéria aorta, enquanto CV indica a elasticidade das veias. A elasticidade do ventrículo esquerdo resume-se ao capacitor variável CVE, pois esta varia com o tempo dependendo da contração ou relaxamento da cavidade. A indutância L indica a inércia da circulação periférica, na qual o fluxo de sangue nunca é nulo (CORDEIRO, 2010).

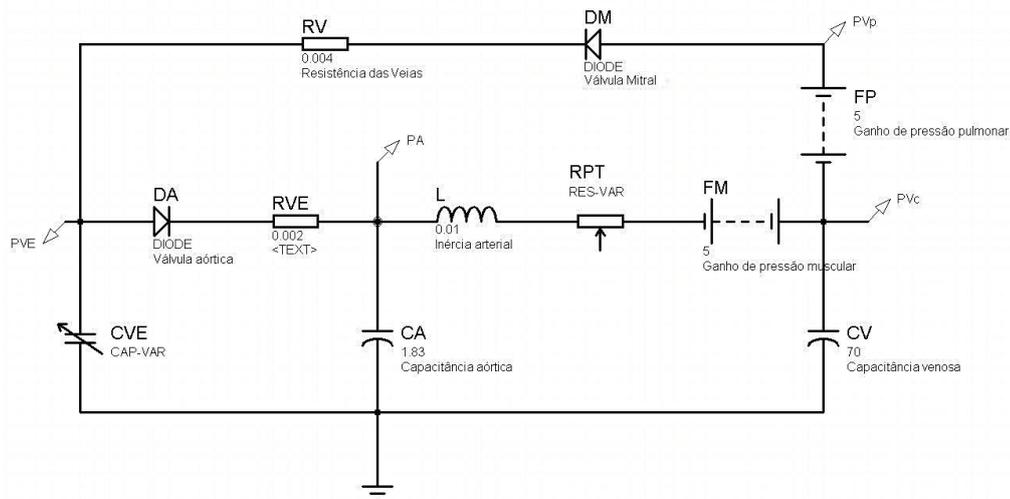


Figura 1: Desenho do circuito elétrico de 3ª ordem equivalente ao SCVH, feito no *software* PROTEUS

4. MODELAGEM DE CIRCUITOS EM BLOCOS

Um diagrama de blocos consiste de blocos operacionais interligados, que mostram a direção de fluxo e as operações sobre variáveis do sistema, estabelecendo uma relação entre a entrada e a saída (OGATA, 2010). O diagrama de um equipamento, ou sistema eletrônico, é uma representação das funções desempenhadas por cada componente, ou circuito, e do fluxo dos sinais dos quais se tem interesse e indica a inter-relação existente entre os vários circuitos. Combina a descrição puramente matemática do sistema através de equações, com a visualização proporcionada por um diagrama.

Cada bloco desempenha uma função ou um conjunto de funções e corresponde a um ou vários circuitos eletrônicos, sendo caracterizado por uma função de transferência (OGATA, 2010). Quando se analisa um bloco, têm-se interesse nas informações, que seriam sinais de tensão e corrente, presentes na sua entrada, na sua saída e na relação existente entre as mesmas.

O fluxo de variáveis do sistema de um bloco para outro é representado por uma linha. Apenas equações algébricas e operações de soma e multiplicação estão envolvidas nos blocos, por serem caracterizados por funções de transferência.

4.1. Elementos básicos dos Diagramas de Blocos

Os diagramas de bloco são constituídos basicamente de blocos associados à operação de multiplicação entre a entrada e a função de transferência do bloco, produzindo a saída, a somadores que fornecem como saída a soma algébrica dos sinais de entrada, e pontos de ramificação, onde o mesmo sinal se ramifica e é levado a pontos diferentes do diagrama.

Blocos

São associados à operação de multiplicação entre a entrada do bloco e a função de transferência correspondente ao bloco, produzindo a saída. Alguns exemplos são relações constitutivas de componentes eletrônicos (DORF, 2012). A equação (1) mostra esta relação para o resistor e é representada pelos blocos da figura 2. O capacitor é representado pela equação (2) e pela figura 3, enquanto o indutor o é pela equação (3) e pela figura 4.

$$i(t) = \frac{1}{R} \cdot v(t) \quad (1)$$



Figura 2: Diagramas de blocos para a resistência, quando a entrada é (a) tensão, e (b) corrente.

$$i(t) = C \cdot \frac{d}{dt} v(t) \quad (2)$$



Figura 3: Diagramas de blocos para a capacitância, quando a entrada é (a) tensão, e (b) corrente.

$$v(t) = L \cdot \frac{d}{dt} i(t) \quad (3)$$



Figura 4: Diagramas de blocos para a indutância, quando a entrada é (a) tensão, e (b) corrente.

Somadores, ou Pontos de Soma, e Pontos de Ramificação

Os somadores produzem como saída a soma algébrica dos sinais de entrada, como mostrado na figura 5(a), e representado na equação (4). Nos pontos de ramificação, o mesmo sinal se ramifica e é levado a pontos diferentes do diagrama, como mostrado na figura 5(b).

$$y(t) = x(t) - z(t) \quad (4)$$



Figura 5:(a) Somador. (b) Ponto de Ramificação.

Outros componentes

Embora estes componentes básicos sejam suficientes para descrever sistemas lineares, os diagramas de blocos também podem ser usados para descrever sistemas não-lineares. Neste caso blocos podem ser associados a não-linearidades e multiplicadores também podem estar presentes.

5. METODOLOGIA

A etapa inicial foi a elaboração de um diagrama de blocos no ambiente Simulink/MATLAB a partir das equações resultantes da análise do circuito de 3ª ordem equivalente ao SCVH. Para validação das analogias empregadas no modelo, a equação

constitutiva de cada componente utilizado foi representada em um diagrama separado, no qual foram observados os sinais de corrente e tensão. A resposta obtida para cada um deles foi comparada com as características da propriedade biológica análoga. Em seguida, o circuito completo foi construído através de dois subsistemas principais: um não-linear, com capacitor variável e diodos, representando o comportamento do ventrículo esquerdo, e outro linear, com três elementos armazenadores de energia, correspondente à circulação periférica. A parte não-linear fornece para a parte linear informações sobre fluxos de ejeção e enchimento (correntes nos diodos) e recebe desta os sinais de pressão atrial e aórtica (tensões nos nós de ligação), como mostrado na figura 6. O sinal de capacitância variável do ventrículo foi gerado em uma função já predefinida em (WU *et al.*, 2007). Os valores obtidos para as pressões e os fluxos de sangue foram comparados com o comportamento esperado para o SCVH.

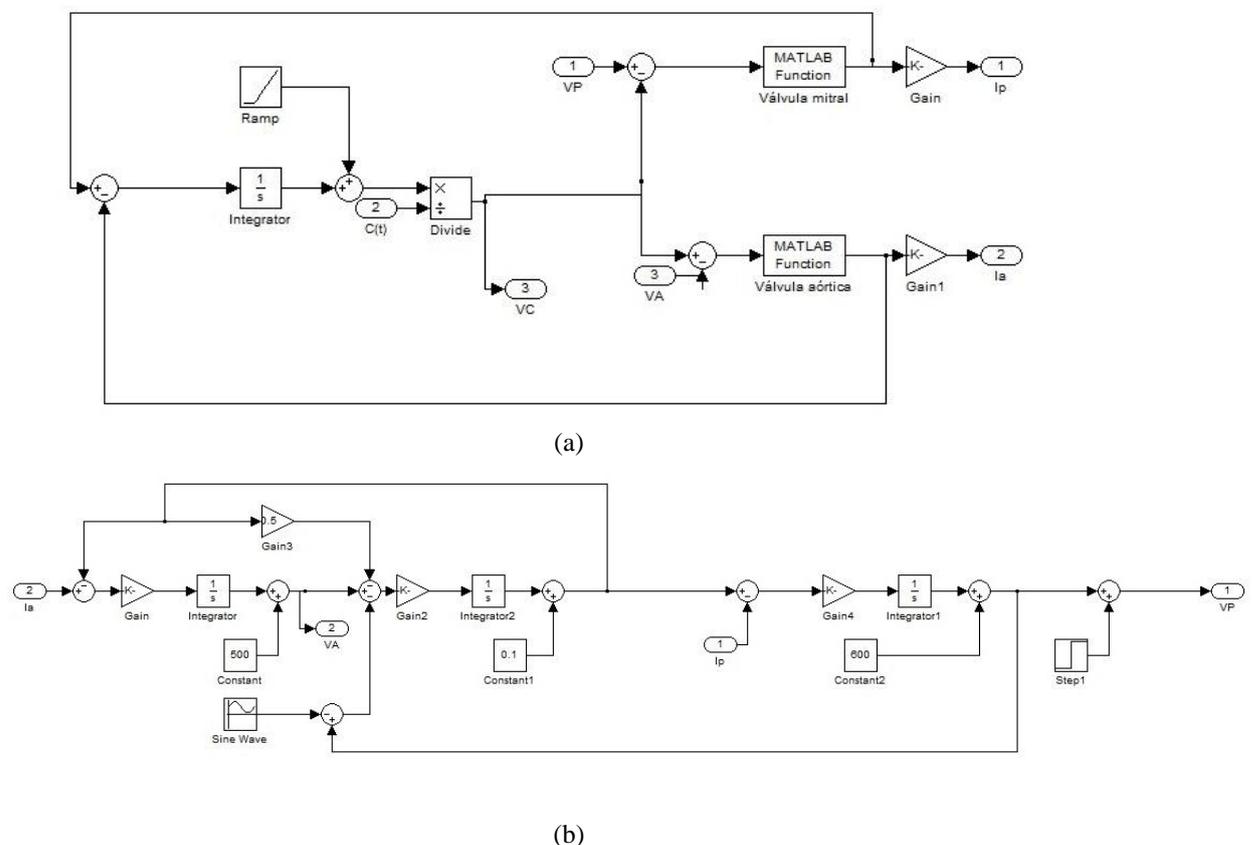


Figura 6: Diagrama de blocos do SVCH com subsistemas (a) não-linear e (b) linear.

A etapa seguinte foi a elaboração de um roteiro de aulas direcionando as ferramentas utilizadas na simulação para reforçar os conceitos da teoria de circuitos. Este roteiro faz uma introdução sobre o sistema cardiovascular humano, explanando sobre sua fisiologia básica, com enfoque na dinâmica ventricular. Tendo como base as analogias presentes neste modelo, foram propostas simulações em ambiente Simulink/MATLAB que permitissem ao aluno visualizar características físicas das seguintes propriedades biológicas: viscosidade do sangue, elasticidade dos vasos sanguíneos, inércia da circulação periférica, controle de fluxo pelas válvulas cardíacas e periodicidade do ciclo cardíaco.

A primeira simulação proposta foi referente à viscosidade sanguínea, representada eletricamente por resistores. Buscando-se mostrar a relação inversa desta com o fluxo de sangue, trabalhou-se com os dois circuitos mostrados na Figura 7, alimentados pela mesma tensão senoidal, mas de resistências diferentes. A comparação entre estas duas configurações deveria ser feita através do modelo da Figura 8. Foi utilizado o bloco *Gain*, da categoria *Math Operations* da biblioteca do Simulink/MATLAB, para representar o ganho de $1/R$ da tensão para a corrente.

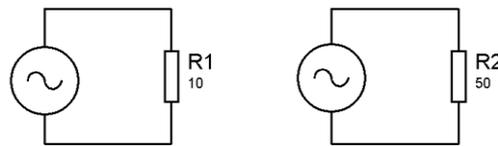


Figura 7: Circuitos com mesma entrada senoidal e resistências de 10Ω e 50Ω

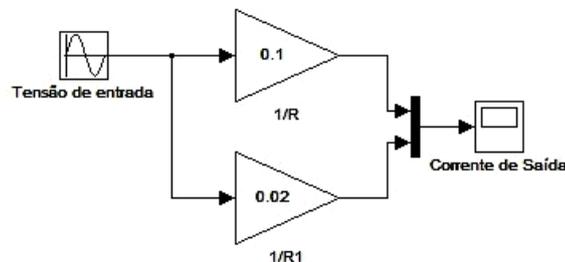


Figura 8: Representação dos dois circuitos num mesmo diagrama

Ao se tratar da elasticidade dos vasos sanguíneos, foi adotada a seguinte situação: o enchimento de um balão com líquido a partir de uma fonte de pressão constante, acionada por uma válvula. Em termos de grandezas elétricas, isto pode ser representado pelo circuito RC da Figura 9(a). Por outro lado, para simulação da inércia da circulação periférica foi proposto o circuito RL da Figura 9(b), cuja alimentação deveria ser ligada e desligada conforme a ejeção de sangue pelo coração. Os diagramas de blocos correspondentes, mostrados na Figura 10, utilizam o bloco *Integrator*, da categoria *Continuous*, para representar o armazenamento de energia, e o bloco *Sum*, de *Math Operations*, para representar as leis de Kirchoff.

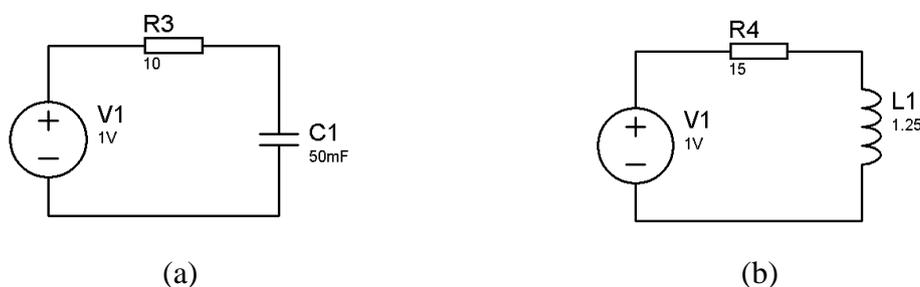
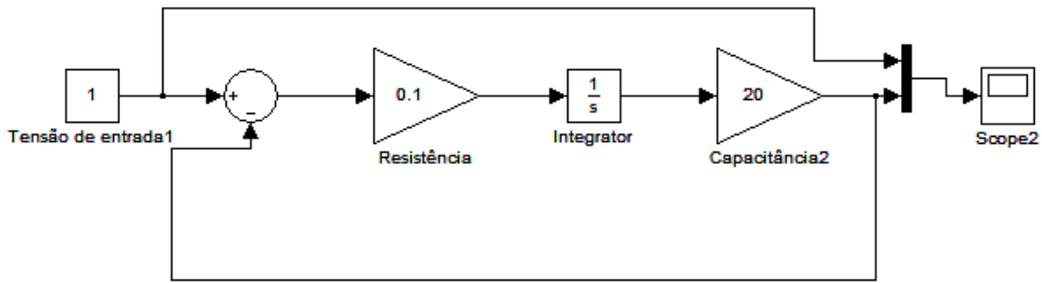
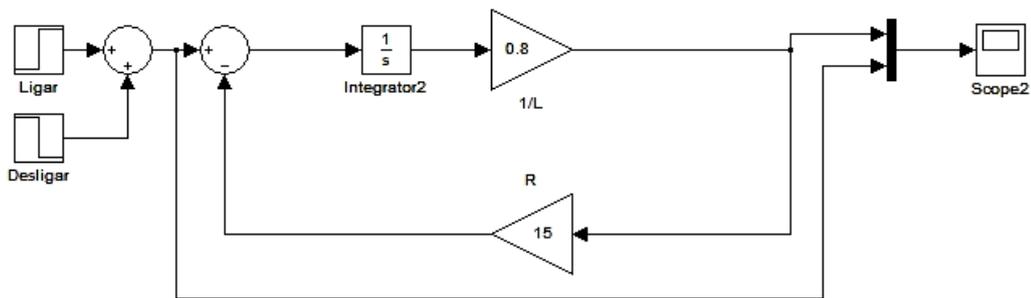


Figura 9: (a) Circuito com resistor e capacitor ligados em série. (b) Circuito com resistor e indutor em série.



(a)



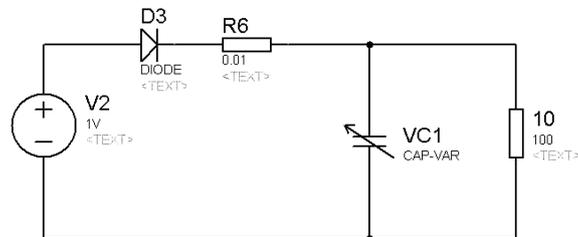
(b)

Figura 10: Diagramas em Simulink/MATLAB dos circuitos (a) resistor-capacitor e (b) resistor-indutor

O caráter unidirecional das válvulas cardíacas foi apresentado por meio de uma função matemática que descreve o comportamento retificador de um diodo, implementada conforme o código da Figura 11(a). Trabalhou-se, então, com o circuito da figura 11(b), no qual o capacitor variável é usado para observar as variações do ciclo cardíaco. A montagem do diagrama de blocos deste circuito (Figura 12) procedeu de forma análoga à de um linear, com as seguintes diferenças: o uso do bloco MATLAB *Function*, contendo a função criada para o diodo, e a substituição do ganho $1/C$ pela divisão por um sinal senoidal através do bloco *Divide*.

```
function u=diodo(x)
if x>0
u=x;
else
u=0;
end
return
```

(a)



(b)

Figura 11: (a) Função matemática da retificação do diodo. (b) Circuito com capacitor variável.

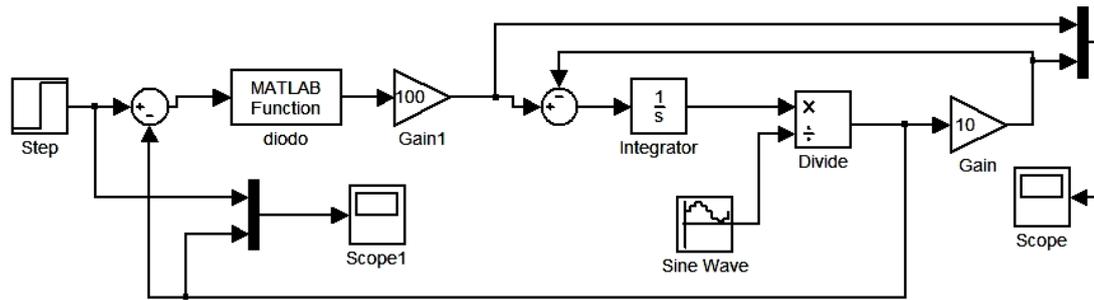


Figura 12: Diagrama de blocos do circuito da figura 11(b).

A aplicação do roteiro foi feita em uma aula complementar às disciplinas teóricas de Circuitos Elétricos para graduandos do curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Pará. Durante a aula, foram expostas as bases teóricas da modelagem proposta e posteriormente foram realizadas as simulações descritas no roteiro, sendo comparados os resultados destas com os esperados na teoria. Ao término das atividades, foram aplicados questionários para a coleta de dados, com perguntas a cerca das opiniões dos estudantes sobre os assuntos trabalhos e a abordagem empregada. Os dados coletados foram submetidos a uma análise qualitativa e quantitativa, baseada nas respostas do tipo sim ou não obtidas, assim como nas críticas e sugestões escritas por eles acerca da atividade.

6. RESULTADOS

6.1. Análise das Simulações

Nas simulações realizadas durante a aula, foi possível visualizar as propriedades biológicas modeladas por cada componente eletrônico. As formas de onda da Figura 13(a) referem-se às correntes de saída dos resistores submetidos a uma entrada senoidal. A análise de suas amplitudes deixa clara a relação inversa entre a viscosidade e o fluxo sanguíneo. Já a Figura 13(b) exhibe o sinal de tensão sobre o capacitor no circuito RC, que está de acordo com esperado para o exemplo abordado: conforme a diferença de pressão entre o balão e a fonte diminui, o fluxo de líquido desacelera até ser atingido um valor fixo de regime permanente. A partir do sinal de corrente da Figura 13(c), obtido para o circuito RL, observa-se a característica da inércia da circulação: continua existindo fluxo de sangue mesmo quando o diferencial de pressão é interrompido. Os resultados para o circuito com o capacitor variável e o diodo são as correntes da Figura 13(d), as quais evidenciam o caráter unidirecional das válvulas e a periodicidade cardíaca.

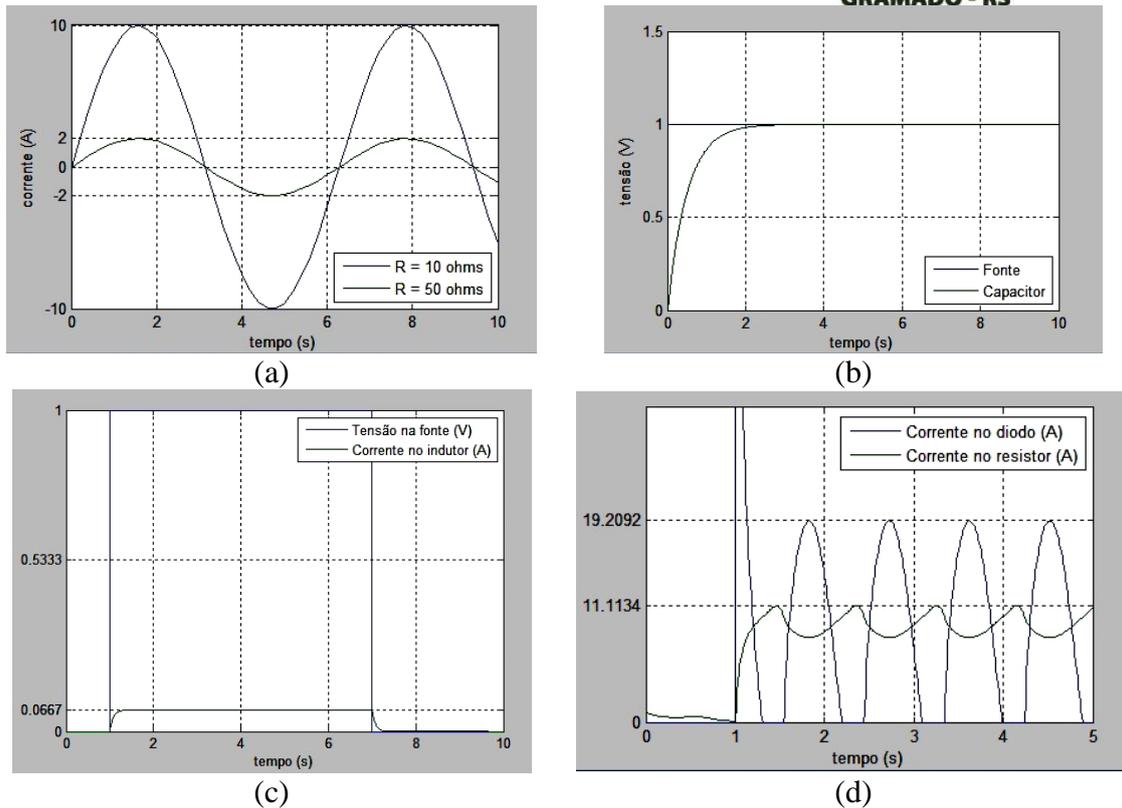


Figura 13: Resultados obtidos nos *Scopes* para os sinais (a) dos resistores, (b) circuito RC, (c) do circuito RL e (d) do circuito capacitor variável-resistores-diodo.

Os sinais obtidos no *Scope* para a simulação completa do circuito de 3ª ordem, mostrados na Figura 13, foram apresentados ao final da aula. Sua análise permitiu identificar as quatro etapas do ciclo cardíaco: relaxamento isovolumétrico, enchimento, contração isovolumétrica e ejeção.

6.2. Análise dos Questionários

As perguntas do questionário elaborado tinham como objetivo conhecer a opinião dos estudantes sobre a aula ministrada de Análise de Circuitos Elétricos, assim como analisar a compreensão referente à atividade proposta, além de avaliar o desempenho do ambiente de simulação MATLAB.

Na primeira pergunta, questionou-se sobre a afinidade dos discentes com as disciplinas de Análise de Circuitos Elétricos. Observou-se que 60% dos alunos tem afinidade com as disciplinas.

Na segunda e terceira pergunta, questionou-se sobre a dificuldade em realizar uma conexão entre o conteúdo e a modelagem apresentada e ainda, se houve alguma dificuldade em operar o simulador dos circuitos que constituem o modelo. As respostas obtidas foram unânimes, 100% afirmou que não sentiu qualquer dificuldade em associar o conteúdo ministrado com a modelagem proposta ou em operar o simulador.

Indagou-se ainda se a experiência de inclusão de um sistema biológico nas aulas ajudaria a reforçar os conhecimentos teóricos da disciplina de Análise de Circuitos Elétricos. A maioria afirmou que a experiência foi uma abordagem nova, porém muito válida e que ajudou a fortalecer o entendimento da disciplina, pois a utilização da

analogia entre o circuito elétrico e o sistema biológico, possibilitou uma melhor interpretação das variáveis presentes nos circuitos.

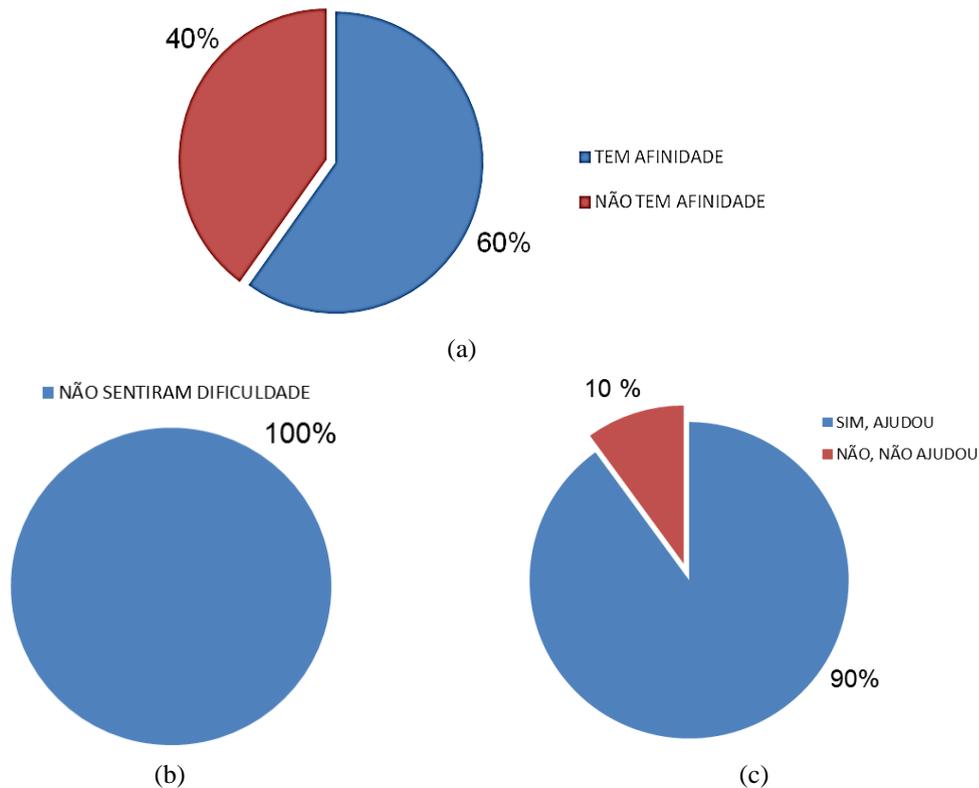
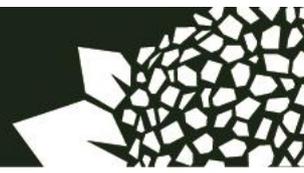


Figura 14:(a) Afinação com as disciplinas de Análise de Circuitos Elétricos. (b) Dificuldade em realizar uma conexão entre o conteúdo e a modelagem e em operar o simulador. (c) Efeito da inclusão de um Sistema Biológico nas aulas em ajudar a reforçar os conceitos teóricos das disciplinas de Análise de Circuitos Elétricos

Sobre a metodologia da aula ministrada, foi unânime que as explicações teóricas, tais como as analogias e o material utilizado foram transmitidos de forma bem didática. Mesmo que alguns alunos tenham sentido alguma dificuldade, os mesmos atribuíram o fato ao pouco conhecimento acerca do assunto. Por fim, todos concordaram que a utilização da ferramenta de simulação Simulink/MATLAB, os diagramas dos circuitos e seus desenvolvimentos foram essenciais para a compreensão e que todos foram explicados minuciosamente, cumprindo assim o objetivo de consolidar os conhecimentos acerca das disciplinas de Análise de Circuitos Elétricos.

7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir dos resultados obtidos nas simulações através da ferramenta Simulink/MATLAB, constatou-se que estes permitiram visualizar as propriedades biológicas e compreender o significado e funcionamento dos elementos do circuito elétrico. A utilização de um modelo de circuito de 3ª ordem, bem como o recurso da comparação elétrico-biológica, tornou o assunto mais didático e de aprendizagem acessível. Isto pode ser verificado nos resultados dos questionários, que mostram



claramente a eficiência do trabalho realizado. Esses recursos — Simulink/MATLAB, comparação elétrico-biológica — auxiliam tanto na compreensão do aluno, como no seu incentivo à aprendizagem de uma disciplina considerada, em grande parte, matematicamente abstrata, que é a Análise de Circuitos Elétricos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

CORDEIRO, Tiago; UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ, Instituto de Tecnologia. Desenvolvimento e Validação de um Modelo em Espaço de Estados para Estudos de Simulação e de Controle do Sistema Cardiovascular na Presença de um Dispositivo Auxiliar do Tipo Coração Artificial, 2010. Dissertação (Mestrado).

DORF, Richard C., SVOBODA, James A. Introdução aos Circuitos Elétricos. 8^a. Ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012. 816 p, il.

OGATA, Katsukiho. Engenharia de Controle Moderno. 5^a. Ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2010. 809 p, il.

WU, Y., ALLAIRE, P. E., TAO, G., FELLOW, IEEE, OLSEN, D. Modeling, Estimation, and Control of Human Circulatory System With a Left Ventricular Assist Device. IEEE Transaction on Control Systems Technology, Trieste, v. 15, n. 4, 2007.

APPLICATION OF MODELING TECHNIQUES FROM A BIOLOGICAL SYSTEM IN DISCIPLINAS OF INTRODUCTION TO ANALYSIS OF ELECTRICAL CIRCUITS

Abstract: *This paper presents a didactic tool that aims to increase the teaching of introductory courses to the theory of electric circuits based on modeling the Human Cardiovascular System (HCS) by means of electrical components. First, it was analyzed the third order equations of an equivalent circuit of HCS and from these it was built the block diagram for model simulation in Simulink/MATLAB. Then, a script was developed with simulations regarding mechanisms employed in the preparation of the diagram. The script was used on a class, assisted by academics of the electrical engineering course, which aimed to explain the behavior of electronic components and the corresponding biological properties based on the results of the simulations, as well as familiarize students with the Simulink/MATLAB. The performance evaluation of the tool was done by analyzing the signals from the outputs of the circuits and the questionnaires answered by the students after the completion of the activities.*

Key-words: *Electrical Circuits, Electric-biological Analogies, Block Modeling, Simulink/MATLAB.*