

Universidade de Brasília – UnB
Faculdade do Gama – FGA
Engenharia Eletrônica

**MODELO DINÂMICO EM ESPAÇO DE ESTADO
DA NEOFORMAÇÃO TECIDUAL DE FERIDAS DIABÉTICAS**

HALLANA RAYSSA ALVES DA SILVA

Orientador: Dr. SUÉLIA DE SIQUEIRA RODRIGUES FLEURY ROSA
Coorientador: Me. DIOGO DE OLIVEIRA COSTA



UNB – UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

FGA – FACULDADE DO GAMA

ENGENHARIA ELETRÔNICA

**MODELO DINÂMICO EM ESPAÇO DE ESTADO DA NEOFORMAÇÃO
TECIDUAL DE FERIDAS DIABÉTICAS**

HALLANA RAYSSA ALVES DA SILVA

ORIENTADOR: SUÉLIA DE SIQUEIRA RODRIGUES FLEURY ROSA

COORIENTADOR: DIOGO DE OLIVEIRA COSTA

**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO
ENGENHARIA ELETRÔNICA**

BRASÍLIA/DF, MAIO DE 2021

UNB – UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FGA – FACULDADE DO GAMA
ENGENHARIA ELETRÔNICA

**MODELO DINÂMICO EM ESPAÇO DE ESTADO DA NEOFORMAÇÃO
TECIDUAL DE FERIDAS DIABÉTICAS**

HALLANA RAYSSA ALVES DA SILVA

**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO SUBMETIDO À FACULDADE DO GAMA - FGA
DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA, COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA
A OBTENÇÃO DO GRAU DE BACHAREL EM ENGENHARIA ELETRÔNICA**

APROVADA POR:

Prof. Suélia de Siqueira Rodrigues Fleury Rosa, Dr.

(Orientador)

Diogo de Oliveira Costa, Me.

(Coorientador)

Dedicado à Ana Bananeira da Silva e Margarida Batista da Silva, minhas avós. As raízes que me ensinaram a resistir às intempéries.

AGRADECIMENTOS

Ao ingressar no ensino superior há oito anos jamais imaginaria qual seria de fato as experiências que viveria. Após essa extensa jornada percebi que a minha aprendizagem não foi acadêmica e sim humana. Desenvolvi algo essencial para alcançar qualquer desejo na vida, a persistência, e descobri que mesmo com ela não seria possível vencer um curso tão desafiador e extenuante como foi a engenharia eletrônica para mim.

Por isso agradeço à Deus por todas as coisas. Meus familiares, minha saúde, minha força e por providenciar em meu caminho os meus amigos.

Aos meus pais Francisco e Maria José agradeço por estarem sempre presentes em oração ou na ajuda cotidiana. Às minhas tias que me inspiram todos os dias, cada uma à sua maneira, a ser uma mulher melhor. À Joyce Karen, minha irmã, o melhor presente que ganhei na vida.

E aqueles sem os quais eu teria passado mais dez anos na FGA. Diogo de Oliveira Costa, o mestre, possuidor de uma generosidade gigante. Angélica Kathariny de Oliveira Alves, uma dessas pessoas muito raras, cheias de afeto, que alegram qualquer humor e são tão difíceis de encontrar. E a professora Suélia de Siqueira Rodrigues Fleury Rosa que em seu trabalho realiza muito mais que a formação de alunos.

À todos os colegas com os quais compartilhei momentos no LEI, aos servidores da FGA e à todos os meus outros amigos que conheci no campus. Todos vocês contribuíram com a minha jornada. Obrigada.

”Nãoo! Tentar nãoo. Faça ou nãoo faça. Tentativa nãoo há.”
Mestre Yoda

RESUMO

As feridas cutâneas acometem a população de forma geral, principalmente os diabéticos. Os protocolos de tratamento utilizados buscam evitar o aumento da área lesionada e induzir o processo de neoformação tecidual, levando à cicatrização da ferida. Os procedimentos utilizados para a verificação da dinâmica da cicatrização são subjetivos e esta ainda não possuem modelo matemático definido na literatura. Porém com o uso de técnicas de engenharia de identificação de sistemas é possível estimar os parâmetros por meio de dados de entrada e saída observados experimentalmente. O objetivo deste artigo é apresentar dados de identificação para dois protocolos de tratamento de feridas: o Padrão Ouro do Sistema Único de Saúde e o Padrão Rapha. Os modelos serão desenvolvidos no software Matlab através da ferramenta de identificação de sistemas e posteriormente analisados para verificar a qualidade de cada modelo e as características do sistema. Por fim, a validação desses modelos buscará verificar se todas as dinâmicas observadas sugerem o protocolo com melhor resposta de neoformação tecidual.

ABSTRACT

Skin wounds affect the population in general, especially diabetics. The treatment protocols used seek to prevent the increase of the injured area and induce the tissue neoformation process, leading to wound healing. The procedures used to verify the dynamics of the healing are subjective and this one still does not have a mathematical model defined in the literature. However, with the use of systems identification engineering techniques, it is possible to estimate the parameters through experimentally observed input and output data. The aim of the article is to present heart identification data for two wound treatment protocols: the Gold Standard of the Single Health System and the Rapha Standard. The models will be developed in the Matlab software, using the system identification tool and advanced to verify the quality of each model and the characteristics of the system. Finally, the validation of these models seeks to verify that all observed dynamics are observed in the protocol with the best tissue neoformation response.

SUMÁRIO

| | | |
|----------|---|-----------|
| 1 | Introdução | 1 |
| 1.1 | Objetivo | 3 |
| 1.2 | Descrição da metodologia | 3 |
| 2 | Referencial Teórico | 4 |
| 2.1 | Modelagem Matemática | 4 |
| 2.1.1 | Tipos de Modelo | 5 |
| 3 | Materiais e Métodos | 6 |
| 3.0.1 | Ensaio Clínico | 6 |
| 3.0.2 | Seleção de dados e pré-processamento | 7 |
| 3.0.3 | Sistema Biológico de Neoformação Tecidual | 7 |
| 3.0.4 | Identificação de Sistemas | 8 |
| 4 | Resultados e Discussão | 10 |
| 5 | Conclusão | 12 |

LISTA DE TABELAS

| | | |
|-----|--|----|
| 4.1 | Valores obtidos em simulação computacional e valores médios de percentual de redução de área de ferida para pacientes do GE. | 10 |
| 4.2 | Valores obtidos em simulação computacional e valores médios de percentual de redução de área de ferida para pacientes do GC. | 10 |

LISTA DE FIGURAS

| | | |
|-----|---|----|
| 3.1 | Diagrama de blocos do sistema em malha aberta, onde a entrada é referente ao protocolo de tratamento Rapha e a saída é a medida da área da ferida. | 8 |
| 3.2 | Tela de configuração do System Identification do Matlab® para obtenção de espaços de estados, onde é possível modificar o método, a ordem, entre outros. | 9 |
| 4.1 | Comparação das saídas dos modelos de EE para o protocolo Rapha® com o vetor de Validação, em preto, onde é possível ver que os sistemas acompanharam de forma satisfatória. | 11 |
| 4.2 | Comparação das saídas dos modelos de EE para o protocolo SUS com o vetor de Validação, em preto, onde é possível ver que os sistemas acompanharam de forma satisfatória. | 11 |

LISTA DE SÍMBOLOS, NOMENCLATURAS E ABREVIACÕES

| | |
|--------------|--|
| <i>DM</i> | Diabetes Mellitus |
| <i>DPN</i> | Polineuropatia Diabética |
| <i>DAN</i> | Neuropatia Aotonômica Diabética |
| <i>SI</i> | Identificação de Sistemas |
| <i>BG</i> | Bond Graph |
| <i>SUS</i> | Sistema Único de Saúde |
| <i>UPDs</i> | Úlcera de Pé Diabético |
| <i>Rapha</i> | Equipamento Emissor de Luz |
| <i>UnB</i> | Universidade de Brasília |
| <i>GC</i> | Grupo Controle |
| <i>GE</i> | Grupo Experimental |
| <i>DLLU</i> | Úlceras Diabéticas de Membros Inferiores |
| <i>HRAN</i> | Hospital Reginal da Asa Norte |
| <i>HRG</i> | Hospital Regional de Brasília |

1 INTRODUÇÃO

Mundialmente, o pé diabético continua ocupando o primeiro lugar entre os principais problemas de saúde, uma vez que o risco de amputação de membros inferiores em pacientes com Diabetes Mellitus (DM) é cerca de 40 vezes maior do que na população em geral [1]. O tratamento do pé diabético depende do grau de comprometimento dos membros, considerando a presença ou gravidade da isquemia e infecção. Existem algumas opções de reconstrução, sendo as mais comuns curativos com cobertura de alginato, carvão, etc. Outro método é o desbridamento de tecidos desvitalizados, revascularização, aplicação local de cremes para atuar nos fatores de crescimento, oxigenoterapia e fotobioestimulação [1][2][3][4].

Visto que os pacientes com pé diabético são afetados por graves deficiências no processo de cicatrização, a cura tem sido amplamente investigada. Há uma grande necessidade clínica não atendida para o tratamento da polineuropatia diabética (DPN) e da neuropatia autonômica diabética (DAN). A base da terapia para prevenir ou interromper a progressão de DPN e DAN é a modificação do fator de risco multifatorial [5]. Entre esses recursos estão dois métodos que têm auxiliado na cicatrização de feridas por meio de seus efeitos de cicatrização: terapia LED de baixa intensidade e o uso de látex natural derivado da seringueira *Hevea brasiliensis* [1][4][6][7]. Uma das terapias atuais para diabéticos o tratamento do pé utiliza uma estratégia não cirúrgica para a prevenção da amputação do membro. Para isso, utiliza-se um curativo derivado de látex natural associado a equipamentos emissores de luz LED para acelerar o processo de cicatrização [1][8][2][3][4][5][6][7][9].

A forma de cicatrização possui muitos aspectos que não são bem compreendidos [10][11], como sua estrutura, o processo de formação do tecido, os mecanismos de interação da úlcera com o equipamento, as propriedades angiogênicas de cicatrização, os efeitos mecânicos esperados no crescimento do tecido, a tenacidade e a estabilidade da pele regenerada.

Estudos são necessários para caracterizar essas curvas de crescimento tecidual, que podem ser consideradas um servossistema com saída mecânica, que requer características dinâmicas específicas e não pode ter operação intermitente durante a interação.

A técnica de identificação de sistemas (SI) tem sido utilizada para analisar questões inerentes aos sistemas biológicos. Em "Modelos de espaço de estado de potenciais evocados para localizar a zona de início da crise", modelos matemáticos foram implementados através de IS para localizar a zona de início da crise no cérebro [12]. Outra modelagem foi realizada para obter o modelo da rede arterial implementado para a detecção e diagnóstico de doenças cardiovasculares [13]. Trabalho semelhante ao que está sendo proposto neste trabalho utiliza a técnica Bond Graph (BG) para propor a modelagem matemática da pele humana [14]. Com o modelo obtido foi possível simular as deformações que ocorrem na pele devido a perfurações.

O método SI tem sido aplicado a sistemas biológicos em tratamento. A partir do entendimento de um modelo de sistema identificado por meio de dados experimentais, pode-se realizar uma avaliação dinâmica e gerar indicadores e especificações de desempenho para padronizar a medida da curva de cura. Neste trabalho, é proposta a modelagem IS do processo de cicatrização de feridas, com dados extraídos de imagens médicas do processo temporal de neoformação tecidual.

Nesse contexto, a modelagem experimental essencial impõe restrições de simultaneidade para o entendimento do sistema dinâmico de fotobiostimulação com interação de biomateriais de látex. Assim, a modelagem fornece uma análise e sugere um índice de desempenho na operação de interação intermitente.

Em particular, demonstramos que é possível desenvolver modelos matemáticos e através da ferramenta de identificação do sistema analisá-los para verificar a qualidade de cada modelo e as características do sistema. Por fim, a validação desses modelos buscará verificar se a dinâmica observada sugere o protocolo com a melhor resposta de neoformação tecidual.

1.1 OBJETIVO

Propor modelos matemáticos através da identificação de sistemas tendo como parâmetros dados medidos em dois protocolos: Rapha e SUS com uso da ferramenta Matlab. Através desses modelos verificar se as dinâmicas observadas sugerem o melhor protocolo para a cicatrização de úlceras.

- Desenvolver um modelo matemático para cada paciente dos grupos controle e experimental.
- Analisar esses modelos através de sistemas de controle.

1.2 DESCRIÇÃO DA METODOLOGIA

Utilizando a ferramenta Matlab construiu-se um sistema referente a cada protocolo. Para a criação desses modelos matemáticos foram considerados como saída do sistema informações de uma base de dados de imagens, classes de mensuração de úlceras de pé diabético.

Nesta base houve o agrupamento de todas as informações possíveis relacionadas ao ensaio clínico randomizado e controlado, cego, cujo protocolo foi previamente aprovado pelo Comitê de Ética em Pesquisa em Seres Humanos da Fundação de Ensino e Pesquisa em Ciências da Saúde (FEPECS) sob o CAAE: 94910718.5.0000.0030.

Como entradas do sistemas foram implementadas dois vetores. Para o protocolo Rapha considerou-se um pulso de luz de 35 joules por centímetro quadrado a cada vinte e quatro horas, somatizando o tempo total ao qual o paciente foi submetido. Para o protocolo SUS considerou-se um estímulo para cada aplicação medicamentosa (aquacel, alginato de cálcio, etc.) e também considerou-se a somatória a qual o paciente foi exposto ao fim do tratamento. Após realocar as informações, foi utilizada a ferramenta system identification para implementação dos modelos.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 MODELAGEM MATEMÁTICA

Um modelo é um conjunto de comportamentos que descreve um determinado sistema e atende a necessidade de representar um fenômeno. Para que um modelo seja descrito de forma adequada deve ser representado por relações matemáticas e construído através de dados extraídos do sistema ao qual queremos descrever, desta forma obtêm-se uma modelagem matemática de um sistema real.

Apesar do modelo ser baseado em dados e informações do sistema, ele é apenas uma representação aproximada da realidade. A fim de que essa representação seja o mais equivalente ao sistema real é necessário que alguns aspectos sejam observados: linearidade, invariância no tempo e concentração de parâmetros. Ao determinar essas características do sistema a ser modelado é possível escolher as técnicas que serão utilizadas e consequentemente a forma de modelagem que mais condiz com o comportamento do sistema real.

Existem algumas formas de desenvolver uma modelagem matemática: modelagem caixa branca, modelagem caixa preta, também conhecida como identificação de sistemas, e a modelagem caixa cinza. Elas possuem técnicas diferentes de modelagem do sistema de acordo com as informações que possuímos dos fenômenos que estão sendo observados. Abaixo foram abordadas brevemente características de cada uma dos tipos de modelagem.

- Modelagem caixa branca: a Modelagem Caixa Branca é também conhecida como modelagem pela física ou natureza do processo ou ainda como modelagem conceitual. Neste tipo de modelagem é necessário conhecimento prévio do sistema em análise e dos fenômenos que o constituem, tais como suas leis físicas. Uma outra consideração da modelagem caixa branca é o tempo gasto para modelar o sistema devido a necessidade de equacionar os fenômenos observados.
- Modelagem caixa cinza: A modelagem caixa cinza é uma junção das modelagens branca e preta.

- Modelagem caixa preta ou identificação de sistemas: já a modelagem caixa preta, conhecida como identificação de sistemas, utiliza métodos no qual é necessário pouco ou nenhum conhecimento prévio de um sistema para a modelagem do mesmo. Este tipo de modelagem representa a relação de causa e efeito, ou seja, qual a saída de um sistema a depender de sua entrada, e é indicado quando não se conhece o comportamento do sistema a ser modelado.

2.1.1 Tipos de Modelo

Após a construção do modelo é possível observar por qual lei matemática ele é regido. Existem várias formas de classificação: modelos estáticos e dinâmicos, discretos e contínuos, autônomo e não autônomo. Todos eles se referem aos dados com o qual o modelo foi construído e as equações que foram formadas a partir de seu comportamento. Os modelos paramétricos, por exemplo, possuem como dados números e coeficientes. Já modelos não paramétricos possuem representações gráficas, tais como resposta ao impulso e resposta em frequência.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo serão apresentados os passos realizados para a construção dos modelos matemáticos dos protocolos Padrão Ouro SUS e Padrão Rapha. Além da ferramenta utilizada para estimar, validar e simular os modelos.

3.0.1 Ensaio Clínico

Um estudo clínico foi realizado por pesquisadores da Universidade de Brasília (UnB) para avaliar a eficácia e segurança de um protocolo para tratamento de úlceras diabéticas de membros inferiores (DLLU) utilizando a associação de biomembrana derivada de látex natural (*Hevea brasiliensis*) e equipamento emissor de luz LED de comprimento de onda variável ($\lambda = 450 \text{ nm}$ a $\lambda = 636 \text{ nm}$). Sob o certificado de avaliação ética de número 94910718.5.0000.0030 aprovado pelo Comitê de Ética em Pesquisa da SES/DF/FEPECS.

O ensaio foi randomizado e comparativo, duplo-cego e teve como objetivo avaliar a ação conjunta de adesivo de látex e equipamentos emissores de luz. A metodologia de aplicação foi semelhante a um curativo DLLU aplicado no Sistema Único de Saúde (SUS) - sugerindo o mesmo protocolo, mas com os agentes propostos.

A amostra foi composta por 113 participantes da pesquisa com DLLU de dois centros médicos: Hospital Regional do Gama (HRG) e Hospital Regional da Asa Norte (HRAN), divididos em dois protocolos comparativos. A permanência do participante no estudo foi de aproximadamente 90 dias. Os participantes do estudo foram randomizados em um dos grupos de tratamento de acordo com uma lista de randomização, gerada por software.

O Grupo Controle (GC) utilizou o protocolo padrão ouro do SUS, que consiste em cobrir toda a área da ferida com o curativo primário adequado ao tipo de lesão tecidual, que pode ser alginato ou espuma de prata. A troca desse curativo era realizada a cada três dias no centro de pesquisa, enquanto a troca do curativo secundário era realizada diariamente na residência do participante.

O Grupo Experimental (GE) utilizou o protocolo denominado Rapha[®]. O procedimento adotado realizou assepsia e cobertura da ferida com a biomembrana de látex. Em seguida, o aparelho emissor de luz LED, envolto em filme plástico, foi posicionado sobre o curativo e mantido em operação por trinta e cinco minutos. Essa rotina era realizada diariamente na casa do participante.

3.0.2 Seleção de dados e pré-processamento

Para este estudo foram adotados os seguintes critérios de inclusão para selecionar os participantes a partir dos dados da ficha Clínica:

- Sexo Masculino;
- Idade 50 ± 5 anos;
- Apenas um ferimento por membro;
- Equipamento emissor de luz vermelha ($\lambda = 636 \pm 20 \text{ nm}$).

Os dados relativos à área da ferida foram organizados juntamente com um vetor de tempo, em dias, e com a contagem inicial no primeiro dia de avaliação da ferida. Em seguida, a variação percentual de cada ferimento foi determinada. Essa variação é importante para possibilitar a comparação entre as diferentes feridas, obtendo-se a normalização de cada amostra de dados para este resultado.

3.0.3 Sistema Biológico de Neoformação Tecidual

Para a análise do processo de neoformação tecidual foi proposto um sistema Single Input Single Output (SISO). As entradas do sistema representam o protocolo de tratamento aplicado e a planta o sistema a ser analisado. O diagrama de blocos apresentado na Fig.3.1 exemplifica o sistema proposto para o protocolo de tratamento Rapha[®].

Os sinais de excitação dos sistemas foram criados a partir de considerações baseadas nos protocolos aplicados. A entrada utilizada para o protocolo Rapha[®] foi criada levando em consideração o tempo em que a ferida ficou exposta a irradiação luminosa, cerca de 1800s. Desta forma, o sinal é representado por uma onda quadrada, com frequência diária durante todo o período de tratamento.



Figura 3.1. Diagrama de blocos do sistema em malha aberta, onde a entrada é referente ao protocolo de tratamento Rapha e a saída é a medida da área da ferida.

A entrada para o protocolo SUS foi estimada como sendo um decaimento linear da medicação utilizada na cobertura da ferida enquanto está em contato a pele do paciente. O curativo é trocado a cada três dias até o final do tratamento, desta forma o sinal de entrada ficou sendo uma onda triangular com amplitude unitária. A taxa de amostragem dos sistemas foi fixada em 60s.

A frequência e o tempo na qual o paciente é exposto ao protocolo determinou o sinal de entrada. Como a exposição não é contínua definiu-se um sinal discreto no tempo, com amplitude de 35 joules/cm que é a energia liberada pelo equipamento, com uma taxa de amostragem de 1800 segundos equivalente a uma aplicação de trinta minutos. O sinal foi replicado pelo tempo total de tratamento que equivale a quatro semanas.

3.0.4 Identificação de Sistemas

O método utilizado para a implementação de modelos através da identificação de sistemas possui duas etapas fundamentais: a estimação do modelo e a validação. Essas etapas foram executadas na toolbox System Identification do software Matlab® R2021a.

Na etapa de estimação foi gerado um modelo para cada participante selecionado para esse estudo. Como entrada foi utilizado o vetor referente ao sinal de excitação do protocolo em análise e como saída o vetor com a área da ferida medida ao longo do tratamento. Como o processo de cicatrização em análise possui resposta biológica lenta foi necessário adotar uma estratégia matemática que considerasse essa característica para melhorar a qualidade do modelo. Para isso foi aplicada a técnica de interpolação linear nos dados e com isso foi criado um vetor de dados com intervalo de tempo em segundo.

Em seguida os vetores foram normalizados para que fosse possível a análise da variação percentual da área das feridas. Os modelos foram estimados utilizando o método n4sid, gerando o resultado em espaço de estados décima ordem, com valores iniciais gerados automaticamente pelo Matlab®. A Fig. 3.2 mostra as telas de configuração da ferramenta System Identification para obtenção do espaços de estados.

Para validar os modelos é necessário utilizar um conjunto de dados diferente do utilizado na etapa de estimação. Os vetores de validação de dados foram criados a partir das médias dos vetores de saída de cada grupo após interpolação. Assim foi criada uma serie de dados que possui o comportamento que acompanha a tendência dos dados originais, porém com uma espécie de ruído inserido pela variação das amostras. Em seguida os modelos foram analisados para verificar o quão bem a estimativa acompanhou os dados obtidos experimentalmente.

Após a obtenção dos espaços de estados foram comparados os vetores de validação para verificar o quão bem a estimativa acompanhou os dados.

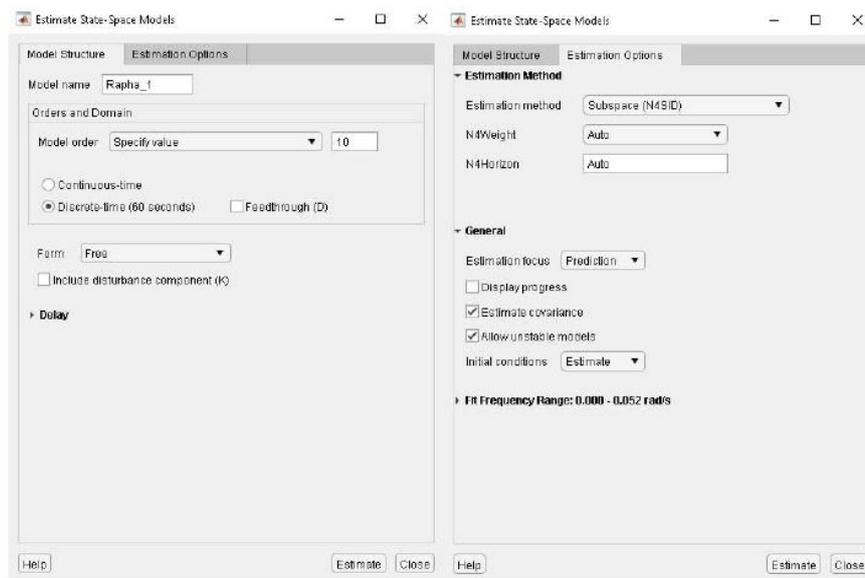


Figura 3.2. Tela de configuração do System Identification do Matlab® para obtenção de espaços de estados, onde é possível modificar o método, a ordem, entre outros.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

O procedimento de identificação de sistemas realizado para o GE resultou em 11 modelos. Os dados referentes ao fit de estimação e validação são apresentados na Tab. 4.1. Para o grupo controle o resultado foi de cinco modelos, conforme é apresentado na Tab.4.2. A diferença no número de modelos em cada grupo reflete a diferença de participantes nos grupos do ensaio clínico.

Tabela 4.1. Valores obtidos em simulação computacional e valores médios de percentual de redução de área de ferida para pacientes do GE.

| Rapha® Protocol | Estimate fit(%) | Validation fit(%) |
|-----------------|-----------------|-------------------|
| Rapha_1 | 26.596743 | 73.306496 |
| Rapha_2 | 35.635300 | 82.096550 |
| Rapha_3 | 62.365611 | 49.482418 |
| Rapha_4 | 68.504027 | 6.946212 |
| Rapha_5 | 83.013103 | 48.719231 |
| Rapha_6 | 61.338047 | 80.360187 |
| Rapha_7 | 29.094635 | 77.819417 |
| Rapha_8 | 21.972722 | 88.033769 |
| Rapha_10 | 71.478093 | 13.320358 |
| Rapha_11 | 81.390354 | 85.985418 |
| Rapha_12 | 89.770896 | 54.185362 |

Tabela 4.2. Valores obtidos em simulação computacional e valores médios de percentual de redução de área de ferida para pacientes do GC.

| SUS Protocol | Estimate fit(%) | Validation fit(%) |
|--------------|-----------------|-------------------|
| Control_1 | 59.591303 | 76.170470 |
| Control_2 | 19.977190 | 72.723208 |
| Control_3 | 38.135247 | 71.759699 |
| Control_4 | 56.149289 | 61.356041 |
| Control_5 | 60.828281 | 48.580269 |

O fit de validação representa a adaptação do modelo proposto ao resultado experimental. Analisando os resultados obtidos é possível notar que, em ambos os grupos, os valores de fit, em sua maioria, não se aproximam dos 90% observados nos modelos obtidos quando comparados a estimativas apresentas no trabalho de Dash [13].

O comportamento da pressão arterial observado por Dash em seu estudo tem um comportamento físico bem definido. Já no estudo aqui realizado o processo de cicatrização não é padronizado para todos os indivíduos, portando levou-se em consideração se o modelo proposto seguiu a tendência de comportamento da saída.

Este comportamento pode ser observado nos gráficos que comparam as saídas dos modelos com a média das áreas de cada grupo. Na Fig. 4.2 é observado que os modelos do GC apresentam comportamentos distintos entre si e em torno da média. Na Fig. 4.1 é possível ver um comportamento mais uniforme dos modelos e mais próximos a média.

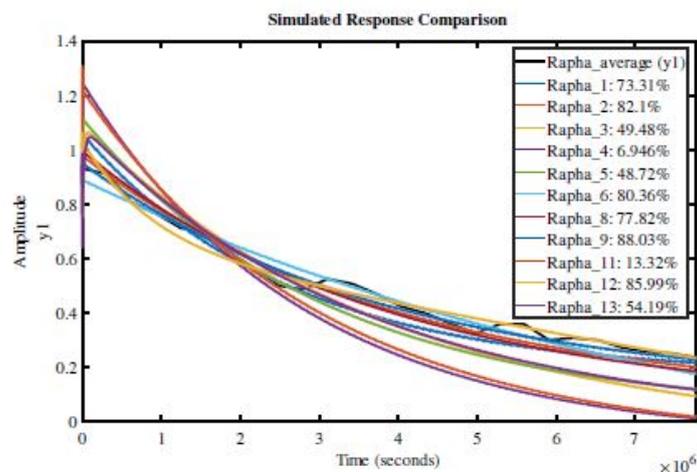


Figura 4.1. Comparação das saídas dos modelos de EE para o protocolo Rapha® com o vetor de Validação, em preto, onde é possível ver que os sistemas acompanharam de forma satisfatória.

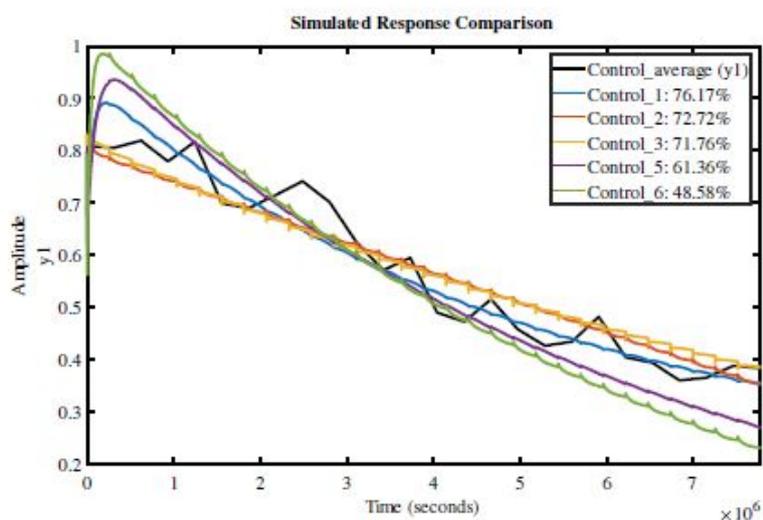


Figura 4.2. Comparação das saídas dos modelos de EE para o protocolo SUS com o vetor de Validação, em preto, onde é possível ver que os sistemas acompanharam de forma satisfatória.

5 CONCLUSÃO

A partir dos dados das áreas das feridas, obtidos experimentalmente, foi proposta a utilização do método de identificação de sistemas para a obtenção de modelos capazes de descrever o processo de cicatrização estimulados por dois métodos distintos: o protocolo padrão ouro do SUS e protocolo Rapha[®]. O objetivo de ambos protocolos é promover a cicatrização de úlceras diabéticas de membros inferiores, comorbidade de difícil tratamento que leva a amputação do membro afetado nos piores casos.

Os dados obtidos em ensaio clínico e utilizados no processos de identificação foram pré-processados de forma a se obter um melhor resultado na modelagem. Os modelos foram obtidos por meio de identificação de sistemas no software matlab. Foram gerados 11 modelos para o grupo experimental e 5 modelos para o grupo controle.

A conclusão desse estudo foi que os modelos obtidos para o GC não seguem uma tendência em torno da média como a apresentada pelos modelos gerados para o GE. Essa observação é pertinente e abre discussão para estudos futuros em que controladores podem ser projetados para atuar no sistema de forma a garantir uma resposta mais próxima a desejada.

Referências Bibliográficas

- [1] S.S.R.F. Rosa; M.F.F. Rosa; M.P. Marques; Et al;. Regeneration of diabetic foot ulcers based on therapy with red led light and a natural latex biomembrane. 2019.
- [2] Marc S.Rendell. The time to develop treatments for diabetic neuropathy expert opinion on investigational drugs. 2021.
- [3] M. L. Zequera; S. E. Solomonidis; F.Vega e L. M. Rondon. Study of the plantar pressure distribution on the sole of the foot of normal and diabetic subjects in the early stages by using a hydrocell pressure sensor. 2003.
- [4] A.L. Delis; S.S.R.F. Rosa; P.E.N. Souza; Et al. Characterization of the cicatrization process in diabetic foot ulcers based on the production of reactive oxygen species. *Journal of diabetes research*, 2018.
- [5] J.Burgess; Et al A. Shazli, U; Alam. Review state-of-the-art pharmacotherapy for diabetic neuropathy, expert opinion on pharmacotherapy. 2021.
- [6] L.S.M. Costa; V.G. Lima; M.P.R. Barbosa; Et al. Photobiomodulation: systematic review and meta-analysis of the most used parameters in the resolution diabetic foot ulcers. 2020.
- [7] J.C.T. Rocha; C.A. Castro; M.S. Fiorese; Et al. Light-emitting diode modulates carbohydrate metabolism by pancreatic duct regeneration. 2017.
- [8] X. Xu; D.D. Xu;. Prospects for the application of transcranial magnetic stimulation in diabetic neuropathy. 2021.
- [9] M.F.F. Rosa; M.A.M. Fonseca; Et al S.S.R.F. Rosa; Rosa. Evidence in practice of tissue healing with latex biomembrane: Integrative review. 2019.
- [10] K.L. ANDREWS; M.T. HOUDEK; L.J. KIEMELE; Et al. Wound management of chronic diabetic foot ulcers: from the basics to regenerative medicine. *Prosthetics and orthotics international*, 2015.

- [11] A. Wang; G. Lv; X. Cheng; Et al. Guidelines on multidisciplinary approaches for the prevention and management of diabetic foot disease (2020 edition). *Burns & Trauma*, v. 8, 2020.
- [12] R.J. Smith; G. Kamali; M. Hays; Et al. State-space models of evoked potentials to localize the seizure onset zone. *42nd Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine & Biology Society (EMBC)*, 2020.
- [13] A. Dash; N. Ghosh; A. Patra; Et al. Estimation of arterial blood pressure waveform from photoplethysmogram signal using linear transfer function approach. *42nd Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine & Biology Society (EMBC)*, 2020.
- [14] M.F.F. Rosa; .S.R.F. Rosa; E.K.F. Souza;. Sistema complexo bio inspirado: modelagem matemática da pele humana via bond graph. . *Estudos Tecnológicos em Engenharia*, v.10, n. 2, 2016.