

Autorização concedida ao Repositório Institucional da Universidade de Brasília (RIUnB) pela Chefe da Editora Universitária da UERN, Professora Anairam de Medeiros e Silva, em 21 de maio de 2020, para disponibilizar o texto integral da obra **Novas tecnologias aplicadas à saúde: integração de áreas transformando a sociedade**, gratuitamente, para fins de leitura, impressão e/ou download, a título de divulgação da produção científica brasileira, sem ressarcimento dos direitos autorais.

REFERÊNCIA

ROCHA, Adson et al. Análise do deslocamento do bolo alimentar: comparação entre o esôfago saudável e o modelo de Megaesôfago Chagásico. In: LEITE, Cícilia Raquel Maia; Suélia Rodrigues Fleury Rosa (org.). **Novas tecnologias aplicadas à saúde: integração de áreas transformando a sociedade**. Mossoró, RN: EDUERN, 2017. p. 263-279. Disponível em: <http://www.sbeb.org.br/site/wp-content/uploads/LivroVersaoFinal15-07-2017.pdf>. Acesso em: 27 maio 2020.

NOVAS TECNOLOGIAS APLICADAS À SAÚDE:
INTEGRAÇÃO DE ÁREAS
TRANSFORMANDO A SOCIEDADE

Organização:

Cicilia Raquel Maia Leite

Suélia de Siqueira Rodrigues Fleury Rosa





REITOR

Prof. Pedro Fernandes Ribeiro Neto

VICE-REITOR

Prof. Aldo Gondim Fernandes

PRÓ-REITOR DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO

Prof. João Maria Soares

COMISSÃO EDITORIAL DO PROGRAMA EDIÇÕES UERN:

Prof. João Maria Soares

Profa. Anairam de Medeiros e Silva (Editora Chefe)

Prof. Eduardo José Guerra Seabra

Prof. Humberto Jefferson de Medeiros

Prof. Sérgio Alexandre de Moraes Braga Júnior

Profa. Lúcia Helena Medeiros da Cunha Tavares

Prof. Bergson da Cunha Rodrigues

ASSESSORIA TÉCNICA:

Daniel Abrantes Sales

AUTORES:

Adriano O. Andrade

Adson da Rocha

Aldira Guimarães Duarte Dominguez

Alessandro Ribeiro de Pádua Machado

Amanda Gomes Rabelo

Ana Maria Guimarães Guerreiro

Ana Paula Machado Velho

Ana Paula S. Paixão

Bruno Elvis Costa Rodrigues da Silva

Bruno Lima Pessôa

Célia Aparecida dos Reis

Cicília Raquel Maia Leite

Cristiane Ramos de Moraes

Cristina Akemi Shimoda Uechi

Danielle Brasil Barros da Silva

Diego Colón

Emerson Fachin-Martins

Fábio Henrique M. Oliveira

Francisco Milton Mendes Neto

Glaukus Regiani Bueno

Jerffeson Gomes Dutra

Josimar Laurentino Serafim

Kayo Luann Nogueira Pinto

Kheline Fernandes Peres Naves

Letícia Gonçalves Nunes Coelho

Marcos Campos

Marcus Fraga Vieira

Maria Jose Ferreira Zaruz

Marina Pinheiro Marques

Marina Pinheiro Marques

Mário Fabrício Fleury Rosa

Paulo Henrique Ferreira de Araújo Barbosa

Pedro Fernandes Ribeiro Neto

Rodrigo Azevedo de Medeiros

Sílvia Guimarães

Suélia de Siqueira Rodrigues Fleury Rosa

Suellem Stephanie Fernandes Queiroz

Tiago Franklin Rodrigues Lucena

Catálogo da Publicação na Fonte. Universidade do Estado do Rio Grande do Norte.

Novas tecnologias aplicadas à saúde: integração de áreas transformando a sociedade / Adriano O. Andrade... [et al.]; Cicília Raquel Maia Leite, Suélia de Siqueira Rodrigues Fleury Rosa (Organizadoras) . - Mossoró - RN, EDUERN, 2017.

284 p.

ISBN: 978-85-7621-164-8

1. Novas tecnologias - Saúde. 2. Engenharia Biomédica. 3. Sistemas de Saúde. 4. Processos interdisciplinares. I. Leite, Cicília Raquel Maia. II. Rosa, Suélia de Siqueira Rodrigues Fleury. III. Universidade do Estado do Rio Grande do Norte. V. Título.

Análise do deslocamento do bolo alimentar: comparação entre o esôfago saudável e o modelo de Megaesôfago Chagásico

Adson da Rocha¹, Suélia Siqueira Rodrigues Fleury Rosa¹, Diego Colón²,
Célia Aparecida dos Reis³, Marina Pinheiro Marques¹ e Letícia Gonçalves Nunes Coelho⁴

Abstract

This work aimed at studying the dynamic of the human esophagus behavior when affected by Chagas' disease. A mass-spring-damper model was proposed to model the food through the esophagus during peristaltic action. After that, parameters were recalculated to simulate a chagasic megaesophagus. It was analyzed the velocity and displacement curves from both models and identified the dynamic differences between the healthy organ and the ill one. According to the results obtained, the food displacement in a chagasic megaesophagus type II (3 centimeters dilated) is just 11.84% of the displacement in a healthy esophagus. A virtually zero velocity and a high damping constant due to aperistalses imply a displacement output that cannot return to its initial state, which proves the food bolus retention.

Keywords: Esophageal Achalasia, Chagas Disease, Esophagus.

1 - Universidade de Brasília, UnB, Laboratório de Engenharia Biomédica, Brasília, DF, Brasil.

2 - Universidade de São Paulo, USP, São Paulo, SP, Brasil.

3 - Universidade Estadual Paulista, Unesp, Faculdade de Ciências, Bauru, SP, Brasil.

4 - Universidade de Brasília, UnB, Instituto de Física, Brasília, DF, Brasil

Resumo

Estudar a dinâmica do comportamento do esôfago humano quando afetado por doença de Chagas. Um modelo de massa, mola e amortecedor foi proposto para modelar o alimento através do esôfago durante a ação peristáltica. Depois disso, os parâmetros foram recalculados para simular um megaesôfago chagásico. Foram analisadas as curvas de velocidade e deslocamento de ambos os modelos e identificou-se as diferenças dinâmicas entre o órgão saudável e um doente. O deslocamento de alimentos em um tipo de Chagas megaesôfago II (3 centímetros de dilatação) é apenas 11,84% do deslocamento num esôfago saudável. A velocidade zero praticamente é um alto amortecimento constante devido ao peristaltismo, implica uma saída de deslocamento que não pode retornar ao seu estado inicial, o que comprova a retenção do bolo alimentar.

Palavras-chave: Acalasia Esofágica, Doença de Chagas, Esôfago.

10.1. Introdução

O deslocamento do bolo alimentar através do esôfago resulta das estimulações neurais e das respostas de contração da parede muscular do esôfago, gerando forças peristálticas que são responsáveis por transportar o bolo até o fim do órgão [Nicosia e Brasseur 2002]. A doença de Chagas no esôfago é caracterizada por lesões inflamatórias no sistema nervoso entérico, associadas com a redução drástica no número de nervos ativos. Como resultado da desnervação intrínseca, verifica-se incoordenação motora, retenção de alimentos, hipertrofia muscular e, finalmente, dilatação esofágica, levando à formação do megaesôfago chagásico [Sanchez, Dick, Sala e Fontes 2007], [Côbo, Silveirinha, Micheletti, Crema e Adad 2012], [Dias e Coura 1997].

Os estudos sobre os aspectos gastrointestinais da doença de Chagas são importantes por permitirem o desenvolvimento de um modelo natural para compreensão das consequências da destruição do sistema nervoso entérico em humanos [De Oliveira, Troncon, Dantas and Meneghelli 1998]. No Brasil, estima-se que há entre 8 milhões a 10 milhões de portadores da doença de Chagas, o que a enquadra entre as 4 principais endemias no país. Os gastos globais e anuais com a doença chegam a aproximadamente US\$ 627 mil, e segundo Sherwood (2007): “Não existe tratamento efetivo para a doença. As drogas disponíveis apenas matam os parasitas extracelulares e as lesões nervosas causadas são irreversíveis”.

O megaesôfago pode ser classificado em 4 graus distintos, de acordo com o diâmetro transversal da imagem do esôfago e pelo tempo de estase (estado no qual o fluxo normal deixa de fluir). A seguir, é apresentada a classificação proposta por [Lee, Bacon, Bottazzi e Hotez 2013].

- **Grau I** – Dilatação moderada, até 4cm de diâmetro transversal. Estase pequena aos 5 minutos;
- **Grau II** – Dilatação até 7cm de diâmetro transversal. Estase aos 30 minutos;
- **Grau III** – Dilatação até 10cm de diâmetro transversal, alongamento sigmoide do esôfago (dolicomegaesôfago). Estase pronunciada aos 30 minutos. Resíduo alimentar, causado pela estase, dando o contraste imagem;
- **Grau IV** – Dilatação maior que 10cm de diâmetro transversal. Imagem sem contraste, mostrando a dilatação ocorrida apenas pelo resíduo alimentar parado no esôfago.

Atualmente, não há um tratamento definitivo para o megaesôfago. É uma doença na qual as alterações funcionais são permanentes e progressivas. Todas as propostas terapêuticas apenas aliviam os sintomas. O tratamento cirúrgico, indicado em casos não avançados, não corrigem a desordem funcional do órgão, e os principais sintomas são recorrentes [Figueiredo et al. 2002].

Dessa forma, a análise do comportamento mecânico do esôfago adoecido se justifica, no sentido de obtenção de recursos que propiciem além de uma melhor qualidade de vida para pacientes que apresentam tal problemática, mas também como auxílio na apresentação de possibilidades de formas de tratamento e uma melhor compreensão do problema em questão.

Sendo assim, propõe-se a análise do comportamento mecânico do esôfago como sendo um sistema cuja entrada é a força. O comportamento mecânico do esôfago humano pode ser considerado como um sistema cuja entrada é a força devido às alterações de pressão entre a parte inferior da faringe e o esfíncter esofágico superior, estimuladas pela passagem do alimento. Já a saída desse sistema pode ser considerada como sendo o deslocamento do alimento pelo esôfago até o estômago. Sabe-se que há dois tipos de modelagem: “entrada –saída e espaço de estados”[Cólon et al. 2015]. A opção neste trabalho é efetuar uma modelagem fenomenológica (isto é, baseada nas leis da Física) e por espaço de estados, de modo que a saída é ainda função dessas variáveis de estado.

Uma importante característica dos sistemas biológicos, tal como o processo da passagem do bolo alimentar pelo esôfago, é a sua alta complexidade, de modo que ao se propor formas de alterar as suas dinâmicas através de controladores com realimentação (tal como se faz em engenharia de sistemas de controle), esses devem ser capazes de realizar suas funções mesmo na presença de ruídos, flutuações ou mudanças bruscas e imprevisíveis, que são características inerentes ao corpo humano. Muitas vezes também é impossível ou indesejável tentar modificar diretamente a dinâmica dos sistemas orgânicos, por questões tecnológicas.

Para estes sistemas biocomplexos (neste caso específico o tratamento esofágico), deve-se utilizar uma arquitetura de controle tal que a ação deste controle aplique-se de forma paralela. Além disso, devido à alta complexidade dos sistemas orgânicos humanos, que provavelmente envolve várias malhas de controle naturais (ligadas ao sistema nervoso), os modelos matemáticos da planta a ser controlada serão de alta ordem e bastante não-lineares, com influência de ruídos e perturbações.

O conceito de Controle Orgânico, que vem sendo desenvolvido pelos autores, procura se adequar a esta realidade, com objetivos de ajuste e reforço das alterações da dinâmica da planta de um sistema biológico, tal como o da passagem do bolo alimentar pelo esôfago. Essa

intervenção dá-se por razões biomédicas, apresentando-se como a contribuição da engenharia biomédica para tratamento de uma patologia específica. Propõe-se neste trabalho projetar um controlador orgânico, que seria responsável por propagar ondas artificiais peristálticas pelo órgão doente, dessa forma, permitindo que as atividades dinâmicas sejam restauradas ou reforçadas, e para que o alimento possa ser deslocado até o estômago. Dessa forma, a intervenção de um controlador orgânico tem o objetivo de atingir um desempenho padrão do esôfago, como o uso de biomaterial (látex) e/ou por sensoriamento [Ljung 1987]. O controlador orgânico a ser projetado atua em paralelo à planta e recebe a mesma entrada. Sua saída é adicionada à saída do sistema, e pode ser monitorada via sensoriamento, o que permitirá automatização e melhores correções do sinal de saída.

Os pacientes com doença de Chagas têm alterações da motilidade do esôfago, caracterizadas por I) menor amplitude de contração; II) maior velocidade das contrações na parte média do esôfago e III) menor pressão do esfíncter inferior. Como proposta de atuar nesses três parâmetros, propomos um sistema de controle orgânico bioinspirado. A atuação deste controle se dá via uma manta esofagiana, derivada de látex natural (biotecnológico), cuja proposta é ajustar tais parâmetros na expectativa de contribuir com o tratamento do acometido do esôfago chagásico. O desenvolvimento de um modelo matemático, que represente o funcionamento do esôfago humano com a moléstia chagásica é muito complexo (quadro típico de sistemas fisiológicos). Desta forma, propõe-se neste trabalho um modelo matemático baseado em um sistema mecânico massa-mola-amortecedor. Esta proposta baseia-se no fato de que o corpo humano pode ser modelado por componentes mecânicos.

Neste trabalho propõe-se um modelo matemático para o esôfago chagásico, representado por um modelo massa-mola-amortecedor, conforme descrito na Figura 10.1. A proposta de modelo matemático é representar o sistema fisiológico em questão por um modelo mecânico massa-mola-amortecedor, conforme mostrado na Figura 10.1, em que (a) mostra toda extensão do esôfago e o que representa cada ponto P1 a P4. Em (b) apresenta-se a distribuição dos valores de pressão nos pontos P1, P2, P3 e P4 no órgão esôfago, contendo valores com chagas e sem chagas.

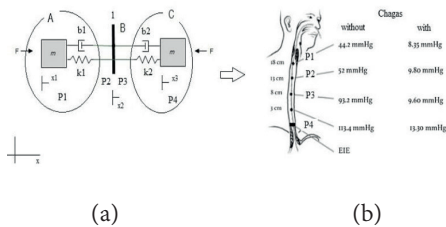


Figure 10.1. Diagrama do sistema massa-mola equivalente ao esôfago.

Fonte: Adaptada de Andrade et al. (2006).

Nesta, o primeiro conjunto massa, mola e amortecedor, observado da esquerda para a direita, deve modelar a redução da amplitude do esfôfago. A parte esquerda do modelo representa a parte superior do esfôfago, e a direita representa a parte inferior. As forças externas F_1 e F_2 , representam a contração peristáltica, sendo que uma força do lado esquerdo F_2 é nula em geral. Já a força F_1 é nula durante o repouso, mas deve ser um pulso durante a passagem do bolo. As massas (m) representam a massa das paredes do esfôfago (que são muito pequenas) dão conta do armazenamento de energia cinética. Os elementos mola (k_1) e amortecedor (b_1) dão conta, na região 2, de modelar a redução da amplitude e velocidade, e os elementos mola (k_2) e amortecedor (b_2) dão conta, na região 3, da perda de pressão do esfíncter inferior.

De fato, a perda de energia nos elementos amortecedores, vai implicar nesta redução da pressão. O bolo alimentar, representado por uma barra (1), não se movimentava por gravidade nesse estudo, e o ponto onde se mede a maior velocidade das contrações em parte média do esfôfago (representada pela velocidade da barra). A força externa F_1 e F_2 são forças que atuam na parede do esfôfago em pontos distintos – sendo a primeira no esfíncter superior e a segunda no esfíncter inferior. Na literatura afirma-se que são 7 segundos a média de tempo para a onda peristáltica chegar ao fim do esfôfago humano padrão, em um homem, 1.60 m, IMC normal e esfôfago normal [Andrade et al. 2006], [Rodrigues et al. 2015].

Os valores para a constante da mola (k) e do amortecedor (b) são calculados a partir dos diferentes valores de pressão na extensão do esfôfago, o diâmetro do órgão e da velocidade da onda peristáltica. A partir dos estudos de manometria, descritos na literatura [Nicosia e Brasseur 2002], [Sanchez, Dick, Salas e Fontes 2007], [Côbo, Silveirinha, Micheletti, Crema e Adad 2012], [Dias e Coura 1997], [De Oliveira, Troncon, Dantas e Meneghelli 1998], [Sherrwood 2007], é possível obter os valores de pressão no esfôfago durante a peristalse, devido à ingestão de 5ml de água. Na Figura 10.1, são apresentados os valores de pressão em quatro pontos de estudo no esfôfago. A região *A* é a que reflete a redução da amplitude para esfôfago chagásico em comparação com esfôfago sem chagas, a região *B* representa o acréscimo de velocidade do bolo na parte média do esfôfago, e a região *C* representa a diminuição da pressão do esfíncter, o que reflete no esvaziamento do esfôfago. Note que na imagem apresentamos os valores de pressão com e sem chagas.

Para o cálculo das constantes da mola (k_i) e do amortecedor (b_i) são adotadas a equação (1), sendo $i = 1, 2, 3, 4$ o índice da pressão na região indicada [Nicosia e Brasseur 2002], [Sanchez, Dick, Salas e Fontes 2007], [Côbo, Silveirinha, Micheletti, Crema e Adad 2012], [Dias e Coura 1997], [De Oliveira, Troncon, Dantas e Meneghelli 1998] .

$$k_i = \frac{\text{pressão} \left[\frac{\text{N}}{\text{m}^2} \right] \times \text{área} \left[\text{m}^2 \right]}{\text{posição} \left[\text{m} \right]} \quad b_i = \frac{\text{pressão} \left[\frac{\text{N}}{\text{m}^2} \right] \times \text{área} \left[\text{m}^2 \right]}{\text{velocidade} \left[\frac{\text{m}}{\text{s}} \right]} \quad (1)$$

10.1.1 Parâmetros do sistema esôfago saudável

Para o cálculo das constantes da mola e do amortecedor, foram adotados os valores de 2cm/s para velocidade da onda peristáltica e 3cm para diâmetro do esôfago [Nicosia e Brasseur 2002], [De Oliveira, Troncon, Dantas e Meneghelli 1998]. Por tomografia computadorizada (TC), observa-se que a parede esofágica de um esôfago normal possui espessura média de 0,35cm, com 28cm de comprimento e um raio 3,0 cm [Côbo, Silveirinha, Micheletti, Crema e Adad 2012], [Dias e Coura 1997]. Pode-se, assim, obter o volume aproximado de um cilindro oco que, para o caso em estudo, adotou-se um valor médio do Volume ($V = 173,95\text{cm}^3$). Pela pressão média obtida da literatura na parede do esôfago normal, tem-se uma densidade esofagiana da parede calculada da forma clássica, onde a pressão é determinada pelo produto da densidade gravidade e da altura, sendo P a pressão média da parede do esôfago normal e ρ a densidade esofagiana da parede dada em g/cm^3 . Para $g = 980\text{cm/s}^2$ e com $P = 102,9\text{gf/cm}^2$ (75,7mmHg), tem-se que $\rho = 3,75 \cdot 10^{-3}\text{g/cm}^3$. A massa (m) é dada por $m = 0,65\text{g}$ para esôfago sem chagas [Dias e Coura 1997].

10.1.2. Parâmetros do sistema megaesôfago chagásico

Os valores de pressão e diâmetro do megaesôfago foram obtidos em Sherwood (2007). Esse estudo manométrico também foi avaliado em quatro pontos espaçados de 5cm ao longo da extensão do órgão quando acometido pela Doença de Chagas. Com o valor do diâmetro interno do órgão de 6,0 cm e a letra M no índice indicando presença de megaesôfago chagásico. Aplicando o mesmo procedimento para megaesôfago chagásico, por tomografia computadorizada (TC), a parede esofágica de um esôfago chagásico é de espessura média de 0,5cm, com 28cm de comprimento, raio de 6cm e Volume ($V = 505,79\text{cm}^3$). Onde P é a pressão média da parede do esôfago chagásico; ρ é a densidade esofagiana da parede dada em g/cm^3 , $g = 980\text{cm/s}^2$, tem-se para $P = 13,9\text{gf/cm}^2$, assim $\rho = 5,06 \cdot 10^{-4}\text{g/cm}^3$, logo a massa (m) é dada $m = 0,25\text{g}$ para esôfago com chagas.

As seguintes hipóteses adicionais foram consideradas: a) a parede do esôfago é suposta uniforme ao longo do comprimento; b) as massas calculadas são consideradas uniformes ao longo do comprimento do esôfago – seja com ou sem chagas; c) o movimento analisado é translacional em x na direção do esôfago – sem deflexões, vibrações; d) a influência dos órgãos circundantes é desprezada. Para obtenção do modelo matemático, tem-se adotado nos estudos realizados pelo grupo de pesquisa a ferramenta Bond Graph e Equações de Movimento [Lopes et al. 2011], [Ljung 1987].

10.2. Método

As entradas do sistema são as forças externas denominadas F , podendo ser diferentes em outros estudos. Tomando as equações de equilíbrio do sistema (balanço das forças) e aplicando as relações constitutivas, têm-se as seguintes equações de movimento para sistema mecânico translacional apresentado na Figura 10.1(a). A seguir, apresentamos o modelo matemático I, que representa o esôfago completo, conforme nossa proposta.

$$m\ddot{x}_1 = -b_1(\dot{x}_1 - \dot{x}_2) - k_1(x_1 - x_2) + F \quad (2)$$

$$k_1(x_1 - x_2) - k_2(x_2 - x_3) + b_1(\dot{x}_1 - \dot{x}_2) + b_2(\dot{x}_2 - \dot{x}_3) = 0 \quad (3)$$

$$m\ddot{x}_3 = b_1(\dot{x}_2 - \dot{x}_3) + b_2(\dot{x}_2 - \dot{x}_3) + k_1(x_2 - x_3) - k_2(x_2 - x_3) - F \quad (4)$$

Aplicamos Bond Graph e obtivemos um Sistema com espaço de estados de maior ordem, porém com a dinâmica similar, por isso optamos por usar esse modelo para aplicação da técnica de linearização exata.

A aplicação da linearização exata por realimentação é um procedimento que permite transformar a dinâmica de um sistema não linear, em uma dinâmica linear, mediante uma saída escolhida previamente. O resultado da Linearização exata do sistema das equações (2), (3) e (4) para $i = 1, 2, 3$. Na descrição no espaço de estados, devemos reescrever o sistema assim:

$$\ddot{x}_1 = -\frac{b_1}{m}(\dot{x}_1 - \dot{x}_2) - \frac{k_1}{m}(x_1 - x_2) + \frac{1}{m}F \quad (5)$$

$$\ddot{x}_3 = -\left[\frac{b_2}{b_2} \frac{(b_1 + b_2)}{m}\right](\dot{x}_1 - \dot{x}_2) - \left[\frac{k_1}{b_2} \frac{(b_1 + b_2)}{m}\right](x_1 - x_2) + \left[\frac{(k_2 b_1 + k_1 b_2)}{m b_2}\right](x_2 - x_3) - \frac{1}{m}F \quad (6)$$

Em (6), tomando $(k_i = \frac{P_i A_i}{x_i}), (b_i = \frac{P_i A_i}{x_i}), i = 1, 2, 3$ e fazendo:

Da Eq. (13), nota-se que $\phi(x)$ é um difeomorfismo global. Das Equações (10) e (11) tem-se:

$$y_1 = \psi_1; \quad y_5 = \mu_2 - \psi_3 + \psi_4; \quad y_3 = \psi_2; \quad y_4 = \psi_3; \quad y_5 = -\mu_1 + \psi_2; \quad y_6 = -\mu_2 + \psi_3 \quad (14)$$

é o difeomorfismo inverso. A forma normal da dinâmica (9) é dada por:

$$\begin{bmatrix} \dot{\mu}_1 \\ \dot{\mu}_2 \\ \dot{\psi}_1 \\ \dot{\psi}_2 \\ \dot{\psi}_3 \\ \dot{\psi}_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mu_2 \\ -E\mu_1 - C\mu_2 - D\psi_1 + D\psi_2 + 2C\psi_3 - C\psi_4 + \frac{1}{m}u(t) \\ \mu_2 - \psi_3 + \psi_4 \\ \psi_3 \\ 0 \\ -E\mu_1 + (A+C)\mu_2 + (B+D)\psi_1 - (B+D)\psi_2 - 2(A+C)\psi_3 + (A+C)\psi_4 \end{bmatrix} \quad (15)$$

De (15), a dinâmica interna é a dinâmica não linear:

$$\begin{bmatrix} \dot{\psi}_1 \\ \dot{\psi}_2 \\ \dot{\psi}_3 \\ \dot{\psi}_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mu_2 - \psi_3 + \psi_4 \\ \psi_3 \\ 0 \\ E\mu_1 + (A+C)\mu_2 + (B+D)\psi_1 - (B+D)\psi_2 - 2(A+C)\psi_3 + (A+C)\psi_4 \end{bmatrix} \quad (16)$$

sendo:

$$A + C = -\left(\frac{P_1 A_1}{m}\right) \frac{1}{(\mu_2 - \psi_3 + \psi_4)} \cdot \left[2 + \left(\frac{P_2 A_1}{P_2 A_2}\right) \cdot \frac{\psi_3}{(\mu_2 - \psi_3 + \psi_4)}\right] e$$

$$B + D = -\left(\frac{P_1 A_1}{m}\right) \frac{1}{\psi_1} \left[2 + \left(\frac{P_2 A_1}{P_2 A_2}\right) \cdot \frac{\psi_3}{(\mu_2 - \psi_3 + \psi_4)}\right]$$

A dinâmica zero é obtida da dinâmica (16) quando a saída $y \equiv 0$. Portanto, $\mu_1 = \mu_2 = 0$. Esta dinâmica tem equações:

$$\begin{bmatrix} \dot{\psi}_1 \\ \dot{\psi}_2 \\ \dot{\psi}_3 \\ \dot{\psi}_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\psi_3 + \psi_4 \\ \psi_3 \\ 0 \\ (B+D)\psi_1 - (B+D)\psi_2 - 2(A+C)\psi_3 + (A+C)\psi_4 \end{bmatrix} \quad (17)$$

sendo, nessas condições:

$$A + C = -\left(\frac{P_1 A_1}{m}\right) \frac{1}{(-\psi_3 + \psi_4)} \left[2 + \left(\frac{P_1 A_1}{P_2 A_2}\right) \cdot \frac{\psi_3}{(-\psi_3 + \psi_4)}\right];$$

$$B + D = -\left(\frac{P_1 A_1}{m}\right) \frac{1}{\psi_1} \left[2 + \left(\frac{P_1 A_1}{P_2 A_2}\right) \cdot \frac{\psi_3}{(-\psi_3 + \psi_4)}\right]$$

Para o cálculo dos pontos críticos de (17) mostra-se que e é livre. Portanto, $(0, 0, 0, 0)$ é um ponto crítico desta dinâmica. A matriz A da contraparte linear da dinâmica (17) é

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Além disso, sua equação característica é dada por $\lambda^4 = 0$.

10.3. Resultados

A partir da proposta simplificadora do modelo massa-mola-amortecedor para o esôfago humano foi possível dar continuidade ao estudo da dinâmica do comportamento do órgão em função da velocidade e deslocamento do bolo alimentar. Assim, quando o sistema em malha aberta do esôfago saudável, usando o programa Simscape do Matlab, a resposta do sistema apresenta a posição da massa em função do tempo. Dessa forma, para 1N de força de entrada o deslocamento da massa é 8cm em 25 segundos. Contudo, para a mesma entrada, o sistema do megaesôfago chagásico tem um deslocamento bem inferior para a mesma escala de tempo.

De acordo com a resposta do sistema megaesôfago chagásico, o deslocamento é equivalente apenas 6,25% do deslocamento quando o órgão é saudável. O resultado é coerente com a literatura, visto que quando o esôfago é acometido pela doença de Chagas o grau de desnervação dos plexos intramurais é de aproximadamente 90% [Tanowitz et al. 1992], o que resulta em hipertrofia muscular e incoordenação motora e implica na redução da pressão de contração do corpo do esôfago para valores inferiores a 20mmHg.

A partir das simulações realizadas no Simscape™ é possível analisar e comparar a dinâmica para ambos os modelos. Para o esôfago saudável a curva de velocidade, Figura 10.2, foram obtidas quando o sistema foi excitado por um pulso de 5N e 7 segundos, equivalente ao tempo necessário para a onda peristáltica chegar até o fim do esôfago. Assim, será possível avaliar em termos da velocidade da onda (que foi considerada nos cálculos de k e b) e do seu tempo de duração, qual será a velocidade do alimento e o seu deslocamento. Para a curva da velocidade, no início a massa está em repouso. Então, em 2 segundos, devido ao sinal de entrada mudar abruptamente, a velocidade da massa dá um pico na direção positiva e gradualmente retorna a zero.

O deslocamento ao mesmo tempo muda mais gradualmente, devido à inércia e ao amortecimento chega ao seu valor máximo no fim da atuação da força. Aos 9 segundos, quando o sinal de entrada retorna a zero, a velocidade tem um pico inverso e a massa retorna gradualmente a sua posição inicial. Como é possível observar, a massa se desloca aproximadamente 25cm , o que corresponde aproximadamente à extensão entre os esfíncteres superiores e inferiores esofágicos.

O gráfico da Figura 10.2 mostra a saída do sistema do esôfago saudável do modelo da Figura 10.1 e a resposta do megaesôfago chagásico, quando excitados por uma entrada degrau unitário.

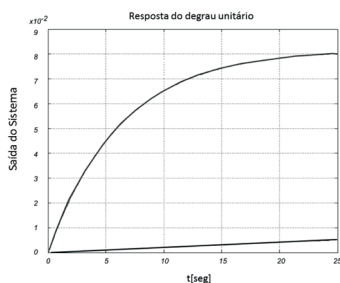


Figura 10.2. Respostas do esôfago saudável e do megaesôfago chagásico quando excitado por uma entrada degrau

A mesma análise aplica-se para a compreensão da dinâmica do megaesôfago chagásico. Já analisando a curva de velocidade, conforme a Figura 10.3, uma velocidade praticamente nula (aproximadamente 1.2 mm/s) ocorre durante os 7 segundos que a força é aplicada e o deslocamento.

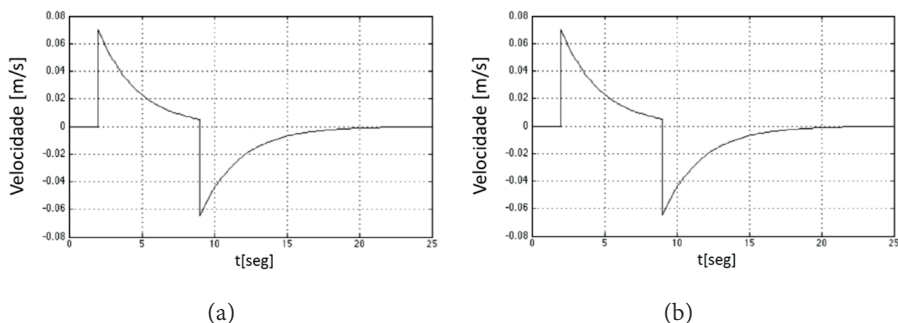


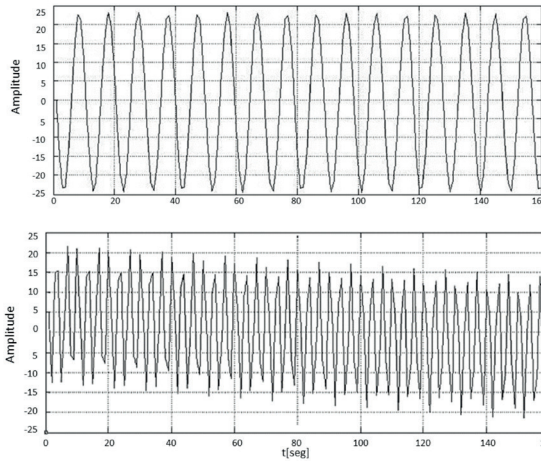
Figura 10.3. (a) Curva de velocidade para o sistema esôfago saudável. (b) Curva de velocidade para o sistema megaesôfago chagásico

10.4. Discussão

Considerando a curva de resposta dos dois sistemas sob estudo, o esôfago saudável e o megaesôfago chagásico foi possível a partir das suas resposta em malha aberta, projetar um controlador de ganho capaz de aproximar a curva do esôfago doente à curva do esôfago quando saudável. O projeto do controlador considera inicialmente a função de transferência do sistema saudável. Ou seja, se caso o órgão estivesse sem nenhuma funcionalidade, o controlador desempenharia por completo as funcionalidades biológicas competentes. Mas, considerando como exemplo o modelo proposto para um caso de Megaesôfago Chagásico Tipo II com dilatação de 6 cm de diâmetro transverso do esôfago, o órgão ainda apresenta uma resposta equivalente a 6,25% de desempenho no deslocamento do alimento. Dessa forma, substituindo os valores obtemos a função de transferência proposta para o Controlador Orgânico que deverá ter uma taxa de desempenho de 93.75% em relação a F.T. do esôfago saudável, já que a diferença é compensada pela saída obtida pelo órgão doente. Logo a função de transferência do Controlador Orgânico será dada pela equação (22).

$$FT = (0.9375)x \frac{1}{0,005s^2 + 76.739s + 12.246} \quad (22)$$

A saída obtida pelo controlador orgânico caracterizado pela Função de Transferência descrita acima somado com a saída natural do megaesôfago chagásico fornecerá uma saída final mais próxima do ideal e com uma performance dinâmica equivalente ao órgão saudável. Para a análise do sistema dinâmico proposto pelo modelo Figura 10.4 e identificação do seu desempenho, o sistema foi excitado por meio de um sinal padronizado. A partir da simulação, a resposta do sistema quando excitada pela entrada degrau permitiu definir as suas características de desempenho. O comportamento dinâmico foi alterado comparado com o esôfago normal, conforme os gráficos da Figura 10.4, em que y é a amplitude adimensional e x , o tempo em segundos.



(a)

(b)

Figura 10.4. (a) Resposta do sistema esôfago saudável para uma entrada degrau;
 (b) simulado no MatLaB Student

O megaesôfago chagásico também apresentou dinâmica alterada quando comparado com o esôfago saudável. De acordo com os resultados mostrados na Figura 10.5, a resposta do sistema para o esôfago doente é altamente oscilatória, implicando em resposta mais lenta.

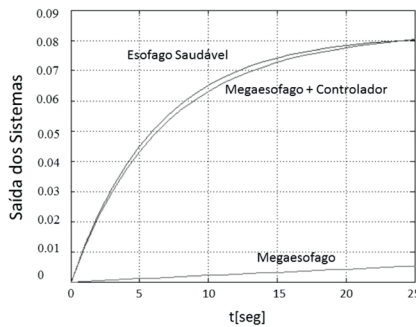


Figura 10.5. Resposta do sistema, curva inferior, devido à atuação do controlador orgânico no megaesôfago chagásico quando excitado por uma entrada degrau – 2015.

Além disso, o decaimento progressivo da amplitude quando o sistema é excitado por uma entrada degrau reflete a ineficiência de manter uma dinâmica capaz de deslocar o alimento ingerido.

1.5. Conclusão

Para a análise do sistema dinâmico proposto e identificação do seu desempenho, o sistema foi excitado por meio de um sinal padronizado. A partir da simulação do sistema de equações de sexta ordem, a resposta do sistema, quando excitada pela entrada degrau, permitiu definir as suas características de desempenho. A análise dos sistemas do esôfago saudável quando excitado pela entrada (degrau) com raízes características do sistema, mostrou que todas as raízes do sistema, distintas ou com repetição, estão no semiplano esquerdo, desse modo, conferindo estabilidade ao sistema.

A definição de controle orgânico foi explorada e uma proposta de controlador foi introduzida ao sistema do megaesôfago chagásico para reverter o quadro de aperistaltismo no órgão quando acometido pela doença de chagas. A proposta matemática para o controlador foi aplicada e obtiveram-se resultados satisfatórios na aproximação da curva de desempenho de um megaesôfago de grau II, somado com o auxílio do controlador orgânico em relação à curva do órgão saudável.

Foi apresentada a primeira versão do estado da arte do controlador orgânico concebido como uma manta esofágica derivada de látex natural. A essência deste estudo é, sob o enfoque etiológico mecânico, possibilitar a intercessão de um elemento externo, que será uma manta derivada de látex que ocasionará uma alteração nas variáveis principais, tais como massa e força de contato.

A investigação apresentada nesse estudo será preparo intelectual para o surgimento de um novo conceito dentro da linha engenharia biomédica - controle orgânico. O entendimento do sistema primário – esôfago – é o foco a ser controlado, baseado em estudos anteriores, a estratégia deste estudo é dar suporte através da mudança qualitativa e quantitativa das cargas aplicadas do esôfago, por meio da interação controlada pela malha manta. Esta denominação tem como base duas grandes áreas: controle, que propõe em sua essência simples realizar a regulação de algum elemento; e orgânico, relativo a órgão figurado como emblema profundamente. Dessa forma, podem-se realçar as regiões de maior concentração de força, deixando as de menor, com a carga mais acentuada que o normal.

O uso de um atuador como controlador derivado de um biomaterial realiza a sincronização e a interferência dinâmica no sistema não o modificando, mas sim o moldando ao sistema de maneira que a saída seja estável e sem sua inclusão ficaria instável.

Referências Bibliográficas

Andrade, C. G., Cecconello, I., Nasi, A., et al. (2006) “Lower esophageal sphincter analysis using computerized manometry in patients with chagasic megaesophagus”, *Diseases of the Esophagus*, v.19, p. 31-35.

Côbo, E. C., Silveira, T. P.; Micheletti, A. M.; Crema, E. and Adad, S.J. (2012) “Research on *Trypanosoma cruzi* and Analysis of Inflammatory Infiltrate in Esophagus and Colon from Chronic Chagasic Patients with and without Mega”, Hindawi Publishing Corporation *J Trop Med*.

Colón, D., Rosa, S. S. R. F., Oliveira, D. S., Balthazar, J. M. R., Célia, A. (2015) “Skin Model and Some Processing Properties of a Drilling Simulation in the Abdominal”, *International Journal of Advanced Engineering Research and Science*, v. 2, p. 50-55.

De Oliveira, R. B., Troncon, L. E. A., Dantas, R. O. and Meneghelli, U. G. (1998) “Gastrointestinal manifestations of Chagas’ disease”. *The American Journal of gastroenterology*, 93(6), p.884-889.

Dias, J. C. P. e Coura, J. R. (Org.). (1997) “Clínica e terapêutica da doença de Chagas: uma abordagem prática para o clínico geral”. Rio de Janeiro, FIOCRUZ, p. 133-176.

Figueiredo, S. D. S., Carvalho, T. B., Nóbrega, B. B., Ribeiro, F. S., Teixeira, K. S., Ximenes, C. A. (2002) “Caracterização radiográfica das manifestações esôfago gastrointestinais da doença de Chagas”, *Radiologia Brasileira*, v. 35, n. 5, p. 293-297.

Lee, B. Y., Bacon, K. M., Bottazzi, M. E. and Hotez, P.J. (2013) “Global economic burden of Chagas disease: A computational simulation model”, *The Lancet infectious diseases*, 13(4), 342-348.

Ljung, L. (1987) “System Identification - Theory for the User”, Prentice Hall.

Lopes, L. R., Braga, N. D. S., Oliveira, G. C. D., Neto, J. S. C., Camargo, M. A., Andreollo, N. A., et al. (2011) “Results of the surgical treatment of non-advanced megaesophagus using Heller-Pinotti’s surgery: Laparotomy vs. Laparoscopy”. *Clinics*, 66(1), p. 41-46.

Nicosia, M. A. e Brasseur, J. G. A. (2002) “Mathematical Model for Estimating Muscle Tension in vivo during Esophageal Bolus Transport”, *Journal of Theoretical Biology*, 219(2), p. 235-255.

Rodrigues, S. S. F. R., Reis, M.C., Rosa, M. F. F., Colón, D., Reis, C. A., Balthazar, J. M. (2015) “Use of Natural Latex as a Biomaterial for the Treatment of Diabetic Foot: A New Approach to Treating Symptoms of Diabetes Mellitus”, In: David Claborn. (Org.). Topics in Public Health. 1ed. Rijeka: In Tech books, v. 1, p. 213-248.

Sanchez-Lermen, R. L. P., Dick, E., Salas, J. A. P. e Fontes, C. J. F. (2007) “Sintomas do trato digestivo superior e distúrbios motores do esôfago em pacientes portadores da forma indeterminada da doença de Chagas crônica”, Revista da Sociedade Brasileira de Medicina Tropical, 2nd ed., v. 40, p. 197-203.

Sherwood, L. (2007) “Human physiology: from cells to systems” 6. ed. [S.l.]: Brooks/Cole Cengage Learning.

Tanowitz, H. B., Kirchoff, L. W., Simon, D., Morris, S. A., Weiss, L. M., Wittner M. (1992) “Chagas’ disease”, Clinical Microbiology Reviews, v. 5, n. 4, pp. 400-419.