

Análise e Simulação de um Sensor Capacitivo para TPMS

Beatriz Sousa Demétrio
Engenharia Física
Universidade do Minho
Braga, Portugal
a92839@alunos.uminho.pt

Carlos Miguel Passos Ferreira
Engenharia Física
Universidade do Minho
Braga, Portugal
a92846@alunos.uminho.pt

Abstract— O presente artigo relata a análise e simulação, com recurso ao programa *COMSOL*, de um sensor capacitivo (baseado em *MEMS*) aplicado em sistemas de monitoramento da pressão dos pneus (*TPMS*), onde se estudou o efeito da variação da pressão e de vários parâmetros físicos do sensor face à sua resposta, realizando em paralelo um estudo da linearidade e sensibilidade do sensor relativamente a estas alterações. O tipo de material utilizado é também alterado, com intuito de identificar qual a resposta do sensor face a esta variação. Observou-se que o aumento da espessura do diafragma (elétrodo móvel) provoca uma diminuição na sensibilidade em relação ao deslocamento do diafragma (face à sua posição de repouso). Por sua vez, o aumento da distância entre os elétrodos gerou uma diminuição na capacitância atingida. Apesar de a estrutura adotada não ter atingido todas as previsões definidas, possíveis alterações são sugeridas com intuito de, em trabalhos futuros, ser possível aumentar significativamente a sensibilidade e linearidade da saída deste sensor.

Keywords—*MEMS, sensor capacitivo, COMSOL, pressão do ar, TPMS, silício, polissilício, deslocamento do diafragma, sensibilidade, linearidade*

I. INTRODUÇÃO

Os pneus são considerados a base para uma condução confortável, segura e eficiente, isto se inflados a uma pressão aconselhada pelos fabricantes.

Apesar de não ser preocupante para a maioria dos condutores, num cenário em que não ocorrem quaisquer danos nos pneus durante o seu uso, ocorrerá uma diminuição natural de pressão do ar de, aproximadamente, 1 psi por mês. Na verdade, cerca de 85% de todas as quedas de pressão nestes artefacto circular devem-se a perdas naturais. [9]

Manter o pneu corretamente inflado, com valores de pressão entre 30 psi e 36 psi (cerca de 207 kPa e 248 kPa, respetivamente) na maioria dos veículos [3], ajuda no controlo e travagem do veículo (permitindo a redução de acidentes causados pela perda destes efeitos), bem como diminuir o consumo de combustível e a vida útil dos pneus. Por estes motivos, ter um sensor a bordo que alerte o condutor da existência de alguma anomalia na pressão de ar dos pneus é de extrema importância.

Como resultado, a maioria das regiões começaram a exigir a implementação de um sistema de monitoramento da pressão dos pneus (TPMS), sendo na União Europeia obrigatória a sua existência em todas viaturas fabricadas a partir de novembro de 2014 [9]. A necessidade de ter um *TPMS* tornaram este tipo de sensores uma parte significativa do total de sensores de pressão produzidos mundialmente.

Existem duas técnicas de monitorização da pressão dos pneus em veículos – detecção direta e indireta.

Um TPMS indireto utiliza os sensores de velocidade do sistema de travagem anti bloqueio (*ABS*) para comparar as

velocidades de rotação das rodas. Tendo em conta que um pneu sub-inflado terá um diâmetro menor que os inflados em condições normais, a sua velocidade de rotação será diferente, gerando um alerta que será transmitido ao condutor. No entanto, este método não é preferível uma vez que exige que o veículo esteja em movimento e a sua resolução não é a desejada, não sendo capaz, por exemplo, de detetar as perdas naturais da pressão abordadas anteriormente.

Um TPMS direto promete resolver as falhas do método anterior, sendo este o tipo de sensor estudado no presente relatório. Montado diretamente no conjunto da roda, na maioria dos casos agrupado com a válvula de ar, este aparelho permite a medição da pressão de ar (entre outros parâmetros, como a temperatura) independente e em tempo real para cada pneu individual, esteja o veículo em movimento ou estacionado.

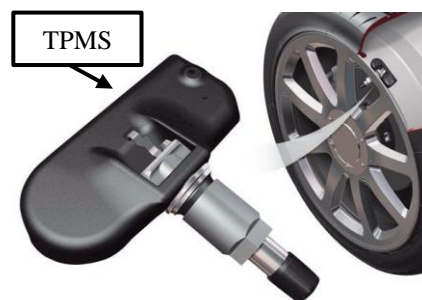


Figura 1 - Exemplo e posicionamento de um TPMS pelo método direto

A maioria destes aparelhos é composto por um sensor de pressão *MEMS* (*Micro Electro-Mechanical System*), em conjunto com microcontroladores, uma antena de *IV* (dada a dificuldade de comunicação por cabos) e uma fonte de alimentação, na maioria das vezes uma pilha de lítio, capaz de fornecer 3 – 3,5V ao sistema para permitir o seu correto funcionamento. A estrutura deste aparelho pode ser representada na seguinte ilustração:

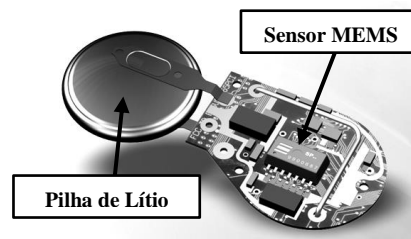


Figura 2 - Esquema de um módulo TPMS alimentado por uma bateria padrão/pilha

A escolha de sensores *MEMS* provém das suas inúmeras vantagens face às necessidades do problema, entre as quais o tamanho reduzido e baixo peso. Podem ser piezorresistivos ou capacitivos, no entanto os últimos são preferíveis por terem

uma elevada sensibilidade à pressão, baixo ruído e uma baixa sensibilidade à temperatura, aspeto importante considerando que a temperatura dos pneus aumenta quando em movimento fruto de forças de fricção.

II. SENSOR DE PRESSÃO CAPACITIVO MEMS

A. Funcionamento do Sensor

Geralmente, um sensor de pressão capacitivo compreende um conjunto de 1 (ou mais) placas/eléctrodos fixos e 1(ou mais) eléctrodos móveis.

A estrutura estudada neste relatório consiste num par de duas placas separadas por uma *gap* de ar/vácuo (meio dielétrico), estando a placa inferior fixa e a superior funciona como um diafragma que se deforma consoante a pressão exercida acima desta. [4,6]

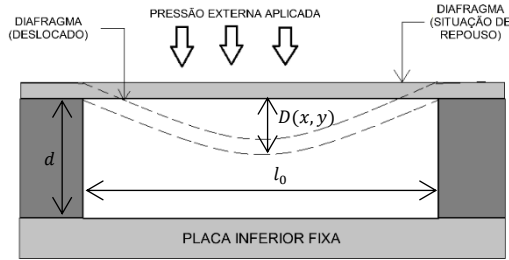


Figura 1 - Ilustração do Sensor Capacitivo

Quando aplicada uma tensão de polarização entre as placas, as mesmas atuarão como eléctrodos.

Observa-se uma variação na capacitância do sensor à medida que, exercida uma certa pressão na parte superior, ocorre a deflexão do diafragma, diminuindo a distância entre os dois eléctrodos.

B. Análise Teórica/Matemática

De forma a entender melhor o comportamento do sensor descrito acima, procedeu-se ao seu estudo matemático.

Considerando a situação inicial em que não se observa uma pressão externa aplicada, a capacitância, C , entre as duas placas paralelas (situação de repouso) é dada por:

$$C = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r A}{d} \quad (1)$$

da qual:

- ϵ_0 : permissividade do espaço livre
- ϵ_r : permissividade relativa do meio dielétrico
- A : área comum entre placas
- d : distância entre os eléctrodos

Passando para o cenário em que é aplicada uma pressão constante sobre o diafragma, provocando a sua deformação, é necessário recorrer a uma expressão distinta.

Para o caso de um “diafragma quadrangular” (a escolha deste formato não é arbitrária, sendo explicada posteriormente quando avaliado o *design* do sensor), o deslocamento máximo, D_{max} , obtido na zona central do diafragma (dada a simetria do mesmo) declara-se por [11]:

$$D_{max} = \frac{0.01512(1 - \nu^2)Pl_0^2}{Eh^3} \quad (2)$$

da qual:

- ν : coeficiente de *Poisson*
- P : pressão externa aplicada
- l_0 : comprimento do diafragma (zona deformada)
- E : módulo de *Young* (em *GPa*)
- h : espessura do diafragma

Tal como descrito anteriormente, esta deformação provoca uma variação na capacitância do sensor capacitivo, sendo este comportamento descrito na seguinte expressão [7]:

$$C = \iint \frac{\epsilon_0}{(d - D(x, y))} dx dy \quad (3)$$

da qual $D(x, y)$ representa a variação no deslocamento do diafragma face a sua posição de repouso.

A expressão acima demonstra a não-linearidade da capacitância com a deformação, algo possível de resolver utilizando uma expansão binomial no denominador e considerando que o sensor funciona com pequenas deformações, obtendo a seguinte expressão [4]:

$$C = C_0 \left(1 + \frac{12.25Pl_0^4}{2025dh} \right) \quad (4)$$

da qual C_0 representa a capacitância com $P = 0 \text{ Pa}$, obtida através da expressão seguinte:

$$C_0 = \frac{0.4\epsilon_0 l_0^4}{d} \quad (5)$$

Estas equações servirão de base para o estudo dos efeitos causados pela presença da pressão no sensor capacitivo face aos parâmetros físicos do mesmo.

III. ESTRUTURA DO MODELO USADO EM COMSOL

Seguindo as informações reunidas, decidiu-se, por fim, desenhar o seguinte modelo:

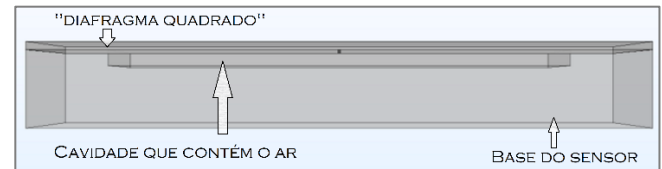


Figura 2: Modelo desenhado em COMSOL

Dentro das possibilidades existentes para os formatos dos diafragmas, optou-se pelo uso do diafragma quadrangular.

Caso fosse utilizado um diafragma *retangular*, ao aplicar a pressão, haveria uma distribuição não uniforme do stress provocada pela falta de simetria da estrutura, resultando num deslocamento mais pequeno quando comparado ao diafragma quadrangular.

Outra opção de uso poderia ser o diafragma *circular*, no entanto, quando comparado com o escolhido, esse não apresenta um deslocamento máximo tão grande, um dos requisitos definidos.

Outra vantagem do uso de diafragmas quadrangulares incide na facilidade de fabricação, fruto da natureza anisotrópica da estrutura cristalina do silício [4], material inicialmente utilizado.

As dimensões definidas no software de simulação foram as seguintes (**geometria** colocada/usada no COMSOL):

- **Base do sensor:** tem como dimensões $(400 \times 400)\mu m$ e altura de $50\mu m$. Colocou-se como coordenadas desta base $(0,0,0)$;
- **Cavidade do ar:** tem como dimensões $(300 \times 300)\mu m$ e altura de $10\mu m$. Colocou-se como coordenadas desta cavidade $(50,50,40)$;
- **Diafragma quadrangular:** tem como dimensões $(400 \times 400)\mu m$ e altura $5\mu m$. Colocou-se como coordenadas desde “diafragma” $(0,0,50)$.

Relativamente aos **materiais** adotados para os diferentes componentes deste sensor, foram utilizados os seguintes:

Materiais usados	Módulo de Young (Gpa)	Coefficiente de Poisson	Densidade (kg/m ³)	Permitividade relativa
Silício (Si)	170	0,27	2329	12
Polissilício (Poly Si)	160	0,22	2320	5
Vácuo	-	-	0	1

Tabela 1: Materiais utilizados e os seus respetivos parâmetros importantes na construção deste sensor.

Decidiu-se escolher o **silício** pois, baseado nos artigos referidos no final do relatório, foi o material semiconductor mais conhecido (facilitando a sua utilização), além de ser um dos materiais mais disponíveis atualmente, sendo assim mais barato, o que é uma mais valia na construção dos sensores.

Já o **polissilício** foi escolhido por ser um dos materiais semicondutores com uma estrutura semelhante à do silício, além de ser bastante utilizado na construção de condensadores, que são inseridos num circuito integrado, sendo assim bastante relevante para o tipo de sensores analisado.

No COMSOL, colocou-se a seguinte geometria e os seguintes materiais (com os parâmetros descritos na tabela anterior):

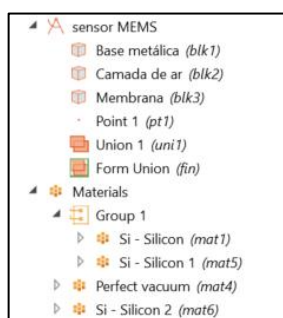


Figura 3: Geometria e Materiais inseridos no COMSOL na construção do modelo

Observando a figura anterior, verifica-se que, na geometria, além dos blocos descritos em cima, se acrescentou um ponto. Ora, este foi inserido para que, nos resultados, se obtivesse o deslocamento máximo do diafragma. Este ponto tem como coordenadas $(200,200,50)$. Como ele pertence também ao diafragma, uniu-se estas duas geometrias, tendo também as duas o mesmo tipo de material.

É de notar que se variou o material do diafragma, a sua espessura e também a espessura da cavidade do meio dielétrico entre os elétrodos.

De seguida, escolheu-se a **física** ideal para este tipo de sensor. Optou-se pela física **electromechanics** pois, neste sensor, temos a interação entre campos eletromagnéticos e uma estrutura sólida. Esta estrutura vai experimentar uma pressão que irá levar ao movimento do seu diafragma.

No COMSOL, ao escolher esta física, obtém-se o seguinte:

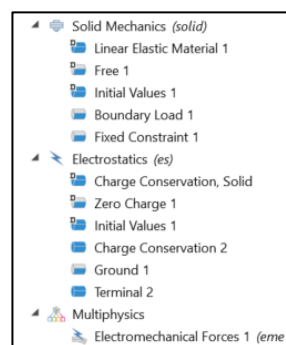


Figura 4: Física e condições fronteiras correspondentes aplicadas em COMSOL

Como se pode verificar em cima, com esta física, vem associado outras duas, que são completamente diferentes uma da outra.

A primeira, **Solid Mechanics (solid)**, serviu para descrever as **condições fronteira da estrutura sólida**. Além das que são predefinidas (a **Linear Elastic Material1**, a **Free1** e a **Initial Values1**, onde não houve qualquer alteração), foram acrescentadas as seguintes:

- **Boundary Load1:** acrescentou-se esta condição fronteira de forma que a face superior do diafragma esteja sujeita a uma pressão;
- **Fixed Constraint1:** acrescentou-se também esta condição fronteira de forma que a cavidade do ar, com as características definidas anteriormente, fique fixa, apesar do movimento do diafragma.

A variação de pressão que irá ser aplicada é de 0 a $300kPa$ [7].

Já a segunda física, a **Electrostatics (es)**, serviu para descrever as **condições fronteira para a formação dos campos eletromagnéticos**. Como na física anterior, além das condições que foram automaticamente predefinidas por esta física (tais como **Charge Conservation, Solid, Zero Charge1** e **Initial Values**), foram acrescentadas as seguintes condições fronteiras:

- **Charge Conservation2:** acrescentou-se esta condição fronteira de forma que na cavidade não haja qualquer alteração na carga;
- **Ground1:** acrescentou-se esta condição fronteira de forma que na face inferior da cavidade esteja aplicada uma voltagem de $0V$.
- **Terminal2:** acrescentou-se esta condição fronteira de forma que no “diafragma” seja aplicada uma voltagem de $3,0V$.

Estes valores de voltagem devem-se ao facto de que normalmente este tipo de sensores é alimentado por uma tensão contínua que provém de uma pilha de lítio, aspeto este abordado na introdução.

De imediato, criou-se a **malha** de forma a fazer o estudo pretendido deste sensor.

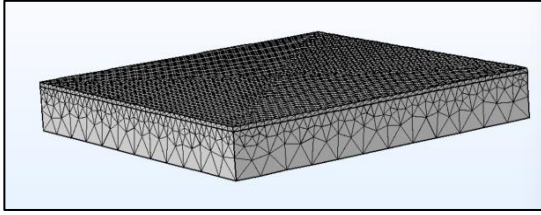


Figura 5: Malha criada "by default" pelo COMSOL, adaptada à física e às condições fronteiras selecionadas anteriormente.

Outra definição especificada na estrutura corresponde à **Moving Mesh**, aplicada apenas à cavidade, cuja forma será afetada pelo comportamento dos limites que envolvem, entre estas a deformação/movimentação do diafragma.

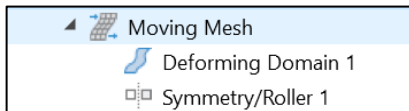


Figura 6: Comandos do COMSOL para a "Moving Mesh".

Por fim, utilizou-se o **solver estacionário** para observar o efeito da pressão na movimentação/deformação do diafragma.

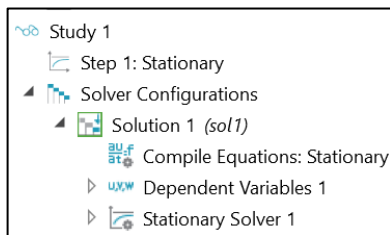


Figura 7: Comandos do COMSOL para a aplicação do solver estacionário.

Como foi dito anteriormente, pretende-se que a pressão varie de 0 a 300kPa. Dessa forma, configurou-se este **Study** de maneira a percorrer esta longa gama de pressões. Para isso, utilizou-se o **range(0,5000,300000)** no **Step 1: Stationary**. Isto implica que a pressão começa em 0 e vai até 300kPa, com intervalos de valores de 5kPa.

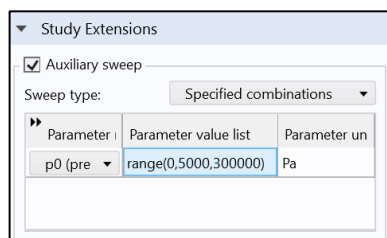


Figura 8: Alteração no "Study" no COMSOL de forma a variar a pressão aplicada.

IV. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Seguindo os pontos descritos anteriormente, ao fazer **compute** no **study**, obteve-se o seguinte:

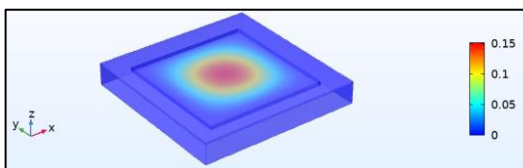


Figura 9: Deslocamento do diafragma de silício para uma pressão aplicada igual a 25kPa.

Sem tardar, de maneira a estudar este deslocamento do diafragma, decidiu-se determinar o deslocamento médio, o deslocamento máximo e a capacitância. Para isso, fez-se o seguinte:

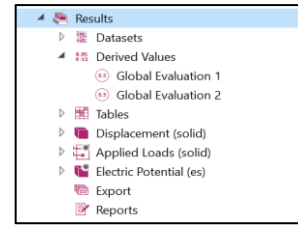


Figura 10: Comandos no COMSOL de forma a obter o deslocamento médio, máximo e a capacitância.

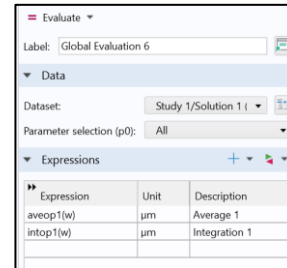


Figura 11: Comandos no COMSOL de forma a obter os valores do deslocamento médio e máximo do Diafragma.

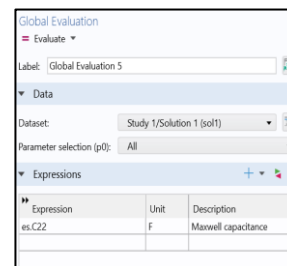


Figura 12: Comandos do COMSOL de forma a obter os valores da capacitância

Entende-se por deslocamento médio, a média dos vários deslocamentos dos pontos por todo o "diafragma". Já o deslocamento máximo é o deslocamento do ponto central do diafragma, que dada a simetria do mesmo, corresponde à posição que sofre maior deformação.

Devido ao referencial utilizado, os valores do deslocamento, tanto o máximo como o médio, no COMSOL foram obtidos como valores negativos. Como se trata de um deslocamento, passou-se todos os valores para positivos.

A. Mudança do Material do "Diafragma"

De forma a verificar qual era o material mais indicado para constituir este diafragma, e tendo em conta as expressões teóricas em cima mencionadas, obteve-se os seguintes resultados:

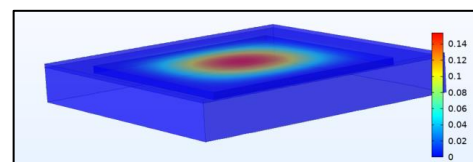


Figura 13: Deslocamento do diafragma de polissilício para uma pressão aplicada igual a 25kPa.

- Em relação ao deslocamento médio e ao deslocamento máximo:

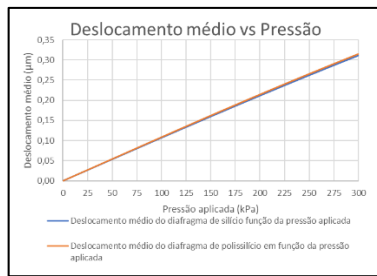


Figura 14: Gráfico do "Deslocamento médio vs Pressão" para diferentes materiais do diafragma.

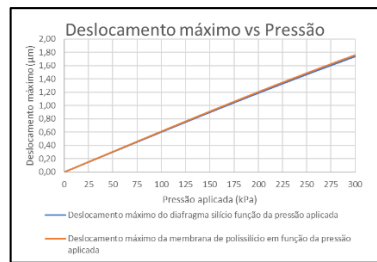


Figura 15: Gráfico do "Deslocamento máximo vs Pressão" para diferentes materiais do diafragma.

Reparamos com estes dois gráficos que, apesar da mudança de material do diafragma, o deslocamento médio e o deslocamento máximo do mesmo em quase nada são afetados. Isto deve-se ao facto de os materiais comparados terem características com valores muito próximos, tais como o coeficiente de Poisson e o módulo de Young.

Como em gráficos não se repara bem a diferença entre valores do deslocamento obtidos para os diferentes diafragmas, recorreremos às tabelas em anexo e verificamos que, efetivamente, o que sofre mais deformação é o diafragma de polissilício. Por isso, de modo a otimizar o sensor que se pretende construir, decidiu-se utilizar como material do diafragma o polissilício nas alterações seguintes.

- Relativamente à capacitância:

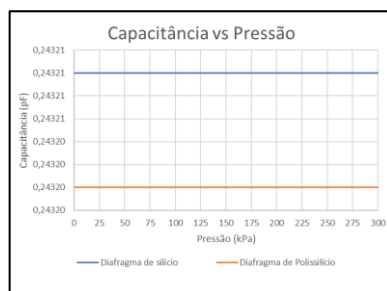


Figura 16: Gráfico da "Capacitância vs Pressão" para diferentes materiais do diafragma.

Utilizando a expressão do estudo analítico descrito anteriormente da capacitância (com a aproximação), sabe-se que esta não depende do material de que é constituído o diafragma. De facto, este gráfico em cima verifica exatamente isso: apesar de haver uma variação entre as duas capacitâncias obtidas, ela é muito pequena (cerca de $0,00001 \text{ pF}$), podendo assim ser desconsiderada.

B. Mudança da espessura do Diafragma (h)

De forma a verificar qual a espessura mais indicada para constituir este diafragma, e tendo em conta as expressões teóricas em cima mencionadas, obteve-se os seguintes resultados:

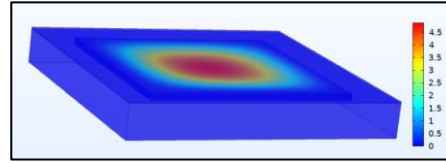


Figura 17: Deslocamento do diafragma de polissilício com uma espessura de $2,5 \mu\text{m}$ para uma pressão aplicada igual a 25 kPa .

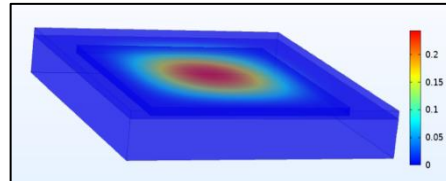


Figura 18: Deslocamento do diafragma de polissilício com uma espessura de $10 \mu\text{m}$ para uma pressão aplicada igual a 25 kPa .

- Relativamente ao deslocamento médio e ao deslocamento máximo:

Como reparamos nas equações expressas anteriormente, reparamos que, por teoria, o deslocamento máximo, para o dobro a espessura do diafragma, passa para $1/6$ do que era. Também se observa que se diminuíssemos para metade da espessura, este deslocamento máximo deveria passar a ser 6 vezes mais. De forma a comprovar se isto se verifica ou não, decidiu-se variar a espessura do diafragma, h , passando do valor inicial de $h = 5 \mu\text{m}$ para valores como $h = 10 \mu\text{m}$ e $h = 2,5 \mu\text{m}$. Obteve-se os seguintes resultados:

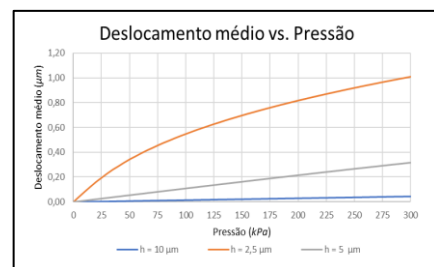


Figura 19: Gráfico do "Deslocamento médio vs Pressão" para diferentes valores da espessura do diafragma.

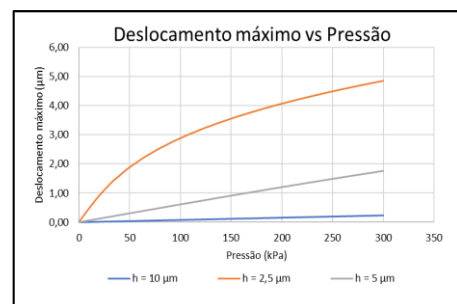


Figura 20: Gráfico do "Deslocamento máximo vs Pressão" para diferentes valores da espessura do diafragma.

Observando estes dois gráficos verifica-se exatamente o que se concluiu nas fórmulas anteriormente. Efetivamente, se analisarmos para uma pressão igual a 300 kPa , verifica-se que no deslocamento máximo para $h = 10 \mu\text{m}$ tem-se que é igual

a $0,24\mu m$, que é aproximadamente um sexto do deslocamento máximo obtido para $h = 5\mu m$, que é o valor usado inicialmente para o diafragma de polissilício.

Verifica-se também que existe uma maior sensibilidade para $h = 2,5\mu m$, pois para a mesma variação de entrada, tem uma maior variação de saída. Mas isso implicou a perda do seu efeito de linearidade.

Portanto, pode-se concluir que efetivamente quanto mais se aumenta a espessura do diafragma, menos sensível será o sensor, mas a linearidade mantém-se.

- Em relação à capacitância:

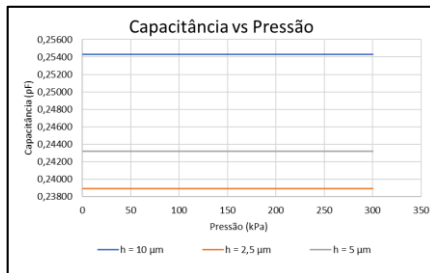


Figura 21: Gráfico da "Capacitância vs Pressão" para diferentes valores da espessura do diafragma.

Voltando a utilizar a expressão da capacitância (com a aproximação), fica a saber-se que quanto maior for o h , ou seja, maior for a espessura do diafragma usado, maior a capacitância. Ora, de facto é exatamente isso que se verifica no gráfico em cima.

C. Mudança da Espessura da Cavidade, ou seja, de d

De forma a verificar qual era a espessura mais indicada para constituir a cavidade, e tendo em conta as expressões teóricas em cima mencionadas, obteve-se os seguintes resultados:

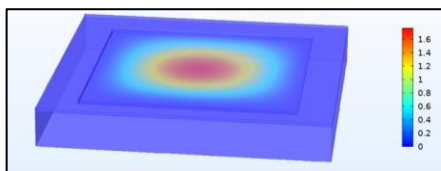


Figura 22: Deslocamento do diafragma de polissilício com uma cavidade de espessura de $5\mu m$ para uma pressão aplicada igual a 25kPa.

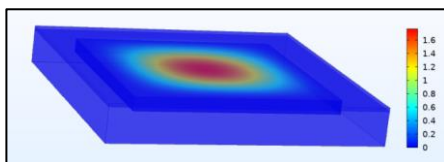


Figura 23: Deslocamento do diafragma de polissilício com uma cavidade de espessura de $20\mu m$ para uma pressão aplicada igual a 25kPa.

- Em relação ao deslocamento médio e ao deslocamento máximo:

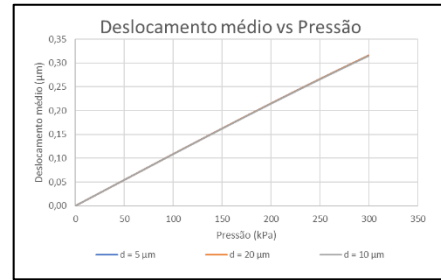


Figura 24: Gráfico do "Deslocamento médio vs Pressão" para diferentes valores da espessura da cavidade.

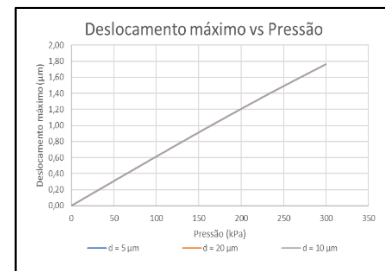


Figura 25: Gráfico do "Deslocamento máximo vs Pressão" para diferentes valores da espessura da cavidade.

Repara-se que a equação que descreve o deslocamento máximo do diafragma em nada depende da espessura da Cavidade. Portanto, mesmo variando este parâmetro, não deve haver qualquer alteração da movimentação desta membrana. Observando o gráfico em cima, verifica-se efetivamente que em nada afeta a alteração do parâmetro d , aliás, apenas se verifica que com o aumento da pressão, à um aumento proporcional tanto do deslocamento médio como do máximo, sendo assim uma relação linear.

- Em relação à capacitância:

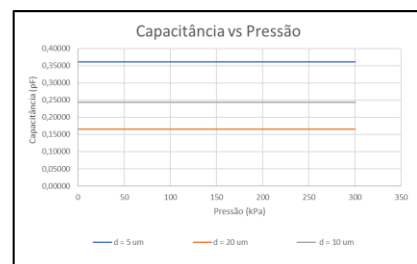


Figura 26: Gráfico da "Capacitância vs Pressão" para diferentes valores da espessura da cavidade.

Olhando de novo para a expressão que determina o valor da capacitância, verifica-se que a relação da mesma com o valor da espessura da cavidade é a seguinte: quanto maior o valor de d , menor é o valor da capacitância, isto é, de C . Isto é comprovado pelo gráfico anterior, que se verifica que em comparação com o valor inicial de $d = 10\mu m$, se se diminuir para $d = 5\mu m$, passamos a ter um valor de capacitância que é aproximadamente 1,5 vezes maior.

D. Capacitância, C

Analisando de novo a expressão do cálculo da capacitância e tendo em conta os artigos que serviram de suporte para este relatório, repara-se que os gráficos obtidos com o *COMSOL* não correspondem às previsões feitas, isto é, efetivamente a capacitância deveria variar em função da pressão, de forma proporcional. Isto pode ser consequência de vários fatores tais como:

- a ordem de grandeza dos parâmetros utilizados;
- certas propriedades incorretas no *COMSOL*.

V. CONCLUSÕES

Neste projeto, tendo em conta o objetivo apresentado, desenhou-se e simulou-se um sensor de pressão capacitivo para o sistema de monitoração dos pneus.

Reparou-se que, apesar de não ser muito perceptível graficamente, a mudança do material de silício para polissilício, além da diminuição da espessura do diafragma, mais sensível (relativamente ao deslocamento do diafragma) é o sensor. Consequentemente, a otimização também implica uma perda de linearidade. Relativamente à mudança da altura/espessura da cavidade, em nada afeta esta movimentação da membrana.

Em relação à capacitância, confirmou-se quais os parâmetros influenciavam a mesma (como por exemplo o aumento da espessura do “diafragma” ou da cavidade) e que não afetavam (como a mudança do material do “diafragma”).

Por fim, sobre a sensibilidade deste sensor, tendo como saída a variação da Capacitância (que é o que realmente importa pois é esta variação, em conjunto com o sistema TPMS, que vai gerar um aviso para o condutor), pode-se dizer que efetivamente a estrutura desenhada não é a mais indicada pois, para uma determinada variação de pressão, não há qualquer variação da saída, ou seja, a Capacitância mantém-se sempre constante.

TRABALHOS FUTUROS

De forma a dar continuidade a este projeto, sugere-se uma análise mais detalhada do efeito da geometria/estrutura do sensor capacitivo no que toca à linearidade e sensibilidade do mesmo (definir um sensor com um diafragma em formato *stepped* [4] seria uma possibilidade a considerar).

Além disso, tendo em conta que o sensor, estando posicionado dentro dos pneus, estará sujeito a constantes variações de temperatura, o efeito deste parâmetro face à saída do sensor seria igualmente uma possível análise a ter em conta.

REFERÊNCIAS

- [1] Schrader Electronics, Northern Ireland, "Optimizing Built-in Tire Pressure Monitoring Sensors", COMSOL NEWS, 2014.
- [2] M. Löhndorf, T. Kvisteroy, E. Westby and E. Halvorsen, "Evaluation of energy harvesting concepts for tire pressure monitoring systems", jan. 2007.
- [3] "What pressure should my tires be?", Kia Sudan, <https://www.kia.com/sd/en/discover-kia/ask/what-pressure-should-my-tires-be.html> (acedido a maio 22, 2022).
- [4] M. Jelodar and B. Ganji, "Design of High Sensitivity and Linearity Microelectromechanical Systems Capacitive Tire Pressure Sensor using Stepped Membrane", marc. 2016.
- [5] S. Yamamoto, O. Nakao and H. Nishimura, "Touch mode capacitive pressure sensor for passive tire monitoring system", jan. 2002.
- [6] A. Pradeep, A. S. A. Unnikrishnan, S. P R, A. S and B. S D, "Material optimization for Capacitive pressure sensor- A COMSOL study", agos. 2021.
- [7] A. Sharma and J. Singh, "Design and analysis of high performance MEMS capacitive pressure sensor for TPMS", dez. 2013.
- [8] J. Zhang, J. Zhang, H. Qi and Z. Hu, "Design of a high-linear mems pressure sensor available for TPMS", out. 2014.
- [9] NXP, "A Global Solution for Tire Pressure Monitoring Systems TPMS (Tire Pressure Monitoring System)".
- [10] W. Tjiu, A. Ahanchian and B. Majlis, "Development of Tire Condition Monitoring System (TCMS) based on MEMS sensors", dez. 2004.
- [11] S. Suman, D. Punetha and S. Pandey, "Improvement in Sensing Characteristics of Silicon Microstructure based MEMS Capacitive Sensor for Automotive Applications", jan. 2020.

ANEXOS

1. Tabela de valores recolhidos pelo COMSOL para o diafragma de silício:

Pressão (kPa)	Deslocamento médio (μm)	Deslocamento Máximo (μm)	Capacitância (pF)
0	0,00	0,00	0,24321
5	0,01	0,03	0,24321
10	0,01	0,06	0,24321
15	0,02	0,09	0,24321
20	0,02	0,12	0,24321
25	0,03	0,15	0,24321
30	0,03	0,18	0,24321
35	0,04	0,21	0,24321
40	0,04	0,24	0,24321
45	0,05	0,27	0,24321
50	0,05	0,30	0,24321
55	0,06	0,33	0,24321
60	0,06	0,36	0,24321
65	0,07	0,39	0,24321
70	0,07	0,42	0,24321
75	0,08	0,45	0,24321
80	0,09	0,48	0,24321
85	0,09	0,51	0,24321
90	0,10	0,54	0,24321
95	0,10	0,57	0,24321
100	0,11	0,60	0,24321
105	0,11	0,63	0,24321
110	0,12	0,66	0,24321
115	0,12	0,69	0,24321
120	0,13	0,72	0,24321
125	0,13	0,75	0,24321
130	0,14	0,78	0,24321
135	0,14	0,81	0,24321
140	0,15	0,84	0,24321
145	0,15	0,87	0,24321
150	0,16	0,90	0,24321
155	0,16	0,93	0,24321
160	0,17	0,96	0,24321
165	0,18	0,99	0,24321
170	0,18	1,02	0,24321
175	0,19	1,04	0,24321
180	0,19	1,07	0,24321
185	0,20	1,10	0,24321
190	0,20	1,13	0,24321
195	0,21	1,16	0,24321
200	0,21	1,19	0,24321
205	0,22	1,22	0,24321
210	0,22	1,24	0,24321
215	0,23	1,27	0,24321
220	0,23	1,30	0,24321
225	0,24	1,33	0,24321
230	0,24	1,36	0,24321
235	0,25	1,39	0,24321
240	0,25	1,41	0,24321
245	0,26	1,44	0,24321
250	0,26	1,47	0,24321
255	0,27	1,50	0,24321
260	0,27	1,52	0,24321
265	0,28	1,55	0,24321
270	0,28	1,58	0,24321
275	0,29	1,61	0,24321
280	0,29	1,63	0,24321
285	0,30	1,66	0,24321
290	0,30	1,69	0,24321
295	0,31	1,71	0,24321
300	0,31	1,74	0,24321

2. Tabela de valores recolhidos pelo COMSOL para o diafragma de polissilício:

Pressão (kPa)	Deslocamento médio (μm)	Deslocamento Máximo (μm)	Capacitância (pF)
0	0,00	0,00	0,24320
5	0,01	0,03	0,24320
10	0,01	0,06	0,24320
15	0,02	0,09	0,24320
20	0,02	0,12	0,24320
25	0,03	0,15	0,24320
30	0,03	0,18	0,24320
35	0,04	0,21	0,24320
40	0,04	0,25	0,24320
45	0,05	0,28	0,24320
50	0,05	0,31	0,24320
55	0,06	0,34	0,24320
60	0,07	0,37	0,24320
65	0,07	0,40	0,24320
70	0,08	0,43	0,24320
75	0,08	0,46	0,24320
80	0,09	0,49	0,24320
85	0,09	0,52	0,24320
90	0,10	0,55	0,24320
95	0,10	0,58	0,24320
100	0,11	0,61	0,24320
105	0,11	0,64	0,24320
110	0,12	0,67	0,24320
115	0,12	0,70	0,24320
120	0,13	0,73	0,24320
125	0,14	0,76	0,24320
130	0,14	0,79	0,24320
135	0,15	0,82	0,24320
140	0,15	0,85	0,24320
145	0,16	0,88	0,24320
150	0,16	0,91	0,24320
155	0,17	0,94	0,24320
160	0,17	0,97	0,24320
165	0,18	1,00	0,24320
170	0,18	1,03	0,24320
175	0,19	1,06	0,24320
180	0,19	1,09	0,24320
185	0,20	1,12	0,24320
190	0,20	1,15	0,24320
195	0,21	1,18	0,24320
200	0,21	1,21	0,24320
205	0,22	1,24	0,24320
210	0,23	1,26	0,24320
215	0,23	1,29	0,24320
220	0,24	1,32	0,24320
225	0,24	1,35	0,24320
230	0,25	1,38	0,24320
235	0,25	1,41	0,24320
240	0,26	1,43	0,24320
245	0,26	1,46	0,24320
250	0,27	1,49	0,24320
255	0,27	1,52	0,24320
260	0,28	1,55	0,24320
265	0,28	1,57	0,24320
270	0,29	1,60	0,24320
275	0,29	1,63	0,24320
280	0,30	1,66	0,24320
285	0,30	1,68	0,24320
290	0,31	1,71	0,24320
295	0,31	1,74	0,24320
300	0,32	1,76	0,24320

3. Tabela de valores recolhidos pelo COMSOL para a mudança da espessura do diafragma para $h = 10 \mu m$:

Pressão (kPa)	Deslocamento médio (μm)	Deslocamento Máximo (μm)	Capacitância (pF)
0	0,00	0,00	0,25431
5	0,00	0,00	0,25431
10	0,00	0,01	0,25431
15	0,00	0,01	0,25431
20	0,00	0,02	0,25431
25	0,00	0,02	0,25431
30	0,00	0,02	0,25431
35	0,01	0,03	0,25431
40	0,01	0,03	0,25431
45	0,01	0,04	0,25431
50	0,01	0,04	0,25431
55	0,01	0,04	0,25431
60	0,01	0,05	0,25431
65	0,01	0,05	0,25431
70	0,01	0,06	0,25431
75	0,01	0,06	0,25431
80	0,01	0,06	0,25431
85	0,01	0,07	0,25431
90	0,01	0,07	0,25431
95	0,01	0,08	0,25431
100	0,01	0,08	0,25431
105	0,02	0,08	0,25431
110	0,02	0,09	0,25431
115	0,02	0,09	0,25431
120	0,02	0,10	0,25431
125	0,02	0,10	0,25431
130	0,02	0,10	0,25431
135	0,02	0,11	0,25431
140	0,02	0,11	0,25431
145	0,02	0,12	0,25431
150	0,02	0,12	0,25431
155	0,02	0,13	0,25431
160	0,02	0,13	0,25431
165	0,02	0,13	0,25431
170	0,02	0,14	0,25431
175	0,03	0,14	0,25431
180	0,03	0,15	0,25431
185	0,03	0,15	0,25431
190	0,03	0,15	0,25431
195	0,03	0,16	0,25431
200	0,03	0,16	0,25431
205	0,03	0,17	0,25431
210	0,03	0,17	0,25431
215	0,03	0,17	0,25431
220	0,03	0,18	0,25431
225	0,03	0,18	0,25431
230	0,03	0,19	0,25431
235	0,03	0,19	0,25431
240	0,04	0,19	0,25431
245	0,04	0,20	0,25431
250	0,04	0,20	0,25431
255	0,04	0,21	0,25431
260	0,04	0,21	0,25431
265	0,04	0,21	0,25431
270	0,04	0,22	0,25431
275	0,04	0,22	0,25431
280	0,04	0,23	0,25431
285	0,04	0,23	0,25431
290	0,04	0,23	0,25431
295	0,04	0,24	0,25431
300	0,04	0,24	0,25431

4. Tabela de valores recolhidos pelo COMSOL para a mudança da espessura do diafragma para $h = 2,5 \mu m$:

Pressão (kPa)	Deslocamento médio (μm)	Deslocamento Máximo (μm)	Capacitância (pF)
0	0,00	0,00	0,23892
5	0,04	0,24	0,23892
10	0,08	0,47	0,23892
15	0,12	0,69	0,23892
20	0,16	0,91	0,23892
25	0,19	1,10	0,23892
30	0,23	1,29	0,23892
35	0,26	1,46	0,23892
40	0,29	1,60	0,23892
45	0,32	1,75	0,23892
50	0,34	1,89	0,23892
55	0,37	2,00	0,23892
60	0,39	2,13	0,23892
65	0,41	2,24	0,23892
70	0,43	2,34	0,23892
75	0,46	2,45	0,23892
80	0,48	2,55	0,23892
85	0,49	2,63	0,23892
90	0,51	2,72	0,23892
95	0,53	2,81	0,23892
100	0,55	2,88	0,23892
105	0,57	2,96	0,23892
110	0,58	3,04	0,23892
115	0,60	3,11	0,23892
120	0,61	3,18	0,23892
125	0,63	3,25	0,23892
130	0,64	3,31	0,23892
135	0,66	3,38	0,23892
140	0,67	3,44	0,23892
145	0,68	3,50	0,23892
150	0,70	3,56	0,23892
155	0,71	3,62	0,23892
160	0,72	3,67	0,23892
165	0,74	3,72	0,23892
170	0,75	3,78	0,23892
175	0,76	3,83	0,23892
180	0,77	3,88	0,23892
185	0,78	3,93	0,23892
190	0,80	3,98	0,23892
195	0,81	4,03	0,23892
200	0,82	4,07	0,23892
205	0,83	4,12	0,23892
210	0,84	4,16	0,23892
215	0,85	4,21	0,23892
220	0,86	4,25	0,23892
225	0,87	4,29	0,23892
230	0,88	4,34	0,23892
235	0,89	4,38	0,23892
240	0,90	4,42	0,23892
245	0,91	4,46	0,23892
250	0,92	4,50	0,23892
255	0,93	4,53	0,23892
260	0,94	4,57	0,23892
265	0,95	4,61	0,23892
270	0,96	4,65	0,23892
275	0,97	4,68	0,23892
280	0,97	4,72	0,23892
285	0,98	4,75	0,23892
290	0,99	4,79	0,23892
295	1,00	4,82	0,23892
300	1,01	4,86	0,23892

5. Tabela de valores recolhidos pelo COMSOL para a mudança da espessura da cavidade para $d = 5 \mu m$:

Pressão (kPa)	Deslocamento médio (μm)	Deslocamento Máximo (μm)	Capacitância (pF)
0	0,00	0,00	0,36070
5	0,01	0,03	0,36070
10	0,01	0,06	0,36070
15	0,02	0,09	0,36070
20	0,02	0,12	0,36070
25	0,03	0,15	0,36070
30	0,03	0,18	0,36070
35	0,04	0,22	0,36070
40	0,04	0,25	0,36070
45	0,05	0,28	0,36070
50	0,05	0,31	0,36070
55	0,06	0,34	0,36070
60	0,07	0,37	0,36070
65	0,07	0,40	0,36070
70	0,08	0,43	0,36070
75	0,08	0,46	0,36070
80	0,09	0,49	0,36070
85	0,09	0,52	0,36070
90	0,10	0,55	0,36070
95	0,10	0,58	0,36070
100	0,11	0,61	0,36070
105	0,11	0,64	0,36070
110	0,12	0,67	0,36070
115	0,12	0,70	0,36070
120	0,13	0,73	0,36070
125	0,14	0,76	0,36070
130	0,14	0,79	0,36070
135	0,15	0,82	0,36070
140	0,15	0,85	0,36070
145	0,16	0,88	0,36070
150	0,16	0,91	0,36070
155	0,17	0,94	0,36070
160	0,17	0,97	0,36070
165	0,18	1,00	0,36070
170	0,18	1,03	0,36070
175	0,19	1,06	0,36070
180	0,19	1,09	0,36070
185	0,20	1,12	0,36070
190	0,20	1,15	0,36070
195	0,21	1,18	0,36070
200	0,21	1,21	0,36070
205	0,22	1,24	0,36070
210	0,23	1,27	0,36070
215	0,23	1,29	0,36070
220	0,24	1,32	0,36070
225	0,24	1,35	0,36070
230	0,25	1,38	0,36070
235	0,25	1,41	0,36070
240	0,26	1,44	0,36070
245	0,26	1,46	0,36070
250	0,27	1,49	0,36070
255	0,27	1,52	0,36070
260	0,28	1,55	0,36070
265	0,28	1,57	0,36070
270	0,29	1,60	0,36070
275	0,29	1,63	0,36070
280	0,30	1,66	0,36070
285	0,30	1,68	0,36070
290	0,31	1,71	0,36070
295	0,31	1,74	0,36070
300	0,32	1,76	0,36070

6. Tabela de valores recolhidos pelo COMSOL para a mudança da espessura da cavidade para $d = 20 \mu m$:

Pressão (kPa)	Deslocamento médio (μm)	Deslocamento Máximo (μm)	Capacitância (pF)
0	0,00	0,00	0,16512
5	0,01	0,03	0,16512
10	0,01	0,06	0,16512
15	0,02	0,09	0,16512
20	0,02	0,12	0,16512
25	0,03	0,15	0,16512
30	0,03	0,18	0,16512
35	0,04	0,21	0,16512
40	0,04	0,25	0,16512
45	0,05	0,28	0,16512
50	0,05	0,31	0,16512
55	0,06	0,34	0,16512
60	0,07	0,37	0,16512
65	0,07	0,40	0,16512
70	0,08	0,43	0,16512
75	0,08	0,46	0,16512
80	0,09	0,49	0,16512
85	0,09	0,52	0,16512
90	0,10	0,55	0,16512
95	0,10	0,58	0,16512
100	0,11	0,61	0,16512
105	0,11	0,64	0,16512
110	0,12	0,67	0,16512
115	0,12	0,70	0,16512
120	0,13	0,73	0,16512
125	0,14	0,76	0,16512
130	0,14	0,79	0,16512
135	0,15	0,82	0,16512
140	0,15	0,85	0,16512
145	0,16	0,88	0,16512
150	0,16	0,91	0,16512
155	0,17	0,94	0,16512
160	0,17	0,97	0,16512
165	0,18	1,00	0,16512
170	0,18	1,03	0,16512
175	0,19	1,06	0,16512
180	0,19	1,09	0,16512
185	0,20	1,12	0,16512
190	0,20	1,15	0,16512
195	0,21	1,18	0,16512
200	0,21	1,21	0,16512
205	0,22	1,24	0,16512
210	0,23	1,26	0,16512
215	0,23	1,29	0,16512
220	0,24	1,32	0,16512
225	0,24	1,35	0,16512
230	0,25	1,38	0,16512
235	0,25	1,41	0,16512
240	0,26	1,44	0,16512
245	0,26	1,46	0,16512
250	0,27	1,49	0,16512
255	0,27	1,52	0,16512
260	0,28	1,55	0,16512
265	0,28	1,57	0,16512
270	0,29	1,60	0,16512
275	0,29	1,63	0,16512
280	0,30	1,66	0,16512
285	0,30	1,68	0,16512
290	0,31	1,71	0,16512
295	0,31	1,74	0,16512
300	0,32	1,76	0,16512