

Efeito da inclusão das nanoantenas óticas no aumento da sensibilidade dos biossensores

R. Rodrigues, M. Martins
Academia Militar
Lisboa, Portugal

rodrigues.rcg@exercito.pt; mariajoamartins2@gmail.com

A. Batista

Instituto Superior Técnico – Universidade de Lisboa
Lisboa, Portugal

baptista@tecnico.ulisboa.pt

Resumo — Os desenvolvimentos na área da tecnologia nanométrica têm proporcionado grandes avanços no conhecimento e na ciência. A utilização de dispositivos de dimensões bastante reduzidas como as nanoantenas permite criar sistemas simples com bastante utilidade, de forma prática e com um custo bastante reduzido, como por exemplo todo o tipo de sensores e biossensores. Este artigo tem como objetivo o estudo do comportamento de sistema que inclui uma nanoantena e um biossensor. Numa primeira fase é estudada a estrutura composta por um dielétrico de silício e por elementos metálicos de ouro, alumínio e platina. Posteriormente são adicionados a esta estrutura as camadas da pele com o objetivo de estudar o comportamento do campo elétrico quando este a atravessa. Os resultados das simulações são obtidos através do programa COMSOL Multiphysics, e os dados são processados através do MATLAB.

I. INTRODUÇÃO

Desde o início da existência do ser humano que nos fascinamos com o poder da luz. Devido à evolução tecnológica a luz deixou de servir apenas para iluminar a escuridão e passou a ter um papel fundamental no nosso quotidiano, desde iluminar ruas e habitações durante a noite, às aplicações que mudaram o mundo, como o estabelecimento de uma rede global de comunicações. A nanomedicina é uma subárea da medicina que surge com o objetivo de impulsionar os avanços das aplicações da nanotecnologia na área da medicina tradicional. Os aparelhos baseados em nanotecnologia têm diversas aplicações para auxílio no diagnóstico e tratamento de pacientes através de técnicas menos intrusivas ou até mesmo não intrusivas, o que não era possível com as tecnologias anteriores. A utilização de dispositivos baseados em nanotecnologia facilita a obtenção de dados devido à sua praticabilidade face a tecnologias mais antigas. Estes dispositivos, baseados em nanotecnologia, são bastante úteis, tendo em conta que os militares destacados nos teatros de operações são sujeitos a condições quer ambientais quer comportamentais, ao lidarem com diferentes situações de risco, muito diferentes daquelas a que estão habituados em Território Nacional. Assim, devido à natureza do trabalho de um militar, à elevada intensidade física e à sujeição a ambientes adversos, a monitorização dos soldados, através de biossensores é de extrema importância, para salvaguardar a saúde dos mesmos permitindo que em caso de necessidade estes sejam assistidos o mais rapidamente possível. Contribui-se assim para uma otimização do desempenho das forças destacadas, nomeadamente evitando baixas desnecessárias nas forças militares. Estes dispositivos são, no entanto, úteis tanto em ambientes de cenário real, no caso de missões em que os militares estejam destacados para desempenhar as suas funções, como em ambientes de simulação, onde os militares estão em formação/aprontamento ou durante a realização de cursos onde as capacidades físicas dos militares sejam exploradas até ao limite.

II. CONCEITOS FUNDAMENTAIS

A. Parâmetro biométricos

A biometria [bio(vida) + metria(medida)] é o estudo e a medida das características físicas e comportamentais dos seres vivos. Esta área tem assim diversas aplicações sendo que, a que nos interessa em particular é a biometria associada ao ser humano, já que permite ajudar os profissionais de saúde a compreender melhor o estado de saúde dos seus pacientes.[1]

Os parâmetros biométricos podem ser medidos através de aparelhos especificamente desenvolvidos para esse efeito, sendo importante referir um grupo especial que se denominam de parâmetros vitais:

- Frequência cardíaca
- Frequência respiratória
- Pressão arterial
- Temperatura corporal

Estes parâmetros são indicadores das funções vitais e permitem avaliar o estado físico de um paciente.

B. Métodos de medição da pulsação e saturação de oxigénio

O sangue é responsável por transportar o oxigénio para as diferentes partes do nosso corpo, garantindo um fluxo vital para o ser humano.

Existem dois métodos principais para efetuar a medição da pulsação e saturação do oxigénio:

- Método Invasivo
- Método não invasivo

No primeiro caso é necessário que seja retirado uma amostra de sangue à pessoa em questão e de seguida a amostra é analisada em laboratório, neste caso é impossível obter-se uma leitura em tempo real.

O segundo caso permite que o utilizador seja monitorizado continuamente e de forma prática. Os métodos não invasivos resumem-se essencialmente a métodos espectrofotométricos que fazem uso das propriedades óticas dos materiais, como a absorção e a reflexão, para determinar os constituintes de uma determinada amostra. [2]

C. Modo de funcionamento de um oxímetro

Os oxímetros devem ser colocados em zonas como os pulsos, os dedos, no peito ou no lóbulo das orelhas por serem locais onde os vasos sanguíneos se localizam perto da superfície da pele ou também pela afluência de sangue na região permitindo obter leituras com maior precisão.

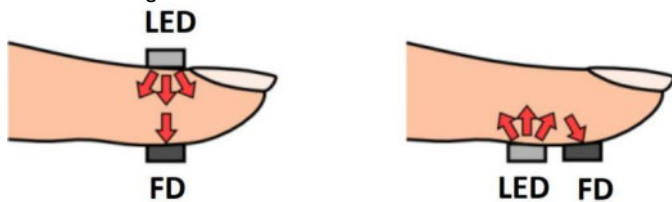


Figura 1 - Tipologias de funcionamento dos oxímetros, por transmissão (à esquerda), e por reflexão (à direita)[3]

Os oxímetros podem operar em dois modos distintos. Em modo de transmissão o LED envia uma onda eletromagnética na direção da pele e o fotodiodo mede a quantidade de luz recebida que atravessa a pele. Para este sistema funcionar é necessário que o LED esteja com um alinhamento idealmente perfeito com o fotodiodo de modo a maximizar a quantidade de luz recebida já que este é um fator determinante da sensibilidade final do sistema.[4]

No caso dos oxímetros de reflexão, o LED e o fotodiodo estão localizados do mesmo lado do corpo e medem a luz refletida pelos tecidos que compõem a pele. Este modo de operação tem a vantagem de permitir que o LED e o fotodiodo possam ser colocados em quase qualquer parte do corpo. Em contrapartida surge um novo problema que é a saturação do fotodiodo pela proximidade do LED, ou seja, o LED deve estar posicionado a uma distância suficientemente grande para que a radiação proveniente do LED não interfira diretamente com a radiação refletida, levando a valores disparem com o expectável, mas também não pode estar a uma distância muito elevada pois a radiação refletida pode não ser suficiente para a sensibilidade do fotodiodo levando a que o sinal recebido seja nulo.

D. Fotopletismografia

A fotopletismografia é um método ótico que tem por base a recolha de informação acerca das variações de volume de sangue em determinada região do corpo humano, este volume é convertido num sinal que é recolhido através de um oxímetro.

O gráfico que resulta do registo do volume de sangue em função do tempo é denominado de pletismograma(PPG), e representa a variação da absorção da luz nos tecidos e no sangue.

A imagem da figura 3 representa apenas um sinal genérico da pulsação de uma pessoa, o gráfico pode variar bastante de pessoa para pessoa especialmente com a idade e condições de saúde do paciente.

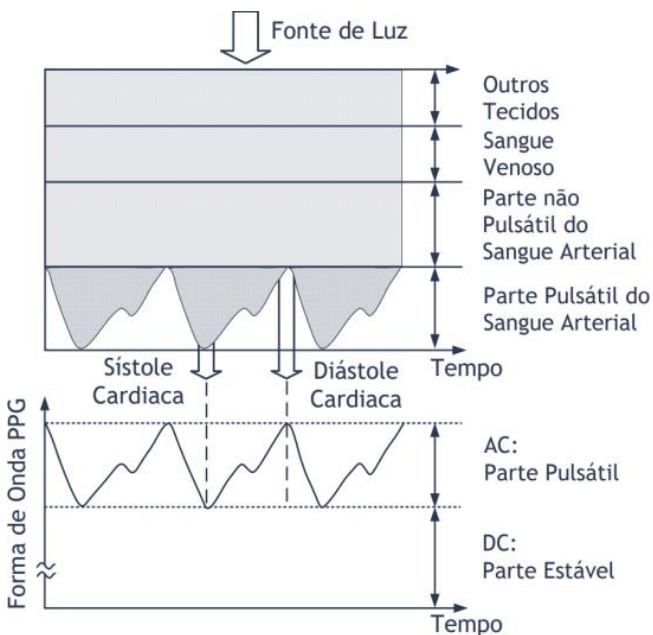


Figura 2 - Componentes do sinal que constituem o pulso cardíaco[5]

E. Modo de funcionamento de um oxímetro

O local mais adequado para colocar um oxímetro necessita de ser estudado de forma atenta, visto que este recorre a fenómenos como a reflexão ou absorção do sangue para determinar a frequência cardíaca. Os sensores podem ser colocados segundo as alternativas a seguir apresentadas:

- Colocar o sensor no dedo (dispositivo do tipo anel)
- Colocar o sensor no pulso (dispositivo do tipo pulseira)
- Colocar o sensor no peito (dispositivo do tipo banda, frequentemente utilizado por atletas de alta competição)

F. Nanoantenas

As antenas são responsáveis por estabelecer as comunicações sem fios que estão presentes em praticamente todo o lado no nosso quotidiano. As antenas são responsáveis por converter o campo elétrico numa onda que se propaga no espaço e o contrário também é possível para o caso das antenas de receção. A nanotecnologia é a ciência que estuda o comportamento dos materiais à escala nanométrica, envolvendo essencialmente estruturas de dimensões da ordem do nanómetro (nm ou $\times 10^{-9}$ m). As antenas podem ser classificadas em 4 grupos de acordo com o seu tipo[6]:

- Antenas eletricamente pequenas (dimensões bastante reduzidas comparando com o comprimento de onda λ)
- Antenas ressonantes (monopolos, dipolos, Yagi-uda, etc)
- Antenas de banda larga (utilizadas na difusão de televisão terrestre)
- Antenas de abertura (antenas cornetas)

As antenas óticas, apesar de respeitarem as mesmas leis que as antenas RF, não são antenas RF reduzidas a uma escala nanométrica. No fundo, quando dimensionamos uma antena temos como objetivo otimizar a comunicação entre o emissor e o recetor de forma a reduzir o consumo de energia e as nanoantenas têm de respeitar certos parâmetros devido ao seu tamanho que no caso das antenas RF não seria necessário tomar em conta.

III.FUNDAMENTOS DA OXIMETRIA

Os pulmões são responsáveis por efetuar as trocas gasosas, expulsando o dióxido de carbono e captando o oxigénio, que posteriormente será transportado para todas as partes do corpo através do sangue. A proteína presente no sangue que é responsável pelo transporte do oxigénio é a hemoglobina. A hemoglobina pode ser associada a vários elementos presentes na atmosfera, quando está associada ao oxigénio denomina-se de oxiemoglobina (HbO₂), quando perde a ligação com os átomos de oxigénio denomina-se desoxiemoglobina.(Hb) Estas são as principais formas de hemoglobina que podem ser encontrados no sangue. A absorção da luz por parte da hemoglobina varia mediante a saturação de oxigénio presente no sangue. A oxiemoglobina torna a cor do sangue mais clara e a desoxiemoglobina torna-o mais escuro. Este fenómeno da variação de cores do sangue deve-se ao facto de que os dois tipos de hemoglobina têm espectros óticos distintos. A Figura 3 representa o espectro do coeficiente de extinção molar das diversas componentes da hemoglobina em função do comprimento de onda da radiação nas regiões dos infravermelhos e visível. Analisando a Figura 3 podemos observar que as maiores diferenças se dão na zona dos 650 nm, onde a absorção por parte da desoxiemoglobina é muito mais significativa do que a oxiemoglobina e nos 1000nm observamos o contrário, a oxiemoglobina tem uma maior absorção do que a desoxiemoglobina.

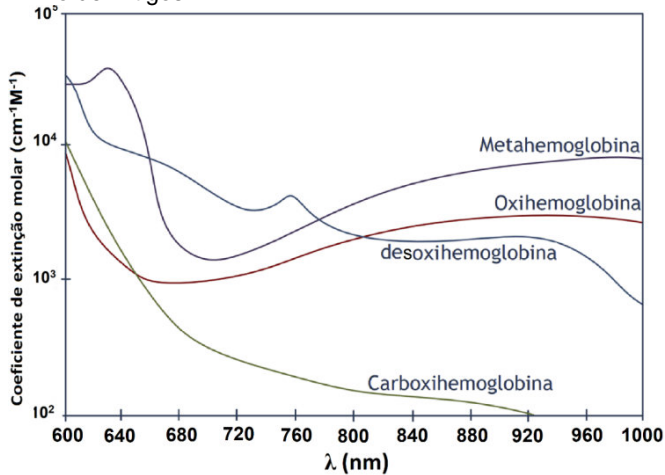


Figura 3 - Coeficiente de extinção molar das componentes da hemoglobina[7]

A. Limitações da oximetria

A oximetria apresenta várias limitações que afetam diretamente a fiabilidade dos resultados obtidos quando analisado um paciente.

Em primeiro lugar, sistemas mais simples que recorrem apenas a dois comprimentos de ondas distintos não conseguem determinar a oxigenação do sangue para todos os casos.

Em segundo lugar é importante referir a baixa fiabilidade associada à saturação de oxigénio para valores inferiores a 70% já que para esses valores não é possível obter calibração.

Por último, importa referir a fiabilidade dos equipamentos durante a execução de movimentos e outras atividades, já que o sinal pode sofrer distorções. [8]

B. Propriedades óticas da pele

A pele Humana apresenta um comportamento semelhante a um meio heterogéneo onde o sangue se encontra distribuído espacialmente de forma variável. A pele pode ser dividida em 3 diferentes camadas principais: a epiderme, a derme e a hipoderme. A epiderme é a camada mais superficial da pele, que está em contacto com o meio ambiente sendo que a sua espessura varia ligeiramente conforme a localização corporal sendo que o seu tamanho mais frequente é cerca de 100µm. Nesta camada não existe sangue armazenado nem a circular. A derme é a camada intermediária da pele, localizada entre a epiderme e a hipoderme, esta é formada por um tecido conjuntivo e por isso nesta camada estão presentes vasos sanguíneos. A espessura desta camada varia de 500µm a 4mm. A hipoderme é a camada mais interna da pele e é responsável por isolar o corpo das temperaturas externas. Esta camada é constituída entre outras coisas por vasos sanguíneos e possui uma espessura típica que varia de 1 a 6 mm. Quando a luz incide na superfície da pele, podem ser descritos 4 fenómenos que descrevem o comportamento ótico da luz na pele[9]:

- Reflexão
- Transmissão
- Absorção
- Dispersão

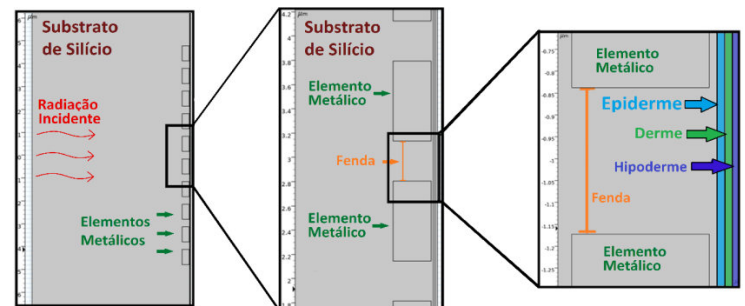


Figura 4 - Esquema de representação do modelo utilizado no COMSOL Multiphysics

Inicialmente foi estudada qual a distância entre os elementos metálicos e a cutline que maximizavam o campo à saída, a cutline é posicionada verticalmente e paralela aos elementos metálicos, esta representa a separação entre o substrato de silício e a primeira camada da pele. Após determinada a distância da cutline para a qual o campo era máximo, segue-se o estudo da influência de um conjunto de fatores no campo recebido:

Frequência da radiação incidente [530nm; 540nm; 660nm; 670nm; 950nm; 960nm] µm

Material constituinte dos elementos metálicos [ouro; platina; alumínio]

Esquema de arranjo dos elementos metálicos [retangulares; circulares; retangulares conjugados com retangulares; retangulares conjugados com circulares]

A figura 5 representa os valores obtidos na simulação para elementos retangulares em platina, nesta configuração foram obtidos os melhores resultados, pelo que os dados processados a partir deste momento passam a ser apenas relativamente a uma configuração de elementos metálicos retangulares em platina. Para este estudo apenas está implementado no esquema do COMSOL o substrato de silício e os elementos metálicos, nesta fase de simulação as camadas da pele ainda não foram adicionadas.

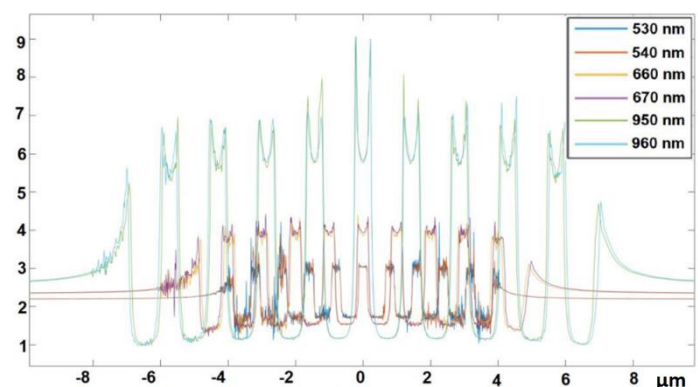


Figura 5 - Campo normalizado à saída da antena quando são utilizados elementos metálicos retangulares em platina

A tabela seguinte apresenta os resultados numéricos obtidos na simulação representada na Figura 5.

Tabela 1 - Valor máximo do campo normalizado à saída da antena para os diversos casos

Campo máximo recebido	530nm	540nm	660nm	670nm	950nm	960nm
Ouro	6.4	5.6	7.2	7.3	6.6	6.6
Platina	4.2	3.9	4.4	4.4	9.0	8.9
Alumínio	5.1	4.0	3.0	3.1	3.0	2.8

O objetivo principal é maximizar o campo à saída da antena, e através dos dados apresentados é possível determinar que a melhor opção ocorre na situação em que usamos elementos metálicos retangulares de platina, para um comprimento de onda de 950nm, deste modo todas as próximas simulações farão uso destas especificações.

Foram criados os cenários tipos com os valores da tabela que se apresentam de seguida para simular as condições reais de propagação da luz na pele, posteriormente os gráficos serão analisados para confirmar se o modelo corresponde às expectativas e se pode simular o comportamento da propagação da luz na pele.

Tabela 2 - Dados da simulação para os casos tipos desenvolvidos

Camadas da pele caucasiano (sístole)	Condutividade (S/m)	Índice de refração (Real)	Índice de refração (Imaginário)	Espessura da camada
epiderme	0.95	1.40	$5 \cdot 10^{-5}$	140
derme	0.2	1.39	$5 \cdot 10^{-6}$	4700
hipoderme	0.7	1.40	$2.5 \cdot 10^{-4}$	470
Camadas da pele caucasiano (diástole)				
epiderme	0.95	1.40	$5 \cdot 10^{-5}$	140
derme	0.2	1.39	$5 \cdot 10^{-6}$	4700
hipoderme	0.7	1.45	$2.5 \cdot 10^{-5}$	470
Camadas da pele africano (sístole)				
epiderme	0.95	1.45	$5 \cdot 10^{-5}$	140
derme	0.2	1.39	$5 \cdot 10^{-6}$	4700
hipoderme	0.7	1.40	$2.5 \cdot 10^{-4}$	470
Camadas da pele africano (diástole)				
epiderme	0.95	1.45	$5 \cdot 10^{-5}$	140
derme	0.2	1.39	$5 \cdot 10^{-6}$	4700
hipoderme	0.7	1.45	$2.5 \cdot 10^{-5}$	470

Os gráficos de seguida apresentam os valores obtidos nas simulações realizadas utilizando os valores descritos na tabela 2.

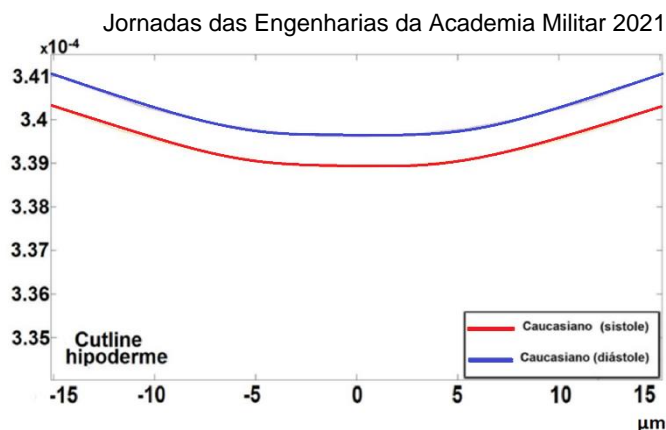


Figura 6 - resultados da simulação cutline hipoderme para um individuo caucasiano

Durante a fase da sístole há um aumento da quantidade de sangue nos vasos capilares que irá causar uma maior atenuação devido à quantidade elevada de sangue rico em oxigénio que percorre as veias. Através da análise da Figura 6 podemos confirmar que os resultados obtidos estão de acordo com o esperado

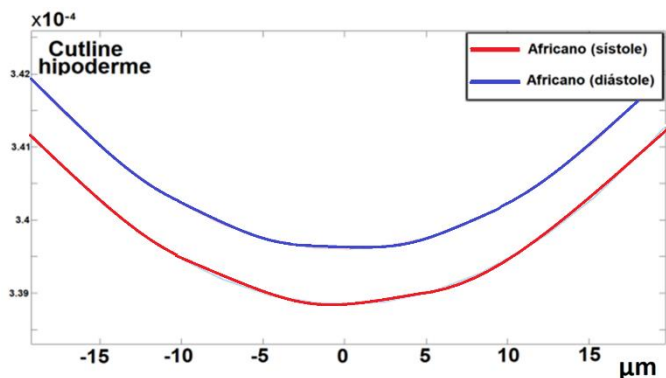


Figura 7 - Resultados da simulação cutline hipoderme para um individuo africano

Como foi explicado no paragrafo anterior podemos afirmar que analisando a Figura 7 confirmamos que os resultados obtidos vão de encontro aos esperados. Deste modo podemos afirmar que tanto para o cenário do individuo caucasiano como para o individuo africano é possível observar-se nas figuras anteriores que o campo elétrico para o caso da sístole é sempre inferior comparando com a diástole, o que está de acordo com o esperado. Deste modelo podemos concluir que o modelo pode ser aplicado para calcular o campo elétrico quando este percorre as camadas da pele.

V. CONCLUSÕES

Este artigo tem como objetivo estudar a vantagem do uso das nanoantenas para aumentar a sensibilidade dos biossensores.

Durante a realização da mesma foi demonstrada que o uso de nanoantenas, mais especificamente as nanoantenas de fendas com dimensões inferiores ao comprimento de onda podem ser aplicadas em biossensores por forma a aumentar a sensibilidade dos mesmos, tendo o melhor desempenho quando utilizadas antenas de fendas com elementos retangulares constituídos em platina para um comprimento de onda da radiação incidente de 950nm.

Através das simulações conseguimos demonstrar que o modelo realizado com o COMSOL consegue descrever o comportamento da propagação da luz nas diferentes camadas da pele.

VI.REFERÊNCIAS

- [1] I. Blumenthal, "THE DEVELOPMENT OF THE CLINICAL THERMOMETER," 1998.
- [2] K. Li, S. Warren, and B. Natarajan, "Onboard tagging for real-time quality assessment of photoplethysmograms acquired by a wireless reflectance pulse oximeter," IEEE Transactions on Biomedical Circuits and Systems,
- [3] T. Tamura, Y. Maeda, M. Sekine, and M. Yoshida, "Wearable photoplethysmographic sensors—past and present," Electronics
- [4] O. S. Fathabadi, T. J. Gale, J. C. Olivier, and P. A. Dargaville, "Automated control of inspired oxygen for preterm infants: What we have and what we need," Biomedical Signal Processing and Control,
- [5] F. de Engenharia, D. Fonseca Cruz, D. Carlos Manuel Pereira Cabrita Coorientador, and D. Eduardo Manuel Godinho Rodrigues, "UNIVERSIDADE DA BEIRA INTERIOR Sensor de Fotopletismografia por Reflexão sem Fios: Projeto e Desenvolvimento de Hardware."
- [6] A. E. Krasnok et al., "Optical nanoantennas," Uspekhi Fizicheskikh Nauk
- [7] J. G. Webster, Design of pulse oximeters. Institute of Physics Pub, 1997.
- [8] P. D. Mannheim, J. R. Casciani, M. E. Fein, and S. L. Nierlich, "Wavelength Selection for Low-Saturation Pulse Oximetry," 1997.
- [9] E. Mohajerani, "Mechanisms of Laser-Tissue Interaction: I. Optical Properties of Tissue," 2011.