



CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA



Universidade Federal
de Campina Grande

LUÍS FELIPE FONSECA DIAS



Centro de Engenharia
Elétrica e Informática

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO
SENSOR DE TEMPERATURA DE RÓTULA DE HELICÓPTERO PARA DETERMINAÇÃO
DA SUA VIDA ÚTIL



Departamento de
Engenharia Elétrica



Campina Grande
2018

LUÍS FELIPE FONSECA DIAS

SENSOR DE TEMPERATURA DE RÓTULA DE HELICÓPTERO PARA DETERMINAÇÃO DA SUA
VIDA ÚTIL

*Trabalho de Conclusão de Curso submetido à
Unidade Acadêmica de Engenharia Elétrica da
Universidade Federal de Campina Grande
como parte dos requisitos necessários para a
obtenção do grau de Bacharel em Ciências no
Domínio da Engenharia Elétrica.*

Área de Concentração: Eletrônica

Orientador:

Professor Gutemberg Gonçalves dos Santos Júnior, Dr. Sc.

Campina Grande, 2018

LUÍS FELIPE FONSECA DIAS

SENSOR DE TEMPERATURA DE RÓTULA DE HELICÓPTERO PARA DETERMINAÇÃO DA SUA
VIDA ÚTIL

*Trabalho de Conclusão de Curso submetido à
Unidade Acadêmica de Engenharia Elétrica da
Universidade Federal de Campina Grande
como parte dos requisitos necessários para a
obtenção do grau de Bacharel em Ciências no
Domínio da Engenharia Elétrica.*

Área de Concentração: Eletrônica

Aprovado em / /

Professor Avaliador
Universidade Federal de Campina Grande
Avaliador

Professor Gutemberg Gonçalves dos Santos Júnior, Dr. Sc.
Universidade Federal de Campina Grande
Orientador, UFCG

Dedico este trabalho a Paimon, um dos reis do inferno, comandante de 200 legiões de demônios e que ensina todas as artes, ciências e coisas secretas, como, por exemplo, redigir este relatório.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à minha mãe, Tereza, por ser a pessoa que dedicou maior esforço consciente para eu ter chegado a este ponto.

Agradeço também ao meu núcleo familiar, por seu apoio em diversas escalas, além de suportar a minha pessoa.

Agradeço também aos meus amigos, colegas e professores, que me permitiram experimentar e aprender sobre a vida.

Agradeço, enfim, à capacidade de entender que gratidão nada mais é que um sentimento com vantagens e desvantagens sociais. Logo, não devemos nos prender a este conceito, aproveitando das boas sensações do momento mas saber que não devemos nada a ninguém, mesmo com a norma social estabelecida afirmando o contrário.

“ La motivation est comme biffer son derche.”

Anônimo.

RESUMO

O setor aeroespacial demanda custos elevados não só na fabricação de equipamentos e veículos mas também com a manutenção destes. Com situações que podem chegar a 50 horas de manutenção para cada hora de voo, há uma necessidade de otimizar esse processo. No caso deste trabalho, o alvo de estudo é a rótula de um helicóptero, peça que permite o deslocamento axial das pás do veículo. Uma proposta atual estudada é o conceito de “rótula inteligente”, na qual um chip seria integrado à peça para analisar seu estado de uso a partir de parâmetros diversos. A temperatura é um parâmetro promissor para a análise do estado de vida útil da rótula, contudo falta definir a tecnologia de sensor que melhor se adapta a esta aplicação. Neste trabalho, são analisados termistores, termo resistências, termopares e diodos para medição de temperatura tomando como base critérios reais para um helicóptero. O diodo é selecionado por alcançar dimensões da ordem de 1mm e possuir uma sensibilidade na faixa de $-2\text{mV}/^\circ\text{C}$. Ele também é um elemento de baixo custo e seus resultados demonstram funcionamento satisfatório até mesmo quando alimentado à $100\mu\text{A}$. O trabalho é concluído validando seu potencial para este tipo de aplicação específica, mas também ressaltando o interesse em usos diversos, como em sistemas eletrônicos e aplicações estudantis.

Palavras-chave: Aeroespacial, helicóptero, manutenção, sensor de temperatura, diodo, instrumentação.

ABSTRACT

The aerospace industry demands high costs not only in the manufacture of equipment and vehicles but also with their maintenance of these. With situations that can reach up to 50 hours of maintenance for every hour of flight, there is a special need to optimize this process. In the case of this work, the target of study is the joint ball of a helicopter, the piece that allows for the axial displacement of the blades of the vehicle. Currently, the concept of "smart joint ball", in which a chip is integrated into the piece in order to analyze its state based on several parameters. The temperature is a promising parameter for the analysis of the life-cycle state of the joint ball, however it is still not clear on which sensor technology better adapts to this application. In this work, thermistors, resistance thermometers, thermocouples and diodes for temperature measurement are analyzed based on real criteria for a helicopter. The diode is selected because it reaches dimensions of the order of 1mm and has a sensitivity in the range of $-2\text{mV}/^{\circ}\text{C}$. It is also a low-cost element and its results demonstrate satisfactory operation even when fed at $100\mu\text{A}$. The work is completed validating its potential for this type of specific application, but also emphasizing the interest in diverse uses, as in electronic systems and student applications.

Keywords: Aerospace, helicopter, maintenance, temperature sensor, diode, instrumentation.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Representação do rotor de um helicóptero.	13
Figura 2 – Hastes de conexão de um helicóptero.	14
Figura 3 – Exemplo de haste com rótulas nas extremidades.	14
Figura 4 – Posicionamento das pás sem ação.	14
Figura 5 – Posicionamento das pás em subida.	14
Figura 6 - Posicionamento das pás em movimento para direção específica.	14
Figura 7 - Rótula individual fora de haste.	14
Figura 8 - Esquema simplificado da solução proposta.	15
Figura 9 – Efeito Peltier-Seebeck.	17
Figura 10 – Termopar tipo K.	17
Figura 11 - Curvas de comportamento de termistores NTC e PTC.	18
Figura 12 - Composição típica de um sensor PT-100.	19
Figura 13 - Vários tipos de diodos: Genérico, Schottky, Zener ...	20
Figura 14 - Esquema ilustrativo de medição de temperatura dos diodos em estufa.	25
Figura 15 – Vista frontal da central de aquisição 34970A.	26
Figura 16 – Vista posterior da central de aquisição 34970A.	26
Figura 17 - Vista Geral do Laboratório.	26
Figura 18 - Máquina de teste de desgaste de rótula.	27
Figura 19 - Curva Característica Diodo PN à 1mA.	29
Figura 20 - Curva Característica Diodo Schottky à 1mA.	30
Figura 21 - Erro Percentual do Termopar.	31
Figura 22 - Curva de Temperatura medida pelo diodo PN sobre a rótula à 100 μ A.	32
Figura 23 - Curva de Temperatura medida pelo diodo PN sobre a rótula à 1mA.	32
Figura 24 - Curva de Temperatura medida pelo diodo PN sobre a rótula à 10mA.	33
Figura 25 – Curva da queda de tensão do diodo com relação ao tempo à 1mA.	33
Figura 26 – Curva da queda de tensão do diodo com relação ao tempo à 10mA.	33

SUMÁRIO

Agradecimentos	v
Resumo	vii
Abstract.....	viii
Lista de Ilustrações	ix
Sumário.....	x
1 Introdução	11
1.1 Setor Aeroespacial	11
1.2 Motivação do Estudo	12
1.3 Contexto.....	13
2 Fundamentação Teórica.....	17
2.1 Sensores de Temperatura	17
2.1.1 Termopar	17
2.1.2 Termistor	18
2.1.3 Termorresistência.....	19
2.1.4 Diodo.....	19
2.2 Escolha do Sensor	23
2.2.1 Termopar	23
2.2.2 Termistor	23
2.2.3 Termorresistência.....	24
2.2.4 Diodo.....	24
3 Materiais e Métodos.....	25
3.1 Teste de Caracterização do Diodo	25
3.2 Teste Funcionais sobre a Rótula	26
4 Análise de Resultados	28
4.1 Caracterização do Diodo.....	29
4.2 Caracterização da Rótula	32
5 Conclusão.....	35
Referências	36
APÊNDICE A – Tabela de Tomada de Decisão do Sensor de Temperatura (Valores de 1 à 5).....	37
ANEXO A – Tabela de Tipos de Termopares.....	38
ANEXO B – <i>Datasheets</i> Diodos PN 1N4007 e Schottky BAT85	39

1 INTRODUÇÃO

1.1 SETOR AEROESPACIAL

No campo aeroespacial, a manutenção é uma operação crucial. Cada voo é seguido por uma mudança periódica de peças em condições críticas.

É uma operação que exige muito tempo e dinheiro (são necessárias três horas de manutenção por apenas uma hora de voo), podendo alcançar até mesmo 50 horas de manutenção por hora de voo (DE BRIGANTI, 2016). O objetivo é garantir uma grande margem de segurança e reduzir os custos do ciclo de vida, reduzindo manutenção e tempo de inatividade.

Para este projeto, nos concentramos mais no estudo do estado de saúde da rótula para destacar sua capacidade de reduzir o tempo de manutenção.

Estatisticamente, as rótulas não falham simultaneamente. Por conseguinte, é desejável encontrar a rótula em estado crítico por meio de análise estatística.

Este método consiste em comparar, a cada medição, a temperatura de cada peça com a temperatura média característica; no caso de temperatura atípica, acima da média, é relatado um aviso. Portanto, queremos ser capazes de medir a temperatura de cada peça e armazenar todos esses dados para uso durante a manutenção.

O cerne deste projeto está na determinação do sensor de temperatura apropriado. Alguns fatores relevantes a serem considerados na escolha são: linearidade, dimensões, custo, precisão e exatidão e a demanda de condicionamento para a comunicação correta da saída. As práticas de instrumentação servem como referência (FRADEN, 1993; RAMSDEN, 2000), além de material fornecido por empresas da área, como *Keysight*.

Podemos citar algumas tecnologias como termopares (DUNBAR, 1964; SMITH, 1923), termistores (CHEVAKO, 1965; BECKER; GREEN; PEARSON, 1946), termo resistência PT-100 (WENCHENG, 2007; GHOSH, 2015) e até mesmo semicondutores (FRADEN, 1993; KUHN, 2009; SIEGAL, 2009). Vamos então comparar estas e outras tecnologias para chegarmos na melhor escolha, após apresentarmos as especificações e prioridade dos parâmetros.

Em um primeiro momento, contextualizaremos a problemática dentro do cenário proposto. Logo em seguida, as tecnologias mais recorrentes de sensores de temperatura serão expostas e analisadas para a escolha da melhor opção. A metodologia dos testes será detalhada e por fim, será desenvolvida uma conclusão em função dos resultados encontrados.

1.2 MOTIVAÇÃO DO ESTUDO

Este trabalho faz parte da disciplina de *Projet Industriel* (Projeto Industrial) obrigatória na universidade francesa ESISAR GRENOBLE INP. Como parte da grade curricular, os alunos do quarto ano de engenharia devem trabalhar em equipe durante seis (6) meses em parceria com empresas de tecnologia. Para uma turma de oitenta (80) alunos, são oferecidos vinte e sete (27) projetos com empresas diferentes para desenvolver os trabalhos.

Estes projetos são patrocinados pelas próprias, que buscam aplicações econômicas a longo e médio prazo. Cada equipe é acompanhada por um representante da empresa, em geral um engenheiro ou gestor, e um professor universitário. A avaliação é dividida em duas defesas parciais e uma final do trabalho. As competências técnicas e de gestão são avaliadas de forma didática, garantindo que mesmo se o grupo não entregar um produto final completo, podem aprender com isso.

Este projeto de sensoriamento térmico em helicóptero foi proposto pela empresa sueca *SKF Aerospace*, com filial em Valence, e desenvolvido por uma equipe de três (3) estudantes, entre eles, o autor. Dois produtos foram demandados: um sistema de aquisição para vários sensores de temperatura e um PCB para futura integração com o helicóptero. A parte de estudo de escolha do sensor foi responsabilidade exclusiva do autor, por isso é o objeto de estudo deste trabalho.

Os equipamentos e dados aqui representados são todos originários do projeto na época. Essa experiência foi possível graças ao programa de intercâmbio BRAFITEC 176/15, financiado pela CAPES.

1.3 CONTEXTO

Um helicóptero é capaz de voar graças ao seu rotor, equipamento que transfere o torque gerado pelo motor à combustão interna para as hélices, proporcionando um momento rotacional e a variação de pressão necessária. O rotor também tem como função o repasse mecânico dos comandos do piloto. Podemos ver na Figura 1 o esquema desse equipamento:

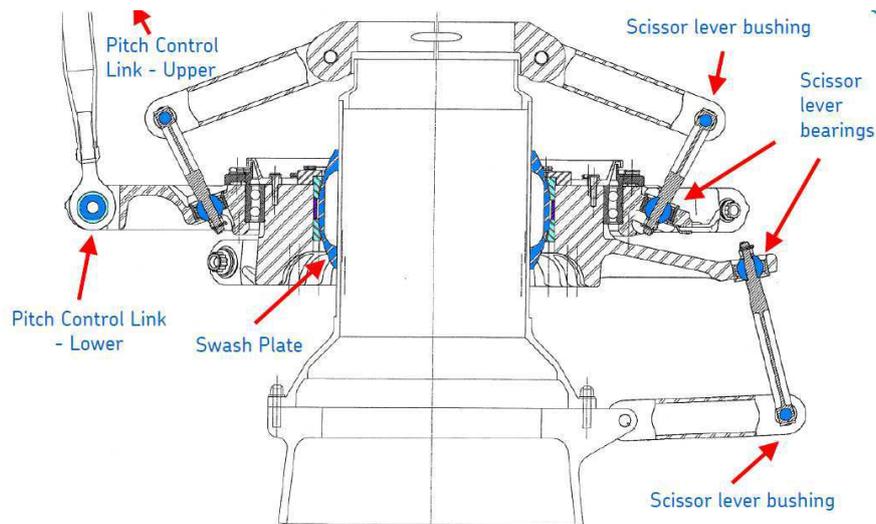


Figura 1 - Representação do rotor de um helicóptero.
Fonte: Hangar MMA

A peça de interesse é exatamente aquela que inclina as pás rotativas em função do comando, chamadas de rótulas. Estas rótulas são articulações de amplo movimento compostas por um polímero interno que garante baixo atrito encapsulado por uma estrutura metálica. As peças são conectadas a hastes de metal resistentes, designadas como *Pitch Control* na imagem acima. Na Figura 2, podemos observar as hastes com um exemplo unitário na Figura 3:



Figura 2 – Hastes de conexão de um helicóptero.
Fonte: Hangar MMA



Figura 3 – Exemplo de haste com rótulas nas extremidades.
Fonte: Aatoria Própria

A Figura 4 demonstra o estado das bielas e pás quando o helicóptero e o rotor estão em repouso, já a Figura 5 ilustra a posição das peças quando o veículo toma vôo, podemos ver que o eixo do rotor sobe, rotacionando as pás e permitindo a geração de uma força contra a oriunda da gravidade. A Figura 6 representa como o equipamento se encontra durante deslocamento horizontal, com inclinação no eixo do rotor que regula o ângulo de rotação das pás. Enquanto que na Figura 7 podemos ver melhor a rótula isolada:

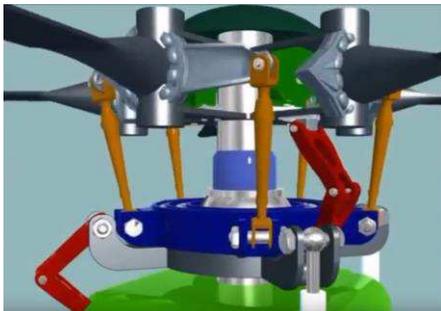


Figura 4 – Posicionamento das pás sem ação.
Fonte: Hangar MMA

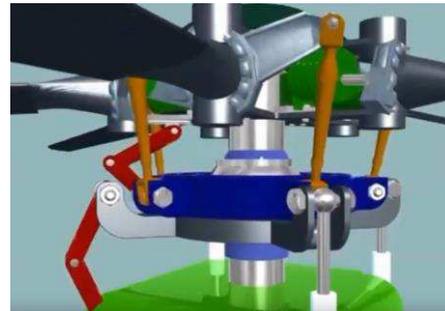


Figura 5 – Posicionamento das pás em subida.
Fonte: Hangar MMA

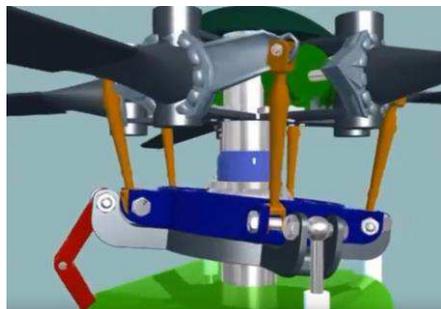


Figura 6 - Posicionamento das pás em movimento para direção específica.
Fonte: Hangar MMA



Figura 7 - Rótula individual fora de haste.
Fonte: Aatoria Própria

Pela natureza da instalação, nota-se a dificuldade de acompanhar a vida útil da peça e os custos da manutenção, que demanda a presença de um técnico e manuseio intrusivo do helicóptero.

A solução proposta, que não é objeto de estudo deste documento, é o acompanhamento de parâmetros indiretos que sejam correlacionados com o estado da peça. Esta proposta foi realizada pela empresa e foi trabalhada em paralelo como um projeto de doutorado em universidade inglesa. Podemos citar como exemplo a variação da capacitância visto que o polímero se desgasta, acarretando uma mudança do dielétrico. Outra alternativa está na análise do comportamento térmico, o qual foi selecionado para este projeto.

Na solução supracitada, introduz-se a ideia de uma rótula inteligente que capta os dados de temperatura e, após tratamento, fornece um parecer de referência para a equipe de manutenção. Isso traz redução dos custos e maior eficiência de tempo. A Figura 8 ilustra a solução idealizada como uma análise da equipe de manutenção baseada em uma interface de aquisição no próprio helicóptero que mede e trata os dados dos sensores localizados nas rótulas do veículo:

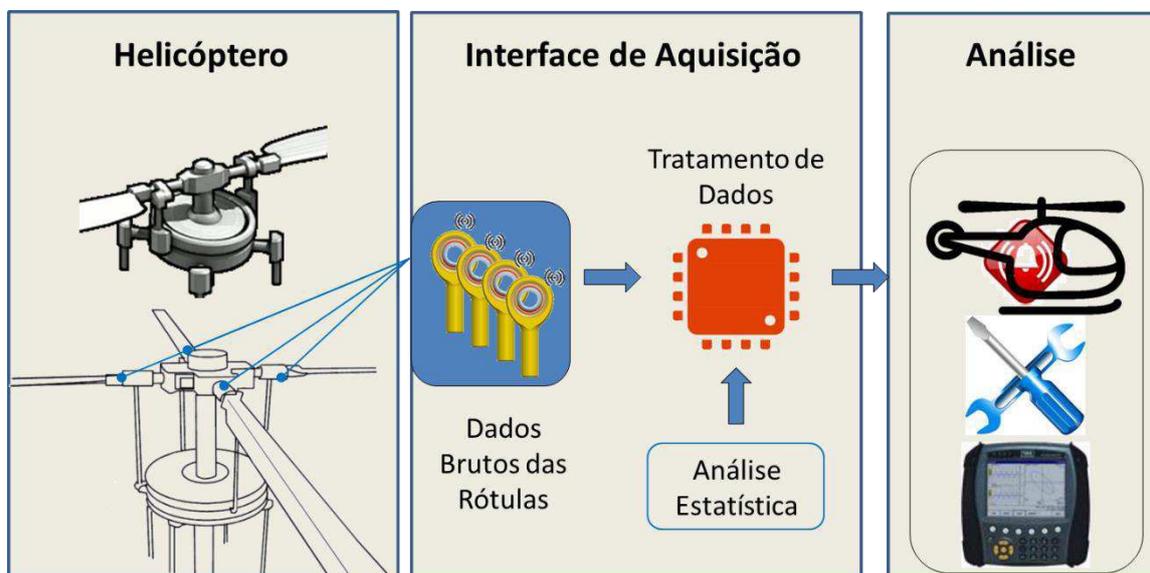


Figura 8 - Esquema simplificado da solução proposta.

Fonte: Autoria Própria

O processamento de dados se baseia na comparação entre o comportamento das rótulas em operação (de 2 a 4) no helicóptero. Uma análise estatística será então realizada baseando-se no comportamento típico, extraído de testes de caracterização prévios para aquele tipo de rótula. O resultado será transmitido sem fio para a equipe de manutenção.

Contudo, para que este sistema possa ser implementado, é fundamental a escolha de uma tecnologia de sensor confiável em vista das restrições. A seção seguinte irá expor as opções e detalhará os critérios de seleção.

Tabela 1 - Tabela de critérios de decisão.

Critério	Descrição	Valor Máximo
Temperatura	Valores máximo e mínimo possíveis	-30°C a 120°C
Desempenho	Precisão, sensibilidade, estabilidade e tempo de resposta	$\pm 2^\circ\text{C}$; $>1\text{mV}/^\circ\text{C}$; $<10\text{s}$
Dimensões	Dimensões físicas	$\sim 10\text{mm}^3$
Robustez a Interferência	Robustez da medição à distância entre o sensor e o chip e processamento	Analisar caso a caso
Circuito Anexo	Circuito de condicionamento do sinal	Analisar caso a caso
Consumo	Demanda energética	$<1\text{mW}$

Fonte: Autoria Própria

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 SENSORES DE TEMPERATURA

2.1.1 TERMOPAR

Esta tecnologia baseia-se no “Efeito Seebeck”, que é a geração de uma diferença de potencial entre duas junções de condutores quando estas apresentam temperaturas diferentes. É o complementar ao “Efeito Peltier”, onde uma diferença de potencial aplicada a estas mesmas junções gera um gradiente de temperatura (SMITH, 1923).

O sensor termopar é constituído da ponta de medição, onde se encontram as junções metálicas, do fio que transmite a tensão gerada e de um conector adaptado ao medidor utilizado. É um tipo de sensor bastante utilizado pela sua simplicidade e relativo baixo custo, além da capacidade de suportar altas temperaturas. Existem vários tipos, em função da liga metálica (Tipo K, E, J ...). No Anexo A, há uma tabela classificando os termopares por tipos.

A Figura 9 representa o esquema do princípio físico e a Figura 10 é um exemplo de termopar:

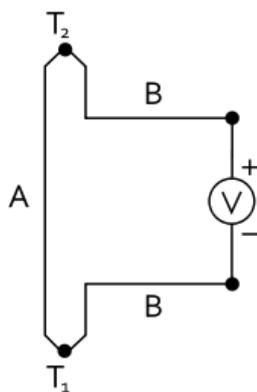


Figura 9 – Efeito Peltier-Seebeck.
Fonte: Wikipédia

Figura 10 – Termopar tipo K.
Fonte: FuelTech

Não é de interesse o estudo matemático, pois os equipamentos de processamento já possuem pacotes de condicionamento dedicados aos termopares.

2.1.2 TERMISTOR

Termistores são semicondutores cuja resistência varia com a temperatura. São fundamentalmente diferentes dos termopares por não gerarem tensão espontaneamente. Isso significa que deve haver um circuito para medição indireta da resistência através da Lei de Ohm. Em geral, suas curvas de comportamento são não-lineares, demandando condicionamento do sinal (NTC THERMISTOR).

Existem dois tipos de termistores: NTC (do inglês, *Negative Temperature Coefficient*) e PTC (do inglês, *Positive Temperature Coefficient*). De maneira resumida, no primeiro caso a resistência diminui com o aumento da temperatura enquanto que no segundo, a resistência aumenta. Para fins de medição de temperatura, o tipo NTC é o mais utilizado. A Figura 11 exemplifica os dois tipos, onde a resistência é inversamente proporcional à temperatura ou diretamente, respectivamente:

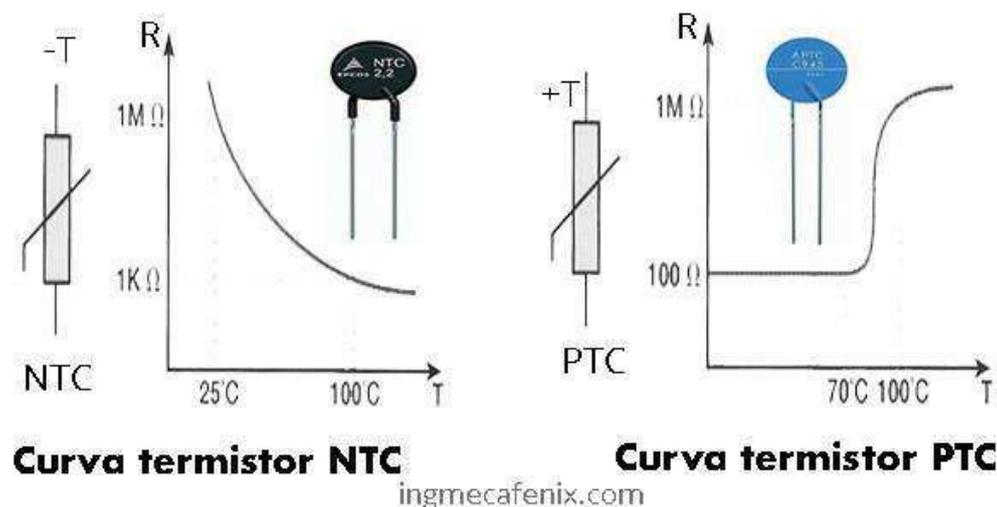


Figura 11 - Curvas de comportamento de termistores NTC e PTC.

Fonte: Ingenieria Mecafenix

A Equação Steinhart-Hart é uma aproximação de terceira ordem recorrente na bibliografia, utilizada para sistemas onde a temperatura varia acima de um determinado valor:

$$\frac{1}{T} = a + b \ln(R) + c(\ln(R))^3 \quad (1)$$

Onde a , b e c são os parâmetros de Steinhart-Hart e são próprios de cada equipamento. A temperatura T é relacionada à resistência R no momento da medição.

2.1.3 TERMORRESISTÊNCIA

De maneira semelhante ao termistor, a termorresistência se baseia no princípio da variação de resistência do material em função da temperatura. A grande diferença, fisicamente, está no tipo de material. Nesta tecnologia, analisa-se o comportamento resistivo de um metal (FRADEN, 1993).

A platina é a referência de uso, com uma normalização conhecida como PT-100. Isto significa que a uma temperatura de 0°C, o sensor tem uma resistência de 100Ω. A Figura 12 ilustra a composição de um sensor do tipo:

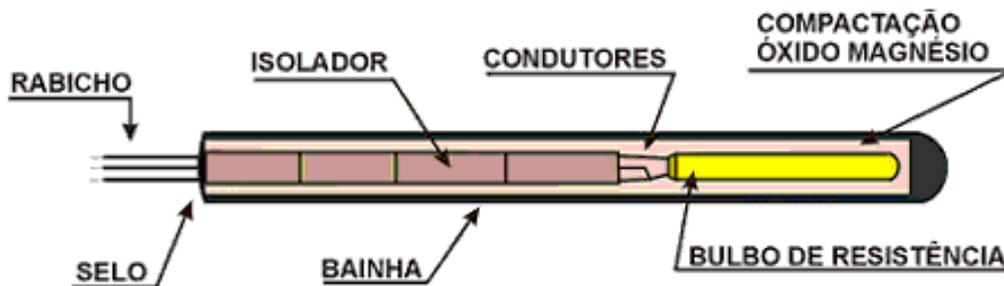


Figura 12 - Composição típica de um sensor PT-100.
Fonte: termopares.com.br

$$R_T = R_0 [1 + y(T - T_0)] \quad (2)$$

Onde y é a constante de temperatura do metal, para a Platina: $y = 3,908 * 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$.

A Equação 2 define o comportamento linear deste tipo de sensor, dependente de um coeficiente de temperatura característico do material.

2.1.4 DIODO

Componente básico de dispositivos eletrônicos, o diodo é uma junção de semicondutores com características distintas P e N. Cada semicondutor é dopado com excesso de lacunas e excesso de elétrons, respectivamente. Esta junção cria um efeito que restringe a passagem de corrente em um sentido. Uma aplicação direta disto é o uso como retificador não-controlado de tensão. O diodo possui uma queda de tensão característica em torno de 0,7 V, para silício. Diferentes tipos de diodos possuem diferentes valores de tensão, como o Schottky, em torno de 0,3 V.

Em aplicações clássicas existe uma interferência física no diodo devido à temperatura do elemento. Contudo, percebeu-se a possibilidade de transformar esse componente em um sensor de temperatura. A implementação é tão bem sucedida que é utilizada nos sensores das placas de microprocessadores como Pentium da Intel (ROTEM et al.). A Figura 13 ilustra alguns tipos de diodo:



Figura 13 - Vários tipos de diodos: Genérico, Schottky, Zener ...
Fonte: Eletronicadidatica.com.br

Como a função de sensor de temperatura do diodo não é explícita, justifica-se uma elaboração teórica. Para melhor entender a relação de funcionamento do diodo com a temperatura, a Equação 3 apresenta a equação característica de um diodo ideal:

$$I = I_S * \left(e^{\frac{V_d}{n * V_T}} - 1 \right) \quad (3)$$

Onde:

- V_T : Tensão térmica
- I_S : Corrente reversa de saturação
- V_d : Tensão do diodo
- n : Fator de idealização

Sabemos que:

$$V_T = k * \frac{T}{q} \quad (4)$$

Onde:

- k : Constante de Boltzmann
- q : Carga elétrica unitária
- T : Temperatura do diodo

Da Equação 3, temos uma relação logarítmica entre a tensão do modo passante e a corrente:

$$V_d = n * V_T * \ln\left(\frac{I}{I_S} + 1\right) \quad (5)$$

Já a corrente reversa de saturação é dada como:

$$I_S = A * e^{-\frac{E_g}{n * V_T}} \quad (6)$$

Onde:

- A : Constante física do diodo, em função das dimensões e dos portadores de carga
- E_g : Largura de banda do semicondutor

A relação entre a queda de tensão do diodo e sua temperatura é, portanto, da seguinte forma:

$$V_d = m * T + b \quad (7)$$

Relacionando as Equações 6 e 5, podemos definir:

$$m = \ln\left(\frac{I}{A} + e^{-\frac{E_g}{n * V_T}}\right) * n * \frac{k}{q} \quad (8)$$

O termo exponencial desta equação é da ordem de 10^{-10} , então pode ser desprezado para a faixa de temperatura de interesse. Definimos também $b = E_g$ para a Equação 7. Com estes valores, a Equação 7 se resume a:

$$V_d = n * \frac{k}{q} * \ln\left(\frac{I}{A}\right) * T + E_g \quad (9)$$

Para definir o fator de idealização n , basta medir a queda de tensão do diodo sob duas correntes diferentes:

$$n = \frac{V_1 - V_2}{V_T * (\ln I_1 - \ln I_2)} \quad (10)$$

A bibliografia afirma que a relação entre a queda de tensão e a temperatura é constante em torno de $-2 \text{ mV}/^\circ\text{C}$, entre -50°C a 150°C (FRADEN, 1993).

2.2 ESCOLHA DO SENSOR

Considerando as especificações explicitadas no Tópico 1.1, uma tabela comparativa com pesos atribuídos em função da importância da característica foi elaborada, no Apêndice A.

O diodo foi escolhido como o sensor que melhor satisfaz a demanda. A análise de decisão é feita em seguida.

2.2.1 TERMOPAR

- **Desempenho:** Boa precisão e tempo de resposta. Sensibilidade e estabilidade são muito baixas;
- **Dimensões:** Melhor opção para miniaturização;
- **Robustez à Interferências:** O uso de um amplificador de tensão leva uma alta impedância. A transmissão é, portanto, mais sensível a interferência eletromagnética (EMI);
- **Circuito Anexo:** Adicionamos amplificadores de sinal com os condicionadores mencionados na termorresistência;
- **Consumo de Energia:** Elemento passivo, não há necessidade de alimentar o sensor.

2.2.2 TERMISTOR

- **Desempenho:** Alta sensibilidade, boa precisão e tempo de resposta. Por outro lado, a estabilidade é baixa;
- **Dimensões:** Boas dimensões, mas próximas dos valores máximos toleráveis;
- **Robustez à Interferências:** Como as altas impedâncias podem ser encontradas em baixas temperaturas, é suscetível a EMI;
- **Circuito Anexo:** Uso de condicionadores relacionados à conversão analógica /digital;
- **Consumo de Energia:** Corrente contínua baixa para alimentar o termistor, há também a dissipação de energia pelo efeito Joule.

2.2.3 TERMORRESISTÊNCIA

- **Desempenho:** Alta precisão e sensibilidade, boa estabilidade, mas o tempo de resposta é longo;
- **Dimensões:** Boas dimensões com uma pequena sonda para medição;
- **Robustez à Interferências:** A impedância não é alta o suficiente, mas existe, por outro lado, usando uma boa montagem, os efeitos EMI são reduzidos;
- **Circuito Anexo:** Possibilidade uma ponte de Wheatstone, filtro anti-aliasing e um conversor analógico-digital;
- **Consumo de Energia:** Corrente contínua baixa para alimentar a resistência, há também a dissipação de energia pelo efeito Joule.

2.2.4 DIODO

- **Desempenho:** Todos os pontos considerados são bons, mas não são os melhores individualmente;
- **Dimensões:** As dimensões encontradas atendem a necessidade;
- **Robustez à Interferências:** Com baixa impedância e boa montagem de transmissão, os efeitos de acoplamento são reduzidos;
- **Circuito Anexo:** Uso de condicionadores relacionados à conversão analógica /digital;
- **Consumo de Energia:** Corrente contínua baixa para alimentar o diodo.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 TESTE DE CARACTERIZAÇÃO DO DIODO

Após a escolha do diodo como sensor de temperatura, testes de caracterização foram conduzidos. Diodos Schottky BAT85 (*datasheet* em Anexo) foram selecionados para os testes por serem menores e possuírem quedas de tensão menores que diodos normais. Como o interesse é a inserção desse elemento na rótula, se possível, raspamos o isolamento de fibra de vidro para reduzir ainda mais o tamanho e reduzir o tempo de resposta.

Foi utilizada uma estufa na universidade francesa com display digital de temperatura. Para melhorar a confiabilidade das medições, foram adicionados um sensor PT-100, um termistor de 10k Ω e um termopar tipo J e, finalmente, um diodo normal 1N4007 (*datasheet* em Anexo) no mesmo ambiente.

Uma fonte de tensão em série com um potenciômetro de 100k Ω foi utilizada como alimentação de corrente contínua constante de 1mA fora da estufa.

Foi utilizada uma central de aquisição 34970A *Data Acquisition/Data Logger Switch Unit* da empresa Keysight.

A Figura 14 ilustra o esquema de medição dos diodos, As Figura 15 e Figura 16 exibem a central de aquisição utilizada:

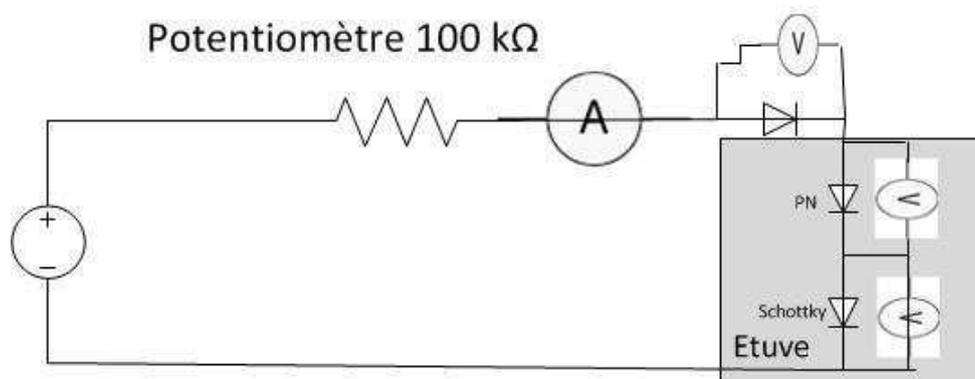


Figura 14 - Esquema ilustrativo de medição de temperatura dos diodos em estufa.
Fonte: Autoria Própria

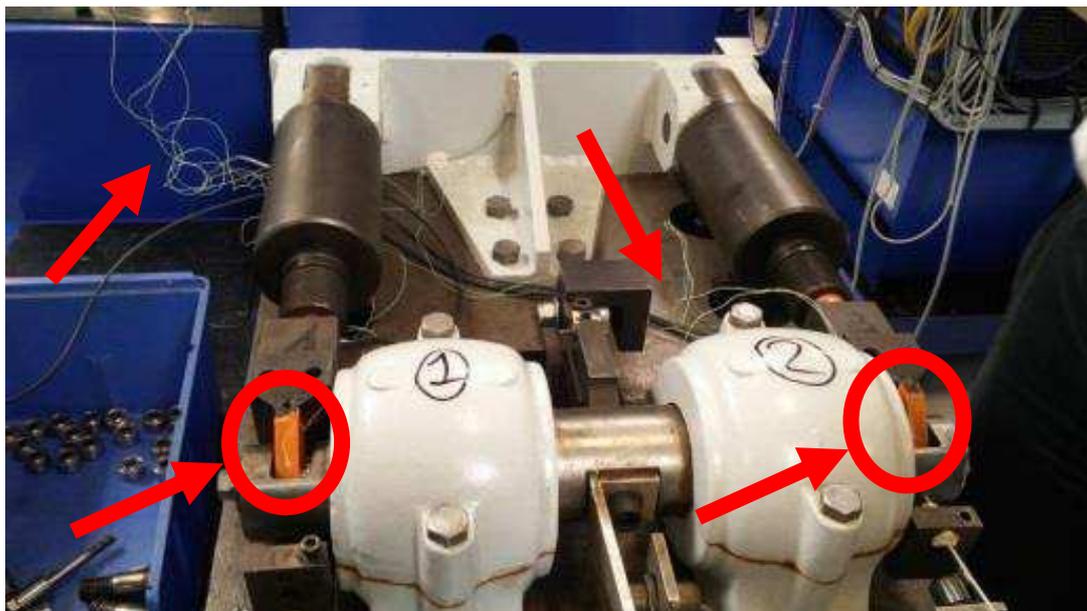


Figura 18 - Máquina de teste de desgaste de rótula.
Fonte: Autoria Própria

A Figura 18 exibe a máquina de desgaste da peça, estas salientadas pelos elipses em vermelho. A fita laranja foi utilizada para fixar os diodos. As setas vermelhas indicam os fios trançados que conectam os sensores à central de aquisição.

4 ANÁLISE DE RESULTADOS

Para a Caracterização diodo, testes realizados na universidade francesa, as medições foram realizadas ao longo de uma semana, sete (5) dias. Cada aquisição foi realizada com todos os tipos de sensores a cada quinze (15) minutos, para garantir a uniformidade da distribuição de energia térmica dentro da estufa.

Os objetivos deste teste é caracterizar os parâmetros que relacionam a queda de tensão do diodo com a variação de temperatura e comparar com as demais tecnologias estudadas. Damos foco especificamente ao termopar por ser o sensor padrão da empresa.

No caso dos testes sobre a rótula, as medições foram realizadas no laboratório da empresa durante uma semana, cinco (5) dias. A taxa de aquisição foi de duas (2) medições a cada minuto, se aproximando do caso real, no helicóptero.

Os objetivos foram a validação do funcionamento do diodo como sensor térmico na aplicação desejada e a otimização da corrente aplicada.

4.1 CARACTERIZAÇÃO DO DIODO

Os valores de temperatura medidos pelo sensor PT-100 foram usados como referência. A Tabela 2 traz uma análise extensiva das medições:

Tabela 2 - Tabela de valores medidos durante teste de caracterização do diodo.

Corrente (A)	PT100	Termistor de 10 k Ω	Termopar tipo J	Tensão PN	Tensão Schottky
0,00100021	132,776	137,98	106,684	0,38833934	0,07756996
0,00100138	126,306	130,276	104,039	0,40550533	0,08829771
0,00100099	115,727	121,347	96,997	0,42194197	0,09921671
0,0010021	105,852	108,895	88,035	0,44862281	0,11750427
0,00099978	95,417	97,934	81,292	0,46956287	0,13268782
0,00102233	84,86	86,666	72,558	0,49324688	0,14999602
0,001	59,095	61,736	54,83	0,54255344	0,18757455
0,00099889	38,116	37,811	38,302	0,59050109	0,22284549
0,00099993	21,472	20,182	24,89	0,62110902	0,24502398
0,00099959	10,371	8,586	17,72	0,64409401	0,26173194
0,00100165	-1,121	-3,085	8,249	0,6698718	0,28056843
0,00099995	-9,564	-12,146	0,52	0,68439049	0,29110465
0,00099997	-28,875	-32,504	-13,99	0,72235217	0,31897515

Fonte: Autoria Própria

Os valores medidos para os diodos podem ser melhor explicitados na forma de curvas características, como na Figura 19 e Figura 20:

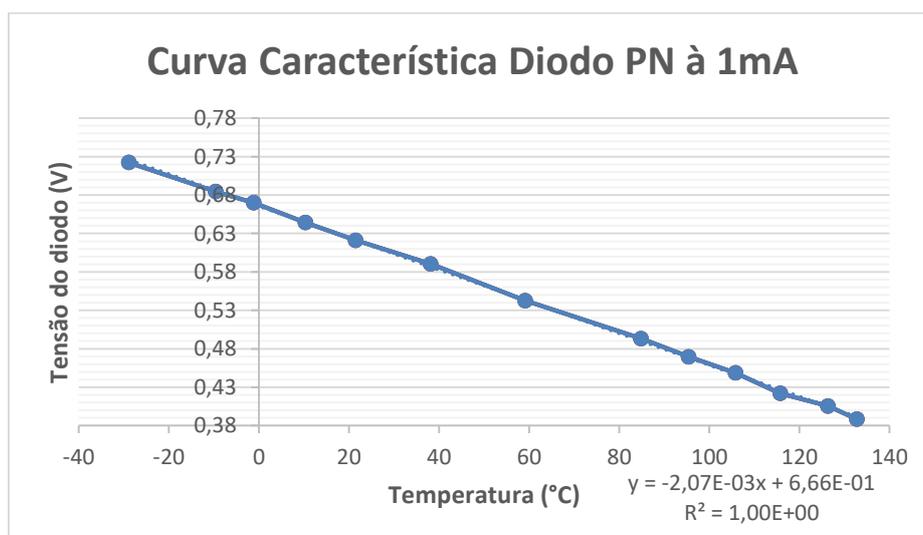


Figura 19 - Curva Característica Diodo PN à 1mA.

Fonte: Autoria Própria

Deste, derivamos a função linearizada:

$$V_d = -2,07 * 10^{-3} * T + 0,666 \quad (11)$$

Já para o diodo Schottky, na Figura 20:

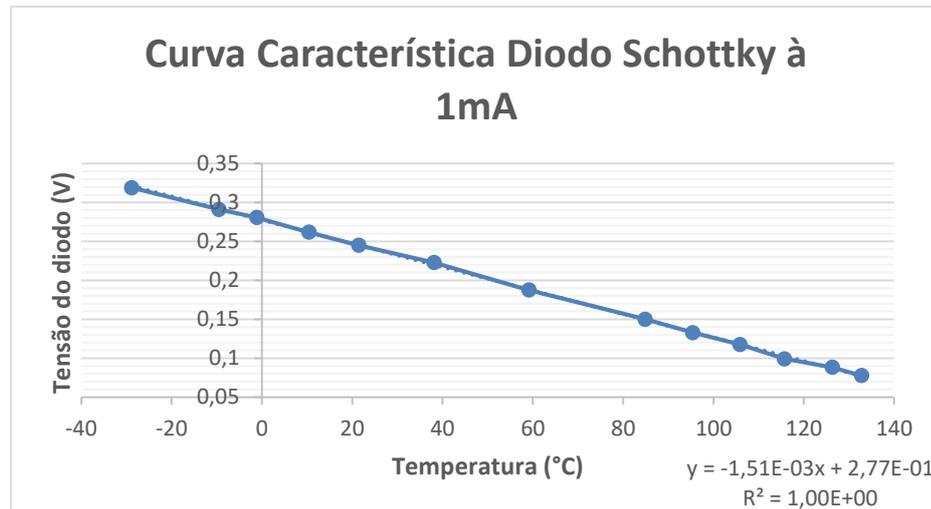


Figura 20 - Curva Característica Diodo Schottky à 1mA.

Fonte: Autoria Própria

$$V_d = -1,51 * 10^{-3} * T + 0,277 \quad (12)$$

Pode-se notar que o diodo Schottky possui uma sensibilidade inferior ao diodo PN, contudo a diferença ainda satisfaz as especificações. Em contrapartida, seu nível DC é inferior e possui encapsulamento menor.

Um comportamento secundário mas interessante de ser observado é o erro percentual das medições do termopar com relação à referência, como ilustrado na Figura 21:

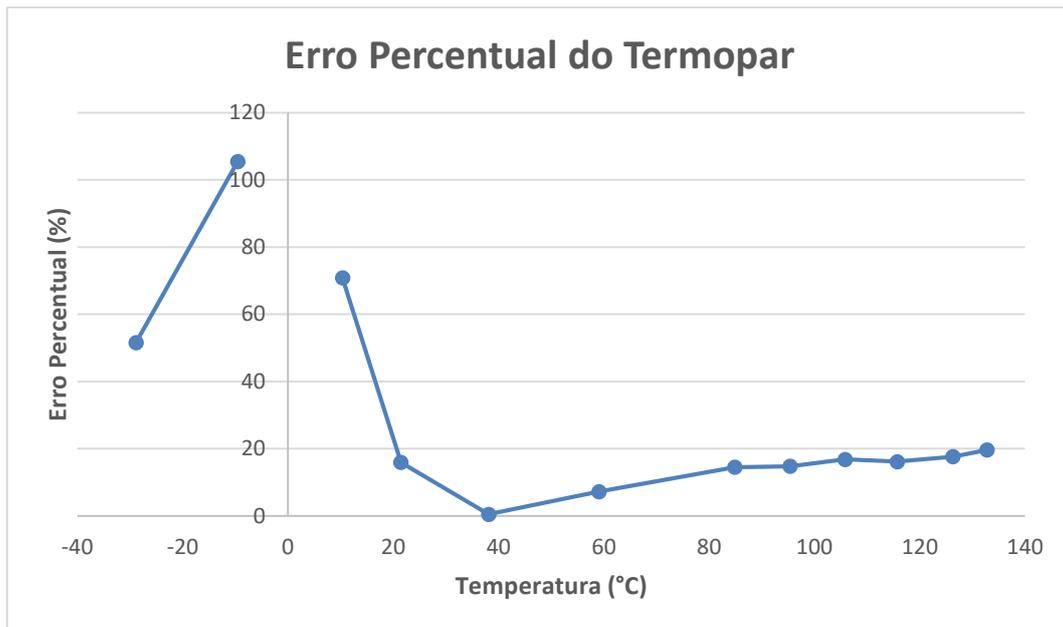


Figura 21 - Erro Percentual do Termopar.
Fonte: Autoria Própria

Pode-se notar que em torno do zero houve um salto no erro que não foi representado por tirar de escala o gráfico resultante (o valor chegou próximo de 900%). Tal variação pode ser atribuída a um condicionamento falho, acarretando um erro considerável (~20%) a temperaturas mais elevadas. Vale ressaltar que o processo de condicionamento foi realizado pelo *software* da central de aquisição, ou seja, um produto comercial e de uma empresa consolidada. Isto demonstra as possíveis dificuldades em condicionar o termopar em um sistema integrado.

À partir dos resultados expostos, podemos notar a vantagem que o diodo possui sobre o termopar, com relação ao condicionamento e calibração. O diodo como sensor é bem mais simples e robusto, com um comportamento que é preservado sem muitas alterações.

4.2 CARACTERIZAÇÃO DA RÓTULA

Nesta seção, expomos os resultados das medições dos diodos como sensores de temperatura sobre as rótulas nas máquinas de desgaste. Os resultados demonstram as variações de comportamento em função da corrente no diodo, além de exibir um comportamento inesperado quando a corrente ultrapassa um certo valor.

Para o caso com a corrente mais baixa, à $100\mu\text{A}$, temos a Figura 22:

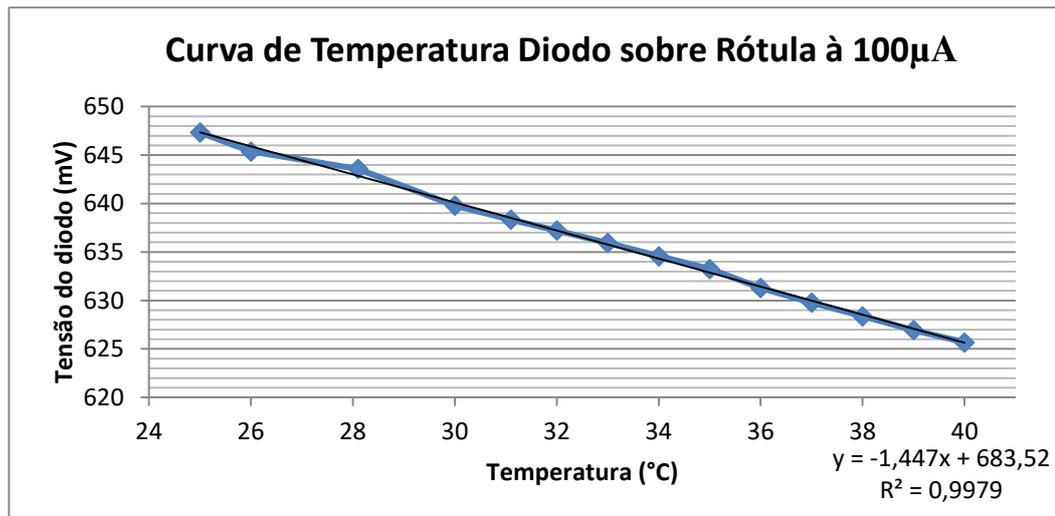


Figura 22 - Curva de Temperatura medida pelo diodo PN sobre a rótula à $100\mu\text{A}$.
 Fonte: Autoria Própria

$$V_d = -1,45 * 10^{-3} * T + 0,683 \quad (13)$$

Para o caso com a corrente à 1mA , a Figura 23:

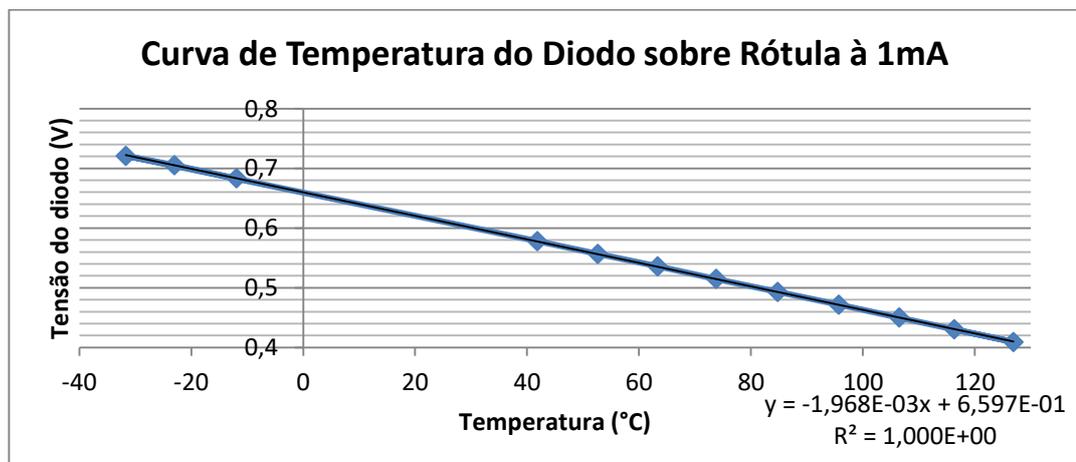


Figura 23 - Curva de Temperatura medida pelo diodo PN sobre a rótula à 1mA .
 Fonte: Autoria Própria

$$V_d = -1,97 * 10^{-3} * T + 0,660 \quad (14)$$

E agora, a Figura 24 representa o caso de corrente mais elevada, à 10mA:

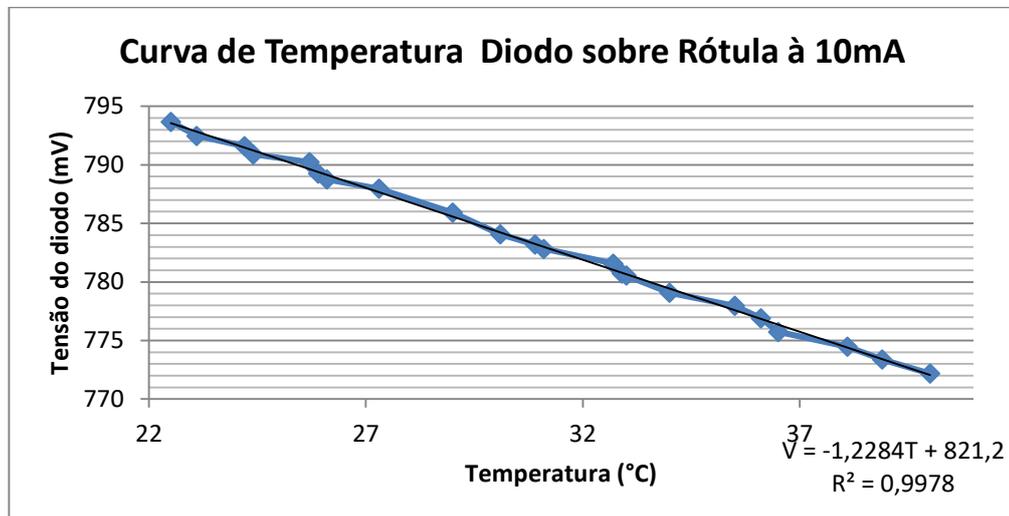


Figura 24 - Curva de Temperatura medida pelo diodo PN sobre a rótula à 10mA.

Fonte: Autoria Própria

$$V_d = -1,23 * 10^{-3} * T + 0,821 \quad (15)$$

Com o interesse de estudar o efeito térmico de semicondutor nos dois casos de corrente na ordem de miliampères, os diodos foram alimentados com suas respectivas correntes e a temperatura foi mantida constante em torno de 20°C. A Figura 25 e a Figura 26 ilustram a variação da queda de tensão do diodo ao longo do tempo:

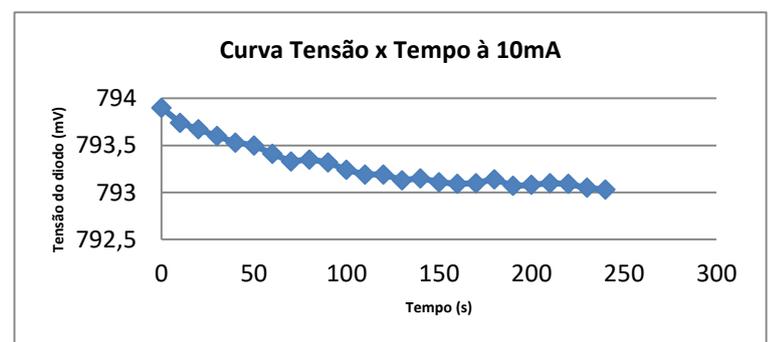
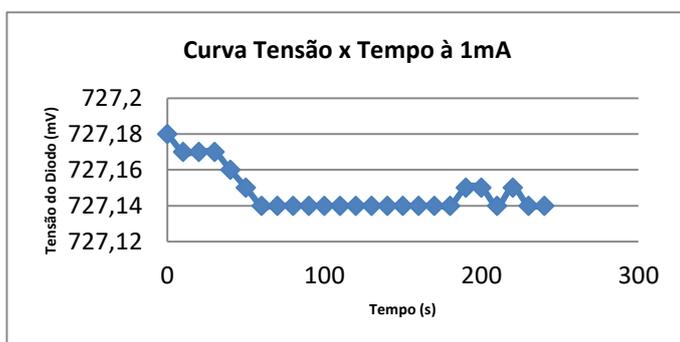


Figura 25 – Curva da queda de tensão do diodo com relação ao tempo à 1mA.

Fonte: Autoria Própria

Figura 26 – Curva da queda de tensão do diodo com relação ao tempo à 10mA.

Fonte: Autoria Própria

Com estes resultados, podemos afirmar que a aplicação de uma corrente de 10mA tem um efeito negativo ao sistema por uma série de fatores. O primeiro é a maior demanda energética do circuito. O segundo problema é uma queda da sensibilidade sem motivo aparente. E, finalmente, o fato de que as medições são distorcidas com o passar do tempo. Um possível fator seria a saturação térmica dos semicondutores.

O cenário de corrente à 100 μ A é promissor, pois a sensibilidade é reduzida moderadamente e temos um consumo menor. Há o potencial de se investigar as razões físicas dessas variações de sensibilidade.

5 CONCLUSÃO

Neste trabalho foi apresentada uma problemática real sobre a manutenção de helicópteros e uma proposta de solução para melhorar o desempenho deste tipo de serviço. Desta análise, foram abordadas as tecnologias mais comuns para medição de temperatura e acompanhamos o processo de tomada de decisão com a eventual escolha do diodo.

Em uma etapa precedente, expomos os materiais disponíveis e definimos duas classes de testes que permitiram a caracterização desta tecnologia aplicada ao contexto. Com os resultados dos testes, pudemos esclarecer alternativas válidas e descartar outras para uma potencial aplicação.

Podemos concluir que o diodo é uma tecnologia válida para medições de temperatura não só no âmbito de rótulas de helicóptero, como também para diversas aplicações.

Possíveis perspectivas seriam a de estudos com diodos medindo temperaturas em sistemas que já possuem semicondutores ou mesmo em práticas estudantis de baixo custo.

REFERÊNCIAS

FRADEN, J. *Handbook of Modern Sensors*: 2. ed. : Editora Springer, 1993.

RAMSDEN, E. *Temperature Measurement*, 2000, Disponível em: <<https://www.sensormag.com/components/temperature-measurement>>. Acesso em: 07 out. 2018.

34970A UNIDADE DE AQUISIÇÃO, COMUTAÇÃO E REGISTRO DE DADOS, Disponível em: <<https://www.keysight.com/en/pd-1000001313%3Aeps%3Apro-pn-34970A/data-acquisition-data-logger-switch-unit?cc=US&lc=eng>>. Acesso em: 16 out. 2018.

KUHN, K. A. *Diode Characteristics*, 2009.

SIEGAL, B. *Na Introduction to Diode Thermal Measurements*, Santa Clara, 2006.

BECKER, J. A.; GREEN, C. B.; PEARSON, G. L. *Properties and uses of thermistors - Thermally sensitive resistors*, IEEE Electrical Engineering on vol. 65, pp. 711-725, 1946.

CHEVAKO, R. J. *Thermistor bibliography*, Proceedings of the IEEE on vol. 53, pp. 175-176, 1965.

DUNBAR, W. G. *High Temperature Effects on Ceramic-Insulated Thermocouple Wires*, IEEE Transactions on Aerospace on vol. 2, pp. 452-456, 1964.

SMITH, I. B. *Applications and limitations of thermocouples for measuring temperatures*, Journal of the American Institute of Electrical Engineers on vol. 42, pp. 851-853, 1923.

WENCHENG, P. et al. *Development of Platinum Resistance Temperature Measurement System with 30mK Precision*, 2007 8th International Conference on Electronic Measurement and Instruments, 2007.

GHOSH, S. et al. *A novel sensitivity enhancement technique employing wheatstone's bridge for strain and temperature measurement*, Proceedings of the 2015 Third International Conference C3IT, 2015.

DE BRIGANTI, G. *Navair Sees F-35 Requiring Up to 50 Maintenance Hours per Flight Hour*, 2016, Disponível em: <http://www.defense-aerospace.com/articles-view/feature/5/179243/navair-projects-f_35-to-need-50-maintenance-hours-per-flight-hour.html>. Acesso em: 13 nov. 2018.

NTC THERMISTOR, Disponível em: <<http://www.resistorguide.com/ntc-thermistor/>>. Acesso em: 25 out. 2018.

KEYSIGHT TECHNOLOGIES *Practical Temperature Measurements - Application Note*, Disponível em: <<http://literature.cdn.keysight.com/litweb/pdf/5965-7822E.pdf>>. Acesso em: 30 nov. 2018.

ROTEM, E. et al. *Temperature measurement in the Intel Core Duo Processor*, Disponível em: <<https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/0709/0709.1861.pdf>>. Acesso em: 12 nov. 2018.

APÊNDICE A – TABELA DE TOMADA DE DECISÃO DO SENSOR DE TEMPERATURA (VALORES DE 1 À 5)

	Desempenho	Dimensões	Robustez a Interferências	Circuito Anexo	Consumo	Total
Coefficientes	5	4	3	2	1	
Diodo	4	5	4	3	4	62
Termorresistência	3	4	3	2	2	46
Termistor	1	3	2	3	2	31
Termopar	3	5	1	2	5	47

LEGENDA:

- 1:** Não satisfaz as especificações;
- 2:** Satisfaz em detrimento da viabilidade da aplicação;
- 3:** Satisfaz de maneira marginal as especificações;
- 4:** Satisfaz as especificações;
- 5:** Satisfaz além das especificações.

ANEXO A – TABELA DE TIPOS DE TERMOPARES

O texto contido neste anexo foi retirado do sítio da Wikipédia na internet.

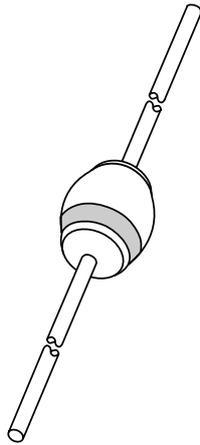
Tipo ^{[1][2][3][4][5]} ↕	Faixa de Temperatura (°C)				Classe de tolerância (°C)		Padrão de Cores		
	Contínua		Termo Curto		1	2	IEC ^[7]	BS ^[7]	ANSI ^[7]
	Baixo ↕	Alto ↕	Baixo ↕	Alto ↕					
K	0	+1100	-180	+1300	-40 – 375: ±1.5 375 – 1000: ±0.004×T	-40 – 333: ±2.5 333 – 1200: ±0.0075×T			
J	0	+750	-180	+800	-40 – 375: ±1.5 375 – 750: ±0.004×T	-40 – 333: ±2.5 333 – 750: ±0.0075×T			
N	0	+1100	-270	+1300	-40 – 375: ±1.5 375 – 1000: ±0.004×T	-40 – 333: ±2.5 333 – 1200: ±0.0075×T			
R	0	+1600	-50	+1700	0 – 1100: ±1.0 1100 – 1600: ±0.003×(T-767)	0 – 600: ±1.5 600 – 1600: ±0.0025×T			
S	0	+1600	-50	+1750	0 – 1100: ±1.0 1100 – 1600: ±0.003×(T-767)	0 – 600: ±1.5 600 – 1600: ±0.0025×T			
B	+200	+1700	0	+1820	não disponível	600 – 1700: ±0.0025×T	Sem definição	Sem definição	Sem definição
T	-185	+300	-250	+400	-40 – 125: ±0.5 125 – 350: ±0.004×T	-40 – 133: ±1.0 133 – 350: ±0.0075×T			
E	0	+800	-40	+900	-40 – 375: ±1.5 375 – 800: ±0.004×T	-40 – 333: ±2.5 333 – 900: ±0.0075×T			
Chromel/AuFe	-272	+300	—	—	Reprodutibilidade 0,2% da tensão. Calibração individual de cada sensor.				

ANEXO B – *DATASHEETS* DIODOS PN 1N4007 E

SCHOTTKY BAT85

Documentos contidos no sítio “alldatasheet.com”.

DATA SHEET



1N4001G to 1N4007G **Rectifiers**

Product specification
Supersedes data of April 1992

1996 May 24

Rectifiers

1N4001G to 1N4007G

FEATURES

- Glass passivated
- High maximum operating temperature
- Low leakage current
- Excellent stability
- Available in ammo-pack.

DESCRIPTION

Rugged glass package, using a high temperature alloyed construction.

This package is hermetically sealed and fatigue free as coefficients of expansion of all used parts are matched.



LIMITING VALUES

In accordance with the Absolute Maximum Rating System (IEC 134).

SYMBOL	PARAMETER	CONDITIONS	MIN.	MAX.	UNIT
V _{RRM}	repetitive peak reverse voltage				
	1N4001G		–	50	V
	1N4002G		–	100	V
	1N4003G		–	200	V
	1N4004G		–	400	V
	1N4005G		–	600	V
	1N4006G 1N4007G		–	800 1000	V V
V _R	continuous reverse voltage				
	1N4001G		–	50	V
	1N4002G		–	100	V
	1N4003G		–	200	V
	1N4004G		–	400	V
	1N4005G		–	600	V
	1N4006G 1N4007G		–	800 1000	V V
I _{F(AV)}	average forward current	averaged over any 20 ms period; T _{amb} = 75 °C; see Fig.2	–	1.00	A
		averaged over any 20 ms period; T _{amb} = 100 °C; see Fig.2	–	0.75	A
I _F	continuous forward current	T _{amb} = 75 °C; see Fig.2	–	1.00	A
I _{FRM}	repetitive peak forward current		–	10	A
I _{FSM}	non-repetitive peak forward current	half sinewave; 60 Hz	–	30	A
T _{stg}	storage temperature		–65	+175	°C
T _j	junction temperature		–65	+175	°C

Rectifiers

1N4001G to 1N4007G

ELECTRICAL CHARACTERISTICS

$T_j = 25\text{ °C}$; unless otherwise specified.

SYMBOL	PARAMETER	CONDITIONS	MAX.	UNIT
V_F	forward voltage	$I_F = 1\text{ A}$; see Fig.3	1.1	V
$V_{F(AV)}$	full-cycle average forward voltage	$I_{F(AV)} = 1\text{ A}$	0.8	V
I_R	reverse current	$V_R = V_{Rmax}$	10	μA
		$V_R = V_{Rmax}$; $T_{amb} = 100\text{ °C}$	50	μA
$I_{R(AV)}$	full-cycle average reverse current	$V_R = V_{RRMmax}$; $T_{amb} = 75\text{ °C}$	30	μA

THERMAL CHARACTERISTICS

SYMBOL	PARAMETER	CONDITIONS	VALUE	UNIT
$R_{th\ j-tp}$	thermal resistance from junction to tie-point	lead length = 10 mm	46	K/W
$R_{th\ j-a}$	thermal resistance from junction to ambient	note 1	100	K/W

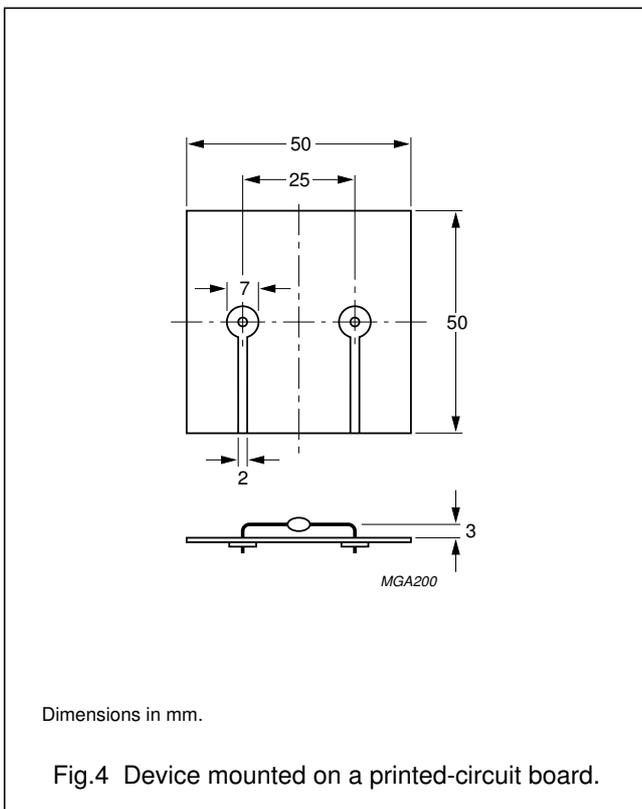
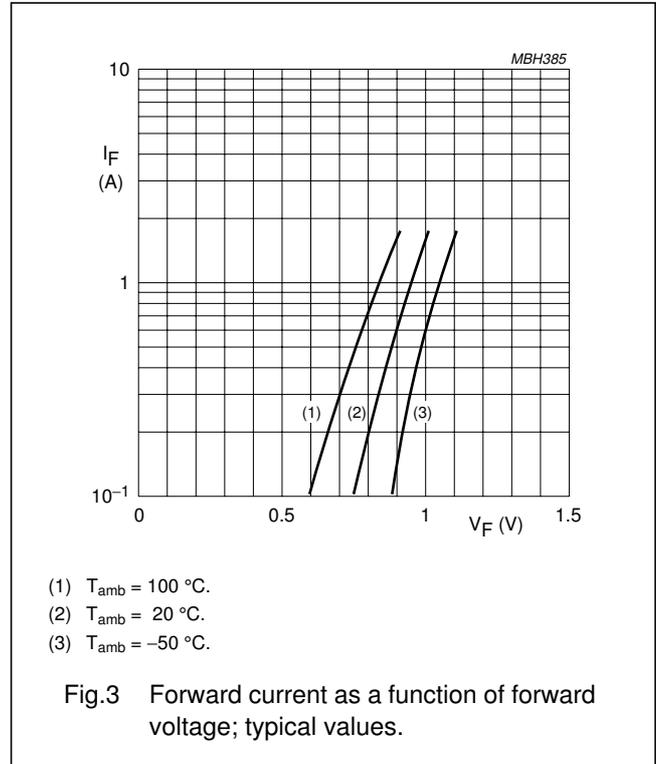
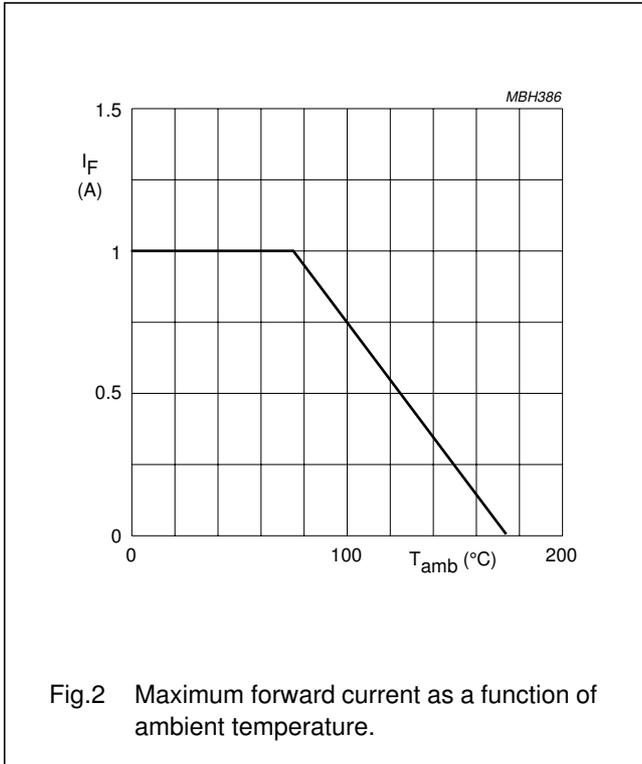
Note

1. Device mounted on epoxy-glass printed-circuit board, 1.5 mm thick; thickness of copper $\geq 40\ \mu\text{m}$, see Fig.4. For more information please refer to the "General Part of associated Handbook".

Rectifiers

1N4001G to 1N4007G

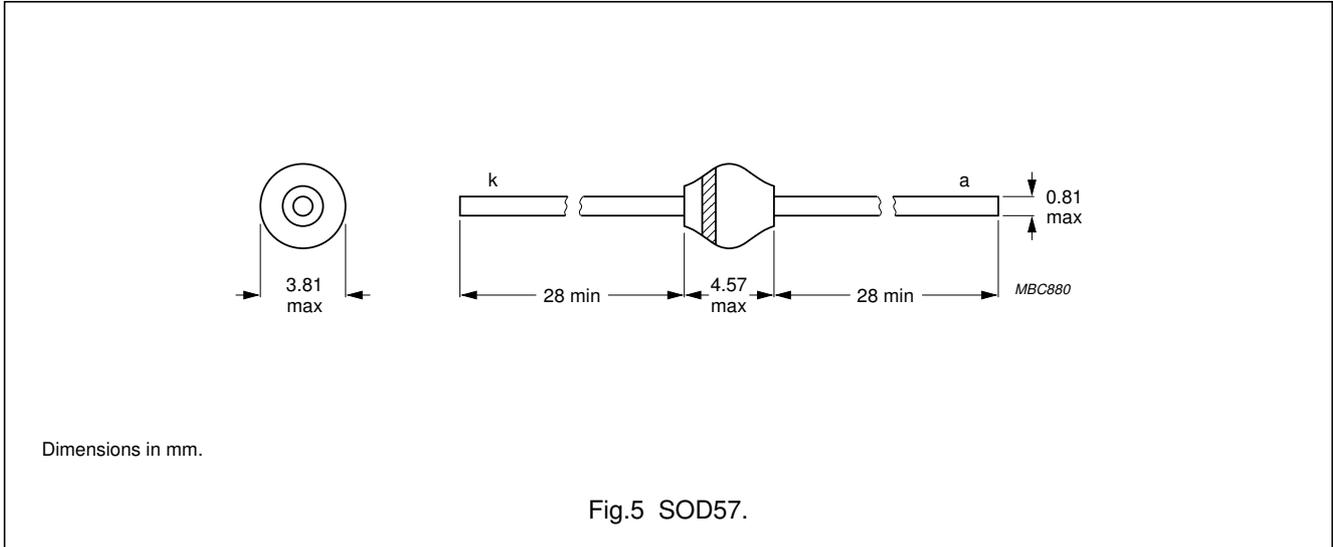
GRAPHICAL DATA



Rectifiers

1N4001G to 1N4007G

PACKAGE OUTLINE



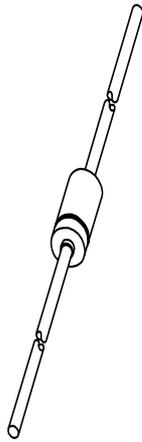
DEFINITIONS

Data sheet status	
Objective specification	This data sheet contains target or goal specifications for product development.
Preliminary specification	This data sheet contains preliminary data; supplementary data may be published later.
Product specification	This data sheet contains final product specifications.
Limiting values	
Limiting values given are in accordance with the Absolute Maximum Rating System (IEC 134). Stress above one or more of the limiting values may cause permanent damage to the device. These are stress ratings only and operation of the device at these or at any other conditions above those given in the Characteristics sections of the specification is not implied. Exposure to limiting values for extended periods may affect device reliability.	
Application information	
Where application information is given, it is advisory and does not form part of the specification.	

LIFE SUPPORT APPLICATIONS

These products are not designed for use in life support appliances, devices, or systems where malfunction of these products can reasonably be expected to result in personal injury. Philips customers using or selling these products for use in such applications do so at their own risk and agree to fully indemnify Philips for any damages resulting from such improper use or sale.

DATA SHEET



BAT85 Schottky barrier diode

Product specification
Supersedes data of February 1992

1996 Mar 20

Schottky barrier diode

BAT85

FEATURES

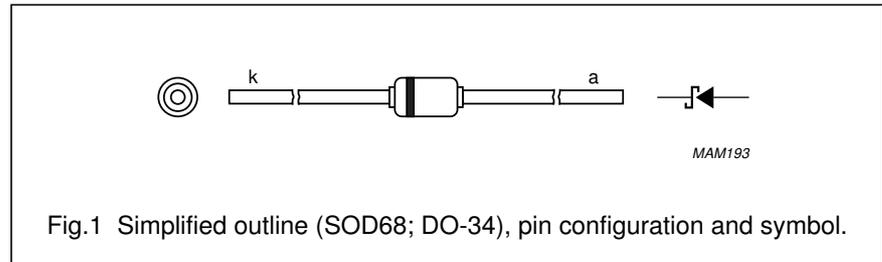
- Low forward voltage
- Guard ring protected
- Hermetically-sealed leaded glass package.

APPLICATIONS

- Ultra high-speed switching
- Voltage clamping
- Protection circuits
- Blocking diodes.

DESCRIPTION

Planar Schottky barrier diode with an integrated protection ring against static discharges, encapsulated in a hermetically-sealed subminiature SOD68 (DO-34) package. The diode is suitable for mounting on a 2 E (5.08 mm) pitch.



LIMITING VALUES

In accordance with the Absolute Maximum Rating System (IEC 134).

SYMBOL	PARAMETER	CONDITIONS	MIN.	MAX.	UNIT
V_R	continuous reverse voltage		–	30	V
I_F	continuous forward current		–	200	mA
$I_{F(AV)}$	average forward current	PCB mounting, lead length = 4 mm; $V_{RWM} = 25\text{ V}$; $a = 1.57$; $\delta = 0.5$; $T_{amb} = 50\text{ °C}$; see Fig.2	–	200	mA
I_{FRM}	repetitive peak forward current	$t_p \leq 1\text{ s}$; $\delta 0.5$	–	300	mA
I_{FSM}	non-repetitive peak forward current	$t_p \leq 10\text{ ms}$	–	5	A
T_{stg}	storage temperature		–65	+150	°C
T_j	junction temperature		–	125	°C
T_{amb}	operating ambient temperature		–65	+125	°C

Schottky barrier diode

BAT85

ELECTRICAL CHARACTERISTICS

$T_{amb} = 25\text{ °C}$ unless otherwise specified.

SYMBOL	PARAMETER	CONDITIONS	MAX.	UNIT
V_F	forward voltage	see Fig.3 $I_F = 0.1\text{ mA}$ $I_F = 1\text{ mA}$ $I_F = 10\text{ mA}$ $I_F = 30\text{ mA}$ $I_F = 100\text{ mA}$	240 320 400 500 800	mV mV mV mV mV
I_R	reverse current	$V_R = 25\text{ V}$; see Fig.4	2	μA
t_{rr}	reverse recovery time	when switched from $I_F = 10\text{ mA}$ to $I_R = 10\text{ mA}$; $R_L = 100\ \Omega$; measured at $I_R = 1\text{ mA}$; see Fig.6	4	ns
C_d	diode capacitance	$f = 1\text{ MHz}$; $V_R = 1\text{ V}$; see Fig.5	10	pF

THERMAL CHARACTERISTICS

SYMBOL	PARAMETER	CONDITIONS	VALUE	UNIT
$R_{th\ j-a}$	thermal resistance from junction to ambient	note 1	320	K/W

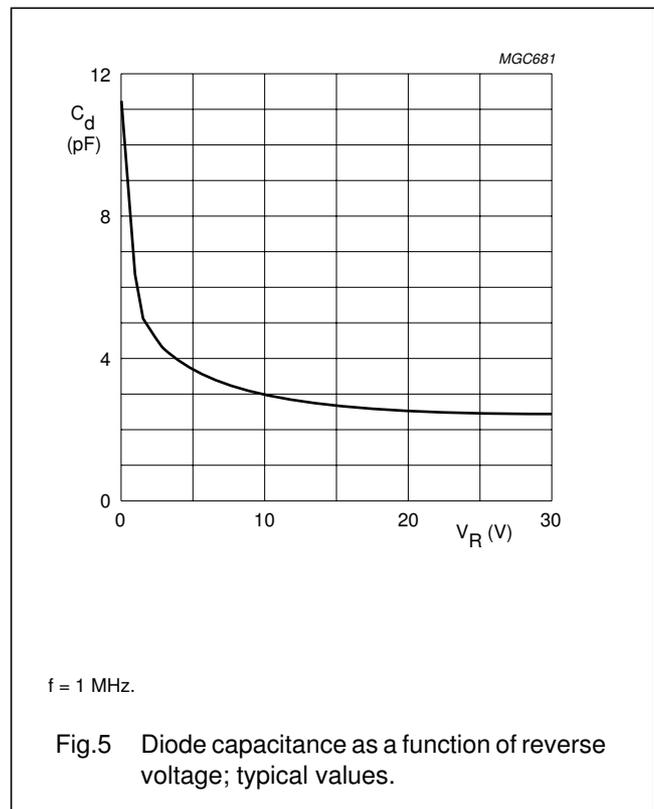
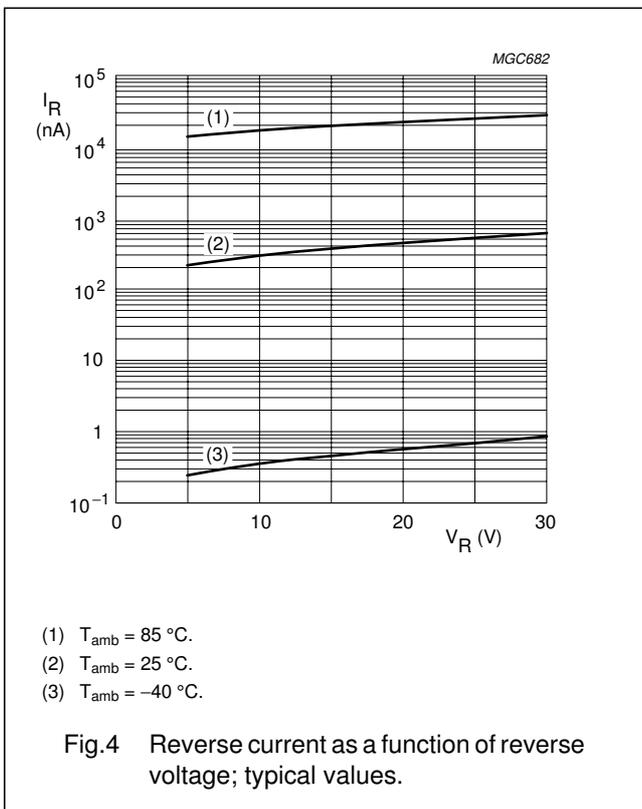
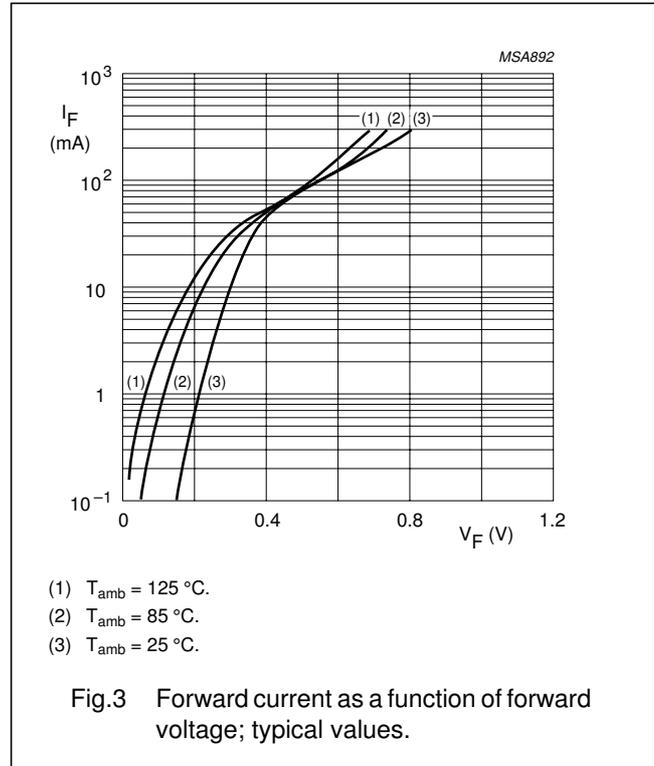
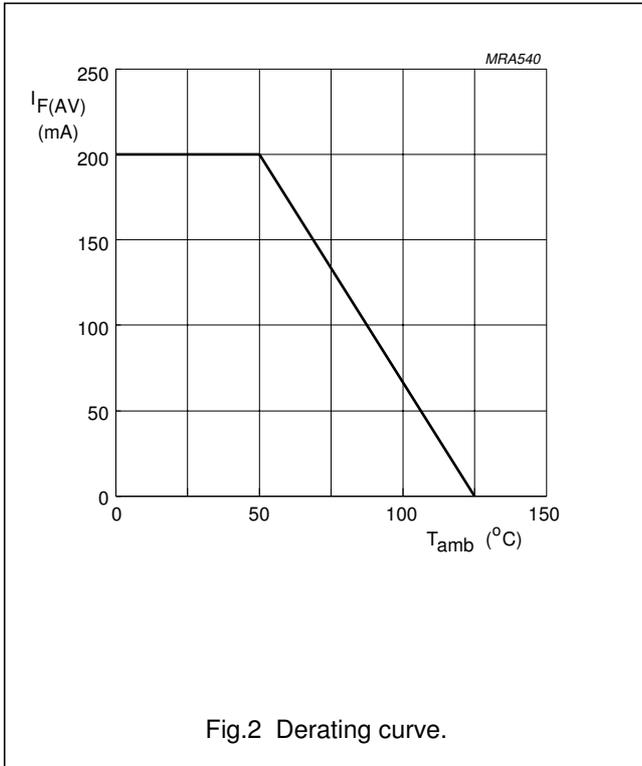
Note

1. Refer to SOD68 standard mounting conditions.

Schottky barrier diode

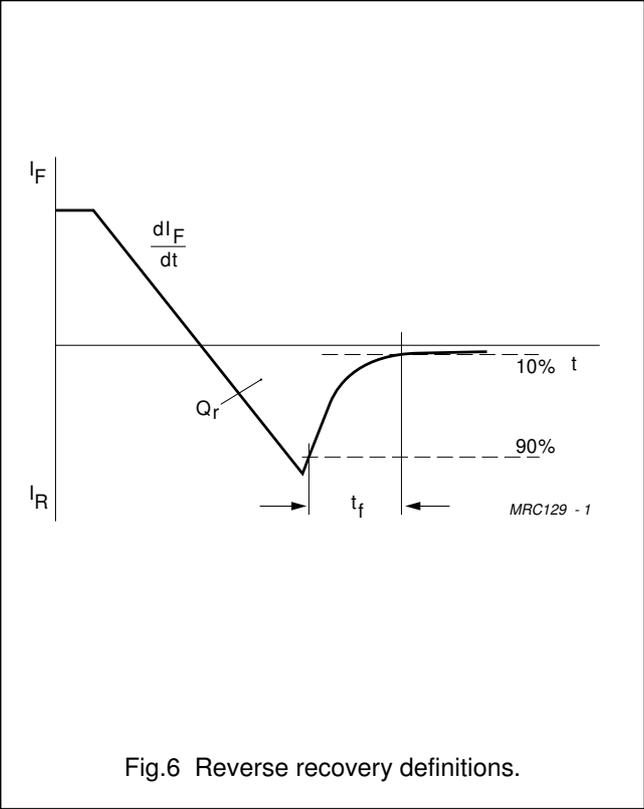
BAT85

GRAPHICAL DATA



Schottky barrier diode

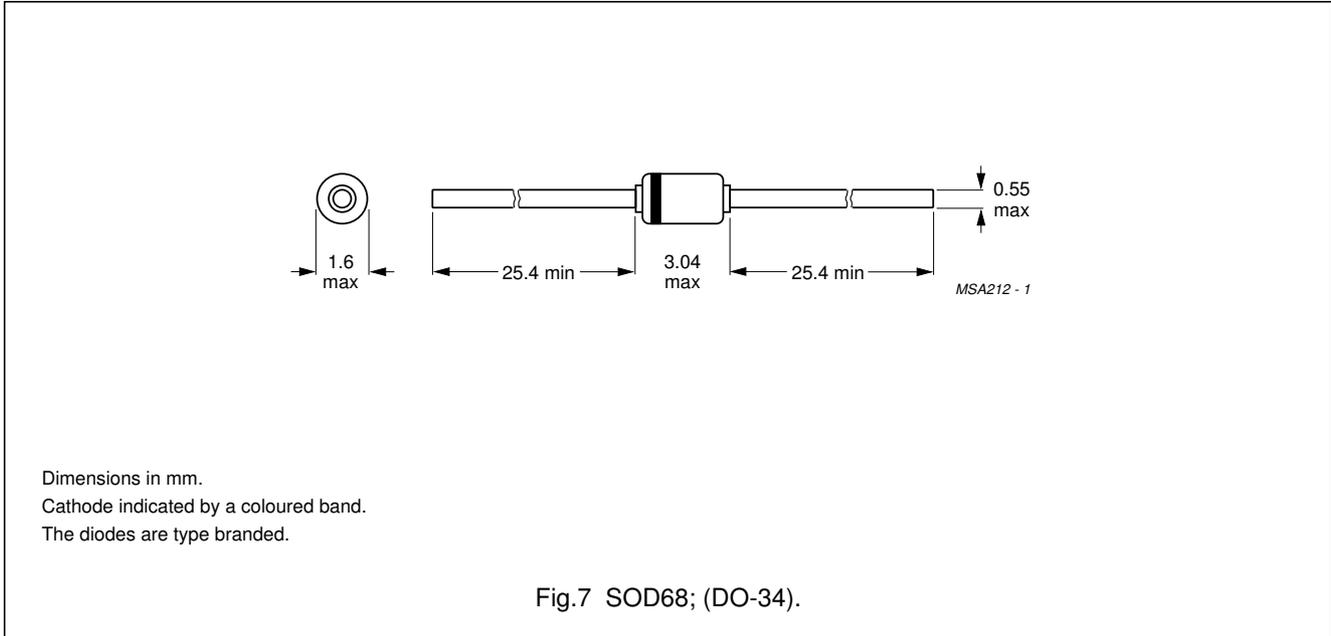
BAT85



Schottky barrier diode

BAT85

PACKAGE OUTLINE



DEFINITIONS

Data sheet status	
Objective specification	This data sheet contains target or goal specifications for product development.
Preliminary specification	This data sheet contains preliminary data; supplementary data may be published later.
Product specification	This data sheet contains final product specifications.
Limiting values	
Limiting values given are in accordance with the Absolute Maximum Rating System (IEC 134). Stress above one or more of the limiting values may cause permanent damage to the device. These are stress ratings only and operation of the device at these or at any other conditions above those given in the Characteristics sections of the specification is not implied. Exposure to limiting values for extended periods may affect device reliability.	
Application information	
Where application information is given, it is advisory and does not form part of the specification.	

LIFE SUPPORT APPLICATIONS

These products are not designed for use in life support appliances, devices, or systems where malfunction of these products can reasonably be expected to result in personal injury. Philips customers using or selling these products for use in such applications do so at their own risk and agree to fully indemnify Philips for any damages resulting from such improper use or sale.