

Universidade de Brasília - UnB
Faculdade UnB Gama - FGA
Engenharia Eletrônica

**Megaesôfago Chagásico: modelagem, análise
dinâmica e proposta de tratamento por indução
artificial de ondas peristálticas**

Autor: Mirella Lorrainy Altoé
Orientador: Profa. Dra. Suélia de Siqueira R. Fleury Rosa
Coorientador: Prof. Dr. Adson Ferreira da Rocha

Brasília, DF
2014



Mirella Lorrainy Altoé

Megaesôfago Chagásico: modelagem, análise dinâmica e proposta de tratamento por indução artificial de ondas peristálticas

Monografia submetida ao curso de graduação em Engenharia Eletrônica da Universidade de Brasília, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Eletrônica.

Universidade de Brasília - UnB

Faculdade UnB Gama - FGA

Orientador: Profa. Dra. Suélia de Siqueira R. Fleury Rosa

Coorientador: Prof. Dr. Adson Ferreira da Rocha

Brasília, DF

2014

Mirella Lorrainy Altoé

Megaesôfago Chagásico: modelagem, análise dinâmica e proposta de tratamento por indução artificial de ondas peristálticas / Mirella Lorrainy Altoé. – Brasília, DF, 2014-

65 p. : il. (algumas color.) ; 30 cm.

Orientador: Profa. Dra. Suélia de Siqueira R. Fleury Rosa

Coorientador: Prof. Dr. Adson Ferreira da Rocha

Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade de Brasília - UnB
Faculdade UnB Gama - FGA , 2014.

1. Megaesôfago chagásico. 2. Modelagem matemática. I. Profa. Dra. Suélia de Siqueira R. Fleury Rosa. II. Universidade de Brasília. III. Faculdade UnB Gama. IV. Megaesôfago Chagásico: modelagem, análise dinâmica e proposta de tratamento por indução artificial de ondas peristálticas

CDU 02:141:005.6

Mirella Lorrainy Altoé

Megaesôfago Chagásico: modelagem, análise dinâmica e proposta de tratamento por indução artificial de ondas peristálticas

Monografia submetida ao curso de graduação em Engenharia Eletrônica da Universidade de Brasília, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Eletrônica.

Trabalho aprovado. Brasília, DF, 18 de novembro de 2014:

**Profa. Dra. Suélia de Siqueira R.
Fleury Rosa**
Orientador

Prof. Dr. Adson Ferreira da Rocha
Coorientador

Prof. Dr. José Felício da Silva
Examinador interno

Prof. Me. Mario Fabrício Fleury Rosa
Examinador externo

Brasília, DF
2014

À minha família.

Agradecimentos

A Deus por cada sorriso e desafio. Pelas tardes mornas ou lilás. Pela coragem.

À minha família. Fui e sou um pouquinho de cada um deles. À minha mãe, eternamente grata por nunca desistir de mim e ensinar a fazer do impossível o real. Ao meu pai, minha gratidão por sempre ter apostado no meu melhor. À minha irmã caçula por me encher de alegria e boas histórias. À minha avó Maria Helena por todo amor e carinho.

Agradeço aos meus grandes mestres que com seu exemplo e sabedoria me constituíram e cultivaram o meu desejo de um dia retribuir ao mundo tudo o que eles me proporcionaram. À Professora Suélia de Siqueira R. Fleury Rosa pela motivação, interesse e confiança. Ao Professor Adson da Rocha pelas oportunidades e ensinamentos. Ao Professor Cristiano Miosso pelo exemplo de competência e dedicação. Ao Professor Rogério Almeida pela minha paixão pela ciência.

Aos grandes amigos Larissa Ângelos, Juh Oliveira, Nathalia Nóbrega, Filipe Barbosa e Stéfano Toledo pelas boas conversas e felicidades compartilhadas. Aos amigos da universidade Felipe Duerno, Guilherme Costa, Emille Késsy, Yasmin Lobo e Gian Oliveira que em algum momento ou constantemente não mediram esforços para ajudar. Meus sinceros agradecimentos.

*“O correr da vida embrulha tudo.
A vida é assim: esquentada e esfria, apertada e daí afrouxa,
sossega e depois desinquieta. O que ela quer da gente é coragem.”*
(Rosa, J. G. O grande sertão: veredas)

Resumo

Este trabalho apresenta um estudo da dinâmica do comportamento do esôfago humano na Doença de Chagas e propõe um método de tratamento por meio de uma manta esofágica indutora de ondas peristálticas artificiais.

Inicialmente, um modelo *Bond Graph* foi proposto para visualização e compreensão dos parâmetros que influenciam a dinâmica do processo de ingestão do alimento e a movimentação do bolo alimentar desde a boca até o fim do esôfago. O sistema foi modelado nos domínios hidráulico, mecânico translacional e rotacional. O modelo de ordem 10 foi excitado com uma entrada em degrau e um impulso unitário para caracterização do sistema no domínio do tempo. Porém, o modelo apresentou-se não controlável, não permitindo que se aplique a teoria de controle.

Dessa forma, dois modelos massa-mola-amortecedor foram propostos para modelar o comportamento da passagem do alimento pelo esôfago a partir da atuação das ondas de contração peristáltica. De acordo com os resultados obtidos no Modelo Matemático I, o deslocamento do alimento no megaesôfago chagásico Grau II (6cm dilatado) é equivalente apenas a 6.25% do deslocamento quando o órgão é saudável. Além disso, a velocidade praticamente nula e uma alta constante de amortecimento decorrente da aperistalse implica em um resposta de deslocamento sem retornar ao seu estado inicial, comprovando os efeitos de retenção do bolus no esôfago e a não possibilidade da passagem do alimento pelo esfíncter inferior esofágico em direção ao intestino. No Modelo Matemático II, o megaesôfago chagásico também apresentou dinâmica alterada quando comparada com o esôfago saudável. A resposta do sistema quando excitado por uma entrada degrau foi altamente oscilatória e com decaimento progressivo da amplitude.

Por fim, o conceito de Controle Orgânico é introduzido e uma proposta de controlador com base no Modelo Matemático I é apresentada para reversão do quadro de aperistaltismo no esôfago quando acometido pela Doença de Chagas.

Palavras-chaves: megaesôfago chagásico. ondas peristálticas. *bond graph*. modelagem matemática. controle orgânico.

Abstract

This work aimed at studying the dynamic behavior of the human esophagus when affected by Chagas' disease and proposing a treatment method by an esophagus peristalsis control system.

A Bond Graph model was proposed to visualize and understand all parameters that influence the food intake dynamics and the movement of the bolus from the mouth to the end of the esophagus. The system was modeled in hydraulic, mechanical translational and rotational domains. The order model 10 was excited by a step and unit input for the characterization system in the time domain. However, the model developed was not controllable, which implies that it is not possible apply the control theory.

Thereby, two mass-spring-damper models were proposed to model the movement of food bolus through esophagus which the transport takes places by periodic contraction of the esophageal wall. According to the Mathematical Model I, the food displacement in a chagasic megaesophagus Type II (6cm dilated) is just 6.25% of the displacement in a healthy esophagus. Furthermore, a velocity virtually zero 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. For Mathematical Model II, the megaesophagus also showed dynamic changes when compared with the healthy esophagus. The system response, when excited by a step input, was highly oscillatory and the output curve had a progressive decrease in amplitude.

Finally, the concept of Organic Control is introduced and a proposed controller based on the Mathematical Model I is developed for reversal of the esophagus aperistaltismo when affected by Chagas' disease.

Key-words: chagasic megaesophagus. peristaltic waves. bond graph. mathematical modelling. organic control.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Desenho feito à mão do sistema estudado.	23
Figura 2 – Propagação da onda peristáltica. Imagem adaptada de (CAMPBELL; WILLIAMSON; HEYDEN, 2003).	24
Figura 3 – Estágios do desenvolvimento do megaesôfago chagásico (REZENDE, 1984).	26
Figura 4 – Diagrama em blocos para o sistema Megaesôfago Chagásico.	28
Figura 5 – Representação mecânica e hidráulica análoga ao sistema de ingestão do alimento, e suas variáveis e constantes.	32
Figura 6 – Modelo <i>Bond Graph</i> do processo de ingestão do alimento desde a boca até o EEI.	34
Figura 7 – Modelo <i>Bond Graph</i> simplificado do processo de ingestão do alimento desde a boca até o EEI.	34
Figura 8 – Modelo massa-mola-amortecedor análogo ao esôfago.	35
Figura 9 – Distribuição dos valores de pressão em 4 pontos de estudo no esôfago saudável e no megaesôfago chagásico. Valores de posição referentes à distância em relação ao EEI.	36
Figura 10 – Diagrama em blocos no programa <i>SimscapeTM</i> para o sistema massa-mola-amortecedor sob estudo.	38
Figura 11 – Modelo Matemático II para representação do comportamento do esôfago humano.	38
Figura 12 – Modelo Matemático II para representação do comportamento do esôfago humano. Diagrama precedente à associação em série dos elementos molas e amortecedores.	39
Figura 13 – Sistema modelado na forma de espaço de estado para o modelo <i>Bond Graph</i>	43
Figura 14 – Resposta do sistema para o esôfago saudável quando excitado por uma entrada degrau.	44
Figura 15 – Resposta do sistema para o megaesôfago chagásico quando excitado por uma entrada degrau.	45
Figura 16 – Curva de velocidade para o sistema esôfago saudável.	45
Figura 17 – Curva de deslocamento para o sistema esôfago saudável.	46
Figura 18 – Curva de velocidade para o sistema megaesôfago chagásico.	46
Figura 19 – Curva de deslocamento para o sistema megaesôfago chagásico.	47
Figura 20 – (a) Resposta do sistema esôfago saudável para uma entrada degrau. (b) Redução da escala temporal para melhor análise da curva de saída.	47
Figura 21 – <i>Root-Locus</i> do sistema modelado.	48

Figura 22 – (a) Resposta do sistema megaesôfago chagásico para uma entrada de grau. (b) Redução da escala temporal para melhor análise da curva de saída.	48
Figura 23 – Resposta do sistema, curva vermelha, devida à atuação do controlador orgânico no megaesôfago chagásico quando excitado por uma entrada de grau.	50
Figura 24 – Proposta para o Controlador Orgânico. Adaptado de (AMARIS1 P Z RASHEV2, 2002)	50

Lista de tabelas

Tabela 1 – Média do número de células nervosas em três diferentes níveis do esôfago para pacientes saudáveis e chagásicos com/sem megaesôfago. . . .	25
Tabela 2 – Valores para as constantes da mola e do amortecedor para o esôfago saudável.	36
Tabela 3 – Valores para as constantes da mola e do amortecedor para o megaesôfago chagásico.	37
Tabela 4 – Análogos das variáveis reais na técnica <i>Bond Graph</i> para a Região A: Região da Boca Humana.	60
Tabela 5 – Análogos das variáveis reais na técnica <i>Bond Graph</i> para a Região B: Região da Epiglote.	61
Tabela 6 – Análogos das variáveis reais na técnica <i>Bond Graph</i> para a Região C: Região do EES.	62
Tabela 7 – Análogos das variáveis reais na técnica <i>Bond Graph</i> para a Região D: Região do Esôfago Cervical.	63
Tabela 8 – Análogos das variáveis reais na técnica <i>Bond Graph</i> para a Região E: Esôfago Torácico porção Abdominal.	64
Tabela 9 – Análogos das variáveis reais na técnica <i>Bond Graph</i> para a Região F: EEI.	65

Sumário

1	INTRODUÇÃO	21
1.1	Contextualização	21
1.2	Objetivos do trabalho	22
1.3	Apresentação do manuscrito	22
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	23
2.1	O esôfago humano	23
2.2	A Doença de Chagas e o megaesôfago	24
2.3	O Conceito de Controle Orgânico	27
3	METODOLOGIA	31
3.1	Modelo <i>Bond Graph</i> do processo de ingestão do alimento desde a boca até o Esfíncter Esofágico Inferior	31
3.2	Modelo Matemático I para o esôfago saudável e o megaesôfago chagásico: análogo mecânico	34
3.2.1	Parâmetros do sistema esôfago saudável	35
3.2.2	Parâmetros do sistema megaesôfago chagásico	36
3.2.3	Simulação do modelo no <i>SimscapeTM</i>	37
3.3	Modelo Matemático II para o esôfago saudável e o megaesôfago chagásico: análogo mecânico	38
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	43
4.1	Análise Dinâmica	43
4.1.1	Análise Dinâmica para o Modelo Matemático I	43
4.1.2	Análise Dinâmica para o Modelo Matemático II	46
4.2	Projeto do Controlador Orgânico para o Modelo Matemático I	48
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS E TRABALHOS FUTUROS	51
	Referências	53
	APÊNDICES	57
	APÊNDICE A – PARÂMETROS DO SISTEMA	59

1 Introdução

1.1 Contextualização

O transporte do bolo alimentar através do esôfago segue a partir das estimulações neurais e das respostas de contração da parede muscular do esôfago, gerando forças peristálticas que são responsáveis por deslocarem o bolo até o fim do órgão (NICOSIA; 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. Como resultado da desnervação intrínseca, verifica-se incoordenação motora, retenção de alimentos, hipertrofia muscular e, finalmente, dilatação, levando à formação do megaesôfago chagásico (SANCHEZ-LERMEN et al., 2007), (CÔBO et al., 2012), (DIAS; COURA, 1997).

Um modelo permite a compreensão do comportamento e dos papéis desempenhados pelos vários componentes de um sistema. Além disso, o modelo matemático, por exemplo, de um sistema biológico, é a tentativa de estabelecer equações dinâmicas que indicam a relação de interferência dos parâmetros do sistema com o valor da taxa de variação temporal. Assim, esse trabalho irá propor um modelo matemático simplificado do esôfago humano que permitirá a compreensão da dinâmica do órgão quando acometido pela Doença de Chagas.

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 (OLIVEIRA et al., 1998), e por ser atualmente um problema de saúde pública não restrito apenas à áreas endêmicas (América Latina). Vários estudos (LEE et al., 2013), (BERN et al., 2007), (OLIVEIRA et al., 1998) abordam os impactos da doença de Chagas em países como o Canadá e os Estados Unidos. No Brasil estima-se que há entre 8 milhões e 10 milhões de portadores da doença de Chagas, o que a enquadra entre as 4 principais endemias no país. Nos EUA, estima-se 100.000 infectados (BERN et al., 2007). Os gastos globais e anuais com a doença chega a aproximadamente \$627 milhões de acordo com (LEE et al., 2013). Não existe tratamento efetivo para a doença. As drogas disponíveis apenas matam os parasitas extracelulares e as lesões nervosas causadas são irreversíveis (ARGOLO et al., 2008).

1.2 Objetivos do trabalho

O objetivo desse projeto é estudar a dinâmica do comportamento do esôfago humano na Doença de Chagas em função da velocidade e deslocamento do bolo alimentar, e então comparar com o comportamento do órgão saudável. Para isso, serão identificadas e calculadas as variáveis significativas no sistema biológico sob estudo, e então propor um modelo matemático para representar a dinâmica do sistema. Por fim, por meio das análises temporais e resultados, será projetado um controlador para reversão do quadro de aperistaltismo no megaesôfago chagásico e tratamento da doença.

1.3 Apresentação do manuscrito

No capítulo 2 são apresentadas revisões bibliográficas sobre o esôfago, o megaesôfago chagásico e o conceito de Controle Orgânico. Em seguida, o capítulo 3 traz em detalhes a metodologia para o cálculo dos parâmetros dos sistemas, a construção dos modelos matemáticos, simulação e a resposta em malha aberta dos sistemas. No capítulo 4 são apresentados e analisados os resultados obtidos. Por fim, no capítulo 5 são apresentadas as conclusões e considerações finais.

2 Fundamentação teórica

2.1 O esôfago humano

O esôfago é um tubo fibro-músculo-mucoso que se estende entre a faringe e o estômago. No adulto, possui comprimento médio de 25cm e diâmetro lateral de 3cm . É formado por três porções: porção cervical, porção torácica e porção abdominal. O esôfago cervical tem cerca de 5cm de comprimento, começa abaixo do esfíncter esofágico superior (EES) e vai até a 1ª vértebra torácica. O esôfago torácico mede de 16 a 18cm de comprimento. Ao entrar no tórax, o trajeto do esôfago deixa de ser retilíneo, desviando-se ligeiramente para a esquerda, cruzando o brônquio esquerdo. Nessa porção, o esôfago se situa entre as vértebras, a traquéia e os pulmões (ROSA, 2009).

No indivíduo vivo o órgão não é rígido: os pulmões, o coração e grandes artérias estão em pulsação rítmica, e além disso o esôfago distende-se na medida em que o bolo alimentar passa através dele. Existe também, dentro dessa estrutura, uma fixação do esôfago ao brônquio principal esquerdo, através do músculo bronco-esofágico. À direita, o órgão é cruzado pelo arco da veia ázigos. Já à esquerda, o esôfago está relacionado com o nervo laríngeo recorrente esquerdo, com as artérias carótida e subclávia esquerdas, com o ducto torácico e o arco da aorta que promove o estreitamento brocoaórtico. Na porção infrabrônquica, o esôfago desvia-se ligeiramente para a linha média a alguns centímetros acima do diafragma. Ao passar por trás do coração, desvia-se outra vez para a esquerda. O esôfago está posteriormente a coluna dorsal (nível entre a 4ª e a 11ª vértebra torácicas), a aorta descendente, a veia ázigos e o ducto torácico, além dos segmentos da reflexão pleural (TORTORA, 2000). A Figura (1) mostra o sistema estudado.



Figura 1: Desenho feito à mão do sistema estudado.

A função básica do esôfago é transportar o material deglutido da boca ao estômago.

Em sua extensão possui um esfíncter em cada extremidade com a finalidade de mantê-lo vazio, evitando a entrada de ar na parte superior e de conteúdos gástricos na parte inferior. Ao avaliar os mecanismos de controle fisiológico que envolve esse órgão, a musculatura do esôfago responsável pela motilidade do órgão é formada por uma camada circular (interna) e uma longitudinal (externa). As fibras musculares encontradas nos 55 a 60% distais do esôfago são do tipo liso, ao passo que, nos 10% proximais, são estriadas; na porção intermediária, mesclam-se fibras lisas e estriadas (DANTAS; ALVES; NASCIMENTO, 2010), (TRAWITZKI; DANTAS; MELLO-FILHO, 2010).

Por meio do movimento voluntário da língua, é originada uma onda peristáltica involuntária, a qual percorre rapidamente a faringe, alcançando o esfíncter esofágico superior, produzindo um relaxamento rápido e coordenado, seguido por uma contração pós-deglutição. Quando a onda peristáltica começa a propagar, as células da camada circular se comprimem causando uma força contrátil. Conseqüentemente, a contração peristáltica atua como uma força externa na estrutura celular e progride a uma velocidade média de 2 cm/s (MISRA; MAITI, 2012). O processo é ilustrado na Fig. (2) .

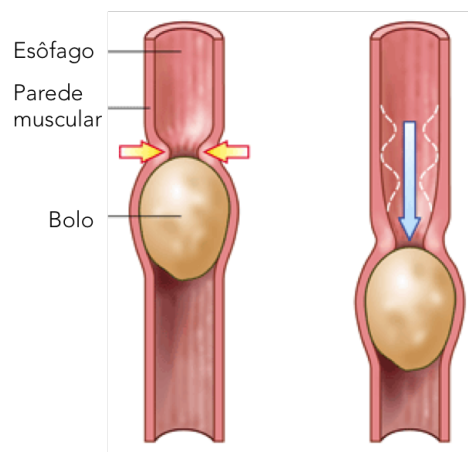


Figura 2: Propagação da onda peristáltica. Imagem adaptada de (CAMPBELL; WILLIAMSON; HEYDEN, 2003).

2.2 A Doença de Chagas e o megaesôfago

A doença de chagas é causada pelo protozoário parasita *Trypanossoma cruzi*, geralmente transmitido por triatomíneos infectados. A transmissão também ocorre por meio da transfusão de sangue ou transplante de órgãos, de mãe para o filho, e pela ingestão de comidas e bebidas contaminadas (BERN et al., 2007).

Os gastos econômicos da doença de Chagas é similar ou ultrapassa a de doenças globais eminentes, tais como rotavirus ou cancer do cólo do útero, mesmo nos Estados Unidos e Canadá, países onde a doença de Chagas não é tradicionalmente endêmica, o que

sugere um forte argumento para maior atenção e maiores esforços no controle da doença de Chagas (LEE et al., 2013).

A evolução da doença se dá em duas fases: uma fase aguda, com duração aproximada de 60 dias e uma fase crônica, com duração indefinida (FIGUEIRÊDO et al., 2002). A doença de Chagas está associada com a diminuição do plexos de Auerbach e Meissner. Além disso, ocorrem lesões pré-ganglionares e a redução no número de células do núcleo motor dorsal do vago (TANOWITZ et al., 1992).

No trabalho publicado por (KOBBERLF, 1959) é apresentada uma análise quantitativa da mudança em números das células ganglionares para pacientes chagásicos com ou sem megaesôfago em comparação com pacientes com esôfago normal. A Tabela (1) apresenta a média do número de células nervosas em três diferentes níveis do esôfago para uma amostra de área da parede esofágica.

Tabela 1: Média do número de células nervosas em três diferentes níveis do esôfago para pacientes saudáveis e chagásicos com/sem megaesôfago.

Classificação	Superior	Meio	Inferior
Esôfago normal	445	778	1003
Pacientes com Chagas mas com o esôfago normal	122	261	391
Paciente com megaesôfago chagásico	0.1	1.5	2.7

As alterações que ocorrem no tracto digestivo na doença de Chagas resultam principalmente dos fenômenos degenerativos das células nervosas do sistema nervoso entérico (DIAS; COURA, 1997). Embora a desnervação ocorra ao longo de todo o tubo digestivo, o esôfago é um dos segmentos mais afetados. Assim, como resultado da desnervação intrínseca verifica-se incoordenação motora, retenção de alimentos, hipertrofia muscular e, finalmente, dilatação, levando a formação do megaesôfago. Nos casos avançados o esôfago se comporta como uma bolsa intratorácica de depósito de alimento (DIAS; COURA, 1997). O megaesôfago pode atingir um peso 26 vezes superior ao normal e suportar até dois litros de fluido (TANOWITZ et al., 1992).

Pacientes com megaesôfago chagásico possuem aperistaltismo do corpo esofágico e as amplitudes de contração são inferiores às amplitudes em pacientes saudáveis (FERREIRA-SANTOS, 1968). Estudos manométricos de pacientes sintomáticos têm demonstrado que, após o início da ingestão do alimento, o peristaltismo ocorre aproximadamente 20% do tempo, enquanto em indivíduos saudáveis, o peristaltismo ocorre mais que em 50% do tempo (PINOTTI et al., 1988).

Disfagia, regurgitação, dor esofagiana espontânea, odinofagia, pirose, obstipação intestinal, desnutrição, sialose com hipertrofia das glândulas salivares e manifestações pulmonares são as mais usuais apresentações clínicas relacionadas ao megaesôfago (VAZ et al., 1995). O exame radiológico constitui o método mais importante no diagnóstico da

esofagopatia chagásica, sendo necessária avaliação dinâmica por meio de intensificador de imagem para ideal configuração morfo-funcional (FIGUEIRÊDO et al., 2002).

A presença dos sintomas acima listados estão associados com a perda de peristaltismo, implicando na dilatação de toda a extensão do órgão. Estudos das pressões do esfíncter esofágico inferior (EEI) em pacientes com a doença de Chagas têm demonstrado resultados variáveis (TANOWITZ et al., 1992), o que permite concluir que possíveis disfunções do EEI não seriam a causa da moléstia.

O megaesôfago pode ser classificado em 4 graus de acordo com o diâmetro transversal da imagem do esôfago e pelo tempo de estase. Abaixo segue a classificação proposta por (FERREIRA-SANTOS, 1968). Na Fig. (3) são apresentados estágios do desenvolvimento do megaesôfago chagásico.

Grau I – Dilatação moderada, até 4 cm de diâmetro transversal. Estase pequena aos 5 minutos;

Grau II – Dilatação até 7 cm de diâmetro transversal. Estase aos 30 minutos;

Grau III – Dilatação até 10 cm de diâmetro transversal, alongamento sigmóide do esôfago (dolicoesôfago). Estase pronunciada aos 30 minutos. Resíduo alimentar, dando ao contraste imagem de flocos;

Grau IV – Dilatação maior que 10 cm de diâmetro transversal. Imagem sem contraste, dado apenas pelo resíduo alimentar.

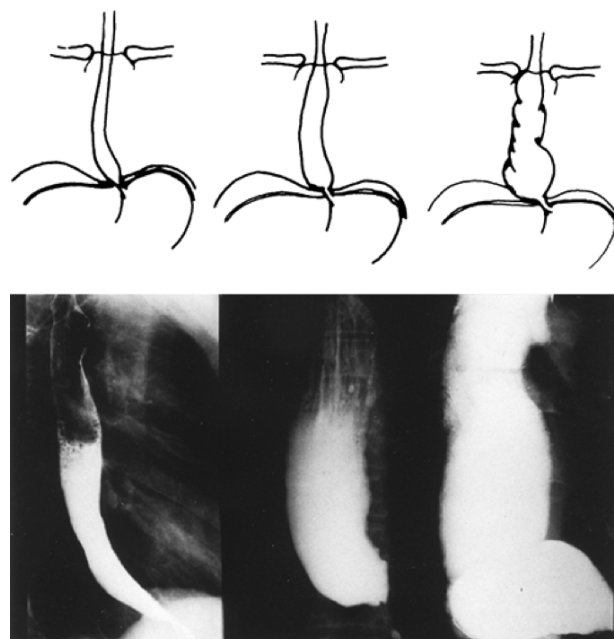


Figura 3: Estágios do desenvolvimento do megaesôfago chagásico (REZENDE, 1984).

Além disso, de acordo com (PINOTTI et al., 1988), uma segunda classificação é possível tendo como referência o comportamento funcional do esôfago à eletromanometria. Assim temos:

Megaesôfago avançado: pressão do corpo esofágico menor que 15 mmHg;

Megaesôfago não avançado: pressão do corpo esofágico maior que 15 mmHg.

Atualmente, não há um tratamento definitivo para o megaesôfago. É uma doença na qual as alterações funcionais são permanentes e progressivas (TANOWITZ et al., 1992). Todas as propostas terapêuticas apenas aliviam os sintomas (SORITA et al., 2005). O tratamento cirúrgico indicado em casos não avançados não corrigem a desordem funcional do órgão e os principais sintomas são recorrentes (LOPES et al., 2011). Para o Grau I é indicada a dilatação forçada ou cirúrgica. Nos Graus II e III tanto pode ser empregada a dilatação como o tratamento cirúrgico pela cardiomiectomia com procedimento anti-refluxo. Já para o Grau IV, a dilatação, além, de tecnicamente mais difícil, oferece resultados pouco satisfatórios, a tendência mais comum é recorrer a operações mais radicais como a esofagectomia com esofagogastroplastia (DIAS; COURA, 1997). Porém de acordo com (OLIVEIRA et al., 2009), as complicações cirúrgicas são maiores com o aumento do grau do megaesôfago, de tal forma que de acordo com o estudo os pacientes de Grau IV quando submetidos a esofagectomia, as complicações cirúrgicas graves ocorrem em 85% dos casos.

2.3 O Conceito de Controle Orgânico

A partir de uma perspectiva da engenharia, o comportamento mecânico do esôfago humano pode ser considerado como um sistema no qual a entrada é uma força ocasionada pelas alterações de pressões entre a parte inferior da faringe e o esfíncter esofágico superior devido à passagem do alimento. Já a saída desse sistema é o deslocamento do alimento pelo esôfago até o estômago, que é uma função das variáveis de estado.

A propriedade mais importante dos sistemas biológicos, tal como o processo citado acima de passagem do bolo alimentar pelo esôfago, é que eles podem alcançar objetivos de alta complexidade e mesmo na presença de ruídos, flutuações ou mudanças bruscas e imprevisíveis. Com o objetivo de ajustar ou alterar as características dinâmicas da planta caracterizada por esses sistemas biocomplexos, surge o conceito de Controle Orgânico. Uma das principais razões da necessidade de ajuste ou alterações da dinâmica da planta de um sistema biológico, tal como o da passagem do bolo alimentar pelo esôfago, é por razões médicas, apresentando-se como uma solução de engenharia biomédica para tratamento de uma patologia. No caso em estudo, seria necessário um projeto de

controlador para alterar a dinâmica de um esôfago acometido pela Doença de Chagas. O controlador seria responsável por propagar ondas artificiais peristálticas pelo órgão doente, permitindo assim que as atividades dinâmicas sejam restauradas e o alimento então possa ser deslocado até o estômago. Ou seja, a técnica de Controle Orgânico viabiliza o estudo de sistemas biológicos e contribui para o projeto de arquiteturas de controle para alcançar comportamentos dinâmicos complexos

Dessa forma, a intervenção de um controlador orgânico tem o objetivo de não apenas ter uma performance padrão, mas por meio do seu material de fabricação, o látex natural, e ou por sensoriamento, o controlador é capaz de gerar uma interferência inteligente no sistema. O látex, matéria prima do Controlador Orgânico, extraído da seringueira (*Hevea brasiliensis*), após tratamento térmico e químico, apresenta importantes propriedades biológicas, como por exemplo: atividade neoangiogenica, promoção de adesão celular e formação de matriz celular (MRUÉ, 2000), promovendo assim, a cicatrização mais rápida de tecidos lesados, hidratação tecidual, biocompatibilidade e potencializando a resposta de saída do Controlador Orgânico.

A importância do conceito de Controle Orgânico justifica-se na necessidade de uma nova abordagem de controle para sistemas biológicos, que são geralmente sistemas complexos com dinâmica não-linear e de alta dimensão, já que não podem ser aplicados os métodos tradicionais para projeto de controladores.

O controlador orgânico a ser projetado atua em paralelo a planta e recebe a mesma entrada. Sua saída é adicionada a saída do sistema e pode ser monitorada via sensoria-mento que permitirá automatização e melhores correções do sinal de saída. Para o exemplo do megaesôfago chagásico, a Fig. (4) apresenta o diagrama de blocos da atuação do controlador orgânico.

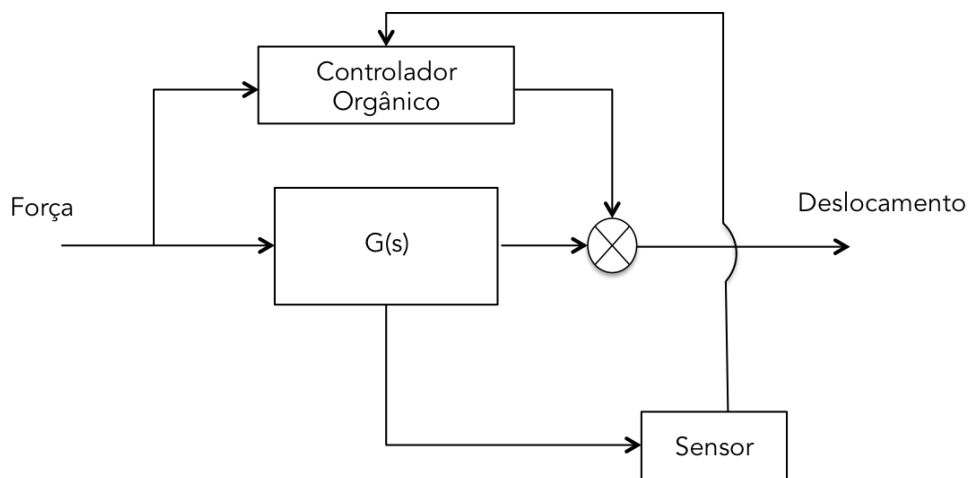


Figura 4: Diagrama em blocos para o sistema Megaesôfago Chagásico.

O controlador orgânico será o principal responsável pela a performance das atividades dinâmicas do sistema de controle, já que ele irá, nesse caso, compensar o baixo

desempenho do megaesôfago chagásico (aqui representado pela planta $G(s)$). Contudo, como pode-se observar, o controlador é parcialmente isolado da complexidade da planta física. O sensor recebe informações sobre as variáveis de estado da planta e envia para o controlador orgânico na tentativa de melhorar a performance global.

3 Metodologia

3.1 Modelo *Bond Graph* do processo de ingestão do alimento desde a boca até o Esfíncter Esofágico Inferior

A combinação de três domínios, mecânico translacional, mecânico rotacional e hidráulico, foi proposta para construir o modelo *Bond Graph* do processo de ingestão do alimento desde a boca até o fim do esôfago. O análogo mecânico-hidráulico projetado pode ser conferido na Figura (5).

Para representação simplificada de todo o processo, o sistema foi subdividido em 6 regiões (A, B, C, D, E e F) explicadas abaixo. A descrição e a equivalência de cada constante do sistema real com o seu análogo podem ser conferidas nos Apêndices do trabalho.

- Região A

A região da boca recebe o alimento via uma fonte de esforço. Em termos gerais existem duas variáveis generalizadas – esforço e fluxo, cujo produto representa a potência no sistema. No caso do sistema modelado a potência se refere à condução do bolo alimentar. O processo de recebimento do alimento foi representado pelo análogo mecânico translacional. Para o processo mastigatório foi feito um análogo ao sistema hidráulico. Aproximou-se o sistema a um cilindro hidráulico, no qual o processo possui pressão, vazão, resistência fluídica e capacitância fluídica. Algumas considerações foram adotadas tais como: fluido compressível, fluxo laminar com perdas e massa específica constante. Nesse caso a variável de esforço (que no *Bond Graph* é a pressão) se manterá a mesma.

- Região B

Ao sair da boca, a vazão Q_0 , que correspondente ao bolo alimentar mais a saliva, entra na região B, que corresponde à região final da boca e a faringe, passando pela epiglote. A partir desse momento o escoamento através do orifício será análogo a um escoamento laminar, já que $Re < 1100$, conforme (GARCIA, 2009). Nesta região foi considerada uma resistência fluídica R_{F_i} ($i=1,2,3$ e 5) que se refere à perda de carga ao longo do sistema.

- Região C

A saída dessa região gera uma vazão Q_1 e uma pressão P_{3_x} que se refere à passagem do bolo alimentar pela região C. Esta região do sistema é similar ao escoamento

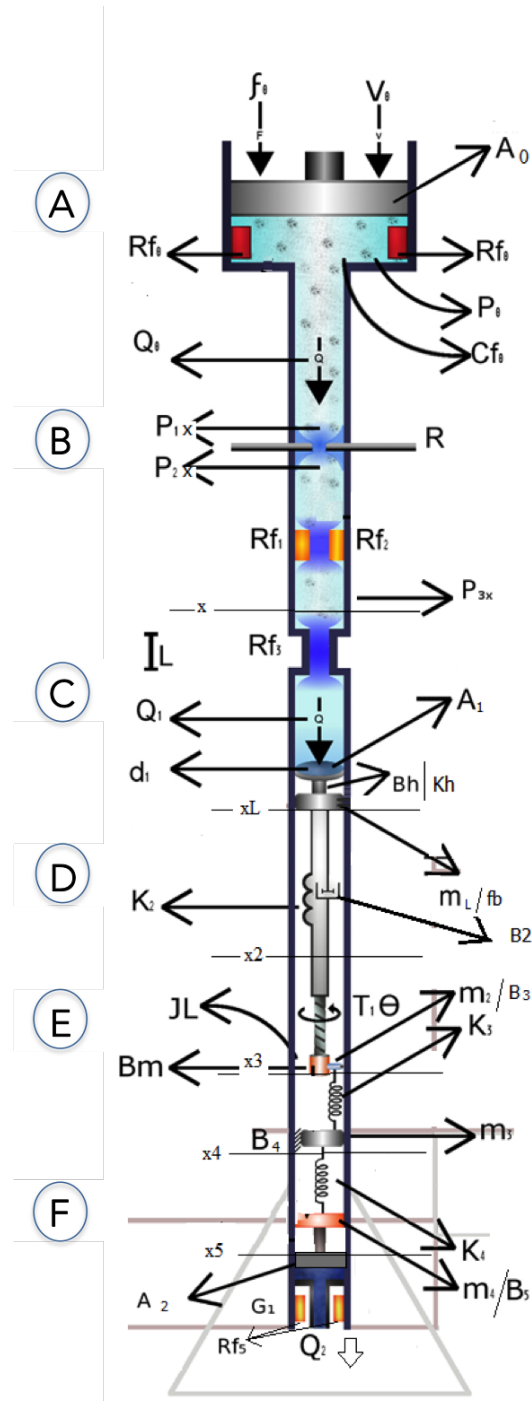


Figura 5: Representação mecânica e hidráulica análoga ao sistema de ingestão do alimento, e suas variáveis e constantes.

através de um tubo capilar, que será considerado laminar (linear), entretanto rugoso devido ao atrito. Nessa região devido às veias ázigas, arco aorta e à influência da vértebra foram consideradas, com a mudança do domínio de energia hidráulico para mecânico translacional, uma perda de pressão e uma variação da vazão.

- Região D

Na região D, o material ingerido é propelido ao longo da luz do esôfago, em direção

caudal, por dois tipos de forças: a força gravitacional, sempre que a deglutição tenha sido feita em posição erecta, e a força de contração do tipo peristáltico, executados pela musculatura do próprio órgão e capaz de movimentar o conteúdo em direção crânio-caudal, mesmo com o corpo em posição supina ou contra a força gravitacional. Em posição erecta, o trânsito esofágico se faz em até 10 segundos. O movimento propulsivo que, depois da ingestão, percorre toda a extensão do esôfago em sentido crânio-caudal é denominado peristaltismo primário. O peristaltismo desencadeado pela presença de algum material sólido ou líquido na luz do órgão, independente da deglutição, é chamado de secundário (GUYTON, 2002). Nessa região estão presentes: Traquéia, Ducto Torácico, Nervo Laríngeo (músculo da parede), os pulmões esquerdo e direito, e os vasos. Na transição entre a faringe e o esôfago, em zona relacionada anatomicamente com o músculo cricofaríngeo, encontra-se o EES, formado por musculatura estriada inervada.

- Região E e F

As etapas E e F do circuito se referem ao esôfago na porção abdominal, entre o corpo do esôfago e o estômago, incluindo o EIE. O EIE é caracterizado por ser uma zona de 2 a 4 cm de extensão com pressão superior à do estômago e, por isso, constitui uma eficiente barreira contra o refluxo gastro-esofágico (FERNANDES, 2006). Nessa região buscou-se representar todo o processo de interferência pleural, variação da musculatura e variação dos valores das ondas de pressão. O EIE pode apresentar contrações espontâneas e relaxamento incompleto, a representação para tais fenômenos foi feita pela mudança de domínio e a resistência R_{F_5} .

O modelo em *Bond Graph* proposto para o sistema de ingestão do alimento foi construído utilizando o software de simulação *20-simTM*. Apenas uma causalidade foi identificada, a derivativa. A causalidade determina como o elemento generalizado pode armazenar energia e interagir produzindo as relações dinâmicas do sistema. Na Figura (6) é possível conferir a modelagem em linguagem *Bond Graph* obtida.

Para obtenção das equações em espaço de estados o sistema foi simplificado via o software *20-simTM*. A Figura (7) mostra o diagrama simplificado. Nesse processo de simplificação o *software* analisou os receptores de potência e energia e eliminou as redundâncias. Após o modelo em *Bond Graph* simplificado foram obtidas as equações para a construção da matriz de espaço de estados do sistema em estudo.

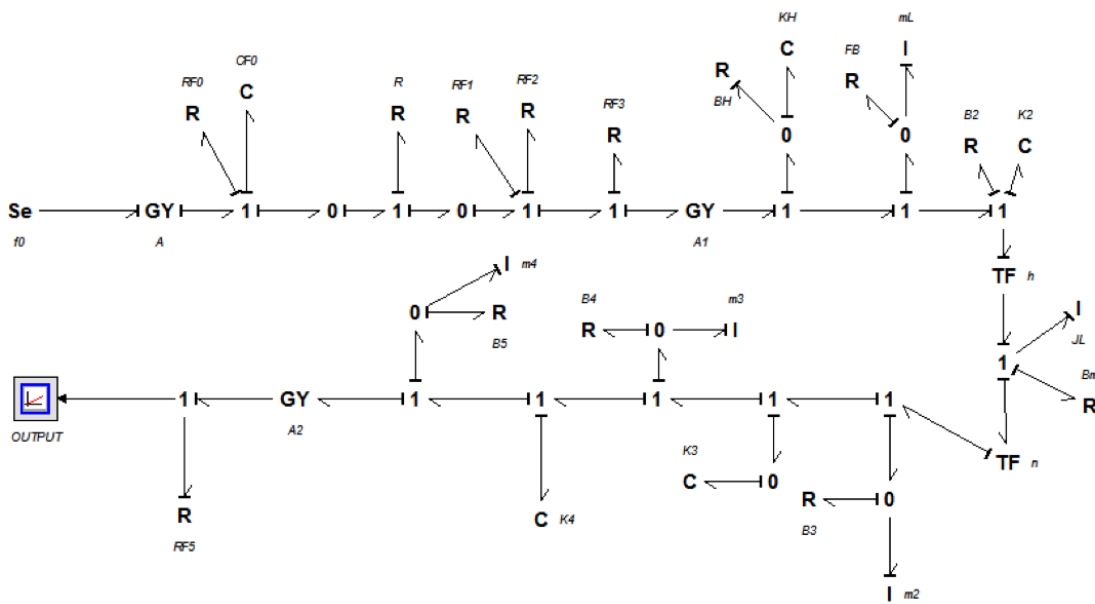


Figura 6: Modelo *Bond Graph* do processo de ingestão do alimento desde a boca até o EEI.

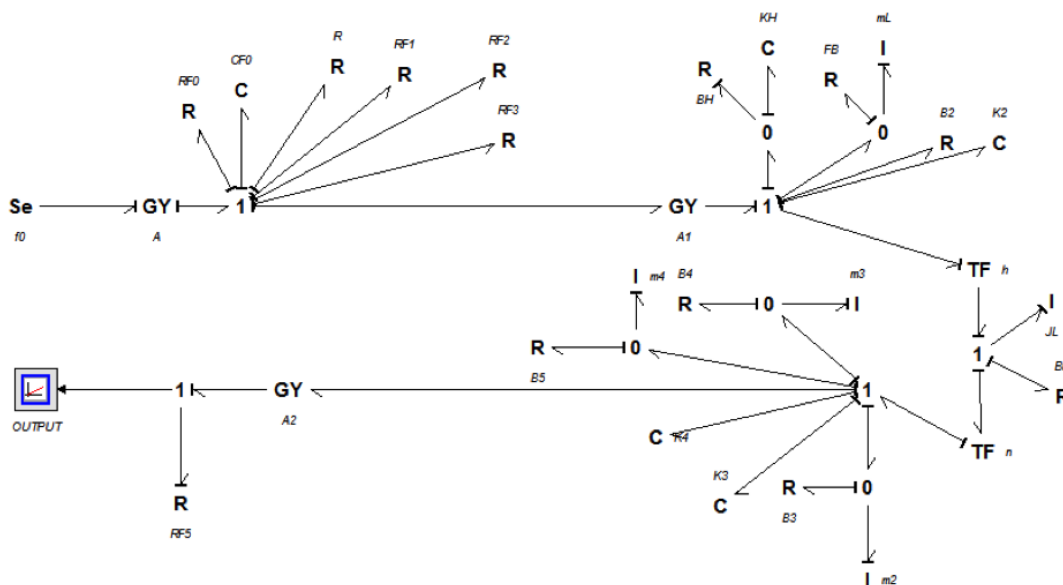


Figura 7: Modelo *Bond Graph* simplificado do processo de ingestão do alimento desde a boca até o EEI.

3.2 Modelo Matemático I para o esôfago saudável e o megaesôfago chagásico: análogo mecânico

Devido à complexidade do sistema modelado para a ingestão do alimento, que compreendeu desde o processo mastigatório até a entrada do bolus no intestino, foi necessário propor um novo modelo simplificador da dinâmica do esôfago.

Assim, a passagem do alimento pelo esôfago a partir das ondas de contração peristáltica é compreendida por meio de um simples modelo massa-mola-amortecedor, Figura (8).

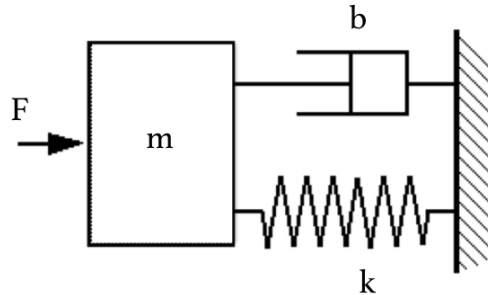


Figura 8: Modelo massa-mola-amortecedor análogo ao esôfago.

O modelo permite apresentar a dinâmica do sistema, em termos da velocidade e deslocamento, a partir da atuação de uma força externa F , que é a contração peristáltica. Essa força é representada por um pulso de 7 segundos, visto que de acordo com a literatura (SHERWOOD, 2007) essa é a média de tempo para a onda peristáltica chegar ao fim do esôfago.

A modelagem do comportamento do esôfago foi possível considerando as variáveis do sistema real que implicariam na restrição da passagem do bolus e fazendo suas analogias ao sistema massa-mola-amortecedor. Assim, os valores para a constante da mola, k , e do amortecedor, b , são calculados a partir do diâmetro do órgão, da velocidade da onda peristáltica e dos diferentes valores de pressão na extensão do esôfago.

A partir dos estudos de manometria na literatura (BASSOTTI et al., 1988), (FERREIRA-SANTOS, 1968), é possível obter os valores de pressão no esôfago durante a peristalse devido à ingestão de 5ml de água. Na Figura (9) são apresentados os valores de pressão em 4 pontos de estudo no esôfago saudável e no megaesôfago chagásico.

Para a cálculo de k e b seguem as equações adotadas:

$$k = \frac{\text{pressão}[\frac{N}{m^2}] \times \text{área}[m^2]}{\text{posição}[m]} \quad (3.1)$$

$$b = \frac{\text{pressão}[\frac{N}{m^2}] \times \text{área}[m^2]}{\text{velocidade}[\frac{m}{s}]} \quad (3.2)$$

3.2.1 Parâmetros do sistema esôfago saudável

Para o cálculo das constantes da mola e do amortecedor foram adotados os valores de 2 cm/s para velocidade da onda peristáltica (TOKLU, 2011) e 3 cm para diâmetro

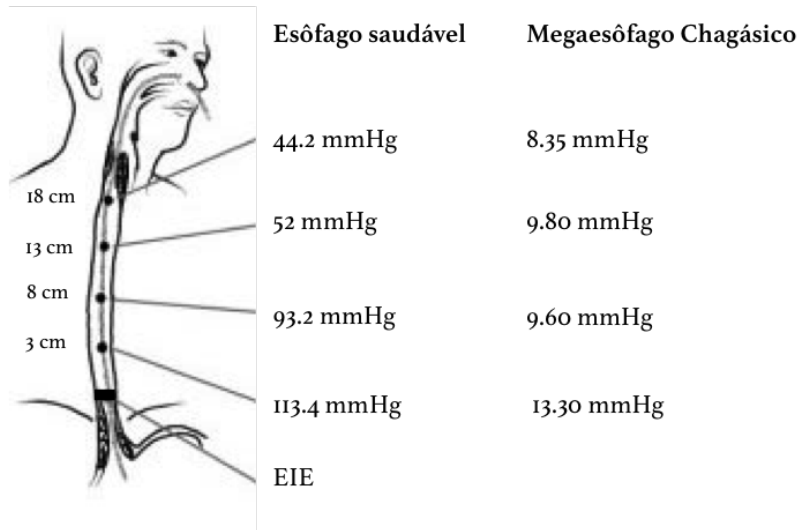


Figura 9: Distribuição dos valores de pressão em 4 pontos de estudo no esôfago saudável e no megaesôfago chagásico. Valores de posição referentes à distância em relação ao EIE.

Tabela 2: Valores para as constantes da mola e do amortecedor para o esôfago saudável.

P	$k_i = \left[\frac{N}{m}\right]$	$b_i = \left[\frac{N \times s}{m}\right]$
P_1	356,277	534,341
P_2	109,790	439,159
P_3	37,696	245,024
P_4	23,14	208,271

do esôfago (BASSOTTI et al., 1988). A Tabela (2) apresenta os valores obtidos para o esôfago saudável.

Como em (BASSOTTI et al., 1988) são analisados quatro pontos de pressão espaçados em 5 cm ao longo do esôfago, assim haverá apenas uma mola resultante da associação em paralelo das quatro molas (k_1 , k_2 , k_3 e k_4) e um amortecedor resultante da associação em paralelo dos quatro amortecedores (b_1 , b_2 , b_3 e b_4). Dessa forma, o valor resultante de k e b considerados para a simulação são:

$$\frac{1}{k_{eq}} = \sum_{i=1}^4 \frac{1}{k_{eqi}} = \frac{1}{12.246} \left[\frac{N}{m}\right] \quad (3.3)$$

$$\frac{1}{b_{eq}} = \sum_{i=1}^4 \frac{1}{b_{eqi}} = \frac{1}{76.739} \left[\frac{Ns}{m}\right] \quad (3.4)$$

3.2.2 Parâmetros do sistema megaesôfago chagásico

Os valores de pressão e diâmetro do megaesôfago foram obtidos em (FERREIRA-SANTOS, 1968). Esse estudo manométrico também foi avaliado em quatro pontos espa-

çados de 5 cm ao longo da extensão do órgão quando acometido pela doença de Chagas. Além disso, o valor do diâmetro do órgão é 6 cm.

Assim, o valor da constante da mola do sistema será a associação em paralelo das outras quatro molas (k_1 , k_2 , k_3 e k_4) e o valor da constante do amortecedor também será resultante da associação em paralelo dos quatro amortecedores (b_1 , b_2 , b_3 e b_4). Dessa forma, o valor resultante de k e b considerados para a simulação são:

$$\frac{1}{k_{eq}} = \sum_{i=1}^4 \frac{1}{k_{eq_i}} = \frac{1}{8.301} \left[\frac{N}{m} \right] \quad (3.5)$$

$$\frac{1}{b_{eq}} = \sum_{i=1}^4 \frac{1}{b_{eq_i}} = \frac{1}{4698.424} \left[\frac{Ns}{m} \right] \quad (3.6)$$

Na Tabela (3), é possível conferir cada um dos valores para a constante da mola e do amortecedor em cada um dos quatro pontos.

Tabela 3: Valores para as constantes da mola e do amortecedor para o megaesôfago chagásico.

P	$k_i = \left[\frac{N}{m} \right]$	$b_i = \left[\frac{N \times s}{m} \right]$
P_1	167,119	25067,855
P_2	45,235	18094,089
P_3	28,417	18471,043
P_4	17,487	15738,088

3.2.3 Simulação do modelo no *Simscape*TM

Para as análises dinâmicas dos dois sistemas foi construído o modelo físico massa-mola-amortecedor no programa *Simscape*TM. A Figura (10) apresenta o diagrama de blocos para o modelo sob estudo.

Considerando que de acordo com os dados de manometria em (JOHNSON, 1997) a pressão na saída da faringe é de aproximadamente 60mmHg e seu diâmetro é de 2cm. Logo, a força calculada que atua na área do esfíncter esofágico superior é de aproximadamente 5N.

Para as análises da velocidade e deslocamento da massa no esôfago saudável e no megaesôfago chagásico são apenas modificados os valores para k e b . O sinal de entrada será um pulso de 7 segundos com 5N de amplitude, equivalente ao tempo necessário para a onda peristáltica chegar até o fim no esôfago.

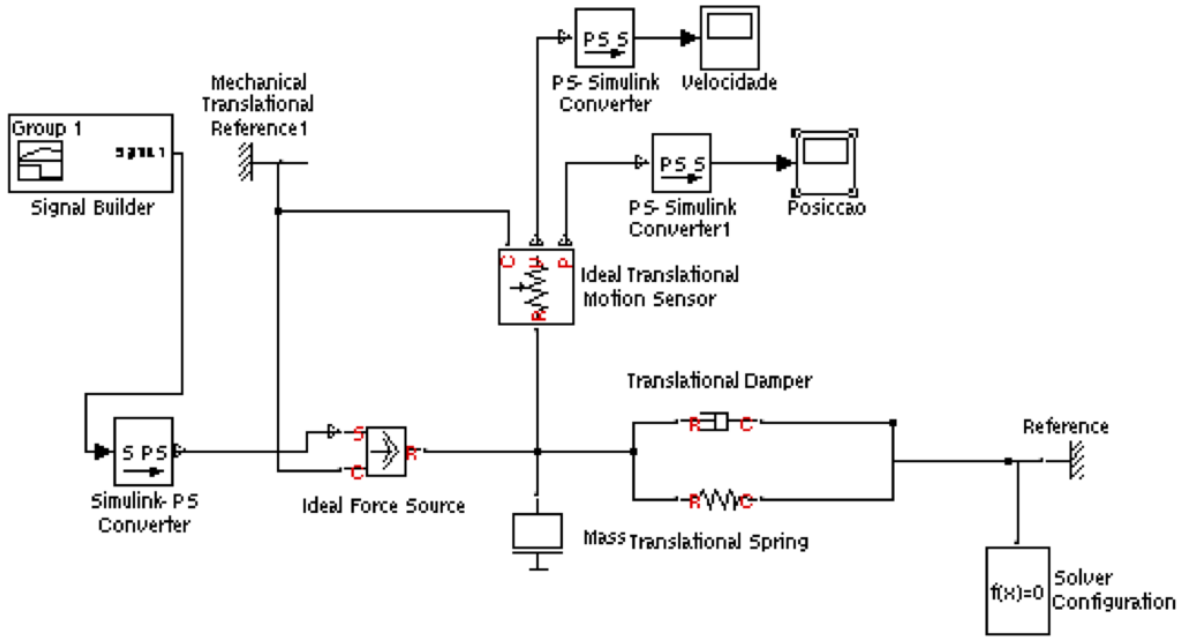


Figura 10: Diagrama em blocos no programa *Simscape*TM para o sistema massa-mola-amortecedor sob estudo.

3.3 Modelo Matemático II para o esôfago saudável e o megaesôfago chagásico: análogo mecânico

Após a proposta apresentada pelo Modelo Matemático I para a modelagem do comportamento dinâmico do esôfago humano, é introduzida uma segunda proposta mais complexa de um modelo mecânico massa-mola-amortecedor, Figura (11), como uma representação alternativa para compreender o comportamento do esôfago humano quando acometido pela Doença de Chagas.

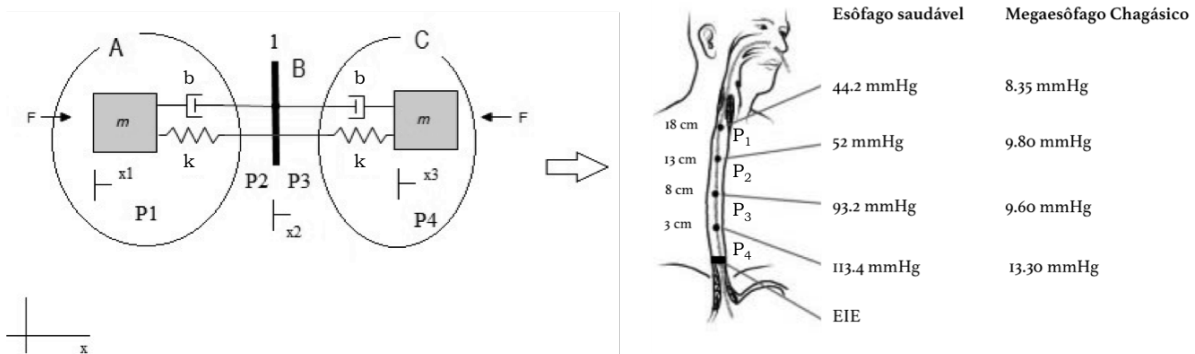


Figura 11: Modelo Matemático II para representação do comportamento do esôfago humano.

O modelo da Figura (11) compreende uma simplificação do modelo apresentado pela Figura (12) por meio da associação em paralelo de todos os valores de molas e

amortecedores já definidos no Modelo Matemático I para cada um dos quatro pontos de pressão durante toda a extensão do esôfago sob análise.

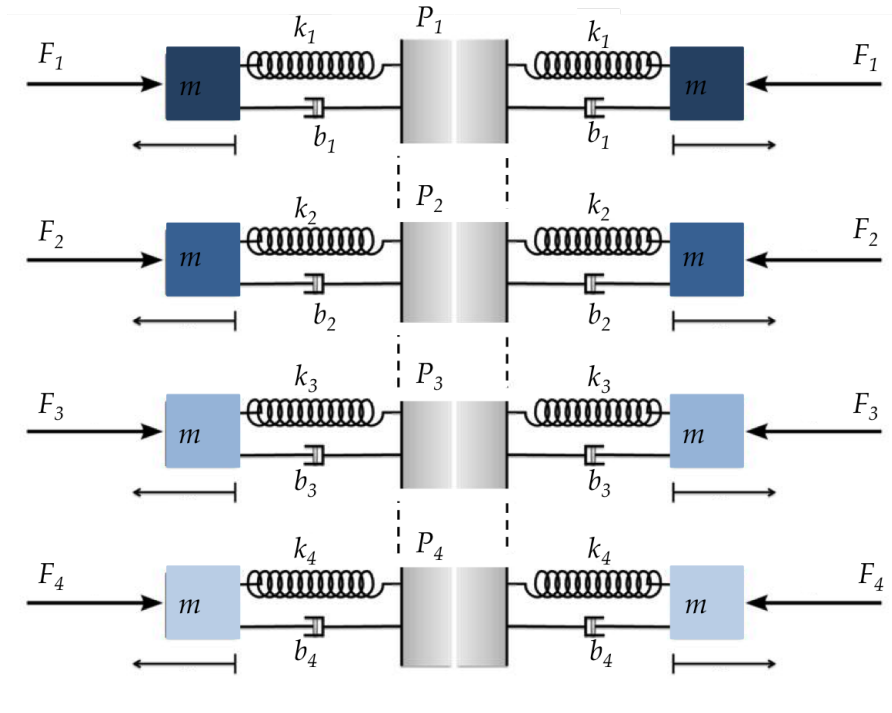


Figura 12: Modelo Matemático II para representação do comportamento do esôfago humano. Diagrama precedente à associação em série dos elementos molas e amortecedores.

A região A, Figura (11), implica na redução da amplitude no esôfago chagásico em comparação com o esôfago saudável. A região B representa o acréscimo de velocidade na parte média do esôfago e, por fim, a região C representa a diminuição da pressão do esfíncter inferior, o que reflete no esvaziamento do esôfago.

Para a obtenção das equações de movimento a partir do novo modelo proposto, algumas hipóteses simplificadoras foram adotadas:

- a parede do esôfago é uniforme ao longo do comprimento;
- a barra que representa o bolo alimentar é rígida com parâmetros concentrados;
- os elementos mecânicos mola e amortecedor do modelo análogo possuem massa desprezível em relação ao restante do conjunto;
- as massas calculadas são consideradas uniformes ao longo do comprimento do esôfago com ou sem Doença de Chagas;
- o movimento analisado é translacional em relação ao eixo x sem deflexões ou vibrações;

- a influência dos órgãos circundantes é desprezadas.

Dessa forma, as entradas do sistema são as forças externas F , que é a contração peristáltica representada por um pulso de 7 segundos, visto que, de acordo com a literatura (SHERWOOD, 2007)], esta é a média de tempo para a onda peristáltica chegar ao fim do esôfago humano. Considerando as equações de equilíbrio do sistema e aplicando as relações constitutivas são obtidas as seguintes equações de movimento para o sistema mecânico translacional apresentado na Figura (11):

$$m\ddot{x}_1 = -b(\dot{x}_1 - \dot{x}_2) - k(x_1 - x_2) + F \quad (3.7)$$

$$k(x_1 - x_2) - k(x_2 - x_3) + b(\dot{x}_1 - \dot{x}_2 + b(\dot{x}_2 - \dot{x}_3)) = 0 \quad (3.8)$$

$$m\ddot{x}_3 = b(\dot{x}_2 - \dot{x}_3) + b(\dot{x}_2 - \dot{x}_3) + k(x_2 - x_3) - k(x_2 - x_3) - F \quad (3.9)$$

Reescrevendo o sistema em espaço de estados, o novo conjunto de equações é dado por:

$$m\ddot{x}_1 = -\frac{b}{m}(\dot{x}_1 - \dot{x}_2) - \frac{k}{m}(x_1 - x_2) + \frac{1}{m}F \quad (3.10)$$

$$(\dot{x}_2 - \dot{x}_3) = -\frac{b}{b}(\dot{x}_1 - \dot{x}_2) - \frac{k}{b} + \frac{k}{b}(x_1 - x_2) + F \quad (3.11)$$

$$\ddot{x}_3 = \frac{b+b}{m}(\dot{x}_2 - \dot{x}_3) + \frac{k+k}{m}(x_2 - x_3) - \frac{1}{m}F \quad (3.12)$$

No sistema de equações anterior, substituindo a Equação 3.11 na Equação 3.12, obtém-se:

$$m\ddot{x}_1 = -\frac{b}{m}(\dot{x}_1 - \dot{x}_2) - \frac{k}{m}(x_1 - x_2) + \frac{1}{m}F \quad (3.13)$$

$$\ddot{x}_3 = \frac{b+b}{m}\left[-\frac{b}{b}(\dot{x}_1 - \dot{x}_2) - \frac{k}{b}(x_1 - x_2) + \frac{k}{b}(\dot{x}_2 - \dot{x}_3)\right] + \frac{k+k}{m}(x_2 - x_3) - \frac{1}{m}F \quad (3.14)$$

O novo sistema de equações ainda pode ser reescrito como:

$$m\ddot{x}_1 = -\frac{b}{m}(\dot{x}_1 - \dot{x}_2) - \frac{k}{m}(x_1 - x_2) + \frac{1}{m}F \quad (3.15)$$

$$\ddot{x}_3 = -\left[\frac{b(b+b)}{b}\right](\dot{x}_1 - \dot{x}_2) - \left[\frac{k(b+b)}{b}\right](x_1 - x_2) + \left[\frac{kb+kb}{mb}\right](x_2 - x_3) - \frac{1}{m}F \quad (3.16)$$

Assim, considerando a notação para equações de espaço de estado, as constantes A, B, C, D e E serão:

$$A = -\frac{b}{m} \quad (3.17)$$

$$B = -\frac{k}{m} \quad (3.18)$$

$$C = -\begin{bmatrix} \frac{b(b+b)}{b} & m \end{bmatrix} \quad (3.19)$$

$$D = -\begin{bmatrix} \frac{k(b+b)}{b} & m \end{bmatrix} \quad (3.20)$$

$$E = \begin{bmatrix} \frac{kb+kb}{mb} \end{bmatrix} \quad (3.21)$$

Logo, o sistema de equações pode ser reescrito em função das suas constantes o que resulta em:

$$m\ddot{x}_1 = A(\dot{x}_1 - \dot{x}_2) - B(x_1 - x_2) + \frac{1}{m}F \quad (3.22)$$

$$\ddot{x}_3 = C(\dot{x}_1 - \dot{x}_2) + D(x_1 - x_2) + E(x_2 - x_3) - \frac{1}{m}F \quad (3.23)$$

A matriz de espaço de estados obtida a partir do sistema 3.16 é dado por:

$$\begin{bmatrix} \dot{y}_1 \\ \dot{y}_2 \\ \dot{y}_3 \\ \dot{y}_4 \\ \dot{y}_5 \\ \dot{y}_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ B & A & -B & -A & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ D & C & -(D-E) & -C & -E & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \\ y_4 \\ y_5 \\ y_6 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{m} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ \frac{-1}{m} \end{bmatrix} u(t)$$

Para a cálculo das constantes da mola, k , e do amortecedor, b , no sistema para o esôfago saudável são adotadas os valores obtidos nas equações 3.3 e 3.4 já introduzidas pelo Modelo Matemático I. Para o megaesôfago chagásico, os valores de k e b são obtidos pelas equações 3.5 e 3.6 que oferecem os valores a serem adotados durante a simulação.

Conforme (C PRAKASH A, 2006), a parede esofágica de um esôfago normal possui espessura média de $0.35cm$, com $28cm$ de comprimento e um raio $3cm$, assim, aproximando

o órgão sob estudo a um cilindro, o volume será de 173.95cm^3 . Dessa forma, a densidade da parede esofágica pode ser calculada pela Equação 3.25

$$P = \rho gh \quad (3.24)$$

Onde P é a pressão média da parede do esôfago normal, ρ a densidade esofagiana da parede dada em g/cm^3 . Para $g = 980\text{cm}/\text{s}^2$ e com $P = 102,9\text{gf}/\text{cm}^2$ ($75,7\text{mmHg}$), tem-se que $\rho = 3,75.10 - 3\text{g}/\text{cm}^3$. Como a massa, m , é dada por:

$$m = \rho V \quad (3.25)$$

é possível concluir que a massa da parede do esôfago saudável é $m = 0.65\text{g}$.

Aplicando o mesmo procedimento para o megaesôfago chagásico, conforme (C PRAKASH A, 2006), a parede de um esôfago chagásico tem espessura média de 0.5cm , com 28cm de comprimento e um raio 6cm , resultando em um volume de $V = 505.79\text{cm}^3$. Dado que P é a pressão média da parede do esôfago chagásico, ρ é a densidade esofagiana da parede e considerando a aceleração da gravidade de $g = 980\text{cm}/\text{s}^2$, logo os valores encontrados são $P = 13,9\text{gf}/\text{cm}^2$, $\rho = 5,06 \times 10 - 4\text{g}/\text{cm}^3$, e a massa, m , do megaesôfago chagásico igual a $m = 0,25\text{g}$.

A partir da matriz de espaço de estados e os valores das constantes do sistema, um código em *Matlab*TM foi desenvolvido para análise da resposta do sistema para uma entrada degrau.

4 Resultados e Discussões

4.1 Análise Dinâmica

A matriz de espaço de estado obtida para o sistema de ingestão do alimento a partir do modelo *Bond Graph* apresentado na Figura (13) não é controlável. Ou seja, nem todos os estados são alcançáveis a partir de qualquer condição inicial pela aplicação de uma entrada adequada. De tal forma que não é possível aplicar as teorias de controle e consequentemente apresentar um projeto de controlador para o sistema modelado.

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \\ \dot{x}_4 \\ \dot{x}_5 \\ \dot{x}_6 \\ \dot{x}_7 \\ \dot{x}_8 \\ \dot{x}_9 \\ \dot{x}_{10} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{Cf_0} \left(\frac{1}{Rf_0} + \frac{1}{R} + \frac{1}{Rf_1} + \frac{1}{Rf_2} + \frac{1}{Rf_3} \right) & 0 & 0 & -\frac{1}{A_1 K_2} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{B_H K_H} & 0 & \frac{1}{B_H K_2} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{Fb}{mL} & \frac{1}{K_2} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{1}{A_1 C f_0} & \frac{1}{B_H K_H} & -\frac{1}{mL} & -\frac{1}{B_H K_2} & -\frac{1}{B_2 K_2} & \frac{1}{h B_m K_2} & \frac{A_1 K_3}{h n^2 K_2} & \frac{A_1 K_4}{h n^2 K_2} & \frac{1}{h J_L} & -\frac{1}{h n m_2} & -\frac{R f_3 A_2^2}{h K_3} & 0 & -\frac{1}{h m_3} & -\frac{1}{h m_4} \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{h K_2} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{B_3 K_4}{n h K_2} & 0 & -\frac{B_3}{m_2} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{K_3}{n h K_2} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{K_4}{n h K_2} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{K_4} & -\frac{B_4}{m_3} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{K_4} & 0 & -\frac{B_5}{m_4} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \\ x_5 \\ x_6 \\ x_7 \\ x_8 \\ x_9 \\ x_{10} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} A_0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \cdot [f_0(t)]$$

Figura 13: Sistema modelado na forma de espaço de estado para o modelo *Bond Graph*.

4.1.1 Análise Dinâmica para o Modelo Matemático I

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. Apesar do primeiro modelo usando a técnica *Bond Graph* ter uma abordagem em vários domínios energéticos e considerar todo processo de ingestão do alimento até o EEI, o segundo modelo permite analisarmos a velocidade e deslocamento do alimento dentro do esôfago saudável e do megaesôfago considerando a velocidade da onda peristáltica, o tempo que ela atua e o diâmetro do órgão.

Assim, quando o sistema em malha aberta do esôfago saudável é excitado por um sinal degrau de entrada, o comportamento obtido é apresentado pela Figura (14).

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 desloca-

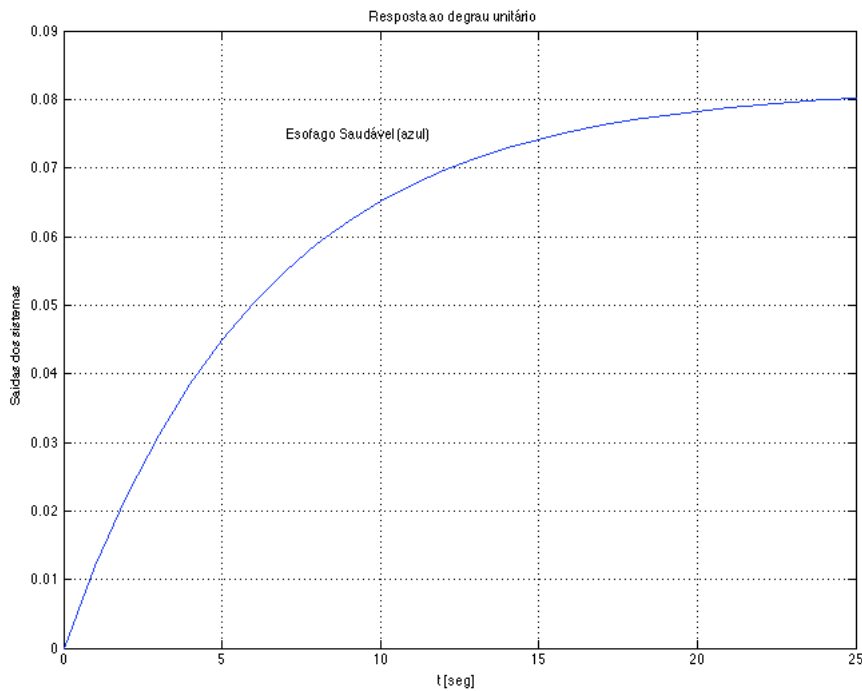


Figura 14: Resposta do sistema para o esôfago saudável quando excitado por uma entrada degrau.

mento bem inferior para a mesma escala de tempo. De acordo com a resposta do sistema megaesôfago chagásico apresentado na Figura (15), o deslocamento é equivalente apenas a 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 denervação dos plexos intramurais é de aproximadamente 90% (RASSI; REZENDE, 2011), 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 *SimscapeTM* é possível analisar e comparar a dinâmica para ambos os modelos.

Para o esôfago saudável a curva de velocidade, Figura (16), e deslocamento, Figura (17), 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. O deslocamento

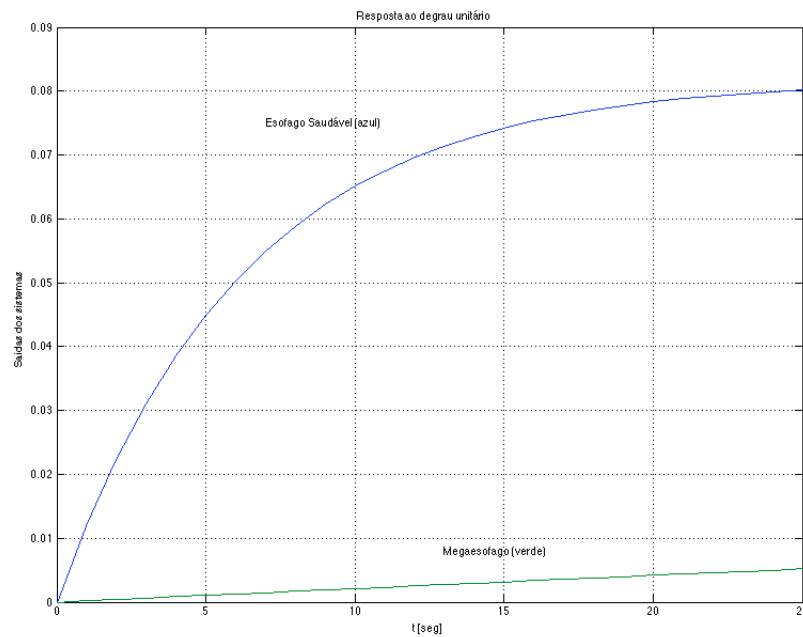


Figura 15: Resposta do sistema para o megaesôfago chagásico quando excitado por uma entrada degrau.

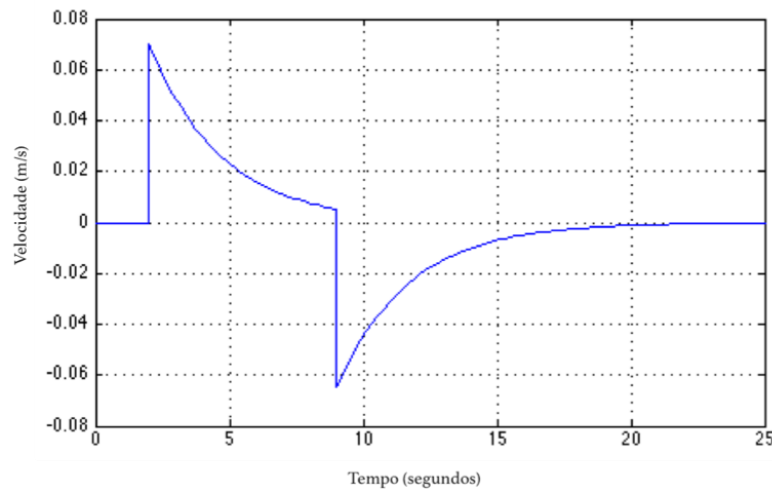


Figura 16: Curva de velocidade para o sistema esôfago saudável.

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 a extensão entre os esfínters superior e inferior esofágicos.

A mesma análise aplica-se para a compreensão da dinâmica do megaesôfago chagásico. Para a velocidade, Figura (18), uma velocidade praticamente nula (aproximadamente 1.2 mm/s) ocorre durante os 7 segundos que a força é aplicada e o deslocamento. Ao

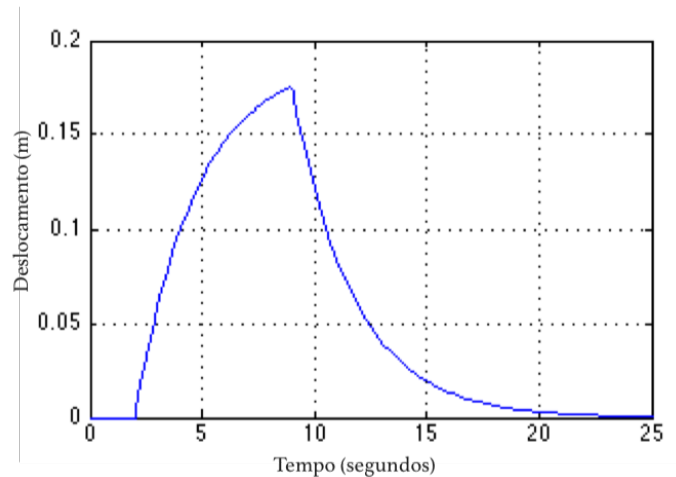


Figura 17: Curva de deslocamento para o sistema esôfago saudável.

mesmo tempo a massa se desloca aproximadamente 0.75cm durante o intervalo de tempo e não consegue retornar ao seu estado inicial, Figura (19), comprovando sua ineficiência no deslocamento do bolus alimentar. Os fatores que influenciam essa resposta é a alta constante de amortecimento, a velocidade praticamente nula decorrente da desnervação e as baixas pressões esofágicas.

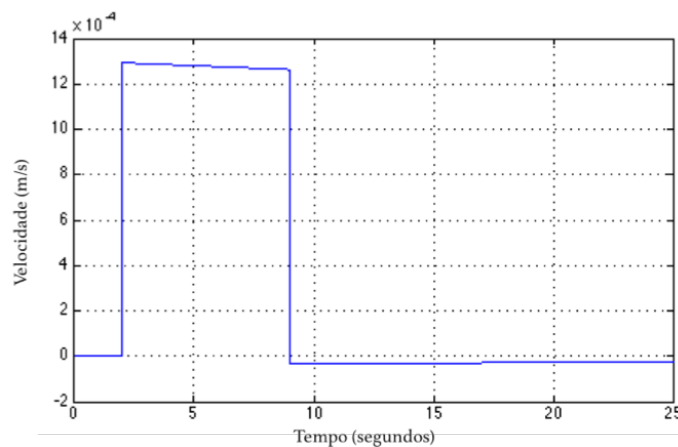


Figura 18: Curva de velocidade para o sistema megaesôfago chagásico.

4.1.2 Análise Dinâmica para o Modelo Matemático II

Para a análise do sistema dinâmico proposto pelo Modelo Matemático II 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 Figura (20) apresenta a saída para o sistema esôfago saudável quando excitado pela entrada degrau. Através da análise das raízes características do sistema, Figura

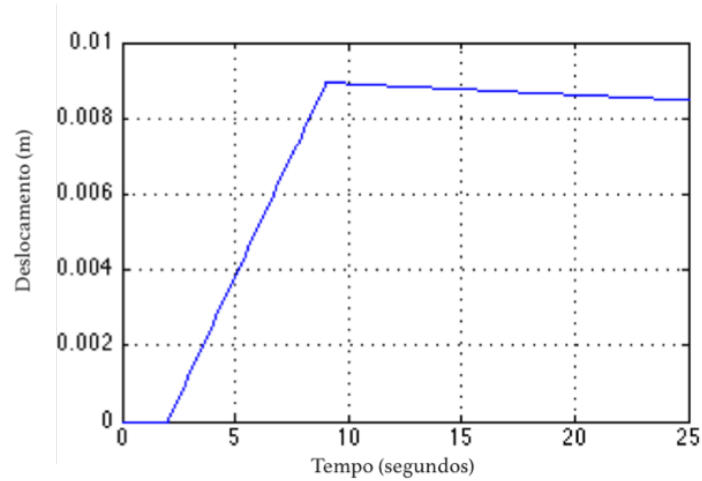


Figura 19: Curva de deslocamento para o sistema megaesôfago chagásico.

(21), todas as raízes do sistema, distintas ou com repetição, estão no semiplano esquerdo conferindo estabilidade ao sistema.

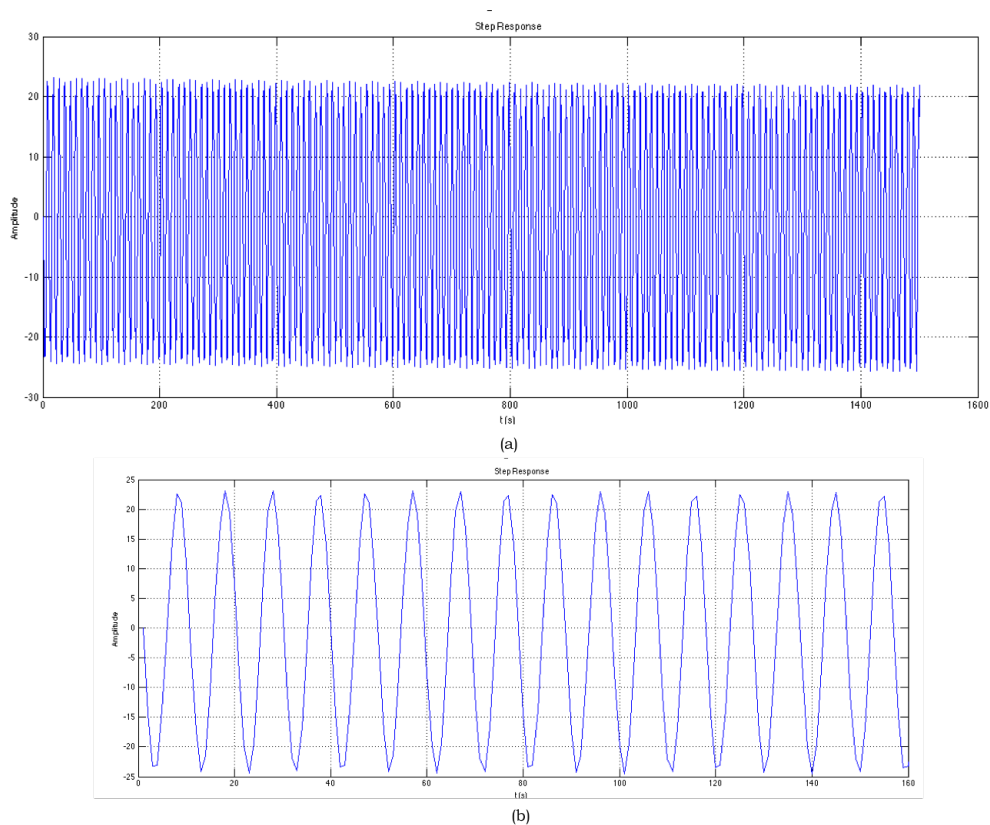


Figura 20: (a) Resposta do sistema esôfago saudável para uma entrada degrau. (b) Redução da escala temporal para melhor análise da curva de saída.

Já a resposta do sistema quando o esôfago é chagásico é apresentada na Figura (22). O comportamento dinâmico foi alterado comparado com o esôfago normal. A amplitude decai progressivamente, caracterizando a ineficiência de manter uma dinâmica capaz

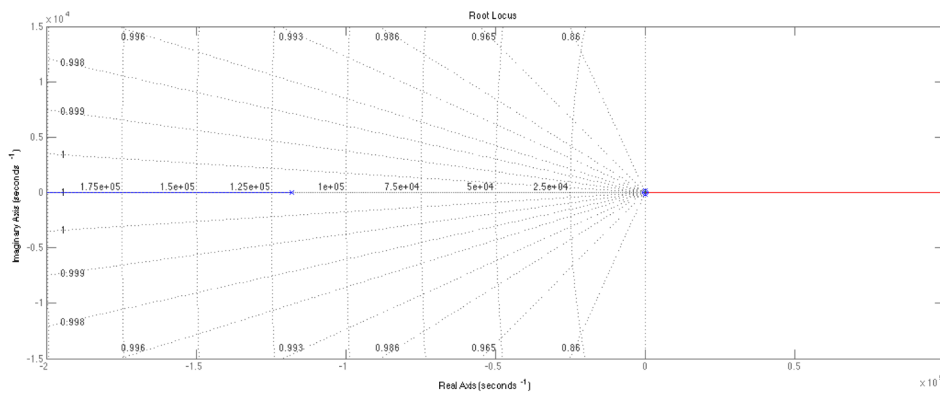


Figura 21: *Root-Locus* do sistema modelado.

de deslocar o alimento ingerido. Além disso, a resposta do sistema se torna altamente oscilatória, que corresponde a uma resposta mais lenta do sistema.

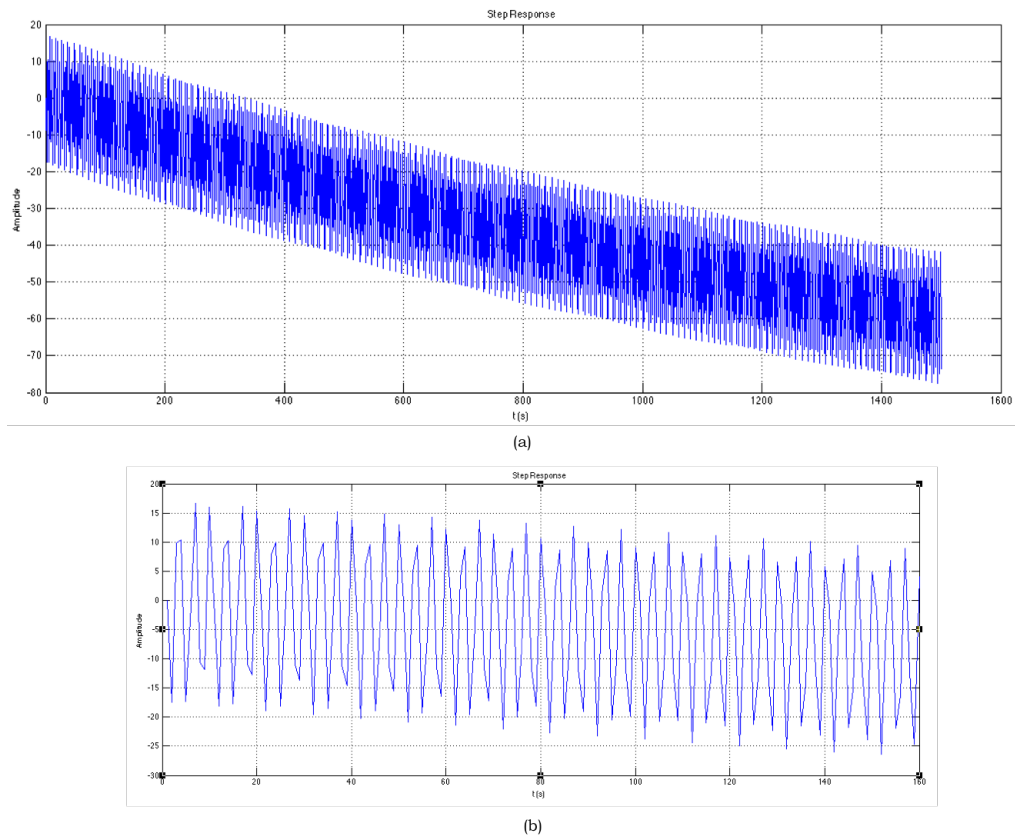


Figura 22: (a) Resposta do sistema megaesôfago chagásico para uma entrada degrau. (b) Redução da escala temporal para melhor análise da curva de saída.

4.2 Projeto do Controlador Orgânico para o Modelo Matemático I

Considerando a curva de resposta dos dois sistemas sob estudo, o esôfago saudável e o megaesôfago chagásico, Figura (15), é 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 transversal do esôfago, o órgão ainda apresenta uma resposta equivalente a 6,25% de desempenho no deslocamento do alimento. Dessa forma, a função de transferência proposta para o Controlador Orgânico 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 o órgão doente.

Logo a função de transferência do Controlador Orgânico será dada pela Eq. (4.1).

$$F.T. = (0.9375) \times \frac{1}{0.005s^2 + 76.739s + 12.246} \quad (4.1)$$

Dessa forma, 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, como apresentado pela Figura (23).

A partir do estudo dinâmico dos três modelos propostos para estudar a performance do esôfago humano saudável e doente, e da proposta matemática para o Controlador Orgânico capaz de reverter o quadro de aperistaltismo no megaesôfago chagásico, é possível construir o conceito de uma manta esofágica derivada de látex natural com o objetivo de ser uma solução para o tratamento do megaesôfago chagásico. A manta esofágica será indutora de ondas peristálticas e propagará a onda pela extensão de 23 cm do esôfago durante 7 segundos. Assim, inicialmente, a manta estará em repouso, quando o alimento passa pelo EES, a manta é forçada para uma posição contraída, ou seja, armazena uma certa quantidade de energia potencial elástica. E então o sistema entra em repouso novamente. Para a manta serão necessários 4 pontos de controle distanciados em 5 cm. Cada ponto implicará em uma magnitude de contração diferente respeitando os dados de manometria da literatura. Para o efeito da propagação da onda peristáltica cada ponto de controle será acionado individualmente e um após o outro. Baseado em trabalhos já publicados (RASHEV MANUEL AMARIS, 2002) e (AMARIS1 P Z RASHEV2, 2002) o controlador será semelhante ao método utilizado em um estimulador elétrico intestinal, que emprega pulsos de corrente de 50msec de duração em baixas frequências usando pares de eletrodos, como apresentado na Figura (24). Permitindo assim, que cada um dos quatro pontos de área da manta sejam forçados para uma posição contraída e então relaxada até que o bolo alimentar chegue ao fim do esôfago.

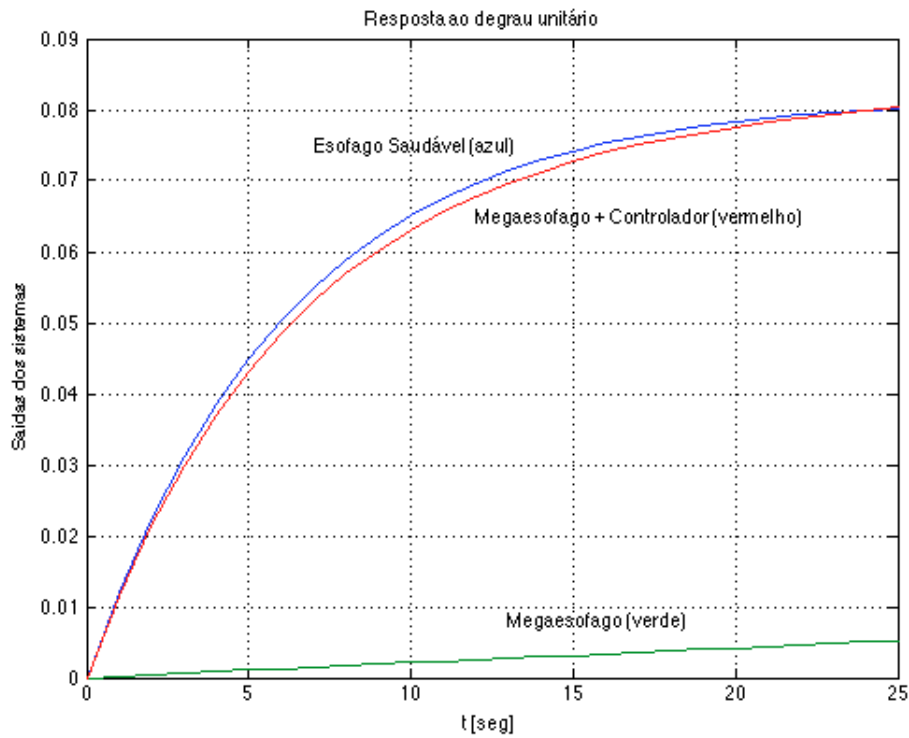


Figura 23: Resposta do sistema, curva vermelha, devida à atuação do controlador orgânico no megaesôfago chagásico quando excitado por uma entrada degrau.

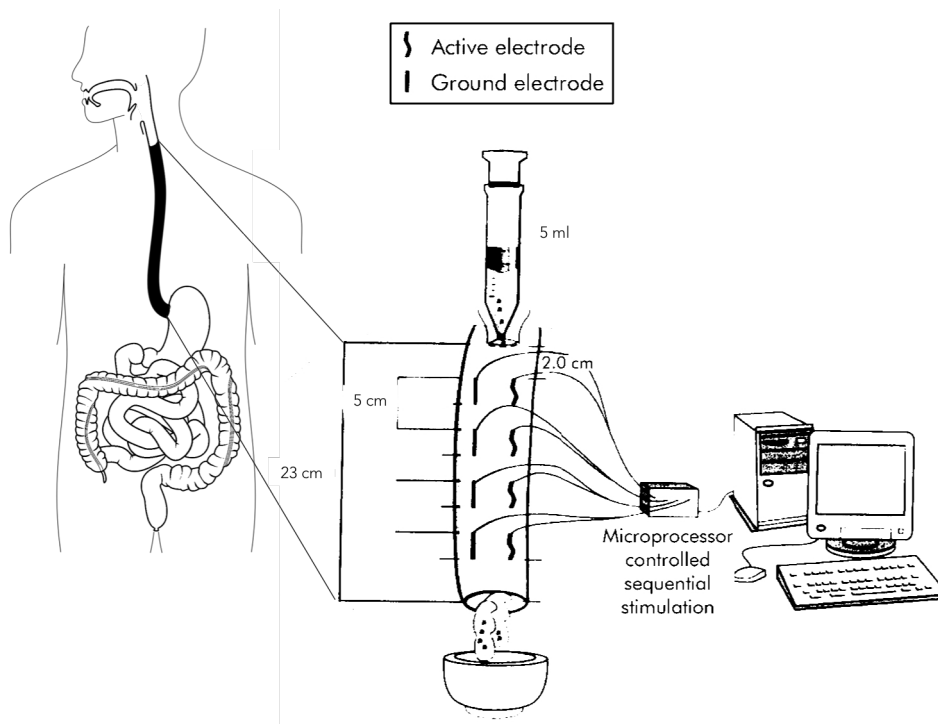


Figura 24: Proposta para o Controlador Orgânico. Adaptado de (AMARIS1 P Z RASHEV2, 2002)

5 Considerações Finais

Este trabalho apresentou um estudo do comportamento dinâmico do esôfago humano saudável e do megaesôfago chagásico. O modelo *Bond Graph* proposto para visualização e compreensão dos parâmetros que influenciam a dinâmica do processo de ingestão do alimento da boca até o fim do esôfago apresentou-se não controlável.

Dessa forma, uma nova proposta simplificadora foi adotada a partir de um sistema mecânico massa-mola-amortecedor. O Modelo Matemático I apresentou a dinâmica do comportamento da passagem de alimento pelo esôfago em termos da velocidade, do deslocamento e da atuação de uma força externa, que é a contração peristáltica. De acordo com os resultados obtidos, o deslocamento do alimento no megaesôfago chagásico é equivalente apenas a 6.25% do deslocamento quando o órgão é saudável. Além disso, a velocidade praticamente nula e uma alta constante de amortecimento decorrente da aperistalse implica em uma resposta de deslocamento sem retornar ao seu estado inicial, comprovando os efeitos de retenção do bolus no esôfago e a não possibilidade da passagem do alimento pelo esfíncter inferior esofágico em direção ao intestino.

No Modelo Matemático II, o megaesôfago chagásico também apresentou dinâmica alterada quando comparada com o esôfago saudável. De acordo com os resultados, a resposta do sistema para o esôfago doente é altamente oscilatória implicando em uma resposta mais lenta. 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.

O trabalho também propôs a construção de um novo conceito em modelagem de sistemas biológicos. 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 ao Modelo Matemático I e foram obtidos 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. Por fim, foi apresentado uma primeira versão do estado da arte do Controlador Orgânico concebido como uma manta esofágica derivada de látex natural.

Referências

- AMARIS1 P Z RASHEV2, M. P. M. K. L. B. M. A. Microprocessor controlled movement of solid colonic content using sequential neural electrical stimulation. *Gut*, v. 50, p. 475–479, 2002. Citado 3 vezes nas páginas 16, 49 e 50.
- ARGOLO, A. M. et al. *Doença de Chagas e seus principais vetores no Brasil*. [S.l.]: Imperial Novo Milênio, 2008. Citado na página 21.
- BASSOTTI, G. et al. Manometric investigation of the entire esophagus in healthy subjects and patients with high-amplitude peristaltic contractions. *Dysphagia*, v. 3, p. 93–96, 1988. Citado 2 vezes nas páginas 35 e 36.
- BERN, C. et al. Evaluation and treatment of chagas disease in the united states: a systematic review. *The Journal of American Medical Association*, v. 298, n. 18, p. 2171–2181, November 2007. Citado 2 vezes nas páginas 21 e 24.
- C PRAKASH A, S. R. S. P. P. R. R. P. V. S. P. Minimally invasive esophagectomy: thoracoscopic mobilization of the esophagus and mediastinal lymphadenectomy in prone position - experience of 130 patients. *J Am Coll Surg.*, v. 203, n. 1, p. 7–16, Jul 2006. Citado na página 42.
- CAMPBELL, N. A.; WILLIAMSON, B.; HEYDEN, R. *Biology: Exploring Life*. [S.l.]: Pearson Prentice Hall, 2003. Citado 2 vezes nas páginas 15 e 24.
- CÔBO, E. de C. et al. Research on trypanosoma cruzi and analysis of inflammatory infiltrate in esophagus and colon from chronic chagasic patients with and without mega. *Journal of Tropical Medicine*, 2012. Citado na página 21.
- DANTAS, R. O.; ALVES, L. M.; NASCIMENTO, W. V. Effect of bolus volume on proximal esophageal contractions of patients with chagasapos; disease and patients with idiopathic achalasia. *Diseases of the Esophagus*, v. 23, p. 670–674, 2010. Citado na página 24.
- DIAS, J. C. P.; COURA, J. R. *Clínica e terapêutica da doença de Chagas: uma abordagem prática para o clínico geral*. [S.l.]: FIOCRUZ, 1997. Citado 3 vezes nas páginas 21, 25 e 27.
- FERNANDES, C. R. Importance of pleural pressure for the evaluation of respiratory mechanics. *Revista Brasileira de Anestesiologia*, v. 56, n. 3, p. 287–303, 2006. Citado na página 33.
- FERREIRA-SANTOS, R. *Tratamento cirúrgico do megaesôfago chagásico*. 1. ed. [S.l.]: Imprensa oficial do estado de MG, 1968. Citado 4 vezes nas páginas 25, 26, 35 e 36.
- FIGUEIRÊDO, S. S. et al. Caracterização radiográfica das manifestações esofago-gastrointestinais da doença de chagas. *Radiologia Brasileira*, v. 35, n. 5, p. 293–297, Sept./Oct. 2002. Citado 2 vezes nas páginas 25 e 26.

- GARCIA, C. *Modelagem e Simulação de processos Industriais e de Sistemas Eletromecânicos*. 2. ed. [S.l.]: Editora da Universidade de São Paulo, 2009. Citado na página 31.
- GUYTON, A. C. *Tratado de fisiologia médica*. 10. ed. [S.l.]: Guanabara Koogan S.A., 2002. Citado na página 33.
- JOHNSON, L. R. *Gastrointestinal Physiology*. 5th. ed. [S.l.: s.n.], 1997. Citado na página 37.
- KOBERLF, F. Die chagaskranflheit-ihre pathogenese und ihre bedeutung als volksseuche. *Ztschr. f. Tropenmed. u Parasitol*, v. 10, n. 236, 1959. Citado na página 25.
- LEE, B. Y. et al. Global economic burden of chagas disease: a computational simulation model. *The Lancet Infectious Diseases*, v. 13, n. 4, p. 342–348, 2013. Citado 2 vezes nas páginas 21 e 25.
- LOPES, L. R. et al. Results of the surgical treatment of non-advanced megaesophagus using heller-pinotti's surgery: laparotomy vs. laparoscopy. *Clinics*, v. 66, n. 1, p. 41–46, 2011. Citado na página 27.
- MISRA, J. C.; MAITI, S. Peristaltic transport of a rheological fluid: model for movement of food bolus through esophagus. *Applied Mathematics and Mechanics*, v. 33, n. 3, p. 315–332, March 2012. Citado na página 24.
- MRUÉ, F. . *Neoformação tecidual induzida por biomembrana de látex natural com polilisina. Aplicabilidade em neoformação esofágica e da parede abdominal. Estudo experimental em cães*. 2000. Citado na página 28.
- NICOSIA, M. A.; BRASSEUR, J. G. A mathematical model for estimating muscle tension in vivo during esophageal bolus transport. *The Journal of Theoretical Biology*, v. 219, p. 235–255, 2002. Citado na página 21.
- OLIVEIRA, G. C. et al. Tratamento cirúrgico do megaesôfago no hospital de clínicas da unicamp – fatores associados a melhores ou a piores resultados. *Revista do Colégio Brasileiro de Cirurgões*, v. 36, n. 4, p. 300–306, 2009. Citado na página 27.
- OLIVEIRA, R. B. de et al. Gastrointestinal manifestation of chagas' disease. *The American Journal of Gastroenterology*, v. 93, n. 6, p. 884–889, 1998. Citado na página 21.
- PINOTTI, H. W. et al. Surgical management of the megaesophagus. *Diseases of the Esophagus*, p. 942–946, 1988. Citado 2 vezes nas páginas 25 e 27.
- RASHEV MANUEL AMARIS, K. L. B. M. P. M. P. Z. Microprocessor-controlled colonic peristalsis: Dynamic parametric modeling in dogs. *Digestive Diseases and Sciences*, v. 47, n. 5, p. 1034–1048, May 2002. Citado na página 49.
- RASSI, A.; REZENDE, J. M. Estudo clínico-radiológico do esôfago e dos cólons na fase aguda da doença de chagas com relato de três casos de remissão espontânea de aperistalse do esôfago do grupo i. *Revista da Sociedade Brasileira de Medicina Tropical*, v. 44, n. 1, p. 70–75, 2011. Citado na página 44.

- REZENDE, J. M. The digestive tract in chagas' disease. *Memórias do Instituto Oswaldo Cruz*, v. 79, p. 97–106, 1984. Citado 2 vezes nas páginas 15 e 26.
- ROSA, S. S. R. F. *Desenvolvimento de um sistema de controle de fluxo esofágico para tratamento da obesidade*. [S.l.]: Edgard Blücher, 2009. Citado na página 23.
- SANCHEZ-LERMEN, R. de L. P. et al. 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*, v. 40, n. 2, p. 197–203, Mar./Apr. 2007. Citado na página 21.
- SHERWOOD, L. *Human physiology : from cells to systems*. 6. ed. [S.l.]: Brooks/Cole Cengage Learning, 2007. Citado 2 vezes nas páginas 35 e 40.
- SORITA, S. et al. Endoscopic and histologic evaluation of advanced megaesophagus after esophagocardioplasty, vagotomy-antrectomy and roux-en-y gastrojejunostomy (serra dória operation). *Diseases of the Esophagus*, v. 18, p. 365–369, 2005. Citado na página 27.
- TANOWITZ, H. B. et al. Chagas' disease. *Clinical Microbiology Reviews*, v. 5, n. 4, p. 400–419, 1992. Citado 3 vezes nas páginas 25, 26 e 27.
- TOKLU, E. A new mathematical model of peristaltic flow on esophageal bolus transport. *Scientific Research and Essays*, v. 6, n. 31, p. 6606–6614, 2011. Citado na página 35.
- TORTORA, G. J. *Corpo Humano: fundamentos de anatomia e fisiologia*. 4. ed. [S.l.]: Artmed Editora, 2000. Citado na página 23.
- TRAWITZKI, L. V. V.; DANTAS, R. O.; MELLO-FILHO, F. Masticatory muscle function three years after surgical correction of class iii dentofacial deformity. *International Journal of Oral and Maxillofacial Surgery*, v. 39, p. 853–856, 2010. Citado na página 24.
- VAZ, M. G. M. et al. Correlação entre sintomatologia e evolução do megaesôfago. *Revista Goiana de Medicina*, v. 41, p. 1–15, 1995. Citado na página 25.

Apêndices

APÊNDICE A – Parâmetros do sistema

Tabela 4: Análogos das variáveis reais na técnica *Bond Graph* para a Região A: Região da Boca Humana.

Parâmetro	Descrição Sistema Real	Descrição Sistema Análogo	Bond Graph
f_0	Força inicial da entrada do alimento na boca	Força aplicada na área do embolo cilindro hidráulico	Fluxo mecânico translacional
v_0	Velocidade inicial de entrada do alimento na boca	Velocidade aplicada na área do embolo cilíndrico hidráulico	Esforço mecânico translacional
A_0	Área da região da boca onde é processado o alimento gerando o bolo alimentar	Área do embolo do cilindro	GY
R_{f_0}	Ê a perda de carga ou dificuldade imposta durante a mastigação	Atrito dentro da boca (fator de 0 a 1)	Resistor - dissipador
P_0	Saliva e alimento, simulando o bolo alimentar	Pressão hidráulica	Esforço - hidráulico
C_{f_0}	Representa o volume do bolo alimentar levando em conta a massa específica do fluido	Capacitância hidráulica	Capacitância - armazenador
Q_0	Vazão do bolo alimentar deixando a região da boca	Vazão	Fluxo - hidráulico

Tabela 5: Análogos das variáveis reais na técnica *Bond Graph* para a Região B: Região da Epiglote.

Parâmetro	Descrição Sistema Real	Descrição Sistema Análogo	Bond Graph
P_{1x}	Pressão de entrada do bolo alimentar nesse região	Pressão de entrada	Esforço hidráulico, em uma junção I
R	Epiglote e as resistências de passagem do alimento	Resistência a passagem do fluido (fluxo laminar)	Resistor - dissipador
P_{2x}	Pressão do bolo alimentar nesse região	Pressão de passagem	Esforço hidráulico em uma junção I
R_{f1}	Cartilagem cricoíde	Restrição imposta pela cartilagem (altera a velocidade do fluxo)	Resistor - dissipador.
R_{f2}	Cartilagem tricoíde	Restrição imposta pela cartilagem (altera a velocidade do fluxo)	Resistor - dissipador
P_{3x}	Pressão de saída bolo alimentar	Pressão de saída	Esforço hidráulico em uma junção I

Tabela 6: Análogos das variáveis reais na técnica *Bond Graph* para a Região C: Região do EFS.

Parâmetro	Descrição Sistema Real	Descrição Sistema Análogo	Bond Graph
Q_{1x}	Vazão volumétrica do bolo alimentar de entrada no esfôfago	Vazão transmitida no tubo sem perdas	Fluxo hidráulico
R_{f3}	Resistência da região devido ao tecido, cartilagens	Resistência Fluidica – RF, TR em função da viscosidade absoluta e do diâmetro interno	RF e TR
P_{4x}	Pressão de saída do bolo da região com uma mudança abrupta	Pressão de saída que irá atuar no embolo do sistema gerando o movimento mecânico	Esforço hidráulico. Entrada de um GY para mudança de domínio de energia

Tabela 7: Análogos das variáveis reais na técnica *Bond Graph* para a Região D: Região do Esôfago Cervical.

Parâmetro	Descrição Sistema Real	Descrição Sistema Análogo	Bond Graph
A_1	Área em função do diâmetro do esôfago	Área do embolo do cilindro	GY
K_h	Influencia dos brônquios	Rigidez da haste	R: BH – mecânico translacional
B_h	Influencia dos brônquios	Amortecedor da haste	
m_L	Massa do bolo alimentar – considerada uniforme	Massa mecânico linear	Porta inercial I que realiza variação da quantidade de movimento
f_b	Atrito do alimento com a parede fibras lisas e estriadas do esôfago	Atrito de carga	R -dissipador (altera o esforço - junção 0)
K_2	Representando a resistência via uma mola da variação da velocidade e do deslocamento	Rigidez da mola	Capacitivo
B_2	Representa a variação de velocidade do bolo alimentar no processo de descida	Atrito viscoso	Resistência
h	Representa a movimentação rotacional que a massa alimentar realiza dentro do esôfago	Passo do parafuso	$T_F = h$
J_L	Representa a resistência do bolo alimentar a aceleração gerada pelas ondas peristálticas	Atrito da J_L com parede do esôfago	Resistência
B_m	Resistência ao torque da bolo alimentar proporcional a variação velocidade angular deste	Atrito da J_L com parede do esôfago	Resistência
d	Deslocamento do bolo alimentar na região do esôfago cervical	Relação de transformação do rotacional para translacional	TF:d
m_2	Massa do bolo alimentar	Massa translacional	Inércia
B_3	Atrito do bolo alimentar com a parede do esôfago	Atrito linear	Resistência

Tabela 8: Análogos das variáveis reais na técnica *Bond Graph* para a Região E: Esôfago Torácico porção Abdominal.

Parâmetro	Descrição Sistema Real	Descrição Sistema Análogo	Bond Graph
K_3	Força de resistência do bolo alimentar a força peristáltica de descida	Mola linear	Capacitância
m_3	Massa atrial do bolo alimentar	Massa translacional	Inércia
B_4	Atrito do bolo alimentar com a parede do esôfago	Atrito linear	Resistência
K_4	Força de resistência do bolo alimentar a força peristáltica de descida	Mola linear	Capacitância
m_4	Massa do bolo alimentar	Massa translacional	Inércia
B_5	Atrito do bolo alimentar com a parede do esôfago	Atrito linear	Resistência

Tabela 9: Análogos das variáveis reais na técnica *Bond Graph* para a Região F: EEI.

Parâmetro	Descrição Sistema Real	Descrição Sistema Análogo	Bond Graph
A_2	Área da região do EEI	Área do embolo do cilindro	GY
R_{f5}	Resistência da passagem do bolo alimentar pelo EEI	Resistência hidráulica	Resistência
Q_2	Massa do bolo alimentar	Vazão de saída do bolo alimentar na saída EEI	Sinal de saída