

ALEX FUKUNAGA GOMES

**CALIBRAÇÃO E COMPENSAÇÃO DE SENSORES DE PRESSÃO  
PIEZORRESISTIVOS**

Dissertação apresentada à Escola  
Politécnica da Universidade de São  
Paulo para a Obtenção do Título de  
Mestre em Engenharia.

São Paulo  
2009

ALEX FUKUNAGA GOMES

**CALIBRAÇÃO E COMPENSAÇÃO DE SENSORES DE PRESSÃO  
PIEZORRESISTIVOS**

Dissertação apresentada à Escola  
Politécnica da Universidade de  
São Paulo para a Obtenção do  
Título de Mestre em Engenharia.

Área de Concentração:  
Microeletrônica

Orientador:  
Prof. Dr. Edgar Charry Rodríguez

São Paulo  
2009

**Este exemplar foi revisado e alterado em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor com anuência de seu orientador.**

**São Paulo, .... de ..... de 200...**

**Assinatura do autor**

**Assinatura do orientador**

## **FICHA CATALOGRÁFICA**

**Gomes, Alex Fukunaga**

**Calibração e compensação de sensores de pressão piezorresistivos / A.F. Gomes. --ed. rev.-- São Paulo, 2009.**

**109 p.**

**Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Sistemas Eletrônicos.**

**1. Microeletrônica 2. Dispositivos eletrônicos 3. Sensor I. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Sistemas Eletrônicos II. t.**

## AGRADECIMENTO

Como em qualquer trabalho não pode ser realizado sozinho, este não é diferente, por isso gostaria de mostrar os meus sinceros agradecimentos:

- Ao Professor Doutor Edgar Charry que orientou, ajudou e compreendeu, com muita paciência, todas as fases deste trabalho;
- Ao Sidney pela “Luz” em diversos momentos de discussão, principalmente na fila do bandeirão;
- Ao Laboratório de Sistemas Integráveis da EPUSP pela infra-estrutura cedida;
- À CAPES concessão da bolsa de mestrado e pelo apoio financeiro para a realização desta pesquisa;
- Ao Jaime e a Carla pelo incentivo para o término do trabalho;
- A Marcia por ser meu alicerce e por todo o respaldo me dado;
- E a todos que direta ou indiretamente me ajudaram;

“亀はめ波!!!!...”

孫悟空

*“Nada pode ser obtido sem uma espécie de sacrifício.  
É preciso oferecer algo de valor equivalente...”*

***Alphonse Elric.***

## RESUMO

Este trabalho apresenta a compensação e calibração de sensores de pressão piezoresistivos com a utilização de resistores de alta precisão. Para que tal objetivo fosse cumprido, foi necessária a caracterização do sensor com relação aos parâmetros térmicos e elétricos. Além disso, foi definida uma metodologia com a qual se obteve os tempos necessários para aquisição dos dados com relação ao valor de precisão requisitada. Os resultados mostram que os valores dos resistores são dependentes da alimentação fornecida ao sensor e que a variação da tensão de saída, com relação a uma média, tem caráter parabólico. A curva do tempo de estabilização para aquisição de dados tem formato assintótico. Com a compensação e calibração tivemos uma diminuição na tensão de *offset* de cerca de 97% e compensação térmica com cerca de 70% para a tensão de fundo de escala, porém com isso foi reduzido 8% no valor da sensibilidade.

## ABSTRACT

This work presents the compensation and calibration of piezoresistive pressure sensors with the use of precision resistors. For this objective to be met was necessary to characterize the sensor with respect to thermal and electrical parameters. Also it was defined a methodology with which they obtained the time required for data acquisition based on the value of precision required. The results show that the values of resistors are dependent on power supplied to the sensor and the variation of the output voltage with respect to an average has a parabolic feature. The curve of the settling time for data acquisition format is asymptotic. With the compensation and calibration, a decrease in the *offset* voltage of about 97% was observed and temperature was compensated with 70% for full scale, however, the sensitivity was reduced in 8%.

## Lista de símbolos

Símbolo	Definição	Unidade
<i>MEMS</i>	<i>Micro Electric Mechanical System</i>	-
<i>MOEMS</i>	<i>Micro Optic Electric Mechanical System</i>	-
<i>MMR</i>	<i>Memory-Mapped Register</i>	-
<i>bioMEMS</i>	<i>Biological MEMS</i>	-
V <sub>out</sub>	Tensão de saída	[V]
V <sub>in</sub>	Tensão de entrada	[V]
R <sub>1</sub>	Piezoresistor 1	[Ω]
R <sub>2</sub>	Piezoresistor 2	[Ω]
R <sub>3</sub>	Piezoresistor 3	[Ω]
R <sub>4</sub>	Piezoresistor 4	[Ω]
R	Representação genérica de um piezoresistor	[Ω]
ΔR	Variação da resistência	[Ω]
V <sub>a</sub>	Tensão sobre o braço esquerdo da ponte de <i>Wheatstone</i>	[V]
V <sub>b</sub>	Tensão sobre o braço direito da ponte de <i>Wheatstone</i>	[V]
ρ	Resistividade	[m . Ω]
l	Comprimento de um piezoresistor	[m]
w	Largura de um piezoresistor	[m]
t	Espessura de um piezoresistor	[m]
Δρ	Variação da resistividade	[m . Ω]
Δl	Variação do Comprimento de um piezoresistor	[m]
Δw	Variação da Largura de um piezoresistor	[m]
Δt	Variação da Espessura de um piezoresistor	[m]
π <sub>l</sub>	Coefficiente piezoresistivo longitudinal	[m <sup>2</sup> /N]
π <sub>t</sub>	Coefficiente piezoresistivo transversal	[m <sup>2</sup> /N]
π <sub>44</sub>	Coefficiente piezoresistivo de cisalhamento	[m <sup>2</sup> /N]
σ <sub>l</sub>	Tensão mecânica longitudinal	[N/m <sup>2</sup> ]
σ <sub>t</sub>	Tensão mecânica transversal	[N/m <sup>2</sup> ]
a	Lado da membrana	[m]
h	Espessura da membrana	[m]
P	Pressão	bar
C'	Coefficiente numérico da diferença entre tensões mecânicas	[N/m <sup>2</sup> ]
ε	Coefficiente de Poisson	
V <sub>off</sub>	Tensão de <i>offset</i>	[V]
TCO	Coefficiente térmico de <i>offset</i>	%FSO
β	Diferença entre os piezoresistores	[Ω]
T	Temperatura	[°C]
S	Sensibilidade	[mV/bar]
σ <sub>rl</sub>	Tensão mecânica residual longitudinal	[N/m <sup>2</sup> ]

<b>Símbolo</b>	<b>Definição</b>	<b>Unidade</b>
$\sigma_t$	Tensão mecânica residual transversal	[N/m <sup>2</sup> ]
TCS	Coefficiente térmico da sensibilidade	[ppm/°C]
TCS <sub>v</sub>	Coefficiente térmico da sensibilidade com alimentação por tensão	[ppm/°C]
TCS <sub>i</sub>	Coefficiente térmico da sensibilidade com alimentação por corrente	[ppm/°C]
R <sub>b</sub>	Resistência da ponte	[Ω]
TCR	Coefficiente térmico da resistência da ponte	[%FSO]
FSO	<i>Full Scale Output</i> (tensão de saída do fundo de escala)	[V]
R <sub>out</sub>	Resistência de saída	[Ω]
VR <sub>1</sub>	Tensão sobre o piezoresistor R1	[V]
VR <sub>2</sub>	Tensão sobre o piezoresistor R2	[V]
VR <sub>3</sub>	Tensão sobre o piezoresistor R3	[V]
VR <sub>4</sub>	Tensão sobre o piezoresistor R4	[V]
<i>Span</i>	Variação da tensão de saída	[V]
R'	Resistor ideal utilizado na modelagem	[Ω]
V <sub>0c</sub>	Tensão de <i>offset</i> com baixa temperatura	[V]
V <sub>b<sub>c</sub></sub>	Tensão na ponte com baixa temperatura	[V]
V <sub>0h</sub>	Tensão de <i>offset</i> com alta temperatura	[V]
V <sub>b<sub>h</sub></sub>	Tensão na ponte com alta temperatura	[V]
R <sub>0</sub>	Resistência de calibração da tensão de <i>offset</i>	[Ω]
R <sub>0</sub> '	Resistência de calibração da tensão de <i>offset</i>	[Ω]
R <sub>TCO</sub>	Resistência de compensação da tensão de <i>offset</i>	[Ω]
R <sub>TCO</sub> '	Resistência de compensação da tensão de <i>offset</i>	[Ω]
R <sub>c</sub>	Resistência da ponte a baixa temperatura	[Ω]
R <sub>h</sub>	Resistência da ponte a alta temperatura	[Ω]
<i>span<sub>c</sub></i>	<i>Span</i> a baixa temperatura	[V]
<i>span<sub>h</sub></i>	<i>Span</i> a alta temperatura	[V]
T <sub>c</sub>	Temperatura baixa a que se quer compensar	[°C]
T <sub>h</sub>	Temperatura alta a que se quer compensar	[°C]
R <sub>i</sub>	Resistência a temperatura de referência	[Ω]
T <sub>i</sub>	Temperatura de referência	[°C]
<i>Span<sub>i</sub></i>	<i>Span</i> com temperatura de referência	[V]
R <sub>0i</sub>	Resistência da ponte sem compensação	[Ω]
R <sub>s</sub>	Resistência de compensação do <i>span</i>	[Ω]
$\gamma$	Coefficiente térmico do coeficiente piezoresistivo	
C	Coefficiente numérico das dimensões do sensor	-
THV <sub>offset</sub>	Histerese térmica da tensão de <i>offset</i>	[V]
MQ	Coefficiente angular médio das curvas experimentais	[mV/bar]

## Lista de tabelas

Tabela 1: Especificações do controlador DRUCK515.....	58
Tabela 2: especificações da câmara climática VT 4004. ....	59
Tabela 3: tempo médio de estabilização. ....	68
Tabela 5: calculo dos resistores de calibração e compensação .....	72
Tabela 4: comparação dos sensores com e sem compensação e calibração .....	95
Tabela 6: caracterização do sensor 1.....	95
Tabela 7: caracterização do sensor 2.....	96
Tabela 8: caracterização do sensor 3.....	96
Tabela 9: parâmetros do transdutor 1.....	97
Tabela 10 parâmetros do transdutor 2.....	98
Tabela 11: parâmetros do transdutor 3.....	99
Tabela 12: equações características dos transdutores de pressão.....	99

## Lista de figuras

Figura 1: Representação dos resistores sobre uma membrana .....	21
Figura 2: Configuração da ponte completa de <i>Wheatstone</i> .....	22
Figura 3: dependência dos valores das piezoresistências com a temperatura e com a concentração de impurezas tipo-p <sup>39</sup> .....	27
Figura 4: Representação do sensor de pressão com o desenho esquemático dos resistores em uma ponte de <i>Wheatstone</i> semi-aberta. ....	38
Figura 5: esquema elétrico e simulação térmica de um sensor com P=0 bar.....	42
Figura 6: esquema elétrico e simulação térmica um sensor com a utilização de resistor de calibração do <i>Offset</i> .....	43
Figura 7: esquema elétrico utilizado e simulação térmica um sensor com resistor de calibração e compensação térmica da tensão do <i>offset</i> .....	45
Figura 8: representação do sensor de pressão com a aplicação de todas as possibilidades para a calibração e compensação .....	47
Figura 9: Modelagem de um sensor piezorresistivo .....	53
Figura 10: esquema elétrico para a simulação do sensor de pressão com a inclusão dos resistores de calibração e compensação .....	55
Figura 11: desenho do invólucro do sensor.....	56
Figura 12: Controlador/Calibrador de Pressão.....	57
Figura 13: foto da câmara climática VT4004 .....	58
Figura 14: fonte de corrente e multímetro.....	60
Figura 15: Comportamento térmico do sensor 2 à 25C. ....	64
Figura 16:Comportamento térmico do sensor2 à 50°C.....	64
Figura 17: Estabilização elétrica do sensor3 a 50°C com 4mA de alimentação.....	65
Figura 18: Estabilização elétrica do sensor3 a 80°C com 4mA de alimentação.....	66
Figura 19: Estabilização elétrica do sensor2 a 25°C com 4mA de alimentação.....	66
Figura 20: Estabilização elétrica do sensor2 a 25°C com 1mA de alimentação.....	67
Figura 21: Variação da resistência da ponte com a temperatura. Medida ôhmica.....	69

Figura 22: Variação da resistência da ponte com a temperatura. Medida com 4mA.....	70
Figura 23: Variação da resistência da ponte com a temperatura. Medida com 235 $\mu$ A .....	70
Figura 24: simulação da piezorresistência longitudinal para três temperaturas.....	74
Figura 25: simulação da piezorresistência transversal para três temperaturas.....	75
Figura 26: simulação para o sensor 1 .....	76
Figura 27: simulação para o sensor 2.....	77
Figura 28: simulação para o sensor 3.....	77
Figura 29: simulação compensada e calibrada para o sensor 1 .....	79
Figura 30: simulação compensada e calibrada para o sensor 2 .....	79
Figura 31: simulação compensada e calibrada para o sensor 3 .....	80
Figura 32: comportamento experimental de uma piezoresistência transversal.....	81
Figura 33: comportamento experimental de uma piezoresistência longitudinal.....	82
Figura 34: resultado experimentais para o sensor 1 .....	84
Figura 35: resultado experimentais para o sensor 2 .....	85
Figura 36: resultado experimentais para o sensor 3 .....	85
Figura 37: erro referente a cada pressão aplicado para o sensor 1 sem compensação e calibração .....	87
Figura 38: erro referente a cada pressão aplicado para o sensor 2 sem compensação e calibração .....	87
Figura 39: erro referente a cada pressão aplicado para o sensor 3 sem compensação e calibração .....	88
Figura 40: resultados experimentais para o sensor 1 compensado e calibrado.....	90
Figura 41: resultados experimentais para o sensor 2 compensado e calibrado.....	90
Figura 42: resultados experimentais para o sensor 3 compensado e calibrado.....	91
Figura 43: erro referente a cada pressão aplicada para o sensor 1 com compensação e calibração .....	92
Figura 44: erro referente a cada pressão aplicada para o sensor 2 com compensação e calibração .....	93
Figura 45: erro referente a cada pressão aplicada para o sensor 3 com compensação e calibração .....	94

# Sumário

AGRADECIMENTO.....	3
RESUMO.....	4
ABSTRACT.....	5
Lista de símbolo.....	6
Lista de tabela.....	8
Lista de Figuras.....	9
Sumário.....	11
1 Introdução.....	13
1.1 Objetivo.....	15
1.2 Justificativa.....	16
2 Revisão bibliográfica.....	19
2.1 Sensores de pressão piezoresistivos.....	19
2.1.1 Dependência com a temperatura e com a dopagem.....	27
2.2 Parâmetros dos sensores de pressão piezoresistivo.....	28
2.2.1 Tensão de <i>offset</i> ( $V_{offset}$ ) e coeficiente de temperatura do <i>offset</i> (TCO).....	28
2.2.2 Sensibilidade e o coeficiente de temperatura da sensibilidade (TCS).....	30
2.2.2.1 Compensação da sensibilidade pela alimentação.....	32
2.2.3 Linearidade e histerese.....	34
3 Parte experimental.....	35
3.1 Procedimento Experimental.....	35
3.2 Metodologia de caracterização.....	37
3.2.1 Metodologia para estabilização.....	37
3.2.2 Metodologia para caracterização com aplicação de pressão.....	40
3.3 Metodologia para calibração e compensação do sensor.....	41
3.3.1 Calibração e Compensação da tensão de <i>offset</i> .....	42
3.3.2 Compensação da temperatura no <i>Span</i> .....	47
3.3.3 Cálculo do resistor de compensação do <i>span</i> , $R_s$ .....	48
3.4 Modelagem do sensor.....	51

3.5	Equipamentos e configurações .....	56
3.5.1	DRUCK 515.....	57
3.5.2	Câmara Climática.....	58
3.5.3	Fonte de Alimentação e Multímetro <sup>66</sup> .....	59
3.6	Parâmetros a serem obtidos .....	60
3.6.1	Tensão de <i>offset</i> e TCO.....	61
3.6.2	Sensibilidade e TCS .....	61
3.6.3	Histerese Térmica ( $THV_{offset}$ ).....	62
3.6.4	Resistência e TCR.....	62
4	Resultados e discussões .....	63
4.1	Estabilização dos sensores.....	63
4.2	Variação das resistências com a temperatura .....	69
4.3	Resistores de calibração e compensação .....	71
4.4	Resultados das Simulações.....	73
4.4.1	Simulação das piezoresistências .....	73
4.4.2	Simulações dos sensores de pressão .....	75
4.4.2.1	Simulação dos sensores de pressão.....	75
4.4.2.2	Simulação dos sensores de pressão com compensação e calibração .....	78
4.5	Resultados Experimentais .....	80
4.5.1	Piezoresistências .....	81
4.5.2	Sensores de Pressão.....	83
4.5.2.1	Sensores sem compensação .....	83
4.5.2.2	Erro absoluto da pressão sem compensação .....	86
4.5.2.3	Sensores com compensação e calibração.....	89
4.5.2.4	Erro absoluto da pressão com compensação.....	91
4.5.3	Comparação dos resultados com e sem compensação e calibração.....	94
4.6	Caracterização e Parâmetros dos sensores .....	95
4.7	Análise dos resultados .....	100
5	Conclusão.....	103
	Perspectivas futuras.....	104
	Referência .....	105

# 1 Introdução

*Micro Electro Mechanical System (MEMS)* é um termo que surgiu em meados de 1989. Este é um campo de pesquisa onde elementos mecânicos, como *cantilever* e membranas são produzidas em grande escala. Estes dispositivos compartilham das características de dimensões entorno de 100 micrômetros que não são fabricados utilizando técnicas de manufatura de máquina, mas sim técnicas de micro-fabricação, que vêm das técnicas utilizadas para a microeletrônica. Mesmo utilizando as mesmas técnicas, o processo em si é muito diferente; enquanto a microeletrônica utiliza elementos compactos e sólidos, os micro-dispositivos utilizam alavancas, membranas, buracos, canais, “braços”, etc. Além disso, tecnologias *MEMS* podem ser agregadas com outros materiais a fim de se obter novas características para micro-atuadores e micro-sensores.

Através das vantagens oferecidas pela tecnologia *MEMS*, ela pode ser empregada, de acordo com o uso, em três classes diferentes:

1. Miniaturização de dispositivo conhecidos;
2. Desenvolvimentos de novos dispositivos baseados em tecnologias que não se possa trabalhar em grandes dimensões;
3. Desenvolvimentos de novas ferramentas para interagir com o micro-mundo.

Estudos feitos <sup>1</sup> mostram que o valor do mercado de *MEMS* gira em torno de um capital de aproximadamente 12 bilhões de dólares, se tem ainda uma perspectiva de crescimento maior ao decorrer dos anos. Existem diversas aplicações de *MEMS*, tanto na área aeroespacial e indústria automobilística, quanto na área biomédica, ótica e leitura de memória de massa; dependendo do tipo a ser utilizado, a sigla recebe complementos, como *MOEMS* para ótica, *MMR* para leitores de memória e *bioMEMS* para área biomédica.

Dentre os diversos tipos de aplicações, os sensores de pressão consomem uma fatia considerável do mercado de micro-máquinas, chegando a um valor de aproximadamente 25% do total <sup>1</sup>. Os sensores mais utilizados são aqueles que conseguem medir a pressão e pesos, portanto, a área de sensores de silício de pressão é uma área muito promissora com relação às indústrias automobilísticas, para a medição de variáveis mecânicas. Podemos categorizar os sensores de acordo com sua aplicabilidade, isto é, de com suas características sensoriais com o meio a ser utilizado.

Sensores de pressão têm amplo uso na indústria e na biomedicina, sendo umas das primeiras aplicações comerciais de *MEMS*. Dentre estes sensores aqueles que utilizam semicondutores como elemento sensível, principalmente o silício, são normalmente utilizados por terem vantagem de já ser utilizado como matéria prima para circuitos integrados, contendo propriedades físicas excelentes, apresentam desenvolvimento crescentes nos últimos anos.

Uma grande vantagem destes sensores é a aplicabilidade da tecnologia de circuitos integrados para a fabricação precisa de tais dispositivos, como por exemplo, a difusão seletiva, implantação iônica, litografia, crescimento epitaxial, deposição de filmes finos combinados com técnicas de corrosão anisotrópica. <sup>2,3</sup> Esta última é normalmente utilizada

para a fabricação de membranas finas as quais recebem uma tensão mecânica, podendo agir como elemento sensível.

Alguns dos critérios para determinar se a qualidade de uma membrana é boa baseia-se na uniformidade de sua composição, estrutura e espessura. <sup>4</sup> As técnicas empregadas para obter tais membranas devem prover composição e estrutura constante.

Em cada uma das técnicas obtém-se baixo custo, produção repetitiva e em tempos relativamente pequenos. Além disso, existe um aumento na projeção da fabricação de micro-sensores de silício, devido principalmente à interface com processos computacionais e de sistema de segurança automotivo.

A busca por materiais e tecnologias para o desenvolvimento de sensores <sup>5</sup> a serem aplicados em tecnologias industriais, melhoramentos de produtos e qualidade de vidas, tanto no campo da saúde <sup>6</sup> como para o meio ambiente, são uma das principais linhas de pesquisas na atualidade.

## **1.1 Objetivo**

Este trabalho tem como objetivo a calibração e compensação de sensores de pressão piezorresistivos, utilizando resistores de alta precisão, pela facilidade de implementação, aceitação do mercado e baixo custo. Para que este objetivo seja cumprido, foi feito um estudo sobre os principais aspectos destes sensores, como o efeito piezorresistivo, coeficientes transversais e longitudinais e os principais efeitos conseqüentes da temperatura.

## **1.2 Justificativa**

Sensores de pressão piezoresistivos apresentam variações nos valores de suas resistências e possuem coeficientes térmicos diferentes, do mesmo modo, problemas de expansão térmica dos materiais utilizados na montagem e no encapsulamento do sensor influenciam na tensão de saída e é um dos problemas mais frequentes na utilização de tais dispositivos.

Com o objetivo de se caracterizar os sensores, são estipulados parâmetros para determinar sua qualidade com relação à sensibilidade, processo de fabricação e montagem.

Existe um grande interesse que as características do sensor estejam dentro de padrões industriais para que possam ser utilizados em sistemas de controle e automatização. Além disso, existe também o interesse de que estes sejam pequenos, confiáveis, de baixo custo e com alta reprodutibilidade para a produção em massa.

A maioria dos sensores necessita de condicionamento de sinal, para eliminar características fora do padrão, este caso também é presente para os sensores de pressão piezoresistivo.

Deste modo, sensores de pressão precisam de calibração e compensação, por serem dependentes com a temperatura. Métodos de calibração e compensação são muito estudados e pesquisados.<sup>7</sup> Algumas técnicas de calibração e compensação foram estudadas ao longo dos anos, elas são classificadas de acordo com a tecnologia envolvida.

Uma técnica de calibração empregada na indústria é a que utiliza um laser de alta potência para a remoção de materiais de um resistor, alterando o valor da resistência.<sup>8 e 9</sup> A intenção de modificar a resistência é igualar os quatro resistores utilizados na ponte. O valor de calibração é obtido através da medida dos valores de cada resistor a fim de se determinar quais deles necessitam ser reajustados.<sup>10</sup>

A técnica de compensação estrutural é a utilização de outros dispositivos para a compensação térmica do sensor, podendo ser através componentes eletrônicos integrados ou através de estruturas sensíveis a qualquer tipo de estímulo que venha a comparar ou complementar o efeito da temperatura. Desta forma, as pesquisas se diferenciaram em vários segmentos de estrutura. Um dos mais propostos em pesquisa é a utilização de elementos sensíveis a temperatura.<sup>11-16</sup> De maneira geral, estes métodos utilizam características de outros dispositivos, podendo ser de outros materiais ou do material do próprio substrato, como *cantilever* ou ressonador, para a compensação.

Além destes, ainda existem métodos que utilizam resistores, difundidos,<sup>17-19</sup> implantados<sup>20-22</sup> ou discretos,<sup>23 e 24</sup> para a compensação; as aplicações se diferenciam com a compensação pelo próprio valor resistor ou com a utilização de resistores como modo de comparação. A utilização de resistores é amplamente utilizada para a calibração e compensação de sensores de pressão, pois mesmo conseguindo baixa precisão nos ajuste, com relação ao nível industrial, esse valor é aceitável pelo baixo custo e facilidade de implementação.

Temos dentro da compensação com estrutura a utilização de outras tecnologias de fabricação da microeletrônica, por exemplo, a utilização da tecnologia SOI.<sup>21 e 25</sup>

Temos ainda a técnica de compensação e calibração matemática <sup>7</sup> que utiliza como meio de compensação a mistura de modelos matemáticos, através de microprocessadores, e de tabelas de busca, como calibração gravadas em memórias de leitura. A resposta correta vem da computação das medidas realizadas, com os coeficientes de computação. <sup>26-28</sup>

## 2 Revisão bibliográfica

Neste capítulo será apresentado o embasamento teórico para o entendimento do sensor de pressão piezoresistivo, do efeito da temperatura e da compensação e calibração do mesmo. São apresentados também os principais parâmetros destes sensores, que são fundamentais para o cálculo dos resistores de compensação térmica e de calibração.

### **2.1 Sensores de pressão piezoresistivos**

Sensor pode ser definido como um dispositivo que libera na saída um sinal elétrico como resposta a algum tipo de estímulo de outra natureza<sup>29</sup>. Quando um sensor é integrado com um circuito de processamento de sinal, então este recebe o nome de sensor integrado. Um transdutor pode ser separado, do ponto de vista operativo, como primário e secundário. O primário entra em contato com a grandeza física (propriamente o sensor), enquanto o secundário recebe a grandeza física do primário da transferência do primário e o transforma em um sinal elétrico

Sensores de pressão foram um dos primeiros dispositivos a utilizar a tecnologia de Sistemas Micro-eletromecânicos (*MEMS*) para a produção em grandes quantidades<sup>30</sup>. Os primeiros protótipos de sensores de pressão utilizaram como

matéria prima o silício, já que este possui boas propriedades mecânicas <sup>31</sup>, combinadas com a tecnologia bem conhecida de circuitos integrados.

A utilização do silício como substrato na fabricação de sensores de pressão vem do fato das qualidades do silício, tanto para a micro-usinagem quanto para a utilização com processos de microeletrônica, assim as qualidades podem ser enumeradas como:

- Fator de ganho do semicondutor com relação a metais em dezenas de vezes maior, ou seja, a variação da resistência com a aplicação da pressão é maior para o silício do que para os metais;
- Utilização da membrana e dos componentes em um só material diminuindo o efeito de *stress*;
- Técnica de miniaturização dos sensores, o que relativamente diminui o custo;
- Circuitaria eletrônica integrada conhecida para a compensação e calibração ou amplificação;
- Muitos efeitos de transdução associados ao silício;

De maneira geral, o processo de fabricação de sensores <sup>1, 32</sup> que utilizam *MEMS* como tecnologia tenta ser reprodutiva e com repetibilidade. <sup>33</sup> Comumente a seqüência de processo utiliza uma fina camada para a formação da membrana, que pode ser pela deposição de filmes finos ou através da corrosão do substrato <sup>34, 35</sup>, o primeiro diz respeito à tecnologia de superfície enquanto a segunda à tecnologia de

corpo <sup>33</sup>; os processos de difusão ou implantação iônica são utilizados para a determinação dos valores de resistência enquanto a sua geometria é definida com processos de fabricação da microeletrônica como litografia e oxidação. <sup>32, 36</sup>

Para sensores de pressão que utilizam como parte do processo de fabricação a corrosão de corpo, são escolhidos geralmente, silício com orientação  $\langle 100 \rangle$ , pois sua taxa de corrosão é muito maior <sup>34</sup>. Com este tipo de corrosão úmida é possível conseguir membranas muito bem definidas e difundindo ou implantando quatro resistências com alinhamentos nas direções  $\langle 110 \rangle$  ao longo desta membrana temos dois pares de resistências com características diferentes.

As resistências que sofrem tração perpendicular com relação ao campo elétrico aplicado diminuem seus valores resistivos, enquanto as resistências que sofrem tração na mesma direção deste campo elétrico aumentam sua resistividade. <sup>37, 38, 39</sup>

Quando um material sofre um *stress* mecânico e sua resistividade é alterada, como no caso mencionado, dizemos que o material possui propriedades piezoresistivas <sup>38, 39, 40</sup>. A figura 1 mostra um dos possíveis posicionamentos das piezoresistências para sensores de pressão mencionados.

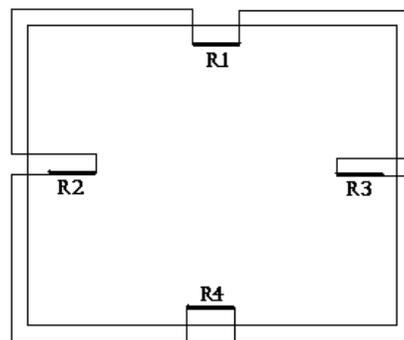


Figura 1: Representação dos resistores sobre uma membrana

A vantagem de se utilizar resistores com tais orientações, com a condição de piezoresistores com dopagem tipo p, é que a variação da resistência é máxima<sup>41</sup> e pode ser simplificada em função dos coeficientes  $\approx \pi 44/2$ , para os coeficientes longitudinais das piezoresistências, e  $\approx -\pi 44/2$ , para os coeficientes transversais das piezoresistências<sup>42</sup>. Assim, se for utilizado uma configuração para os sensores de pressão baseados na utilização de uma ponte de *Wheatstone*, alimentada com corrente ou com tensão, podemos ter a utilização de quatro piezoresistores.

Podemos ter três tipos de configurações para a ponte de *Wheatstone*, uma quarto de ponte, meia ponte e ponte completa. Destas, a ponte completa normalmente é utilizada, para sensores de pressão de silício, pelo fato do aumento da sensibilidade e pela semelhança das variações dos coeficientes piezoresistivos com a variação esperada nesta configuração.<sup>22,23</sup> A figura 2 mostra o esquemático para tal configuração:

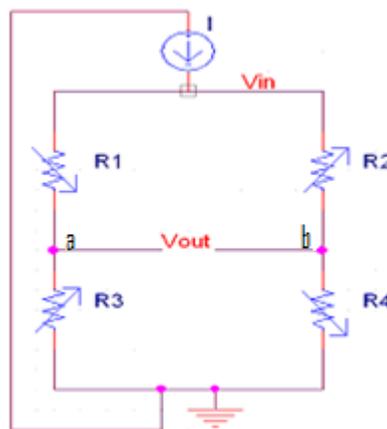


Figura 2: Configuração da ponte completa de *Wheatstone*

A montagem é feita de modo que se estes quatro piezoresistores funcionem como dois divisores de tensão, sendo que estes são colocados no diafragma de maneira que dois resistores aumentem seu valor com o aumento da pressão, enquanto os outros dois são diminuem o seu valor com o aumento da pressão.

O sinal de saída será a tensão diferencial entre os dois lados da ponte, ou seja, dependendo da variação nos valores das resistências, causado por algum esforço externo, a ponte fica desequilibrada, alterando proporcionalmente o valor de tensão na saída. A seguir serão mostrados os cálculos para a obtenção da tensão de saída de acordo com a figura 2:

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{V_a - V_b}{V_{in}} = \frac{R_3}{R_1 + R_3} - \frac{R_4}{R_2 + R_4} \quad (1)$$

Onde  $V_{in}$  é a tensão de alimentação e  $V_{out}$  é a tensão de saída da ponte. Considerando os quatros resistores iguais e que duas resistências aumente seu valor e duas diminuam igualmente, ( $-\Delta R_1 = \Delta R_2 = \Delta R_3 = -\Delta R_4 = \Delta R$ ), a equação (1) pode ser escrita como:

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{R + \Delta R}{2R} - \frac{R - \Delta R}{2R} = \frac{\Delta R}{R} \quad (2)$$

Se considerarmos a segunda lei de Ohm para um material retangular, a resistência é expressa:

$$R = \rho \frac{l}{wt} \quad (3)$$

Sendo que:

$R$  é a resistência do material

$l$  é o comprimento

$w$  é largura

$t$  é a espessura

Considerando as mudanças nesta resistência, temos:

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta \rho}{\rho} + \frac{\Delta l}{l} - \frac{\Delta w}{w} - \frac{\Delta t}{t} \quad (4)$$

As mudanças na resistência relacionada com a mudança dimensional são representadas pelo três últimos termos, estas no caso do silício, não são efeitos que predominantes, pois a mudança na resistividade,  $\Delta \rho / \rho$ , que, em comparação aos metais, é maior com um fator de aproximadamente cinquenta <sup>37</sup>, portanto, para

efeitos mais práticos, os efeitos da mudança dimensional são desconsiderados, ou seja:

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta \rho}{\rho} \quad (5)$$

A equação (2) nos mostra que a tensão de saída é proporcional à variação da resistência e como estas variações estão relacionadas às tensões mecânicas<sup>43</sup>, podemos reescrever esta equação como:

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta \rho}{\rho} = \pi_l \sigma_l + \pi_t \sigma_t \quad (6)$$

Assim, podemos considerar um valor aproximado de  $\pi_{44}/2$  como resultante dos coeficientes longitudinal e transversal<sup>44, 45</sup>

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\pi_{44}}{2} (\sigma_l - \sigma_t) \quad (7)$$

Para a ponte, temos ainda dois tipos de configuração, um quarto de ponte e meia ponte, a qual considera um resistor como elemento sensível, sendo que a meia

ponte, que considera dos resistores como elemento sensível, pode ser ainda simétrica ou assimétrica dependendo do posicionamento dos resistores variáveis.

Se considerarmos a fabricação sobre uma membrana quadrada com tamanho dos lados “ $a$ ”, e espessura “ $h$ ”, tensão física “ $\sigma$ ” e pressão “ $P$ ”, podemos calcular a tensão adimensional como:

$$\bar{\sigma} = \frac{\sigma}{P} \times \frac{a^2}{h^2} \quad (8)$$

Desta forma, se for aplicado a equação (8) na equação (9) tem-se:

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{\Delta R}{R} = \frac{\pi_{44}}{2} \cdot P \cdot \frac{a^2}{h^2} \cdot (\bar{\sigma}_l - \bar{\sigma}_t) \quad (9)$$

Onde  $\bar{\sigma}_l$  e  $\bar{\sigma}_t$ , são os *stress* longitudinal e transversal, respectivamente. Podemos atribuir um coeficiente numérico  $C'$ , para a diferença entre estes que, no caso ideal, é aproximadamente igual a  $0,3(1-\varepsilon)$ , onde  $\varepsilon$  é o coeficiente de Poisson:

$$\frac{V_o}{V_{cc}} = \frac{\Delta R}{R} = \frac{\pi_{44}}{2} \cdot P \cdot \frac{a^2}{h^2} \cdot C' \quad (10)$$

### 2.1.1 Dependência com a temperatura e com a dopagem

Os coeficientes das piezoresistências têm dependência tanto com a temperatura quanto concentrações de impurezas <sup>46</sup>, porém a influência se distingue com relação à temperatura, através da concentração obtida na superfície do substrato, isto é, dependendo da concentração de impurezas, a temperatura tem mais ou menos influências, independente do tipo de dopante utilizado. <sup>47</sup>

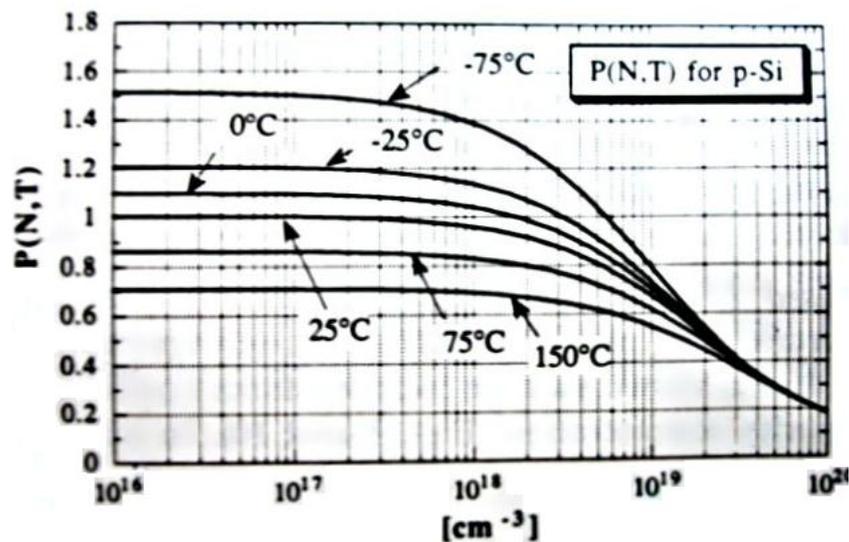


Figura 3: dependência dos valores das piezoresistências com a temperatura e com a concentração de impurezas tipo-p<sup>39</sup>

A variação dos coeficientes diminui de acordo com o aumento da concentração para uma dada faixa de temperatura, a qual diminui os valores dos coeficientes para o aumento de suas temperaturas. Na figura3 é observada a diminuição dos intervalos entre as curvas para valores diferentes de temperatura, isto mostra a influência da temperatura sobre

o valor da piezoresistência, este é o efeito que ocasiona um dos tipos de erros que é devido à temperatura.

## **2.2 Parâmetros dos sensores de pressão piezoresistivo**

Pela necessidade da diminuição de custos, sensores de silício, fabricados com processos de microeletrônica são normalmente utilizados, o que ocasiona membranas mais finas e, portanto, as variações da espessura, rugosidade, uniformidade, entre outros, passam a ser muito significativos. Estes tipos de efeitos são chamados de efeitos de escalonamento.

<sup>33</sup> Os efeitos de escalonamento são um das causas que ocasionam variações nas respostas dos sensores. A fim de se atribuir qualificações para os sensores são extraídos parâmetros que facilitam suas características.

De maneira geral, os sensores necessitam de algum tipo de compensação e calibração destes parâmetros, pois no ato da utilização todos os sensores estão “desequilibrados” e sofrem grande influência da temperatura. Nesta parte serão mostrados alguns parâmetros para caracterizar sensores de pressão

### **2.2.1 Tensão de *offset* ( $V_{offset}$ ) e coeficiente de temperatura do *offset* (TCO)**

A tensão de *offset* é a tensão de saída do sensor quando neste não está sendo aplicado nenhum tipo de pressão<sup>26</sup>. Sua principal fonte é a diferença entre os valores das

piezoresistências, causado por diferentes concentrações de dopantes ou por variação na geometria, que formam o resistor.

Podemos também ter como causa da tensão de *offset* o aparecimento do *stress* induzido pelo encapsulamento do sensor e pela incompatibilidade da expansão dos coeficientes do sensor com o invólucro onde são colocados <sup>20</sup>.

Considerando a equação (9), sem considerar as dimensões da membrana, <sup>48</sup> o valor de *offset* é descrito como:

$$\frac{V_{offset}}{V} = \frac{\Delta R}{R} = \beta(T) + \frac{\pi_{44}}{2}(\sigma_{rl} - \sigma_{rt}) \quad (11)$$

Sendo que o primeiro termo representa a diferença entre os valores das quatro piezoresistências e o segundo termo da equação representa a parte constituída do *stress* residual, sendo que ambas tem a dependência com a temperatura.

A dependência de  $\beta$  com a temperatura vem do fato de que cada resistor utilizado na ponte tem um coeficiente térmico resistivo diferente, e o termo do *stress* residual, como dito anteriormente, tem a sua dependência devido à incompatibilidade dos materiais utilizados para o encapsulamento e fabricação <sup>20, 49</sup> com relação à expansão térmica.

Como mostrado na figura 3, existe uma forte influência da temperatura no valor das piezoresistências, além disso, como mencionado acima, existem outros fatores influenciam na temperatura. Para englobar todos estes efeitos, é determinado um coeficiente chamado de coeficiente térmico do *offset* (TCO), este efeito é determinado com

a razão da diferença da tensão de *offset* de saída, sem a aplicação de pressão, entre duas temperaturas pela tensão da saída na temperatura de referência.

### 2.2.2 Sensibilidade e o coeficiente de temperatura da sensibilidade (TCS)

Podemos entender a sensibilidade como a taxa de saída elétrica com relação à entrada mecânica, isto é, se tivermos em um sensor uma pressão aplicada com certa alimentação elétrica, a deformação mecânica sobre a membrana causará uma variação nas resistências da ponte, ocasionando uma tensão na saída maior. Se para outro sensor, com a mesma pressão e alimentação aplicada, tivermos uma tensão na saída maior, isso quer dizer que a sensibilidade deste é maior do que a do primeiro sensor analisado. A sensibilidade é definida como a variação relativa da tensão de saída pela variação da pressão aplicada para uma dada alimentação. Através da equação (10), pode-se extrair:

$$S = \frac{d}{dP} \left[ \frac{V_{out}}{V_{in}} \right] = \frac{\pi_{44}}{2} \cdot \frac{a^2}{h^2} \cdot \frac{d}{dP} \cdot C' \quad (12)$$

Esta equação nos mostra que a sensibilidade depende do quadrado da área e da espessura, do coeficiente  $C'$ , relativo à diferença entre o *stress* longitudinal e transversal e ao valor do coeficiente  $\pi_{44}$ , isto é, os fatores que influenciam a sensibilidade do sensor são o posicionamento dos piezoresistores, pois o *stress* nas bordas da membrana do sensor é

máximo e quando se aproxima do centro, este diminui a espessura da membrana e o suas dimensões.

A sensibilidade varia com a temperatura já que esta é diretamente relacionada com o coeficiente piezoresistivo e seu coeficiente térmico.<sup>50</sup> O coeficiente de temperatura da sensibilidade da pressão pode ser expresso como:

$$TCS_V = \frac{1}{S} \cdot \frac{\partial S}{\partial T} = \frac{1}{\pi_{44}} \cdot \frac{\partial \pi_{44}}{\partial T} + \frac{1}{C'} \cdot \frac{\partial C'}{\partial T} \quad (13)$$

Quando o sensor é alimentado com tensão constante, o valor de TCS (equação 13) é dependente da variação do coeficiente piezoresistivo com a temperatura e da variação da resultante de *stress* com a temperatura. Pode-se aumentar a concentração de impurezas das piezoresistências para que o valor do TCS diminua como visto na figura 3, porém isto diminui significativamente a sensibilidade<sup>67</sup>.

Se o sensor é alimentado com corrente, o TCS resultante depende da variação do coeficiente piezoresistivo, do coeficiente térmico da piezoresistência (TCR) e do *stress* térmico. A equação 14<sup>26</sup> mostra o coeficiente para alimentação por corrente constante:

$$TCS_i = \frac{1}{S} \cdot \frac{\partial S}{\partial T} = \frac{1}{\pi_{44}} \cdot \frac{\partial \pi_{44}}{\partial T} + \frac{1}{R} \cdot \frac{\partial Rb}{\partial T} + \frac{1}{C'} \cdot \frac{\partial C'}{\partial T} \quad (14)$$

Igualmente com o que acontece com a tensão de *offset*, a variação da sensibilidade com a temperatura não é linear, embora possa ser considerada linear para pequenos intervalos de temperatura.<sup>26</sup>

### 2.2.2.1 Compensação da sensibilidade pela alimentação

Considerando a equação (14), que mesmo com mais termos, este tipo de alimentação faz com que haja uma compensação simples pelo fato dos termos serem com sinais opostos.<sup>22</sup> Este tipo de compensação baseia-se no fato que os valores do coeficiente de temperatura da sensibilidade (TCS) e do coeficiente de temperatura da resistência (TCR) ter sinais diferentes.<sup>51, 52</sup>

Para que a compensação seja entendida melhor é necessário explicar outro parâmetro utilizado na caracterização de sensores de pressão, o FSO (*Full Scale Output*), que se refere ao produto da sensibilidade pela tensão na ponte. Através de uma excitação com tensão constante temos que:

$$FSO(T) = S(T).V_{in} \quad (15)$$

Sendo que  $V_{in}$  é a tensão sobre a entrada da ponte e  $S$  é a sensibilidade dependente da temperatura. A saída FSO, para sensores excitados com tensão constante, é proporcional a tensão aplicada e a sensibilidade do dispositivo. A mudança da resistência da ponte, que ocorre com a temperatura, não afeta o desempenho do sensor e somente o efeito da

temperatura na sensibilidade pode ser considerada, pois há somente uma fonte de erro em “S”, que é dependente com a temperatura. Se ao invés da alimentação com tensão constante passasse a ser com corrente constante, a equação (15) poderia ser escrita como:

$$FSO(T) = S(T).R_b(T).I \quad (16)$$

Se um sensor é alimentado com corrente constante, a tensão através da ponte do sensor é aumentada com o aumento da temperatura, como resultado do aumento da resistência da ponte e conseqüentemente diminuindo o valor da sensibilidade<sup>26</sup>.

Assim, o aumento da resistência dependente da temperatura compensará a redução da sensibilidade também dependente da temperatura. Uma desvantagem ao usar corrente é a redução na tensão de saída ( $V_{out}$ ) tipicamente na faixa de 10% a 25%.

Também são utilizadas técnicas de alimentação mútua para a compensação<sup>26</sup>. Seu principio nos diz que, através de duas pontes iguais integradas sobre o mesmo substrato e através de *loop* realimentado termicamente, faz com que o coeficiente térmico de uma das pontes seja a realimentação para a segunda ponte com sinal oposto do coeficiente térmico.

<sup>53</sup> Esta técnica utiliza técnicas de compensação com alimentação juntamente com técnicas de compensação estrutural.

### 2.2.3 Linearidade e histerese

Ao contrário do que ocorre com a maioria dos metais, o silício comporta-se de forma linear até a fratura e não exibe a histerese típica da deformação plástica.<sup>26</sup> Assim, a histerese deve-se ao fato de que os materiais utilizados na fabricação e encapsulamento do sensor têm coeficientes térmicos diferentes do sensor propriamente dito.<sup>54</sup>

A origem da não linearidade está no comportamento não linear do efeito piezoresistivo ocasionados por efeitos de segunda ordem<sup>55, 56</sup> e na existência de não linearidades mecânicas. Podemos considerar a resposta do sensor linear quando analisamos o sinal de saída com uma precisão não menor do que um por cento.<sup>26</sup>

## 3 Parte experimental

Neste capítulo será apresentada a parte experimental do trabalho, esta é constituída da metodologia utilizada para a calibração e compensação dos sensores; os materiais empregados e as simulações de piezoresistores em configuração de ponte.

Para a calibração e compensação, verificou-se a necessidade de criar uma metodologia de obtenção dos valores, devido à instabilidade dos resultados causados pela variação da temperatura e pela variação da alimentação.

Através de simulações, foram comparados os resultados experimentais com os valores obtidos pela simulação. Deste modo foi possível verificar a eficácia da calibração e compensação.

### ***3.1 Procedimento Experimental***

Com o objetivo de compensar e calibrar sensores de pressão, foi proposta uma metodologia com a qual se obteve os resultados experimentais e os resultados das simulações. Esta metodologia pode ser separada em procedimento para obtenção dos resultados experimentais, simulações dos sensores piezoresistivos, comparação entre as simulações e os resultados experimentais, cálculos dos resistores de compensação e

calibração, simulações dos sensores compensados e calibrados, obtenção dos resultados com compensação térmica e calibração e comparação dos resultados.

O procedimento para obtenção dos resultados experimentais iniciou-se com a determinação dos tempos de estabilização dos sensores com relação à alimentação empregada e com relação às variações de temperaturas. Estes tempos foram utilizados para extrair os parâmetros dos sensores de pressão, desta forma os caracterizando<sup>68</sup>

Com a caracterização dos sensores foram empregadas simulações com os valores obtidos experimentalmente e aplicados a um modelo de equação que rege o comportamento, de primeira ordem, de sensores de pressão. Com os resultados destas simulações foi possível comparar os resultados para análise da eficácia da simulação para posterior aplicação dos valores dos resistores de compensação térmica e calibração da tensão de *offset* da saída.

Para o cálculo dos resistores foi utilizado um artigo técnico<sup>57</sup> que utiliza de métodos computacionais empregando um modelo teórico-experimental para determinar um conjunto de três resistores configurados sobre a ponte de piezoresistores de acordo com as características térmicas e resistivas de cada um.

A aplicação dos resistores de compensação térmica e calibração foram feitas para a corrente que se mostrou mais estável. Estes resistores, como na simulação, não tiveram a influência da temperatura, pois como foram baseados nos equacionamentos do artigo que não levou em consideração os coeficientes térmicos.

A finalização do procedimento experimental se teve com a obtenção dos parâmetros compensados e calibrados e a comparação destes com as simulações já realizadas.

## **3.2 Metodologia de caracterização**

Para o cálculo dos resistores com precisão e para a determinação de parâmetros a serem analisados, foram atribuídas duas metodologias. A primeira refere-se aos tempos necessário para a estabilização e a segunda a refere-se à forma com que os dados experimentais foram obtidos.

### **3.2.1 Metodologia para estabilização**

O primeiro passo foi estabelecer uma metodologia para estabilização térmica e elétrica dos valores das piezoresistências e o valor da tensão de *offset*. Este procedimento foi necessário pelo fato do tempo de espera para se obter tais valores não ser imediato e por não existir bibliografia com uma metodologia para a determinação destes tempos.

O procedimento de caracterização se iniciou com a determinação das posições dos piezoresistores, para que estes fossem tomados como referência para todas as medidas, a figura 25 mostra o desenho esquemático dos sensores e das posições dos resistores:

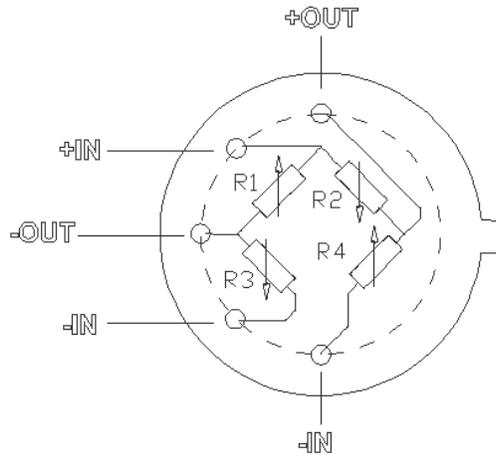


Figura 4: Representação do sensor de pressão com o desenho esquemático dos resistores em uma ponte de *Wheatstone* semi-aberta.

Foram seguidas duas seqüências para a medição dos valores dos três sensores. A primeira consiste em medir a resistência, utilizando um multímetro de alta precisão, iniciando-se pela medida da resistência de saída  $R_{out}$  (+OUT e -OUT), após a medição deste parâmetro foram medidos os valores da resistência de entrada (+IN e -IN) chamada de  $R_b$  e das resistências da ponte R1, R2, R3 e R4 respectivamente. Esta ordem foi atribuída pela maior variação nos valores de saída, causado pela análise dos quatro resistores em configuração de ponte, portanto como existe a necessidade da estabilização térmica, este método nos mostra a maior variação pelo efeito da temperatura, esta metodologia tende a simplificar o processo de obtenção dos resultados.

A segunda seqüência utilizada foi a medida da tensão de saída  $V_{out}$ , seguida pela tensão de entrada  $V_{in}$  e pela tensão sobre cada resistor da ponte do sensor VR1, VR2, VR3 e VR4, respectivamente. Note que o sensor foi polarizado por corrente constante.

Para cada seqüência de medição da tensão, foram feitas alterações nos valores de alimentação por corrente, seguindo a ordem de 4mA, 1mA, 235 $\mu$ A e 500 $\mu$ A; os dois

primeiros valores se referem às especificações que fabricantes dos sensores fornecem e os dois últimos se referem a utilização da corrente de alimentação típica em aplicações em sistema de transmissores de pressão <sup>61</sup>.

As medidas foram obtidas, em média, de cinco em cinco minutos até que seus valores não se alterassem até o penúltimo dígito do multímetro de precisão. Quando este se manteve estável, o tempo tomado passa a ser de quinze em quinze minuto até sua estabilização.

Após as mediações das tensões para o grupo das cinco correntes, as temperaturas foram alteradas seguindo a ordem de 25°C, 50°C, 80°C, 50°C, 25°C, 0°C, -10°C, 0°C, e 25°C. As anotações das medidas feitas sobre cada temperatura foram aquisitadas somente após a estabilização da temperatura da câmara com valor de variação igual a  $\pm 0,1^\circ\text{C}$ , isso para termos um ponto de referência sobre as medidas efetuadas. Nesta primeira etapa não foram aplicados aos sensores nenhum tipo de pressão, deixando-os com pressão ambiente dentro de uma câmara climática. A seguir serão descritas as etapas seguidas para a obtenção dos valores das resistências:

- 1- Ligação dos aparelhos e espera de 10 minutos;
- 2- Inserção do sensor dentro da câmara climática;
- 3- Ligação e configuração da câmara climática para 25°C;
- 4- Espera da estabilização térmica da câmara climática;
- 5- Medição ôhmica;

- 6- Aquisição dos valores até a espera pela estabilização sobre a resistência de saída  $R_{out}$ , resistência de ponte  $R_b$  e dos resistores  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$  e  $R_4$ , respectivamente;
- 7- Alimentação a 4mA com a fonte de corrente;
- 8- Aquisição dos valores até a espera pela estabilização sobre a tensão de entrada  $V_{in}$ , tensão de saída  $V_{out}$  e sobre a tensão nos resistores  $VR_1$ ,  $VR_2$ ,  $VR_3$  e  $VR_4$ , respectivamente;
- 9- Itens 7 e 8 repetidos para as correntes, em ordem, 1mA, 235 $\mu$ A e 500 $\mu$ A;
- 10- Ligação e configuração da câmara climática para 50°C;
- 11- Repetição dos itens 4 ao 9 para os valores de 80°C, 50°C, 25°C, 0°C, -10°C, 0°C, 25°C;

### 3.2.2 Metodologia para caracterização com aplicação de pressão

Com a determinação dos tempos de estabilização, foi definida a metodologia para os valores com a aplicação de pressão utilizando, 235 $\mu$ A e 500 $\mu$ A, já que estes se mantiveram mais estáveis com a variação de corrente elétrica:

1. Ligação dos aparelhos e espera de 10 minutos;
2. Conexão da mangueira ao sensor a ser medido;
3. Inserção do sensor dentro da câmara climática;
4. Ligação e configuração da câmara climática para 25°C;
5. Espera da estabilização da câmara climática;

6. Medição em ohms com a fonte de corrente;
7. Aquisição dos valores até a espera pela estabilização sobre a resistência de saída  $R_{out}$ , resistência da ponte  $R_b$  e dos resistores  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$  e  $R_4$ , respectivamente;
8. Geração de 5bars;
9. Espera da estabilização do gerador de pressão;
10. Repetição dos itens 5, 6 e 8 para as pressões 10bars, 15bars e 20bars;
11. Alteração da temperatura seguindo os itens 3 e 4 para cada ciclo de pressão com as temperaturas de  $50^{\circ}\text{C}$ ,  $80^{\circ}\text{C}$ ,  $0^{\circ}\text{C}$  e  $-10^{\circ}\text{C}$  e obtenção dos valores de resistência seguindo o item 6;
12. Repetição dos itens de 4-11 para as correntes de  $235\mu\text{A}$  e  $500\mu\text{A}$

O tempo de espera decorrente do gerador de pressão foi muito menor do que o tempo de estabilização térmica da câmara, que em média demora 20 minutos por variação de temperatura, ou do que o tempo de estabilização da medição devido à alimentação, portanto não foi um fator que contribui para o aumento do tempo de medida.

### **3.3 Metodologia para calibração e compensação do sensor**

O método empregado para a calibração e compensação dos sensores, se baseou em um artigo técnico, que calibra e compensa com a implementação de resistências ao sensor<sup>57</sup>. Os resistores de compensação são divididos em duas partes: 1) resistores de calibração e compensação térmica da tensão de *offset*; 2) resistor de compensação térmica do *span*.

### 3.3.1 Calibração e Compensação da tensão de *offset*.

O desequilíbrio sofrido na ponte, sem a aplicação de pressão, é causado principalmente pela variação entre os valores nominais dos resistores e pela sua variação com a temperatura. A figura 5 mostra a simulação da ponte de *Wheatstone* a qual representa o desequilíbrio pelo efeito térmico e pela diferença dos resistores sobre um sensor.

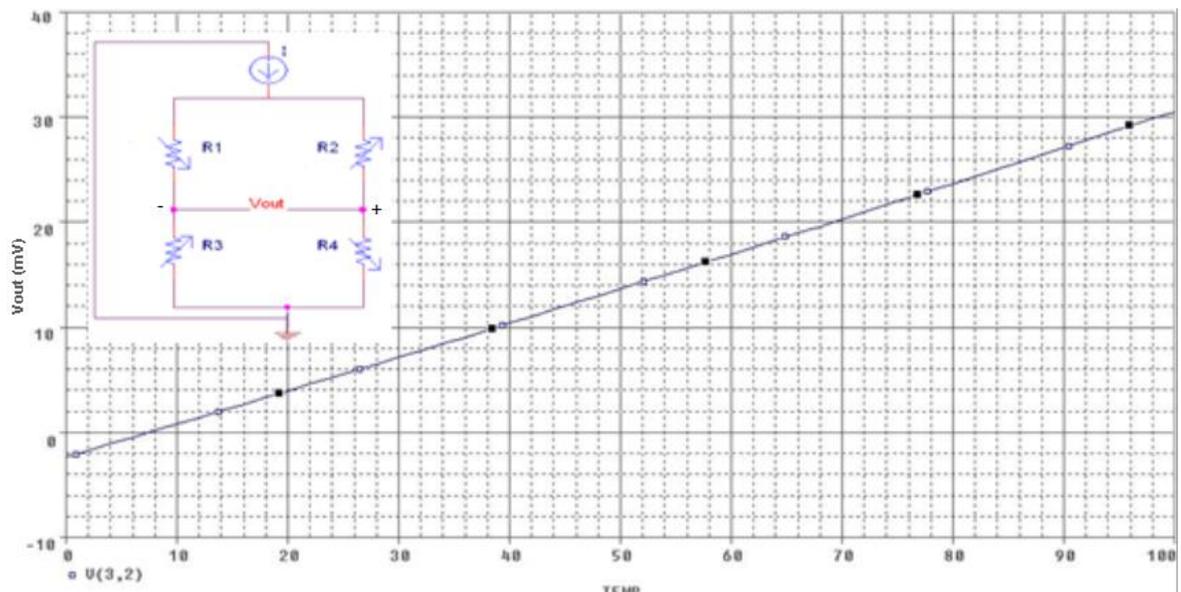


Figura 5: esquema elétrico e simulação térmica de um sensor com P=0 bar

Os valores das resistências utilizadas para a simulação foram determinados aleatoriamente, desta forma representam genericamente os sensores de pressão.

Para as simulações utilizamos o modelo de resistores clássico (ver Pspice) o qual modela o resistor como  $R = R'[1 + TCR]$ ,<sup>58</sup> sendo que o TCR foi obtido experimentalmente para cada piezoresistor.

Para que estes efeitos sejam minimizados são utilizados dois resistores, uma para a diferença dos valores dos resistores e outro para o efeito da temperatura. A primeira resistência a ser determinada é a que calibra a tensão de *offset* à zero, esta tenta igualar as resistências dos dois lados da ponte os quais são diferentes pelo resistor de compensação e pela diferença dos valores das piezoresistências.

Se o *offset* for positivo, o valor de OUT+ for maior do que OUT-, então haverá a inserção em série da resistência  $R_o$ , como mostrado na figura 6, para aumentar o potencial sobre a saída OUT-, caso contrário, se o *offset* for negativo, será inserido em série o resistor  $R'_o$ , para diminuir a tensão sobre a saída OUT-, com isso somente haverá uma das duas resistências; Estes resistores não mudam o coeficiente da temperatura do *offset* no modo de alimentação por corrente constante. É possível notar o efeito deste resistor através das figuras 6 que representam a simulação realizada.

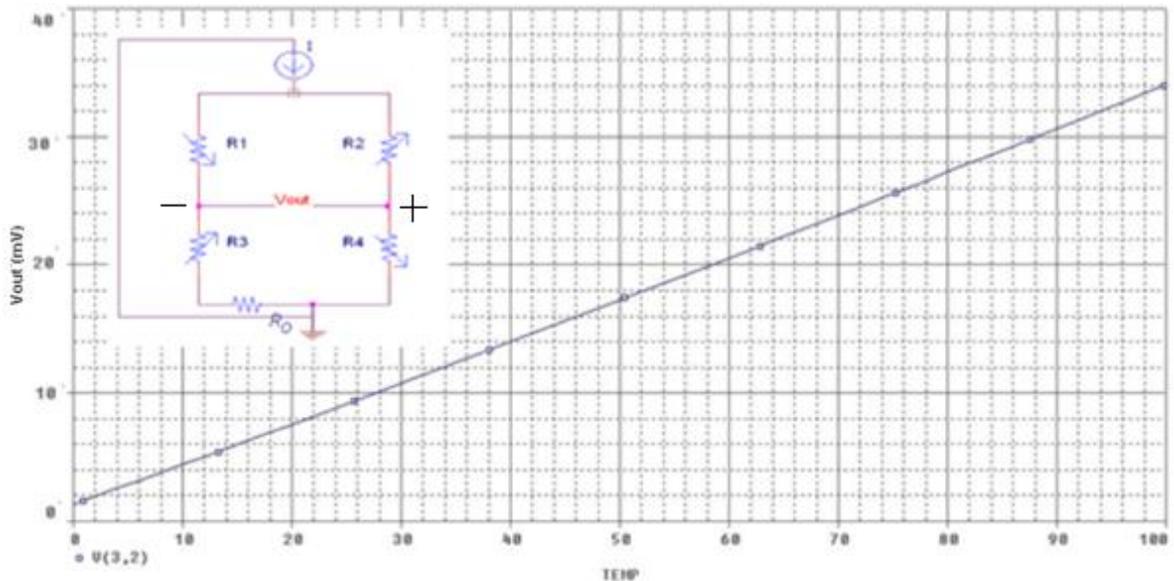


Figura 6: esquema elétrico e simulação térmica um sensor com a utilização de resistor de calibração do *Offset*

O segundo resistor a ser determinado é o resistor que compensa a variação da tensão de saída causada pela temperatura, seu valor e posicionamento junto ao sensor são devidos ao conjunto de piezoresistores que formam a ponte de *Wheatstone*.

Cada nó da tensão de saída é influenciado diferentemente com a temperatura, assim, o posicionamento do resistor depende desta variação, isto é, se com o aumento da temperatura a tensão no pino de saída OUT+ aumentar mais do que a tensão OUT-, podemos dizer que o coeficiente da temperatura da tensão de *offset* é positivo, para tal coeficiente haverá a inserção em paralelo do resistor  $R_{TCO}$  com o resistor  $R_1$ , por outro lado, se o valor do coeficiente da temperatura da tensão de *offset* for negativo, isto é, se a tensão no pino de saída OUT- aumentar mais do que o pino da tensão de saída OUT+, então haverá a inserção do resistor  $R'_{TCO}$  em paralelo com o resistor  $R_2$ . O fato de colocar um resistor em paralelo faz com que haja uma diminuição no valor do coeficiente térmico do piezoresistor, esta diminuição tenta igualar o coeficiente térmico dos dois lados das tensões de saída da ponte de *Wheatstone* diminuindo o valor de TCO. A inclinação da reta da simulação na figura 7 é menor do que a simulação sem a aplicação do resistor de compensação.

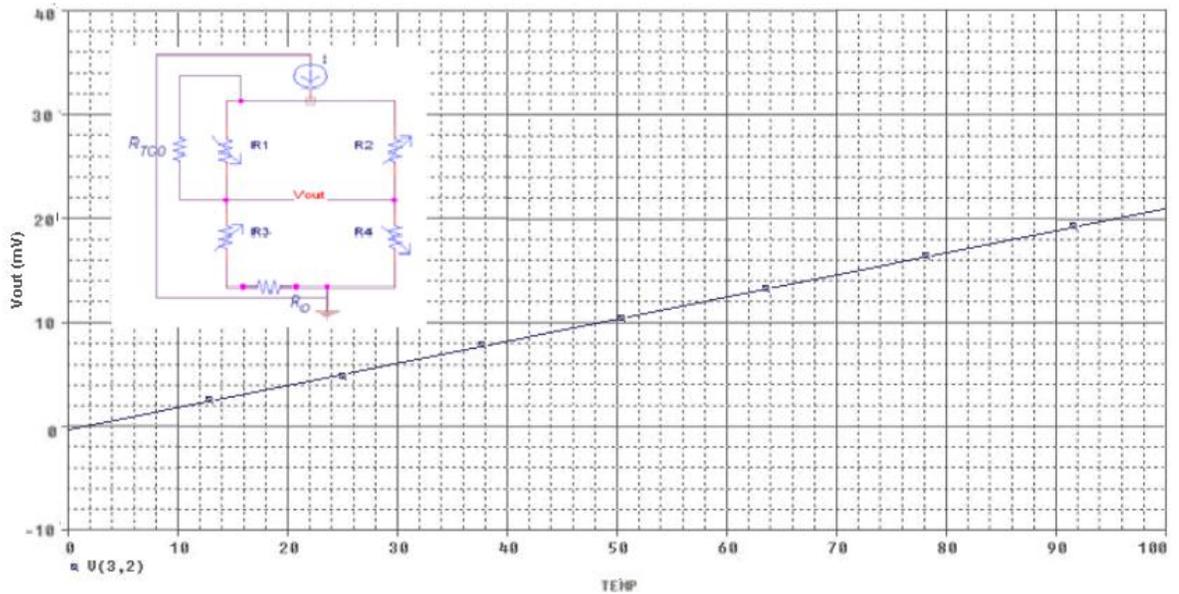


Figura 7: esquema elétrico utilizado e simulação térmica um sensor com resistor de calibração e compensação térmica da tensão do *offset*

A tensão de *offset* na ponte não é perfeitamente proporcional a corrente de alimentação. Devido ao efeito de auto-aquecimento da mudança da corrente, isso pode resultar em uma variação na tensão de saída, de algumas centenas de *microvolts*.

Nestas simulações os resistores de calibração da tensão de *offset* e do TCO não foram calculados, porém seus valores resultaram de tentativas empíricas para apresentar melhores resultados sobre a ponte.

O cálculo destes resistores é dependente da variação da tensão da ponte ( $V_b$ ) e da tensão de saída sem pressão ( $V_o$ ), para as condições com dois valores extremos de temperatura, quente e frio, representadas através dos índices  $h$  e  $c$  respectivamente, com as quais se deseja compensar. Estas equações são baseadas em resultados obtidos empírico-analiticamente através da aplicação em um modelo de sensor<sup>57</sup>. Assim, as equações de (17) até (22) formam a base dos cálculos dos resistores, onde as primeiras quatro equações são os parâmetros utilizados para as temperaturas com as quais se quer compensar, e as duas

últimas são as equações que utilizam tais parâmetros, sendo que a equação (21) ajusta a tensão de *offset* e a equação (22) compensa a variação térmica do *offset*.

$$A = \frac{V_{oc} + Vb_c}{I} \quad (17)$$

$$B = A - \frac{4V_{oc}^2(V_{oc} + Vb_c)}{I^2(Vb_c + 2V_{oc})} \quad (18)$$

$$C = \frac{V_{oh} + Vb_h}{I} \quad (19)$$

$$D = C - \frac{4V_{oh}^2(V_{oh} + Vb_h)}{I^2(Vb_h + 2V_{oh})} \quad (20)$$

$$Ro = \frac{1}{2} \left[ A + C - \sqrt{(A + C)^2 - 4 \frac{AB(D - C) - DC(B - A)}{D - B}} \right] \quad (21)$$

$$Rtco = \frac{(AB - BRo)}{(B - A + Ro)} \quad (22)$$

O resistor de compensação da temperatura, *Rtco*, interfere na tensão de *offset*, isto faz com que o seu cálculo seja feito considerando o valor da resistência *Ro*. Este resistor tenta minimizar o desequilíbrio na ponte causado pela variação da temperatura.

### 3.3.2 Compensação da temperatura no *Span*

A compensação da temperatura de *span* é feita com o acoplamento de um resistor,  $R_S$ , em paralelo com a ponte (quando utilizado a excitação com corrente constante) ou em série (quando utilizado com tensão constante). Este resistor tem a função de diminuir a resistência de entrada da ponte do sensor e compensar seu coeficiente térmico de resistência. A figura 8 representa a configuração da ponte com a aplicação de todas as possibilidades para os resistores de calibração e compensação:

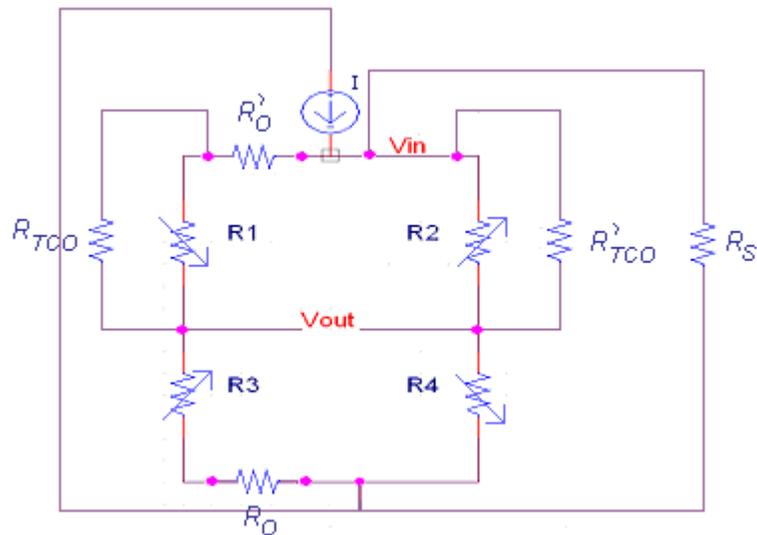


Figura 8: representação do sensor de pressão com a aplicação de todas as possibilidades para a calibração e compensação

Para um determinado nível excitação esta resistência irá diminuir a saída *span*. Para a corrente constante perda para a saída do sensor será de apenas 13%. O que para a

tensão constante dará uma perda de 87% na saída do sensor. Desta forma é imprescindível o uso da alimentação por corrente constante.<sup>57, 51</sup>

### 3.3.3 Cálculo do resistor de compensação do *span*, $R_s$

A determinação do valor da resistência de compensação do *span* vem da utilização da equação da tensão de saída do sensor, que pode ser representada como:

$$V_{out} = P.S.V_{in} + V_{offset} \quad (23)$$

Sendo que S é a Sensibilidade, P é a pressão aplicada e  $V_{in}$  a tensão sobre a entrada da ponte. Se analisarmos a variação da tensão de saída com relação à temperatura e considerarmos para a tensão de saída compensada como:

$$\frac{V_{out}}{\delta T} = 0$$

$$\frac{V_{offset}}{\delta T} = 0$$

Para a variação da tensão de saída compensada teremos:

$$\frac{V_{out}}{\delta T} = P \left( \frac{\delta S}{\delta T} V_{in} + \frac{\delta V_{in}}{\delta T} S \right) = 0$$

Portanto

$$-\left(\frac{\delta S}{\delta T}\right)_{Vin.P} = P.S \left(\frac{\delta Vin}{\delta T}\right)$$

e alimentando com corrente constante:

$$-\left(\frac{\delta S}{\delta T}\right)_{Rb.I.P} = \left(\frac{\delta Rb}{\delta T}\right)_{P.S.I}$$

$$-\left(\frac{\delta S}{\delta T}\right)_{Rb} = \left(\frac{\delta Rb}{\delta T}\right)_S$$

$$-\frac{\left(\frac{\delta S}{\delta T}\right)}{S} = \frac{\left(\frac{\delta Rb}{\delta T}\right)}{Rb}$$

Como  $\frac{\delta S}{\delta T} = TCS$  e  $\frac{\delta Rb}{\delta T} = TCR$  podemos concluir que  $\frac{TCR}{TCS} = -1$  quando este é

compensado e o valor da variação com a temperatura da tensão de saída é igual a zero.

Podemos igualar as razões dos coeficientes de temperatura para duas faixas de temperaturas distintas para que, através destas, possamos determinar um valor com o qual coincidam seus valores de resistências desta forma temos que:

$$\frac{TCR_{(C)}}{TCS_{(C)}} = \frac{TCR_{(H)}}{TCS_{(H)}}$$

Sendo que

$$TCR = \frac{\Delta R}{R(\Delta T)} \quad e \quad TCS = \frac{\Delta S}{S(\Delta T)}$$

Como a sensibilidade  $S$  é a razão da variação máxima da tensão de saída pela pressão aplicada, isto é o *Span*, temos que:

$$\frac{\frac{(R_C - R_{oi})}{R_{oi}(T_C - T_i)}}{\frac{(Span_C - Span_i)}{\Delta P}} = \frac{\frac{(R_H - R_{oi})}{R_{oi}(T_H - T_i)}}{\frac{(Span_H - Span_i)}{\Delta P}}$$

$$\frac{Span_0}{\Delta P} (T_C - T_i) = \frac{Span_i}{\Delta P} (T_H - T_i)$$

Simplificando

$$\frac{(R_C - R_i)}{(Span_C - Span_i)} = \frac{(R_H - R_i)}{(Span_H - Span_i)}$$

Então, para determinarmos o valor da resistência, que para as condições de quente e frio, deverá ser o mesmo, temos:

$$R_{oi} = \frac{R_C(\text{Span}_H - \text{Span}_i) - R_H(\text{Span}_C - \text{Span}_i)}{(\text{Span}_H - \text{Span}_C)} \quad (24)$$

Este valor é o valor ideal para a resistência da ponte, portanto para determinarmos o valor da resistência com a qual deverá ser inserida em paralelo a esta devemos considerar que

$$R_0 = \frac{R_{oi} \cdot R_S}{R_{oi} + R_S}$$

Sendo que  $R_{oi}$  é o valor da resistência da ponte sem a compensação  $R_0$  (inclusive e sem o valor das resistências de compensação e calibração) é a resistência da ponte com a compensação e o valor de  $R_S$  é o resistor para compensar a variação com a temperatura:

$$R_S = \frac{R_{oi} \cdot R_0}{R_{oi} - R_0} \quad (25)$$

### **3.4 Modelagem do sensor**

Programas de simulação são utilizados para descrever comportamentos de dispositivos <sup>56</sup> de materiais ou de circuitos, <sup>59</sup> por isso, com o objetivo de comprovar o comportamento do sensor, foi feito a modelagem do sensor em PSPICE <sup>60</sup> e simulado

eletricamente. Considerando as equações (10) e (11) e que tanto os piezoresistores quanto os coeficientes piezorresistivo dependem da temperatura podemos escrever a variação da resistência em função da temperatura como:

$$\Delta R(T) = R\alpha\Delta T + \frac{\pi_{44}(1 + \gamma\Delta T)}{2} \quad (26)$$

Sendo que  $\alpha$  é o coeficiente térmico dos piezoresistor,  $\gamma$  é o coeficiente térmico dos coeficientes piezorresistivos. Podemos considerar que o valor da variação da piezoresistência é formado por duas partes, a primeira com valor provocado com *stress* e a segunda sem a aplicação de *stress*. Assim, na equação (26), podemos atribuir o valor da resistência sem a variação do *stress*, com a adição do primeiro termo:

$$R_{(stress,T)} = R \cdot (1 + \alpha\Delta T) + \frac{\pi_{44}(1 + \gamma\Delta T)}{2} \cdot P \cdot \frac{a^2}{h^2} \cdot C \quad (27)$$

Este termo adicionado tem somente a influência da temperatura. Desta forma, é utilizada esta equação para a modelagem de cada piezoresistor. A figura 9 é o modelo utilizado no PSPICE em configuração de ponte para a representação dos sensores de pressão:

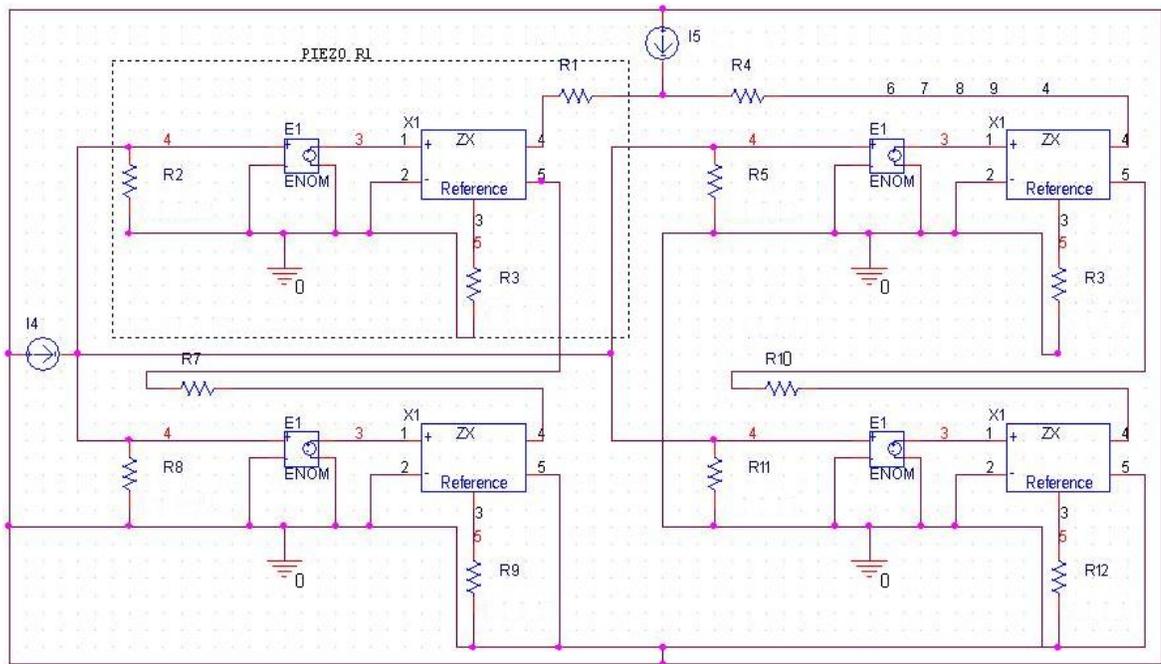


Figura 9: Modelagem de um sensor piezorresistivo

Neste modelo temos a representação dos quatro piezoresistores com valores obtidos experimentalmente e ligados em configuração de ponte completa. As resistências R1, R4, R7 e R10 representam o primeiro termo da equação de cada piezoresistor, para cada um, foram atribuídos valores de TCR obtidos experimentalmente.

Os valores de R2, R5, R8 e R11 representam o coeficiente piezorresistivo com os coeficientes térmicos dos coeficientes piezorresistivos. Estes valores são adquiridos através de valores encontrados na literatura.<sup>61</sup> Em um dos terminais destes resistores são ligados a uma fonte de corrente, que corresponde à fonte de pressão aplicada, e no outro uma função multiplicadora “E”, que tem como finalidade a interpretação do valor constante definido como  $C \cdot a^2 / h^2 \cdot 1/2$ , através de ganho pré-definido. Desta forma, conseguimos obter o valor da contribuição dimensional, do *stress* da pressão e do coeficiente piezorresistivo juntamente com o seu coeficiente térmico.

Com os resistores R3, R6, R9 e R12 de são conectados aos terminais três de cada dispositivo  $Z_x$ , que utilizado é como referência. Este dispositivo multiplica o valor de referência pela impedância de entrada, isto é, será multiplicado o valor do coeficiente piezorresistivo com o valor da resistência de referência. Se aplicarmos os mesmos valores das piezoresistências se formará o segundo termo da equação.

Assim, se o valor de cada piezoresistor será o valor em série do primeiro termo com o valor do segundo termo, na figura 9 pode ser observado em torno da linha tracejada, a modelagem do piezoresistor R1. Para a representação dos piezoresistores com valor que diminuem com a aplicação de pressão, o segundo termo da equação deverá ser negativo.

Para comprovar que o modelo tem o comportamento desejado, foram analisados, primeiramente, os valores das resistências com a alteração da temperatura e de pressão, depois a aplicação dos piezoresistores em configuração com de ponte para a comparação com os sensores.

Através dos cálculos realizados, sobre os valores obtidos experimentalmente, para determinar os resistores de compensação, modelagens foram realizadas para definir a eficácia da compensação e calibração dos sensores. A figura 10 mostra a configuração esquemática da modelagem do sensor com resistores de compensação:

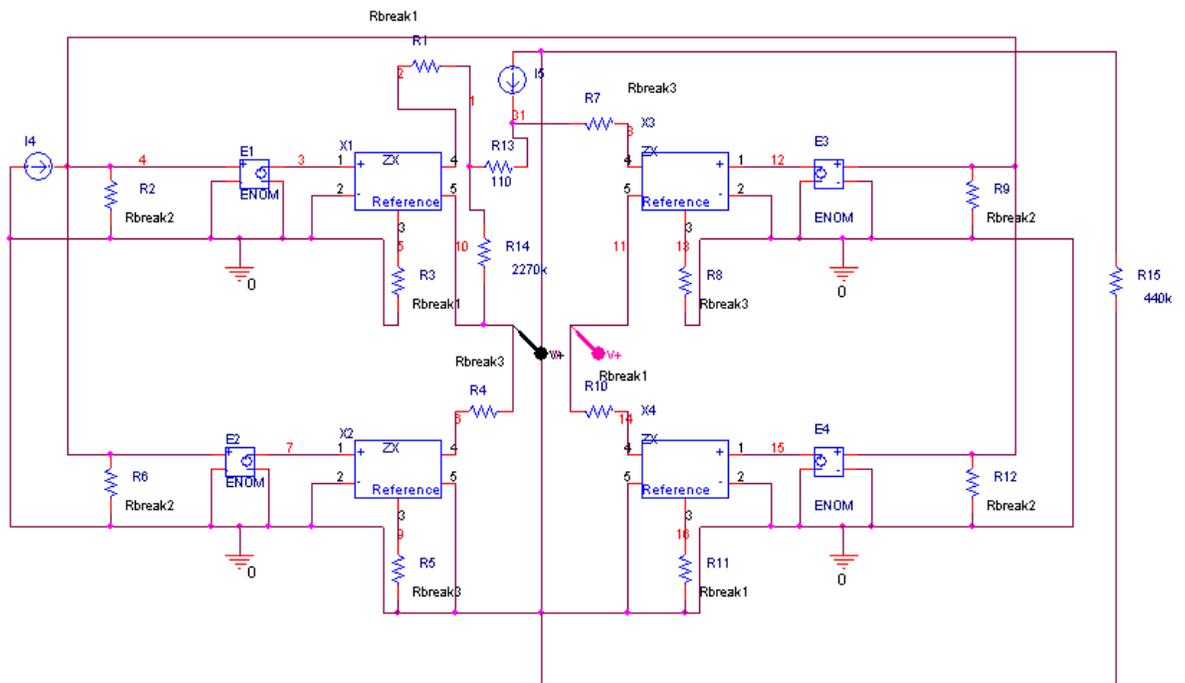


Figura 10: esquema elétrico para a simulação do sensor de pressão com a inclusão dos resistores de calibração e compensação

Os resistores utilizados para a compensação e calibração, R13, R14 e R15, foram considerados somente com seus valores nominais, assim o efeito da temperatura sobre cada um deles não terá nenhum tipo de influência sobre o resultado na tensão de saída. Esta consideração foi tomada pelo fato da aplicação de tais resistores, nas medidas experimentais, terem sido feitas fora da câmara climática, porém estes serão de grande valia para a avaliação dos resultados.

### 3.5 Equipamentos e configurações

Foram utilizados três sensores piezorresistivos com capacidade de 20bars de marca Keller 9s, <sup>62</sup> os quais receberam invólucros de aço 316L para conexão com sistemas de pressão e como forma de proteção aos sensores. A figura 11 mostra o sensor e suas dimensões:

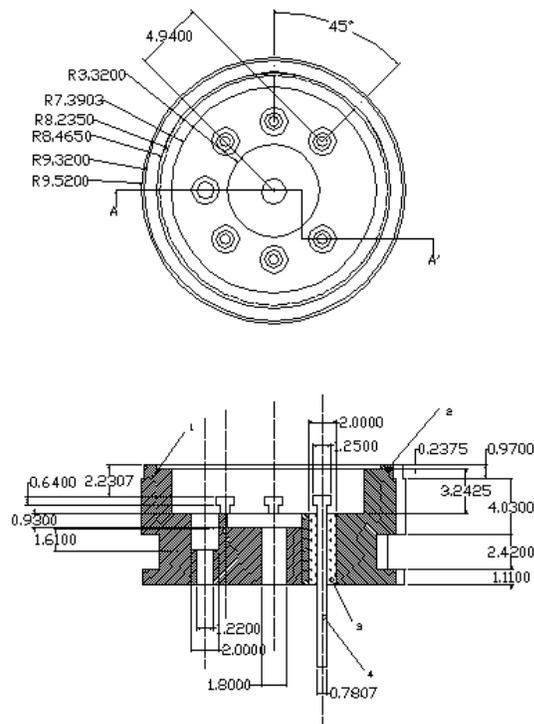


Figura 11: desenho do invólucro do sensor

Estes encapsulamentos são utilizados para, proteger o sensor e fazer a conexão elétrica entre o *die* do sensor e o instrumento de leitura dos sinais. A escolha dos materiais vem da compatibilidade térmica e elétrica exigida para determinadas aplicações e ambientes.

### 3.5.1 DRUCK 515

O Controlador/Calibrador de Pressão de Precisão Druck DPI 515<sup>63</sup> mede e controla a pressão pneumática e exibe, em um visor LCD, a medida da pressão e o status do controlador. Um teclado ao lado do visor permite seleções e configurações manuais dos modos de medida e controle.

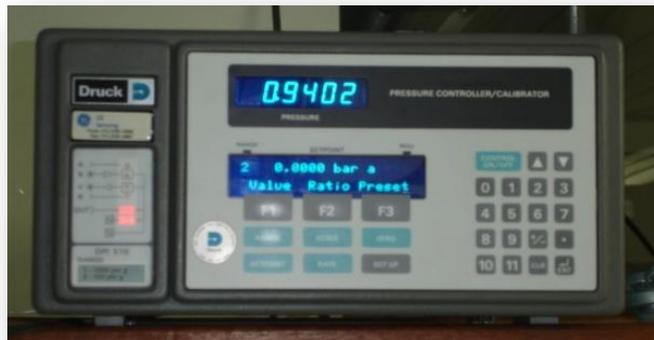


Figura 12: Controlador/Calibrador de Pressão

O instrumento pode ser operado remotamente através de interfaces de comunicação serial ou paralela. O instrumento pode ter um ou dois canais pneumáticos de medida/controle de variações de pressão diferentes. A tabela 1 mostra as principais características do controlador de pressão:

Tabela 1: Especificações do controlador DRUCK515

<b><i>Estabilidade de Medida</i></b>	0,01% de leitura por ano para variações entre 0,7 e 210 bar (10 e 3000 psi)
<b><i>Estabilidade do Controlador</i></b>	Para variações entre 0,7 e 70 bar: melhor do que 0,001% de amplitude
<b><i>Resposta do Controlador</i></b>	Menos de 5 segundos em um volume de 50 cm <sup>3</sup>
<b><i>Tempo de aquecimento</i></b>	15 minutos para a especificação
<b><i>Painel</i></b>	atualizado a cada 0,6 segundos
<b><i>Peso</i></b>	9 kg (19,8 lbs) aproximadamente.
<b><i>Dimensões</i></b>	390mm [largura] x 132mm [altura] x 300 mm [profundidade].
<b><i>Precisão</i></b>	0,01% de fundo de escala de 700 mbar a 210 bar

### 3.5.2 Câmara Climática

A câmara climática VT4004<sup>64</sup> foi o equipamento utilizado para a geração de temperaturas, tanto negativa quanto positiva, para a determinação dos parâmetros dos sensores.



Figura 13: foto da câmara climática VT4004

O acesso ao sensor, para o duto do gerador de pressão e para as ligações elétricas, é através do orifício localizado sobre o lado direito o qual é fechado com uma tampa de silicone maleável. Este tampão não lacra totalmente a passagem do ar, fazendo com que ocorra uma demora na estabilização da temperatura, diferenciando o valor real da taxa de aquecimento e de resfriamento com o encontrado na tabela2:

Tabela 2: especificações da câmara climática VT 4004.

<i>Volume interno</i>	35 litros
<i>Faixa de temperatura</i>	-40°C /+180°C
<i>Flutuação da temperatura</i>	±1°C
<i>Taxa de aquecimento</i>	5,0°C/min
<i>Taxa de resfriamento</i>	3,5°C/min
<i>Dimensão</i>	320 x 270 x 400 (mm)

Além da variação dos valores, com relação à estabilidade, temos também a falta de controle da temperatura o qual influencia no valor a ser aquiritado, portanto tenta-se fazer medidas sobre os sensores sem que haja interrupções dos dias, já que assim os valores das umidades tendem a se manter mais próximos.

### 3.5.3 Fonte de Alimentação e Multímetro<sup>66</sup>

Para alimentação dos sensores foi utilizado a fonte de corrente constante modelo 2400 da Keithley. <sup>65</sup> Esta fonte além de fornecer uma fonte de corrente pode ainda funcionar como multímetro, e ser gerador de uma fonte de tensão. Sua escolha foi pela

precisão, nas medidas das resistências e na faixa de corrente. Suas principais características são as medidas da tensão de  $1\mu\text{V}$  até  $211\text{V}$ , valor de corrente com valores que podem variar de  $\pm 10\text{pA}$  até  $\pm 1\text{A}$ , mediadas de resistência de  $100\mu\Omega$  até  $211\text{M}\Omega$ .



Figura 14: fonte de corrente e multímetro

O multímetro utilizado nas medidas foi um Agilent 34401A, o qual tem resolução de 6,5 dígitos e exatidão na tensão contínua (para saídas dos sensores) de 0,0035%. A figura 14 mostra a foto do multímetro (direita) e a fonte de corrente (esquerda).

### **3.6 Parâmetros a serem obtidos**

No item 2.3 foram mostrados parâmetros dos sensores e suas influências com a temperatura, porém a forma de obtenção dos já mostrados e de outros parâmetros<sup>46</sup> será mostrada a seguir:

### 3.6.1 Tensão de *offset* e TCO

A tensão de *offset* é obtida com a diferença da medição de tensão dos dois terminais de saída de tensão dos sensores (OUT + e OUT-), quando neste não há *stress* influenciado pela inserção voluntária de algum tipo de pressão.

Se variarmos a temperatura e extrairmos as tensões de *offset* para cada variação e realizarmos a razão entre estes será o valor de TCO a unidade é dada por [ppm/°C], obteremos o valor do coeficiente, através da equação.

$$TCO = \frac{\Delta V_{offset}}{V_{offset(ref.)} \Delta T} \quad (28)$$

### 3.6.2 Sensibilidade e TCS

A sensibilidade é a resposta do sensor em função da pressão aplicada, por isso ao aplicarmos pressão ao sensor e analisarmos a tensão de saída consegue-se obter, pela razão entre a tensão de saída pela pressão aplicada [V/V/bar].

$$S = \frac{\Delta V_{out}}{\Delta P} \quad (29)$$

O valor de TCS utiliza a razão da variação da sensibilidade pela variação da temperatura com a Sensibilidade inicial e pode ser expresso por ppm/°C.

$$TCS = \frac{\Delta S}{S_{(ref.)}\Delta T} \quad (30)$$

### 3.6.3 Histerese Térmica ( $THV_{offset}$ )

Corresponde à diferença na tensão de *offset*, para a variação da temperatura. Se determinar ao medir a variação de  $V_{offset}$  com a temperatura, tanto ao incrementar esta em  $+\Delta T$  ou decrementar em  $-\Delta T$

### 3.6.4 Resistência e TCR

A resistência é o valor medido sobre cada terminal das piezoresistências que constituem o sensor de pressão, enquanto TCR corresponde à variação da resistência com a temperatura, a medida é expressa em ppm/°C e é determinada pela razão da variação da resistência pela variação da temperatura com a resistência de referência

$$TCR = \frac{\Delta R}{R_{(ref.)}\Delta T} \quad (31)$$

## 4 Resultados e discussões

Neste capítulo, são apresentados os resultados obtidos para os três sensores de pressão, analisando os valores das piezoresistências com relação à variação da temperatura, a variação da corrente de alimentação e a variação de pressão. Assim, serão apresentados os resultados das estabilizações térmicas e elétrica, caracterização das piezoresistências com a variação da temperatura.

São mostrados também os resultados das simulações dos sensores com e sem a aplicação dos resistores de calibração e compensação da temperatura e comparados com os resultados experimentais através dos parâmetros característicos dos sensores.

### 4.1 Estabilização dos sensores

As estabilizações foram realizadas de acordo com a variação da corrente de alimentação e da temperatura. Através da utilização de linhas de tendências do *software Origin 6.0*, foi possível observar que as estabilizações, quando existentes, seguiam um decaimento do tipo exponencial. Os gráficos a seguir são referentes às estabilizações para uma variação de temperatura de 25°C, os valores são apresentados sobre a resistência da ponte.

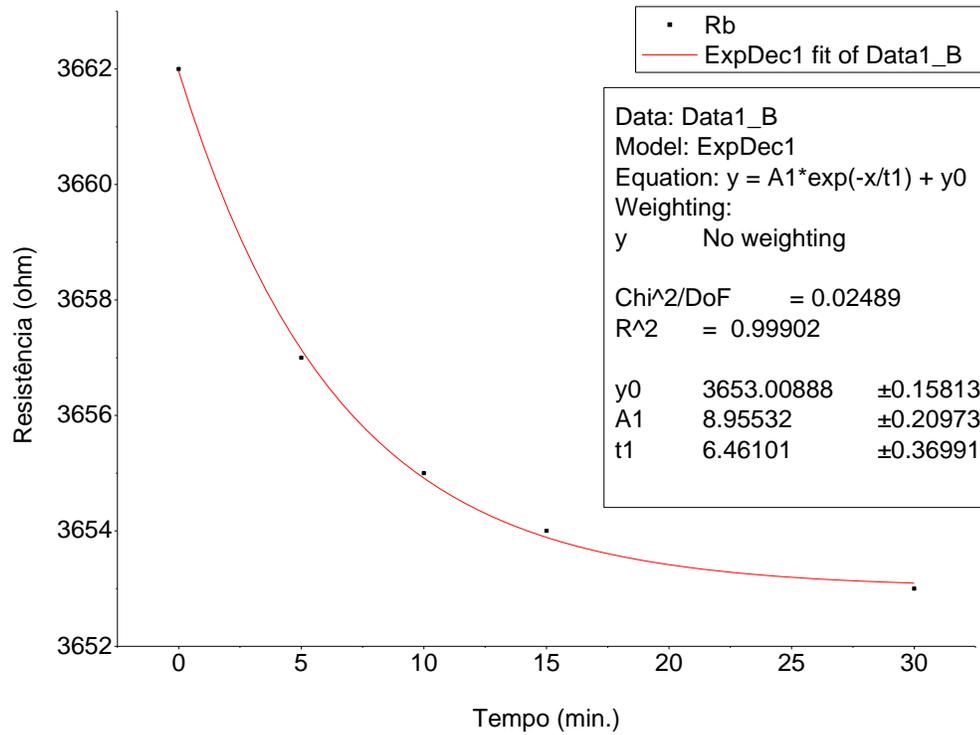


Figura 15: Comportamento térmico do sensor 2 à 25°C.

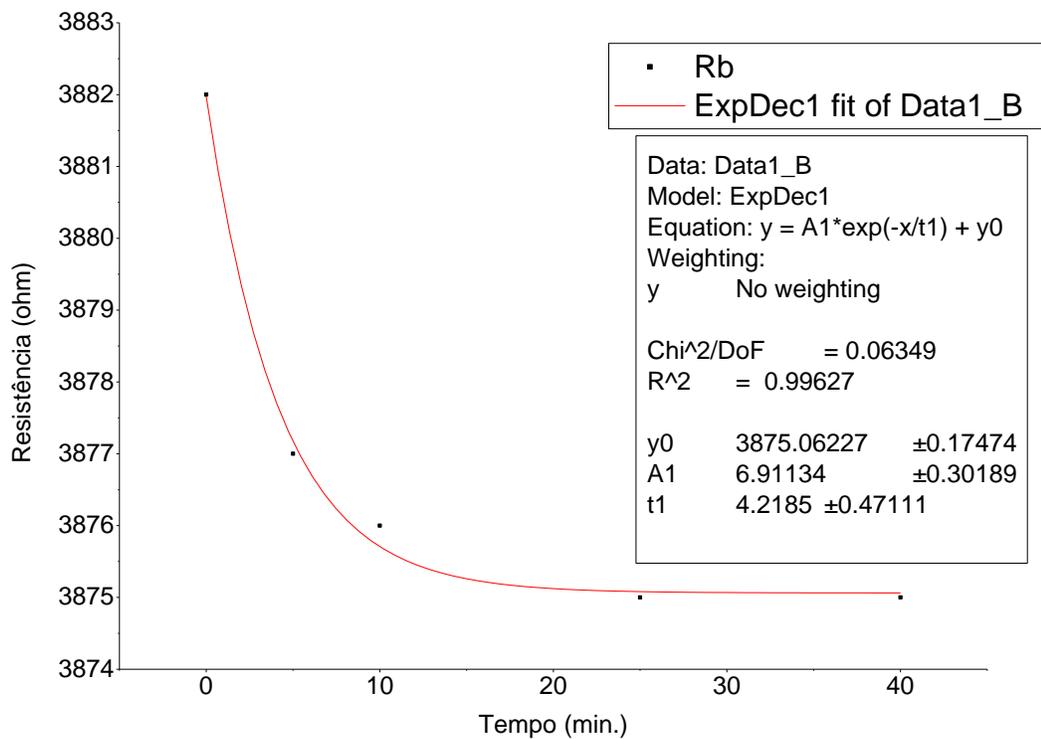


Figura 16: Comportamento térmico do sensor 2 à 50°C.

O tempo necessário para a estabilização dos sensores depende do nível de precisão com o qual devemos trabalhar, pois como se trata de um decaimento exponencial. Assim sendo, para grande variações nos valores da resistência da ponte, tempo muito pequenos são necessários, porém caso a precisão requisitada for alta o tempo terá um grande aumento.

Para a estabilização térmica dos sensores foi analisado o intervalo de tempo após a mudança da alimentação de  $500\mu\text{A}$  para a leitura ôhmica do multímetro, de acordo com a metodologia empregada, já que foi observado que nesta alteração não houve uma mudança significativa no valor de saída causado pelo efeito do elétrico. As figuras acima exemplificam as estabilizações para todas as mudanças térmicas medidas já que estas se mostraram repetitivas. As figuras abaixo mostram os resultados referente as estabilizações elétricas para corrente de  $1\text{mA}$  e  $4\text{mA}$ .

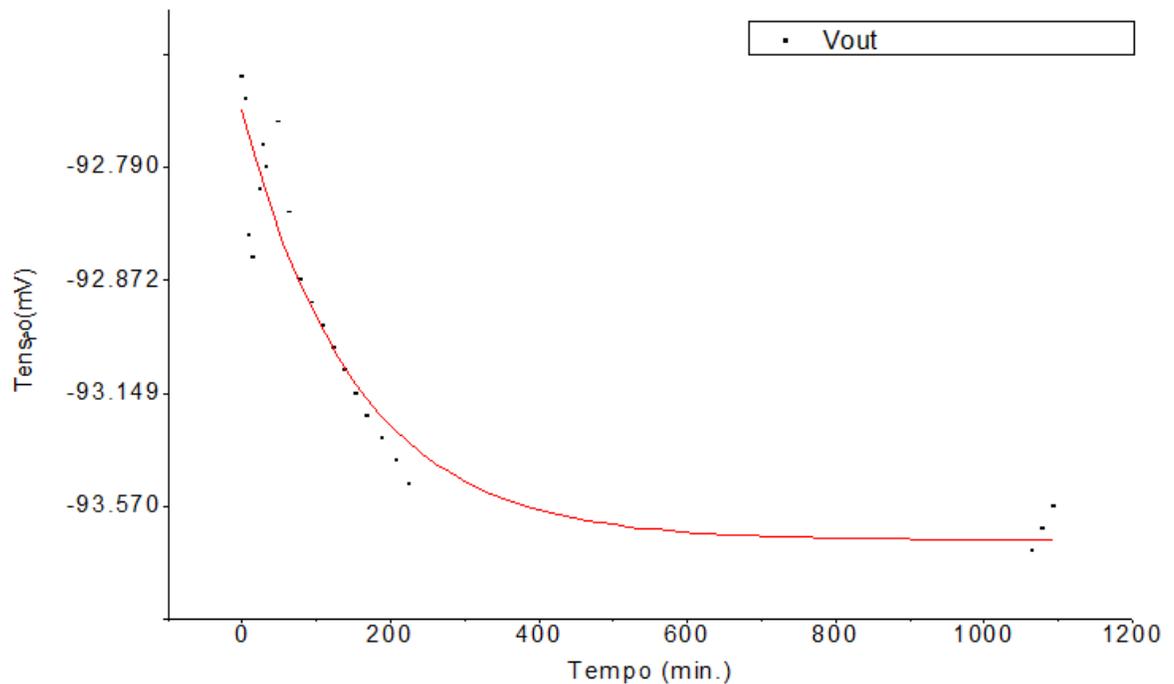


Figura 17: Estabilização elétrica do sensor3 a  $50^{\circ}\text{C}$  com  $4\text{mA}$  de alimentação.

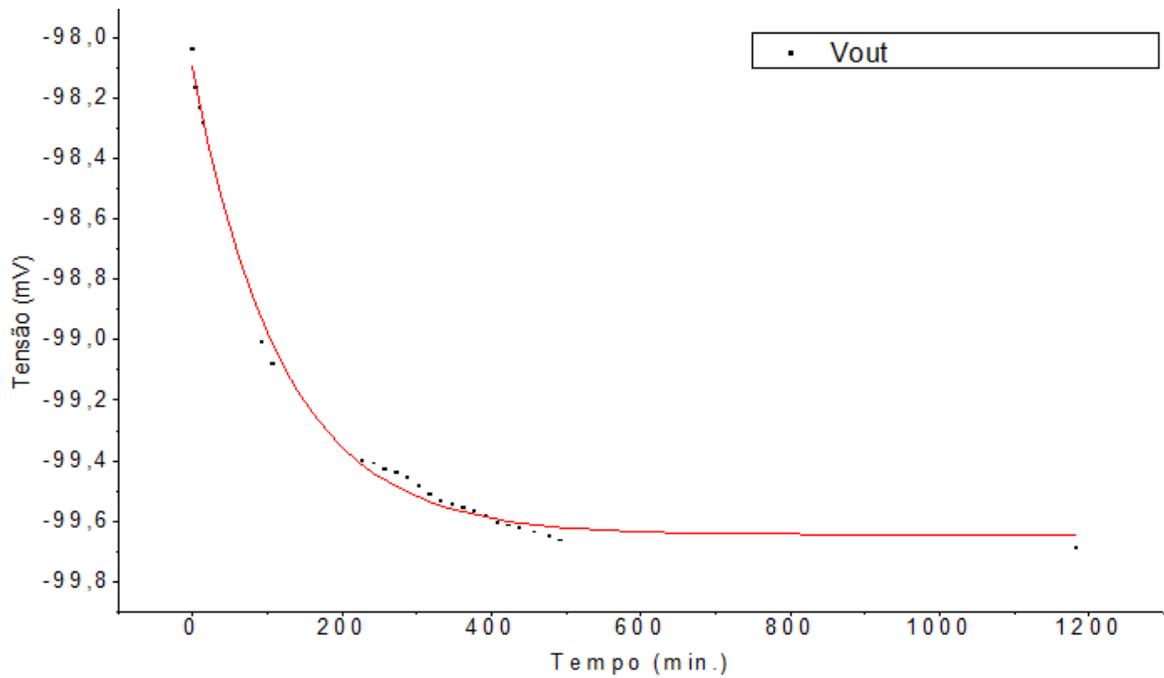


Figura 18: Estabilização elétrica do sensor3 a 80°C com 4mA de alimentação.

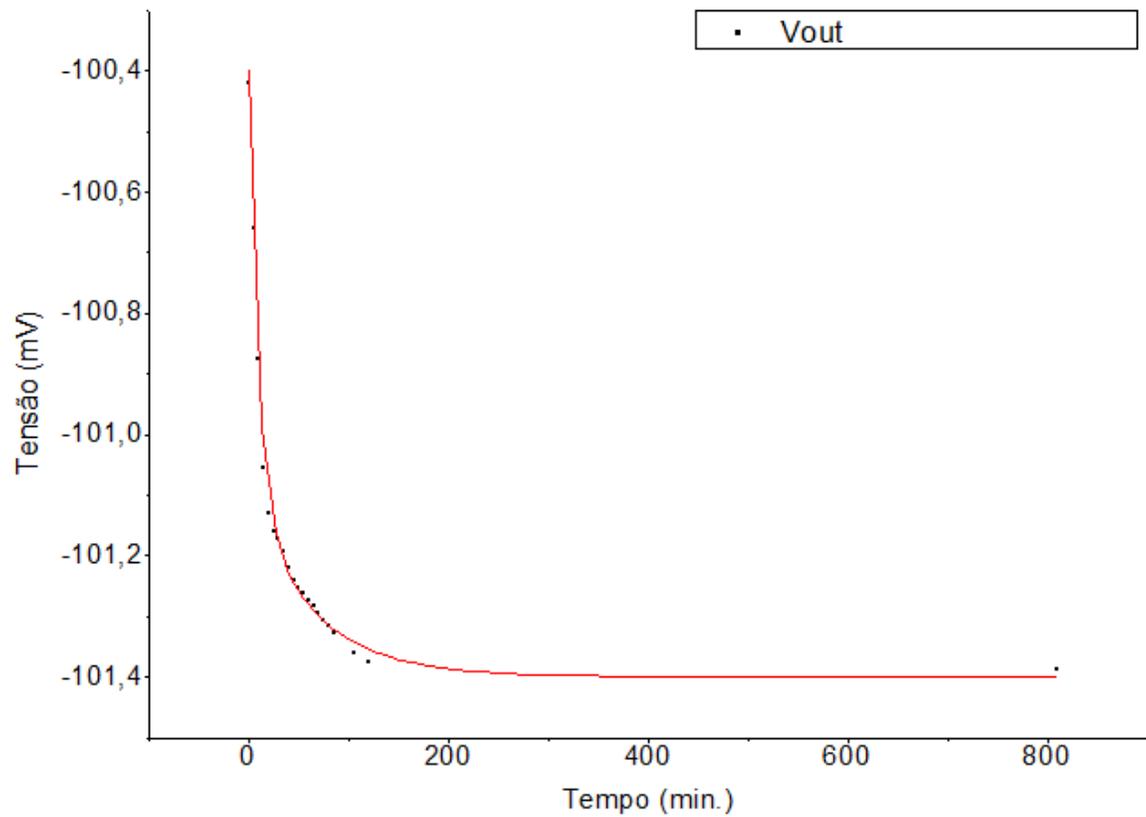


Figura 19: Estabilização elétrica do sensor2 a 25°C com 4mA de alimentação.

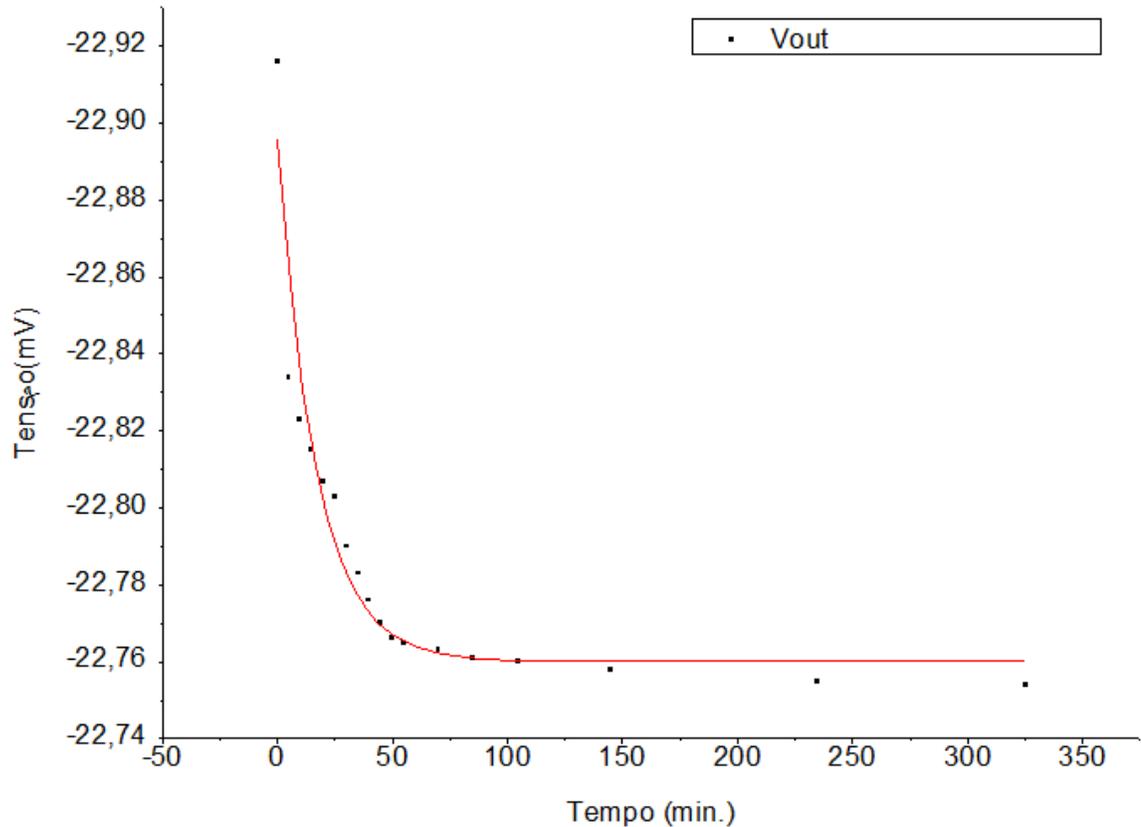


Figura 20: Estabilização elétrica do sensor2 a 25°C com 1mA de alimentação.

Os tempos para a estabilização elétrica dos sensores são maiores do que os tempos de estabilização da temperatura, isso acontece para as correntes de 4mA e 1mA, porém para as correntes de 235 $\mu$ A e 500 $\mu$ A a estabilização térmica é maior. Este fato ocorre pelo fato que a transferência de calor, devido ao efeito Joule da corrente de alimentação sobre os sensores em relação a temperatura induzida pela câmara climática, ser mais acentuada, pois a diferença de temperatura é maior e, conseqüentemente, o tempo para o equilíbrio térmico é maior.

O tempo de estabilização para uma variação de temperatura 25°C dos resultados experimentais foi de aproximadamente 30 minutos levando em consideração uma precisão de 0,1% do valor final.

Tabela 3: tempo médio de estabilização.

	4mA	1mA	235 $\mu$ A	500 $\mu$ A	$\Delta T(\pm 25^\circ\text{C})$	precisão
Tempo(min)	200 $\pm$ 20	50 $\pm$ 10	1 $\pm$ 1	1 $\pm$ 1	18 $\pm$ 5	0,05%
Tempo(min)	100 $\pm$ 20	35 $\pm$ 10	1 $\pm$ 1	1 $\pm$ 1	5 $\pm$ 5	0,10%
Tempo(min)	20 $\pm$ 15	10 $\pm$ 8	1 $\pm$ 1	1 $\pm$ 1	1 $\pm$ 5	1,00%
Tempo(min)	1 $\pm$ 5	1 $\pm$ 5	1 $\pm$ 1	1 $\pm$ 1	1 $\pm$ 5	5,00%

Podemos perceber que o tempo de estabilização é diretamente relacionada a corrente de alimentação utilizada e também ao nível de precisão que se deseja. Para o maior tempo de estabilização, isto é, para a corrente de 4mA e precisão de 0,05%, temos que o valor foi de 200 minutos com desvio de 20. Em contra partida, para os menores tempos o valor de espera para a estabilização foi tão pequeno quanto foi possível medir, pois o valor da tensão de saída variou da primeira medida ate a estabilização final.

Os valores dos desvios, em todas as condições, foram obtidos com a tabela *t-students*. Como a quantidade de amostra foi muito pequena, os valores obtidos, para uma confiança de 98,5%, foram muito próximos ou maiores do que o próprio tempo analisado.

## 4.2 Variação das resistências com a temperatura

Com a definição dos tempos, foi analisado a variações das 4 piezoresistências com a temperatura com uma certeza maior dos resultados. Podemos perceber que o valor nominal das piezoresistências é semelhante para cada par, de acordo com o seu posicionamento junto à membrana. As piezoresistências longitudinais, R1 e R4, são as piezoresistências de menor valor, de forma análoga, para os valores transversais, R2 e R3, são os de maior valor.

Esse fato se dá pela variação com que cada piezoresistor tem com a mudança com a pressão. Assim, nas longitudinais, quando é exercida a pressão máxima seu valor se torna aproximadamente o valor das transversais e vice-versa.

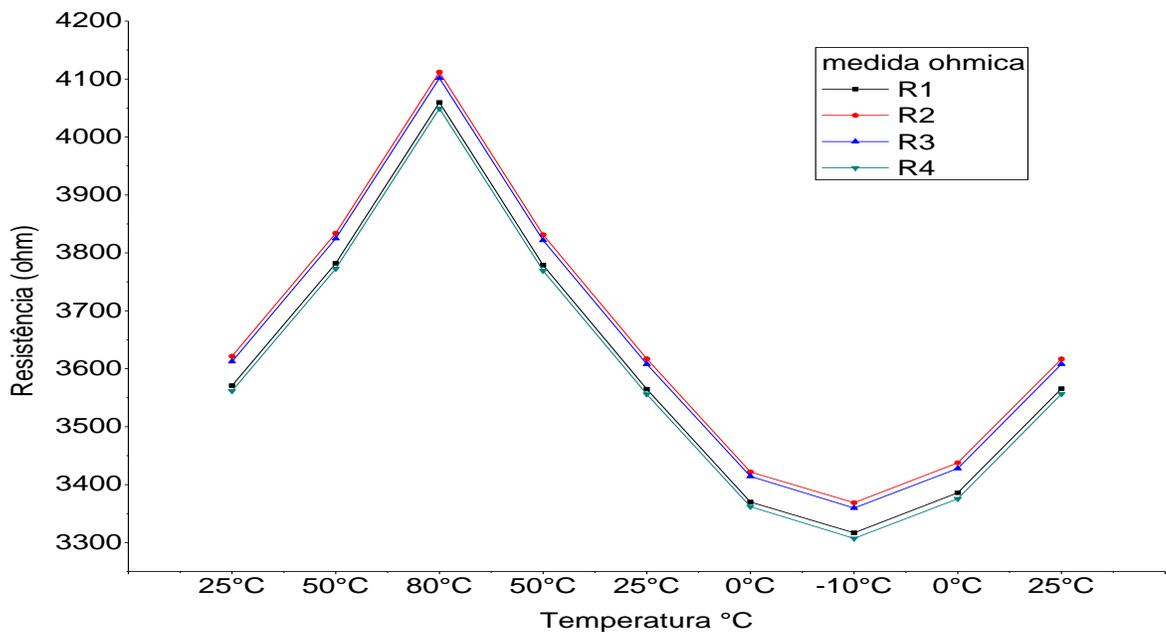


Figura 21: Variação da resistência da ponte com a temperatura. Medida ôhmica

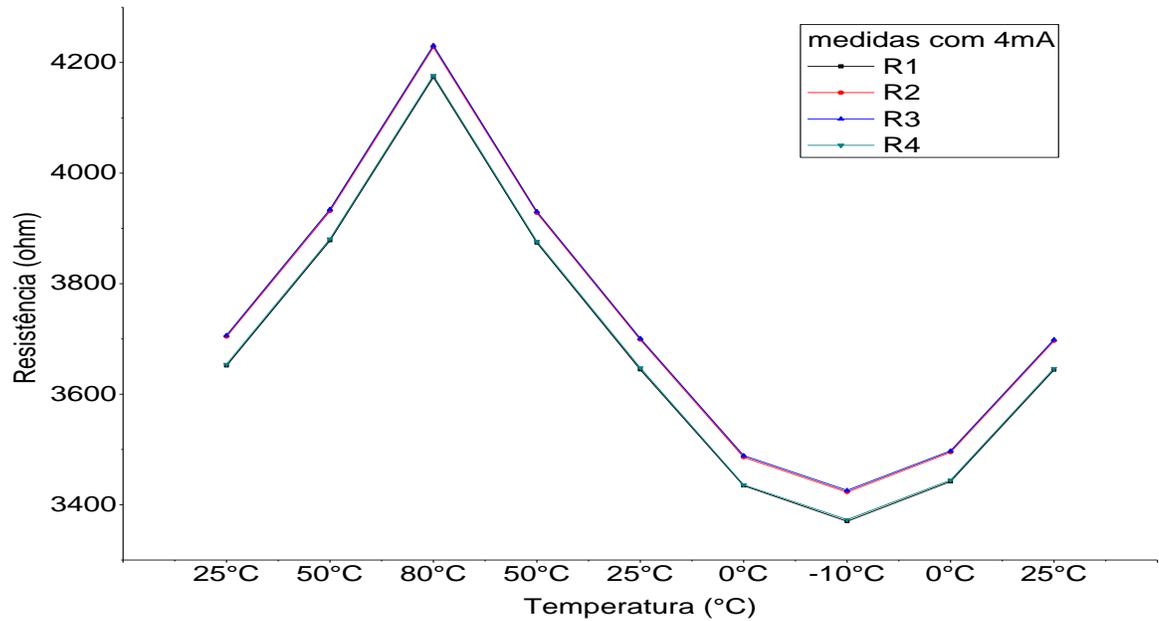


Figura 22: Variação da resistência da ponte com a temperatura. Medida com 4mA

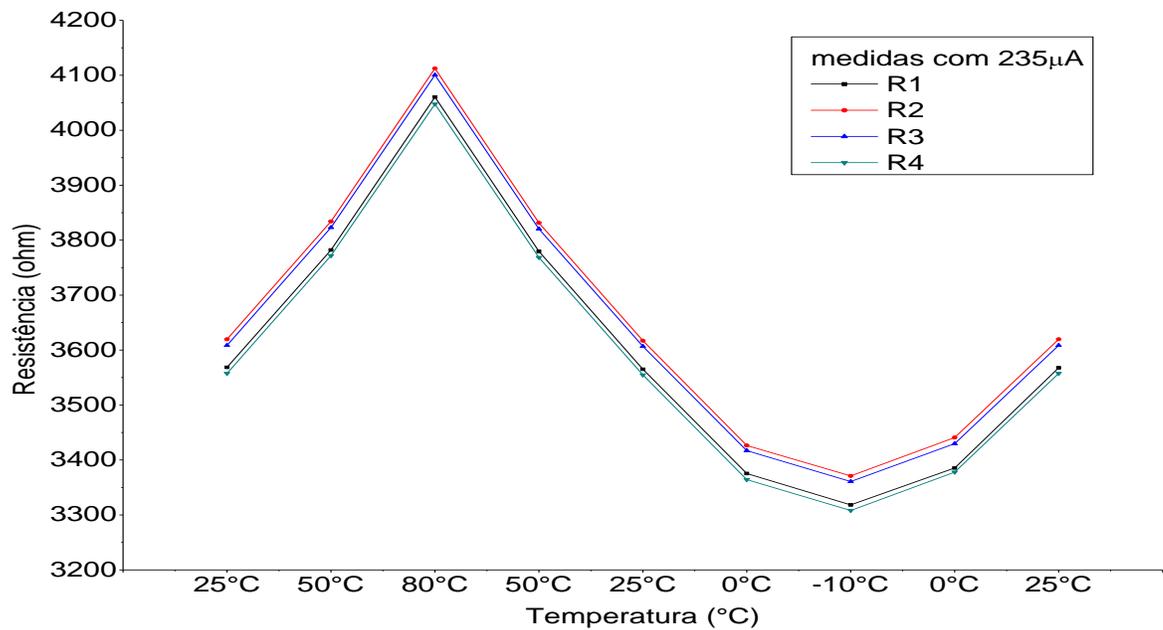


Figura 23: Variação da resistência da ponte com a temperatura. Medida com 235µA

Nestes sensores podemos perceber que as resistências se mostraram com valores próximos, assim como o valor da variação com a temperatura, isto mostra que o processo de fabricação utilizado, como dito anteriormente, são repetitivos.

Os valores das piezoresistências variaram com a temperatura cerca de  $9\Omega/^{\circ}\text{C}$ , este valor é devido a própria dependência térmica dos piezoresistores. Podemos perceber que existe também uma variação devido as alimentações, sendo que a variação entre a medida ôhmica e a alimentação de 4mA, foi de aproximadamente 150ohm. Essa característica é importante de ser considerada na polarização de um sensor.

### ***4.3 Resistores de calibração e compensação***

A tabela abaixo mostra o resultado dos cálculos feitos para os resistores de calibração e compensação. Nesta tabela são mostrados os valores para duas correntes de alimentação,  $235\mu\text{A}$  e  $500\mu\text{A}$ , pois estas se mostraram mais estáveis.

Podemos perceber que mesmo para sensores com características resistivas e elétricas similares o valor dos resistores depende dos valores das correntes de alimentação. Os valores de  $R_s$  e  $R_0$  sofreram menos influência do que os valores de  $R_p$  o qual foi influenciado em quase cinco vezes um valor sobre o outro, visto no sensor 2. A tabela 5 mostra os resultados dos cálculos realizados para os três sensores:

Tabela 4: calculo dos resistores de calibração e compensação

Sensor1				Sensor 2			
235		500		235		500	
R0=	-112,47	R0=	-110,21	R0=	-90,187521	R0=	-86,0637
R3=	Rs	R3=	Rs	R3=	Rs	R3=	RS
R4=	CORTADO	R4=	CORTADO	R4=	CORTADO	R4=	CORTADO
Rtco=	-1516542	Rtco=	-2270529	Rtco=	14525661	Rtco=	2701808
R1=	Rp	R1=	Rp	R1=	ABERTO	R1=	ABERTO
R2=	ABERTO	R2=	ABERTO	R2=	Rp	R2=	Rp
R0=	39008,85	R0=	42416,41	R0=	69814,284	R0=	69609,41
Rs=	-4052,95	Rs=	-4022,41	Rs=	-3865,334	Rs=	-3867,58
sensor3							
235				500			
Rs=	-96,3131	Rs=	-95,157709				
R3=	Rs	R3=	Rs				
R4=	CORTADO	R4=	CORTADO				
Rp=	-6387435	Rp=	-15896551				
R1=	Rp	R1=	Rp				
R2=	ABERTO	R2=	ABERTO				
R0=	98761,13	R0=	-879918,4				
Rs=	-3724,27	Rs=	-3577,396				

Os cálculos foram realizados com as duas correntes para mostrar a influência destas com a obtenção dos resistores. No caso do resistor Rs, o qual calibra o efeito do desbalanceamento na ponte, não houve divergência acentuada nos valores, pois a corrente não afeta de modo significativo esta variação, porém para a variação dos resistores que compensação o efeito término, no caso Rp e R0, são drasticamente alterados.

## **4.4 Resultados das Simulações**

Nesta seção serão apresentados, as simulações dos sensores de pressão que servem como base para observar o funcionamento com a pressão e com a temperatura. As simulações utilizam medidas dos piezoresistores e dos coeficientes térmicos das resistências, sendo que a aquisição dos coeficientes são referente as temperaturas dos extremos medidos, isto quer dizer que foram utilizadas as temperaturas de  $-10^{\circ}\text{C}$  e  $80^{\circ}\text{C}$ , porém como é conhecida da literatura<sup>20, 16</sup>, a variação dos piezoresistores com a temperatura não é completamente linear, sendo que suas curvas se comportam como uma função parabólica.

### **4.4.1 Simulação das piezoresistências**

Para comprovar que o modelo tem o comportamento desejado, foram analisados, primeiramente, os valores das resistências com a alteração da temperatura e de pressão, depois a aplicação dos piezoresistores em configuração com de ponte para a comparação com os sensores. As simulações aplicadas para a obtenção destas piezoresistências foram baseadas na figura 9, onde a área tracejada representa o piezoresistor.

Os coeficientes térmicos utilizados, tanto para estas piezoresistências quanto para as simulações dos sensores, foram atribuídas pelos valores obtidos experimentalmente, As que no caso destas piezoresistências foi de  $2157\text{ppm}/^{\circ}\text{C}$ , para a longitudinal e  $2131\text{ppm}/^{\circ}\text{C}$ ,

para a transversal. As figuras 24 e 25 são as simulações das piezorresistências com os efeitos longitudinais e transversais <sup>21</sup> respectivamente:

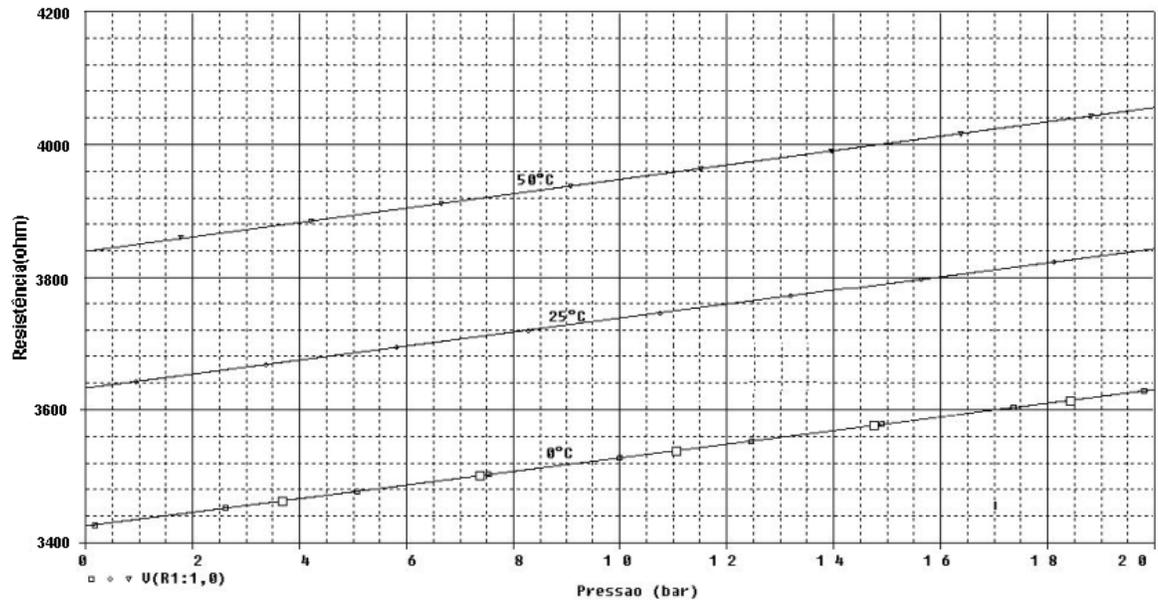


Figura 24: simulação da piezorresistência longitudinal para três temperaturas

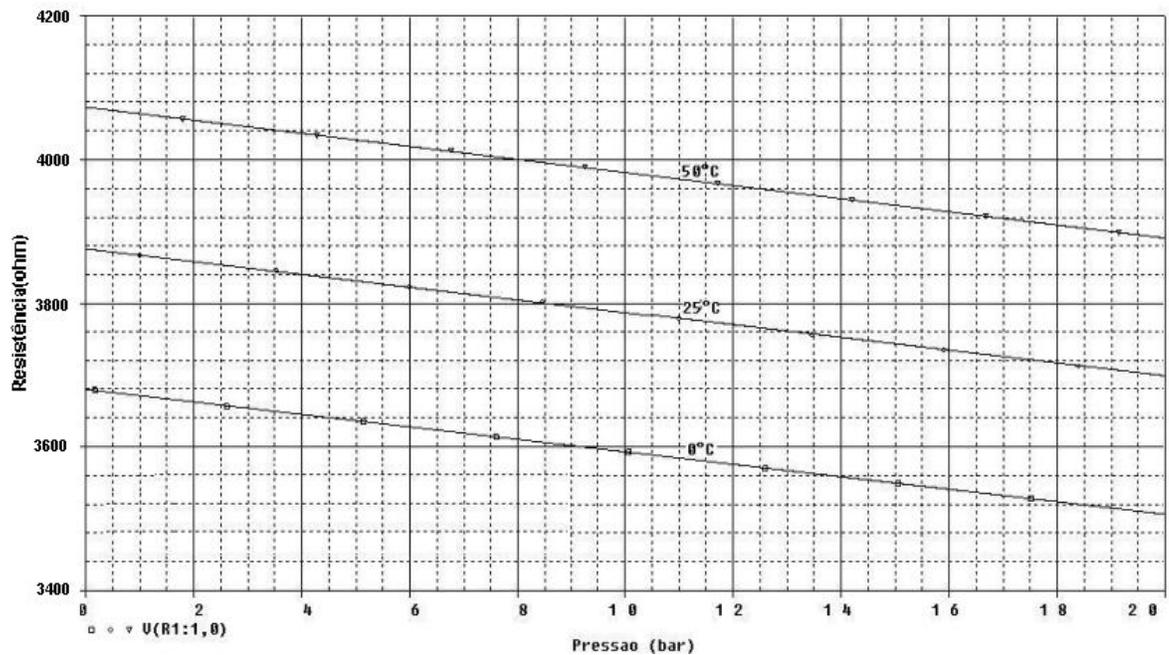


Figura 25: simulação da piezorresistência transversal para três temperaturas

#### 4.4.2 Simulações dos sensores de pressão

São apresentadas as simulações dos três sensores de pressão, sem a aplicação dos resistores de compensação e calibração e depois com a sua aplicação. Para as simulações foi utilizada a alimentação de  $235\mu\text{A}$ , já que esta se mostrou bem estável, facilitando as medidas realizadas nos sensores.

##### 4.4.2.1 Simulação dos sensores de pressão

As simulações realizadas mostram a variação da tensão de saída pela pressão aplicada para cinco temperaturas distintas. Para definir o valor do ganho no elemento “E”, o

qual representa o fator C e as dimensões do sensor, foi atribuído um valor aleatório e com isso o valor da corrente, que representa a pressão aplicada foi atribuído da mesma forma. Assim, este valor na primeira medida nos serve de parâmetro para definir qual é a relação da corrente com a pressão As figuras 26, 27 e 28 mostram os resultados de tais simulações:

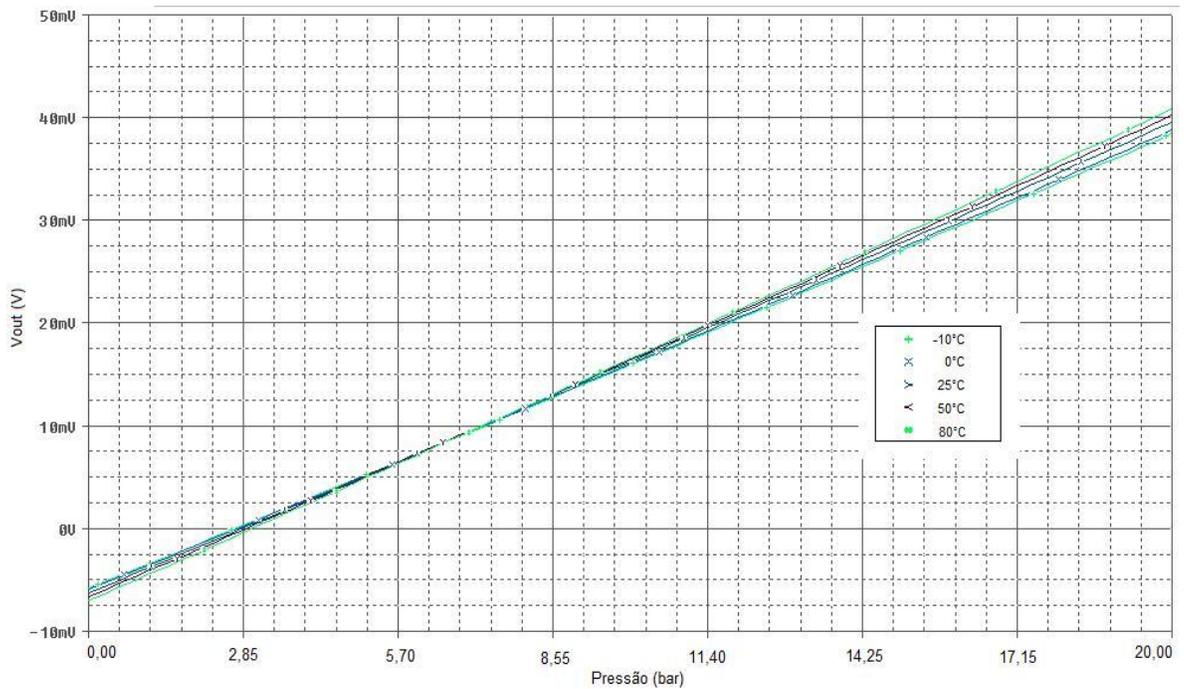


Figura 26: simulação para o sensor 1

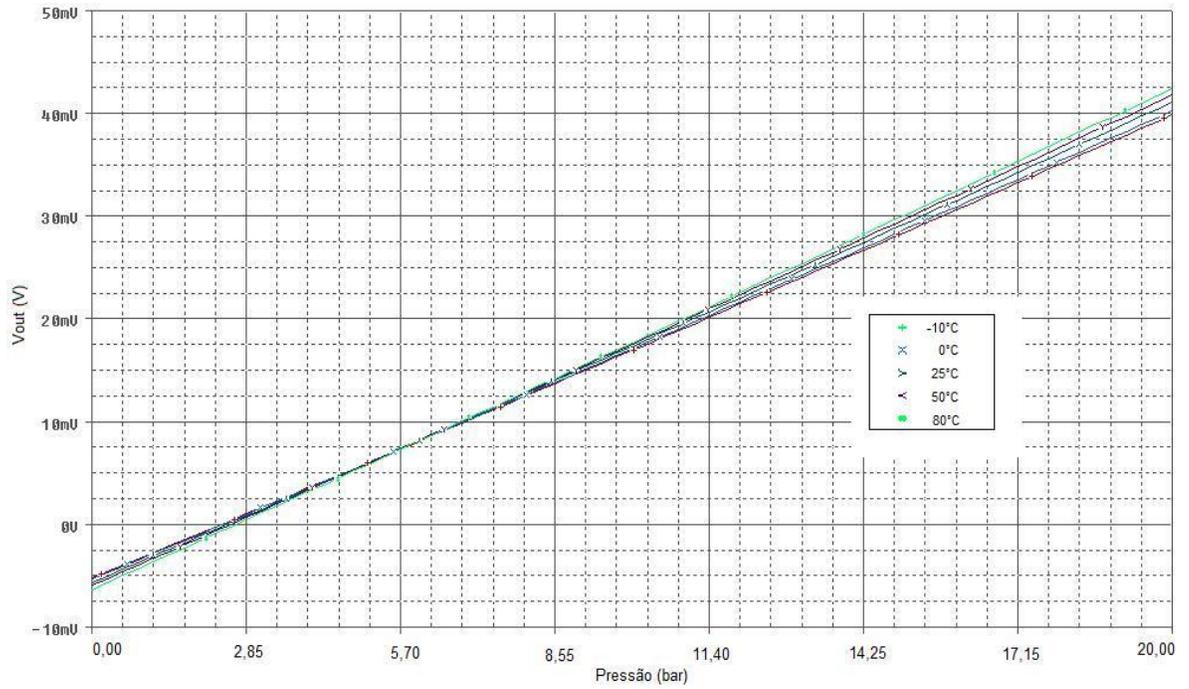


Figura 27: simulação para o sensor 2

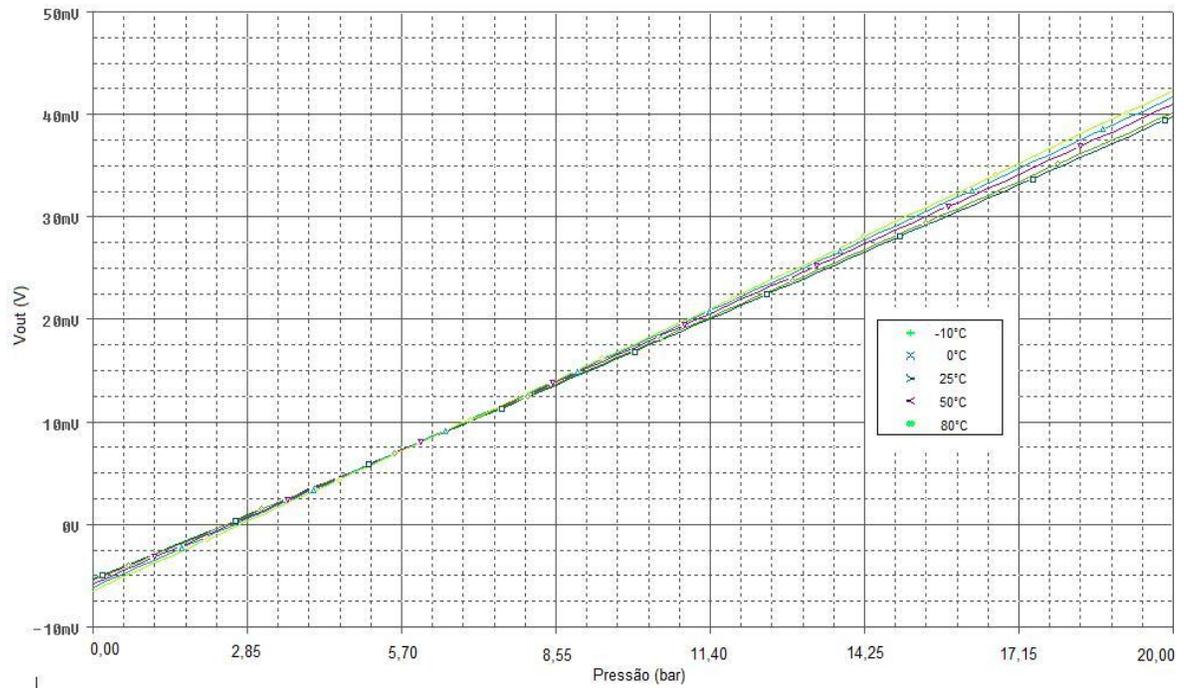


Figura 28: simulação para o sensor 3

Podemos notar que nestas simulações as tensões de saída, sem a aplicação de pressão, são todas negativas com o valor de  $-5\text{mV}$ , estes são os resultados da diferença das resistências entre os lados da ponte, sendo que o lado  $-OUT$  é maior do que o lado  $+OUT$ .

Houve uma pequena variação na tensão de saída com relação à temperatura, isso se deve ao fato da diferença dos coeficientes térmicos resistivos.

Quando aplicada pressão o sinal de saída mudou para  $80\text{mV}$  o que resulta em uma variação de  $110\text{mV}$ . Com a aplicação de temperatura houveram deslocamentos mais discriminados dos efeitos da temperatura.

#### **4.4.2.2 Simulação dos sensores de pressão com compensação e calibração**

Os resistores utilizados para estas simulações foram somente com seus valores nominais, assim o efeito da temperatura sobre cada um deles não terá nenhum tipo de influência sobre o resultado na tensão de saída, porém estes serão de grande valia para a avaliação dos resultados. As figuras 29, 30 e 31 são as simulações dos sensores 1, 2 e 3 respectivamente com os resistores de compensação e calibração:

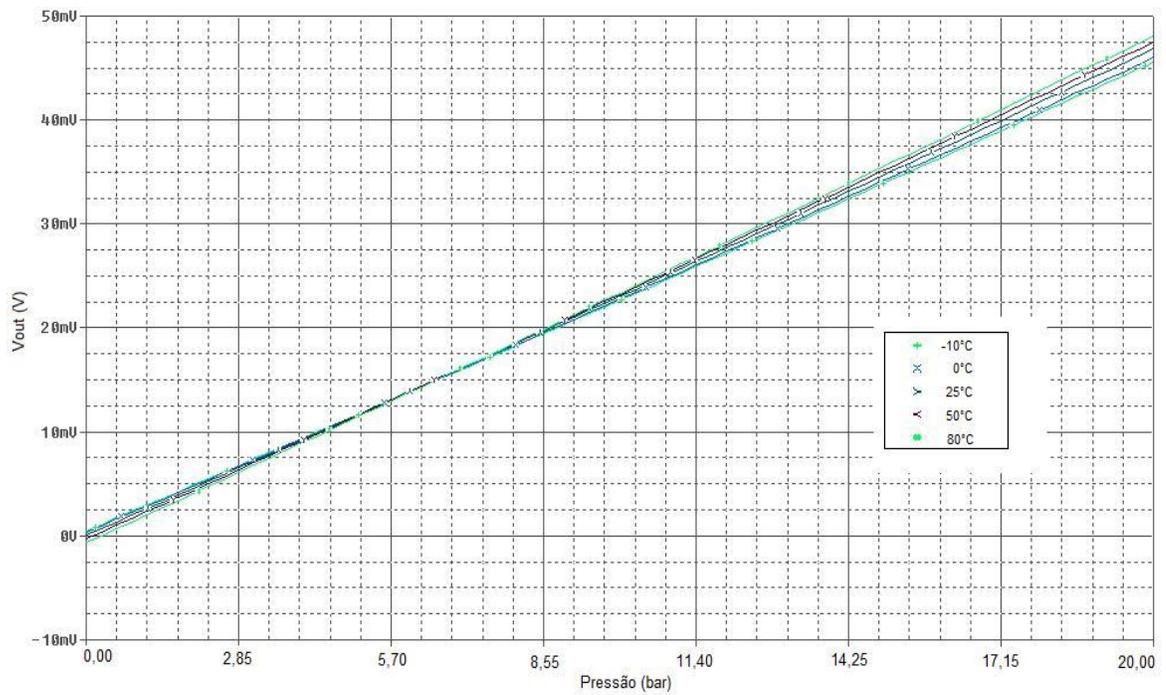


Figura 29: simulação compensada e calibrada para o sensor 1

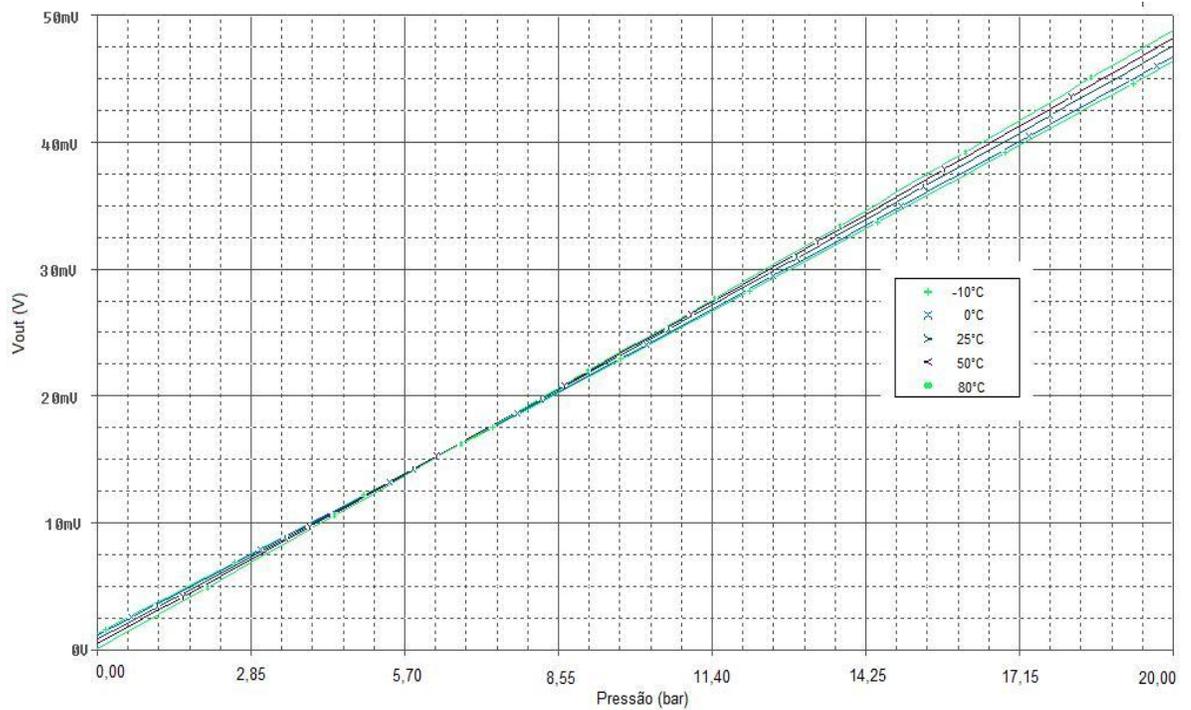


Figura 30: simulação compensada e calibrada para o sensor 2

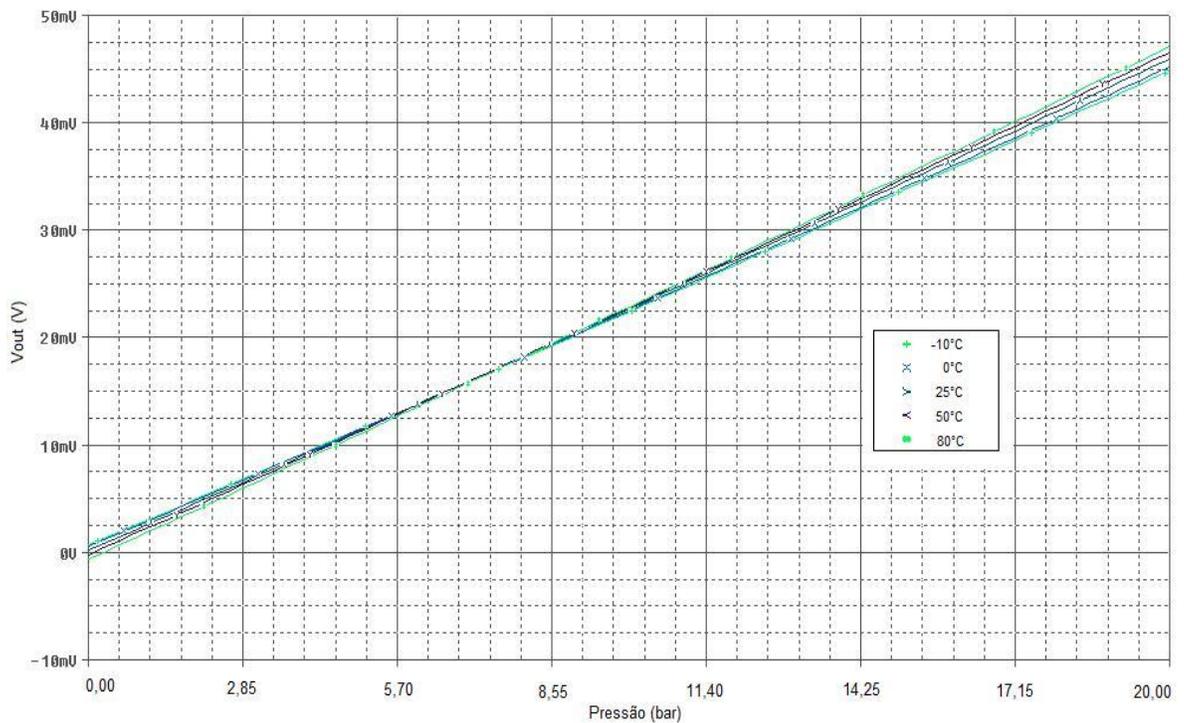


Figura 31: simulação compensada e calibrada para o sensor 3

Através da aplicação dos resistores nos sensores, notamos que o valor da tensão de *offset* aproxima da tensão zero e que a variação com a temperatura diminui neste ponto também

#### 4.5 Resultados Experimentais

A seguir, serão mostrados os resultados obtidos experimentalmente. Estes estão separados em valores das piezoresistências, para comparação com os valores das

simulações e valores dos sensores sem e com a aplicação dos resistores de compensação e calibração.

Nas análises realizadas são mostrados os resultados da variação da pressão em cada temperatura para os três sensores comparando o efeito com e sem os resistores

#### 4.5.1 Piezoresistências

Os gráficos a seguir são mostrados os resultados experimentais para os sensores de pressão. A seguir são mostrados nas figuras 32 e 33 os gráficos para as medidas feitas nos piezoresistores longitudinal e transversal.

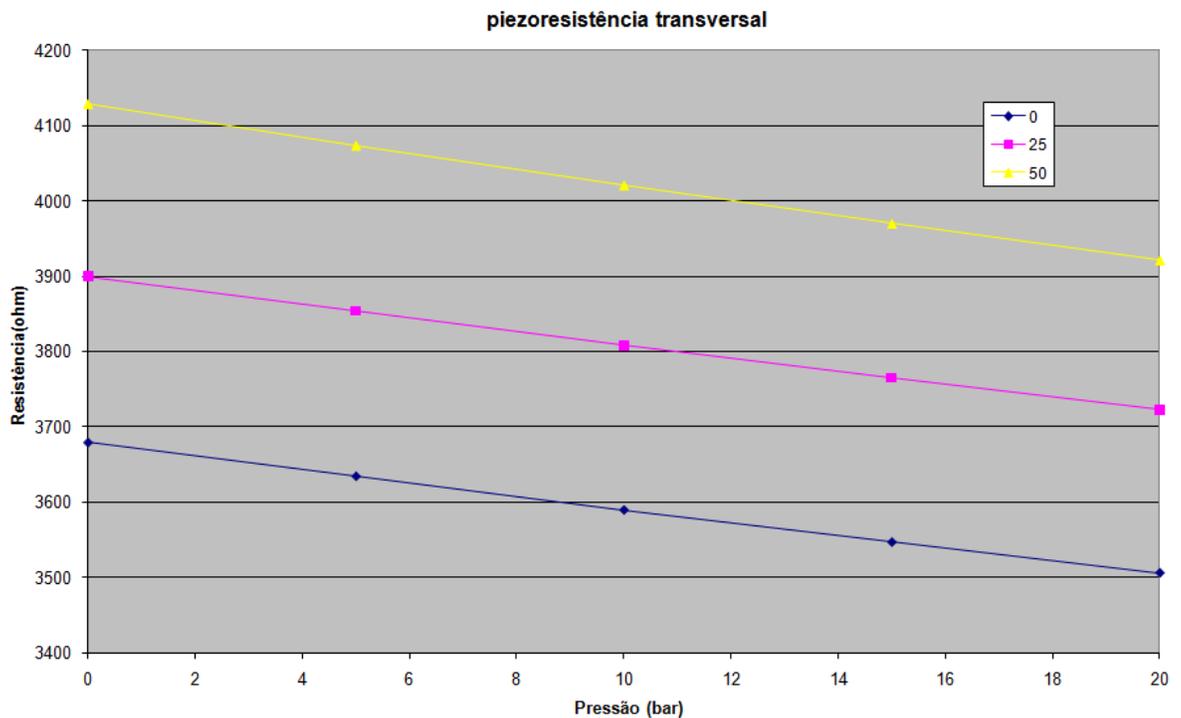


Figura 32: comportamento experimental de uma piezoresistência transversal

Na piezorresistência transversal observou-se o valor da resistência inicial de 3870 e com a aplicação de 20bars a resistência variou para 3700, com respeito a temperatura de 25°C.

Desta forma, ocorrerá a variação  $|\Delta R|$  para as piezorresistências com configuração de ponte completa, caracterizando a equação (12).

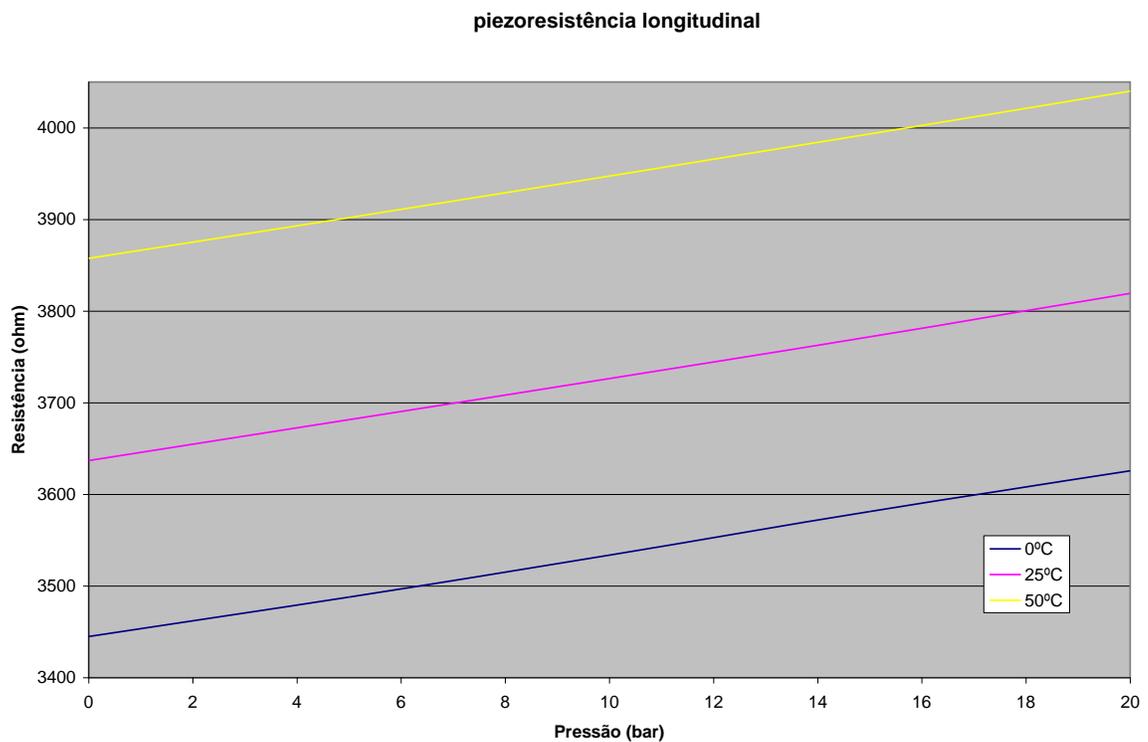


Figura 33: comportamento experimental de uma piezorresistência longitudinal

Foram utilizadas três temperaturas para analisar a eficácia do modelo, tanto para o efeito da temperatura quanto para o efeito piezoresistivo.

Podemos observar que o valor inicial, isto é, sem a aplicação de pressão, para a resistência longitudinal foi de aproximadamente 3630 ohm variando com a pressão máxima

até 3840 à 25°C. Com a variação da temperatura, houve um deslocamento dos valores de  $\pm 200$  ohm. Este deslocamento se manteve praticamente igual sobre a outra piezoresistência já que os coeficientes térmicos são próximos.

Esta diferença entre as piezoresistências é devido ao processo de fabricação e é um valor esperado, pois para a produção de sensores de pressão existe um melhor casamento do sinal de saída devido a isto. As figuras 12, 13 e 14 abaixo são os resultados obtidos experimentalmente para os três sensores analisados:

#### **4.5.2 Sensores de Pressão**

Nesta seção serão apresentados os gráficos dos resultados experimentais dos sensores de pressão com e sem a aplicação da temperatura. Além disso, são apresentados os gráficos referentes às variações de pressão para cada pressão aplicada em faixas de temperaturas distintas.

##### **4.5.2.1 Sensores sem compensação**

As figuras 34, 35 e 36, a seguir, mostram as curvas características dos sensores de pressão. Podemos notar que os valores da tensão de *offset* estiveram em torno de -7mV.

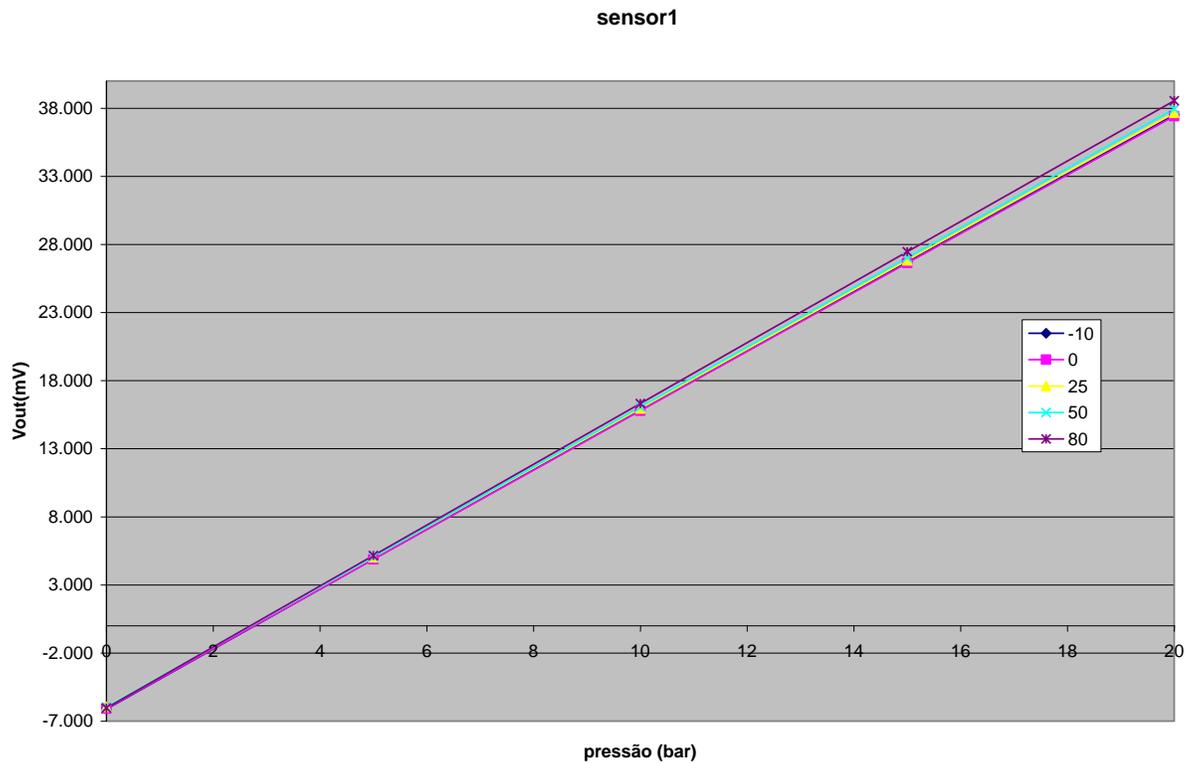


Figura 34: resultado experimentais para o sensor 1

Podemos verificar que os valores da tensão de saída se manteve em -15mV quando não houve a aplicação de pressão e com a aplicação da pressão máxima a tensão de saída variou para 80mV, estes valores são vistos nos três sensores medidos. Com aumento da temperatura, as tensões sem a aplicação de pressão ficaram menores e as tensões de saída com a aplicação da pressão máxima ficaram maiores, isto ocorre pela combinação dos coeficientes térmicos dos sensores influenciarem um dos lados do braços da ponte mais do que o outro lado.

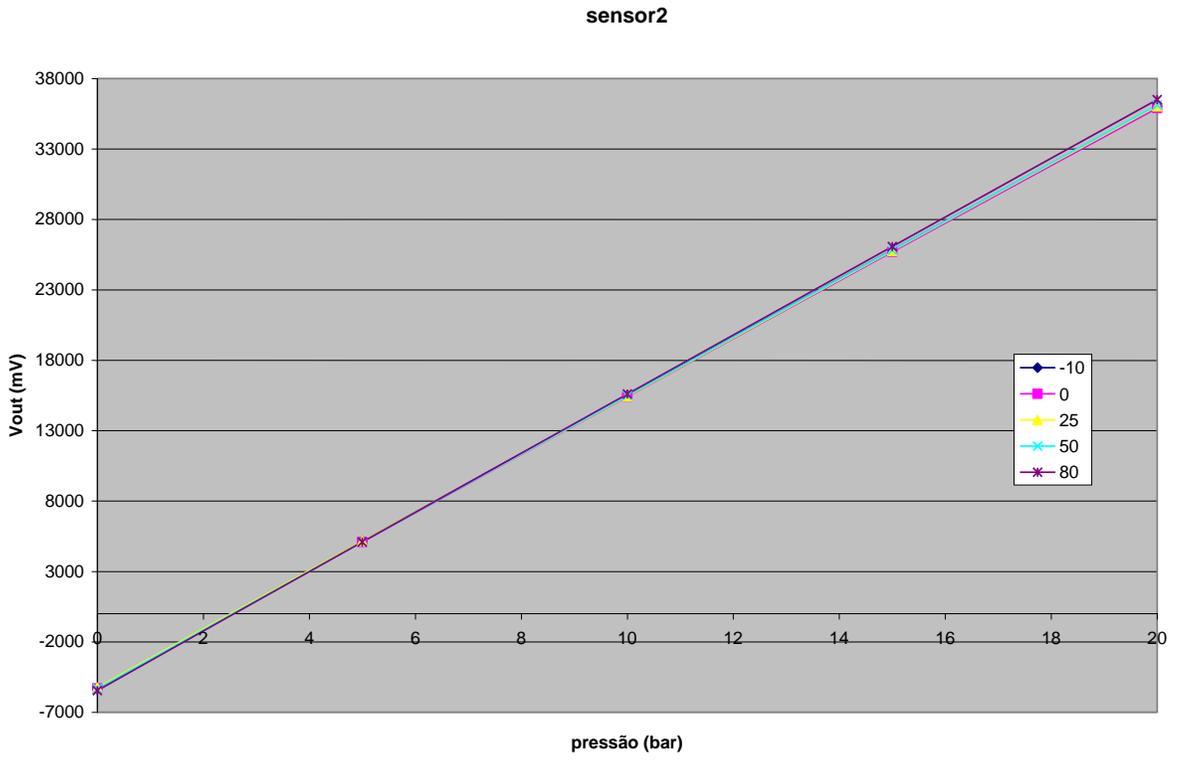


Figura 35: resultado experimentais para o sensor 2

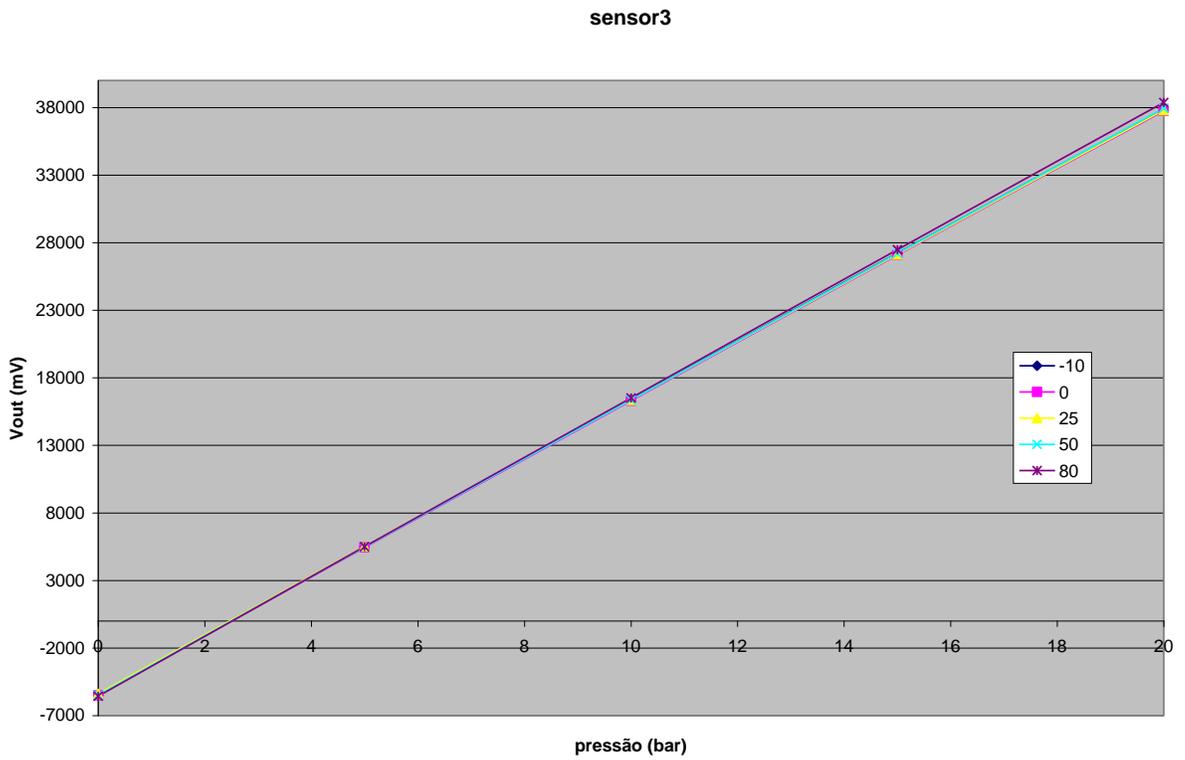


Figura 36: resultado experimentais para o sensor 3

#### 4.5.2.2 Erro absoluto da pressão sem compensação

Os gráficos da diferença de pressão mostrados abaixo foram definidos utilizando o método de mínimos quadrados. Com este método foi definido o valor do coeficiente angular que melhor ajusta todas as retas, deste modo, foi utilizados este coeficiente pra definir uma curva que melhor correlaciona todos os pontos.

$$MQ = \sum \frac{X.Y}{X^2} \text{ [mV/bar]} \quad (32)$$

Onde X são os valores das pressões e Y da tensão de saída, no caso do coeficiente linear, este foi definido como zero, já que é considerado que a zero de pressão não existe tensão na saída. Assim os valores são feitos pela divisão da diferença entre o valor calculado e o valor medido pelo coeficiente MQ definido.

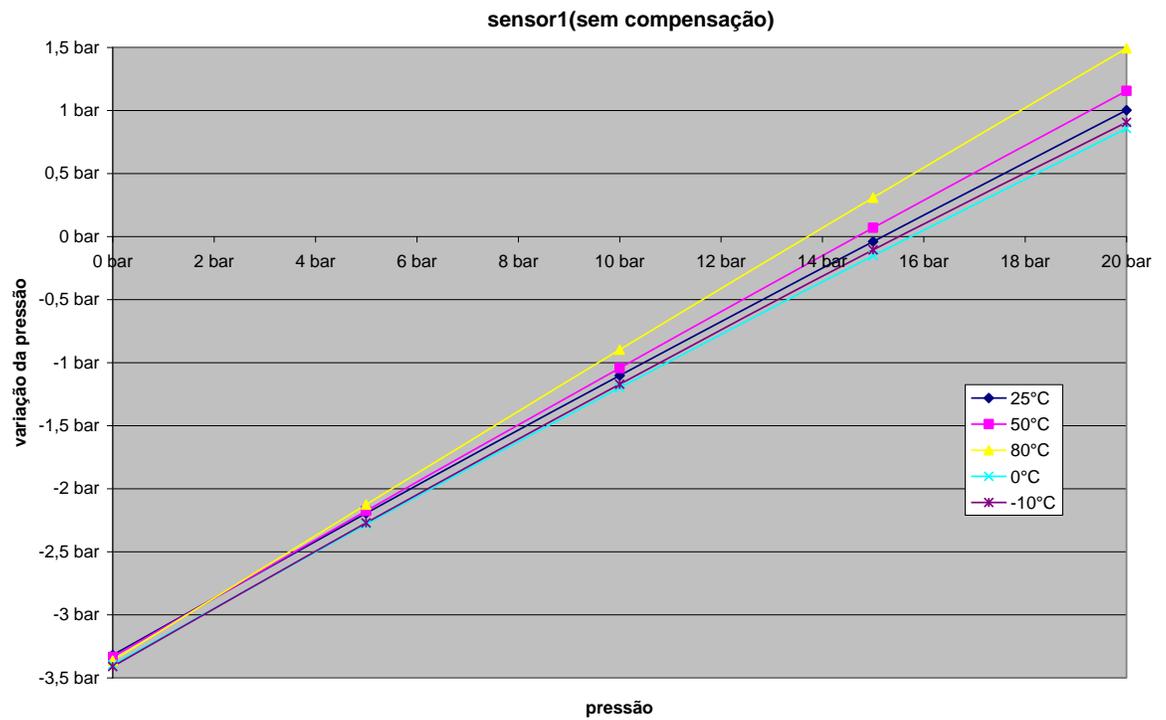


Figura 37: erro referente a cada pressão aplicado para o sensor 1 sem compensação e calibração

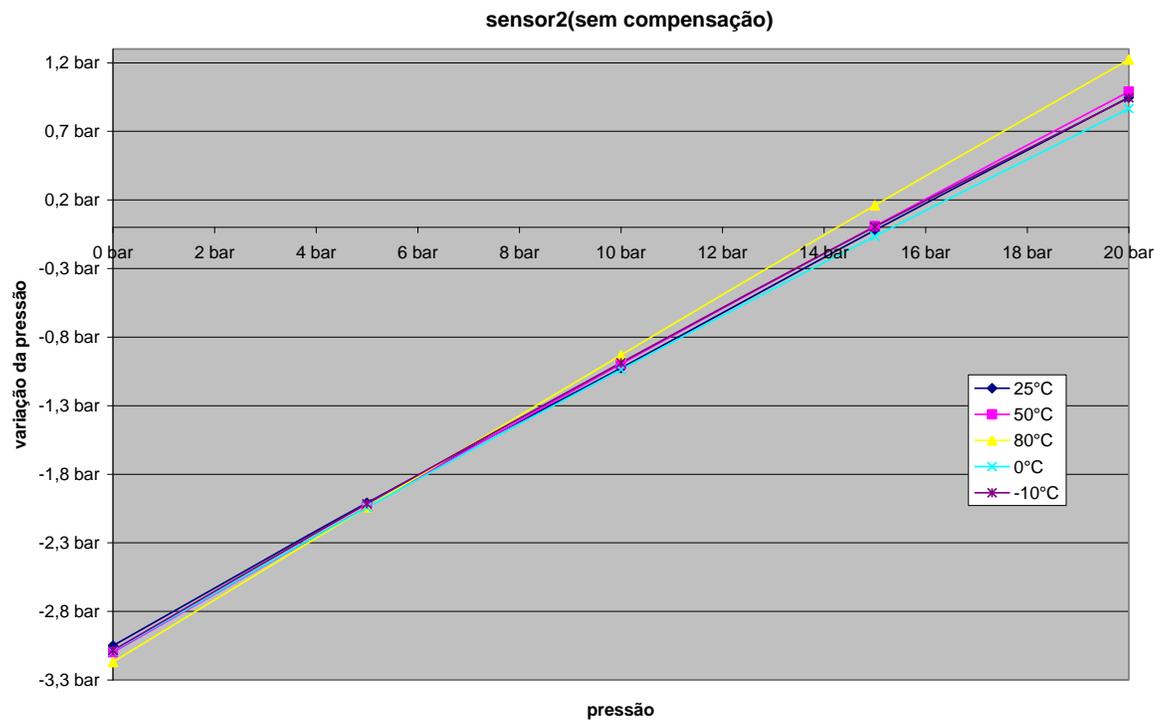


Figura 38: erro referente a cada pressão aplicado para o sensor 2 sem compensação e calibração

Com a variação da temperatura temos uma boa aproximação dos valores obtidos com as simulações. Os valores das piezoresistências na temperatura ambiente foram próximos aos simulados pelo fato que os efeitos dos coeficientes temperatura não são considerados, deste modo Os resultados para os três sensores com relação à tensão de saída Os valores das resistências encontrados são iguais para a temperatura ambiente sem a aplicação da pressão. Porém com a aplicação de pressão e com a variação da temperatura podemos notar que houve pequenos deslocamentos nos valores de saída devido ao fato que a dependência térmica da piezorresistência não é linear.

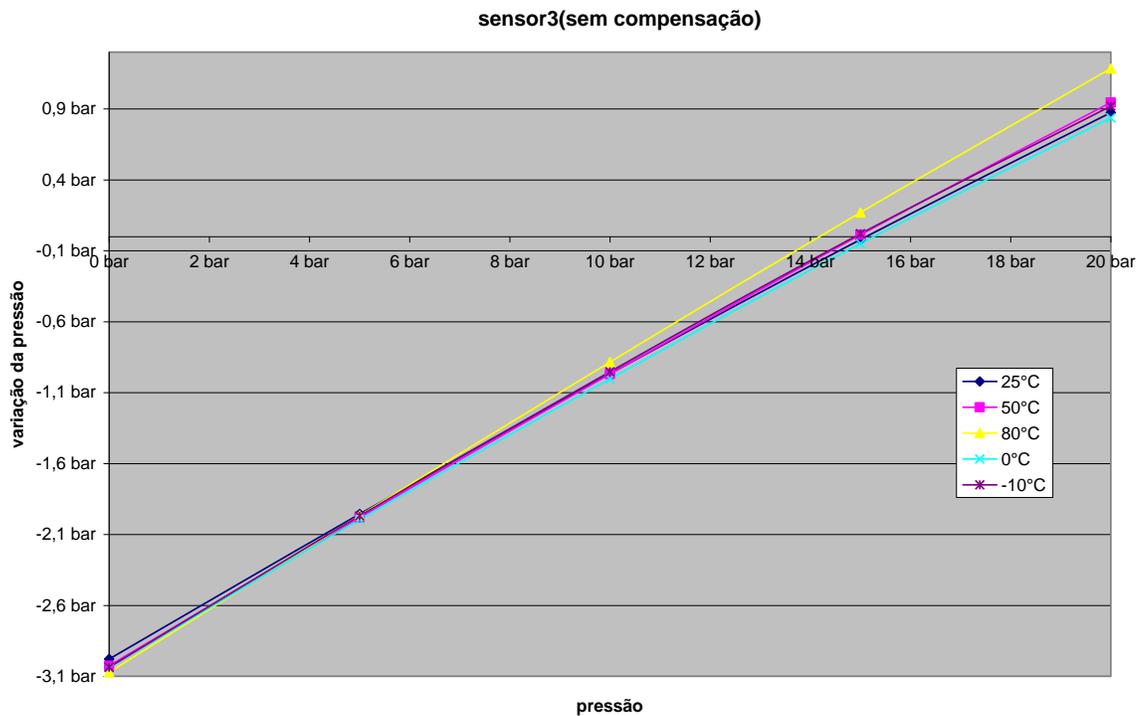


Figura 39: erro referente a cada pressão aplicado para o sensor 3 sem compensação e calibração

Comparando as simulações com os resultados experimentais, a variação no pior caso se deu em extremos de temperatura já que nestas condições o efeito térmico é muito mais acentuado.

### 4.5.2.3 Sensores com compensação e calibração

As figuras são os resultados obtidos com a aplicação dos resistores de calibração e compensação. Estes sensores foram alimentados com uma corrente constante de  $235\mu\text{A}$ .

As resistências dos dois lados da ponte tendem a se igualar com a inserção da restência de calibração, deste modo o valor da tensão de saída mostrados nestes gráficos com pressão aplicada de zero bar, é próximo de zero Volts.

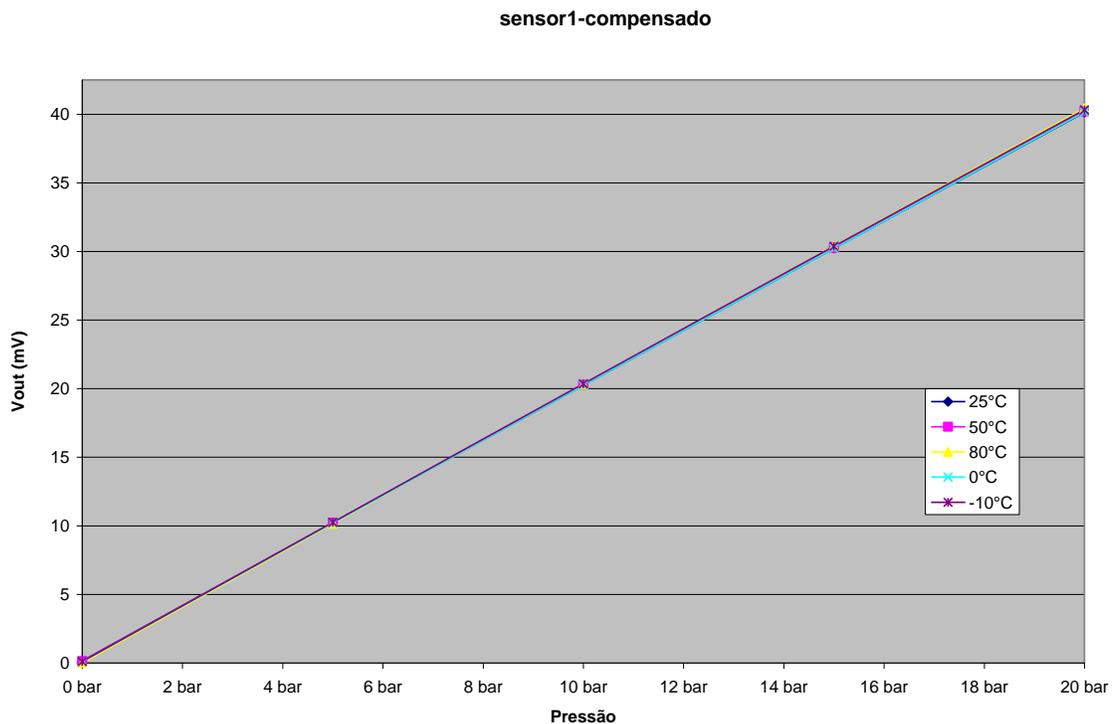


Figura 40: resultados experimentais para o sensor 1 compensado e calibrado.

Com a aplicação de pressão a tensão de saída se manteve no mesmo patamar de valores isso quer dizer que o valor da sensibilidade diminuiu pelo fato da resistência de compensação de temperatura estar em paralelo diminuindo o valor da resistência equivalente da ponte.

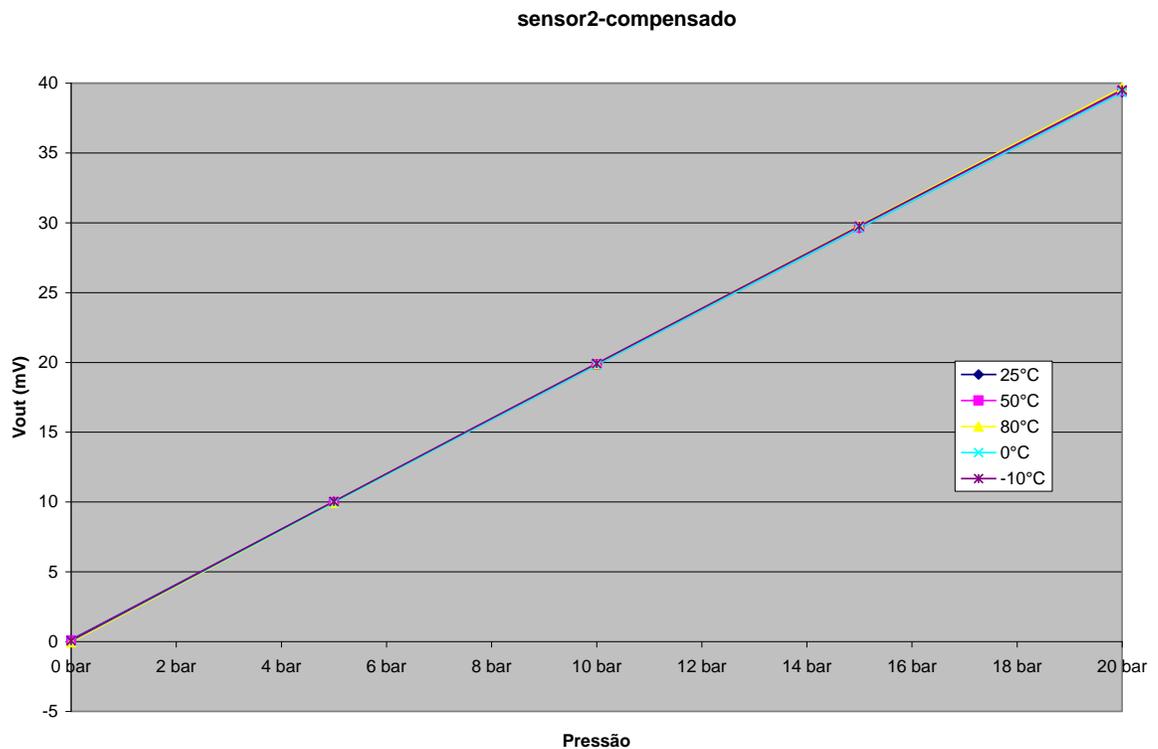


Figura 41: resultados experimentais para o sensor 2 compensado e calibrado.

Com relação à temperatura, tanto para a tensão de *offset* quanto para a tensão máxima de saída, é visível que as curvas dos sensores com cada temperatura diminuíram a divergência, isso acontece devido a compensação sobre a resistência que mais sente o efeito da mudança da temperatura e o efeito sobre a resistência total da ponte.

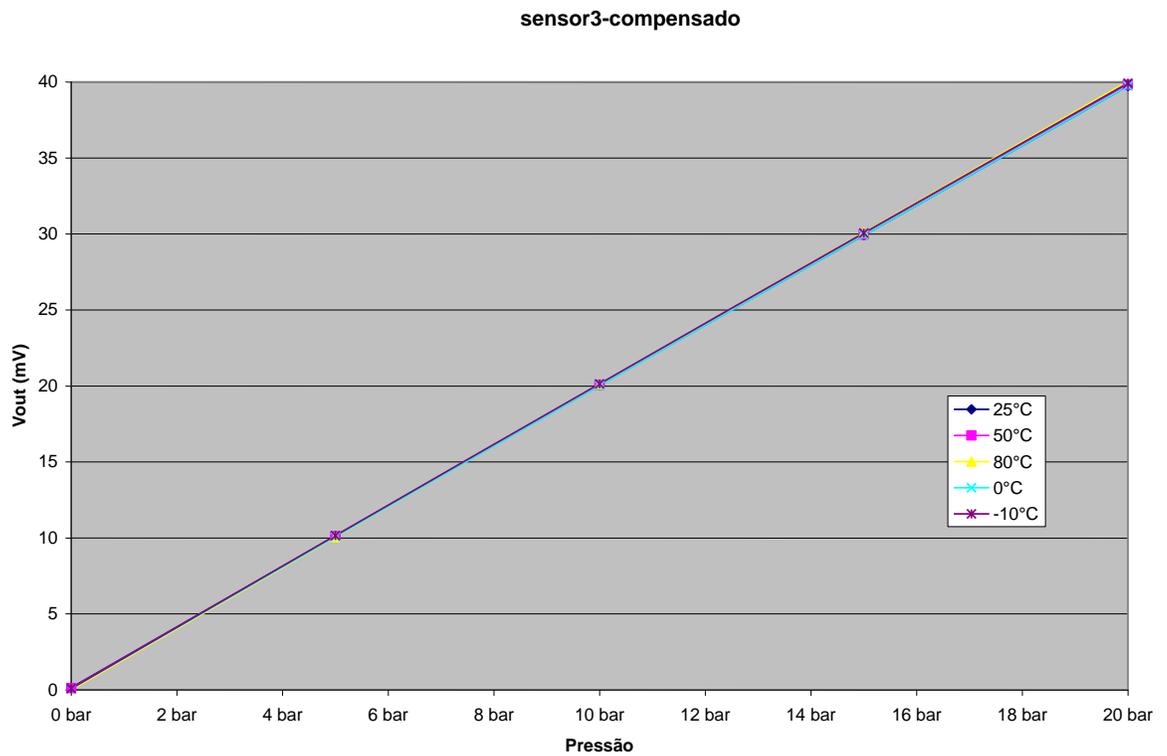


Figura 42: resultados experimentais para o sensor 3compensado e calibrado.

#### 4.5.2.4 Erro absoluto da pressão com compensação

Os gráficos mostram a variação da pressão com relação à pressão aplicada para faixas de temperaturas distintas para os sensores com a aplicação dos resistores de calibração e compensação.

A variação da pressão foi de frações da pressão aplicada, diferentemente do caso anterior a este. Nas figuras podemos observar estes gráficos:

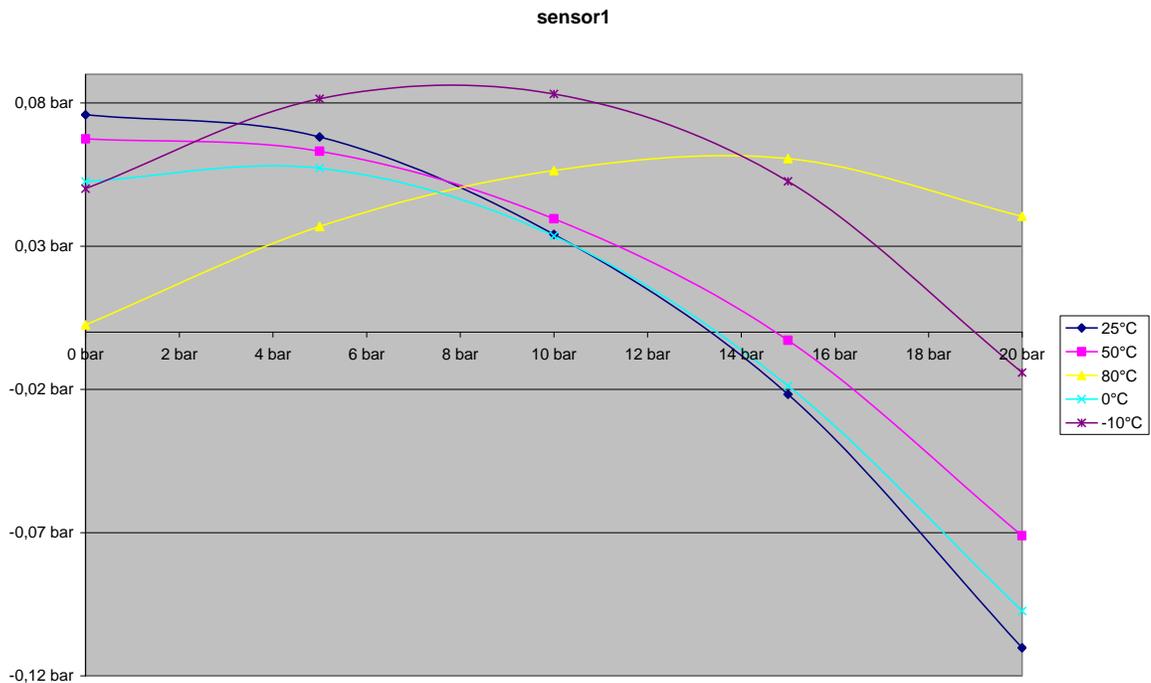


Figura 43: erro referente a cada pressão aplicada para o sensor 1 com compensação e calibração

Para a faixa de temperatura compensada temos que, no pior caso nos três sensores, isto na temperatura de 25°C, que a medida realizada se deslocou da curva da pressão média com um  $|\Delta P| \approx 0,18$  bars para a pressão de 0,20 bars.

Porém três sensores, as curvas de 0°C, 25°C e 50°C tem suas curvas mais semelhantes se comparados com as curvas com temperaturas dos extremos, isso não se dá somente pelo fato dos valores das temperaturas serem próximos, mas também pelo fato dos cálculos resistivos serem feitos para tais temperaturas.

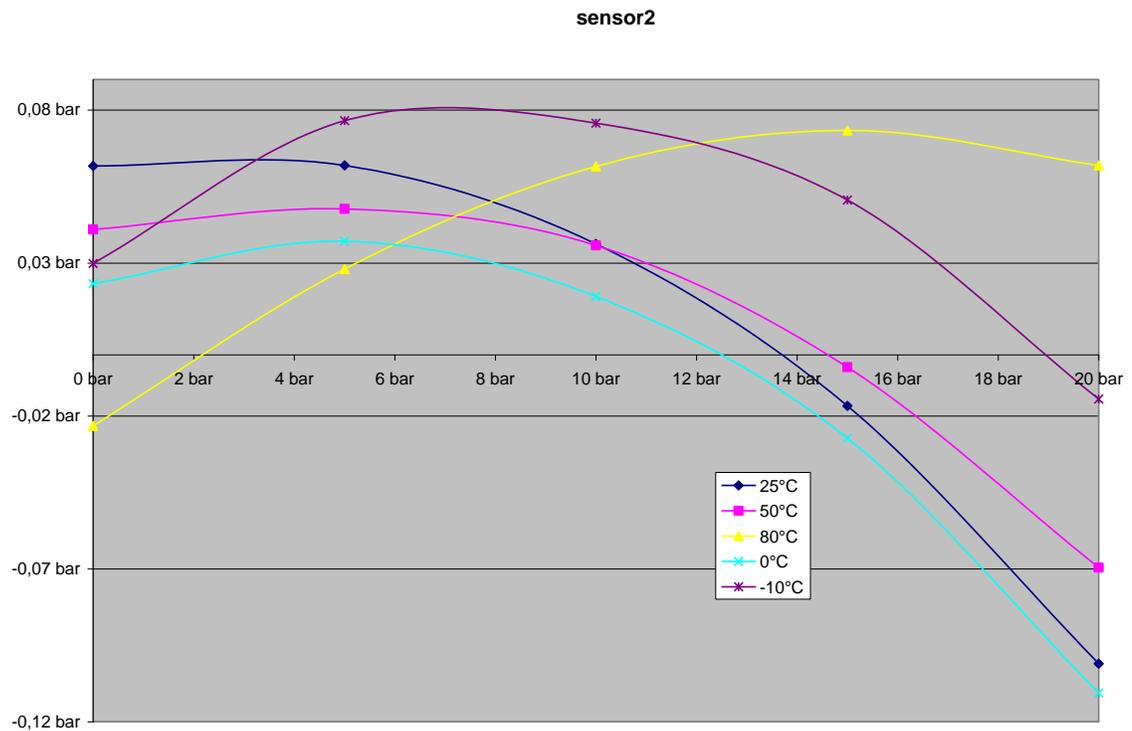


Figura 44: erro referente a cada pressão aplicada para o sensor 2 com compensação e calibração

Nestes gráficos, como nos das figuras 37, 38 e 39, foram realizadas medidas sobre o sensor e determinado o coeficiente que melhor se ajusta na reta. Desta forma, o modo de obtenção foi o mesmo.

O fato da amostragem do sinal estar mais visivelmente parabólico mostra que com a compensação o valor da variação da pressão ficou com menos linear se analisarmos toda a faixa de pressão.

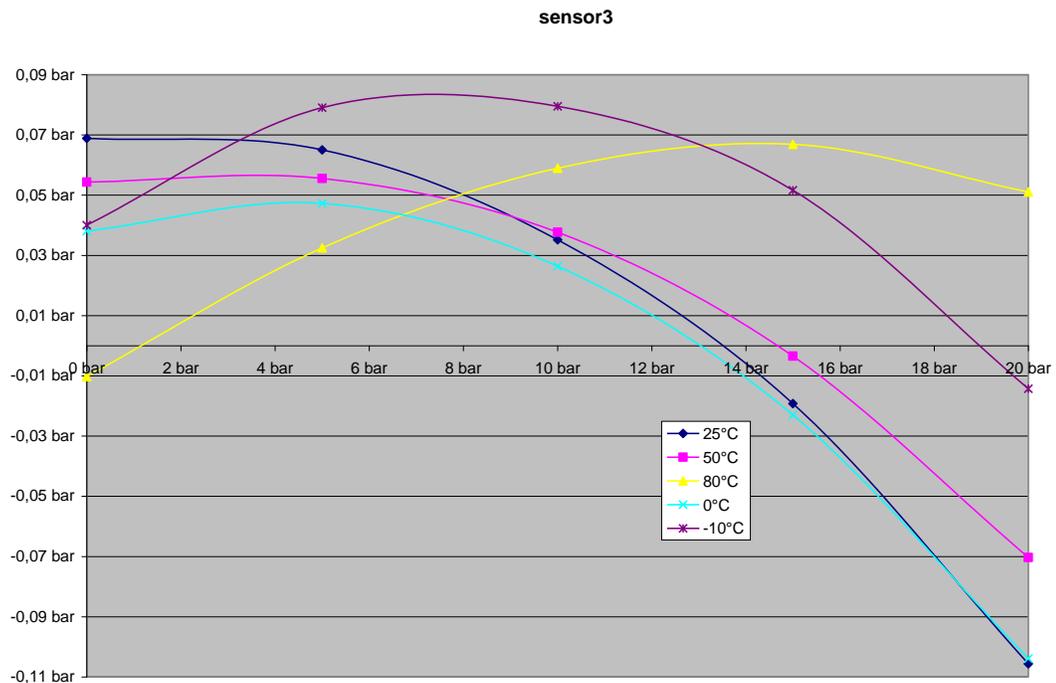


Figura 45: erro referente a cada pressão aplicada para o sensor 3 com compensação e calibração

Os sensores tiveram uma diminuição percentual do valor médio obtido, comparando os dois casos, de 95% no pior caso amostrado, o que é notado pela ordem de grandeza de ambos.

### 4.5.3 Comparação dos resultados com e sem compensação e calibração.

Nesta seção será mostrada a comparação entre os resultados dos sensores com as resistências de compensação e calibração e sem tais componentes. Estes resultados são análises feitas entre as variações de pressão ocasionadas pelas imperfeições nos sensores e

pelo efeito térmicos sobre os mesmos. A tabela 4 mostra os resultados das comparações entre os três sensores:

Tabela 5: comparação dos sensores com e sem compensação e calibração

Sensor	Parâmetro	Sem compensação	Com compensação
Sensor1	$V_{offset}$	~5mV	~0,15mV
	$ \Delta P_{m\acute{a}x} $	6,9 bar	0,20bar
Sensor2	$V_{offset}$	~5mV	~0,1mV
	$ \Delta P_{m\acute{a}x} $	5,4 bar	0,09bar
Sensor3	$V_{offset}$	~5mV	~0,1mV
	$ \Delta P_{m\acute{a}x} $	4 bar	0,18bar

#### 4.6 Caracterização e Parâmetros dos sensores

A caracterização dos sensores foi feita analisando as piezoresistências da ponte, obtendo dela o valor nominal de cada uma, a influência da pressão, a influência da temperatura, alimentação e como a temperatura influencia nos valores das piezoresistências para cada variação de pressão. As tabelas mostram estes resultados:

Tabela 6: caracterização do sensor 1

sensor 1					
	resistência [ $\Omega$ ]	$\Delta R (P) \pm \sigma$ [ $\Omega/\text{bar}$ ]	$\Delta R (T) \pm \sigma$ [ $\Omega/^\circ\text{C}$ ]	$\Delta R (I@4\text{mA}) \pm \sigma$ [ $\Omega$ ]	$\Delta R (T)_P \pm \sigma$ [ $\Omega/\text{bar} \cdot ^\circ\text{C}$ ]
resistor 1	3574	10,55±0,5605	7,6842±1,5229	-73,3333±24,6407	0,0025+/-0,0033
resistor 2	3616	10,05±1,2266	7,7408±1,4027	-82,6667±29,4344	-0,0015±0,006
resistor 3	3612	7,9±1,3848	7,5775±1,6501	-87,8333±36,4593	-0,0024±0,0096
resistor 4	3553	8,55±1,4717	7,3583±2,2422	-96,3333±25,9224	0,0014±0,0066
Rb	3589	0,15±0,9876	7,9125±1,2206	-89,0001±0,7607	-0,0053±0,007

Os valores nominais das resistências podem ser separados com relação ao posicionamento deles na configuração de ponte, isto quer dizer que em nos três sensores os

valores das resistências 1 e 4 e das resistências 2 e 3 são semelhantes entre si já que estes são separados em longitudinais e transversais respectivamente.

Tabela 7: caracterização do sensor 2

sensor 2					
	resistência [Ω]	$\Delta R (P) \pm \sigma$ [Ω/bar]	$\Delta R (T) \pm \sigma$ [Ω/°C]	$\Delta R (I@4mA) \pm \sigma$ [Ω]	$\Delta R (T)_P \pm \sigma$ [Ω/bar.°C]
resistor 1	3641	9,5±0,7715	7,7733±2,1321	73,5745±31,0099	0,004±0,0082
resistor 2	3680	8,7±0,8529	7,9675±1,5777	54,9433±1,5242	0,0009±0,0095
resistor 3	3690	8,45±0,7607	7,91±1,6772	75,3901±5,5502	0,005±0,0201
resistor 4	3640	8,4±4,03336	7,925±1,6207	75,7376±4,2983	0,0062±0,0171
Rb	3662	0,25±0,8431	7,8808±2,0137	68,2411±2,2166	0,004±0,011

A variação das resistências com a pressão teve seu valor excursionado de 10,55 Ω/bar até 8,15 Ω/bar. Estes valores são as respostas obtidas com aplicação de pressão e a análise realizada para cada valor pontual desta.

As piezoresistências foram influenciadas com a temperatura com um valor médio de ~8 Ω/°C. Este valor mostra uma forte influência da temperatura, como mostrado na parte teórica.

Tabela 8: caracterização do sensor 3

sensor 3					
	resistência [Ω]	$\Delta R (P) \pm \sigma$ [Ω/bar]	$\Delta R (T) \pm \sigma$ [Ω/°C]	$\Delta R (I@4mA) \pm \sigma$ [Ω]	$\Delta R (T)_P \pm \sigma$ [Ω/bar.°C]
resistor 1	3649	9,75±0,7607	8,4233±1,6510	86,2411±61,6424	-0,0027±0,0066
resistor 2	3692	9,65±0,9876	8,3667±1,8003	78,6099±63,5420	-0,0056±0,0103
resistor 3	3696	8,15±0,6681	8,2458±2,0318	92,0567±65,1833	-0,00458±0,0108
resistor 4	3646	9,1±0,2572	8,2467±1,956	92,4043±61,8077	-0,0028±0,0077
Rb	3671	0,2±0,3637	8,4425±1,6105	87,9078±62,5456	-0,004±0,0118

A quinta coluna mostra a variação que as piezoresistências tiveram para o pior caso, corrente de 4mA, esta variação foi obtida com relação a medida ôhmica realizada a qual induz uma corrente de 100 micro amperes.

A última parte da tabela mostra a mudança da piezoresistência com a variação da pressão e com a mudança da temperatura, isso nos mostra qual é a influência que a temperatura se faz na variação da pressão resultando na variação da resistência.

Todos os valores são médias aritméticas e os seus desvios padrões foram obtidos com a utilização da tabela *t-student* com 98% de confiança aplicada com uma grau de liberdade igual a 5, isso se dá pela quantidade de informações adquiridas durante o processo de caracterização.

A seguir são mostrados os parâmetros obtidos da caracterização dos sensores. Estes parâmetros são separados em valores compensados e não compensados com a utilização da corrente de 235 $\mu$ A, pois esta se mostrou com tempo de estabilização menor e por ser utilizada em processos de transmissores de pressão industrial. As tabelas mostram tais resultados:

Tabela 9: parâmetros do transdutor 1

Sensor 1 @ 235 $\mu$ A			
Parâmetros	Não compensado	Compensado	Unidade
<i>Voffset</i>	-5,956	0,153	[mV]
TCO	0,01	0,098	%FSO
TCR	0,05	0,046	%FSO
<i>Span</i>	43,626	39,975	[mV]
Sensibilidade	2,1813	1,99875	[mV/bar]
TCS	0,000193921	-1,15072E-05	[ppm/°C]
THOffset	- $\Delta T = 0,046 / +\Delta T = 0,125$		[mV]

Com a aplicação do resistor de calibração o valor da tensão de *Voffset* teve uma redução de cerca de 97%, porém o valor do coeficiente térmico do *offset* (TCO), teve uma variação de 376, 1 para 3922 ppm/°C. Este valor corresponde o quanto que a tensão nominal varia com a temperatura, mas como o valor do valor compensado é muito menor do que o aumento do TCO, a variação final com a temperatura também é menor pra abaixas temperaturas. Podemos verificar esta afirmação nos gráficos de erro de cada curva, mostrado anteriormente.

Tabela 10 parâmetros do transdutor 2

sensor 2@235μA			
Parâmetros	não compensado	compensado	Unidade
<i>Voffset</i>	-5,249	0,122	[mV]
TCO	0,02	0,144	%FSO
TCR	0,054	0,049	%FSO
<i>Span</i>	41,289	39,221	[mV]
Sensibilidade	2,06445	1,96105	[mV/bar]
TCS	0,000945308	2,34568E-05	[ppm/°C]
THOffset	-ΔT= 0,001/+ΔT=0,05		[mV]

Como descrito no artigo utilizado como base para os cálculos, o valor da sensibilidade, *span* e TCS foram também diminuídos em cerca de 8 % para a sensibilidade e *span*, e cerca de 20% no caso do sensor 3. Como houve a inserção de um resistor em paralelo com a ponte a influência da temperatura ficou vinculada a este também, reduzindo assim o valor do coeficiente térmico resistivo.

Tabela 11: parâmetros do transdutor 3

sensor 2@235 $\mu$ A			
Parâmetros	não compensado	compensado	Unidade
<i>Voffset</i>	-5,395	0,1375	[mV]
TCO	0,022	0,118	%FSO
TCR	0,056	0,0467	%FSO
<i>Span</i>	43,21	39,598	[mV]
Sensibilidade	2,1605	1,9799	[mV/bar]
TCS	8,00741E-05	1,74251E-05	[ppm/°C]
THOffset	- $\Delta$ T= 0,079/+ $\Delta$ T=0,132		[mV]

O valor de THOffset foi realizado para a temperatura de referência de 25°C, os símbolos  $-\Delta$ T e  $+\Delta$ T, representam se a temperatura estava vindo do semi-ciclo com temperaturas menores do que 25°C e se a temperatura estava vindo do semi-ciclo com temperaturas maiores do que 25°C, respectivamente.

A tabela12 abaixo mostra como os sensores respondem a pressão aplicada, isso quer dizer que para um dado valor de tensão medido na saída é aplicado em uma das equações abaixo, o valor resultante será a pressão correspondente.

Tabela 12: equações características dos transdutores de pressão

	Compensado
Sensor1	$X(2,017\pm 0,0036)$ [mV/bar]
Sensor2	$X(1,977\pm 0,00409)$ [mV/bar]
Sensor3	$X(1,997\pm 0,00384)$ [mV/bar]

Foi considerada para tais equações uma reta de primeiro grau e aplicado para a determinação do coeficiente angular a lei dos mínimos quadrados com base nos valores experimentais. Este coeficiente corresponde a normal dos pontos, no caso do coeficiente linear, foi atribuído como zero já que a zero de pressão o valor deverá ser zero. Estes valores são referentes também a sensibilidade

#### **4.7 Análise dos resultados**

Os sensores de pressão piezorresistivos têm grande aceitação no mercado, devido ao baixo custo em grandes produções e boas características sensitivas devido ao substrato utilizado, no caso o silício.

Um dos maiores problemas com este sensor é sua dependência com a temperatura. O efeito que esta ocasiona pode ser de algumas dezenas de milivolts no sinal de saída do sensor.

A estabilização térmica e elétrica dos sensores tem a forma de decaimento exponencial e seus tempos são decorrentes do nível de precisão que se deseja e dos valores de variação da corrente e da temperatura. Para uma variação de 25 °C temos que o tempo de espera foi de  $18 \pm 5$  minutos para uma precisão de 0,05%.

As piezoresistências variaram em torno de 3600 para as R2 e R3 e 3700 para R1 e R4, estes valores são devido ao processo de fabricação e a distribuição sobre a membrana de silício.

Utilizando como princípio os efeitos longitudinais e transversais das piezoresistências, bem como seus respectivos coeficientes térmicos, simulações do dispositivo puderam ser realizadas, utilizando assim valores obtidos experimentalmente como base.

Nestas simulações, com as aproximações do coeficiente  $\pi/44$  e efeitos térmico de segunda ordem, pequenos desvios foram notados em seus resultados. Os erros referentes ao

efeito dos materiais e efeito do encapsulamento foram considerados na aquisição de dados, sendo assim implementados nestas.

Através do desequilíbrio da ponte e do efeito térmico sofrido em todo o circuito, o valor da tensão de saída teve dispersão de 4 a 5 bars para toda a extensão de utilização, sendo que a variação com relação a temperatura para 0 bar aplicado foi de 0,1 bar e para 20 bar a variação foi de 0,5 bar.

A calibração resistiva do *offset* faz com o sinal de saída tenda a zero, pelo equilíbrio sobre os resistores da ponte; e sua compensação é feita pela diminuição do coeficiente térmico no lado ponte que mais é sensível à temperatura.

A compensação da temperatura no sinal de saída com a pressão aplicada é feita também com a diminuição do coeficiente térmico, além disso, é diminuído o coeficiente térmico da ponte.

Com a compensação e calibração resistiva foi possível notar que a variação da tensão foi bem menor do que no caso anterior, porém a variação é teve caráter mais parabólico.

Após as análises realizadas sobre os sensores notamos que, a variação da piezoresistência para cada bar aplicado foi cerca de  $9\Omega$  e a variação para cada grau Celsius a variação foi de  $7,5\Omega$  na média.

Temos ainda que a influência com a corrente de 4mA teve sobre o sensor foi de  $70\Omega$  com relação as medidas feitas. Isso se acontece principalmente pelo efeito Joule sofrido pela ponte de *Wheatstone*.

O efeito da temperatura sobre a variação da pressão teve seu valor em torno de  $0,001\Omega/\text{bar}.\text{°C}$  até  $0,006\Omega/\text{bar}.\text{°C}$ , para o pior caso, esta influência causa também pequenas variações na linearidade do sensor e incertezas nas medidas realizadas.

Com a inserção do resistor de calibração houve a diminuição na tensão de *offset* foi de aproximadamente 97%, porém o coeficiente térmico deste aumentou. O resultado deste coeficiente não é tão visível pela diminuição considerável do *offset*. A diminuição da sensibilidade já que a tensão de saída permanece praticamente a mesma enquanto o valor do *span* é alterado.

Para os três sensores a histerese térmica é maior quando a temperatura está maior do que a temperatura de referência e esta é diminuída do que quando a temperatura é menor do que a temperatura de referência e esta é aumentada.

Traçando uma reta média característica para cada sensor, temos que para cada *milivolt* na tensão de saída o correspondente em pressão é a metade do valor em bar, considerando ainda que o desvio padrão é menor do que 1%.

## 5 Conclusão

Foi realizada com êxito a compensação e calibração dos sensores de pressão, visto a diminuição dos efeitos térmicos e ajuste da tensão de *offset*. Houve eficácia nos cálculos do artigo técnico utilizados.

Com a metodologia empregada para determinar os tempos de estabilização foi possível adquirir resultados mais confiáveis pelo fato da sua exatidão estar de acordo com o esperado.

Mesmo com o valor da precisão nos valores de compensação e calibração não serem muito alto, estes resistores são, por sua facilidade de implementação e baixo custo, de grande valia para sistemas de baixa precisão.

Este trabalho pode ser utilizado como base para caracterizar sensores de pressão

## Perspectivas futuras

A análise térmica em diferentes variações de temperatura para melhor quantificar os tempos de estabilização

O estudo teórico dos cálculos para a determinação dos resistores de calibração e compensação da tensão de offset, para melhor entender o processos de compensação e calibração dos resistores.

A análise dos efeitos da precisão e do coeficiente térmico sobre os resistores sobre a compensação e calibração dos sensores.

## Referência

- [1] Chollet, F. e Liu, HB, *A (not so) short introduction to Micro Electromechanical System, ver2.0.1, Março2007*, site: <http://MEMScyclopedia.org/introMEMS.html> ;
- [2] Goldman, K.; Gritt, G.; Baskett, I.; Sooriakumar, K.; Wallace, D.; Hughes, D. e Shah, M. *A vertically integrated media-isolated absolute pressure sensor* Solid State Sensors and Actuators, Volume 2 Pag 1501 - 1504 Junho de 1997;
- [3] Samber M.A.; Ho-Tran T.P.L. *Evaluation of the fabrication of pressure sensors using bulk micromachining before IC processing* Sensors and Actuators A: Physical, Volume 46, Number 1 pag 147-150, January 1995 ;
- [4] Dibi, Z.; Boukabache, A. e Pons, P., *Effect of the silicon membrane flatness defect on the piezoresistive pressure sensor response*. Electronics, Circuits and Systems, 2000. The 7th IEEE International Conference on, Volume 2 pag 853-856, 2000;
- [5] Richter, J.; Hansen, O.; Larsen, A. N.; Hansen, J.L.; Eriksen, G.F. e Thomsen, E.V., *Piezoresistance of silicon and strained Si<sub>0.9</sub>Ge<sub>0.1</sub>*, Sensors and Actuators A pag 388-396, Fevereiro de 2005;
- [6] Pietro, D. H. e Charry, E., *Estudio y Deseño de un Sensor de Presion para Aplicaciones em Angioplastia*, In: Primer congresso de Ingenieria Hospitalaria 2000, 2000, La Habana. Primer Congreso de Ingenieria Hospitalaria 2000,
- [7] Akbar, M., *Interface Circuit for Piezoresistive Pressure Sensor*. PhD. Dissertation – Michigan University, Michigan 1992;
- [8] Laserod Inc., *Laser Resistor Trimming – Thick and Thin Film*, Laser Machining 2004;

- [9] Putten, A. F. P. V., *Thermal Feedback Drives Sensor Bridge Simultaneously with Constant Supply Voltage and Current*, IEEE Transaction on Instrumentation and Measurement Volume 39 N°1 fevereiro 1990;
- [10] Swartz, C.; Derrington, C. e Gragg, J., *Temperature Compensation Method For the Motorola X-ducer Pressure Sensor Element*, Freescale Semiconductor, Inc. 2004;
- [11] Nam, T.; Kim, S. e Park, S., *The temperature compensation of a thermal flow sensor by changing the slope and the ratio of resistances*, Sensors and Actuators A pag 212–218, Janeiro de 2004;
- [12] Jianqiang, H. ; Changchun, Z. ; Junhua, L. and Li Peng, *A novel temperature-compensating structure for micromechanical bridge resonator*, Journal Of Micromechanics and Microengineering pag 702-705, fevereiro de 2005;
- [13] Melvås, P. e Stemme, G., *A Diode-Based Two-Wire Solution for Temperature-Compensated Piezoresistive Pressure Sensors* IEEE Transactions On Electron Devices, Volume 50, N° 2, Fevereiro de 2003;
- [14] Stankevič, V. e Šimkevičius, Č., *Application of aluminum films as temperature sensors for the compensation of output thermal shift of silicon piezoresistive pressure sensors*, Sensors and Actuators A pag 161-166 maio de 1998;
- [15] Melvås, P.; Kälvesten, E. e Stemme, G. *A temperature compensated dual beam pressure sensor*, Sensors and Actuators A pag 46–53, abril de 2002;
- [16] Akbar, M. e Shanblatt, M. A., *Temperature compensation of piezoresistive pressure sensors*, Sensors and Actuators A pag 155-162 fevereiro de 1992;
- [17] Dziuban, J.; Gbrecka-Drzazga, A.; Llpowicz U.; Indyka, W. e Wqsowslu J., *Self-compensating piezoresistive pressure sensor* Sensors and Actuators A, pag 368-374 1994;

- [18] Kress, H -J ; Bantien, F; Marek, J e M Willmann. *Silicon Pressure Sensor with Integrated CMOS Signal-conditioning Circuit and Compensation of Temperature Coefficient* Sensors and Actuators A, pag 21-26 1991;
- [19] Hongwei, Q.; Suying, Y.; Rong, Z.; Ganru, M. e Weixin, Z., *Polysilicon Piezoresistive Pressure Sensor and Its Temperature Compensation* Solid-State and Integrated Circuit Technology Pag 914 - 916, 1998;
- [20] Lee, Y.; Seo, H.; Kawamura, A.; Yamada ,T.; Matsumoto, Y.; Ishida, M. e Nakamura, T., *Compensation Method of Offset and its Temperature Drift in Silicon Piezoresistive Pressure Sensor Using Double Wheatstone Bridge Configuration*. The 8th Conference on Solid State Sensors and Actuators, and Eurosens IX. Stockholm, Sweden. Junho de1995;
- [21] Lee,B.; Kim, K.; Park, H. e Shin, S. *Calibration and temperature compensation of silicon pressure sensors using ion-implanted trimming resistors*, Sensors and Actuators A pag.148–152 julho 1998;
- [22] Beltrán, J.R.; Prieto, D. H. e Rodríguez, E. C., *Compensación Térmica de la Sensibilidad em Sensores de Presión Piezorresistivo*, Iberchip fevereiro 2007;
- [23] Microbridge Technologies Inc.; *Wheatstone Bridge Compensation and Temperature Conditioning by Rejustors™: Zero-Offset, Tempco of Zero-Offset, Span, and Tempco of Span*, Hi-line Sensor Tech Janeiro de 2005;
- [24] Wang, Q.; Ding, J. e Wang, W. *Fabrication and temperature coefficient compensation technology of low cost high temperature pressure sensor*, Sensors and Actuators A pag 468–473 fevereiro 2005;
- [25] Akbar, M., *Interface Circuit for Piezoresistive Pressure Sensor*. PhD. Dissertation – Michigan University, Michigan 1992;

- [26] Beltrán, J. R., *Interface Eletrônica para Sensor de Pressão Piezorresistivo com Tecnologia CMOS para ser Utilizada em um Sistema de Biotelemetria*, Tese (Doutorado), Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo 2003;
- [27] Lin, J. *Experiment Design on Smart MEMS Sensor Module*, iCEER Exploring Innovation in Education and Research, Taiwan, Março de 2005;
- [28] Akbar, M. e Shanblatt, M. A., *A Fully Integrated Temperature Compensation Technique for Piezoresistive Pressure Sensor*, IEEE Transaction Instrumentation and Measurement, Volume 42, N°3 , Junho de 1993;
- [29] Gahide, S. F., *Exploration of Micromachines to Textiles: Monitoring Warp Tension and Breaks during the Formation of Woven Fabrics*, Tese (Doutorado), North Carolina State University, Raleigh, 2001;
- [30] Singh, R.; Ngo, L.L.; Seng, H. S. e Mok, F. N. C., *A Silicon Piezoresistive Pressure Sensor*, IEEE Computer Society 2002;
- [31] Petersen, K. E., *Silicon as a Mechanical Material*, Proceedings of the IEEE, Volume 70, N°5, Maio 1982;
- [32] Helvajian, H., *Microengineering Aerospace System*, Capítulo-1, AIAA (American Institute of Aeronautics & Ast (June 1999);
- [33] Madou, M. J., *Fundamentals of Microfabrication*, CRC Press, 1ªedition, 1998;
- [34] Seidel, H.; Csepregi, L.; Heuberger, A. e Baumgärtel, H., *Anisotropic Etching of Crystalline in Alkaline Solutions*. Journal Electrochemical Society, Volume 137, n°11 pág. 3612-3626, Novembro de 1990;
- [35] Rodrigues, B. S., *Plasma Fluorado com acoplamento indutivo*, Dissertação (Mestrado), Universidade de São Paulo, 2006;

- [36] Fung,C.; Harris, R. e Zhu,T. *Multifunction Polysilicon Pressure Sensors for Process Control*, Sensors Magazine, Agosto de 1999;
- [37]Kanda, Y., *Piezoresistance effect of silicon*, Sensors and Actuators A, pág. 83-91, 28, 1991;
- [38] S.M.Sze., *Semiconductor Sensors*, Capítulo 4 Mechanical Sensors, pag160 a 185 John Wiley &Sons, Inc. 1994;
- [39] Kloeck B.; Rooij N.F. de e Bau H.H, *Sensors a Comprehensive Survey*, Capítulo 5 Piezoresistive Sensors pag 146-171 volume7 John Wiley &Sons, Inc. 1996;
- [40] Smith, C.S., *Piezoresistance Effect in Germanium and Silicon*, Physical Review, pag 42-49,1954;
- [41]Kanda, Y., *A Graphical Representation of the PiezoResistance Coefficients in Silicon*, IEEE Transactions on electron devices, Vol. Ed-29, N°1, Janeiro 1982;
- [42] Kanda, Y. e Suzuki, K., *Origin of shear piezoresistance coefficient  $\pi_{44}$  of n-type silicon*, Physical Review B volume 43, N°8, 15 Março de 1991;
- [43] Song, X. e Liu, S.; *A Performance Prediction Model For A Piezoresistive Transducer Pressure Sensor*, IEEE International Conference on Electronic Packaging Technology 2003;
- [44] Ko, W. H., Hynecek, J. e Boettcher, S. F.; *Development of a Miniature Pressure Transducer for Biomedical Application*, IEEE Transactions on Electron Devices, Volume 26 – N° 12, Dezembro de 1979;
- [45] Fulkerson, D.E. ; *A Silicon Integrated Circuit Force Sensor*, IEEE Transaction on Electron Devices, Volume 16 – N° 10, Outubro de 1969;

- [46] Ocampo, J. M. J., *Desenvolvimento de um Microsensor de Pressão Intravascular Utilizando Pós-processamento*, Tese (Doutorado), Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 1999;
- [47] Tufte, O. N. e Stelzer, E. L., *Piezoresistive Properties of Silicon Diffused Layers*, *Journal of Applied Physics*, Volume 34 - N°2, Setembro de 1962;
- [48] Kim, S. e Wise, K. D., *Temperature Sensitivity in Silicon Piezoresistive Pressure Transducers*, *IEEE Transaction on Electron Devices*, Volume ED30, N° 7, Julho de 1983;
- [49] Fruett, F., Chapter2, *The Piezjunction Effect in Silicon Sensor*, Tese (Doutorado), TU Delft, Sep.2001;
- [50] Cho, C.H.; Jaeger, R.C. e Suhling, J.C. *Experimental characterization of the temperature dependence of the piezoresistive coefficients of silicon* I THERM Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronics Systems, Pag928 - 935 Junho de 2006;
- [51] NovaSensor Products, *Constant Current Excitation Circuits*, NovaSensor Application Note2, Setembro 1996;
- [52] SensorTechnics Inc., *Understanding Constant Voltage and Constant Current Excitation For Pressure Sensors*, retirado do site <http://www.sensortechinics.com> – SSAN-32- Agosto de 2008;
- [53] Putten, A. F. P. V., *Thermal Feedback Drives Sensor Bridge Simultaneously with Constant Supply Voltage and Current*, *IEEE Transaction on Instrumentation and Measurement* Volume 39 N°1 fevereiro 1990;
- [54] Suhling, J.C. e Jaeger, R.C., *Silicon Piezoresistive Stress Sensor and Their Application in Electronic Packaging*, *IEEE Sensors Journal* Volume1 N°1, June de 2001;

- [55] Matsuda, K.; Kanda, Y.; Yamamura, K. e Suzuki, K., *Nonlinearity of piezoresistance effect in p- and n-type silicon*. Sensors Actuators. Volume. 21A, N°. 1-3, pag. 45-48. 1990;
- [56] Boukabache, A.; Pons, P. ; Blasquez, G. e Dibi, Z. *Characterization and modeling of the mismatch of TCRs and their effects on the drift of the offset voltage of piezoresistive pressure sensors* Sensors and actuators A Physical volume 84, No3, pag 292-296, 2000;
- [57] ICSensor Inc., Temperature Compensation IC Pressure Sensors, Application Note TN-002 Maio de 1985;
- [58] Schultz, W. Compound Coefficient Pressure Sensor Pspice Model, Motorola Inc. Application Notes AN1660, 1998;
- [59] Lin, L.; Chu, H. e Lu, Y., *A simulation Program for the Sensitivity and Linearity of Piezoresistive Sensors*, Journal of Microelectromechanical System Volume 8, N°4, dezembro de 1999;
- [60] Tuinenga, P. W., *Spice: A guide of circuit simulation & Analysis Using Pspice*, Prentice Hall, MicroSim Corporation, New Jersey 1992;
- [61] Danaee H., Sensor de pressão piezoresistivo. Relatório Fapesp processo 97;
- [62] DataSheet Series 7S/9S, *Piezoresistive OEM Pressure Transducer*. KELLER AG internet< <http://www.msi-scantech.co.uk/datasheets/7se.pdf>> novembro de 1998;
- [63] GE sensing, Manual de usuário DRUCK 515: Controlador e calibrador de pressão de precisão;
- [64] Manual de Usuário, *Small and fine... Temperature Mini Test Chambers VT 4002, VT 4004 and VT 7004*, Vötsch Industrietechnik;
- [65] datasheet sourcemeter Keithley series 2400;
- [66] datasheet multimeter agilent model 34401A Agilent technologies

[67] Garcia, V., *Sensor de pressão microeletrônico baseado no efeito piezoMOS*. Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação.--Campinas, SP: [s.n.], 2006.

[68] Luz, S. F. da, *Microsistema transmissor de pressão piezoresistivo de 4-20mA de alta precisão*, Dissertação (Mestrado), Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo 2006;