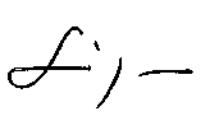
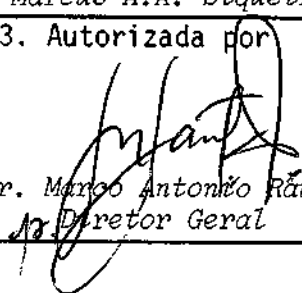


1. Publicação nº <i>INPE-4408-PRE/1221</i>	2. Versão	3. Data <i>Out., 1987</i>	5. Distribuição ☐ Interna ☒ Externa ☐ Restrita
4. Origem <i>DEO</i>	Programa <i>A6A52</i>		
6. Palavras chaves - seleccionadas pelo(s) autor(es) <i>DETETORES FOTOVOLTAICOS DETERMINAÇÃO DE ATITUDE</i> <i>SENSOR SOLAR</i>			
7. C.D.U.: <i>681.586.72</i>			
8. Título <i>INPE-4408-PRE/1221</i> <i>CARACTERIZAÇÃO DE DETETORES FOTOVOLTAICOS INTEGRADOS PARA OS SENSORES SOLARES DA MECB</i>		10. Páginas: <i>21</i>	
		11. Última página: <i>14</i>	
9. Autoria <i>Selingardi, M.L.; Matos, J.D.; Bertoli no, M.A.; *Andrade, A.M.; *Fonseca, F. J.; *Sanematsu, M.S.</i>		12. Revisada por  <i>Marcus A.A. Siqueira</i>	
Assinatura responsável 		13. Autorizada por  <i>Dr. Marco Antônio Rüpp</i> <i>Dr. Diretor Geral</i>	
14. Resumo/Notas <i>Este trabalho descreve os testes de caracterização dos detetores fotovoltaicos integrados desenvolvidos pelo LME/USP. Estes detetores constituirão os estágios de detecção dos sensores solares a serem utilizados na determinação de atitude dos Satélites Brasileiros de Coleta de Dados da Missão Espacial Completa Brasileira - MECB. São apresentados os resultados das medidas de uniformidade, "cross-talk", linearidade e variação da corrente com a temperatura, que foram realizadas no Departamento de Sistemas Eletroópticos (DEO) do Instituto de Pesquisas Espaciais - INPE.</i>			
15. Observações <i>*Laboratório de Microeletrônica - LME/USP.</i> <i>Este trabalho foi apresentado na SBMicro - Congresso da Sociedade Brasileira de Microeletrônica, de 14 a 16 de julho de 1987, no Centro de Convenções Rebouças, em São Paulo-SP.</i>			



PROPOSTA PARA
PUBLICAÇÃO

- ☐ DISSERTAÇÃO
☐ TESE
☒ RELATÓRIO
☐ OUTROS

IDENTIFICAÇÃO				TÍTULO			
CARACTERIZAÇÃO DE DETETORES FOTOVOLTAICOS INTEGRADOS PARA OS SENSORES SOLARES DA MECB							
AUTOR(ES) Mário Luiz Selingardi; José Dias de Matos, Marcos Antonio Bertolino; Adnei M. Andrade; Fernando J. Fonseca; M.S. Sanematsu				ORIENTADOR			
				CO-ORIENTADOR			
LIMITE _/_/_				DEFESA _/_/_			
CURSO _/_/_				ORGÃO _/_/_			
				DIVULGAÇÃO ☒ EXTERNA ☐ INTERNA ☐ RESTRITA			
				EVENTO/MEIO ☒ CONGRESSO ☐ REVISTA ☐ OUTROS			
NOME DO REVISOR Marcus A.A. Siqueira				NOME DO RESPONSÁVEL Mário Luiz Selingardi			
RECEBIDO _/_/_				DEVOLVIDO _/_/_			
ASSINATURA <i>[Signature]</i>				APROVADO ☒ SIM ☐ NÃO			
				DATA 09/07/87			
				ASSINATURA <i>[Signature]</i>			
REV. LINGUAGEM Nº 207				PRIOR. 1			
RECEBIDO 18/08/87				NOME DO REVISOR Neusa Maria Dias			
PÁG. 10				DEVOLVIDO 20/8/87			
ASSINATURA <i>[Signature]</i>				OS AUTORES DEVEM MENCIONAR NO VERSO INSTRUÇÕES ESPECÍFICAS, ANEXANDO NORMAS, SE HOUVER			
				RECEBIDO _/_/_			
				DEVOLVIDO _/_/_			
				NOME DA DATILÓGRAFA			
Nº DA PUBLICAÇÃO:				PÁG.:			
CÓPIAS:				Nº DISCO:			
				LOCAL:			
				AUTORIZO A PUBLICAÇÃO ☐ SIM ☐ NÃO			
				//_			

OBSERVAÇÕES E NOTAS

Este relatório será apresentado no SBmicro - Congresso da Sociedade Brasileira de Microeletrônica.

ABSTRACT

This work describes the characterization tests of the integrated photovoltaic detectors developed by LME/USP. These detectors will constitute the detection stages of the solar sensors to be used in attitude determination of the Brazilian Data Collecting Satellites of the Brazilian Complete Space Mission. The results of measurements of uniformity, cross talk, linearity and variation of the current with temperature carried out at Electrooptical Department at Instituto de Pesquisas Espaciais-INPE are presented.

SUMÁRIO

	<u>Pág.</u>
LISTA DE FIGURAS	v
1. <u>INTRODUÇÃO</u>	1
2. <u>PRINCÍPIOS DE FUNCIONAMENTO DO SENSOR</u>	2
3. <u>TESTES DE CARACTERIZAÇÃO DOS DETETORES INTEGRADOS</u>	4
3.1 - Testes efetuados	4
3.1.1 - Uniformidade do sinal ao longo de cada fotodiodo	5
3.1.2 - Uniformidade do sinal entre os fotodiodos	5
3.1.3 - "Cross-talk"	6
3.1.4 - Linearidade	6
3.1.5 - Variação da corrente gerada com a temperatura	7
3.2 - Sistema de teste dos detetores	8
3.2.1 - Diagrama de blocos	8
3.2.2 - Sistema óptico	8
4. <u>RESULTADOS</u>	8
4.1 - Resultados das medidas de uniformidade do sinal ao longo de cada fotodiodo	11
4.2 - Resultados das medidas de uniformidade do sinal entre os fotodiodos	11
4.3 - Resultados das medidas de "cross-talk"	12
4.4 - Linearidade	12
4.5 - Variação da corrente gerada com a temperatura	13
5. <u>CONCLUSÕES</u>	13
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	14



LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>
1 - Cabeça óptica do sensor solar com representação dos eixos de referência	1
2 - Representação de uma unidade sensora	3
3 - Sistema de testes de detetores	9
4 - Montagem óptica para a formação de um ponto luminoso	10
5 - Curva de uniformidade ao longo do fotodiodo 1 do detetor 23A	11
6 - Variação da corrente gerada com a potência incidente no fotodiodo R5A-4	12
7 - Variação da corrente com a temperatura para o fotodiodo 96 B-5	13

1. INTRODUÇÃO

O sensor solar, atualmente em desenvolvimento no INPE, constitui um dos equipamentos do sistema de determinação de atitude dos Satélites Brasileiros de Coleta de Dados. Este sensor, operando num princípio digital (Abus, 1961; Kalweit, 1971; Selingardi e Yossimi, 1982), apresenta dois objetivos básicos:

- . Fornecer uma informação digital do ângulo que a direção do Sol faz com o eixo de rotação do satélite. Para isto, a eletrônica do sensor detecta o momento de seu cruzamento com o Sol, adquire a informação angular gerada pelo detetor e a armazena num registro de saída.
- . Medir a frequência de rotação do satélite.

O sensor consiste em uma cabeça óptica e em um módulo eletrônico de processamento conectados mecanicamente, constituindo um único conjunto compacto, e deverá medir o ângulo solar dentro de um campo de visada de 180° . A cabeça óptica do sensor é composta por duas unidades idênticas que cobrem 90° de visada cada uma, como ilustrado na Figura 1.

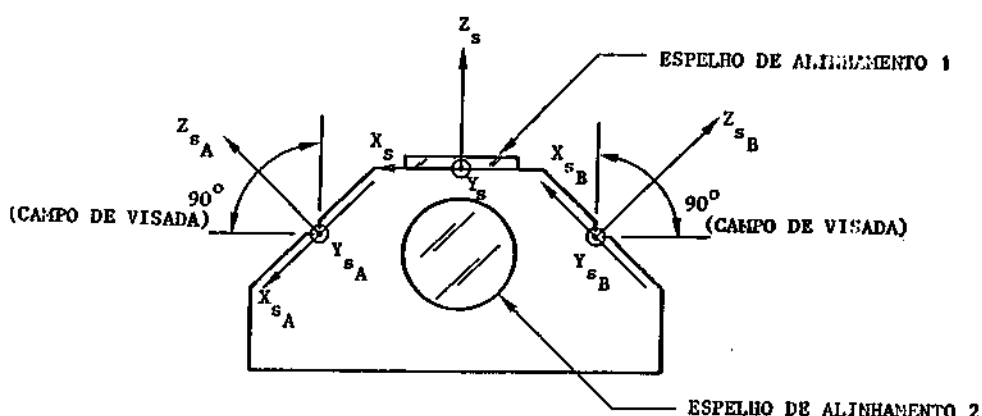


Fig. 1 - Cabeça óptica do sensor solar com representação dos eixos de referência.

O sensor solar apresenta as seguintes especificações:

Número de eixos	: 1
Número de sensores	: 2 (por questão de redundância)
Campo de visada	: 180°
Resolução	: 1°
Precisão	: $\pm 0,5^{\circ}$
Peso	: 1,2kg (cabeça óptica + eletrônica)
Potência consumida	: + 15V (20mA máx) - 15V (20mA máx) + 5V (80mA máx)
Faixa de temperatura de operação:	cabeça óptica: $-30^{\circ}\text{C} - +60^{\circ}\text{C}$ eletrônica : $-20^{\circ}\text{C} - +60^{\circ}\text{C}$
Sinais de saída	: 1 palavra digital de 8 bits 1 pulso de medida de rotação
Dimensões	: 128mm x 77mm x 207mm

2. PRINCÍPIOS DE FUNCIONAMENTO DO SENSOR

O sensor fornece um sinal de saída codificado, que é uma representação digital do ângulo entre os raios solares e a normal à face do sensor quando o Sol está no seu campo de visada, (Selingardi e Yossimi, 1982), como ilustrado na Figura 2.

Cada unidade sensora é composta por estágio óptico e estágio de detecção.

- 1) O estágio óptico consiste em um bloco de quartzo, em cuja face superior é gravada, sobre um filme de cromo, uma fenda fina por onde passam os raios solares.
- 2) O estágio de detecção é constituído por um conjunto de fotodiodos integrados numa mesma pastilha de silício.

Essa pastilha, como ilustrado na Figura 2, apresenta 9 fotodiodos independentes, dos quais 7 são de codificação e 2 de ajuste automático de limiar (AAL). Os 7 fotodiodos representam uma codificação

de Gray e fornecem leitura digital de 7 bits. Os 2 AALs são usados, em primeiro lugar, para determinar o momento de cruzamento do sensor com o Sol comparando os 2 sinais; em segundo lugar, para indicar um nível de referência com o qual as saídas dos fotodiodos de codificação são comparadas a fim de determinar em qual nível o bit deve ser mudado de zero para um.

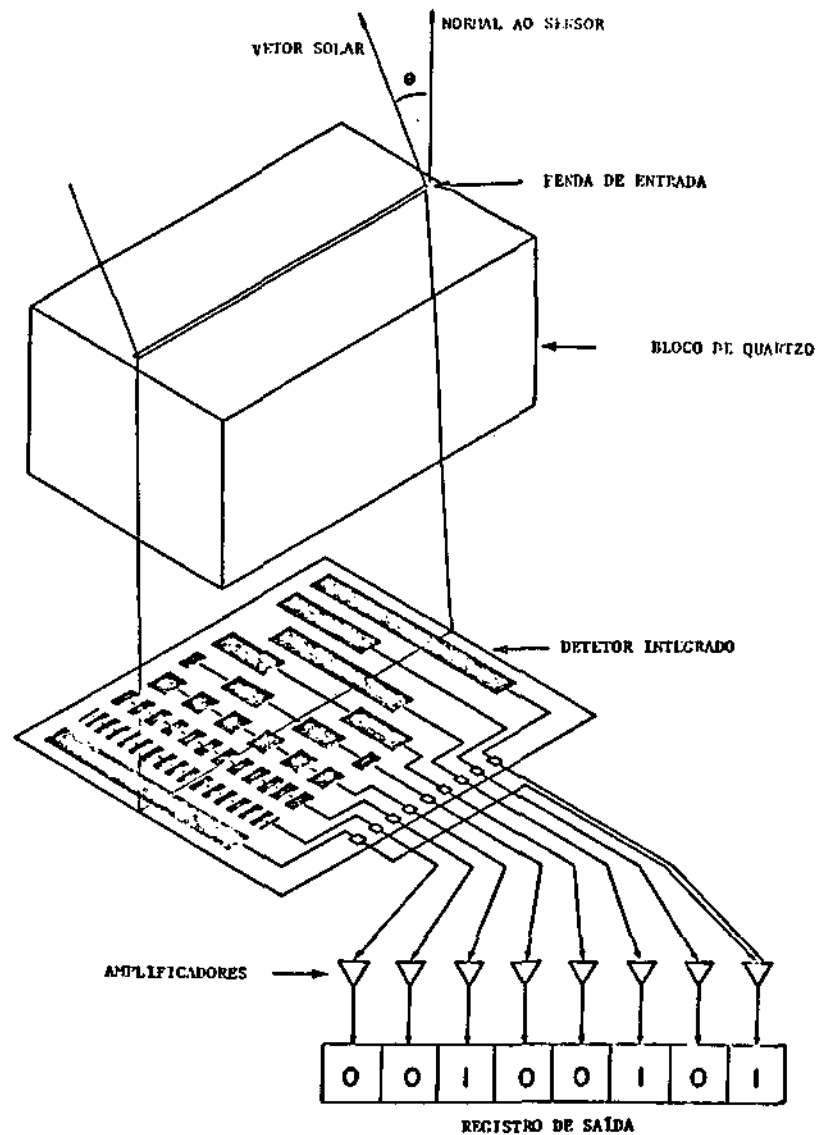


Fig. 2 - Representação de uma unidade sensora.

O código Gray é o mais utilizado uma vez que é um código equidistante, isto é, um e somente um bit muda para cada transição adjacente (Wertz, 1978).

Como o desenvolvimento do sensor solar está dividido em três modelos (identificação, qualificação e voo), foi realizado no LME/USP, numa primeira etapa, um certo número de detetores para o modelo de identificação.

Uma série de medidas de caracterização desses detetores, realizada no Departamento de Sistemas Eletroópticos (DEO) do INPE, é apresentada a seguir.

3. TESTES DE CARACTERIZAÇÃO DOS DETETORES INTEGRADOS

Para o modelo de identificação do satélite foi recebido um lote de 20 detetores. Com este lote foram feitos diversos testes, cujos objetivos eram escolher os quatro melhores para a fabricação do modelo de identificação, e identificar problemas e possíveis modificações para os modelos de qualificação e de voo.

Para os próximos modelos, será recebido um grande lote de detetores com os quais serão efetuados testes de qualificação para uso no espaço, mas para o modelo de identificação do satélite não se pretende ainda que os detetores sejam qualificados.

3.1 - TESTES EFETUADOS

Os testes utilizados para a avaliação dos detetores são os seguintes:

- 1) uniformidade do sinal ao longo de cada fotodiodo,
- 2) uniformidade do sinal entre os fotodiodos,
- 3) "cross-talk",
- 4) linearidade,

- 5) variação da corrente gerada com a temperatura,
- 6) resposta espectral,
- 7) responsividade.

Neste trabalho são analisados apenas os testes de 1 a 5. As medidas de resposta espectral e responsividade foram realizadas no LME/USP.

3.1.1 - UNIFORMIDADE DO SINAL AO LONGO DE CADA FOTODIODO

Um feixe de luz passa através de uma fenda e incide sobre um determinado bit que, dependendo do ângulo, é ou não ligado. Por este motivo, talvez a medida da uniformidade ao longo de cada fotodiodo seja o teste mais importante para o funcionamento do detetor no sensor solar, pois, se houver uma não-uniformidade em um determinado ponto de um bit, isto poderá se traduzir numa codificação errada do ângulo. Faz-se esta medida montando um sistema óptico com o qual se forma um minúsculo ponto luminoso sobre o fotodiodo a ser testado. Este ponto é deslocado ao longo de todo o fotodiodo, e a corrente é adquirida em cada posição.

O sistema de aquisição do sinal é controlado por um microcomputador, o qual efetua várias aquisições em cada ponto e calcula a sua média. Isto é feito para eliminar o ruído na aquisição. O resultado é fornecido sob a forma de uma curva da corrente do fotodiodo em função da posição do ponto de luz ao longo dele. Sobre a curva são anotados a corrente média para todos os pontos, o desvio padrão e o máximo e o mínimo desvios percentuais da corrente em relação à média.

3.1.2 - UNIFORMIDADE DO SINAL ENTRE OS FOTODIODOS

Na seção anterior, durante a medida da uniformidade ao longo de cada fotodiodo, também era calculada a média do sinal para cada um deles. É muito importante avaliar as diferenças de sinais entre os fotodiodos, pois se elas forem consideráveis também poderá ocorrer um erro de codificação.

3.1.3 - "CROSS-TALK"

Quando um único fotodiodo é iluminado, um sinal é gerado nos seus vizinhos. A este fenômeno denomina-se "cross-talk", que é medido iluminando um único fotodiodo com o mesmo ponto luminoso gerado para medir a uniformidade e adquirindo o sinal dos vizinhos com o sistema de testes.

Esta medida é bastante importante, já que os fotodiodos são fisicamente isolados, e o sinal deles deve ser independente.

3.1.4 - LINEARIDADE

O teste de linearidade dos fotodiodos tem uma importância relativa, uma vez que o sensor solar trabalhará com um único nível de potência incidente, ou seja, a luz do Sol. Porém, a linearidade do fotodiodo torna-se importante, quando se deseja testar o sensor solar com níveis de potência que não sejam aqueles do seu valor de trabalho. Se o dispositivo for linear, o seu comportamento pode ser extrapolado para outros valores de potência incidente.

Este teste é feito colocando no caminho da luz incidente, sobre o detetor, vários filtros de atenuação e medindo o sinal e a potência incidente. O computador traça, então, a curva da corrente versus potência incidente, e usa o método dos mínimos quadrados para traçar a melhor reta que se encaixe nos pontos adquiridos.

Se a melhor reta for:

$$I = mP_i + b,$$

onde:

I : corrente do fotodiodo,
P_i : potência incidente,
m, b: constantes,

calcula-se o coeficiente R para avaliar o grau de dispersão dos pontos ao longo da reta, o que se traduz na avaliação da linearidade:

$$R = m \frac{\sigma_p}{\sigma_I},$$

onde:

σ_p e σ_I são os desvios padrão dos pontos de potência incidente e de corrente.

Quanto mais próximo de 1 for o valor de R, mais linear será a resposta do fotodiodo.

3.1.5 - VARIAÇÃO DA CORRENTE GERADA COM A TEMPERATURA

Um dispositivo que venha a ser colocado no espaço certamente sofrerá variações de temperatura ora bem abaixo e ora acima da temperatura ambiente. Portanto, é importante conhecer o comportamento dos detetores nessas condições.

Neste teste, o dispositivo é colocado sobre uma plataforma que possui resfriamento termoeletrônico controlado. A plataforma fica dentro de uma câmara, com uma janela de vidro para a entrada de luz, e dentro da qual é feito vácuo. O vácuo impede a condensação de vapores durante o resfriamento.

O detetor é iluminado e, conforme a temperatura vai sendo reduzida, o valor da fotocorrente gerada é lido em função da temperatura.

Finalmente, o computador fornece a curva da corrente versus temperatura.

3.2 - SISTEMA DE TESTE DOS DETETORES

3.2.1 - DIAGRAMA DE BLOCOS

O sistema de teste para a aquisição do sinal dos detetores é controlado por um microcomputador. O sistema é bastante simples e pode ser observado na Figura 3.

A luz incidente gera uma corrente nos fotodiodos. As saídas destes são entradas para um multiplexador que, de acordo com o comando enviado pelo microcomputador, seleciona uma saída cujo sinal é adquirido.

O pré-amplificador converte a corrente em uma tensão, a qual é digitalizada pelo conversor A/D em palavras de 12 bits. O microcomputador lê a saída do conversor através de uma interface. Uma vez dentro do micro, os dados podem ser tratados, transformados em curvas traçadas no monitor de vídeo e na impressora, ou armazenados em arquivos na unidade de disco flexível.

3.2.2 - SISTEMA ÓPTICO

A maior parte dos testes é feita com a iluminação de um único fotodiodo, utilizando um minúsculo ponto luminoso. Este ponto é obtido através do esquema da Figura 4.

A luz de uma lâmpada de filamento de tungstênio é focalizada sobre um "pin-hole" por uma lente condensadora. Utiliza-se uma objetiva de microscópio para formar uma imagem do "pin-hole" sobre um fotodiodo. A objetiva possui um ganho 10 e é montada de modo a formar uma imagem reduzida.

4. RESULTADOS

Nesta seção, apresentam-se alguns resultados das medidas descritas anteriormente.

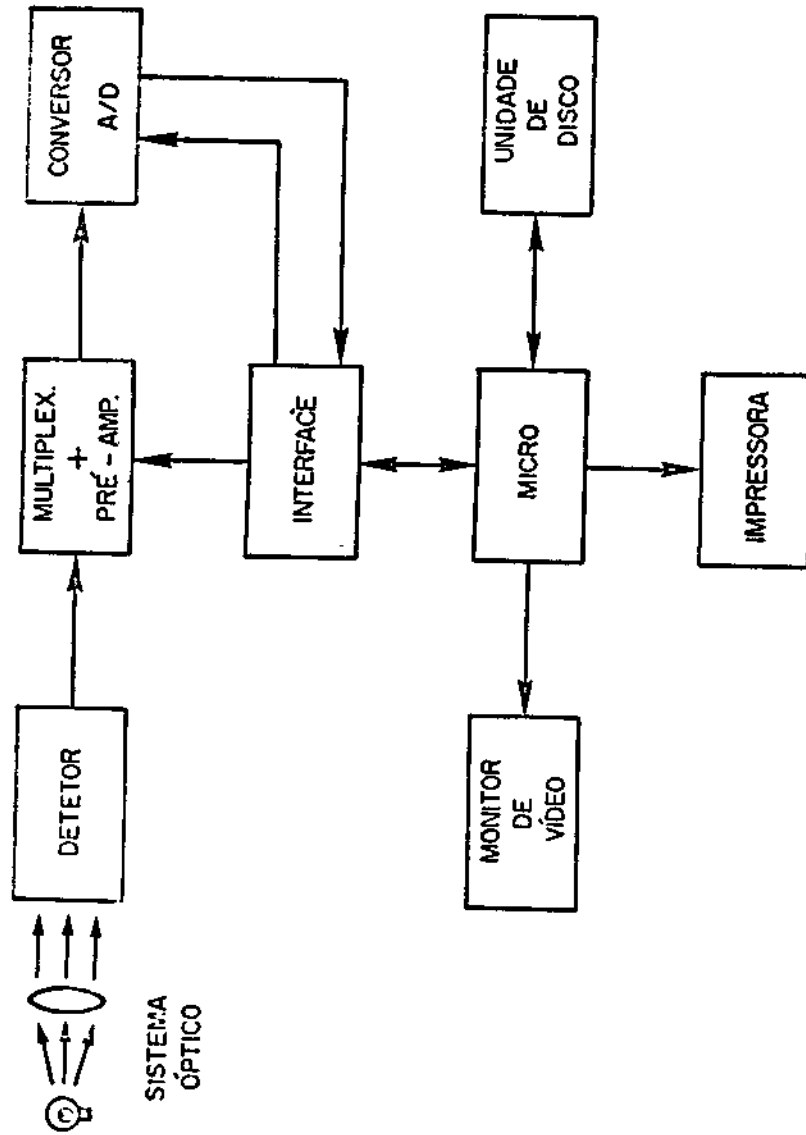


Fig. 3 - Sistema de testes de detetores.

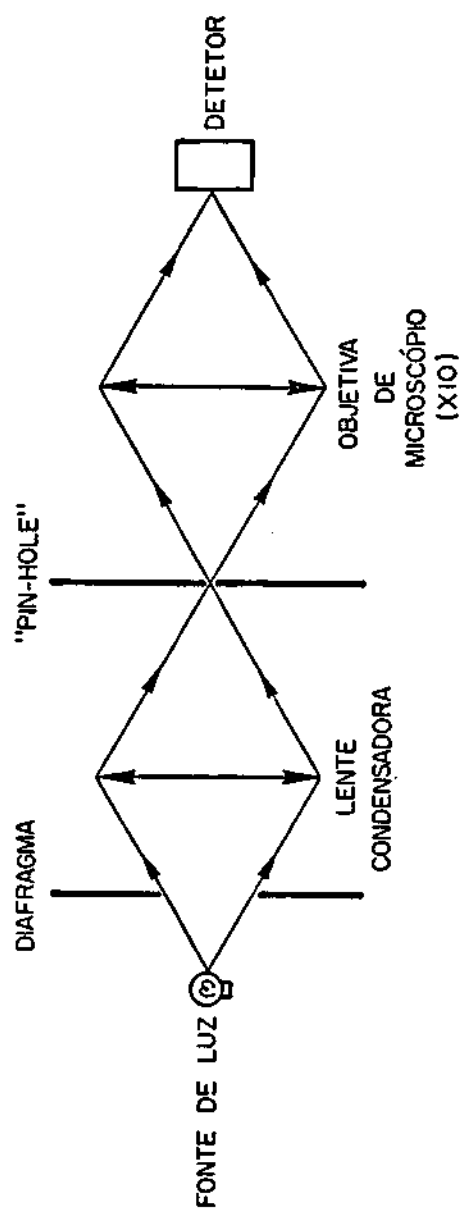


Fig. 4 - Montagem óptica para a formação de um ponto luminoso.

4.1 - RESULTADOS DAS MEDIDAS DE UNIFORMIDADE DO SINAL AO LONGO DE CADA FOTODIODO

O microcomputador libera os resultados desta medida sob a forma de curvas da corrente de saída versus a posição do ponto de luz ao longo do fotodiodo. Na Figura 5 é apresentada a curva da uniformidade ao longo do fotodiodo número 1 da pastilha 23A.

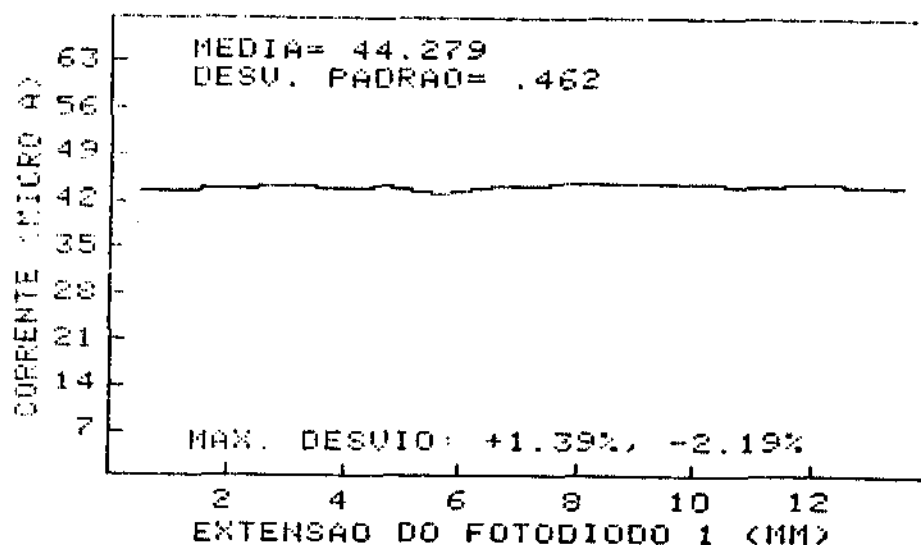


Fig. 5 - Curva de uniformidade ao longo do fotodiodo 1 do detector 23A.

Foram traçadas curvas para todos os fotodiodos de todas as pastilhas. Todos os dados obtidos foram compilados, e verificou-se que o valor típico da uniformidade de todas as pastilhas é $\pm 4,1\%$. No entanto, foram encontradas pastilhas onde todos os fotodiodos possuem uniformidade melhor do que $\pm 2\%$.

4.2 - RESULTADOS DAS MEDIDAS DE UNIFORMIDADE DO SINAL ENTRE OS FOTODIODOS

Comparando as médias dos sinais obtidos ao longo de cada fotodiodo, podem-se avaliar as não uniformidades entre os sinais dos

fotodiodos de uma mesma pastilha. Chegou-se à conclusão de que o valor típico para uma pastilha é de $\pm 3,2\%$. Observaram-se, no entanto, pastilhas com variação de sinal entre os fotodiodos da ordem de $\pm 1\%$.

4.3 - RESULTADOS DAS MEDIDAS DE "CROSS-TALK"

O valor típico obtido para o "cross-talk" entre os fotodiodos de uma pastilha foi de $2,9\%$. Para algumas pastilhas, foi obtido um "cross-talk" entre os fotodiodos melhor do que 2% .

4.4 - LINEARIDADE

A linearidade é um parâmetro que não varia muito de um detector para outro. Na Figura 6 pode ser observada a resposta obtida com a variação de potência incidente sobre o fotodiodo 4 da pastilha R5A. O valor de R está anotado no gráfico, indicando a linearidade. A potência variou da ordem 12:1, estando a região de trabalho e a de teste contidas na faixa avaliada.

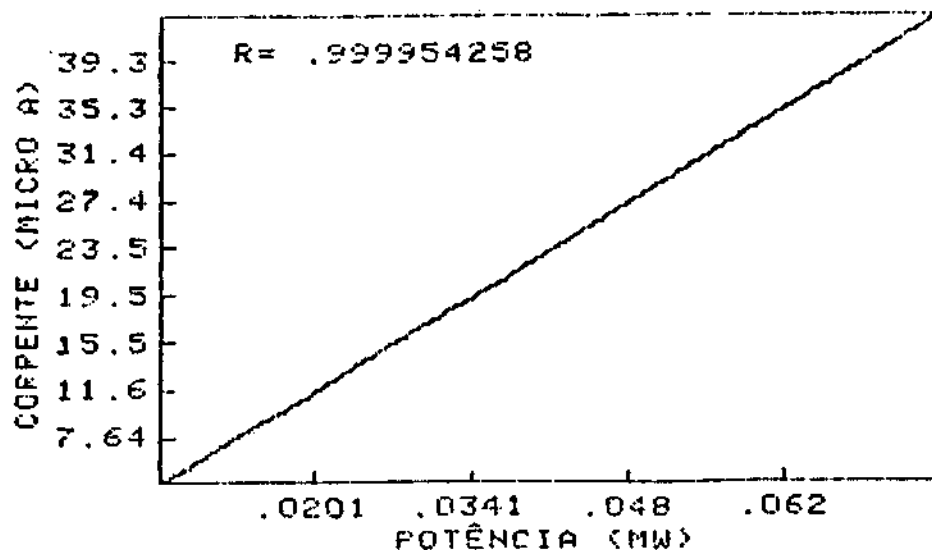


Fig. 6 - Variação da corrente gerada com a potência incidente no fotodiodo R5A-4.

Foram feitos vários testes em fotodiodos, e a linearidade obtida foi sempre da ordem de $99,99\%$.

4.5 - VARIAÇÃO DA CORRENTE GERADA COM A TEMPERATURA

Utilizando um sistema de resfriamento termoelétrico e uma câmara de vácuo, pôde-se variar a temperatura dos fotodiodos de 20°C a -50°C .

A Figura 7 mostra a variação da corrente com a temperatura para o fotodiodo 5 da pastilha 96B.

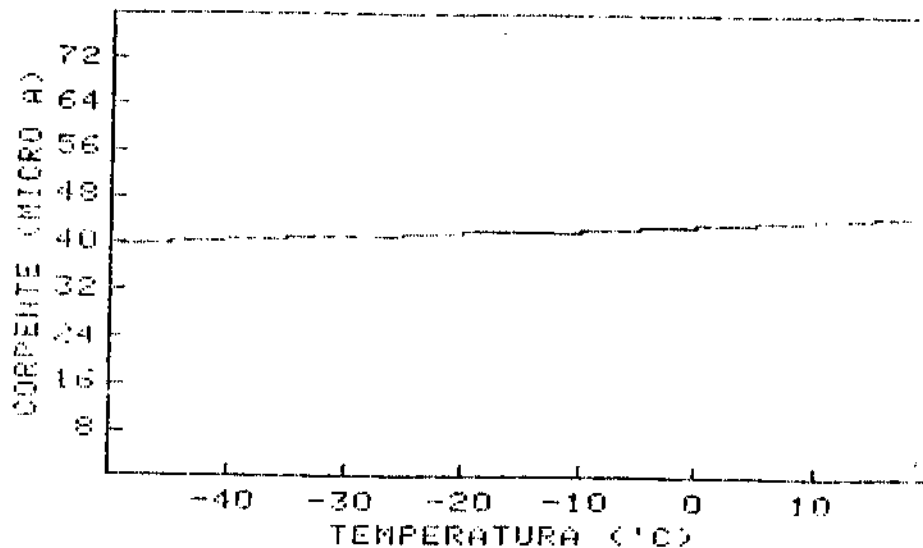


Fig. 7 - Variação da corrente com a temperatura para o fotodiodo 96B-5.

Observa-se que a corrente cai quando a temperatura cai.

Foram feitas algumas curvas e foi constatada uma variação da corrente gerada com a temperatura em torno de $0,15\%/^{\circ}\text{C}$.

5. CONCLUSÕES

Este primeiro lote de fotodiodos fabricado no LME/USP correspondeu plenamente às expectativas, o que permitiu a escolha de unidades para a fabricação do modelo de identificação do sensor solar.

Para a fabricação dos outros modelos, será necessário o recebimento de um lote de fotodiodos maior, sobre o qual serão efetuados diversos testes de qualificação para uso no espaço. Entre os testes de qualificação que serão feitos, os principais são: ciclos térmicos, aceleração, vibração, irradiação e "burn-in".

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALBUS, J.S. *A digital solar aspect sensor*. Washington, DC, NASA-Langley, 1961.

KALWEIT, C.C. The ERSO I altitude measurement system. *IEEE Transaction Aerospace Electronics Systems*, AES-7(1):132-141, 1971.

SELINGARDI, M.L.; YOSSIMI, M. *Projeto de um sensor digital para determinação de atitude*. São José dos Campos, INPE, ago. 1982. (INPE-2495-PRE/178).