

SENSOR BIOTELEMÉTRICO DE DESLOCAMENTO POR AUTORRESSONÂNCIA DE ONDA ESTACIONÁRIA

C. M. de Miranda e S. F. Pichorim

CPGEI, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, Brasil
e-mail: caio.demiranda@gmail.com

Resumo: Este trabalho apresenta um sensor biotelemétrico de deslocamento, o qual utiliza a modulação da autorressonância por onda estacionária de uma bobina, de acordo com a variação no comprimento longitudinal da mesma. Para variar o comprimento, a estratégia foi enrolar a bobina em torno de um tubo de látex, onde apenas as espiras iniciais e finais são coladas ao mesmo. O tubo sofre a deformação que consequentemente é refletida no aumento do espaçamento entre espiras, e portanto, no comprimento da bobina. São realizados testes práticos e cálculos teóricos para comprovar a técnica proposta e mostrar sua viabilidade, onde erros menores que 5 % e correlação de 0,98 foram encontrados. Por fim é proposta a utilização da técnica apresentada como um sensor de pletismografia respiratória, sendo realizado um teste *in-vivo* com o objetivo de mostrar o potencial do sistema apresentado. O protótipo necessita de melhorias para aplicações reais, sendo estas discutidas na conclusão.

Palavras-chave: Biotelemetria, autorressonância, onda estacionária, pletismografia.

Abstract: *This work proposes a biotelemetric displacement sensor, which uses the modulation of the self-resonance by standing wave of the coil that constitutes the sensor, according to the variation of its longitudinal length. To change coil's length the strategy was to wind the coil around a latex tube with the initial and ending turns bonded to it, then when the tube undergoes deformation it is consequently reflected in the inter windings spacing and therefore on coil's length. Tests and theoretical calculations were conducted to prove the proposed technique and show its feasibility, errors smaller than 5% and correlation of 0,98 were found. Finally it is proposed the use of the presented technique as a respiratory plethysmography sensor, where, a test in vivo was conducted in order to show the potential of the presented system. The prototype needs improvement to use in real applications, those are discussed in the conclusion session.*

Keywords: *Biotelemetry, self-resonance, standing wave, plethysmography.*

Introdução

A biotelemetria consiste na medição e monitoração de parâmetros fisiológicos de homens e animais a distância, de maneira a causar a menor interferência

possível na atividade ou rotina observada. Dentro do campo da biotelemetria encontram-se as mais variadas técnicas de comunicação com a unidade sensora, porém a técnica da comunicação passiva possui um grande destaque por não precisar de fonte própria de alimentação acoplada ao sensor. Isto possibilita uma menor dimensão da unidade sensora, além de aumentar a vida útil do sensor e evitar o risco de danos a um paciente caso ocorra o vazamento do conteúdo químico da bateria [1]. Grandezas como pressão, posição, deslocamento linear e angular são comumente medidas com este tipo de sensor, sendo que destes valores podem se extrair parâmetros tais como, elasticidade e deformações de tendões [2], frequência cardíaca [3], pressões intra-oculares, dentre outras.

Um importante tipo de sensor utilizado na Biotelemetria passiva é o sensor indutivo autorressonante. O princípio de operação deste sensor é modular a frequência de autorressonância da bobina (f_o) de acordo com o parâmetro medido, portanto não se faz necessária a adição de um capacitor em paralelo para que se obtenha a ressonância do sistema. Desta maneira, este tipo de sensor pode possuir apenas um componente [4].

Neste trabalho é proposto um sensor de deslocamento autorressonante, que utiliza a modulação da frequência de autorressonância de uma bobina com núcleo de ar, de acordo com a variação do seu comprimento longitudinal (H) ou espaçamento entre espiras. O sensor consiste em uma bobina com núcleo de ar enrolada em torno de um tubo de látex, fixada apenas nas suas extremidades (primeiras e últimas espiras). O tubo sofre a deformação alongando a bobina e variando a sua frequência de autorressonância. Por fim, apresenta-se uma aplicação como um sensor para se utilizar em pletismografia, onde se mostra o potencial do método apresentado.

Materiais e métodos

Bobinas com núcleo de ar e de comprimento longitudinal H relativamente longos, isto é, com uma relação entre comprimento e diâmetro (D) em geral maior do que 1, podem apresentar frequência de ressonância por onda estacionária. Isto deve-se ao fato de que a bobina quando possui dimensões apreciáveis em relação ao comprimento de onda (λ) suporta a propagação de uma onda com velocidade de fase e comprimento de onda característicos ao longo do seu

eixo longitudinal [5]. Neste caso a bobina passa a se comportar como um guia de onda, e quando em ressonância trata-se portanto de um ressonador. No caso de uma bobina com ambas as extremidades abertas ou “fechadas” (conectada a um gerador por exemplo), esta comporta-se como um ressonador de meia onda. Neste caso existem máximos e mínimos de tensão (V) ou corrente (I), dependendo das condições de contorno do sistema (extremidades abertas ou fechadas) [6]. A Figura 1 mostra a bobina conectada a um gerador se comportando como um ressonador de meia onda, e o perfil das ondas estacionárias de corrente e tensão presentes ao longo do seu eixo longitudinal.

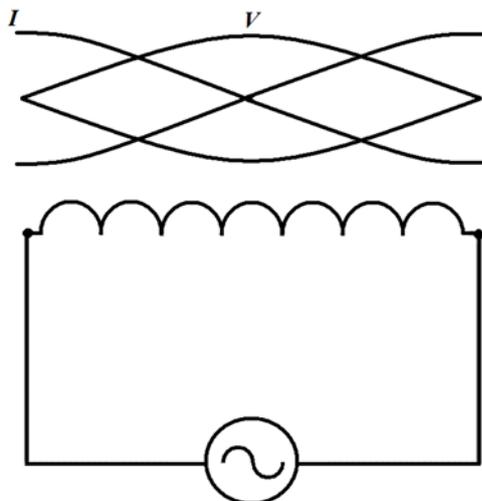


Figura 1: Bobina com ambas as extremidades conectadas a um gerador e os perfis de corrente (I) e tensão (V), para uma onda estacionária de $\frac{1}{2}$ comprimento de onda.

Uma expressão aproximada para o cálculo da frequência de ressonância, de uma bobina comportando-se como um ressonador de meia onda [6], é dada por:

$$f_o = \frac{52}{nD} \sqrt{\frac{H}{D}} \quad (\text{MHz}) \quad (1)$$

onde n é o número de espiras, H é o comprimento longitudinal e D o diâmetro da bobina, dados em metros. Com base na equação (1) fica clara a proposta deste estudo, que é a de modular f_o de acordo a variação de H .

Resultados

A bobina desenvolvida foi enrolada em um tubo de látex, utilizando fio de cobre esmaltado com diâmetro de 0,31 mm, 137 espiras, 55 mm de comprimento e diâmetro da bobina de aproximadamente 7 mm. Apenas as primeiras e últimas espiras são coladas ao tubo que quando esticado aumenta o comprimento da bobina através da variação do espaçamento entre espiras. Para os testes foi implementado um sistema para variação controlada da deformação aplicada ao tubo de látex,

utilizando um paquímetro. O passo do alongamento aplicado foi de 2 mm, sendo a f_o medida em um analisador vetorial de impedância HP4294A em cada passo. A Figura 2 mostra o esquema utilizado no ensaio.

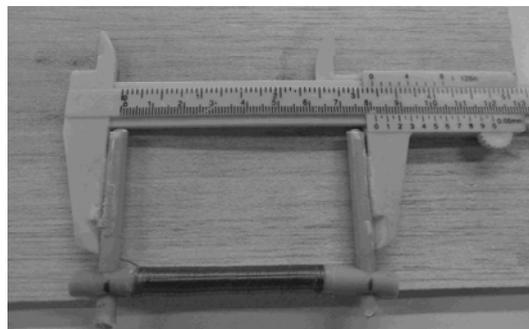


Figura 2: Sistema para o deslocamento controlado.

Para a bobina em repouso, utilizando a equação (1) e os dados informados na seção anterior, calcula-se uma f_o de 81,89 MHz. O valor medido no analisador de impedância é igual a 84,98 MHz, o que resulta em um erro relativo de 3,64%. Acredita-se que o erro se deve as aproximações nas medidas de comprimento e diâmetro.

Utilizando o sistema de deslocamento foi possível medir as ressonâncias em passos de 2 mm, até o alongamento final de 2,4 cm. Também foram calculadas as ressonâncias para cada passo através de (1), onde levou-se em consideração o fato de que a deformação aplicada ao tubo não é totalmente refletida no aumento de H . Desta maneira, H foi medido com o auxílio de um paquímetro digital de acordo com o deslocamento aplicado no tubo, e portanto utiliza-se este valor medido para o cálculo das ressonâncias. Neste caso, para cada 2 mm aplicados na deformação do tubo de látex, um aumento médio de 0,7 mm foi refletido no comprimento da bobina. Os resultados obtidos são mostrados na Figura 3. O menor e maior erro relativo percentual entre os valores calculados e medidos são de 3,4 e 4,78%, respectivamente. Sendo a correlação entre todos os valores medidos e calculados de 0,98 e a correlação entre f_o e d de 0,9781.

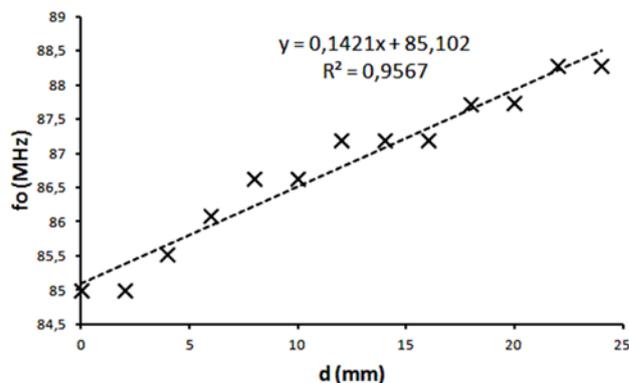


Figura 3: Frequências de autorressonância medidas (X) em função do alongamento d aplicado no tubo, e reta de regressão linear associada.

Proposta de um pletismógrafo telemétrico – O sensor desenvolvido possui grande potencial para ser utilizado como um sensor telemétrico para pletismografia. Neste trabalho é focado o caso da pletismografia respiratória por variação do volume da caixa torácica, onde os métodos tradicionais utilizam *strain gages*, magnetômetros e sensores indutivos, todos necessitando da interconexão de cabos para realizar as medidas[7]. O sensor apresentado na seção anterior foi utilizado para o teste de pletismografia. Uma cinta não maleável com comprimento ajustável conectada em ambas as extremidades do tubo de látex do sensor, pode ser ajustada a circunferência da caixa torácica do paciente quando este libera todo o ar dos pulmões. Em seguida pede-se que o paciente inspire o ar até o seu limite. Entre os intervalos de inspiração e respiração a variação do volume da caixa torácica é refletida na variação do comprimento da bobina uma vez que a cinta é não maleável. Portanto toda variação de volume é transmitida à deformação do tubo de látex, o que modula frequência de autorressonância por onda estacionária. Em um sistema completo, a frequência deve ser continuamente medida por um sistema de excitação e leitura telemétrico conectado a um computador, o qual trata e interpreta os dados, sendo estes apropriadamente exibidos em um monitor onde o profissional da área da saúde pode acompanhar o exame.

Para os testes foi utilizado um ressonímetro Leader LDM-815, o qual possibilita medir telemetricamente a frequência de ressonância da bobina. Uma vez que o ressonímetro utilizado não possibilita a medição contínua da frequência de ressonância, isto é, o operador necessita sintonizar a frequência de excitação através de um *dial*, foram medidas as ressonâncias nos casos extremos de inspiração e expiração máxima. Os valores das ressonâncias para os casos de expiração e inspiração máximas medidos com o ressonímetro foram de 105,3 e 113,4 MHz, resultando em uma variação total de 8,1 MHz na f_0 . Para a expiração e inspiração máxima, o comprimento da bobina é de 55 e 71 mm, respectivamente. Isto acarreta em uma variação teórica de 4,9 MHz na f_0 . A Figura 4 mostra o sistema desenvolvido e o ressonímetro utilizado.

Discussão

Uma característica importante do sensor autorressonante é a de que ao aproximar o corpo humano, devido as suas características elétricas, a f_0 é alterada por um Δf , sendo o cálculo desta variação fora do escopo desse estudo e trata-se na realidade de um tópico bastante complexo. Porém esta alteração na f_0 não constitui-se em problema na prática visto que o sensor encontra-se estático no peito do paciente, portanto Δf é a mesma para todas as medidas de f_0 em função da variação de H .

Os testes em bancada foram conduzidos com um analisador de impedâncias vetorial Agilent HP4294A, por se tratar de um equipamento de precisão. Desta ma-

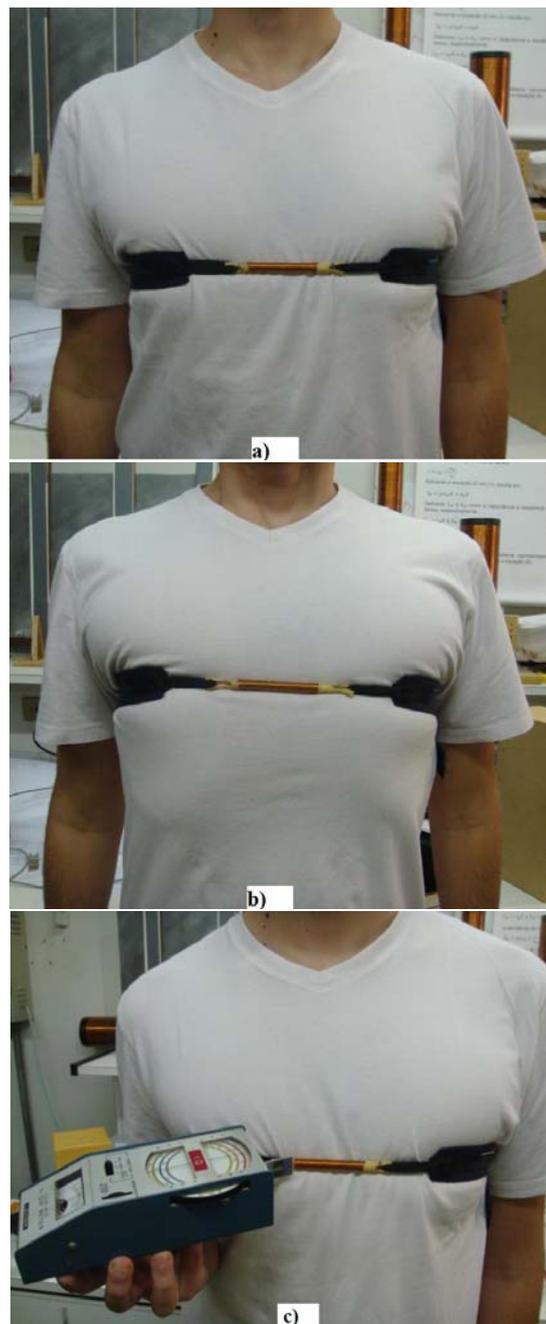


Figura 4: Experimento realizado com o sistema desenvolvido. a) Expiração total. b) Inspiração total. c) Medida com o ressonímetro.

neira, pode-se correlacionar corretamente os valores de frequência medidos, e calculados com a teoria apresentada.

Para os testes telemétricos, os terminais da bobina (anteriormente usados para a conexão com o analisador de impedância) foram cortados para que sua disposição não alterasse os resultados, uma vez que os terminais apresentam dimensões apreciáveis em relação a bobina (proporcionais a se acrescentar aproximadamente 10 espiras). Isto acarretou em uma maior frequência de ressonância do sensor conforme verificado nos resultados. Outra possibilidade de divergência na f_0 é o

fato de a bobina estar com ambos os terminais em aberto, neste caso apesar de se tratar de um ressonador de meia onda, podem existir divergências na frequência. Também, para esta faixa de frequência o valor medido com ressonômetro apresenta maior divergência em relação ao medido com o analisador de impedância, o que também pode ter acarretado em aumento na frequência lida. Variações no diâmetro da bobina quando alongada, também não foram levados em consideração, e contribuem para o aumento na f_0 medida. Acredita-se que este efeito em particular pode ter sido mais significativo nos testes de pletismografia, uma vez que o sensor é pressionado contra o peito do indivíduo quando este inspira. Isto pode explicar a divergência entre a variação na f_0 teórica e medida, conforme apresentado na seção “Proposta de um pletismógrafo telemétrico”. Porém a variação da frequência em função de H , que é o principal objetivo da técnica proposta, não deve ser afetada devido aos erros inerentes ao sistema de medida.

Os resultados obtidos com os cálculos e medidas realizadas em bancada e *in-vivo* mostraram a viabilidade da técnica proposta e o seu potencial como sensor para pletismografia, em especial a respiratória. O sistema apresentado trata-se obviamente de um protótipo cujo objetivo foi exclusivamente apresentar o potencial da técnica aqui proposta. Para um sistema real o sensor deve ser otimizado para que a deformação no tubo de látex seja refletida na variação do comprimento da bobina com uma melhor eficiência, evitando-se ao máximo perdas por histerese mecânica e outras. Um sistema de leitura que meça continuamente a frequência de ressonância, bem como um software para interpretação e exibição dos parâmetros medidos, devem ser desenvolvidos para uso em clínica ou em campo. Este tipo de sistema já existe na literatura e não possui instrumentação complexa conforme pode ser verificado em [8]. A faixa de frequências que tal instrumento irá trabalhar é determinada principalmente em função das dimensões do sensor e da aplicação. A distância máxima de medição é em geral de alguns centímetros (geralmente menor que 5 cm).

Uma possível e interessante aplicação seria a de monitorar telemetricamente a grandes distâncias pacientes ou atletas, onde bastaria embarcar uma fonte de alimentação, excitação e uma antena transmissora ao sistema, e seria possível receber os sinais medidos a relativa longa distância (não se tratando neste caso de biotelemetria passiva obviamente).

Conclusão

O objetivo deste artigo foi o de apresentar um novo método para medição de deslocamentos e deformações. Este método baseia-se na modulação da autorressonância por onda estacionária que solenoides com núcleo de ar podem apresentar quando são feitos relativamente longos ($H/D > 1$). Neste caso, utilizou-se a variação no comprimento longitudinal da bobina de

acordo com o parâmetro medido. Foram realizados testes em bancada e cálculos teóricos de modo a validar o princípio utilizado. Procurou-se mostrar o grande potencial que este tipo de sensor possui para exames de pletismografia, tendo sido aqui focada a pletismografia respiratória por variação do volume da caixa torácica, a qual tradicionalmente utiliza a interconexão de cabos ao paciente para injeção e extração dos sinais de interesse.

Agradecimentos

Agradecemos à CAPES e ao CNPq pelo apoio financeiro obtido durante a realização do trabalho. Agradecemos Lilian Miranda e Priscila Savulski pela confecção da cinta utilizada nos testes de pletismografia.

Referências

- [1] Furse, CM. Biomedical telemetry: Today's opportunities and challenges. In: IEEE International Workshop on Antenna Technology; 2010 Mar 1-3; Lisboa, Portugal. 2010. p.1-4.
- [2] Pichorim, SF.; Abatti, PJ. Biotelemetric Passive Sensor Injected Within Tendon for Strain and Elasticity Measurement. IEEE Trans. on Biomed. Eng., v. 53, p.921-925. 2006.
- [3] Maeoka, G; Pichorim, SF; Abatti, PJ. Avaliação do desempenho de um sensor biotelemétrico passivo para monitoração da pressão arterial testes estáticos. IFMBE Proceedings, v. 18, p. 524-527. 2007
- [4] Miranda, C. M.; Pichorim, S. F. Equacionamento e modelagem da bobina bifilar de Tesla. Revista UNIANDRADE, v. 13, p. 42-59. 2012.
- [5] Corum, KL; Corum, JF. Rf coils, helical resonators and voltage magnification by coherent spatial modes. Microw. Rev. v.7, p.1-10. 2001.
- [6] Miranda, CM; Pichorim, SF. Self-resonant frequencies of air-core single-layer solenoid coils calculated by a simple method. Electr. Eng. 2014 [submetido].
- [7] Webster, JG. Medical instrumentation: application and design. New Jersey: John Wiley & Sons; 2009. p. 399-400.
- [8] Rosengren, L; Bäcklund, Y; Sjöström, T; Hök, B; Svedbergh, B. A system for wireless intra-ocular pressure measurements using a silicon micromachined sensor. J. Micromech. Microeng., 2, p. 202-204. 1992.