

## Laboratório de Eletrônica – 2018/02

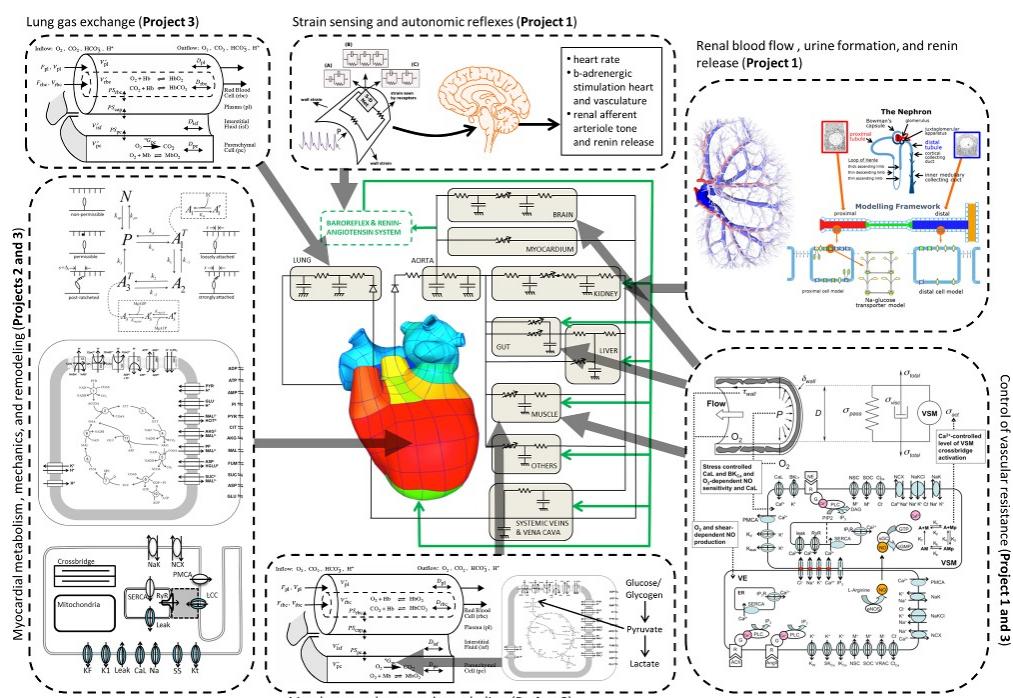
### Experiência Nº 03: Modelamento elétrico simplificado do sistema cardiovascular

#### I - Objetivos

O objetivo deste experimento é a simulação do sistema cardiovascular por meio de um modelo elétrico simplificado, que procura modelar o comportamento das veias, artérias, válvulas cardíacas e da pulsação do coração. O sistema cardiovascular é responsável por transportar oxigênio, gás carbônico e nutrientes a todos os tecidos no corpo humano. Para a simulação computacional deste modelo, pode-se utilizar o programa PSpice, LTSpice ou um outro simulador de sua preferência.

Pretende-se com este experimento mostrar uma aplicação prática de diodos. No modelo a ser implementado, diodos simulam o comportamento de válvulas cardíacas, no sentido de permitir passagem de fluxo sanguíneo (modelado pela corrente do circuito elétrico) em uma única direção.

Modelos deste tipo ajudam no entendimento do funcionamento do sistema cardiovascular. Um exemplo, dentre vários, de modelos matemáticos e elétricos aplicados à fisiologia pode ser visto no projeto "Cardiovascular Systems Dynamics and the Etiology of Hypertension", disponível em: <http://virtualrat.org/research-projects/cardiovascular-systems-dynamics-etiology-hypertension>. Neste projeto, são modelados o funcionamento de diferentes partes do sistema cardiovascular, para ajudar a entender a regulação da pressão arterial por este sistema, com o objetivo de melhor entender as causas e consequências da hipertensão arterial. A figura 1 ilustra os diferentes sistemas simulados neste projeto.



**Figura 1: Os diferentes sub-sistemas modelados no projeto "Cardiovascular Systems Dynamics and the Etiology of Hypertension"<sup>1</sup>.**

<sup>1</sup> FONTE: <http://virtualrat.org/research-projects/cardiovascular-systems-dynamics-etiology-hypertension>

---

Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Campus Universitário Darcy Ribeiro, Gleba A, Avenida L3 Norte, CEP 70.910-900, Brasília - DF  
Caixa postal 4386, fone +55 61 3307 2300, fone/fax +55 61 3273 8893, ftd@unb.br, www.ft.unb.br

No presente experimento, o objetivo é implementar um modelamento mais simples. O modelo implementado está baseado naqueles explicados nas seguintes referências:

1. Mossa, Hassanain Ali Lafta Mossa. “Engineering Modeling of Human Cardiovascular System”. 1<sup>st</sup> International Conference of Eng. Sci. NUCEJ Spatial ISSUE, vol. 11, no. 2, Proceedings, 2008. pp. 307-314. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/268015735>. (Há um link direto na página do curso para este artigo, no item “Resources” → link “Resources” → seção “Recursos Gerais” (ao final da página) ).
2. Mirzaee, Mohammad Reza, et. al. “Simulating of human cardiovascular system and blood vessel obstruction using lumped method”. World Academy of Science, Engineering and Technology, 2008, vol. 41. Disponível em: <http://citeserx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.193.2407&rep=rep1&type=pdf> (Há um link direto na página do curso para este artigo, no item “Resources” → link “Resources” → seção “Recursos Gerais” (ao final da página) ).

Para o pré-relatório, serão feitas perguntas relativas às fontes acima, assim como à seguinte aula do prof. Adson Rocha, do ENE/UnB, no YouTube:

3. **O coração como bomba (hidráulica)**, do professor Adson Rocha. Esta aula explica conceitos importantes utilizados nos modelos dos artigos acima como válvula unidirecional, circulação pulmonar, circulação periférica ou sistêmica, etc. Disponível em: <[https://youtu.be/yhnFyU\\_M-uQ](https://youtu.be/yhnFyU_M-uQ)>.

## II – Preparação para o laboratório

**Sugestão de leitura prévia:** Para responder às perguntas propostas, as três referências listadas acima serão fundamentais. Pode-se, no entanto, consultar outras fontes (biblioteca, internet etc) sempre que necessário. Lembrem-se de citar todas as fontes consultadas para a elaboração do pré-relatório, incluindo as fontes acima.

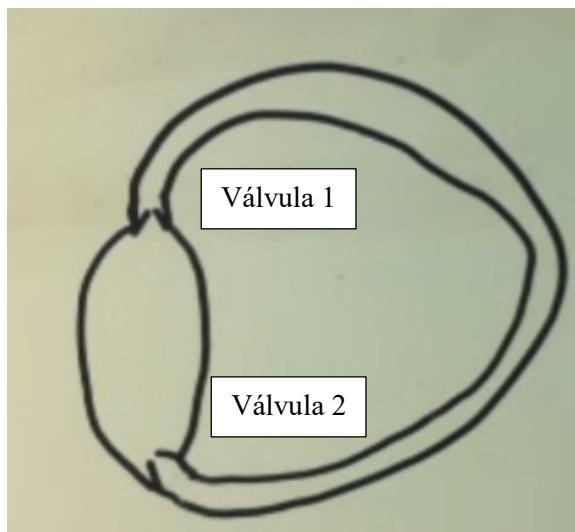
### Pré-relatório - INDIVIDUAL

O pré-relatório consistirá na resposta a perguntas propostas ao longo do texto. Suas respostas serão baseadas nas leituras e na aula acima listadas e em outras fontes que encontrarem, **mas não devem ser diretamente copiadas de nenhuma fonte**. Isso é considerado plágio e é muito sério:  
<https://sites.google.com/site/labcircuitos1unb/classroom-news/introducaoteoricacuidadocomplagio>).

## O coração como bomba (hidráulica)

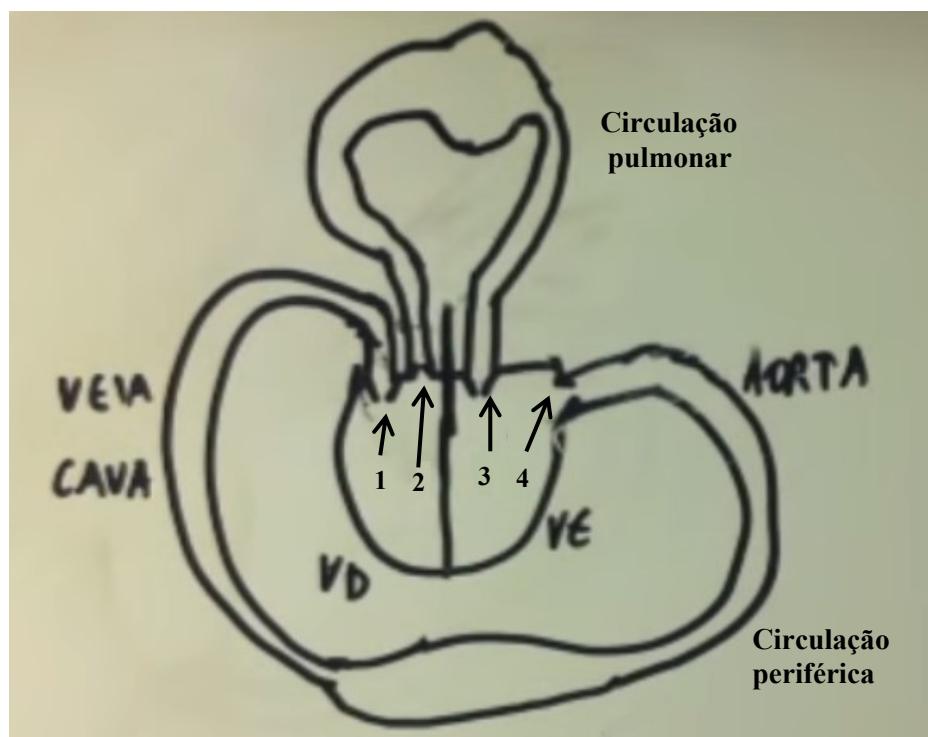
Responda às seguintes perguntas com base na aula do prof. Adson Rocha listada acima:

- (2,0 pts) O prof. Adson Rocha, em sua aula a respeito do coração como uma bomba, explica o conceito de uma bomba de dois tempos a partir do modelo simplificado da Figura 2 abaixo. Descreva, de modo resumido, com suas próprias palavras, o que entendeu da explicação do professor nessa aula sobre como funciona uma bomba de dois tempos, no contexto mostrado na aula. Inclua, obrigatoriamente, em sua resposta os seguintes termos, em qualquer ordem: bexiga, modelo do coração, válvula 1, válvula 2, elasticidade, expansão, pressão, pressionar (ou apertar) a bomba, sistema em equilíbrio, força elástica, soltar a bexiga, sistema circulatório, circulação unidirecional, bomba de dois tempos. As válvulas 1 e 2 são as válvulas superior e inferior, respectivamente, como ilustrado na Figura 2 abaixo. Não serão aceitas simples listagens dos termos obrigatórios. Eles devem estar em contexto, divididos entre diferentes frases que expliquem a questão solicitada.



**Figura 2: Modelo do coração como uma bomba de dois tempos (vide aula do prof. Adson listada no início deste roteiro). As válvulas 1 e 2 são as válvulas superior e inferior, respectivamente, como ilustrado na figura. A figura é uma captura do desenho do prof. Adson durante sua aula.**

- (2,0 pt) Assista à aula do prof. Adson Rocha e explique, de modo resumido, com suas próprias palavras, a trajetória do sangue a partir do momento que ele chega pela veia cava. Observe que a veia cava é a que traz o sangue venoso (“pobre” em oxigênio) do restante do corpo de volta ao coração, para ser oxigenado nos pulmões. Inclua, obrigatoriamente, em sua resposta os seguintes termos, em qualquer ordem: átrio direito, válvula 1, válvula 2, válvula 3, válvula 4, ventrículo direito, artéria pulmonar, pulmões, átrio esquerdo, circulação unidirecional, ventrículo esquerdo, aorta, bombas de dois tempos. A numeração 1, 2, 3 e 4 para as válvulas estão indicadas na Figura 3 abaixo. Não serão aceitas simples listagens dos termos obrigatórios. Eles devem estar em contexto, divididos entre diferentes frases que expliquem a questão solicitada.



**Figura 3: Modelo do coração como duas bombas de dois tempos (vide aula do prof. Adson listada no início deste roteiro).** As válvulas estão indicadas pelos números 1, 2, 3 e 4. A figura é uma captura do desenho do prof. Adson durante sua aula.

3. (2,0 pt) Na aula, o prof. Adson Rocha explica que o coração funciona como duas bombas de dois tempos funcionando em paralelo. Explique, de modo resumido, com suas próprias palavras, o que entendeu da explicação do prof. Adson sobre isso. Comece do ponto em que ele explica o que acontece ao se apertar ao mesmo tempo as duas bombas (representando os dois ventrículos) e depois soltá-las. Inclua, obrigatoriamente, em sua resposta os seguintes termos, em qualquer ordem: pressão, vasos elásticos, válvula 1, válvula 2, válvula 3, válvula 4, ventrículo esquerdo, ventrículo direito, energia elástica, armazenamento, diferença de pressão, circulação unidirecional, contração, relaxamento, bombeado, expansão, armazenamento, abertura/fechamento da válvula (1, 2, 3 ou 4), aumento da pressão, diminuição da pressão, circulação pulmonar, circulação periférica. Não serão aceitas simples listagens dos termos obrigatórios. Eles devem estar em contexto, divididos entre diferentes frases que expliquem a questão solicitada.

Consulte agora o artigo “Engineering modeling of human cardiovascular system”, de Hassanain Mossa, listado no início deste roteiro, e responda às seguintes perguntas:

4. (2,0 pt) Quais componentes do circuito elétrico da figura 3 do artigo (reproduzido na Figura 4 deste roteiro) estão representando: (a) o ventrículo esquerdo; (b) o ventrículo direito; (c) o átrio direito; (d) o átrio esquerdo; (e) a válvula 1 indicada na Figura 3 acima; (f) a válvula 2 indicada na Figura 3 acima; (g) a válvula 3 indicada na Figura 3 acima; (h) a válvula 4 indicada na Figura 3 acima? Deixe claro também em cada resposta que componente elétrico está sendo representado em cada caso, se é um resistor, uma capacitância (que representa a propriedade de complacência, relacionada à distensibilidade do vaso sanguíneo), uma indutância (que representa a inertância no deslocamento do fluxo sanguíneo), uma fonte ou um diodo.

Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Campus Universitário Darcy Ribeiro, Gleba A, Avenida L3 Norte, CEP 70.910-900, Brasília - DF  
Caixa postal 4386, fone +55 61 3307 2300, fone/fax +55 61 3273 8893, ftd@unb.br, www.ft.unb.br

5. (1,5 pt) Ainda com base na figura 3 do artigo do Mossa (2008), reproduzido na Figura 4 deste roteiro, responda os seguintes itens: (a) Qual parte do sistema cardiovascular está sendo representado pelas duas fontes variáveis? (b) Quais componentes elétricos do modelo estão participando da circulação pulmonar, como mostrado na Figura 3 referente à aula do prof. Adson? (c) Quais componentes elétricos do modelo estão participando da circulação periférica ou sistêmica, como mostrado na Figura 3 referente à aula do prof. Adson? Explique sucintamente cada resposta, com base na leitura do artigo.
6. (0,5 pt) Inclua as referências bibliográficas utilizadas no formato ABNT.

Traga para o laboratório **os dois artigos** listados acima, pois serão feitas referências a eles na montagem em laboratório.

Se possível, traga também ao laboratório o seu **notebook** com o simulador escolhido instalado. Sugiro fazer testes em casa com o circuito a ser simulado para ter certeza que o seu simulador está funcionando corretamente.

O experimento no laboratório será a simulação, em PSpice ou similar, do circuito elétrico ilustrado na figura 3 do artigo do Mossa (2008), reproduzido na Figura 4 do Procedimento Experimental.

O artigo do Mirzaee (2008) será consultado para comparar os gráficos simulados obtidos no laboratório com a figura 9 do artigo.

Lembrem-se: o pré-relatório é individual. Questões respondidas “em grupo” terão sua pontuação devidamente descontadas.

As respostas a estas perguntas devem ser enviadas ao professor de laboratório por email, em arquivo **pdf**, com nome, matrícula, data, e título do experimento, com o enunciado das perguntas, além de suas respostas, até as 23:59 do dia imediatamente anterior ao primeiro dia deste experimento.

Pré-relatórios não recebidos até este prazo terão desconto de 2 pontos por dia de atraso.

### Laboratório de Eletrônica

#### **Experiência Nº 03: Modelamento elétrico simplificado do sistema cardiovascular - 2018/02**

Turma: \_\_\_\_\_ Data: \_\_\_\_\_

Alunos: \_\_\_\_\_ Matrícula: \_\_\_\_\_  
 \_\_\_\_\_ Matrícula: \_\_\_\_\_

### **III - Procedimento Experimental**

#### **Material necessário**

1. Computador/notebook com simulador instalado (PSpice, LTSpice etc)
2. Os artigos do Mossa (2008) e do Mirzaee (2008) listados no início deste roteiro

Alguns links para tutoriais do LTspice (mais simples de instalar no Windows 10 do que o PSpice):

- <http://eecs.oregonstate.edu/education/docs/tutorials/LTSpiceIntro.pdf>
- [http://www.me.umn.edu/labs/hmd/lab/docs/LTspice\\_Guide.pdf](http://www.me.umn.edu/labs/hmd/lab/docs/LTspice_Guide.pdf)

#### **Experiência (4,0 pts).**

Monte, no simulador, o circuito da figura 3 do artigo do Mossa (2008), listado no início deste roteiro, reproduzido na Figura 4 deste roteiro. No artigo (pg. 311, último parágrafo) é mencionado que o ciclo cardíaco possui um período médio de  $T = 0,833$  seg. Assim, conforme explicado no artigo, utilize como as duas fontes variáveis indicadas no circuito fontes senoidais com uma frequência  $f = 1/T$  Hz. Em relação à amplitude, os ventrículos esquerdo e direito não têm a mesma força de contração. O objetivo do ventrículo direito é bombear sangue para os pulmões, para que seja oxigenado, enquanto que o ventrículo esquerdo deve bombear sangue para o restante do corpo. Assim, a pressão (equivalente à tensão elétrica) do sangue na saída do ventrículo esquerdo é bem maior do que a pressão do sangue na saída do ventrículo direito. Desta forma, para modelar este efeito, a onda senoidal na entrada do ventrículo esquerdo deve ter uma amplitude de 120 V, enquanto que a onda senoidal na entrada do ventrículo direito deve ter uma amplitude de 30 V.

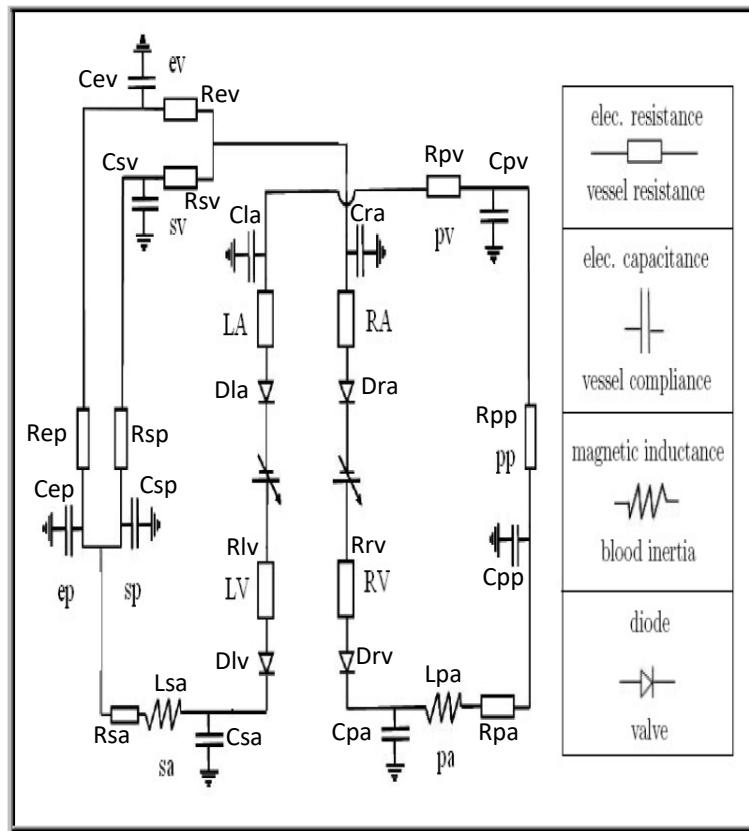
Além disso, o mesmo artigo menciona que cada fonte senoidal deve ser ajustada de modo a fornecer tensão em apenas uma direção, conforme equação 16 do artigo, reproduzida a seguir:

$$\begin{aligned} \phi(t) &= \sin(2\pi\omega) & 0 \leq \sin(2\pi\omega) \\ &= 0 & \sin(2\pi\omega) < 0 \end{aligned}$$

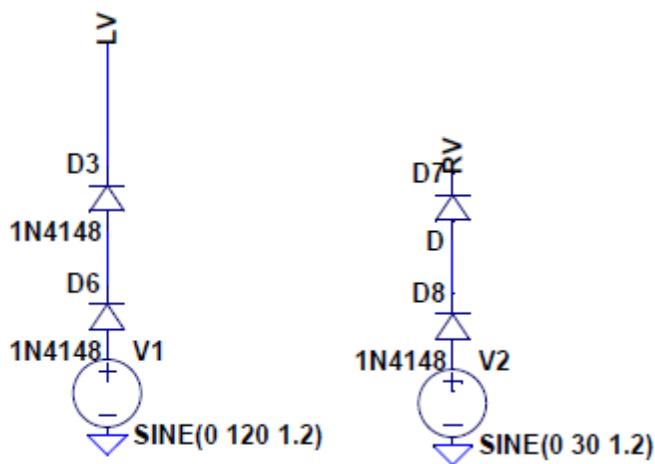
16

Assim, para implementar essas fontes, representando os ventrículos, sugere-se colocar em série 2 diodos em cada, como indicado na Figura 5 abaixo.

Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Campus Universitário Darcy Ribeiro, Gleba A, Avenida L3 Norte, CEP 70.910-900, Brasília - DF  
Caixa postal 4386, fone +55 61 3307 2300, fone/fax +55 61 3273 8893, ftd@unb.br, www.ft.unb.br



**Figura 4:** Modelo paramétrico simplificado de malha fechada do sistema cardiovascular baseado no modelo elétrico da Figura 3 do artigo do Mossa (2008), listado no início deste roteiro.



**Figura 5:** Sugestão de ajuste das fontes senoidais para obedecer à equação (16) do artigo do Mossa (2008), conforme explicado no texto.

**Importante:** ajuste sua simulação para mostrar no máximo 2 segundos de cada curva e ajuste o passo ou o incremento da simulação (que controla a resolução da curva) para que as ondas não fiquem com

Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Campus Universitário Darcy Ribeiro, Gleba A, Avenida L3 Norte, CEP 70.910-900, Brasília - DF  
 Caixa postal 4386, fone +55 61 3307 2300, fone/fax +55 61 3273 8893, ftd@unb.br, www.ft.unb.br

trechos “quadrados”. **Você terá pontuação descontada** se utilizar um incremento muito grande e sua onda ficar com trechos “quadrados”.

Os valores das grandezas hidráulicas utilizadas no modelo encontram-se nas tabelas 1 e 2 do artigo do Mossa (2008). Como nem toda as grandezas estão definidas neste artigo, e para a conversão das grandezas hidráulicas (mecânicas) em grandezas elétricas para simulação, foi necessária também uma pesquisa no artigo do Mirzaee (2008). A conversão das grandezas elétricas para as grandezas hidráulicas pode ser feita de acordo com a Tabela 1 ao final do roteiro, obtida a partir das informações constantes no artigo do Mirzaee (2008) e calculadas e compiladas pela monitora Kássia Sayonara (obrigada, Kássia!).

Lembre-se de utilizar uma referência de tensão para o circuito sempre que indicado. No PSpice: “GND\_ANALOG”.

- Obtenha o sinal de tensão equivalente à pressão na entrada da aorta (saída do **ventrículo esquerdo**, após a válvula de saída deste ventrículo) e compare com o formato de onda da figura 9 do artigo do Mirzaee (2008), reproduzida na Figura 6 abaixo. Como o circuito do Mirzaee (2008) é diferente (mais complexo) do que do Mossa (2008), os valores numéricos serão um pouco diferentes. A seguir, compare a mesma curva simulada com a forma de onda da curva de pressão da aorta idealizada da Figura 7 abaixo.

Se estiver utilizando algum variante do programa Spice, a simulação necessária será “Transient Analysis”. Veja detalhes no “Step 3” do tutorial disponível em: [http://www.dsif.unicamp.br/~manera/EE610/files/PSpice\\_Schematic\\_Tut1.pdf](http://www.dsif.unicamp.br/~manera/EE610/files/PSpice_Schematic_Tut1.pdf).

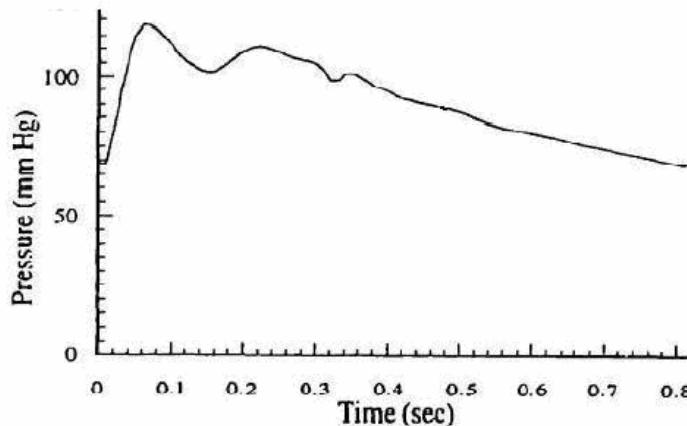
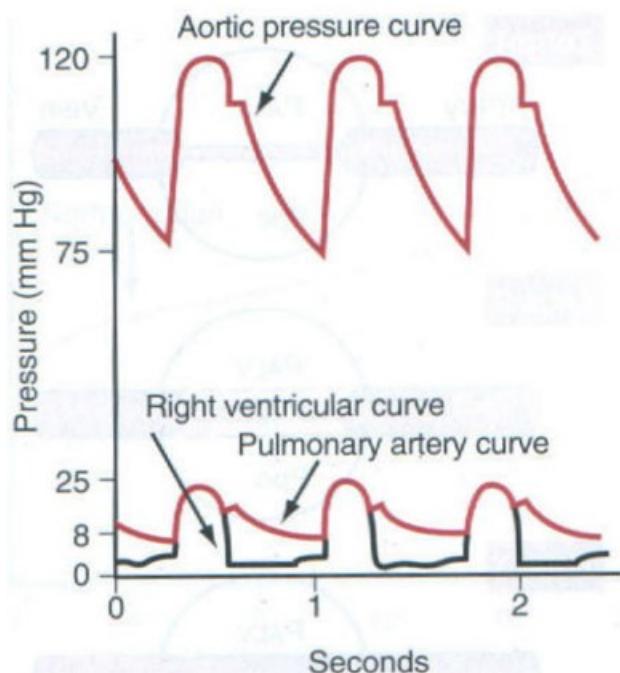


Fig. 9 Calculated Pressure for Aorta

Figura 6: Reprodução da Fig. 9 do artigo do Mirzaee (2008), ilustrando o formato de onda da pressão na aorta (calculada pelo modelo mais complexo utilizado no artigo).



**Figura 7: Formato de onda das curvas de pressão na entrada da artéria aorta (curva vermelha superior – “Aortic pressure curve”), na artéria pulmonar (curva vermelha inferior – “Pulmonary artery curve”) e no ventrículo direito (curva preta inferior – “Right ventricular curve”)<sup>2</sup>. Compare as suas ondas experimentais também com estas ondas idealizadas.**

- A seguir, obtenha o sinal de tensão equivalente à **pressão da artéria pulmonar** (saída do **ventrículo direito**, após a válvula de saída deste ventrículo) e compare com o formato de onda da pressão da artéria pulmonar idealizada na Figura 7 acima (amplitude, tempo etc). No artigo do Mirzaee (2008) não há uma figura da pressão da artéria pulmonar, para fins de comparação.

A curva pontilhada representada no painel central da figura 4 do artigo do Mossa (2008), reproduzida na Figura 8 abaixo, corresponde à pressão Plv no ventrículo esquerdo.

- Obtenha o sinal da tensão (equivalente à pressão) Plv (curva de pressão ventricular esquerda, na **entrada do ventrículo esquerdo**, após a válvula de saída do átrio esquerdo) no circuito simulado e compare com a curva de pressão Plv do artigo.

**OBRIGATÓRIO: Mostre o funcionamento do circuito ao professor/monitor.** Estejam preparados para responder a perguntas sobre o funcionamento do circuito e a gerar, na hora, a resposta do sistema em qualquer outro pontos do circuito. Sem o devido visto do professor ou monitor, sua simulação não será considerada.

<sup>2</sup> FONTE: <https://www.memorangapp.com/flashcards/32553/Pulmonary+Circulation/>

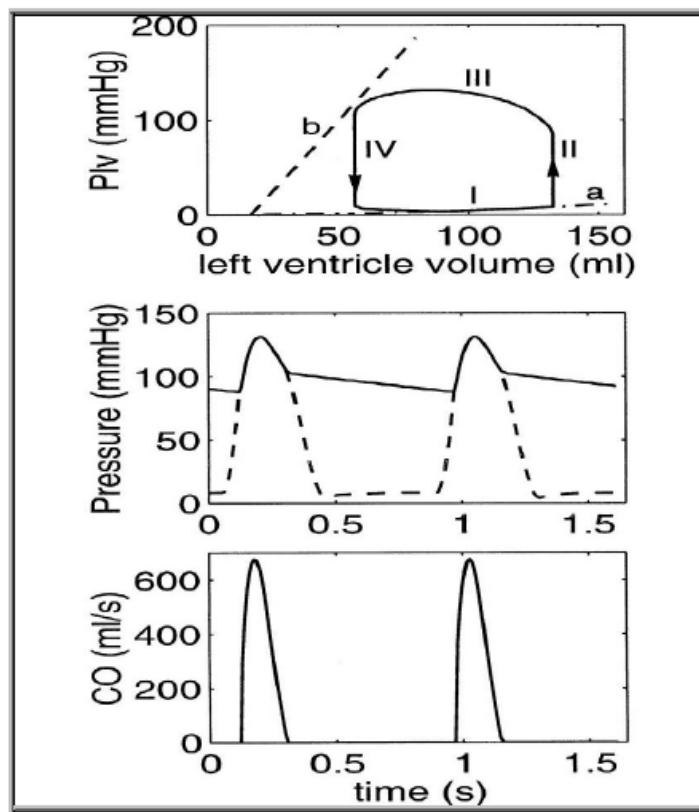


Figura 8: Reprodução da figura 4 do artigo do Mossa (2008). O gráfico superior mostra como a pressão no ventrículo esquerdo (Plv) varia em função do volume durante o ciclo basal (vide artigo para mais detalhes). A figura do meio mostra a variação da pressão no tempo da pressão arterial sistêmica (linha contínua) e da pressão do ventrículo esquerdo, Plv (linha tracejada). A curva inferior mostra o débito cardíaco (“cardiac output”, em inglês), em ml/s, que mostra quanto volume de sangue é ejetado pelo ventrículo esquerdo por unidade de tempo. Vide artigo para mais detalhes.

### Questões experimentais e discussão

**Questão 1 (3,0 pts).** Descreva as semelhanças e diferenças observadas entre os gráficos simulados e esperados em cada caso, incluindo semelhanças e diferenças em amplitude, tempo, formato etc, e procure explicar algumas fontes específicas para as diferenças observadas, a partir das descrições de cada artigo. Lembre-se de referir-se a cada artigo sempre que consultar alguma explicação em uma ou em outra fonte. Inclua em seu relatório a figura do circuito implementado de modo visível (escolha um tamanho adequado para a visualização dos detalhes do circuito e dos valores dos componentes) e as saídas simuladas nos pontos solicitados.

**Questão 2 (1,0 pt).** Quais as grandezas elétricas equivalentes às grandezas de pressão arterial, fluxo sanguíneo, volume, resistência e complacência no sistema cardiovascular?

**Questão 3 (1,0 pt).** Relacione cada válvula mostrada na Figura 3 acima (numeradas de 1 a 4) com os diodos mostrados na figura 3 do artigo do Mossa (2008), reproduzido na Figura 4 acima.

---

Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Campus Universitário Darcy Ribeiro, Gleba A, Avenida L3 Norte, CEP 70.910-900, Brasília - DF  
Caixa postal 4386, fone +55 61 3307 2300, fone/fax +55 61 3273 8893, ftd@unb.br, www.ft.unb.br

**Questão 4 (1,0 pt).** Com base na mesma figura da questão 3, explique o que significa cada uma das seguintes abreviaturas para os diferentes compartimentos simulados: (a) ev; (b) ep; (c) sv; (d) sp; (e) pv; (f) pp; (g) pa; (h) sa. Em sua resposta a cada item, inclua também que componentes elétricos estão sendo utilizados para simular cada compartimento indicado por estas siglas (se o compartimento está sendo simulado por um único resistor, capacitor, indutor, fonte ou diodo, ou se por um conjunto de componentes elétricos, explicitando quais componentes do circuito são utilizados em cada conjunto).

**Questão 5 (bônus - optativa) (+1,0 pt).** Gere as curvas simuladas que reproduzam os gráficos “Plv (mmHg) × volume do ventrículo esquerdo (ml)” e “CO (ml/s) × tempo (s)” da Figura 8 acima. Explique claramente o seu raciocínio para gerar estas curvas e que opções de simulação de seu programa precisou utilizar (adição, subtração, integração, derivada etc). Consulte o artigo do Mossa (2008) para dicas de como obter estas curvas.

Lembre-se de colocar o nome e a matrícula de cada componente do grupo, além da turma.

Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Campus Universitário Darcy Ribeiro, Gleba A, Avenida L3 Norte, CEP 70.910-900, Brasília - DF  
 Caixa postal 4386, fone +55 61 3307 2300, fone/fax +55 61 3273 8893, ftd@unb.br, www.ft.unb.br

**Tabela 1: Tabelas de conversão dos valores dos componentes hidráulicos (grandeza mecânica) para os componentes elétricos (grandeza elétrica). Observem com cuidado as unidades a serem utilizadas!**

	Grandeza mecânica (ml/mmHg)	Grandeza Elétrica ( $\mu$ F)
Csa	0.28	0.210
Csp	2.05	1.538
Cep	1.67	1.252
Csv	61.11	45.83
Cev	50	37.50
Cpa	0.76	0.5700
Cpp	5.8	4.350
Cpv	25.37	19.03
Cla	19.23	14.42
Cra	31.25	23.44
Crv	0.3389	0.2542

	Grandeza mecânica (ml)	Grandeza elétrica (C)
Vu,sa	0	0.00E+00
Vu,sp	274.4	2.057E-03
Vu,ep	336.6	2.523E-03
Vu,sv	1121	8.402E-03
Vu,ev	1375	1.031E-02
Vu,pa	0	0.000E+00
Vu,pp	123	9.219E-04
Vu,pv	120	8.994E-04
Vu,lv	16.77	1.257E-04
Vu,rv	40.8	3.058E-04

	Grandeza mecânica (mmHg.s/ml)	Grandeza elétrica (K $\Omega$ )
Rsa	0.06	8.00
Rsp	3	440.9
Rep	1	187.6
Rsv	0.038	5.066
Rev	0.016	2.133
Rpp	0.0894	11.92
Rpa	0.023	3.066
Rpv	0.0056	0.7466
Rla	2.50E-03	0.3333
Rra	2.50E-03	0.3333
Rlv	5.625E-0.4	0.0750
Rrv	0.0021	0.2800

	Grandeza mecânica (mmHg.s <sup>2</sup> /ml)	Grandeza elétrica ( $\mu$ H)
Lsa	2.20E-04	2.93E-02
Lpa	1.80E-04	2.40E-02

	Grandeza mecânica (mmHg)	Grandeza elétrica (V)
po,Lv	1.5	1.5
po,Rv	1.5	1.5