

## UTILIZAÇÃO DE DISPOSITIVOS DE ONDA ACÚSTICA SUPERFICIAL (SAW) NA INDÚSTRIA TRANSPORTADORA

Joana Catarina Mendes<sup>1,2,\*</sup>, Luís Nero Alves<sup>1,3</sup>, António B. Pereira<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Instituto de Telecomunicações, Campo Universitário de Santiago, 3810-193 Aveiro

<sup>2</sup> Centro de Tecnologia Mecânica e Automação, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Aveiro

<sup>3</sup> Departamento de Engenharia Eletrónica, Telecomunicações e Informática, Universidade de Aveiro

\* joanacatarina.mendes@av.it.pt

### RESUMO

Os dispositivos de onda acústica superficial ou *surface acoustic wave devices* (SAW) têm uma aplicação generalizada na substituição de filtros convencionais nos circuitos elétricos há várias décadas. A sua aplicação como sensores é relativamente mais recente. Com efeito, mediante a utilização destes dispositivos, tudo o que afete a velocidade de propagação das ondas acústicas num sólido é suscetível de ser convertido num sinal elétrico, pelo que têm sido desenvolvidos sensores de onda acústica superficial, por exemplo, de temperatura, pressão, binário, aceleração, densidade mássica, humidade e muitas outras grandezas.

Estes dispositivos podem também ser utilizados como sensores sem fios (*transponders* SAW) desde que a fonte de sinal que lhes é aplicada (e a deteção de um sinal de resposta) seja feita em radiofrequência (RF), mediante a utilização de uma antena adequada. Com efeito, podem ser interrogados por um sinal de RF ao qual o dispositivo responderá, se tiver um refletor adequado, com outro sinal de RF com um tempo de atraso ou frequência relacionados com a grandeza a detetar. Como é evidente, esta tecnologia envolve a utilização de uma unidade eletrónica de interrogação, exterior ao sensor propriamente dito. Como facilmente se depreende, esta tecnologia permite a medição de grandezas físicas em lugares dificilmente acessíveis, em peças em movimento, ou ainda em ambientes agressivos ou tóxicos, pelo que abre inúmeras possibilidades para a indústria dos transportes.

Com uma utilização inteligente de refletores, os SAW podem também ser utilizados como identificadores passivos, substituindo com vantagem dispositivos equivalentes que dependem de uma fonte de energia. Os SAW possuem neste momento algumas limitações, nomeadamente quanto à exatidão (1 %, no melhor dos casos) e ao alcance da comunicação por RF (3 a 4 metros, quando muito) que são de certo modo compensadas pelas características únicas que acabamos de descrever.

Para dar apenas três exemplos, a pressão no interior dos pneus dos automóveis é hoje rotineiramente medida (e transmitida para o painel dos instrumentos) utilizando SAW. Nos caminhos-de-ferro, os dispositivos SAW têm sido utilizados, por exemplo, na medição da temperatura dos freios e na identificação de carruagens.

Neste artigo, descrevem-se possíveis aplicações desta tecnologia, entre as quais uma, desenvolvida pelos autores, para medição de binário em caixas de velocidades.

Palavras-Chave: Onda Acústica Superficial; SAW; IDT; Sensor Sem Fios; *Wireless*.

## 1. Introdução

Um dos desafios que se colocaram, desde o início do desenvolvimento da eletrónica e da instrumentação, foi a necessidade de atrasar sinais de forma significativa, dezenas de microssegundos ( $\mu\text{s}$ ) ou mais, sem lhes alterar significativamente a forma. Esta necessidade surge em muitas situações com interesse prático. Historicamente, a primeira aplicação surgiu na televisão a cores, uma vez que o sistema PAL (*Phase Alternation Line*) original exigia a geração de um atraso entre linhas consecutivas de cerca de  $64 \mu\text{s}$ , mas há aplicações noutros domínios. Por exemplo, nos osciloscópios analógicos, a visualização do início de um sinal envolve o seu atrasado relativamente ao sinal de disparo da base de tempo. A primeira solução para este tipo de problema foi a utilização de linhas de atraso eletromagnéticas convencionais. No entanto, a velocidade de propagação nas linhas de transmissão é próxima da velocidade da luz,  $c$ , (tipicamente  $0,8c$ ) o que conduz a dimensões e custos inoportáveis para a maioria das aplicações. Numa fase deste processo, desenvolveram-se inclusivamente linhas de transmissão com as quais, mediante artifícios construtivos tais como a utilização de condutores helicoidais bobinadas sobre um núcleo ferromagnético, se conseguiram linhas com atrasos tipicamente de  $1 \mu\text{s}/\text{m}$ . Tais linhas, no entanto, além de caras e com atravancamentos ainda bastante significativos, introduziam uma distorção intolerável para um grande número de aplicações. A segunda alternativa foi utilizar linhas de componentes concentrados (indutâncias e condensadores) que simulassem o comportamento de uma linha de transmissão convencional. Esta solução também não solucionou completamente o problema, porque as dimensões e as perdas decorrentes da não-idealidade dos componentes continuaram a ser um problema por resolver. A maneira encontrada para contornar este problema foi converter o sinal elétrico numa onda acústica superficial (*Surface Acoustic Wave* ou SAW), fazer essa onda percorrer uma certa distância e depois converter de novo a vibração mecânica num sinal elétrico. A geração e transdução destas ondas superficiais envolvem duas condições; em primeiro lugar, o sólido a utilizar deve ser piezoelétrico e, em segundo lugar, é necessário um transdutor capaz de converter um sinal elétrico numa vibração mecânica, e vice-versa. Este transdutor, conhecido como IDT (*interdigital transducer*), foi desenvolvido em 1965 por White e Voltmer [1]. A Figura 1 representa de forma muito simplificada um SAW simples. Os IDT geram um campo elétrico alternado tangencial à superfície que, devido às propriedades piezoelétricas do substrato, induz neste um tipo de onda superficial (onda de Rayleigh [2]) que se propaga a uma velocidade que é, para a maioria dos sólidos, cerca de 105 vezes menor que a velocidade da luz no vazio, permitindo obter atrasos significativos com dimensões razoáveis. Por exemplo, para o niobato de lítio,  $\text{LiNbO}_3$ , um material piezoelétrico omnipresente nos dispositivos mais habituais, a velocidade de propagação é de cerca de  $4000 \text{ m/s}$ , o que conduz a um atraso de cerca de  $2,5 \mu\text{s}/\text{cm}$ , o que contrasta com o atraso de típico de  $4 \text{ ns}/\text{m}$ , numa linha eletromagnética convencional.

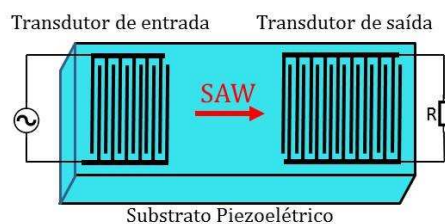


Figura 1 – Representação simplificada de um dispositivo SAW

Os dispositivos SAW são utilizados entre 70 MHz e 4 GHz. Utilizando como exemplo a frequência de 1 GHz, o comprimento da onda de Rayleigh correspondente é

$$\lambda = \frac{v}{f} = \frac{4 \cdot 10^3}{10^9} = 4 \mu\text{m}$$

este valor corresponde ao período espacial entre condutores (“franjas”) do IDT, pelo que, mesmo a esta frequência relativamente elevada, a resolução espacial necessária para a execução destes dispositivos anda à volta de 1  $\mu\text{m}$ , uma dimensão perfeitamente atingível com litografia convencional, sem necessidade de recorrer a técnicas mais “finas”, como as tecnologias modernas de circuitos integrados. Outros tipos de IDT podem funcionar como refletores das ondas acústicas, quando fechados sobre uma resistência adequada, nomeadamente em curto-circuito ou em circuito aberto.

### 1.1 Dispositivos SAW como ressoadores e filtros

A Figura 2 representa um dispositivo SAW alimentado com dois refletores colocados lateralmente. Dependendo da distância a que estão colocados os refletores, a onda refletida vai interferir destrutivamente com a onda incidente a determinadas frequências e construtivamente a outras. Isto faz com que a impedância do dispositivo, tal como medida nos terminais do elemento ativo, tenha um máximo a uma determinada frequência, pelo que o dispositivo se comporta como um circuito ressonante ou ressoador. A frequência de ressonância de um ressoador SAW é controlável através do período espacial das franjas do IDT e do espaçamento entre o IDT e os refletores; uma vez mais, a baixa velocidade de propagação das ondas de Rayleigh permite obter frequências de ressonância bastante mais baixas em ressoadores com dimensões na ordem dos milímetros. Duas aplicações atuais típicas de ressoadores baseados em SAW são a da indústria dos relógios, em que a frequência de ressonância normalmente utilizada é de 16 384 (2<sup>14</sup>) Hz, e também nos comandos à distância utilizados em portões e em automóveis, em que uma frequência muito utilizada é a de 433 MHz.

Quando o comprimento das franjas dos IDT de entrada e saída é variável ou quando franjas consecutivas são ligadas entre si, os SAW podem apresentar um comportamento seletivo na frequência. Esta é a maior utilização de dispositivos SAW na indústria, uma vez que os dispositivos eletrónicos portáteis (sobretudo os telemóveis e smartphones) fazem deles uma utilização extensiva. De facto, não seria possível a miniaturização deste tipo de equipamentos se os filtros, extensamente utilizados, fossem implementados com elementos reativos convencionais. Graças a esta aplicação, estima-se que a produção anual de filtros SAW ultrapasse, de longe, as 10<sup>9</sup> unidades.

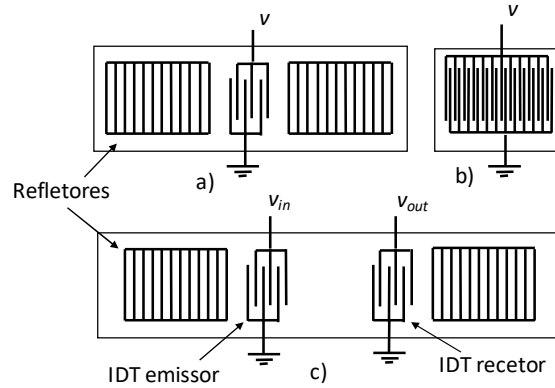


Figura 2 – Diferentes tipos de ressoadores com SAW. (a), (b) ressoadores com um porto; (c) ressoador com dois portos.

### 1.2 Dispositivos SAW sem fios (*wireless*)

No dispositivo representado na Figura 1, o gerador que ataca o porto de entrada pode ser substituído por uma antena, transformando-o num dispositivo sem fios (*wireless*). Se, por outro lado, o porto de saída for substituído por um elemento refletor, temos um dispositivo que pode ser interrogado por radiofrequência (RF). De facto, após a emissão de um trem de onda (um *burst*) de RF, é gerada uma onda mecânica no IDT de entrada, onda essa que, após percorrer o caminho até ao refletor, regressa ao IDT de entrada, pelo que a antena responderá com um novo *burst* de RF cujo atraso depende das características do meio onde se propagou a onda (Figura 3). Um tal dispositivo necessita ainda, para a extração da informação, de um circuito de leitura adequado além, evidentemente dos necessários circuitos de adaptação de impedâncias entre a antena e o IDT de entrada.

A principal vantagem dos dispositivos SAW sem fios é o facto de serem dispositivos passivos, ou seja, de não dependerem de uma fonte de energia local para o seu funcionamento, ao contrário dos dispositivos baseados em circuitos integrados utilizados noutras situações. De facto, os dispositivos de onda acústica superficial recebem a energia necessária ao seu funcionamento do próprio feixe de RF que os interroga.

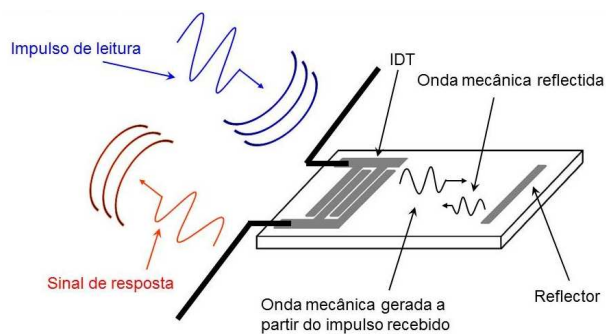


Figura 3 – Uma linha de atraso SAW sem fios, simplificada.

### 1.3 Dispositivos SAW como identificadores e sensores

Qualquer grandeza física que afete a velocidade de propagação das ondas de Rayleigh pode ser transduzida por um dispositivo SAW. Têm, por isso, sido utilizados como sensores de temperatura, de deformação/solicitação, de massa, de aceleração ou de humidade, além de outras grandezas derivadas.

Ao mesmo tempo, se dotado de refletores a distâncias convenientes, a resposta de um dispositivo SAW gera um código binário semelhante a um código de barras, pelo que estes podem também ser utilizados como identificadores RF. A Figura 4 representa dispositivos que se comportam simultaneamente como sensores e identificadores.

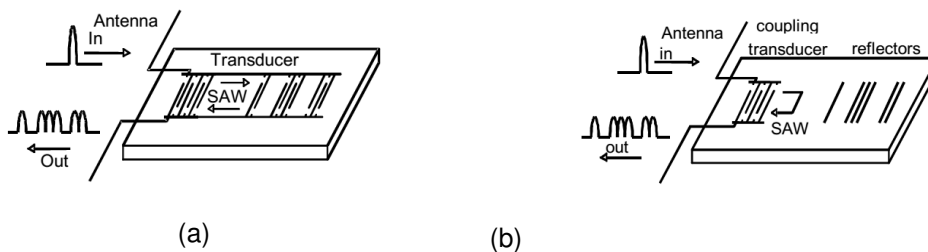


Figura 4 – Um dispositivo SAW utilizado como (a) sensor e (b) identificador [3].

A combinação de sensores e identificadores possibilita a implementação de redes de sensores que podem ser endereçados individualmente. Como exemplo, poderá obter-se, em tempo real, um mapa da deformação em diferentes pontos de uma peça em movimento, sem ser necessária a ligação física entre o dispositivo de leitura e a peça mecânica em teste.

### 1.4 Vantagens e limitações dos dispositivos SAW

O facto de o contacto físico entre o IDT e a unidade de leitura não ser necessário possibilita a interrogação remota deste tipo de sensores. Sendo ainda, como já foi referindo, dispositivos pequenos e de fabrico simples sem necessidade de alimentação, os sensores SAW assumem um lugar de destaque em certo tipo de aplicações, como em peças em movimento, ou ainda em locais de difícil acesso ou em ambientes agressivos ou tóxicos

Os dispositivos SAW não deixam, no entanto, de apresentar algumas limitações, pelo menos no seu estado de desenvolvimento atual:

- O alcance do feixe de RF interrogador é relativamente reduzido, sobretudo pelas limitações que existem em relação à potência emitida pela unidade de leitura. Medições a distâncias inferiores a 1 m são realisticamente possíveis, embora haja resultados experimentais que apontam para alcances da ordem dos 10 m.
- A exatidão das leituras é tipicamente da ordem de 1 %, o que é de alguma forma compensado pelo facto de esta técnica ter um domínio de aplicação não acessível a técnicas de transdução, porventura, mais exatas.

## 2. Aplicações dos dispositivos SAW

O facto de os dispositivos de onda superficial poderem ser utilizados como sensores sem fios confere-lhes características muito úteis em vários setores, uma vez que dispensam o contacto elétrico entre a grandeza a medir e o observador. Devido à sua elevada resiliência, os sensores SAW foram já usados para medir temperatura em condições extremas, como o interior de vasos metalúrgicos [4], turbinas de motores a jato [5] ou em para-raios [6]. Existem soluções comerciais que permitem a monitorização contínua e em tempo real da temperatura em locais críticos em sistemas de produção e distribuição de energia elétrica [7]. Os sensores SAW podem também ser utilizados para medir as forças de corte em maquinaria numericamente controlada por computador (CNC) [8, 9] e a deformação em veios em rotação [10]. Na indústria automóvel, os dispositivos SAW podem ser utilizados para medição de binário [11, 12], em sistemas de recuperação de energia cinética [13] e para medição em tempo real da pressão dos pneus em veículos comerciais [14] e desportivos [15]. As elevadas taxas de aquisição das unidades de leitura comerciais possibilitam ainda a utilização destes dispositivos para medir as vibrações em estruturas mecânicas [16]. Para além de serem usados como sensores, os SAW são também usados em aplicações de identificação RF nos setores ferroviário [17] e metalúrgico [18].

## 3. Medição de temperatura e binário num veio em rotação

No presente momento, há algumas empresas a nível internacional que fornecem sistemas comerciais para a medição da temperatura e da deformação. Estes sistemas COTS (*Comercial Off-The-Shelf*) constituem uma solução imediata para a medição destas grandezas em condições estáticas. No entanto, a adequação destes para a monitorização de peças em movimento, como o veio de uma caixa reductora, é algo que carece de estudo prévio para cada aplicação concreta. Neste sentido, foi adquirido à empresa francesa SENSEOR um kit de sensores de temperatura (TSE F162) e deformação (extensómetros SSE E015 e SSE E017), antenas respetivas e unidade de interrogação correspondente (transceiver de banda larga SENSEOR WR D005, que funciona na gama de frequências [430,5; 449,5] MHz e que pode ser ligado a um computador externo através de portas RS232/USB. Os sensores foram montados numa célula de carga composta por um cilindro oco em alumínio Al7075-T6 com 90 mm de comprimento e diâmetros interno e externo de 74 mm e 80 mm, respetivamente. Para tal, foi maquinada uma área plana com  $24 \times 50 \text{ mm}^2$  na superfície da célula. Os sensores montados na célula de carga foram calibrados com a temperatura e o fator de conversão da célula de carga foi determinado a 25 °C. As antenas foram substituídas por um acoplador RF desenvolvido para o efeito e o comportamento do sistema completo foi avaliado a diferentes temperaturas e velocidades de rotação [19]. Nesta seção, descreve-se o sistema de testes, o processo de calibração da célula de carga e os resultados obtidos em rotação.

### 3.1 Descrição do sistema de testes

O sensor de temperatura TSE F162 é um componente SMD (*Surface-Mount Device*) com  $5 \times 5 \text{ mm}^2$  de área encapsulado numa caixa de alumínio de  $26 \times 16 \times 54.7 \text{ mm}^3$  que pode ser colada ou aparafusada diretamente na superfície da peça a ser monitorizada; o sensor e caixa correspondente pesam cerca de 7 g. O sensor é composto por dois ressoadores SAW com frequências de ressonância e respetivos coeficientes de temperatura

distintos, como apresentado na Tabela 1. O conjunto vem inserido numa redoma de PTFE com 54,8 mm de altura e com uma base cilíndrica de 35,5 mm de diâmetro, apresentado na Figura 5a; no seu total, o conjunto tem uma massa de 35 g. No interior da redoma, encontra-se uma antena omnidirecional ligada ao sensor através de conetores W.FL. Como esta solução não é adequada para a utilização num veio em rotação, a redoma foi removida e a ficha SMA ligada aos terminais do sensor foi ligada diretamente a um cabo coaxial W.FL (Figura 5b). O conjunto sensor e caixa de alumínio foi colado na superfície plana da célula com cola e catalisador M-Bond 200; o contacto térmico foi garantido através da utilização de uma pasta condutora térmica. O cabo coaxial foi ligado a um acoplador RF solidário com o veio em rotação.

Quadro 1 – Frequências de ressonância a 25 °C e coeficientes de temperatura e primeira e segunda ordem [19].

sensor	$f_{R_0}$ / MHz	$C_1$ / ( $10^{-6}$ / °C)	$C_2$ / ( $10^{-9}$ / °C <sup>2</sup> )
TSE F162	$435,90 \pm 0,15$	4,8	-24,6
	$436,80 \pm 0,15$	-1,4	-33,1
SSE E015	$433,97 \pm 0,15$	0,9	-24,8
SSE E017	$433,32 \pm 0,15$	0,9	-24,8

O binário foi medido com os extensómetros SSE E015 e SSE E017 (ressoadores SAW com diferentes frequências de ressonância, mas com os mesmos coeficientes de temperatura, apresentados no Quadro 1), de 350 µm de espessura, com  $9,0 \times 5,5$  mm<sup>2</sup> de área e uma massa aproximada de 0,04 g (Figura 5c). Os extensómetros foram colados na superfície plana da célula com cola e catalisador M-Bond 200. Para a medição do binário sofrido pela célula, os extensómetros foram montados em configuração meia-ponte (Figura 5d). Tal como no caso do sensor de temperatura, os extensómetros foram ligados ao acoplador RF (Figuras 5e e 5f) através de cabos W.FL.



(a)



(b)



(c)





Figura 5: (a) Sensor de temperatura e caixa de alumínio dentro da redoma com a antena; o cabo coaxial permite a ligação direta à unidade de leitura; (b) Cabo W.FL soldado diretamente ao conetor SMA ligado ao sensor; (c) extensómetros SAW com o conetor W.FL claramente visível; (d) extensómetros SAW montados na célula de carga em configuração meia-ponte; (e,f) acopladores RF [19].

O sensor de temperatura foi calibrado numa câmara térmica FITOTERM 22E. Para tal, a célula de carga foi exposta a um varrimento de temperatura com uma resolução de 5 °C entre 20 °C e 80 °C; entre cada temperatura decorreu um intervalo de 45 minutos para garantir um aquecimento uniforme. A temperatura na superfície da célula foi medida com um termopar digital tipo J. A frequência de ressonância de cada um dos ressoadores foi medida para cada temperatura. Para a determinação do fator de conversão dos extensómetros, a célula de carga foi acoplada a um eixo de aço assente em dois rolamentos aparafusados a uma mesa. Um dos extremos do veio foi também aparafusado à mesa e o outro extremo foi acoplado a um braço metálico móvel rígido, como apresentado na Figura 6a. Com uma máquina de ensaios universal Shimadzu Autograph AGS-10 kN *Universal Testing Machine* (UTM), foi aplicada uma deformação vertical entre 0 e 47  $\mu\text{m}/\text{m}$ , com um passo de 4,7  $\mu\text{m}/\text{m}$ , no extremo do braço. A resposta dos sensores foi medida para cada valor de deformação aplicada. Para a aplicação do binário na célula de carga em rotação, foi desenvolvido um sistema de testes com um motor AC ligado a um veio em aço assente em dois rolamentos através de um par de polias e uma correia dentada. A célula de carga foi acoplada a este veio que, por sua vez, atravessava um forno para controlo de temperatura. No lado livre do veio, um travão permitia a aplicação de uma força paralela ao veio, apresentado em Figura 6b.

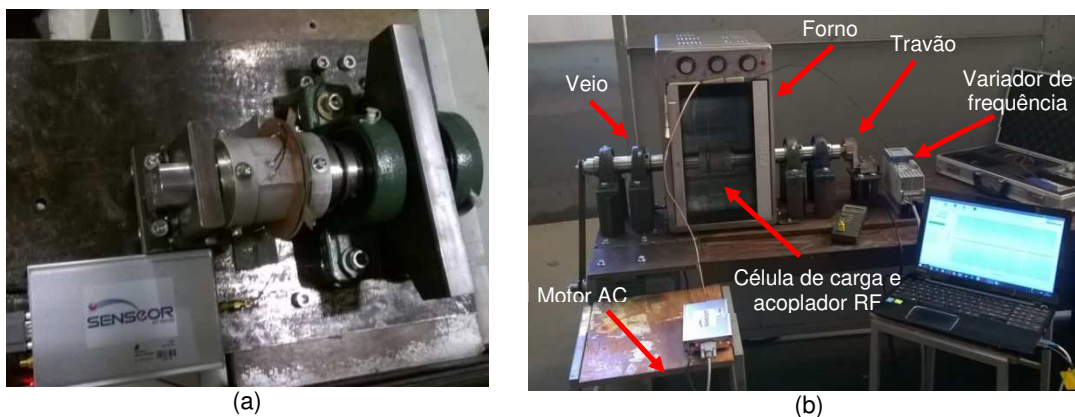


Figura 6: (a) Sistema para calibração dos extensómetros; (b) Sistema de testes [19].



### 3.2 Calibração dos sensores

No caso do sensor de temperatura, a dependência da diferença das frequências de ressonância relativas de cada ressoador com a temperatura é dada por [19]:

$$\Delta f_r = C_1 \cdot \Delta T + C_2 \cdot \Delta T^2 \quad (1)$$

onde  $\Delta T = T - 25$  °C e  $C_1$  e  $C_2$  são os coeficientes de calibração do sensor. As medições da resposta do sensor a diferentes temperaturas, efetuadas na câmara térmica, permitiram a extração dos coeficientes de calibração de primeira e segunda ordem

$$C_1 = 5,06 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$$

e

$$C_2 = 18,9 \times 10^{-9} / (^\circ\text{C})^2$$

No caso dos extensómetros, a diferença entre as frequências de ressonância relativas de cada sensor  $\Delta f_r$  está relacionada com a temperatura e com o fator de conversão  $S_G$  através da expressão:

$$\Delta f_r = C_2 \cdot \Delta T^2 + C_1 \cdot \Delta T + 2 \cdot S_G \cdot \varepsilon \quad (2)$$

A resposta de cada um dos extensómetros foi medida a diferentes temperaturas na ausência de carga aplicada, o que permitiu a determinação de

$$C_1 = 2,31 \times 10^{-6}$$

e

$$C_2 = -1,38 \times 10^{-8}$$

Como estes coeficientes não são nulos, a existência de um sensor de temperatura melhora a qualidade das medições de deformação / binário, uma vez que permite fazer a compensação das mesmas. Por sua vez, o fator de conversão foi determinado a uma temperatura de 25 °C através da medição da resposta dos extensómetros para diferentes cargas aplicadas, chegando-se ao valor  $S_G = 3,30$ . Dado que o fator de conversão dos extensómetros é tipicamente 2, a utilização de extensómetros SAW pode levar a medições com resolução superior.

### 3.3 Medição do binário em rotação

A Figura 7 mostra o binário medido pela ponte de extensómetros SAW em função do binário aplicado à célula de carga pelo travão. As medições foram feitas à temperatura ambiente e a uma velocidade de rotação de  $\approx 150$  rpm. Para valores de binário superiores a 15 N m, o desvio entre os binários medido e aplicado aumentou; este efeito pode ter origem no aquecimento do disco do travão, o que provocou o desvio do valor do coeficiente de atrito do valor teórico.

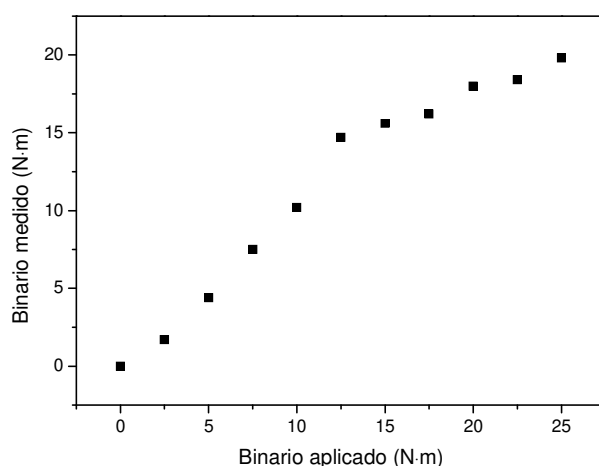


Figura 7 – Binário medido pelos sensores como resposta ao binário aplicado pelo travão na célula de carga [19].

#### 4. Conclusões

O *kit* comercial foi testado exhaustivamente pelos autores em [19]. Os testes efetuados permitem concluir que, na generalidade, o sistema comprado à empresa SENSEOR é adequado para a medição da temperatura e da deformação / binário de uma peça em repouso – desde que a peça em questão possua uma área plana onde os sensores possam ser colados. Caso contrário, a superfície da peça deverá ser processada previamente. Em alternativa, os sensores poderão ser montados num transdutor com forma adequada. No entanto, no caso de a peça em questão se encontrar em rotação, foram detetadas algumas limitações quer ao nível dos sensores quer ao nível da própria unidade de leitura. O desenvolvimento de uma solução COTS passível de ser utilizada para monitorizar uma peça em rotação envolverá os seguintes passos:

- Otimização do procedimento de interrogação de maneira a aumentar a taxa de aquisição do sistema;
- Desenvolvimento de algoritmos de interrogação mais eficazes de maneira a aumentar a precisão das leituras da frequência;
- Fabrico de extensómetros e sensores de temperatura sem conetores; isto possibilitará a utilização de uma pequena placa de circuito impresso com os conetores necessários e de fios elétricos com um diâmetro de 25  $\mu\text{m}$  para fazer a ligação elétrica do sensor à placa; isto minimizará a força centrífuga e a influência da rotação nas medições.

Como conclusão, pode afirmar-se que o domínio de aplicação dos dispositivos SAW está em expansão muito rápida, sendo previsíveis avanços significativos no curto / médio prazo. No momento presente, e do ponto de vista dos autores deste texto, está a ser desenvolvido trabalho quer ao nível do dispositivo (utilização de novos materiais), quer ao nível das unidades de leitura. Os melhoramentos expetáveis consistem no aumento das taxas de interrogação e da qualidade das medições, bem como o desenvolvimento de dispositivos operacionais a temperaturas elevadas.

---

## 5. Agradecimentos

Este trabalho foi copatrocinado pelo projeto Clean Sky RTMGear 641593. A autora J.C. Mendes agradece à FCT a bolsa de pós-doutoramento POPH (Programa Operacional Potencial Humano) SFRH/BPD/90306/2012, cofinanciada por fundos europeus (FSE—Fundo Social Europeu) e nacionais (MCTES—Ministério da Ciência, Tecnologia E Ensino Superior).

## 6. Referências

- [1] R.M. White, F.W. Voltmer, Direct piezoelectric coupling to surface elastic waves, *Appl. Phys. Lett.*, 7 (1965) 314-316.
  - [2] L. Rayleigh, On Waves Propagated along the Plane Surface of an Elastic Solid, *Proceedings of the London Mathematical Society*, s1-17 (1885) 4-11.
  - [3] L. Reindl, G. Scholl, T. Ostertag, A. Pohl, R. Weigel, Wireless Remote Identification and Sensing with SAW Devices, *Proc. IEEE 1998 MMT/AP International Workshop on Commercial Radio Sensor and Communication Techniques*, 1998, pp. 83-96.
  - [4] R. Fachberger, A. Erlacher, Applications of wireless SAW sensing in the steel industry, *Procedia Engineering*, 5 (2010) 224-227.
  - [5] M.P.d. Cunha, R.J. Lad, T. Moonlight, S. Moulzolf, A. Canabal, R. Behanan, P.M. Davulis, D. Frankel, G. Bernhardt, T. Pollard, D.F. McCann, Recent advances in harsh environment acoustic wave sensors for contemporary applications, *2011 IEEE SENSORS Proceedings*, 2011, pp. 614-617.
  - [6] C. Heinrich, V. Hinrichsen, Diagnostics and monitoring of metal-oxide surge arresters in high-voltage networks-comparison of existing and newly developed procedures, *IEEE Transactions on Power Delivery*, 16 (2001) 138-143.
  - [7] <http://www.intellisaw.com/>, Advanced Monitoring Solutions for Critical Electric Power Transmission & Distribution Assets, 2013.
  - [8] R. Stoney, B. Donohoe, D. Geraghty, G.E. O'Donnell, The development of surface acoustic wave sensors (SAWs) for process monitoring, *Procedia CIRP*, 2012, pp. 569-574.
  - [9] R. Stoney, G.E. O'Donnell, D. Geraghty, Dynamic wireless passive strain measurement in CNC turning using surface acoustic wave sensors, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 69 (2013) 1421-1430.
  - [10] V. Kalinin, G. Bown, A. Leigh, Contactless Torque and Temperature Sensor Based on SAW Resonators, *2006 IEEE Ultrasonics Symposium*, 2006, pp. 1490-1493.
  - [11] J. Beckley, V. Kalinin, M. Lee, K. Voliansky, Non-contact torque sensors based on SAW resonators, *Proceedings of the 2002 IEEE International Frequency Control Symposium and PDA Exhibition (Cat. No.02CH37234)*, 2002, pp. 202-213.
  - [12] V. Kalinin, High-speed torque sensing in car engines by means of SAW resonators, *SAW Symposium*, 2012.
-

- [13] V. Kalinin, R. Lohr, A. Leigh, J. Beckley, G. Bown, High-speed high dynamic range resonant SAW torque sensor for kinetic energy recovery system, EFTF-2010 24th European Frequency and Time Forum, 2010, pp. 1-8.
- [14] <http://www.trans-logik.com/>, iTruck TPMS, 2017.
- [15] <http://www.stackltd.com/tpms.html>, Tyre Pressure Monitoring Systems, 2017.
- [16] J.-M. Friedt, C. Droit, S. Ballandras, S. Alzuaga, G. Martin, P. Sandoz, Remote vibration measurement: A wireless passive surface acoustic wave resonator fast probing strategy, Rev. Sci. Instrum., 83 (2012) 055001.
- [17] <https://www.siemens.com/global/en/home/products/mobility.html>, Sofis – Surface acoustic wave identification system, in: Siemens (Ed.), 2017.
- [18] <http://www.sawcomponents.de/en/products/saw-sensors-and-rfid/saw-ident/>, SAW IDENT RFID for roughest applications, 2017.
- [19] D. Silva, J.C. Mendes, A.B. Pereira, F. Gégot, L.N. Alves, Measuring Torque and Temperature in a Rotating Shaft Using Commercial SAW Sensors, Sensors, 17 (2017) 1547.