Paulo Fracalossi Ciampa

**PROJETO E DESENVOLVIMENTO DE UM SENSOR MAP DE
PRESSÃO E TEMPERATURA EM LTCC PARA APLICAÇÕES
AUTOMOTIVAS**

São Paulo

2011

Paulo Fracalossi Ciampa

**PROJETO E DESENVOLVIMENTO DE UM SENSOR MAP DE
PRESSÃO E TEMPERATURA EM LTCC PARA APLICAÇÕES
AUTOMOTIVAS**

**Dissertação de mestrado apresentada à
Escola Politécnica da Universidade de São
Paulo para obtenção do título de Mestre em
Engenharia Elétrica.**

São Paulo

2011

Paulo Fracalossi Ciampa

**PROJETO E DESENVOLVIMENTO DE UM SENSOR MAP DE
PRESSÃO E TEMPERATURA EM LTCC PARA APLICAÇÕES
AUTOMOTIVAS**

**Dissertação de mestrado apresentada à
Escola Politécnica da Universidade de São
Paulo para obtenção do título de Mestre em
Engenharia Elétrica.**

Área de concentração: Microeletrônica

Orientador: Antonio Carlos Seabra

São Paulo

2011

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

São Paulo, 28 de junho de 2011.

Assinatura do autor _____

Assinatura do orientador _____

1. FICHA CATALOGRÁFICA

Ciampa, Paulo Fracalossi

Projeto e desenvolvimento de um sensor MAP de pressão e temperatura em LTCC para aplicações automotivas / P.F.

Ciampa. -- ed.rev. -- São Paulo, 2011.

88 p.

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

1. Sensor (Projeto; Desenvolvimento) 2. Eletrônica embarcada 3. Cerâmica avançada I. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Sistemas Eletrônicos II. t.

DEDICATÓRIA

*À minha mãe, Mercedes, pessoa de caráter,
força e dedicação inigualáveis;*

*A meu pai Ronaldo e meu avô Miguel, os
“engenheiros natos” que me inspiraram
desde criança;*

Ao meu irmão Davi;

À Fabiana, pelo carinho de sempre.

AGRADECIMENTOS

Ao professor Antonio Carlos Seabra pela confiança, orientação, ajuda e apoio, sem os quais este trabalho definitivamente não teria acontecido.

Ao professor Armando Laganá pelos materiais da área automotiva e pela boa vontade.

Ao professor Fernando Josepetti Fonseca pelas dicas sobre o texto.

Ao professor Nilton Morimoto pela presença nas altas noites de trabalho e pela filosofia oriental de motivação.

Ao professor Mario Gongora pelo material.

Aos técnicos, Jair Pereira do LME pelas dicas, montagens e imensa simpatia, a Marinalva do CTI de Campinas e ao Adriano do laboratório de eletrônica.

Aos técnicos e pesquisadores do Laboratório de Sistemas Integráveis (LSI) do Departamento de Sistemas Integráveis (PSI) da Escola Politécnica da USP (EPUSP) pelas incontáveis ajudas com assuntos do dia-a-dia, em especial ao Nelson Ordonez. Da mesma forma a: Rubinho, Julio Cesar, Adir, Alexandre e Renato.

Aos amigos do LSI: Larissa, Vanessa, Zaira, Luis, Sergio. Em especial ao tecnólogo Alex Nunes pela ajuda com material.

Ao Departamento de Engenharia de Sistemas Eletrônicos, à Escola Politécnica e à Universidade de São Paulo por permitir a utilização da infra-estrutura necessária à realização deste trabalho.

Finalmente, a todos aqueles que me ajudaram nesse caminho gostaria de expressar a minha profunda gratidão e respeito. Obrigado.

“Trabalhar não é ruim. O ruim é TER que trabalhar.”

Seu Madruga (Ramón Valdés).

“I think if you try hard enough and make the best of a situation the situation won't get the best of you.”

Macgyver (Richard Dean Anderson).

“Suspeitei desde o princípio!”

Chapolin Colorado (Roberto Gómez Bolaños).

RESUMO

Este trabalho apresenta um módulo sensor de pressão absoluta do duto de admissão (MAP) para aplicações automotivas desenvolvido em substrato cerâmico LTCC. Em um veículo com sistema de injeção eletrônica de combustível, o sensor MAP informa a unidade de controle do motor sobre a pressão no duto de admissão permitindo o cálculo da vazão de ar e o ajuste da injeção de combustível. O sensor desenvolvido possui circuitos eletrônicos para a aquisição de sinais analógicos e digitais, realiza o condicionamento de sinal, a calibração e compensação de temperatura através de processamento digital, que permitem a indicação de pressões de 0 a 100kPa na faixa de temperaturas de -40 a +125°C. Utilizou-se um elemento sensor de pressão piezorresistivo com membrana micro fabricada em silício e um sensor resistivo de temperatura. São apresentadas: a topologia do circuito, a construção, caracterização e testes. O protótipo apresenta precisão melhor do que 1,5% FE em pressão e 0,5% em temperatura. O teste de diferentes sensores de pressão e diferentes funções de transferência é facilmente realizado através de um circuito versátil que permite a alteração via programa. A montagem em cerâmica LTCC é realizada e é desenvolvida uma técnica de montagem do sensor de pressão MEMS em *flip-chip*, com excelentes resultados. Finalmente, é apresentado o teste em operação real em um veículo.

Palavras-chave: Sensores. Eletrônica Embarcada. Cerâmica Avançada. Injeção eletrônica de combustível. Motor.

ABSTRACT

This paper presents a manifold absolute pressure (MAP) sensor module developed on LTCC substrate. In electronic fuel injection systems, a MAP sensor measures the vacuum at the engine intake manifold, allowing the electronic control unit to calculate mass flow and control the fuel injection. The sensor developed is composed by electronic circuits for analog signal acquisition and generation, digital signal processing and features software calibration and temperature-compensated pressure indications from 0 to 100kPa in the -40 to +125°C temperature range. It is presented the assembly of a MEMS silicon pressure sensor and a thermistor on ceramic substrate and also the circuit topology, construction, characterization and tests. The prototype exhibits full scale accuracy better than 1.5% for pressure and 0.5% for temperature measurements. Tests are easily performed with different pressure sensors and different transfer functions due to a versatile circuit which enables software updates. The assembly on LTCC ceramic substrate is performed and an innovative flip-chip assembly technique is developed for MEMS pressure sensors, with excellent results. Finally, it is presented the test on a real vehicle.

Keywords: Sensors. Embedded electronics. Advanced ceramics. Fuel electronic injection. Engine.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – MAP com sensor de temperatura Bosch modelo 0 261 230 022, (A) tomada de pressão, (B) sensor de temperatura.....	17
Figura 2 – Ponte de Wheatstone com sinal de excitação VB e sinal de saída V. .	18
Figura 3 – Amplificador de instrumentação	20
Figura 4 – Esquema de acondicionamento da pastilha de sensor de pressão com membrana microfabricada.....	22
Figura 5 – Típico ambiente de instalação do sensor MAP: (A) posição do sensor, (B) coletor de admissão.....	23
Figura 6 – Esquema de acondicionamento do módulo MAP automotivo.	25
Figura 7 – Processo de fabricação de circuitos em LTCC.....	27
Figura 8 – Processo de sinterização da cerâmica LTCC.....	27
Figura 9 – Sensor de pressão MS7801A.	29
Figura 10 – Sensor LPSi100-HT-A.....	31
Figura 11 – Sensor de temperatura do tipo Termistor.	31
Figura 12 – Diagrama em blocos do circuito de condicionamento do sensor MAP.	32
Figura 13 – Circuito de leitura e condicionamento de sinais montado em placa de fibra de vidro FR4.	34
Figura 14 – Sensor de pressão montado em cápsula padrão TO-5: (A) cápsula aberta, (B) cápsula fechada com orifício para tomada de pressão, (C) detalhe do sensor.	36
Figura 15 – Estudo para montagem e acondicionamento do sensor em substrato cerâmico com sistema flip-chip: (A) substrato LTCC com contatos elétricos, (B) sensor de pressão MEMS, (C) conjunto montado com o diafragma sensor voltado para a cerâmica.	37
Figura 16 – Sensor de pressão MEMS montado por <i>flip-chip</i> : (A) tomada de pressão, (B) placa de circuito impresso em resina fenólica, (C) sensor MS7801A, (D) fios de conexão, (E) detalhe (notar a camada de silicone protetora).	38
Figura 17 – Ferramentas utilizadas no processo de serigrafia: (A) tela, (B) fundo luminoso para alinhamento, (C) rodo, (D) máscara com furação.	39

Figura 18 – Equipamentos utilizados no processo de fabricação LTCC: (A) fresa e furadora CNC LPKF PROTOMAT C100/HF, (B) Laminadora LACTEA, (C) Forno LINDBERG/BLUE.	40
Figura 19 – Seqüência de fabricação do substrato em LTCC: desenho do circuito a 115% (A), corte da cerâmica em estado verde (B), furação (C), serigrafia da pasta condutora em trilhas e vias (D), substrato após sinterização (E).....	40
Figura 20 – Projeto e construção do MAP em LTCC: visualização 3D do projeto (A), protótipo finalizado (B). A seta mostra o sensor montado por <i>flip-chip</i>	41
Figura 21 – Protótipo do MAP em LTCC com sensor de pressão montado por <i>wirebonding</i> (a) e sensor de temperatura (b).	41
Figura 22 – Estratégia de acondicionamento do sensor MAP com montagem <i>flip-chip</i>	42
Figura 23 – Estratégia de acondicionamento do sensor MAP com montagem <i>wirebonding</i>	42
Figura 24 – Protótipo do MAP pronto para testes de operação. (A) invólucro plástico vedado com circuito do MAP em LTCC; (B) tubo de tomada de pressão; (C) fios de conexão.	43
Figura 25 – Equipamento de plasma com câmara de vácuo (A) e bomba de vácuo (B) e banho térmico (C) usados para caracterização do sensor MAP.	44
Figura 26 – Aparato experimental: (A) controle de gases e medição de vácuo; (B) computador para coleta de dados; (C) fonte de alimentação e multímetro; (D) conexões elétricas com os sensores na câmara de vácuo.	45
Figura 27 – Detalhe da montagem experimental na câmara de vácuo: (A) sensor de referência; (B) sensor sob teste na placa térmica; (C) conexões elétricas.	45
Figura 28 – Função de transferência (curva tensão versus pressão) do MAP.....	48
Figura 29 – Indicação da temperatura com termistor não calibrado.....	50
Figura 30 – Erros absolutos das diversas estratégias de calibração do sinal de temperatura.....	51
Figura 31 – Indicação de temperatura calibrada.....	52
Figura 32 – Indicação da temperatura com termistor não calibrado montado no circuito do MAP em LTCC.....	53
Figura 33 – Erros absolutos de calibração do sinal de temperatura do MAP em LTCC.	54

Figura 34 – Indicação de temperatura do MAP em LTCC.	55
Figura 35 – Tensão de offset do sensor de pressão MS7801A montado em cápsula TO-5 e modelo linear de ajuste.	56
Figura 36 – Tensão de offset do sensor de pressão MS7801A montado como <i>flip-chip</i> em placa de circuito impresso.	57
Figura 37 – Tensão de offset do sensor LPSi100-HT-A montado por wirebonding sobre a cerâmica LTCC.	57
Figura 38 – Caracterização do sensor MS7801A montado em cápsula TO-5.	59
Figura 39 – Ganho do sensor MS7801A em cápsula TO-5.	60
Figura 40 – Caracterização do sensor MS7801A montado como <i>flip-chip</i>	60
Figura 41 – Ganho do sensor MS7801A montado como <i>flip-chip</i>	61
Figura 42 – Caracterização do sensor LPSi100-HT-A montado no substrato LTCC.	62
Figura 43 – Ganho do sensor LPSi100-HT-A montado por <i>wirebonding</i> sobre LTCC.	63
Figura 44 – Resposta do sensor montado cápsula TO-5 operando com compensação de temperatura.	65
Figura 45 – Erro do sensor montado cápsula TO-5 operando com compensação de temperatura.	66
Figura 46 – Resposta do sensor montado por <i>flip-chip</i> , operando com compensação de temperatura.	67
Figura 47 – Erro do sensor montado por <i>flip-chip</i> , operando com compensação de temperatura.	68
Figura 48 – Resposta do sensor montado por <i>wirebonding</i> em LTCC, operando com compensação de temperatura.	69
Figura 49 – Erro do sensor montado por <i>wirebonding</i> em LTCC, operando com compensação de temperatura.	70
Figura 50 – Comparação do MAP protótipo com MAP BOSCH.	72
Figura 51 – Erro de medida na comparação entre o MAP protótipo e uma unidade comercial.	72
Figura 52 – Sensor MAP original do veículo de teste.	73
Figura 53 – Teste do sensor MAP em automóvel: (A) sensor original, (B) conexão pneumática com o duto de admissão, (C) sensor MAP protótipo.	74
Figura 54 – Comparação preliminar dos sensores dos sensores MAP Denso original do veículo e do protótipo em LTCC.	76

Figura 55 – Erro observado na comparação preliminar dos sensores MAP Denso e do protótipo em LTCC. Notar que o erro em regime permanente permanece abaixo dos 1,5% FE. A escala foi mantida em 5% para clareza dos detalhes.....	77
Figura 56 – Teste em operação real: MAP Denso (azul) e protótipo (vermelho). .	78
Figura 57 – Ligando o motor do veículo: MAP Denso (azul) e protótipo (vermelho).	79
Figura 58 – Diferentes regimes de operação do veículo: MAP Denso (azul) e protótipo (vermelho).....	80

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Requisitos de durabilidade automotivos.....	24
Tabela 2 – Propriedades do LTCC, dados do fabricante.....	26
Tabela 3 – Especificações do sensor MS7801A, dados do fabricante.....	29
Tabela 4 – Especificações do sensor LPSi100-HT-A, dados do fabricante.	30
Tabela 5 – Especificações do termistor NTCLE100E3103, dados do fabricante. .	31
Tabela 6 – Código em C para o cálculo da pressão e tensão de saída.	33
Tabela 7 – Regressões lineares, sensor MS7801A em cápsula TO-5.....	59
Tabela 8 – Regressões lineares, sensor MS7801A como <i>flip-chip</i>	61
Tabela 9 – Regressões lineares, sensor LPSi100-HT-A no LTCC.....	62
Tabela 10 – Parâmetros dos sensores: medidos e esperados.....	63
Tabela 11 – Parâmetros dos sensores caracterizados inseridos no programa.....	64
Tabela 12 – Regressão linear, sensor em cápsula TO-5, compensado.....	66
Tabela 13 – Regressão linear, sensor em <i>flip-chip</i> , compensado.	67
Tabela 14 – Regressão linear, sensor em <i>wirebonding</i> no LTCC, compensado. .	69
Tabela 15 – Características do protótipo MAP LTCC.	71
Tabela 16 – Constantes medidas da função de transferência do sensor Denso. .	73

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AD	Analógico-Digital
AFR	<i>Air-to-fuel-ratio</i>
CAD	<i>Computer Aided Design</i>
CC	Corrente contínua
DA	Digital-Analógico
ECU	<i>Electronic Control Unit</i>
FE	Fundo de escala
IAT	<i>Intake Air Temperature</i>
KOH	Hidróxido de Potássio
LTCC	<i>Low Temperature Cofired Ceramic</i>
MAF	<i>Mass Air Flow</i>
MAP	<i>Manifold Absolute Pressure</i>
MTBF	<i>Mean Time Between Failures</i>
NTC	<i>Negative Temperature Coefficient</i>
PGA	<i>Programmable Gain Amplifier</i>
PIB	Produto Interno Bruto
PTC	<i>Positive Temperature Coefficient</i>
PTH	<i>Plated Through Hole</i>
RPM	<i>Rotações por minuto</i>
RTD	<i>Resistance Temperature Detector</i>
SMD	<i>Surface Mount Device</i>
SMT	<i>Surface Mount Technology</i>
SOI	<i>Silicon on insulator</i>
TMAH	Hidróxido de Tetrametiletilamônia

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO.....	1
2.	REVISÃO DA LITERATURA.....	3
2.1	Sensores, sinais e sistemas.....	3
2.1.1	Classificação dos sensores	4
2.2	Características dos sensores.....	4
2.2.1	Características estáticas.....	4
2.2.2	Características dinâmicas.....	8
2.2.3	Fatores ambientais	9
2.2.4	Confiabilidade	10
2.3	Sensores de pressão	11
2.3.1	Efeito piezorresistivo.....	12
2.3.2	Micro fabricação do sensor piezorresistivo.....	13
2.4	Sensores de temperatura.....	14
2.4.1	O termistor	14
2.5	Sensores MAP	15
2.6	Condicionamento de sinais	18
2.6.1	A ponte de Wheatstone	18
2.6.2	Amplificação do sinal	19
2.6.3	Tratamento digital de sinais	20
2.7	Acondicionamentos	20
2.7.1	Acondicionamento do sensor	20
2.7.2	Acondicionamento do módulo automotivo.....	23
2.8	Tecnologia LTCC	25
3.	MATERIAIS E MÉTODOS.....	28
3.1	Descrição dos sensores.....	28
3.2	Descrição da eletrônica associada	32
3.3	Construção	34
3.3.1	Armazenamento e manuseio do sensor.....	34
3.3.2	Montagem do sensor	35
3.3.3	Montagem do sensor em cápsula tipo TO-5	36

3.3.4	Montagem do sensor no substrato	36
3.3.5	Projeto e construção dos protótipos em LTCC.....	38
3.4	Descrição dos procedimentos de medidas	43
3.4.1	Medidas a serem realizadas	46
4.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	49
4.1	Calibração do sensor de temperatura.....	49
4.2	Caracterização dos sensores de pressão montados.....	55
4.2.1	Medida do offset	56
4.2.2	Medida do ganho	58
4.3	Caracterização do sensor MAP e comparativo com sensor comercial	64
4.4	Testes do circuito em operação real em veículo	73
5.	CONCLUSÃO	81
6.	PERSPECTIVAS FUTURAS	82
7.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	83

2. INTRODUÇÃO

Os primeiros sistemas eletrônicos a serem aplicados em um carro foram para o controle do motor. Nos anos 1960 os primeiros sistemas de ignição eletrônica, seguidos por sistemas de injeção eletrônica se popularizaram. Nos anos 1970, com as legislações para o controle de emissões de poluentes, tiveram início os sistemas de gerenciamento do motor, que logo evoluíram graças à eletrônica digital. Os sensores de pressão automotivos aparecem a partir da década de 60 e sua mais importante aplicação desde então tem sido o controle de ar admitido pelo motor. Em 2005, o mercado foi de 1,4 bilhões de dólares [1], somente para sensores de pressão.

Em 2010, o Brasil se consolidou como o quarto mercado automotivo mundial [2]. Após cinco séculos de história, o PIB per capita brasileiro atingiu US\$ 10 mil, com perspectiva de dobrar até 2020 [3], [4]. Cabe citar que, embora haja o crescimento do mercado interno e da demanda, o desenvolvimento tecnológico e a formação de mão-de-obra especializada não cresceram na mesma proporção [5], [6].

Paralelamente, o controle de emissões em frotas de veículos, necessidade ambiental e de saúde pública que já é realidade mundial, se estabeleceu no Brasil. Em 2008, a cidade de São Paulo implantou um programa para controle de emissões, atingindo em 2009 mais de 80% da frota de automóveis [7]. Isso gerou um impacto substancial na manutenção da frota e no mercado de peças, que atingiu vendas de até R\$ 10 bilhões em 2010 [8].

Como um dos sensores de pressão de maior importância neste cenário, o sensor MAP tem um papel importante nos sistemas de gerenciamento do motor. Tendo em vista a necessidade de desenvolvimento tecnológico, qualificação e perspectivas econômicas positivas, a proposta deste trabalho é desenvolver um sensor de pressão e temperatura automotivo funcional sobre um substrato cerâmico LTCC.

Vale mencionar que este primeiro desenvolvimento abre um leque de possibilidades de aplicações automotivas para os sensores de pressão. Vale citar, por exemplo, as medidas de:

- Pressão atmosférica
- Pressão de fluídos
- Pressão dos sistemas de freio hidráulicos ou pneumáticos
- Pressão dos pneus
- Rápidas variações de pressão em cavidades estruturais (colisão)

Outros desenvolvimentos são esperados deste trabalho, como a montagem de sensores em pastilha de silício sobre LTCC e topologias de circuito reutilizáveis.

3. REVISÃO DA LITERATURA

Neste capítulo, apresenta-se a revisão bibliográfica sobre sensores de pressão e temperatura, sensores MAP, seu projeto e construção.

3.1 Sensores, sinais e sistemas

Um sensor pode ser definido amplamente como um dispositivo que recebe e responde a um sinal ou estímulo [10].

Os estímulos são propriedades físicas, quantidades ou condições de natureza acústica, biológica, química, eletromagnética, óptica, mecânica, radiação ou térmica. Os sinais são essencialmente a informação e correspondem ao estímulo.

Os sinais e estímulos variam amplamente e uma definição mais específica e adequada ao escopo deste trabalho se faz necessária. Aqui, portanto, um sensor será definido como um dispositivo que recebe um sinal ou estímulo e responde com um sinal elétrico.

Sensores devem ser diferenciados de transdutores. Sensores convertem diferentes formas de energia em sinais elétricos. Já os transdutores convertem um tipo de energia em outro tipo e podem ser utilizados como atuadores em vários sistemas.

Um sensor faz uso de um fenômeno de conversão que ocorre em um material sensor ou em um meio de detecção para traduzir um estímulo em um sinal elétrico.

Um dado sensor pode gerar um sinal elétrico diretamente em resposta a um estímulo, sem a necessidade de uma fonte de energia externa. Outro tipo de sensor pode necessitar de uma fonte de energia externa, ou sinal de excitação, sem a qual não apresenta sinal elétrico de saída. Esse último tipo de sensor é conhecido como paramétrico, porque seus parâmetros variam com um estímulo externo, modificando ou modulando as características de um sinal elétrico de excitação.

O sinal elétrico de saída do sensor pode ser usado por um circuito eletrônico diretamente ou através de um circuito de condicionamento ou de interface.

Um sensor não opera sozinho e quase sempre faz parte de um sistema maior. O sistema é capaz de fazer a aquisição e armazenamento dos dados dos sensores e, em seguida, realizar computações e decisões de modo a responder ao mundo externo através de atuadores ou gerar informações através de periféricos.

3.1.1 Classificação dos sensores

Um sensor pode ser classificado de acordo com suas propriedades:

- Estímulo: Mecânico (pressão), Térmico (temperatura), etc.
- Especificações: Sensibilidade, Exatidão, Linearidade, etc.
- Material do sensor: Silício, Cerâmico, Orgânico, etc.
- Meio de detecção: Deformação mecânica, aquecimento, radiação, etc.
- Fenômeno de conversão: piezorresistivo, termorresistivo, piezelétrico, etc.
- Campo de aplicação: automotivo, industrial, aeroespacial, militar, etc.

3.2 Características dos sensores

A característica preponderante de um sensor é a relação entre os sinais de entrada e saída. Nesse sentido, não há uma preocupação com o seu comportamento interno e o sensor pode ser tratado como uma caixa preta.

3.2.1 Características estáticas

Sob condições estáticas um sensor é completamente descrito pelas seguintes características:

3.2.1.1 Função de transferência

É a relação entre o estímulo de entrada x e o sinal de saída y e pode ser dado por uma função matemática $y = f(x)$, uma tabela ou um gráfico. Uma função de transferência bi-dimensional linear pode ser (Eq. 1):

$$y = ax + b \quad \text{Eq. 1}$$

Onde:

y : sinal de saída

a : inclinação da reta entrada-saída, sensibilidade ou ganho

b : saída quando o estímulo de entrada é zero (*offset*)

x : estímulo de entrada.

As funções de transferência podem ser não lineares, do tipo logarítmico, exponencial ou polinomial. Funções polinomiais de alta ordem podem ser aplicadas quando as funções de menor ordem não representam a função de transferência com precisão.

A resposta y de um sensor também pode ser função de múltiplos estímulos, e.g. pressão e temperatura. Nesse caso, a função de transferência será multidimensional.

3.2.1.2 Sensibilidade

Para funções não lineares a sensibilidade a não é constante. Genericamente, para um determinado valor de estímulo x_0 , a sensibilidade a um estímulo x pode ser definida como (Eq. 2):

$$a = \frac{\partial y(x_0)}{\partial x} \quad \text{Eq. 2}$$

3.2.1.3 Faixa de entrada ou fundo de escala de entrada (FE)

É a diferença entre o valor máximo e mínimo de estímulo de entrada. Representa o maior valor de estímulo que pode ser convertido em sinal de saída com exatidão aceitável [10] (Eq. 3).

$$FE = x_{\max} - x_{\min} \quad \text{Eq. 3}$$

3.2.1.4 Faixa de saída ou fundo de escala de saída

É a diferença entre valores de saída para estímulo máximo e mínimo de entrada e inclui os desvios da função de transferência ideal, ou seja, o valor máximo possível da saída com todas as variações inclusas.

3.2.1.5 Exatidão ou acurácia

A exatidão [10] de um sensor representa a medida de inacurácia ou do maior desvio representado pelo sensor em relação a uma entrada verdadeira ou ideal. A função de transferência real de um sensor desvia entre $\pm\delta$ do ideal. Este é o erro de medida. Esse valor é menor que o limite aceitável de erro $\pm\Delta$.

A exatidão pode ser expressa:

- 1) Em termos do valor medido (Δ);
- 2) Em termos da faixa de entrada;
- 3) Em termos do sinal de saída.

3.2.1.6 Erro de calibração

É a inexactidão permitida pelo fabricante quando um sensor é calibrado em fábrica.

3.2.1.7 Histerese

É o desvio da saída do sensor para um mesmo estímulo quando se aplica esse estímulo por sentidos diferentes (aumento ou diminuição).

3.2.1.8 Linearidade

A linearidade é uma medida da não-linearidade e é expressa para sensores cuja função de transferência pode ser aproximada por uma reta. A não linearidade é o desvio máximo da função de transferência real da aproximação pela linha reta. Usualmente é expressa como uma porcentagem da escala ou do valor medido. Para ter significado, deve-se estabelecer qual reta foi usada na aproximação. Frequentemente, utiliza-se reta determinada pelo método dos mínimos quadrados, embora fabricantes procurem escolher uma reta que resulte na menor linearidade.

3.2.1.9 Saturação

É o ponto além dos limites de operação do sensor a partir do qual o estímulo de entrada não produz a resposta linear na saída.

3.2.1.10 Repetibilidade

É o erro causado pela incapacidade do sensor de apresentar o mesmo valor de saída sob condições idênticas. É expresso como a máxima diferença entre duas saídas obtidas em dois ciclos de calibração, a não ser que especificado o contrário. Usualmente expresso como porcentagem do fundo de escala (Eq. 4):

$$\delta r = \frac{\Delta}{FS} 100\% \quad \text{Eq. 4}$$

3.2.1.11 Banda-morta

É a ausência de sensibilidade do sensor em uma gama específica de valores de estímulo de entrada, para a qual a saída permanece constante.

3.2.1.12 Resolução

É a menor diferença entre dois estímulos que pode ser detectada. A saída do sensor pode variar em degraus mesmo quando o estímulo varia continuamente.

3.2.2 Características dinâmicas

Quando o estímulo de entrada varia no tempo a função de transferência não permanece a mesma. Isto ocorre porque o sensor não responde instantaneamente ao estímulo. Em outras palavras, o sensor possui características dependentes do tempo ou características dinâmicas.

Essas características devem ser levadas em conta quando o sensor faz parte de um sistema de controle, pois podem levar a oscilações ou atrasos indesejáveis.

3.2.2.1 Tempo de aquecimento

É o tempo necessário entre a aplicação da energia ou excitação ao sensor e o instante em que ele é capaz de responder com a exatidão especificada.

3.2.2.2 Resposta em frequência

Caracteriza a saída de um sensor em amplitude e fase (atraso) para um estímulo de frequência variável. Destacam-se:

- Frequências de corte inferior e superior: pontos onde a resposta do sensor se reduz de – 3 decibéis do valor máximo. Em outras palavras, quão lento ou quão rápido o sensor pode operar.
- Frequência de ressonância: é a frequência onde a resposta do sensor aumenta consideravelmente

3.2.2.3 Resposta ao degrau

O tempo de resposta do sensor a um estímulo em degrau é caracterizado pelo:

- Tempo de ajuste: é o tempo de estabilização da saída do sensor para um valor próximo do valor final, dentro de um erro especificado.
- Amortecimento: caracteriza se a resposta é criticamente amortecida (menor tempo de ajuste sem sobre-sinal), super amortecida (maior tempo de ajuste), ou sub-amortecida (resposta oscilatória amortecida).

3.2.3 Fatores ambientais

3.2.3.1 Condições de armazenagem

Estabelecem as condições ambientais limites nas quais um sensor pode ser armazenado durante um período de tempo sem que suas características sejam alteradas em condições normais de operação. Inclui valores máximos e mínimos de temperatura, umidade, pressão, além de substâncias contaminantes, etc.

3.2.3.2 Deriva

Pode ser utilizada para caracterizar a estabilidade da resposta tanto a curto como em longo prazo, significando a variação do sinal de saída em períodos de tempo pré-estabelecidos devido a envelhecimento, temperatura, acomodação de materiais, etc.

3.2.4 Confiabilidade

A confiabilidade é a habilidade de um item desempenhar uma dada função, sob condições específicas por um dado período. É expressa estatisticamente como uma probabilidade de que um dispositivo venha a operar sem apresentar falhas durante um período de tempo ou número de operações. A confiabilidade é relacionada diretamente com a falha, situação na qual o dispositivo, temporária ou permanentemente, não atende sua especificação sob condições normais de operação.

A norma MIL-HBK-338B [11] permite o entendimento dos conceitos, princípios e metodologias, cobrindo todos os aspectos da engenharia de confiabilidade de sistemas eletrônicos. Segundo a mesma, a confiabilidade pode ser determinada através de predição ou através de testes de qualificação.

A predição de confiabilidade determina o tempo médio entre falhas ou MTBF (*Mean Time Between Failures*) e pode ser realizada através de cálculo como descrito na norma MIL-HDBK-217F [12]. A taxa de falhas de um dispositivo é determinada compondo-se as taxas de falhas dos seus componentes, que por sua vez são determinadas pelas condições de operação: temperatura, estresse, ambiente e nível de triagem (medida de qualidade). Infelizmente, a predição não reflete a completa realidade sendo freqüentemente severa e resultando em altas taxas de falha.

Por outro lado, a qualificação de dispositivos permite estabelecer de modo mais realista a confiabilidade, uma vez que os dispositivos são colocados em funcionamento em situações de pior caso ou em testes de vida acelerada sob condições extremas de operação. Nesses testes além de estabelecer o MTBF é possível avaliar melhorias no projeto e a vida útil dos dispositivos.

3.3 Sensores de pressão

A tecnologia dos sensores de pressão feitos em silício ganhou aceitação universal para medidas em ambientes automotivos. Sensores do tipo capacitivo e piezorresistivo têm sido produzidos em altos volumes [13].

O silício é usado como elemento auxiliar na constituição mecânica de sensores, em parte devido ao seu elevado módulo de elasticidade, boa condutividade térmica e nenhuma plasticidade [14]. Por outro lado, a processabilidade do silício também o faz muito útil como material para sensores, uma vez que existe o domínio dos processos, a fabricação em lote e a possibilidade de integração do elemento sensor juntamente com o circuito de condicionamento [15].

Os sensores de pressão microfabricados em silício mais utilizados podem ser piezorresistivos ou capacitivos.

Em sensores capacitivos, um diafragma condutivo é colocado de maneira oposta a um eletrodo rígido condutivo, de modo a formar um capacitor de placas paralelas cuja capacitância é alterada pela pressão aplicada.

Em sensores piezorresistivos, o silício é o transdutor mecânico e elétrico. O diafragma possui resistores de modo que a resistência é alterada pela pressão aplicada.

Diafragmas de silício monocristalino e, mais recentemente, silício policristalino ou nitreto de silício de algumas centenas de microns de largura e espessura da ordem de dezenas de microns, são comumente usados em sensores de pressão [16]. O controle preciso da espessura é necessário, uma vez que a tensão gerada no diafragma pela pressão (detectada pelos piezorresistores) tem uma dependência quadrática com a espessura do diafragma, enquanto que a deflexão do centro (detectada por sensores capacitivos) tem uma dependência cúbica.

Sensores capacitivos são menos sensíveis à temperatura, podem ser usados em temperaturas mais altas e podem ter sensibilidades mais elevadas do que piezorresistivos. Usualmente, possuem dimensões maiores e diafragmas mais espessos que piezorresistivos, podendo suportar maior pressão. No entanto, a

fabricação da cavidade selada é mais complexa. O circuito de condicionamento precisa ficar próximo do elemento sensor para minimizar efeitos parasitas e a fabricação do diafragma é mais complexa em se tratando de eliminar não linearidades intrínsecas ao sensor capacitivo.

3.3.1 Efeito piezorresistivo

No efeito piezorresistivo a variação ΔR de uma resistência R do material semiconductor é proporcional à tensão mecânica transversal σ_t e longitudinal σ_l .

$$\frac{\Delta R}{R} = \Pi_t \sigma_t + \Pi_l \sigma_l \quad \text{Eq. 5}$$

Onde Π é o coeficiente piezorresistivo que depende da orientação do resistor no cristal de silício.

Em um sensor de pressão de silício, um resistor difundido tipo p em uma orientação <110> ou um diafragma quadrado de silício tipo n com superfície de orientação (100), resulta aproximadamente nos seguintes coeficientes piezorresistivos:

$$\Pi_l = -\Pi_t = \frac{1}{2} \Pi_{44} \quad \text{Eq. 6}$$

Onde Π_{44} é o coeficiente piezorresistivo do silício.

Uma ponte de Wheatstone pode ser montada com esses piezorresistores distribuídos em uma membrana, de tal forma que os resistores tenham seu valor alterado em direções opostas e na mesma magnitude. Assim, se a ponte for alimentada por uma tensão E , a tensão de saída da ponte é proporcional à tensão mecânica na membrana:

$$V_{saída} = \frac{1}{2} E \Pi_{44} (\sigma_l - \sigma_t) \quad \text{Eq. 7}$$

Em uma membrana quadrada com lateral a e espessura h , a tensão mecânica é proporcional à pressão aplicada [17].

$$V_{saída} = \frac{1}{2} E \Pi_{44} p \frac{a^2}{h^2} C \quad \text{Eq. 8}$$

Onde C é um coeficiente do sensor.

Portanto, a tensão de saída é proporcional à pressão na membrana.

É importante mencionar que, dada a forte dependência do coeficiente piezorresistivo do silício com a temperatura (resistências com coeficiente de temperatura da ordem de 2500 ppm/°C), em geral, é necessária a compensação do sinal do sensor com temperatura. Mais ainda, esse comportamento associado ao aumento da temperatura provoca a redução da sensibilidade geral do sensor.

3.3.2 Microfabricação do sensor piezorresistivo

Microfabricação refere-se normalmente ao processo de criação de formas em silício de modo controlável usando-se técnicas como corrosão química, fotolitografia, crescimento térmico de óxido, deposição química por vapor, deposição por feixe de elétrons e espirramento (*sputter*), corrosão por plasma, corrosão eletroquímica, difusão, implantação, deposição epitaxial, soldagem anódica e soldagem silício-silício. Estas técnicas são aplicadas na microfabricação em corpo ou superfície [15].

Um sensor piezorresistivo clássico combina processos de semicondutores como fotolitografia, implantação iônica, difusão, deposição de resistores de filmes finos, ajuste por laser em pastilha e corrosão química. Os piezorresistores podem ser difundidos ou implantados. O diafragma de silício é geralmente obtido através de corrosão química.

Uma seqüência típica de fabricação de um sensor integrado em tecnologia bipolar começa com a difusão dos dispositivos bipolares através de técnicas convencionais para circuitos integrados. Após a difusão, filmes finos de cromo e silício, além de linhas de interconexão de alumínio são depositados. Uma vez que os dispositivos eletrônicos estão completos, uma cavidade é feita por corrosão anisotrópica através de KOH ou TMAH na face oposta da placa de silício para formar o diafragma. Finalmente, a pastilha de silício é soldada em uma placa de vidro em uma câmara de vácuo para formar uma cavidade com pressão absoluta de referência abaixo do diafragma [21], [34].

3.4 Sensores de temperatura

Materiais podem apresentar coeficiente de temperatura negativo, NTC (*Negative Temperature Coefficient*), ou positivo, PTC (*Positive Temperature Coefficient*). Costuma-se dizer que um sensor de temperatura é do tipo NTC quando a resistividade do material do qual é fabricado diminui com o aumento da temperatura. O comportamento oposto se observa nos sensores do tipo PTC.

Dentre os tipos de sensores que se destacam em aplicações automotivas há os sensores do tipo RTD, circuito integrado e termistores [18].

O sensor do tipo RTD (*Resistive Temperature Detector*) suporta aplicações de alta temperatura. Exibe uma característica com coeficiente positivo, do tipo PTC, uma vez que os metais ou ligas de que é feito apresentam aumento da resistividade com a temperatura.

Circuitos integrados para medição de temperatura permitem a geração de um sinal de temperatura calibrado na faixa de temperatura de até 150°C. Sua principal desvantagem é o custo elevado.

Termistores têm larga aplicação em automóveis na verificação de variáveis relacionadas ao controle do motor [19]. Exibem uma ampla gama de temperaturas de trabalho e são feitos de materiais cerâmicos ou semicondutores, o que lhes permite exibir características com coeficiente do tipo positivo (PTC) ou negativo (NTC). São fabricados em uma grande variedade de cápsulas e especificações.

3.4.1 O termistor

Naturalmente, a resistividade de um material metálico ou óxido semicondutor (os mais empregados) varia com a temperatura. O coeficiente de temperatura da resistividade α_r ou TCR é definido como:

$$\alpha_r = \frac{1}{\rho_0} \frac{d\rho}{dT} \quad \text{Eq. 9}$$

Onde, ρ_0 é resistividade padrão do material na temperatura de referência (zero ou 25°C).

Em um termistor NTC a equação de Steinhart-hart pode ser usada para modelar a relação entre resistência e temperatura, com precisão da ordem de $\pm 0,02\%$ [20] Eq. 10.

$$\frac{1}{T} = A + B \ln \frac{R}{R_{25}} + C \ln^2 \frac{R}{R_{25}} + D \ln^3 \frac{R}{R_{25}} \quad \text{Eq. 10}$$

Onde:

A, B, C, D : constantes do componente;

R : resistência na temperatura T (Ω);

R_{25} : resistência padrão na temperatura 25°C (Ω);

T : temperatura (kelvin).

No projeto de um circuito com termistor deve-se procurar reduzir o erro por auto-aquecimento, diminuindo-se a corrente de excitação. Isso pode ser conseguido através do aumento das resistências e diminuição da tensão de polarização. Uma alternativa válida é o chaveamento da excitação do componente, aplicando-se corrente somente nos momentos de leitura do sinal.

3.5 Sensores MAP

Atualmente, sensores de pressão absoluta do duto de admissão (MAP – *Manifold Absolute Pressure Sensor*) fazem parte dos sistemas de controle de motores de combustão interna e medem o vácuo no duto de admissão. Quando o motor realiza um ciclo de admissão, um dado cilindro gera uma redução de pressão no duto de admissão para receber a mistura ar-combustível. A pressão nesse duto é informada à unidade eletrônica de controle do motor (ECU) que então calcula a vazão mássica de ar (MAF) através do método da velocidade-densidade (Eq. 11) [21].

$$MAF = \frac{n \cdot MAP \cdot Volume \cdot RPM}{IAT} \quad \text{Eq. 11}$$

Onde:

MAF: vazão mássica de ar [g/min]

n: fator empírico de ajuste;

MAP: pressão absoluta no duto de admissão [kPa]

Volume: volume do cilindro multiplicado pelo número de cilindros [litros]

RPM: número de rotações do motor por minuto [min^{-1}]

IAT: temperatura do ar ou da mistura ar-combustível admitida [K]

Com o resultado desse cálculo, a ECU controla o fluxo instantâneo de combustível pelos bicos injetores de modo a atingir a proporção estequiométrica da mistura ar-combustível (*AFR*).

O controle da mistura ar-combustível permite queimar o combustível de modo a atingir uma potência aceitável ao mesmo tempo em que reduz o nível de emissão de poluentes nos gases de exaustão, permitindo a operação de conversores catalíticos. Poluentes como monóxido de carbono (CO) e hidrocarbonetos (C_xH_x) estão associados a uma mistura rica em combustível, enquanto que óxidos de nitrogênio (NO_x) estão associados a uma mistura pobre e altas temperaturas de combustão [22], [23].

Esse método de cálculo é dependente da densidade do ar que, por sua vez, varia com a altitude. Assim, é importante determinar a pressão atmosférica. Isso pode ser realizado medindo-se a pressão com o mesmo sensor quando o motor está desligado.

Assim, as variáveis de interesse para o controle do motor são a pressão (*MAP*) e a temperatura (*IAT*).

Dois tipos de sinal de pressão podem se originar do mesmo sensor, dependendo de onde a tomada de pressão se localiza no motor: 1) um sinal de pressão instantânea, contendo rápidas variações de pressão devido à admissão de ar pelos cilindros – nesse caso, o sensor localiza-se próximo ao coletor de admissão; 2) um sinal de pressão absoluta média – nesse caso, o sensor localiza-se distante do coletor, conectado ao mesmo através de um tubo que filtra as variações de pressão e, portanto, o sensor pode ser colocado junto à central eletrônica de controle do motor.

As especificações gerais do sensor MAP variam entre montadoras e fabricantes, dependendo do algoritmo, tecnologia e requisitos do sistema. Exemplos de especificações podem ser encontrados em [24], [25], [26].

Sensores MAP modernos são baseados em sensores de pressão piezorresistivos ou capacitivos [27]. O sinal de saída de um sensor MAP pode ser de frequência variável de 80 a 180Hz, embora a saída de tensão de 0 a 5V seja mais comum. A alimentação elétrica de 5V é proveniente da ECU. A faixa de pressão é de 0 a 105 kPa típica para motores aspirados, enquanto que para motores turbo, a faixa de pressão é de até 250kPa. As temperaturas de operação variam de -40 to +125°C e as tolerâncias especificadas são cerca 1 a 2% para componentes novos.

Em motores onde o sensor localiza-se no coletor de admissão pode-se integrar o sensor de pressão absoluta e o sensor de temperatura do ar admitido no mesmo invólucro.

Esta abordagem permite que o mesmo sinal de temperatura possa ser usado para compensação de temperatura do sensor no local ou informado à central eletrônica de controle do motor. A Figura 1 mostra um MAP automotivo com sensor de temperatura [28].

Figura 1 – MAP com sensor de temperatura Bosch modelo 0 261 230 022, (A) tomada de pressão, (B) sensor de temperatura.

Os sensores de pressão embarcados, especialmente para o controle do motor são severamente requeridos durante sua vida útil. Eles devem operar de modo confiável durante milhões de ciclos de pressão e temperatura, enquanto expostos a choques térmicos e mecânicos, combustíveis e outros químicos. Mesmo após testes de qualificação, devem manter suas tolerâncias menores do que 2%.

3.6 Condicionamento de sinais

O sinal fornecido por um sensor de pressão piezorresistivo necessita de amplificação, compensação de temperatura, calibração de zero e fundo de escala. O circuito de interface deve também amplificar e gerar um sinal de saída de baixa impedância e em nível adequado para posterior leitura por outros sistemas.

3.6.1 A ponte de Wheatstone

A ponte de Wheatstone foi inventada por Samuel Hunter Christie em 1833 e melhorada por Sir Charles Wheatstone em 1843. Trata-se de um arranjo de resistores que possui a finalidade de medir a resistência elétrica.

O arranjo possui dois ramos por onde a corrente se divide. Cada ramo é composto por dois resistores em série, como mostrado na Figura 2.

Figura 2 – Ponte de Wheatstone com sinal de excitação VB e sinal de saída V.

Quando a ponte está em equilíbrio, a tensão V é zero e a equação é válida:

$$\frac{R4}{R1} = \frac{R3}{R2} \quad \text{Eq. 12}$$

Essa propriedade é útil para determinar uma resistência desconhecida na ponte. Se $R1$ é desconhecido pode-se ajustar $R4$ até que se obtenha a tensão zero de equilíbrio.

Em aplicações da topologia de ponte em sensores, um ou mais resistores da ponte são os elementos transdutores de grandezas físicas. Desse modo, a tensão medida na ponte é um indicativo da variação da grandeza a ser medida.

Embora possa se usar um ou dois elementos transdutores, a configuração de ponte onde todos os elementos variam em função da grandeza a ser medida oferece o maior ganho de sinal e é inerentemente linear. Para uma ponte desse tipo, alimentada por uma tensão contínua V_B , com resistências iguais de valor R e uma variação de resistência ΔR , a tensão de saída V é dada pela equação:

$$V = V_B \cdot \frac{\Delta R}{R} \quad \text{Eq. 13}$$

Como existe dependência entre V e V_B , a tensão de alimentação deve ser fixa dentro da exatidão requerida para o sinal de saída ou mesmo medida para compensação de suas variações.

3.6.2 Amplificação do sinal

As variações de resistência da ponte em um sensor geram tensões da ordem de dezenas a centenas de mV. A amplificação se faz necessária para a redução da relação sinal-ruído e ganho de resolução, tornando o sinal adequado para uma posterior conversão analógico-digital [29], [30].

Um amplificador de instrumentação é um circuito especificamente designado para este tipo de aplicação. Suas características incluem baixo offset CC, baixa deriva, baixo ruído, alto ganho de malha aberta, alta razão de rejeição de modo comum e alta impedância de entrada.

Figura 3 – Amplificador de instrumentação

O ganho de tensão ajustado pelo resistor R é dado pela equação:

$$\frac{V_s}{V_2 - V_1} = \left(1 + \frac{2.R_1}{R}\right) \cdot \frac{R_3}{R_2} \quad \text{Eq. 14}$$

3.6.3 Tratamento digital de sinais

O sinal não compensado de um sensor de pressão pode ser tratado através de processamento digital. Para tanto, as tensões fornecidas por um sensor de pressão em ponte e, também por um sensor de temperatura, são convertidas para o domínio digital através de conversores AD programáveis. Após a conversão, o sinal é tratado matematicamente por um processador digital. Neste momento podem ser realizadas operações de compensação de temperatura e ajustes de offset e ganho, uma vez que as constantes das equações podem ser armazenadas em memória não-volátil. Após o cálculo do valor de pressão, o sinal digital é convertido novamente para o domínio analógico através de um conversor DA. Esta abordagem traz vantagens sobre a abordagem analógica. Em primeiro lugar, o circuito de condicionamento torna-se relativamente flexível para qualquer característica de sensor, permitindo o uso de curvas de calibração eletrônicas. Em segundo lugar, os procedimentos de calibração em programa (*software*) dispensam técnicas sofisticadas e caras de ajuste por laser no chip [31].

A taxa de amostragem do sinal deve ser alta o suficiente para garantir a conversão AD de toda a informação desejada no espectro da frequência, ou seja, respeitando o teorema de Nyquist para a resposta em frequência de interesse.

3.7 Acondicionamentos

3.7.1 Acondicionamento do sensor

O acondicionamento de um sensor de pressão apresenta dois requisitos conflitantes: deve prover contato com o meio a ser medido e deve providenciar adequada proteção contra efeitos como corrosão das conexões elétricas, contaminação química e esforços que podem causar a alteração das características do sensor. Esses requisitos têm promovido intensas pesquisas em cápsulas poliméricas, materiais para colagem da pastilha e para proteger quimicamente o sensor. Estes materiais devem suportar além de vapores de combustível e óleo presentes no coletor de admissão, também a contaminação por agentes ácidos e iônicos [32], [33], [34].

O acondicionamento deve prover basicamente:

- Suporte mecânico,
- Interface elétrica,
- Proteção ambiental,
- Interface com o meio.

O número de terminais do acondicionamento varia de acordo com a aplicação do produto. Assim, dependerá de como é a montagem final do sensor e do circuito de condicionamento. Os terminais possuem em geral espaçamento e configurações típicos para montagem de componentes SMD (*Surface Mount Device*) em SMT (*Surface Mount Technology*) ou PTH (*Plated Through-Hole*). No entanto, devido à abertura para medida de pressão, os terminais não são convencionalmente revestidos com solda ou banhados. Em seu lugar é aplicado um recobrimento de ouro.

O acondicionamento deve incluir uma abertura para a tomada de pressão absoluta. No caso de pressão diferencial, o acondicionamento deve possuir duas aberturas. Dependendo da montagem do sensor, as aberturas podem necessitar de conexão com tubos do invólucro do módulo MAP.

Uma vez selecionado o acondicionamento, processos convencionais de montagem incluem:

Colagem da pastilha (*Die attach*): trata-se da colagem da pastilha do sensor no substrato do material da cápsula utilizada para o acondicionamento. É fundamental na montagem de sensores de pressão, pois deve reduzir tensões mecânicas aplicadas na pastilha, que podem alterar a resposta do sensor [35].

Soldagem por fio (*Wirebonding*): trata-se de um método para efetuar conexões elétricas entre terminais de componentes eletrônicos integrados. É amplamente usado na fabricação de semicondutores e circuitos integrados ou híbridos na conexão entre os circuitos integrados e os terminais do invólucro. O método consiste da soldagem de um fio de Ouro, Cobre ou Alumínio de diâmetro maior ou igual a $15\mu\text{m}$ entre contatos metálicos. A soldagem é essencialmente realizada aplicando-se uma combinação de pressão, calor e ultrassom entre o fio e o terminal metálico [36].

Passivação (*Passivation*): é processo de tornar um material inerte em relação ao outro antes de colocá-los juntos. Em circuitos integrados e dispositivos de silício, aplica-se uma fina camada de óxido ou nitreto superficial com algumas moléculas de espessura a fim de proteger o dispositivo contra corrosão, difusão ou penetração de impurezas e para protegê-lo até o momento da soldagem.

A seguir costuma-se realizar procedimentos de caracterização e calibração, muito comumente o ajuste via laser e separação dos dispositivos (*dicing*). A Figura 4 mostra uma cápsula com sensor. Nota-se a passivação, no nível da cápsula, feita a partir de um gel de silicone para impedir a contaminação do sensor e dos contatos metálicos através do meio externo.

Figura 4 – Esquema de acondicionamento da pastilha de sensor de pressão com membrana microfabricada.

3.7.2 Acondicionamento do módulo automotivo

O módulo MAP automotivo tem sido construído em um invólucro de plástico moldado contendo os terminais elétricos estampados para o conector de interface com o chicote do veículo. Invólucros de materiais metálicos têm sido utilizados em uma minoria de aplicações. Os invólucros plásticos são desenvolvidos de modo a assegurar que o módulo MAP seja à prova de água e robusto ao ambiente do interior do compartimento do motor do veículo (Figura 5).

Figura 5 – Típico ambiente de instalação do sensor MAP: (A) posição do sensor, (B) coletor de admissão.

A Tabela 1 lista exemplos de requisitos sob os quais são testados os módulos MAP de modo a assegurar uma vida útil maior que 10 anos ou 100.000 quilômetros. É importante ressaltar que, após os testes, o módulo deve manter uma estabilidade típica dentro de 0,1 a 0,3% do fundo de escala. Testes mais rígidos, incluindo testes para indução de falha aceitam variação de até 1%.

Tabela 1 – Requisitos de durabilidade automotivos.

Teste	Condições	Duração
Alta temperatura	100°C a 5 V	1000 h
Choque térmico	-40°C a 125°C	1000 ciclos
Alta temperatura e umidade	85°C a 85% umidade relativa (U.R.) e sem polarização	1000 h
Pressão, temperatura e alimentação	20 kPa até pressão atmosférica, 5 V, -40°C a 125°C	3000 h
Armazenagem quente	125°C	1000 h
Armazenagem fria	-40°C	1000 h
Ciclagem de pressão	20 kPa até pressão atmosférica	2.000.000 ciclos
Sobre-pressão	2 × P max	
Vibração	5-10 g, varredura de frequência	30 h, cada eixo
Choque	50 g, pulsos de 10 ms	100 vezes nos três planos
Compatibilidade com fluidos e meio	Ar, água, água corrosiva, gasolina, metanol, etanol, diesel, óleo de motor, ácido nítrico e ácido sulfúrico.	Varia com aplicação

Duas abordagens são utilizadas para acondicionar o sensor e a eletrônica no invólucro plástico. Uma utiliza um substrato onde são montados os sensores e a eletrônica de condicionamento. O substrato é então preso ao invólucro e ligado aos terminais elétricos. Esta opção é adequada às configurações que usam múltiplos circuitos integrados e permite a utilização de circuitos adicionais de proteção contra transientes de tensão e EMC. No entanto, são necessárias múltiplas vedações para a medida de pressão e proteção contra contaminação e vazamentos no interior do módulo.

Uma segunda abordagem elimina o custo da utilização do substrato. Isso ocorre porque o sensor e a eletrônica de condicionamento estão na mesma pastilha e são montados no mesmo invólucro, que por sua vez é montado diretamente no módulo automotivo. Embora as duas abordagens possam levar a reduções significativas de dimensões, as mesmas estão limitadas às especificações das montadoras, dimensões dos conectores, tomadas de pressão e fixação mecânica.

A Figura 6 mostra um exemplo de acondicionamento do módulo automotivo. Neste caso, a passivação feita à base de gel ao nível do módulo automotivo é responsável por adequar o sensor ao meio ambiente. Notar que este é um tipo de abordagem que elimina a necessidade da cápsula exclusiva do sensor [37].

Figura 6 – Esquema de acondicionamento do módulo MAP automotivo.

3.8 Tecnologia LTCC

Desde os anos 1980 a tecnologia de cerâmica de baixa temperatura de sinterização ou *LTCC* (Low Temperature Co fired Ceramic) oferece uma alternativa de baixo custo para a construção de micro-estruturas, sistemas micro-fluídicos e microssistemas, além da aplicação em circuitos híbridos [38], [39]. Esta tecnologia foi originalmente criada para indústria eletrônica e por isso, o projeto de circuitos pode ser realizado através de ferramentas *CAD* (Computer Aided Design) e das técnicas convencionais para componentes *SMD* e *PTH*. É importante mencionar que o

substrato *LTCC* oferece vantagens aos substratos convencionais, como o FR4 (popularmente conhecido como “fibra de vidro”) ou resina fenólica (“fenolite”). Dentre suas características, destacam-se a maior resistência a meios agressivos, excelente condutividade térmica e coeficiente de expansão térmica próximo ao do Silício (Tabela 2). Particularmente, essas qualidades aumentam a confiabilidade de dispositivos fabricados sobre esse substrato. Graças à alta constante dielétrica, também melhora o comportamento de dispositivos que operam em altas frequências.

Tabela 2 – Propriedades do LTCC, dados do fabricante.

Propriedades físicas	
Espessura em estado verde (μm)	50 ± 3 (951C2)
	114 ± 8 (951PT/951AT)
	165 ± 11 (951P2/951A2)
	254 ± 13 (951PX/951AX)
Encolhimento X, Y (%)	$12,7 \pm 3$
Encolhimento Z (%)	$15 \pm 0,5$
TCE (25 a 300°C) (ppm/°C)	5,8
Densidade (g/cm^3)	3,1
Curvatura (m/m)	Conforma-se ao molde
Rugosidade superficial (μm)	$< 0,34$
Condutividade térmica (W/mK)	3,3
Resistência à flexão (Mpa)	320
Módulo de Young (Gpa)	120
Propriedades elétricas	
Constante dielétrica a 3 GHz	7,8
Tangente de perdas a 3 GHz	0,006
Resistência de isolamento a 100VDC (Ω)	$> 10^{12}$
Voltagem de ruptura ($\text{V}/\mu\text{m}$)	$> 1000/25$

O processo de fabricação é ilustrado na Figura 7. A cerâmica é fornecida em folhas padronizadas, inicialmente em estado “verde”. Nesse estado, constitui-se de um aglomerado de partículas de Alumina (Al_2O_3) e vidro, mantidas coesas por um ligante orgânico. Enquanto verde, a cerâmica pode ser facilmente furada e cortada de acordo com o dispositivo projetado. Através de serigrafia, filmes espessos são impressos formando padrões condutores e componentes híbridos. Da mesma maneira, podem-se preencher as vias que conectam as diferentes camadas do circuito. Após a impressão, as camadas são unidas e o conjunto é laminado. Em

seguida a sinterização é feita conforme o processo descrito na Figura 8, onde a temperatura máxima atingida é 850°C.

Figura 7 – Processo de fabricação de circuitos em LTCC.

Figura 8 – Processo de sinterização da cerâmica LTCC.

No processo de sinterização, a cerâmica sofre um encolhimento esperado da ordem de 15% [40]. Após a obtenção do substrato rígido, seguem-se as etapas convencionais de montagem de componentes e por fim, os testes.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo são apresentados os materiais e métodos utilizados, assim como os equipamentos e procedimento experimental realizado.

4.1 Descrição dos sensores

Para a construção do módulo MAP foram escolhidos os sensores Intesema MS7801A [41] e First Sensor LPSi100-HT-A [42]. A escolha desses componentes se deu principalmente por serem adequados à aplicação de medidas de pressão absoluta na faixa de interesse (0 a 100kPa), pelo projeto consagrado com elevada sensibilidade e linearidade, bem como sua disponibilidade como pastilha não encapsulada. Esta última característica permite explorar alternativas de montagem e acondicionamento que permitam aperfeiçoar mecanicamente o sensor MAP e reduzir suas dimensões. Além disso, a escolha de dois sensores diferentes permitirá comprovar a versatilidade do circuito de condicionamento. As aplicações comuns desses sensores são em barômetros, altímetros, indicadores de deslocamento vertical e outras aplicações industriais, automotivas e aeroespaciais de elevada confiabilidade.

Em ambos os modelos, o elemento sensor consiste de uma membrana micro-fabricada em silício (espessuras da ordem de 20 μm para o MS7801A e 50 μm para o LPSi100) e montada sob vácuo em uma superfície de vidro. Resistores implantados na membrana fazem uso do efeito piezorresistivo para converter a pressão em um sinal elétrico. Por se tratar de um sensor de pressão absoluta, uma das faces da membrana de silício encontra-se sobre uma cavidade selada a vácuo, enquanto que a outra face fica exposta à pressão variável.

As características do sensor MS7801A são descritas a seguir e constam na Tabela 3.

Tabela 3 – Especificações do sensor MS7801A, dados do fabricante.

Características Elétricas					
(Condições de referência: Tensão de alimentação $V_s=5V_{dc}$; Temperatura ambiente $T_a=25^{\circ}C$)					
Parâmetro	Mín	Típico	Máx	Unidade	Notas
Faixa de pressão de operação	0		1	Bar	
Faixa de temperatura de operação	-40		125	$^{\circ}C$	
Resistência da ponte	3,0	3,4	3,8	k Ω	
Fundo de escala de saída (<i>span</i>)	120	150	180	mV	
Tensão para pressão zero (<i>offset</i>)	-40	0	40	mV	
Linearidade		$\pm 0,05$	$\pm 0,2$	%F.S.	1
Coeficiente de temperatura da resistência	2400	2800	3300	ppm/ $^{\circ}C$	2
Coeficiente de temperatura do span	-1500	-1900	-2300	ppm/ $^{\circ}C$	
Coeficiente de temperatura do offset	-80		80	$\mu V/^{\circ}C$	
Histerese em pressão		$\pm 0,05$	$\pm 0,15$	%F.S.	3
Repetibilidade		$\pm 0,05$	$\pm 0,15$	%F.S.	4
Histerese em temperatura			0,3	%F.S.	5

Notas

- 1) Desvio a meia escala de pressão da reta dos mínimos quadrados em toda escala de pressão.
- 2) Ângulo do fim da linha reta de $25^{\circ}C$ a $60^{\circ}C$.
- 3) Desvio da saída em qualquer pressão dentro da faixa, quando esta pressão é ciclada de e para o mínimo ou máximo de pressão, a $25^{\circ}C$.
- 4) Mesmo que 3) depois de 10 ciclos de pressão.
- 5) Máxima diferença de offset depois de um ciclo térmico completo de $-40^{\circ}C$ a $+125^{\circ}C$.

A pressão de sobrecarga é 5BAR e a tensão máxima absoluta 20V. A máxima faixa de temperatura é -40 a $+150^{\circ}C$.

A membrana é microfabricada em uma pastilha de silício de dimensões 1,98 x 1,84 x 0,9mm e possui uma área de 0,9 por 0,9mm, sendo protegida contra umidade por uma camada de nitreto de silício. A pastilha é soldada sobre uma lâmina de vidro tipo Pyrex através de soldagem anódica. A Figura 9 apresenta o sensor utilizado.

Figura 9 – Sensor de pressão MS7801A.

Os quatro resistores da membrana estão configurados como uma ponte resistiva de Wheatstone e seus terminais estão disponíveis para acesso externo à pastilha através de seis áreas de contato, duas das quais são interligadas eletricamente e formam o terminal de alimentação positivo da ponte. Os outros acessos constituem-se dos terminais de saída e dos terminais negativos separados. Cada contato (sapata de ligação – *pad*) possui 100 por 100 μ m. O material do contato é alumínio com uma espessura de 1 a 2 μ m.

Os elementos sensores são resistências difundidas na camada epitaxial de silício e possuem uma resistência típica de 3,4k Ω . O coeficiente de temperatura típico é de +2800ppm/ $^{\circ}$ C com uma abertura (variação máxima) de -1900ppm/ $^{\circ}$ C. Não há compensação em temperatura na pastilha.

As características do sensor LPSi100-HT-A constam na Tabela 4 e são descritas a seguir.

Tabela 4 – Especificações do sensor LPSi100-HT-A, dados do fabricante.

Características Elétricas					
(Condições de referência: Tensão de alimentação Vs=5Vdc; Temperatura ambiente Ta=25 $^{\circ}$ C)					
Parâmetro	Mín	Típico	Máx	Unidade	Notas
Faixa de pressão de operação	0		100	kPa	
Faixa de temperatura de operação	-40		225	$^{\circ}$ C	
Resistência da ponte	3	3,6	4,2	k Ω	
Fundo de escala de saída (<i>span</i>)	60	100	140	mV	1
Tensão para pressão zero (<i>offset</i>)	-25	0	25	mV	1
Linearidade		< 0,3	0,5	%F.S.	2
Coeficiente de temperatura da resistência	0,24	0,27	0,3	%F.S./K	
Coeficiente de temperatura do span	-0,16	-0,18	-0,2	%/K	
Coeficiente de temperatura do offset	-80		80	μ V/ $^{\circ}$ C	
Notas					
1) Medido de 25 $^{\circ}$ C a 225 $^{\circ}$ C					
2) Erro no fim da linha reta					

A pressão de sobrecarga é três vezes a pressão máxima e a tensão máxima é 5V. A máxima faixa de temperatura é -40 a +225 $^{\circ}$ C.

A membrana é microfabricada em uma pastilha de silício sobre isolante (SOI) de dimensões 2,74 x 2,74 x 1,19mm. A Figura 10 apresenta o sensor utilizado.

Figura 10 – Sensor LPSi100-HT-A

Os quatro resistores da membrana estão configurados como uma ponte resistiva de Wheatstone. Os outros acessos constituem-se de terminais para diodos extras. Cada contato possui 220 por 220 μ m. O material do contato é alumínio.

Os elementos sensores possuem uma resistência típica de 3,6k Ω . O coeficiente de temperatura típico é de 0,27%/K. Não há compensação em temperatura.

O sensor de temperatura utilizado é o Vishay NTCLE100E3103, um termistor NTC de resistência nominal 10k, visto na Figura 11 [43]. Suas características são mostradas na

Tabela 5.

Figura 11 – Sensor de temperatura do tipo Termistor.

Tabela 5 – Especificações do termistor NTCLE100E3103, dados do fabricante.

Parâmetro	Valor
Valor de resistência a 25°C (R25)	10,0 k Ω
Tolerância em R25	5%
Dissipação máxima	0,5W
Faixa de temperatura de operação	-40°C a 125°C
A1	3,354016E-03
B1	2,569850E-04
C1	2,620121E-06
D1	6,383091E-08

4.2 Descrição da eletrônica associada

O circuito eletrônico de condicionamento de sinal do sensor de pressão foi projetado para fornecer uma indicação de pressão compensada em temperatura através de sinais de tensão. Fazendo uso de um circuito microprocessado e circuitos integrados específicos, o circuito realiza medidas de sinal de pressão de sensor em ponte resistiva não compensada e de um sensor resistivo de temperatura NTC, calcula a compensação de temperatura e gera um sinal em saída de tensão.

O circuito tem diferentes seções, envolvendo a conexão aos sensores, a aquisição de sinais analógicos, o processamento digital e a geração de sinais analógicos. Esse circuito foi projetado utilizando um microcontrolador PIC de 16 bits, um conversor AD de 16 bits com amplificador de ganho programável (PGA) e conversores DA de 12 bits, bem como os sensores de pressão e temperatura. O diagrama de blocos pode ser visto na Figura 12.

Figura 12 – Diagrama em blocos do circuito de condicionamento do sensor MAP.

O microcontrolador mede os sinais dos sensores através do PGA, realiza os cálculos de compensação e calibração e gera os sinais analógicos de 0 a 5V através dos conversores DA. O microcontrolador é também capaz de efetuar comunicação serial para troca de dados.

A programação é feita no circuito. O desenvolvimento e a programação são executados através da ferramenta MPLAB IDE v8.60. Assim, o microcontrolador pode

ser programado em linguagem de máquina ou em linguagem C. O trecho a seguir na Tabela 6 mostra o código em C utilizado para o cálculo da pressão e tensão de saída. Note que as variáveis de offset e ganho podem ser alteradas para sensores diferentes, bem como a função de transferência pode ser determinada pelas variáveis k_1 e k_2 .

Tabela 6 – Código em C para o cálculo da pressão e tensão de saída.

//Calcula a pressão a partir da tensão da ponte, offset e ganho do sensor sensor_p_pressao = (Vin_ADC - sensor_p_offset)/sensor_p_ganho;
//Calcula a função de transferência entrada-saída Vmap = Vs*(sensor_p_pressao*k1-k2);

O uso do conversor AD e PGA simplificam o projeto da etapa analógica. Por outro lado, o microcontrolador pode armazenar em sua memória flash não volátil uma variedade de curvas e tabelas de calibração e compensação. Esta abordagem torna o circuito aplicável a uma grande variedade de sensores e sinais.

As características do circuito são:

Alimentação:

- +5 Volts $\pm$ 10%, regulados.

Microprocessador:

- Tipo: PIC18F, 16 bits, fabricante Microchip;
- Frequência: 8MHz;
- Memória Flash: 16kbytes;
- Memória RAM: 1kbytes;
- Memória EEPROM: 256bytes

Conversor AD:

- Ganho e offset variáveis podem ser alterados e definidos nos registradores;
- Conversão por capacitores chaveados e amostragens sucessivas;
- Aquisição em modo diferencial;
- Resolução de até 16 bits;
- Comunicação via interface I2C;

Conversor DA:

- Conversão instantânea por rede resistiva;

- Resolução de 12 bits;
- Comunicação via interface I2C;

Sensores admitidos:

- Pressão: tipo piezorresistivo em ponte de Wheatstone;
- Temperatura: termistor NTC;

Para fins de validação de funcionamento do programa e da topologia escolhida, o circuito foi inicialmente montado em fibra de vidro FR4 e tecnologia SMT, por ser um processo conhecido. A Figura 13 mostra o circuito utilizado para os testes de funcionamento.

Figura 13 – Circuito de leitura e condicionamento de sinais montado em placa de fibra de vidro FR4.

4.3 Construção

4.3.1 Armazenamento e manuseio do sensor

As pastilhas dos sensores são entregues como lâminas de silício, serradas e coladas em uma folha adesiva. Unidades defeituosas geralmente são marcadas com um ponto. A lâmina serrada é acondicionada em bolsas antiestáticas preenchidas com nitrogênio. A atmosfera de nitrogênio protege o sensor contra umidade e corrosão durante o transporte e armazenamento. As bolsas devem ser abertas em sala limpa e armazenadas em uma ambiente com nitrogênio depois de abertas. O armazenamento não deve ser maior do que 90 dias, pois problemas de oxidação dos contatos de alumínio podem ocorrer. A temperatura de armazenamento deve ficar entre 19 e 26°C.

A superfície da lâmina é sensível e devem ser evitadas operações de limpeza. O manuseio do sensor não deve ser realizado com pinças mecânicas, mas usando pinças de vácuo de tamanho tal que cubra o diafragma. Qualquer força exercida deve ser menor que o equivalente a 100g. O excesso de esforço mecânico pode resultar em um sensor com características instáveis e flutuação do offset. A limpeza da ferramenta deve ser efetuada por meio de limpeza em hidróxido de amônia e água (limpeza RCA2) para eliminar sujidades que possam causar a corrosão do sensor.

Temperaturas de processo acima de 225°C devem ser evitadas. Temperaturas menores favorecem a estabilidade do sensor em longo prazo.

4.3.2 Montagem do sensor

Vários fatores devem ser considerados durante a montagem do sensor de modo a se manter o melhor desempenho em termos de estabilidade em longo prazo, histerese e comportamento em temperatura.

Para a montagem da pastilha, devido a sua sensibilidade a esforços mecânicos, colas de silicone de baixa dureza (A25 ou menor) com uma camada de espessura entre 50 a 100µm são recomendadas. A colagem da pastilha com colas mais duras à base de epóxi ou silicone resultarão em comportamentos instáveis da tensão de offset e alto offset do coeficiente de temperatura [44].

Para o processo de soldagem de fio, os melhores resultados são conseguidos com fio de ouro de 30µm usando soldagem por processo termo-sônico com bola de ouro. A temperatura de soldagem é tipicamente 150°C. Uma boa soldagem resultará em uma força de cisalhamento da bola maior que o equivalente a 30g e uma força de tração maior que o equivalente a 6g.

Após a soldagem dos fios, o sensor deve ser protegido do meio ambiente com um gel macio de silicone livre de íons com viscosidade menor do que 1000cps e nenhuma dureza. O tipo de gel é de alta importância no desempenho do sensor. Bons resultados podem ser conseguidos com o gel Dow Corning Sylgard 527. O gel pode ser aplicado como uma gota na superfície do sensor ou em toda área em volta, incluindo soldagem, caso uma proteção maior seja desejada.

4.3.3 Montagem do sensor em cápsula tipo TO-5

Para a primeira etapa de testes o sensor foi encapsulado em um invólucro do tipo TO-5 de seis terminais. A tomada de pressão foi feita através de um orifício na parte superior da tampa da cápsula. A Figura 14 mostra detalhes do interior da cápsula, do invólucro fechado e detalhe do sensor e das conexões elétricas. Foi utilizada a cola tipo Ablestik, à base de epóxi, para fixar a pastilha na cápsula.

Figura 14 – Sensor de pressão montado em cápsula padrão TO-5: (A) cápsula aberta, (B) cápsula fechada com orifício para tomada de pressão, (C) detalhe do sensor.

4.3.4 Montagem do sensor no substrato

Para a montagem do sensor de pressão diretamente no substrato, foram utilizadas duas abordagens: primeiramente, a montagem convencional por *wirebonding*. Neste caso, o chip é colado no substrato com a cola Dow Corning 3145RTV. Em segundo lugar, foi desenvolvida uma técnica de montagem não-convencional semelhante à montagem conhecida como *flip-chip* [45]. O objetivo é explorar as possibilidades de montagem de pastilhas de silício, em especial, sensores, sobre o substrato cerâmico. Particularmente, a montagem *flip-chip* permite que a membrana do sensor fique voltada para o substrato. A vantagem é que a entrada de

pressão poderia ser feita pela face oposta do substrato, o que isolaria a entrada de pressão do lado dos componentes sem a necessidade de estruturas adicionais. Isso preservaria os componentes e contatos elétricos de fugas de combustível ou produtos químicos. Outra vantagem é que eliminaria as etapas de colagem da pastilha e conexão por *wirebonding*. A Figura 15 clarifica o processo.

Figura 15 – Estudo para montagem e acondicionamento do sensor em substrato cerâmico com sistema flip-chip: (A) substrato LTCC com contatos elétricos, (B) sensor de pressão MEMS, (C) conjunto montado com o diafragma sensor voltado para a cerâmica.

Contudo, o sensor escolhido não foi projetado especificamente para soldagem direta no substrato. Assim, etapas adicionais foram necessárias. Uma camada de fita Kapton é furada de modo a expor os contatos de alumínio na superfície da pastilha. Em seguida um adesivo condutor de prata Loctite 3880 é aplicado sobre os contatos. Após a cura térmica do adesivo a 125°C por 10 minutos, a camada de Kapton foi removida. A pastilha é então alinhada e colocada sobre os contatos do substrato com uma nova camada de adesivo condutor. Um novo passo de cura permite a fixação mecânica e elétrica do componente. A Figura 16 mostra um teste dessa técnica efetuado sobre um substrato convencional de resina fenólica.

Figura 16 – Sensor de pressão MEMS montado por *flip-chip*: (A) tomada de pressão, (B) placa de circuito impresso em resina fenólica, (C) sensor MS7801A, (D) fios de conexão, (E) detalhe (notar a camada de silicone protetora).

4.3.5 Projeto e construção dos protótipos em LTCC

Para a segunda etapa, o circuito completo foi montado sobre LTCC. O projeto seguiu o mesmo fluxo de trabalho de uma placa de circuito impresso convencional. Ferramentas de projeto de circuito impresso, como KICAD ver. 20100505 permitem a visualização em três dimensões do protótipo, facilitando o projeto mecânico e a verificação de conformidade dimensional (Figura 20).

Na construção do protótipo foram utilizadas técnicas de impressão por serigrafia. Para as dimensões envolvidas, baixo volume de produção e para o intuito deste trabalho, a técnica de serigrafia manual é suficiente. As ferramentas e o equipamento utilizados podem ser vistos na Figura 17 e Figura 18.

Figura 17 – Ferramentas utilizadas no processo de serigrafia: (A) tela, (B) fundo luminoso para alinhamento, (C) rodo, (D) máscara com furação.

A Figura 19 mostra a seqüência de fabricação executada. Em primeiro lugar, o leiaute foi aumentado 15% em escala para compensar os efeitos de encolhimento da cerâmica durante a sinterização (A). Uma vez que neste projeto em particular só existem duas camadas, a cerâmica em estado verde foi pré-laminada para atingir a espessura desejada. A laminação foi realizada com pressão de duas toneladas, a 90°C por 10 minutos. A cerâmica em estado verde é então cortada e furada de acordo com o desenho do circuito (B e C). Em seguida, as trilhas são impressas utilizando a tela de serigrafia e a pasta condutora soldável de prata-paládio (Ag/Pd) Dupont™ 6146 (D) e pasta de ouro AU QG150. Após secagem da pasta a 125°C por 10 minutos, as vias são preenchidas utilizando-se a máscara com furação e a pasta de prata (Ag) 6141. A próxima etapa é a sinterização no forno, seguindo o processo da Figura 8.

Figura 18 – Equipamentos utilizados no processo de fabricação LTCC: (A) fresa e furadora CNC LPKF PROTOMAT C100/HF, (B) Laminadora LACTEA, (C) Forno LINDBERG/BLUE.

Figura 19 – Seqüência de fabricação do substrato em LTCC: desenho do circuito a 115% (A), corte da cerâmica em estado verde (B), furação (C), serigrafia da pasta condutora em trilhas e vias (D), substrato após sinterização (E).

As etapas finais envolvem a montagem convencional de circuitos SMD, PTH, montagem dos sensores e os testes de operação. O protótipo finalizado com montagem *flip-chip* é mostrado na Figura 20, enquanto que na Figura 21, é mostrado o protótipo com montagem por *wirebonding*. Notar que, neste último, os componentes para geração do sinal de saída de temperatura não foram montados por simplicidade.

Figura 20 – Projeto e construção do MAP em LTCC: visualização 3D do projeto (A), protótipo finalizado (B). A seta mostra o sensor montado por *flip-chip*.

Figura 21 – Protótipo do MAP em LTCC com sensor de pressão montado por *wirebonding* (a) e sensor de temperatura (b).

Finalmente, o sensor e o circuito são protegidos por uma camada de gel de silicone, conforme mostra a Figura 22. No protótipo montado por *wirebonding* usa-se um invólucro adicional, como mostra a Figura 23. O gel de silicone utilizado foi o Dow Corning Sylgard 527.

Figura 22 – Estratégia de acondicionamento do sensor MAP com montagem *flip-chip*.

Figura 23 – Estratégia de acondicionamento do sensor MAP com montagem *wirebonding*.

O recobrimento do sensor através de gel de silicone deve fornecer interface mecânica entre os meios, de modo a transmitir a pressão aplicada ao sensor, não afetar as características do diafragma e suportar ataques químicos sem alterações significativas em sua estrutura.

A Figura 24 mostra o protótipo finalizado para testes de operação que adota a estratégia da Figura 23 e o circuito da Figura 21.

Figura 24 – Protótipo do MAP pronto para testes de operação. (A) invólucro plástico vedado com circuito do MAP em LTCC; (B) tubo de tomada de pressão; (C) fios de conexão.

4.4 Descrição dos procedimentos de medidas

A caracterização do MAP é feita em duas etapas. Primeiramente, os sensores de pressão e temperatura são caracterizados e suas características são inseridas no programa do circuito de condicionamento. Em segundo lugar, é feita a caracterização do módulo MAP em pressão e temperatura. Ambos os procedimentos são realizados no equipamento de plasma no Laboratório de Sistemas Integráveis do Departamento de Engenharia de Sistemas Eletrônicos da Escola Politécnica da USP (Figura 25), que permite a testar o sensor em pressões abaixo da atmosférica (vácuo). A pressão de referência é obtida através da bomba de vácuo EDWARDS QDP80 e medida através do transmissor de pressão WIKA P-10, Zürich PSI420 e Baratron WKS. O ajuste da pressão pode ser feito via sistema de controle de válvulas do equipamento e da bomba (válvula borboleta do vácuo e válvula da linha de entrada de gases). O controle de temperatura é realizado pelo banho térmico Haake F3, que se conecta na placa

térmica da câmara de vácuo. A fonte de rádio frequência é mantida desligada. A leitura dos sinais de pressão e temperatura é feita através do circuito de condicionamento e comparada aos sinais de referência. Os sinais são monitorados através de multímetros HP344401A e um computador (Figura 26). A alimentação é fornecida pela fonte Agilent E3631A. A Figura 27 mostra o detalhe da câmara de vácuo.

Figura 25 – Equipamento de plasma com câmara de vácuo (A) e bomba de vácuo (B) e banho térmico (C) usados para caracterização do sensor MAP.

Figura 26 – Aparato experimental: (A) controle de gases e medição de vácuo; (B) computador para coleta de dados; (C) fonte de alimentação e multímetro; (D) conexões elétricas com os sensores na câmara de vácuo.

Figura 27 – Detalhe da montagem experimental na câmara de vácuo: (A) sensor de referência; (B) sensor sob teste na placa térmica; (C) conexões elétricas.

4.4.1 Medidas a serem realizadas

4.4.1.1 Caracterização e compensação do sensor de pressão

Uma vez acondicionada, a pastilha do sensor é caracterizada com a finalidade de verificar a manutenção de suas especificações originais, uma vez que a montagem no invólucro pode alterar a resposta do sensor. O sensor, então, é submetido a ciclos de pressão, de modo a obter a resposta em tensão com a pressão aplicada e ciclos de temperatura, de modo a obter a resposta do offset e da sensibilidade da ponte em função da temperatura.

É possível a calibração e a compensação para um sensor individual, uma vez que se obtenham seus parâmetros. Considerando um modelo linear, pode-se assumir que para um sensor excitado por uma tensão V_s a tensão de saída do sensor V_p seja função da pressão p e temperatura T , possuindo a seguinte função de transferência:

$$V(p, T) = (pS(T) + O(T))V_s \quad \text{Eq. 15}$$

Onde, S [V/V/kPa] é a sensibilidade do sensor e o O [V/V] é o offset ou tensão da ponte para pressão zero.

Assumindo uma dependência linear da sensibilidade e do offset com a temperatura:

$$S(T) = S_{25}(1 + TCS(T - 25)) \quad \text{Eq. 16}$$

$$O(T) = O_{25} + TCO(T - 25) \quad \text{Eq. 17}$$

Onde, S_{25} e O_{25} são sensibilidade e offset medidos a 25°C.

O coeficiente de temperatura da sensibilidade ou TCS [ppm/°C] é definido como:

$$TCS = \frac{1}{S_{T_{ref}}} \frac{dS}{dT} \quad \text{Eq. 18}$$

O coeficiente de temperatura do offset ou TCO [V/V/°C] é definido como:

$$TCO = \frac{dO}{dT} \quad \text{Eq. 19}$$

Uma vez que o modelo linear do sensor contém quatro parâmetros independentes (S_{25} , O_{25} , TCS , TCO), uma calibração com duas medidas independentes de pressão, e.g. P_a , P_b em duas temperaturas, T e 25°C , permite determinar essas quatro variáveis.

Com mais pontos de medida é possível avaliar detalhadamente o comportamento do sensor e estabelecer funções de calibração e compensação não lineares.

4.4.1.2 Caracterização e calibração do MAP

Considerando-se que o MAP é alimentado por uma fonte regulada com tensão V_{SN} e que deve apresentar uma saída de tensão de acordo com a Figura 28, a sua função de transferência é:

$$V_{MAP} = V_{SN} (pK_1 - K_2) \pm E \quad \text{Eq. 20}$$

Onde:

$$K_1 = \frac{1}{V_{SN}} \cdot \frac{\Delta V}{\Delta P} \quad \text{Eq. 21}$$

$$K_2 = \frac{1}{V_{SN}} \cdot \left(\frac{\Delta V}{\Delta P} \cdot P_M - V_M \right) \quad \text{Eq. 22}$$

E = erro [V].

Figura 28 – Função de transferência (curva tensão versus pressão) do MAP.

A pressão p é dada por uma função inversa de $V(p, T)$, ou seja:

$$p = \frac{\frac{V(p, T)}{V_s} - O(T)}{S(T)} \quad \text{Eq. 23}$$

Estas equações e suas constantes são programadas para se obter a resposta do sensor MAP calibrada e compensada em temperatura.

A tensão de saída do MAP é medida para diversas pressões e temperaturas dentro da faixa de operação. Os dados são comparados com a resposta esperada para se determinar a exatidão e linearidade. Adicionalmente, são medidos:

- Consumo elétrico;
- Tempo de resposta;
- Tempo de ajuste.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos.

5.1 Calibração do sensor de temperatura

Na primeira etapa o sensor de temperatura foi exercitado e calibrado, fazendo uso do banho térmico. Utilizou-se uma abordagem direta, calculando-se a resistência do termistor pela medida da tensão no circuito de polarização do mesmo. Utilizando-se os coeficientes disponibilizados pelo fabricante e a equação de Steinhart-Hart, é calculada a temperatura. Os cálculos são executados pelo microcontrolador e a indicação de temperatura é enviada através do canal serial e obtida através de um computador. A temperatura do banho foi variada entre -20 e +100°C com exatidão de $\pm 0.1^\circ\text{C}$. A precisão do termistor é 5%. Os dados obtidos podem ser observados na Figura 29. Apesar da concordância entre valores para baixas temperaturas, observa-se um desvio não linear de mais de 5% para temperaturas acima de 50°C.

Figura 29 – Indicação da temperatura com termistor não calibrado.

Para a calibração foi realizada a regressão linear dos dados pelo método dos mínimos quadrados, considerando o erro da referência ($0,1^{\circ}\text{C}$) como desprezível. Obteve-se uma equação de reta $Y = (1,06026 \pm 0,00371)X + (0,11248 \pm 0,15526)$ com $r^2 = 0,99957$ e uma equação polinomial do 2º grau $Y = (0,00084 \pm 3,93493\text{E-}05)X^2 + (1,00307 \pm 0,00286)X + (0,00123 \pm 0,04189)$, com $r^2 = 0,99997$, ambos com $N=37$.

Os erros podem ser comparados na Figura 30. Os pontos foram substituídos por curvas para facilitar a visualização das tendências. Nesta figura fica claro o desvio do sinal original, bem como a escolha da melhor função para calibração. Nota-se que a distribuição do erro não é simétrica na faixa de operação. Daí decorre uma possível estratégia para reduzir o erro, que consiste em distribuir os erros em torno da temperatura central da escala. Como o máximo erro absoluto é em torno de 7% FE,

essa estratégia permitiria alcançar erros da ordem de 3,5% FE (traço azul da Figura 30). Para a correção linear, o erro seria de até 2% FE (traço vermelho da Figura 30). Porém, o erro é visivelmente crescente para além da faixa medida.

Por outro lado, adotando-se a função polinomial de segunda ordem (traço em verde da Figura 30) é possível calibrar a indicação de temperatura para uma exatidão melhor do que 0.5% FE, na faixa observada. Ressalta-se que essa escolha resulta na efetiva linearização do sinal original.

Figura 30 – Erros absolutos das diversas estratégias de calibração do sinal de temperatura.

Uma vez que a curva de calibração escolhida é programada, a comparação entre o sensor e a referência foi obtida (Figura 31). As barras de erro são pequenas para serem mostradas na figura. A regressão linear dos dados obtidos resulta na equação $Y = (0,99998 \pm 0,00075)X$ com $r^2 = 0,99998$ ($N=37$). O desvio máximo observado é de 0,2°C.

Figura 31 – Indicação de temperatura calibrada.

É importante ressaltar que a calibração é específica tanto para cada termistor como para o circuito onde é montado, devendo ser refeita para cada novo sensor. Como exemplo, pode-se ver a indicação de temperatura do termistor montado sobre a cerâmica na Figura 32. Nesse caso, nota-se uma resposta mais aderente em altas temperaturas. Por outro lado, há um leve descolamento na região de baixa temperatura. Isso se deve principalmente à diferença no circuito de polarização do termistor, no qual o resistor de polarização foi reduzido de 33k para 10k ohms. O efeito dessa mudança é alterar o ponto de polarização do termistor, centrando-o na região de 25°C. Este ponto poderia ser diferente, dependendo da temperatura de regime da aplicação. Note-se que foram utilizados menos pontos de medida em relação ao primeiro procedimento.

Figura 32 – Indicação da temperatura com termistor não calibrado montado no circuito do MAP em LTCC.

Para a calibração foi realizada a regressão linear dos dados pelo método dos mínimos quadrados. Obteve-se uma equação de reta $Y = (1,03008 \pm 0,002675)X + (-0,97779 \pm 0,11902)$ com $r^2=0,99992$ ($N=14$) e uma equação polinomial do 2º grau $Y = (-0,000200 \pm 9,54639E-05)X^2 + (1,04475 \pm 0,00756)X + (-1,04728 \pm 0,11118)$, com $r^2 = 0,99994$ ($N=14$).

Os erros podem ser comparados na Figura 33. Foi mantida a mesma escala da Figura 30 para comparação. Nota-se nessa comparação que o erro é mais bem controlado, já que a resposta é mais linear nessa faixa de temperatura (25°C). Ou seja, polarizar o sensor de temperatura em nesse ponto permitiu extrair um melhor comportamento do circuito, mesmo sem nenhuma estratégia de linearização.

Adotando-se a mesma estratégia anterior (função polinomial de segunda ordem, traço verde da Figura 33), é possível calibrar a indicação de temperatura para uma exatidão melhor do que 0.5% FE, na faixa observada.

Figura 33 – Erros absolutos de calibração do sinal de temperatura do MAP em LTCC.

Após a programação da curva de calibração, a comparação entre o sensor e a referência é obtida (Figura 34). A regressão linear dos dados resulta na equação $Y = (0,99997 \pm 0,00154)X$ com $r^2 = 0,99997$ ($N=14$).

Figura 34 – Indicação de temperatura do MAP em LTCC.

Uma vez calibrado, o termistor pode servir para aferir a temperatura próxima ao sensor de pressão, com maior precisão dentro da câmara de vácuo. Isso é importante para a correta caracterização dos parâmetros do sensor de pressão em temperatura, uma vez que os dois sensores estarão em contato com o mesmo meio ambiente durante a operação.

5.2 Caracterização dos sensores de pressão montados

Os procedimentos seguintes envolveram a extração dos parâmetros de ganho e offset dos sensores de pressão em suas diferentes montagens. Nesses casos, o circuito de condicionamento não efetua nenhuma compensação, de modo que é obtida a resposta direta do sensor.

5.2.1 Medida do offset

A tensão de offset foi medida para pressões próximas a zero. Nestes experimentos foi considerada a pressão menor do que 10Pa. Para cada sensor, foi realizada duas séries de medidas (Medida 1 e Medida 2), independentes, em cinco pontos de temperatura diferentes.

A Figura 35 mostra os resultados para o sensor MS7801A montado por *wirebonding* na cápsula metálica TO-5. O modelo linear obtido pelo método dos mínimos quadrados resulta na seguinte equação: $Y = (-0,04404 \pm 0,01109)X + (18,5404 \pm 0,40363)$, com $r^2 = 0,66356$ (N=10).

Figura 35 – Tensão de offset do sensor de pressão MS7801A montado em cápsula TO-5 e modelo linear de ajuste.

A Figura 36 mostra os resultados para o sensor MS7801A montado como *flip-chip*. O modelo linear obtido pelo método dos mínimos quadrados resulta na seguinte equação: $Y = (0,05211 \pm 0,00145)X + (-0,59337 \pm 0,06722)$, com $r^2 = 0,99388$ (N=10).

Figura 36 – Tensão de offset do sensor de pressão MS7801A montado como *flip-chip* em placa de circuito impresso.

A Figura 37 mostra o comportamento da tensão de offset do sensor LPSi100-HT-A montado através de *wirebonding* em LTCC. O modelo linear obtido resulta na equação $Y = (0,03664 \pm 0,00117)X + (-13,4943 \pm 0,05119)$, com $r^2 = 0,99196$ ($N=10$).

Figura 37 – Tensão de offset do sensor LPSi100-HT-A montado por wirebonding sobre a cerâmica LTCC.

No sensor MS7801A em cápsula TO-5, os dados apresentam um comportamento relativamente não linear, bem como um deslocamento vertical da ordem de 1,0 mV ou 0,7%F.E entre as duas séries de medidas (Figura 35). O offset a 25°C ficou próximo de 17 mV. Já para o sensor MS7801A em montagem *flip-chip* (Figura 36) e para o LPSi100-A-HT em montagem *wirebonding* (Figura 37), os dados apresentam um comportamento mais linear, sem deslocamento notável entre as duas séries. Nesses últimos, note-se que o offset do sensor LPSi100 a 25°C ficou próximo a -13 mV e o offset do sensor MS7801A montado por *flip-chip* ficou próximo do esperado a 25°C, com 0 mV e erro de menos de 1 mV.

Aparentemente, a montagem *flip-chip* não alterou significativamente a característica do sensor.

Comparando-se os resultados das montagens por *wirebonding*, verifica-se que o offset se alterou da ordem de 10% FE para mais e para menos.

Por outro lado, enquanto a resposta do sensor LPSi100-A-HT manteve-se linear, a resposta do MS7801A em cápsula TO-5 foi bastante afetada, exibindo além da não linearidade, uma leve tendência à deriva do offset entre medidas. Uma causa possível é o tipo de cola utilizada entre a pastilha e a cápsula metálica. A sua dureza excessiva causaria um subsequente esforço extra sobre o sensor e sua acomodação com a temperatura resultaria em uma variação imprevisível desse esforço e, por conseguinte, da tensão de offset.

5.2.2 Medida do ganho

O ganho é caracterizado exercitando toda a escala de pressão para diferentes temperaturas. Para cada sensor, foi fixada a temperatura em cinco valores diferentes e foi medida a tensão de saída para cinco pressões diferentes com exatidão de 0,1%. A resposta esperada do sensor é mostrada nas curvas: Máximo, Típico e Mínimo.

A Figura 38 revela o comportamento do sensor MS7801A em cápsula TO-5. Cada reta de tendência agrupa um conjunto de pontos de medida (N=5) obtidos em cada temperatura média (N=5). Na regressão linear das medidas, o erro de pressão é considerado desprezível. A Tabela 7 sumariza os resultados obtidos.

Figura 38 – Caracterização do sensor MS7801A montado em cápsula TO-5.

Tabela 7 – Regressões lineares, sensor MS7801A em cápsula TO-5.

y=ax+b	Temperatura média (°C)				
Parâmetro	4,3	20,6	42,7	64,2	76,4
a	1,51806	1,47253	1,42828	1,36251	1,28631
erro a	0,00040	0,00268	0,00489	0,00531	0,02048
b	10,14879	9,19087	8,81026	10,81390	9,33009
erro b	0,02437	0,16423	0,29308	0,31999	1,23187
r2	1,00000	0,99999	0,99996	0,99995	0,99924

Os coeficientes de ganho obtidos utilizados são mostrados na Figura 39. A regressão linear resulta na equação $Y = (-0,00301 \pm 0,0003)X + (1,53884 \pm 0,01651)$, com $r^2 = 0,96438$ (N=5), cujo modelo também é mostrado na figura.

Figura 39 – Ganho do sensor MS7801A em cápsula TO-5.

A Figura 40 mostra o comportamento do sensor MS7801A montado como *flip-chip*. A Tabela 8 sumariza os parâmetros da regressão linear das diferentes séries de dados.

Figura 40 – Caracterização do sensor MS7801A montado como *flip-chip*.

Tabela 8 – Regressões lineares, sensor MS7801A como *flip-chip*.

y=ax+b	Temperatura média (°C)				
Parâmetro	6,6	23,4	48,7	58,1	74,3
a	1,54280	1,49653	1,43125	1,41012	1,37327
erro a	0,00261	0,00249	0,00290	0,00231	0,00241
b	-1,97940	-0,38849	1,82402	2,09200	1,60491
erro b	0,14468	0,14423	0,16814	0,13632	0,14034
r2	0,99999	0,99999	0,99999	0,99999	0,99999

A Figura 41 mostra o ganho. A regressão linear resulta na equação $Y = (-0,00251 \pm 5,6561E-05)X + (1,5569 \pm 0,00275)$, com $r^2 = 0,99848$ (N=5), cujo modelo também é apresentado.

Figura 41 – Ganho do sensor MS7801A montado como *flip-chip*.

Na Figura 42 pode-se observar o comportamento do sensor LPSi100-HT-A e na Tabela 9, mostra-se a regressão linear para as diferentes séries de dados.

Figura 42 – Caracterização do sensor LPSi100-HT-A montado no substrato LTCC.

Tabela 9 – Regressões lineares, sensor LPSi100-HT-A no LTCC.

y=ax+b	Temperatura média (°C)				
Parâmetro	12,0	28,1	45,4	61,0	64,9
a	0,88740	0,86384	0,83339	0,81236	0,79879
erro a	0,00052	0,00041	0,00037	0,00196	0,00131
b	-15,10450	-13,44147	-11,86115	-11,56585	-11,35525
erro b	0,03186	0,02388	0,02162	0,12012	0,07970
r2	1,00000	1,00000	1,00000	0,99998	0,99999

Os coeficientes de ganho são mostrados na Figura 43. A regressão linear resulta na equação $Y = (-0,00163 \pm 7,13951E-05)X + (0,90803 \pm 0,00334)$, com $r^2 = 0,99427$ (N=5).

Figura 43 – Ganho do sensor LPSi100-HT-A montado por *wirebonding* sobre LTCC.

Na Tabela 10 são apresentados os dados obtidos e os parâmetros fornecidos pelos fabricantes, para comparação.

Tabela 10 – Parâmetros dos sensores: medidos e esperados.

Sensor	Parâmetro	Medido			Esperado (fabricante)			Unidade
		Min	Típico	Max	Min	Típico	Max	
MS7801A TO-5	O25	16,8	17,4	18,1	-40	0	40	mV
	TCO	-55,1	-44,0	-33,0	-80	0	80	uV/°C
	S25	1,439	1,464	1,488	1,2	1,5	1,8	mV/kPa
	TCS	-1860	-2057	-2247	-1500	-1900	-2300	ppm/°C
MS7801A flip-chip pcb	O25	0,6	0,7	0,8	-40	0	40	mV
	TCO	50,7	52,1	53,6	-80	0	80	uV/°C
	S25	1,490	1,494	1,498	1,2	1,5	1,8	mV/kPa
	TCS	-1648	-1681	-1714	-1500	-1900	-2300	ppm/°C
LPSi100-HT-A wirebonding LTCC	O25	-12,7	-12,6	-12,5	-25	0	25	mV
	TCO	35,5	36,6	37,8	-50	0	50	uV/°C
	S25	0,862	0,867	0,872	0,6	1	1,4	mV/kPa
	TCS	-1806	-1878	-1949	-1600	-1800	-2000	ppm/°C

Verificou-se a progressiva redução do ganho ou sensibilidade com o aumento da temperatura, para todos os gráficos, confirmando o fenômeno já esperado para o Silício.

O comportamento de todos os sensores se mantém dentro dos limites esperados. Note-se que, para o sensor MS7801A na cápsula TO-5 com *wirebonding*,

há uma maior diferença entre máximos e mínimos e o ganho apresenta menor linearidade, quando comparada com a montagem *flip-chip*. Tanto a não linearidade, quanto a maior dispersão, podem refletir posteriormente em maior complexidade na compensação e calibração ou maior erro final.

A Tabela 11 sintetiza os parâmetros obtidos para o modelo dos sensores, empregada no programa de compensação do microcontrolador.

Tabela 11 – Parâmetros dos sensores caracterizados inseridos no programa.

Sensor	O25 (mV/V)	TCO (mV/V/°C)	S25 (mV/V/kPA)	TCS (ppm/°C)
MS7801, TO-5	3,48790057	-0,008807389	0,292714179	-2057,037772
MS7801, <i>flipchip</i> pcb	0,14187584	0,010422003	0,298812911	-1680,999517
LPSi100-HT-A <i>wirebonding</i> LTCC	-2,51567973	0,007327456	0,173463246	-1877,754066

5.3 Caracterização do sensor MAP e comparativo com sensor comercial

Os parâmetros dos sensores são inseridos no programa de calibração e condicionamento, possibilitando ao circuito efetuar a compensação de temperatura de acordo com os modelos extraídos dos sensores. Assim, o sensor MAP é compensado e calibrado de acordo com os modelos lineares descritos na seção 5.2, que são programados no microcontrolador antes do teste com cada sensor.

Para todas as comparações de desempenho, foi adotada a especificação de erro do sensor MAP comercial Bosch, modelo 0 261 230 022.

A Figura 44 mostra a comparação da pressão medida pelo sensor com a referência para o sensor em cápsula TO-5.

Figura 44 – Resposta do sensor montado cápsula TO-5 operando com compensação de temperatura.

A Tabela 12 apresenta os resultados da regressão linear (N=5) e na Figura 45 fica visível o comportamento do erro na comparação da pressão medida pelo sensor em cápsula TO-5 com a referência. Observa-se um erro de até 6%, superior ao estipulado comercialmente. O notável erro de offset gera um erro na resposta como um todo, colocando-a fora da faixa esperada. A resposta é compensada, mas com elevada dispersão dos pontos (Figura 44). Obviamente, as maiores não linearidades observadas no offset e no ganho prejudicam a resposta calibrada pelo modelo linear. Possivelmente, a deriva do offset anteriormente observada tenha uma parcela no erro pós-calibração. Embora o erro de offset possa ser removido por uma nova calibração, o erro visivelmente não se reduziria ao nível aceitável. Assim, se faria necessária a compensação por um modelo não-linear ou por tabelas.

Tabela 12 – Regressão linear, sensor em cápsula TO-5, compensado.

$y=ax+b$	Temperatura média (°C)				
Parâmetro	4,3	20,6	42,7	64,2	76,4
a	0,97359	0,97874	0,98427	0,98474	0,95404
erro a	0,01184	0,01233	0,01623	0,01682	0,02937
b	-3,84334	-4,23649	-3,49158	-1,49679	-2,19555
erro b	0,72265	0,75403	0,97242	1,01332	1,76695
r2	0,99956	0,99952	0,99918	0,99913	0,99716

Figura 45 – Erro do sensor montado cápsula TO-5 operando com compensação de temperatura.

A Figura 46 mostra a resposta do sensor MS7801A montado por *flip-chip*. Todos os pontos observados se ajustam aos limites esperados. Na Figura 47 é possível observar os erros correspondentes, melhores do que o especificado. A Tabela 13 apresenta os resultados da regressão linear. O desempenho está dentro do esperado.

Figura 46 – Resposta do sensor montado por *flip-chip*, operando com compensação de temperatura.

Tabela 13 – Regressão linear, sensor em *flip-chip*, compensado.

$y=ax+b$	Temperatura média (°C)				
Parâmetro	6,6	23,4	48,7	58,1	74,3
a	1,00133	0,99868	0,99734	1,00056	0,99632
erro a	0,00125	0,00176	0,00196	0,00427	0,00251
b	-1,13719	-0,66448	-0,06945	-0,23833	-0,88243
erro b	0,06946	0,10185	0,11347	0,25216	0,14655
r2	1,00000	0,99999	0,99999	0,99995	0,99998

Figura 47 – Erro do sensor montado por *flip-chip*, operando com compensação de temperatura.

A Figura 48 mostra a comparação da pressão de referência com a pressão indicada pelo circuito em LTCC com sensor montado por *wirebonding*. A correspondente inexatidão é mostrada na Figura 49. Verifica-se, portanto que o protótipo em LTCC apresenta erro satisfatório de acordo com os limites considerados. A Tabela 14 apresenta os resultados da regressão linear.

Figura 48 – Resposta do sensor montado por *wirebonding* em LTCC, operando com compensação de temperatura.

Tabela 14 – Regressão linear, sensor em *wirebonding* no LTCC, compensado.

$y=ax+b$	Temperatura média (°C)				
Parâmetro	12,0	28,1	45,4	61,0	64,9
a	0,99907	1,00144	0,99901	1,00229	0,99543
erro a	0,00086	0,00030	0,00045	0,00183	0,00249
b	-1,15267	0,06546	1,18345	0,99395	1,04469
erro b	0,05206	0,01737	0,02630	0,11019	0,14974
r2	1,00000	1,00000	1,00000	0,99999	0,99998

Figura 49 – Erro do sensor montado por *wirebonding* em LTCC, operando com compensação de temperatura.

A cápsula TO-5 foi útil para a fase inicial de testes por oferecer um meio rápido de testar o sensor. Mas o seu desempenho foi menos exato, pois não foram tomados os devidos cuidados de montagem. Isso poderia ser corrigido, tornando a cápsula uma alternativa adequada. Por sua vez, a montagem pelas técnicas de *flip-chip* e *wirebonding* em LTCC mostrou resultados adequados para a aplicação. A opção de montagem do sensor por *flip-chip* no substrato LTCC não foi caracterizada (devido à falhas de conexão elétrica e posterior dano ao sensor). Cabe aqui mencionar que, embora não haja essa caracterização, o excelente resultado obtido com o teste no substrato de resina fenólica indica que esta abordagem possivelmente apresentaria resultados satisfatórios em um substrato LTCC.

O circuito de condicionamento e calibração foi capaz de operar satisfatoriamente, com resultados aceitáveis para modelos de sensores diferentes.

As características do protótipo do MAP em LTCC funcional são resumidas na Tabela 15.

Tabela 15 – Características do protótipo MAP LTCC.

Parâmetro	Operação			
	Mínimo	Típico	Máximo	Unidade
Alimentação	4,5	5	5,5	V
Consumo	3	5	7	mA
Temperatura	-40	25	125	°C
Tempo de resposta 10-90%		0,15	0,2	s
Tempo de aquecimento			0,2	s
Faixa de medida de pressão	0		100	kPa
Precisão			1,5	%FE
Faixa de medida de temperatura	-40		125	kPa
Precisão			0,5	%FE

Como será descrito posteriormente, os tempos de resposta e ajuste do sensor foram determinados a partir de testes do comportamento dinâmico.

Finalmente, o protótipo da Figura 24 foi montado na câmara de vácuo juntamente com o sensor MAP comercial Bosch modelo 0 261 230 022 da Figura 1. As constantes k_1 e k_2 foram obtidas a partir dos dados do fabricante. Uma vez inseridas no programa do microcontrolador, tanto o sensor comercial quanto o protótipo devem exibir a mesma característica entrada-saída.

Ambos os sinais foram registrados variando-se a pressão e temperatura. Note-se que nesse teste são registrados os valores de tensão de saída. Os resultados são apresentados na Figura 50 e na Figura 51. Como pode ser verificado nesses gráficos, o desempenho do protótipo é comparável ao da unidade comercial.

Figura 50 – Comparação do MAP protótipo com MAP BOSCH.

Figura 51 – Erro de medida na comparação entre o MAP protótipo e uma unidade comercial.

5.4 Testes do circuito em operação real em veículo

Para este teste foi utilizado um veículo Toyota Corolla 1.8, que possui o sensor Denso 89420-12090, mostrado na Figura 52.

O sensor MAP em LTCC foi calibrado e reprogramado para a mesma curva do sensor Denso e foi montado no duto de admissão. As constantes k_1 e k_2 adotadas na reprogramação foram medidas no sensor Denso original e são mostradas na Tabela 16.

Tabela 16 – Constantes medidas da função de transferência do sensor Denso.

k_1	k_2
0,0308	-0,5309

A conexão pneumática foi feita compartilhando-se a mesma tomada de pressão e a conexão elétrica compartilhou a mesma alimentação elétrica do sensor MAP original (Figura 53). Esta montagem permite a comparação dos sensores em regime estático e dinâmico.

Figura 52 – Sensor MAP original do veículo de teste.

Figura 53 – Teste do sensor MAP em automóvel: (A) sensor original, (B) conexão pneumática com o duto de admissão, (C) sensor MAP protótipo.

O sinal do sensor protótipo foi registrado juntamente com o sinal do sensor original, para vários regimes de operação do veículo. A taxa de amostragem para coleta dos sinais foi de 10 Hz para cada sinal.

Para verificação preliminar, inicialmente foi registrado o comportamento com o motor desligado, contato em meia-volta, contato ligado, partida e marcha lenta. Os resultados podem ser vistos na Figura 53. O erro entre os sinais pode ser visto na Figura 54. Obviamente, dadas as condições de amostragem, essa figura ilustra tão somente que o erro entre os sensores é aceitável (menor do que 1,5%) em condições de regime permanente, ou seja, enquanto o motor encontra-se desligado ou em marcha lenta. Mais ainda, notar que a resposta do sensor em vermelho é mais rápida, pois apresenta oscilações adicionais durante a partida.

Para avaliação do comportamento dinâmico foram registrados aproximadamente 20 minutos de operação contínua com o veículo em movimento, em um trajeto urbano.

Os resultados são apresentados na Figura 56, onde se observa o sinal do sensor original (linha azul, tensão AC2) e o sinal do protótipo (linha vermelha, tensão AC3). A correlação calculada entre os dois sinais é de 0,9989, o que indica a forte concordância entre os mesmos. A Figura 57 mostra o detalhe da operação de partida do motor, enquanto a Figura 58 ilustra o comportamento comparativo do veículo em

marcha, para diversos regimes de operação. Diferentes marchas são impostas ao veículo (neutro ou marcha lenta, primeira, segunda, terceira e quarta marchas), bem como é executado um freio motor. Nas condições de marcha nota-se o progressivo aumento da pressão no coletor com o aumento da marcha, significando uma maior massa de ar admitida. Por outro lado, em freio motor, a pressão atinge níveis menores do que na marcha lenta, o que significa menor massa de ar admitido e, portanto, menor consumo de combustível. De fato, nessas condições é possível cortar o suprimento de combustível e o motor passar a funcionar como um compressor, impondo o freio ao invés de gerar tração. Em todas as condições, entretanto, é possível observar que os sinais concordam em diversos níveis de tensão de saída.

Uma vez que os sensores apresentaram desempenho semelhante, o sinal do sensor MAP original que é enviado à ECU foi substituído pelo sinal do protótipo. Assim, o veículo operou com o sinal do sensor MAP desenvolvido, exclusivamente. Como se pode depreender da observação dos resultados, foi possível operar o veículo por 30 minutos com o sensor desenvolvido sem alteração perceptível no desempenho do veículo.

Figura 54 – Comparação preliminar dos sensores dos sensores MAP Denso original do veículo e do protótipo em LTCC.

Figura 55 – Erro observado na comparação preliminar dos sensores MAP Denso e do protótipo em LTCC. Notar que o erro em regime permanente permanece abaixo dos 1,5% FE. A escala foi mantida em 5% para clareza dos detalhes.

Figura 56 – Teste em operação real: MAP Denso (azul) e protótipo (vermelho).

Figura 57 – Ligando o motor do veículo: MAP Denso (azul) e protótipo (vermelho).

Figura 58 – Diferentes regimes de operação do veículo: MAP Denso (azul) e protótipo (vermelho).

6. CONCLUSÃO

Foi proposto o projeto e o desenvolvimento de um sensor MAP de pressão e temperatura em cerâmica LTCC para aplicações automotivas. Esperava-se ao final, caracterizar o desempenho do protótipo funcional. Do mesmo modo, eram esperadas algumas contribuições decorrentes desse trabalho, dentre elas, o domínio do tema e geração de conhecimento aplicável em outros trabalhos. Assim, conclui-se satisfatoriamente que:

1. Após a calibração, foi demonstrado que o sensor é completamente funcional e possui desempenho comparável a uma unidade comercial automotiva, com precisão melhor do que 1,5% FE em pressão e 0,5% em temperatura.
2. A versatilidade da compensação e calibração via programação permitiu a rápida mudança de parâmetros e possibilitou ao protótipo se adequar a diferentes funções de transferência (tanto dos sensores, como do MAP), sem modificações físicas na placa.
3. No processo de projeto desenvolveu-se um circuito aplicável a uma ampla gama de sensores e que poderá ser reutilizado em futuros projetos, diminuindo assim o custo de futuros desenvolvimentos.
4. Após uma análise de opções de montagem, foi demonstrada a construção bem sucedida do sensor MEMS em LTCC. Ficou evidente que o acondicionamento do sensor de pressão não oferece grandes desafios, mas deve ser realizado com critério, pois a sua montagem inadequada pode comprometer o desempenho do MAP.
5. A montagem de sensores de pressão MEMS por *flip-chip* em cerâmica proporciona excelentes resultados. Essa abordagem aparece como uma possibilidade interessante, pois são reduzidos os custos do processo de acondicionamento e ocorre a eliminação de etapas e materiais, associados aos processos convencionais.
6. O teste em operação real validou funcionalmente o protótipo, demonstrando a sua aplicação em um veículo.

7. PERSPECTIVAS FUTURAS

Uma vez que a proposta de trabalho foi atendida, ficam aqui registradas algumas sugestões de trabalhos futuros:

1. As contribuições que possam melhor adequar o sensor desenvolvido aos exigentes requisitos de produtos automotivos. Dentre eles, destacam-se: o estudo da compatibilidade do sensor com meios agressivos, estudos de robustez e adequação mecânica, determinação e testes de confiabilidade, durabilidade, validação de produto (testes de vibração, compatibilidade eletromagnética, entre outros) e análises de custo;
2. Trabalhos que desenvolvam o acondicionamento do sensor MAP e dos sensores individuais, seja o acondicionamento completo em LTCC ou em polímero, com a sua caracterização. Considera-se também a possível melhoria no processo de montagem de sensores de pressão MEMS por *flip-chip*;
3. Trabalhos que se utilizem do projeto aqui desenvolvido para outras aplicações automotivas e não automotivas: sensores barométricos, altímetros, transmissores de pressão industriais, etc.;
4. Finalmente, esse trabalho abriu caminho para a aplicação de sensores integrados de pressão e sensores de temperatura em Microssistemas para análise química, biológica, etc. em LTCC, na qual a detecção de pressão e temperatura seja necessária.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] MAREK, J.; **Sensors for Automotive Applications**. Sensors Applications Volume 4. Wiley-VHC, ISBN 3-527-29553-4 (2003).
- [2] ISHIKAWA, M. **Brasil fecha 2010 como 4º maior mercado de carros**. Revista Quatro rodas. Disponível em: http://quatorrodas.abril.com.br/noticias/brasil-fecha-2010-como-4o-maior-mercado-carros-281101_p.shtml. Acesso em: 04/02/2011.
- [3] IBGE. **Contas Nacionais Trimestrais**. Coordenação de contas nacionais. Disponível em: <http://www.ibge.gov.br/home/presidencia/noticias/imprensa/ppts/0000000123.pdf>. Acesso em: 03/11/2010.
- [4] IPEA. **Brasil chega a PIB per capita de US\$ 10 mil em 2010. E agora?** Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada. Disponível em: http://www.ipea.gov.br/portal/index.php?option=com_content&view=article&id=2036. Acesso em: 29/07/2010.
- [5] ESTADAO. **Brasil já enfrenta falta de mão-de-obra**. Disponível em: <http://www.estadao.com.br/noticias/economia,brasil-ja-enfrenta-falta-de-mao-de-obra,501032,0.htm>. Acesso em: 25/01/2010.
- [6] VASCONCELOS, Y. **No ranking do desenvolvimento tecnológico**. Revista Super Interessante 187ª, Maio 2003, Disponível em: <http://super.abril.com.br/ciencia/ranking-desenvolvimento-tecnologico-443835.shtml>. Acesso em: 11/01/2011.
- [7] FOLHA. **Inspeção veicular ambiental atinge marca de um milhão de veículos em São Paulo**. Folha.com. Disponível em: <http://noticias.bol.uol.com.br/brasil/2009/09/04/ult4733u41742.jhtm>. Acesso em: 04/09/2009.
- [8] FENABRAVE. **Setor de reposição vende R\$ 10 bilhões**. Disponível em: http://www.fenabreve.com.br/principal/home/?sistema=conteudos|conteudo&id_conteudo=2034#conteudo. Acesso em: 08/02/2011.

- [9] FRADEN, J.; **Handbook of modern sensors: physics, design and applications**. 2nd ed. Springer-Verlag, ISBN 1-5639-538-0 (1996).
- [10] GARDNER, J.; **Microsensors: Principles and Applications**. John Wiley & Sons, ISBN 0-471-94135-2 (1994).
- [11] UNITED STATES DEPARTMENT OF DEFENSE; **MIL-HDBK-338B-Military Handbook-Electronic reliability design handbook**. Disponível em: <http://www.everyspec.com>. Acesso em 18/02/2011.
- [12] UNITED STATES DEPARTMENT OF DEFENSE; **MIL-HDBK-217F-Military Handbook-Reliability prediction of electronic equipment**. Disponível em: <http://www.everyspec.com>. Acesso em 18/02/2011.
- [13] DUNN, W.; FRANK, R. **Automotive Silicon Sensor Integration**. Society of Automotive Engineers Technical Paper 920471 (1992).
- [14] PETERSON, E. **Silicon as a Mechanical Material**. Proceedings IEEE, vol 70, 420 (1982).
- [15] ZANINI, M.; STEVENSON, P. **Silicon Microstructures: Mergin Mechanics with Electronics**. Society of Automotive Engineers Technical Paper 920472 (1992).
- [16] EATON, W.; SMITH, J. **Micromachined pressure sensors: review and recent developments**. Smart Materials and Structures. Vol. 6, pp. 530-539 (1997).
- [17] GOMES, A.; **Calibração e compensação de sensores de pressão piezorresistivos**. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Sistemas Eletrônicos. 109p., (2009)

- [18] FLEMING, W.; **Overview of Automotive Sensors**. IEEE Sensors Journal, Vol. 1, No. 4, 296-308 (2001).
- [19] EL-AWAR, Y. et al. **Automotive Temperature Sensing**. Keystone Thermometrics Corporation Application Notes, 1999. Disponível em: <http://www.thermometrics.com/assets/images/autoapp.PDF>. Acesso em: 01/08/2010.
- [20] STEINHART, S., HART, R.; **Calibration curves for thermistors**, Deep Sea Research and Oceanographic Abstracts, Vol. 15, Issue 4, August 1968, pp. 497-503, ISSN 0011-7471, DOI: 10.1016/0011-7471(68)90057-0.
- [21] VERMA, R.; et al. **A Monolithic Integrated Solution for MAP Applications**. Society of Automotive Engineers Technical Paper 970608 (1997).
- [22] KIENCKE, U., NIELSEN, L.; **Automotive Control Systems: For Engine, Driveline, and Vehicle**. Springer, ISBN 3-540-66922-1 (2000).
- [23] U.S. Environmental Protection Agency; **Automobiles Emissions: an Overview**. Disponível em: <http://www.epa.gov/oms/consumer/05-autos.pdf>. Acesso em: 29/11/2010
- [24] Infineon Technologies; **Manifold Pressure Sensors (MAP) KP21x Product Brief**. Disponível em: <http://www.infineon.com/cms/en/product/channel.html?channel=ff80808112ab681d0112ab68f0bc009c>. Acesso em: 01/08/2010.
- [25] CHAVAN, A.; WISE, K. **A Monolithic Fully-Integrated Vacuum-Sealed CMOS Pressure Sensor**. IEEE Transactions on Electronic Devices, Vol. 49, 164-169 (2002).
- [26] UEYANAGI, K.; SAITO, K.; ASHINO, K. **Automotive Pressure Sensors**. FUJI ELECTRIC REVIEW, Vol. 50 Nº2. Disponível em: <http://www.fujielectric.com/company/tech/pdf/r50-2/06.pdf>. Acesso em: 01/08/2010.

- [27] AA1CAR Auto Diagnosis Repair Help; **Manifold Pressure Absolute Pressure Sensors**. Disponível em: http://www.aa1car.com/library/map_sensors.htm. Acesso em: 01/08/2010.
- [28] BOSCH. **Medium-resistant Absolute Pressure Sensors Product Datasheet**. Disponível em: http://apps.bosch.com.au/motorsport/downloads/sensors_mappressure.pdf. Acesso em: 01/08/2010.
- [29] BOYLESTAD, R. NASHELSKY. L. **Dispositivos Eletrônicos e teoria dos circuitos**. 8^a ed. Prentice-Hall, (2004).
- [30] SEDRA, S.; SMITH, C. **Microeletrônica**. 4^a ed. Pearson, (2004).
- [31] CZARNOCKI, W. et al. **Programable CMOS Integrated Pressure Sensor**. Society of Automotive Engineers Technical Paper 1999-01-1041 (1999).
- [32] CZARNOCKI, W.; SCHUSTER, J.; **The Evolution of Automotive Pressure Sensors**. (1999). Disponível em: <http://www.sensorsmag.com/sensors/pressure/the-evolution-automotive-pressure-sensors-844>. Acesso em: 15/06/2010.
- [33] ARAND, D.; MAREK, J.; WEIBLEN, K.; LIPPHARDT, U. **Integrated Barometric Pressure Sensor with SMD Packaging: Example of Standardized Sensor Packaging**. Society of Automotive Engineers Technical Paper 960756 (1996).
- [34] GOLDMAN, K. et al. **A Vertically integrated Media-Isolated Absolute Pressure Sensor**. IEEE Transducer'97, 1501-1504 (1997).
- [35] MEYYAPPAN, K. et a. **Die attach technology to reduce die stresses in MEMS pressure sensors**. The 7th International High Temperature Electronics. Disponível em: <http://nepp.nasa.gov/docuploads/D7375941-3C11-4E21-9351F99C27EA06CC/7th%20HiTEC%20Die-attach%20paper.pdf>. Acesso em: 01/08/2010.
- [36] LAI, Z.; LIU, J. **Introduction to wirebonding technology**. Disponível em: <http://extra.ivf.se/ngl/A-WireBonding/ChapterA.htm>. Acesso em 15/08/2010

- [37] MAXIM. **Design and Manufacture of Automotive Pressure Sensors**. Maxim Application Note 762. Disponível em: <http://www.maxim-ic.com/app-notes/index.mvp/id/762>. Acesso em: 01/08/2010.
- [38] YAMAMOTO, R. K. **Desenvolvimento de um gerador de microplasma utilizando a tecnologia LTCC**. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica da universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Sistemas Eletrônicos. 126p., (2008).
- [39] ROCHA, Z.; **Microlaboratórios Autônomos para monitoramento de parâmetros de qualidade de água**. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica da universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Sistemas Eletrônicos. 171p., (2009).
- [40] DU PONT MICROCIRCUIT MATERIALS. **951 green tape datasheet**. Disponível em: http://www.dupont.com/mcm/en_us/products/greentape/green_tae.html. Acesso em: 15/12/2010.
- [41] INTERSEMA SENSORIC SA; **MS7801 Pressure Sensor Die (0-1BAR)**; Folha de dados. Disponível em: <http://www.intersema.ch/products/guide/dice/ms7801/>. Acesso em 01/08/2010.
- [42] FIRST SENSOR TECHNOLOGY; **LPSi100-HT-A**; Folha de dados. Disponível em: <http://www.first-sensor.com>. Acesso em 01/02/2011.
- [43] VISHAY BC Components; **NTC Thermistors DataSheet**; Folha de dados. Disponível em: <http://www.vishay.com>. Acesso em 23/08/2010.
- [44] INTERSEMA SENSORIC SA; **AN-508 Mounting of pressure sensor dice**; Notas de aplicação. Disponível em: <http://www.intersema.ch/products/guide/dice/ms7801/>. Acesso em 01/08/2010.

[45] FLIP CHIP TUTORIAL. Disponível em: <http://www.flipchips.com/tutorials.html>. Acesso em 06/09/2010.