

Revista Física no Campus, v.2, n.1, p. 22-31, Campina Grande - PB, 2022

Universidade Estadual da Paraíba

<http://novo.revista.uepb.edu.br/fisicanocampus>

Artigo Original

MODELO DE CIRCUITO ELÉTRICO BASEADO NAS PERTURBAÇÕES EM UM SENSOR A ONDA ACÚSTICA DE SUPERFÍCIE A PARTIR DO COEFICIENTE DE REFLEXÃO DE ENTRADA ELECTRIC CIRCUIT MODEL BASED ON PERTURBATIONS IN A SURFACE ACOUSTIC WAVE SENSOR FROM THE INPUT REFLECTION COEFFICIENT

¹Henrique Dantas Silva, ²Raimundo Carlos Silvério Freire, ³Jalberth Fernandes de Araújo,
⁴Marlo Andrade Santos

^{1,4}Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica – UFCG, Campina Grande, PB,
Brasil;

^{2,3}Departamento de Engenharia Elétrica – UFCG, Campina Grande, PB, Brasil.

Resumo: Neste trabalho é apresentado um modelo de circuito elétrico baseado nas perturbações em um sensor a onda acústica de superfície. O modelo é fundamentado na determinação da impedância de entrada do sensor como função do coeficiente de reflexão de entrada. As perturbações utilizadas para desenvolver o modelo foram: 150 μL e 300 μL de água destilada, 150 μL de água destilada com sal, 150 μL de etanol, 150 μL de água destilada com glicerol. Para a determinação de um modelo de circuito elétrico para cada uma das perturbações, foram consideradas as perdas de reflexão de entrada do sensor e a sua frequência de ressonância. Dentre as perturbações analisadas, foi verificado que a água destilada não causou perdas elevadas de reflexão (inferior a 3 dB), resultando em uma energia refletida superior a 50%. No entanto, ao adicionar as demais perturbações, foram verificadas perdas de reflexão elevadas (superior a 12 dB), resultando em uma energia refletida cerca de 16 vezes menor do que a energia de entrada. Isso significa que o sinal de entrada do sensor foi transmitido com menores atenuações com água destilada do que com as demais perturbações. Além disso, verificou-se que a água destilada não modificou a frequência de ressonância do sensor, diferentemente das demais perturbações, que causaram a modificação da velocidade de fase da onda acústica de superfície. Assim, esse trabalho fornece um modelo de circuito elétrico para as perturbações de 150 μL e 300 μL de água destilada, 150 μL de água destilada com sal, 150 μL de etanol e 150 μL de água destilada com glicerol, bem como a metodologia para o desenvolvimento do modelo de circuito elétrico para outras perturbações, de forma a utilizar esse modelo em um simulador para facilitar a realização de análises com o sensor a onda acústica de superfície.

Palavras chave: sensor a onda acústica de superfície, perturbações, coeficiente de reflexão de entrada.

Abstract: In this paper, an electric circuit model based on perturbations in a surface acoustic wave sensor is presented. The model is based on determining the sensor input impedance as a function of the input reflection coefficient. The perturbations that were used to carry out the

¹henrique.dsilva@ee.ufcg.edu.br

model were: 150 μL and 300 μL of distilled water, 150 μL of distilled water with salt, 150 μL of ethanol, 150 μL of distilled water with glycerol. To determine an electrical circuit model for each of the perturbations, the sensor input reflection losses and its resonance frequency were considered. Among the analyzed perturbations, it was verified that distilled water didn't cause high reflection losses (less than 3 dB), resulting in a reflected power greater than 50%. On the other hand, when adding the other perturbations, high reflection losses (greater than 12 dB) were verified, resulting in a reflected power about 16 times smaller than the input power. This means that the sensor input signal was transmitted with lower attenuations with distilled water than with the other perturbations. In addition, it was verified that the distilled water didn't change the resonance frequency of the sensor, unlike the other disturbances, that caused the modification of the phase velocity of the surface acoustic wave. Thus, this work provides an electrical circuit model for the perturbations of 150 μL and 300 μL of distilled water, 150 μL of distilled water with salt, 150 μL of ethanol and 150 μL of distilled water with glycerol, as well as the methodology for the development of the electrical circuit model for other perturbations, in order to use this model in a simulator to facilitate the performance of analyzes with the surface acoustic wave sensor.

Keywords: surface acoustic wave sensor, perturbations, input reflection coefficient.

Introdução

O primeiro sensor a onda acústica de superfície (do inglês *Surface Acoustic Wave* - SAW) foi fabricado em 1965 [1] e, com o decorrer dos anos, passou a ser utilizado como: linhas de atraso e filtros mecânicos para o processamento de sinais de radiofrequência; ressonadores para a detecção de modificações na velocidade e comprimento de onda mediante alterações em parâmetros físicos, tais como temperatura e tensão; e osciladores para o processamento do sinal analógico em radares, comunicações e aplicações espaciais [2,3].

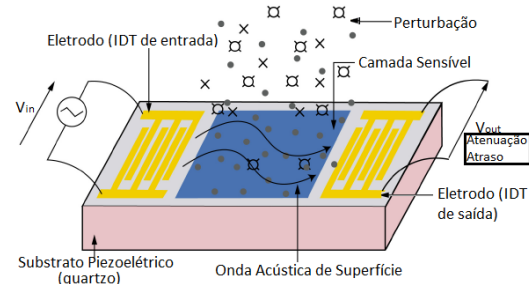
Uma outra aplicação do sensor SAW é o seu uso como biossensor para a detecção de vírus, bactérias e toxinas [4,5]. Essa aplicação é possível devido ao fato desses sensores serem sensíveis à substância para a qual foram projetados para detectar, podendo ser utilizados tanto em meios líquidos quanto em meios gasosos. O seu uso como biossensor ganhou importância nos últimos anos devido ao aumento da poluição ambiental e ao

crescimento do número de doenças decorrente de vírus e bactérias [5].

O sensor SAW também se destaca pelo seu tamanho portátil, permitindo o seu uso em ambientes de testes mais controlados, e pelo baixo custo de fabricação em relação a outras tecnologias existentes, como o sensoriamento remoto via satélite [6].

O funcionamento desses sensores é baseado na propagação de ondas mecânicas na superfície de um substrato piezoelétrico ao qual estão depositados transdutores interdigitais (do inglês *Interdigitated Transducers* - IDTs). Uma representação do princípio de funcionamento do sensor SAW pode ser observada na Fig. 1.

Fig. 1: Princípio de funcionamento do sensor SAW.



Fonte: Adaptado de [7].

Conforme apresentado na Fig. 1, o sensor SAW possui dois IDTs, um IDT de entrada e

outro de saída. Nos eletrodos do IDT de entrada é aplicada uma tensão alternada, V_{in} , com frequência próxima a frequência de ressonância do sensor, proporcionando o efeito piezoelétrico sobre a superfície de quartzo. O efeito piezoelétrico se inicia com a deformação mecânica caracterizada por um conjunto de compressão e expansão nos IDTs e se espalha ao longo do substrato. Desta forma, o IDT de entrada proporciona a transformação da onda elétrica em mecânica, gerando a onda acústica de superfície [8].

Considerando o fato de o efeito piezoelétrico ser reversível, um IDT de saída é utilizado como receptor e possibilita a coleta do sinal em forma elétrica. O sinal recebido, V_{out} , é atrasado e atenuado em relação ao sinal transmitido, V_{in} [9].

Uma outra estrutura que pode ser observada na Fig. 1 é a camada sensível. Esta camada é utilizada para absorver ou reagir com a substância externa depositada sobre a camada sensível do sensor, também chamada de perturbação. A adição das perturbações sobre a camada sensível causa alterações na velocidade de fase e na amplitude da onda acústica de superfície [10]. A depender da quantidade e do tipo de perturbação que for depositada sobre o sensor, as alterações na tensão de saída podem vir a ser suficientes para impedir a análise das características desse sinal, podendo gerar, por exemplo, um curto-circuito.

De forma a analisar a resposta em frequência do sensor em meio líquido mediante a adição de perturbações, [7] estudou as características de transmissão e de reflexão do sensor com a adição de amostras de água de rios e vilas próximas à região de estudo. A partir das análises realizadas, o autor conseguiu determinar a qualidade da água de cada uma das amostras selecionadas, identificando o tipo de

perturbação presente em cada amostra. Já [9] desenvolveu um modelo de circuito elétrico do sensor SAW e realizou testes, via simulação, dos efeitos causados pela inserção de uma perturbação. O autor concluiu que a perturbação causou uma atenuação na resposta em frequência do seu modelo de forma similar às respostas observadas no sensor físico.

Em [11] foi analisada a resposta em frequência do sensor SAW em meio líquido na faixa de 116 MHz mediante a adição de 15 tipos de perturbações, sendo desenvolvida uma equação que relaciona a impedância de entrada do sensor com o coeficiente de reflexão de entrada. O autor também analisou a variação da impedância do sensor com a frequência e o coeficiente de transmissão para cada uma das perturbações. Como resultados, o autor conseguiu estimar a viscosidade mecânica e a densidade das perturbações.

De forma geral, os trabalhos envolvendo a análise da resposta em frequência do sensor SAW em meio líquido mediante o acréscimo de perturbações focaram em constatar a eficiência do sensor para a detecção de perturbações, seja fisicamente ou via simulação. Com o objetivo de realizar uma análise mais detalhada das perturbações, buscando padronizar um modelo de circuito elétrico, que possa ser utilizado em simulações, para facilitar o estudo das características desse sensor, como biossensor em meios líquidos, esse trabalho tem por objetivo o desenvolvimento de um modelo de circuito elétrico baseado nas perturbações em um sensor a onda acústica de superfície a partir do coeficiente de reflexão de entrada.

Metodologia

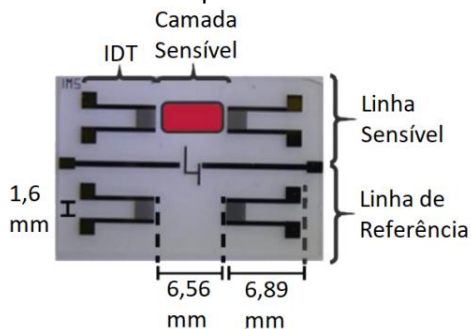
Nesta sessão são apresentados os materiais e métodos utilizados no desenvolvimento do modelo de circuito elétrico baseado nas perturbações em um sensor a onda acústica de superfície a partir do coeficiente de reflexão de entrada.

¹henrique.dsilva@ee.ufcg.edu.br

A. Características do Sensor

Neste trabalho foi utilizado um sensor SAW com uma camada de SiO_2 de $4 \mu\text{m}$ de espessura, depositada acima do substrato piezoelétrico. O comprimento de onda do sensor foi de $40 \mu\text{m}$ e sua frequência fundamental de operação foi de cerca de 117 MHz. Este sensor foi projetado e testado pelo Laboratório de Integração de Materiais para Sistema (do francês *Laboratoire de l'Intégration du Matériau au Système - IMS*) de Bordeaux, em conjunto com o Laboratório de Análise e Arquitetura de Sistemas (do francês *Laboratoire d'Analyse et d'Architectures des Systèmes - LAAS*) de Toulouse. Um esquema do sensor é apresentado na Fig. 2.

Fig. 2: Esquema do sensor SAW de 117 MHz desenvolvido pelo IMS Bordeaux.

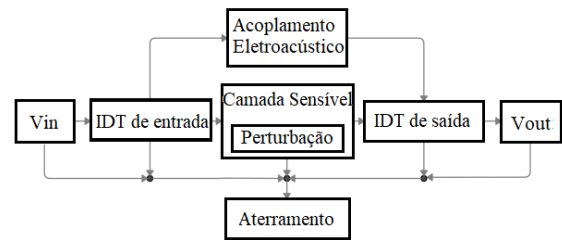


Fonte: Adaptado de [7].

Conforme apresentado na Fig. 2, é possível observar a existência de dois pares de IDTs. Na linha sensível foi depositada uma camada sensível entre os IDTs e a linha de referência foi utilizada como referência para compensar mudanças no ambiente, como mudanças na temperatura, pressão e umidade.

Na Fig. 3 está apresentado um diagrama de blocos simplificado do sensor SAW.

Fig. 3: Diagrama de blocos simplificado do sensor SAW.



Fonte: Adaptado de [9].

Na Fig. 3 são observados os vários blocos que compõem o SAW. Cada bloco pode ser modelado como um conjunto de componentes eletrônicos (resistor, capacitor, indutor, fonte, linhas de transmissão, terra, etc). Dentre os blocos apresentados, esse trabalho irá desenvolver um modelo de circuito elétrico para o bloco da perturbação com o objetivo de utilizar esse modelo em um simulador para analisar a resposta em frequência e no tempo do sensor mediante alterações nos parâmetros dos demais blocos do sensor.

B. Parâmetros S

Neste trabalho foi feita a medição do coeficiente de reflexão de entrada (S_{11}), do coeficiente de transmissão reversa (S_{12}), do coeficiente de transmissão direta (S_{21}) e do coeficiente de reflexão de saída (S_{22}) com um analisador de redes vetorial (do inglês *Vector Network Analyzer - VNA*). O VNA usado neste trabalho foi o "Copper Mountain TR1300/1".

Devido às características construtivas do sensor SAW utilizado neste trabalho, pode-se inferir que o dispositivo é recíproco e simétrico. Dizer que ele é recíproco significa que o sinal transmitido do IDT de entrada para o IDT de saída é igual ao sinal transmitido do IDT de saída para o IDT de entrada, desta forma, conclui-se que o S_{12} e o S_{21} são idealmente iguais; e simétrico, que os IDTs de entrada e de saída são idênticos, desta forma, pode-se concluir que o S_{11} e o S_{22} também são idealmente iguais. Nesse caso, a extração dos parâmetros do modelo pode ser baseada nas medições do S_{21} e do S_{11} .

A partir do S_{11} é possível inferir informações sobre a impedância de entrada do sensor a partir de (1) [11].

$$Z_{11} = 50 \frac{1 + S_{11}}{1 - S_{11}} \approx R + \frac{1}{j\omega C} \quad (1)$$

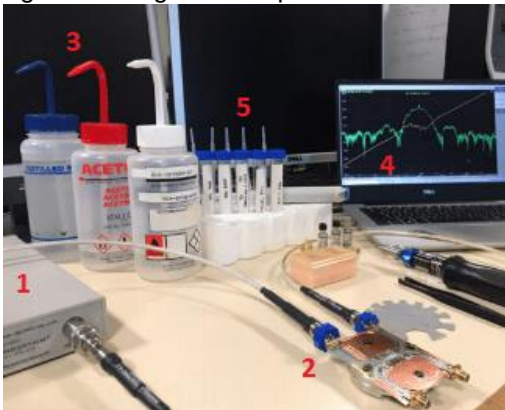
Em que,

Z_{11} – Impedância de Entrada (Ω);
 S_{11} – Coeficiente de Reflexão de entrada;
 R – Resistência (Ω);
 ω – Frequência angular (rad/s);
 C – Capacitância (F);

C. Procedimento Experimental

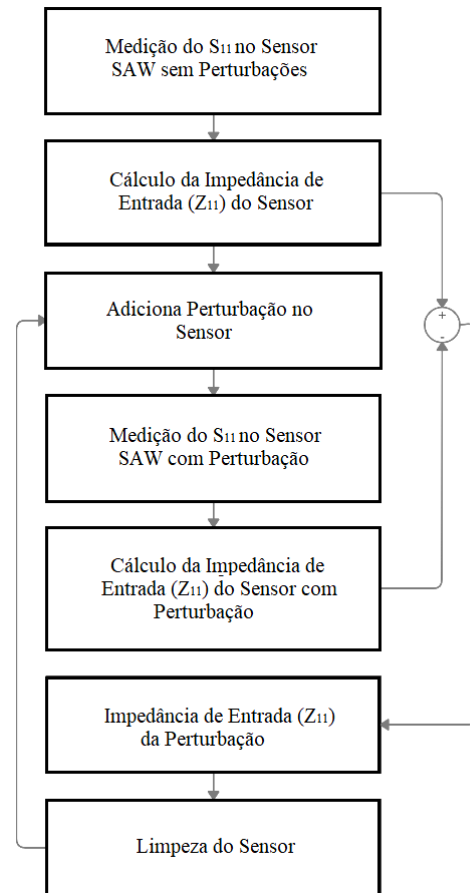
A montagem e o fluxograma do procedimento experimental desse trabalho podem ser observados nas Figs. 4 e 5, respectivamente. As medições foram realizadas a 20 °C e com umidade controlada.

Fig. 4: Montagem do experimento.



Fonte: Autoria própria.

Fig. 5: Fluxograma do procedimento experimental.



Fonte: Autoria própria.

Conforme apresentado nas Figs. 4 e 5, inicialmente é realizada a medição do parâmetro S_{11} do sensor SAW (indicado pelo número 2 na Fig. 4) sem a adição de perturbações, utilizando o VNA (indicado pelo número 1 na Fig. 4). O VNA foi controlado por um computador (indicado pelo número 4 na Fig. 4) via conexão USB.

Uma vez determinado o parâmetro S_{11} para a frequência de ressonância do sensor, foi encontrada a impedância de entrada Z_{11} para esta frequência de acordo com (1). De modo a determinar o modelo do circuito elétrico das perturbações, foi adicionado ao sensor SAW, por meio de uma micropipeta, 150 μ L água destilada (indicado pelo número 5 na Fig. 4). Na sequência, foi determinado o S_{11} do sensor com a perturbação definida e, em seguida, sua impedância de entrada.

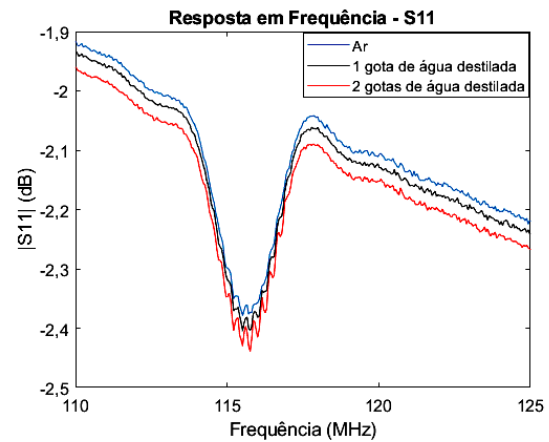
Conhecidas as impedâncias de entrada do sensor sem e com a perturbação, subtraiu-se a impedância de entrada do sensor sem

perturbação da impedância de entrada do sensor com a perturbação, de modo a determinar a impedância da perturbação. Uma vez conhecida a impedância da perturbação, pode-se determinar o seu circuito elétrico correspondente. De forma a analisar as demais perturbações, borrifou-se água destilada, álcool isopropílico e acetona (indicado pelo número 3 na Fig. 4) sobre o sensor, seguido de uma secagem com um borrifador de ar, o que garante a limpeza do sensor. Após a limpeza, uma nova perturbação foi adicionada e o procedimento foi repetido. A ordem das demais perturbações adicionadas foi: 300 μL água destilada, 150 μL de etanol, 150 μL de água destilada com sal, 150 μL de água destilada com glicerol.

Desenvolvimento e Resultados

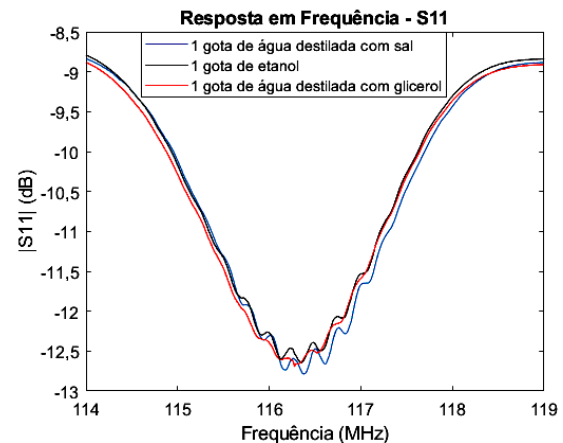
A resposta em frequência do parâmetro S_{11} do sensor SAW com e sem perturbações, medido com o VNA, pode ser observada nas Figs. 6 e 7 e na Tabela 1. Na Fig. 6 é apresentado o módulo do parâmetro S_{11} em dB como função da frequência para o sensor sem perturbações (ar) e tendo adicionado água destilada como perturbação. Na Fig. 7 é apresentado o módulo do parâmetro S_{11} em dB como função da frequência para o sensor com as perturbações de água destilada com sal, etanol e água destilada com glicerol. Na Tabela 1 são apresentados os valores da frequência de ressonância e da atenuação em dB para a frequência de ressonância do sensor para cada uma das perturbações utilizadas.

Fig. 6: Resposta em frequência – S_{11} .



Fonte: Autoria própria.

Fig. 7: Resposta em frequência – S_{11} .



Fonte: Autoria própria.

Tabela 1: Frequência de ressonância e perdas de reflexão do sensor SAW.

Configuração	f_0 (MHz)	$ S_{11} $ (dB)
Ar	115,86	-2,37
Água Destilada – 1 gota	115,86	-2,40
Água Destilada – 2 gotas	115,86	-2,44
Água Destilada + Sal – 1 gota	116,38	-12,79
Etanol – 1 gota	116,35	-12,64
Água Destilada + Glicerol – 1 gota	116,31	-12,66

Fonte: Autoria própria.

Conforme apresentado na Fig. 6 e na Tabela 1, constatam-se maiores perdas de reflexão no sensor SAW ao se acrescentar água destilada do que na configuração com ar, sendo essas perdas 1,27% maiores para 1 gota de água destilada e 2,95% maiores para 2 gotas de água destilada. Como as perdas de reflexão foram menores que 3 dB, significa que, para esses casos, o sinal refletido apresentou mais da metade da energia do sinal original, ou seja, a adição de água destilada causou uma atenuação pouco significativa na onda acústica de superfície (referente à parte da energia refratada - não transmitida - pela perturbação). Na refração, a velocidade de propagação da onda será alterada, pois a mudança de meio gera mudança no comprimento de onda. Já a frequência da onda, por depender da fonte geradora, não é alterada.

Ao analisar a Fig. 7 e a Tabela 1, verificam-se perdas de reflexão no sensor SAW 439,66%, 433,33% e 434,18% maiores quando é adicionada 1 gota de água destilada com sal, 1 gota de etanol e 1 gota de água destilada com glicerol, respectivamente. Como as perdas foram maiores que 12 dB, significa que, para esses casos, o sinal refletido apresentou uma energia cerca de 16 vezes menor que a energia do sinal original, ou seja, a adição dessas perturbações causou uma alteração na velocidade e, conseqüentemente, uma atenuação na onda acústica de superfície (referente à parte da energia refratada - não transmitida - pela perturbação). Essa atenuação, devido às maiores perdas de reflexão, foi bem maior em relação aos casos com água destilada. Além disso, a adição dessas perturbações alterou a frequência de ressonância do sensor.

A alteração da frequência ocorreu devido à modificação da velocidade de fase da onda acústica de superfície ao adicionar essas perturbações, gerando

uma modificação na fase e, conseqüentemente, um descasamento de impedância nos IDTs. Assim, constata-se que o sensor SAW estudado nesse trabalho pode ser utilizado como biossensor, sendo capaz de detectar diferentes tipos de perturbações, que podem ser diferenciadas pela frequência de ressonância e pelas perdas relativas ao coeficiente de reflexão de entrada.

Após a análise do parâmetro S_{11} do sensor, foi calculada, usando (1), a impedância de entrada do sensor com e sem as perturbações. Na Tabela 2 é apresentada a impedância de entrada do sensor com os diferentes tipos de perturbações apresentadas.

Tabela 2: Impedância de entrada do sensor SAW.

Configuração	R (Ω)	X (Ω)	C (nF)
Ar	6,86	6,29	0,22
Água Destilada – 1 gota	6,91	6,34	0,22
Água Destilada – 2 gotas	6,96	6,95	0,20
Água Destilada + Sal – 1 gota	42,98	20,69	0,07
Etanol – 1 gota	32,96	9,42	0,14
Água Destilada + Glicerol – 1 gota	34,42	12,31	0,11

Fonte: Autoria própria.

Conforme apresentado na Tabela 2, o acréscimo das perturbações no sensor SAW é refletida no aumento da resistência e da reatância do sensor e, conseqüentemente, na redução da capacitância da impedância de entrada do sensor. Além disso, verifica-se, ao comparar as Tabelas 1 e 2, que os casos com maiores perdas de reflexão também apresentaram os maiores valores de resistência e impedância. Dentre esses resultados, vale destacar a configuração com água e sal, que apresentou os resultados mais distantes da configuração com ar, sendo sua resistência e reatância, 526,53% e 228,93% maiores, respectivamente. Estes resultados ocorreram pelo fato da perturbação de água destilada com sal ser o melhor condutor elétrico dentre as perturbações analisadas devido à progressiva ionização da água pela

presença do sal. Esta progressiva ionização caracteriza maiores permissividade e condutividade elétrica e, conseqüentemente, um maior campo elétrico entre os IDTs de entrada e de saída.

Também é observada uma redução na capacitância da impedância de entrada ao se acrescentar as perturbações. Essa redução indica que a perturbação apresenta uma característica indutiva, presente devido à modificação da perturbação (dielétrico) na camada sensível do sensor. Por outro lado, as perdas de inserção do sensor podem ser representadas por uma componente resistiva.

Na Tabela 3 estão apresentados os parâmetros do modelo do circuito elétrico de cada perturbação abordada. Esses parâmetros foram calculados pela diferença entre as impedâncias de entrada apresentadas na Tabela 2. Já na Fig. 8 é apresentado o modelo de circuito elétrico referente ao bloco da perturbação, apresentado na Fig. 3, em que os valores de R e L para cada uma das perturbações analisadas estão mostrados na Tabela 3.

Tabela 3: Parâmetros do modelo elétrico das perturbações.

Configuração	R (Ω)	L (nH)
Água Destilada – 1 gota	0,05	0,07
Água Destilada – 2 gotas	0,05	0,91
Água Destilada + Sal – 1 gota	36,12	19,65
Etanol – 1 gota	26,10	4,25
Água Destilada + Glicerol – 1 gota	27,56	8,20

Fonte: Autoria própria.

Fig. 8: Modelo de circuito elétrico das perturbações.



Fonte: Autoria própria.

Conforme apresentado na Tabela 3 e na Fig. 8, as perturbações analisadas nesse trabalho podem ser modeladas por um resistor em série com um indutor. Assim, é possível inserir o modelo de circuito elétrico dessas perturbações em um simulador, juntamente com o modelo de circuito elétrico dos demais blocos do sensor, apresentados na Fig. 3, e realizar as análises da resposta em frequência e no tempo desse circuito via simulação, uma vez que o sensor real é frágil e pode ser danificado com facilidade.

Considerações Finais

Neste trabalho foi abordado o sensor a onda acústica de superfície, com foco na modelagem do circuito elétrico de perturbações depositadas sobre o sensor, por meio do coeficiente de reflexão de entrada. Sendo constatado que a adição de perturbações causou alterações na resposta em frequência do sensor (amplitude, frequência e fase).

A amplitude do sensor SAW foi analisada com base nas perdas de reflexão de entrada, em que, quanto maior as perdas, menor a energia refletida e, conseqüentemente, menor a energia transmitida. Em relação a frequência do sensor, verificou-se que a perturbação de água destilada não causou alterações. Por outro lado, a adição das demais perturbações causou a modificação da velocidade de fase da onda acústica de superfície, gerando uma modificação na fase e, conseqüentemente, um descasamento de impedância nos IDTs. A mudança na parte reativa da impedância do IDT gera uma modificação na frequência de ressonância do sensor.

A partir dos resultados da frequência de ressonância e das perdas de reflexão de entrada foi constatado que o sensor SAW estudado nesse trabalho pode ser utilizado como biossensor, sendo capaz de detectar diferentes tipos de perturbações, que podem ser diferenciadas tanto pela frequência de ressonância e pelas perdas relativas ao coeficiente de reflexão de entrada, quanto

pela impedância de entrada do sensor e de cada perturbação.

Por fim, com a impedância de entrada de cada perturbação, foi possível elaborar um modelo de circuito elétrico que representasse as perturbações estudadas, sendo esse modelo definido por um circuito RL série. Assim, é possível inserir o modelo de circuito elétrico das perturbações em um simulador, juntamente com o modelo de circuito elétrico do sensor para a realização de outras análises, como, por exemplo, a alteração de alguns parâmetros do sensor, de forma a verificar as mudanças na sua resposta em frequência.

Agradecimentos

Agradecemos a CAPES e ao CNPq pelo apoio financeiro em forma de bolsas.

Referências

- [1] White, R.M.; Voltmer, F.W.; "Direct Piezoelectric Coupling to Surface Elastic Waves". Appl. Phys. Lett. 1965, 7, 314–316. doi:10.1063/s11754276. Disponível em: <https://aip.scitation.org/doi/pdf/10.1063/1.1754276>.
- [2] Durdaut, P. et al. "Phase Noise of SAW Delay Line Magnetic Field Sensors". Sensors; Vol. 21, Ed. 16, 2021. doi:10.3390/s21165631. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1424-8220/21/16/5631/htm>.
- [3] Liu, B. et al. "Surface acoustic wave devices for sensor applications." J. Semicond. 2016, 37, 021001. doi: 10.1088. Disponível em: <http://www.ijs.ac.cn/app/article/app/doi/10.1088/1674-4926/37/2/021001>.
- [4] Länge, K.; Gruhl, F.J.; Rapp, M. "Surface Acoustic Wave (SAW) biosensors: coupling of sensing layers and measurement". Methods Mol Biol. 2013; 949:491-505. doi: 10.1007/978-1-117-11111-1_11. Disponível em: https://doi.org/10.1007/978-1-117-11111-1_11.
henrique.dsilva@ee.ufcg.edu.br
- 62703-134-9_31. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/23329462/>.
- [5] Landrigan, P.J. et al. "The lancet commission on pollution and Health". The lancet, 391(10119):462–512, 2018. doi: 10.1016/S0140-6736(17)32345-0. Disponível em: [https://www.thelancet.com/pdfs/journals/lancet/PIIS0140-6736\(17\)32345-0.pdf](https://www.thelancet.com/pdfs/journals/lancet/PIIS0140-6736(17)32345-0.pdf).
- [6] Han, W.; Bu, X.; Song, M.; Huang, X. "Research into a novel surface acoustic wave sensor signal-processing system based on compressive sensing and an observed-signal augmentation method based on secondary information prediction". Measurement Science and Technology, V. 32, N. 7. 2021. doi: 10.1088/1361-6501/abe3ab. Disponível em: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1361-6501/abe3ab>.
- [7] Tamarin, O.; Rube, M.; Lachaud, J.L.; Raimbault, V.; Rebière, D.; Dejous, C. "Mobile Acoustic Wave Platform Deployment in the Amazon River: Impact of the Water Sample on the Love Wave Sensor Response". Sensors 2020, 20, 72. doi: 10.3390/s20010072. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1424-8220/20/1/72/htm>.
- [8] Huang, Y. Das, P. Bhethanabotla, V. "Surface acoustic waves in biosensing applications", Sensors and Actuators Reports, V. 3, 2021, doi: 100041. Disponível em: [https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2666053921000175#:~:text=With%20their%20ability%20to%20mitigate,\(PON\)%20based%20biosensing%20applications](https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2666053921000175#:~:text=With%20their%20ability%20to%20mitigate,(PON)%20based%20biosensing%20applications).
- [9] Jesus, R.C.; Carvalho, E.A.; Tamarin, O.; Freire, R.; Dejous, C. "Evaluation of an Equivalent Circuit Model for Simulation of Surface Acoustic Wave Sensors," 2021 5th International Symposium on Instrumentation Systems, Circuits and Transducers (INSCIT), 2021, pp. 1-6, doi:10.1109/INSCIT49950.2021.9557258. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9557258>.
- [10] Devkota, J.; Ohodnicki P.; Greve, D. "SAW sensors for chemical vapors and

gases". *Sensors* (Switzerland), 17(4):13–15, 2017. doi: 10.3390/s17040801. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1424-8220/17/4/801/htm>.

[11] Rube, M. et al., "Unconventional protocol for SAW sensor: multi-physic

response enrichment in liquid medium," in *IEEE Sensors Journal*, 2021. doi: 10.1109/JSEN.2021.3094299. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9471843>.