



PALAVRAS CHAVES / KEY WORDS

AUTORES / AUTHORS

SENSOR SOLAR DIGITAL
DETERMINAÇÃO DE ATITUDE
ORÇAMENTO DE ERROS

AUTORIZADA POR / AUTHORIZED BY

Marcos Antonio Baupp
Dir. Diretor Geral

AUTOR RESPONSÁVEL
RESPONSIBLE AUTHOR

Marcos Antonio Bertolino

DISTRIBUIÇÃO / DISTRIBUTION

INTERNA / INTERNAL
 EXTERNA / EXTERNAL
 RESTRITA / RESTRICTED

REVISADA POR / REVISED BY

Mário Luiz Selingardi

CDU / UDC

687.586.5

DATA / DATE

abril 1988

TÍTULO / TITLE	<p>PUBLICAÇÃO Nº PUBLICACION NO</p> <p>INPE-4508-TDL/327</p> <p>DESENVOLVIMENTO DE UM SENSOR SOLAR DIGITAL PARA SATÉLITE ESTABILIZADO EM ROTAÇÃO</p>
	<p>AUTORES / AUTHORSHIP</p> <p>Marcos Antonio Bertolino</p>

ORIGEM
ORIGIN

PG/DCG

PROJETO
PROJECT

FRH/ECO

Nº DE PAG.
NO OF PAGES

138

ULTIMA PAG.
LAST PAGE

C.4

VERSÃO
VERSION

Nº DE MAPAS
NO OF MAPS

RESUMO - NOTAS / ABSTRACT - NOTES

Apresentam-se alguns aspectos gerais relativos ao desenvolvimento de um Sensor Solar para Satélite estabilizado por rotação. O Sensor é do tipo digital com 7 bits de codificação, resolução angular de 1° e o código de Gray impresso na própria cadeia de fotodiodos. A abordagem inclui as características do equipamento, partes constituintes, o modelamento composto pela função de transferência e os resultados de teste, que comprovam o funcionamento do Sensor de acordo com a análise efetuada. A ênfase dada é para o orçamento de erros, em que a precisão de medida de 40 minutos de arco é obtida, através da soma das componentes de erro. Os processos de fabricação são analisados, no sentido de verificar a compatibilidade com a precisão requerida. Este Sensor será utilizado nos satélites de Coleta de Dados da Missão Espacial Completa Brasileira.

OBSERVAÇÕES / REMARKS

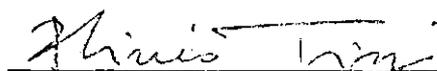
Dissertação de Mestrado em Eletrônica e Telecomunicações, aprovado em 04 de dezembro de 1987.

ABSTRACT

Some general features related to sun sensor development for spin stabilized satellite are presented. The sensor is of the digital type with a 7 bit Gray code, angular resolution of 1° , with the code printed on the photodiode array. Consideration is given to equipment characteristics and components, transfer function modeling and test results, which prove the sensor operation is in agreement with predicted specifications. Emphasis is given to the error budget, in which an accuracy of 40 arc minutes is obtained, through addition of error components. Fabrication processes are analysed, to ensure the feasibility of obtaining the required accuracy. This sensor will be used in the Data Collection Satellite of the Brazilian Complete Space Mission.

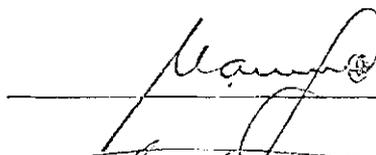
Aprovada pela Banca Examinadora
em cumprimento a requisito exigido
para a obtenção do Título de Mestre
em Eletrônica e Telecomunicações

Dr. Plínio Tissi



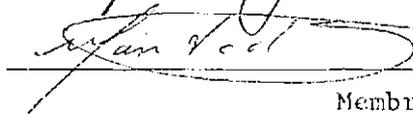
Presidente

Dr. Mário Luiz Selingardi



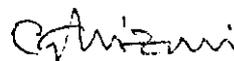
Orientador

Dr. Marcos Tadeu T. Pacheco



Membro da Banca
-convidado-

Dr. César Celeste Chizoni



Membro da Banca

Dr. Décio Castilho Deballos



Membro da Banca

Candidato: Marcos Antonio Bertolino

São José dos Campos, 04 de dezembro de 1987

Dedico este trabalho

ã minha esposa Eliane,
às minhas filhas Caroline e Natália
e aos meus pais Mário e Gilda.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Dr. Mário Luiz Selingardi pela orientação e incentivo, e aos colegas do INPE que possibilitaram a realização deste trabalho.

SUMÁRIO

	<u>Pág.</u>
<u>LISTA DE FIGURAS</u>	<i>xiii</i>
<u>LISTA DE TABELAS</u>	<i>xvii</i>
<u>LISTA DE SÍMBOLOS</u>	<i>xix</i>
<u>CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO</u>	1
1.1 - Apresentação	1
1.2 - Considerações gerais sobre Sensores Solares	1
1.3 - Utilização do Sensor Solar no controle de atitude	5
<u>CAPÍTULO 2 - DESCRIÇÃO DO PROTÓTIPO DE UM SENSOR SOLAR DIGITAL</u> ..	7
2.1 - Funções do equipamento	7
2.2 - Características do Sensor	8
2.3 - Partes constituintes e princípio de funcionamento	10
2.4 - Características do Detetor Integrado	16
<u>CAPÍTULO 3 - MODELAMENTO E ANÁLISE</u>	19
3.1 - Função de transferência	19
3.2 - Orçamento de erros	23
3.2.1 - Tipos de erros	23
3.2.2 - Quantização do código	26
3.2.3 - Tolerância de fabricação do código sobre os fotodiodos ..	27
3.2.4 - Ângulo equivalente de ruído ou NEA ("Noise Equivalent Angle")	28
3.2.5 - Não-uniformidade da resposta dos fotodiodos	35
3.2.6 - "Cross-Talk" entre fotodiodos	36
3.2.7 - "Offsets" dos amplificadores e comparadores	36
3.2.8 - Precisão de posicionamento do detetor em relação ao pris ma e fenda	38
3.2.8.1 - Erro na altura Δz	39
3.2.8.2 - Erro de posicionamento Δx , no eixo x	40
3.2.8.3 - Erro Δy de posicionamento no eixo y	40
3.2.8.4 - Erro $\Delta\theta_x$	41
3.2.8.5 - Erro $\Delta\theta_y$	42

	<u>Pág.</u>
3.2.8.6 - Erro $\Delta\theta_z$	43
3.2.9 - Precisão de alinhamento da unidade sensora em relação aos espelhos de referência	43
3.2.9.1 - Erro na medida causado pelo desvio $\Delta\theta_x$	44
3.2.9.2 - Erro causado por $\Delta\theta_y$	46
3.2.9.3 - Erro causado por $\Delta\theta_z$	46
3.2.10 - Incerteza na detecção do cruzamento	47
3.2.11 - Incerteza no conhecimento do índice de refração <u>equiva</u> lente	58
3.2.12 - Considerações finais	59
3.3 - Processos de fabricação	60
3.3.1 - Posicionamento do detetor em relação ao prisma com fenda.	60
3.3.2 - Alinhamento das unidades sensoras na cabeça óptica	64
3.3.3 - Alinhamento com o simulador solar	65
3.3.4 - Erro de leitura do posicionador angular automatizado	65
3.3.5 - Características do simulador solar	66
<u>CAPÍTULO 4 - CONSIDERAÇÕES RADIOMÉTRICAS</u>	67
4.1 - Características da radiação solar	67
4.2 - Cálculo da corrente fotogerada	69
4.3 - Imagem da fenda no detetor	72
4.4 - Influência do albedo terrestre	78
4.5 - Índice de refração equivalente.....	84
<u>CAPÍTULO 5 - ELETRÔNICA</u>	85
5.1 - Modelo equivalente dos fotodiodos e o amplificador	85
5.2 - Princípio de funcionamento	88
5.2.1 - Detecção de cruzamento	88
5.2.2 - Habilitação de leitura	92
5.2.3 - Processamento dos sinais dos bits	94
5.2.4 - Lógica de controle	95
5.2.5 - Medida da rotação do satélite	96
5.3 - Diagrama de blocos da eletrônica	99
<u>CAPÍTULO 6 - RESULTADOS</u>	101
6.1 - Medidas angulares	101

	<u>Pág.</u>
6.1.1 - Procedimento e meios de teste	101
6.1.2 - Resultados dos ensaios	104
6.2 - Medida da variação do sinal do fotodiodo com o ângulo de incidência θ ($dV/d\theta$)	106
6.3 - Formas de onda da eletrônica	116
6.4 - Relação sinal/ruído na saída do amplificador	120
6.5 - Conclusão	120
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	121
APÊNDICE A - PROGRAMA DAS CURVAS DOS FOTODIODOS ATAs	
APÊNDICE B - RESULTADOS DOS ENSAIOS DO SENSOR SOLAR	
APÊNDICE C - TABELA DE ÂNGULOS EM FUNÇÃO DOS CÓDIGOS DO SENSOR SOLAR	

LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>
1.1 - Sensor Solar Analógico	2
1.2 - Primeiro modelo do Sensor Solar Digital	3
1.3 - Solução da direção do eixo de rotação na intersecção dos cones nadir e solar	6
2.1 - Leitura do ângulo θ fornecido pelo Sensor Solar Digital	7
2.2 - Sensor Solar Digital	9
2.3 - Prisma com fenda	10
2.4 - Operação do Sensor Solar (código gerado 0100100)	11
2.5 - Variação da corrente em função do ângulo de incidência	12
2.6 - Configuração dos Retículos dos códigos Gray e Binário	14
2.7 - Conversão Gray para Binário	14
2.8 - Cabeça óptica	15
2.9 - Detetor integrado	17
2.10 - Resposta Espectral do fotodiodo	18
3.1 - Refração da luz Solar no Prisma	19
3.2 - Ângulos de transposição da cabeça óptica	22
3.3 - Erro resultante da tolerância de fabricação do código em função do ângulo de incidência θ	28
3.4 - Ligação do fotodiodo e amplificador	29
3.5 - Circuito equivalente de cálculo de ruído	29
3.6 - Variação do sinal do fotodiodo com θ , próximo à transição .	31
3.7 - Ampliação da região de transição para cálculo do NEA	32
3.8 - Variação do sinal próximo à transição x_0	33
3.9 - Região de transição para cálculo do erro de uniformidade	35
3.10 - Região angular do erro de "offset"	37
3.11 - Definição dos eixos na unidade sensora	38
3.12 - Inclinação do campo de visada causada pelo desvio Δy	41
3.13 - Geometria para cálculo do erro causado pelo desvio angular $\Delta\theta_x$	42
3.14 - Geometria para cálculo do erro de $\Delta\theta_z$	43
3.15 - Desvios angulares de alinhamento das unidades sensoras na cabeça óptica	44
3.16 - Geometria para cálculo do erro angular causado pelo desvio $\Delta\theta_x$ da unidade sensora	45

3.17 - Geometria para cálculo do erro angular causado pelo desvio $\Delta\theta_z$ da unidade sensora em relação aos eixos da cabeça óptica ca_z	47
3.18 - Definição dos ângulos e geometria para cálculo do erro causado pela incerteza na detecção do cruzamento.....	48
3.19 - Triângulo esférico para cálculo de γ_2	49
3.20 - Incidência dos raios solares no detector, com erro de α em relação ao plano ideal de leitura	50
3.21 - Curvas das correntes dos fotodiodos ATA e da diferença em função do ângulo de rotação do satélite	52
3.22 - Ajuste do ângulo $\Delta\theta_z$ do detector em relação à fenda	61
3.23 - Ajuste do detector em relação ao prisma na direção y	63
4.1 - Padrão de Irradiância Solar espectral	68
4.2 - Divisão da responsividade do fotodiodo e da Irradiância Solar espectral em faixas de comprimento de onda.....	70
4.3 - Variação da posição da imagem da fenda com o comprimento de onda, devido à dispersão no prisma	73
4.4 - Efeito da divergência dos raios solares na imagem da fenda..	75
4.5 - Gráfico do Alargamento na imagem da fenda Δx_c , ocasionado pela divergência dos raios solares.	76
4.6 - Distribuição da Intensidade de luz com λ de 700 nm, difratada em uma fenda de $100\mu\text{m}$, com distância ao anteparo de $12,2\text{mm}$	77
4.7 - Mapa do albedo em agosto de 1975 para $0.2-4.7\mu\text{m}$	79
4.8 - Órbita do Satélite	81
4.9 - Geometria para cálculo da potência incidente no fotodiodo, referente ao albedo.	82
5.1 - Modelo equivalente dos fotodiodos	85
5.2 - Característica I x V dos fotodiodos	86
5.3 - Circuito do amplificador dos fotodiodos.....	87
5.4 - Formas de onda dos ATAs obtidas com a rotação do satélite	89
5.5 - Amplificador dos ATAs e Detetor de Cruzamento	90
5.6 - Geração do pulso de disparo dos dados.....	92
5.7 - Circuito de habilitação de leitura	93
5.8 - Circuito de Processamento dos Sinais dos bits.....	94
5.9 - Lógica do controle	96
5.10- Amostragem do Sinal da Medida de Rotação	97

	<u>Pág.</u>
5.11 - Menor variação no período perceptível para uma média de n termos	98
5.12 - Diagrama de Blocos da Eletrônica	100
6.1 - Montagem de Testes do Sensor Solar	103
6.2 - Diferença entre os ângulos fornecidos pela função de transferência e os ângulos medidos do Sensor Solar.....	105
6.3 - Medida de $dV/d\theta$	107
6.4 - Curvas da Variação da corrente em função do ângulo de incidência para todos os fotodiodos.	109
6.5 - Formas de onda da Eletrônica	117

LISTA DE TABELAS

	<u>Pág.</u>
2.1 - Códigos Gray e Binário	13
3.1 - Orçamento das componentes de ruído do amplificador LM108A e Fotodiodo	30
3.2 - Erro angular causado pela incerteza na detecção do cruzamento	57
3.3 - Orçamento de erros	59
4.1 - Dependência da temperatura efetiva de emissão do Sol com o comprimento de onda	69
4.2 - Valores utilizados para resolução da integral da corrente fotogerada	71

LISTA DE SÍMBOLOS

- B - Faixa de frequência de passagem da eletrônica, Hz.
- C - Comprimento do detetor, m.
- C_c - Capacitância para compensação em frequência do amplificador do fotodiodo, F.
- C_f - Capacitância em paralelo do modelo do fotodiodo, F.
- C_r - Capacitância em paralelo com o resistor, da realimentação do amplificador do fotodiodo, F.
- d_a - Distância entre os ATAs do detetor, m.
- D - Diodo.
- e_{io} - Tensão de "offset" equivalente de entrada do amplificador, V.
- e_n - Tensão equivalente de ruído do amplificador LM108A, $V/\sqrt{\text{Hz}}$.
- e_o - Erro de tensão de "offset" na saída do amplificador, V.
- E_{ct} - Erro angular resultante do "cross-talk" entre fotodiodos, Min. de arco.
- E_f - Erro resultante da tolerância de fabricação do código sobre os fotodiodos, Min. de arco.
- E_{ic} - Erro angular resultante da incerteza na detecção do cruzamento, Min. de arco.
- E_n - Erro angular resultante da incerteza no conhecimento do índice de refração equivalente, Min. de arco.
- E_o - Irradiância solar na Terra, W/m^2 .
- E_{os} - Erro angular devido ao "offset" dos amplificadores e comparadores, Min. de arco.
- E_q - Erro de quantização do código, Min. de arco.
- E_{ss} - Precisão do Sensor Solar, Min. de arco.
- E_{T_d} - Erro no período T_d , $E_{T_d} = \frac{\Delta T_d}{T_d}$.
- E_u - Erro angular devido a não-uniformidade da resposta dos fotodiodos, Min. de arco.
- $E_{\Delta x}, E_{\Delta y}, E_{\Delta z}, E_{\Delta \theta_x}, E_{\Delta \theta_y}, E_{\Delta \theta_z}$ - Erros angulares resultantes dos desvios $\Delta x, \Delta y, \Delta z, \Delta \theta_x, \Delta \theta_y$ e $\Delta \theta_z$, respectivamente, Min. de arco.
- f_c - Frequência de corte, Hz.

h	- Altura do prisma de sílica, m.
$H(\lambda)$	- Irradiância solar espectral, $W \cdot m^{-2} \cdot nm^{-1}$.
i_{n1}, i_{n2}	- Correntes equivalentes de ruído do amplificador LM108A, A / \sqrt{Hz} .
I	- Corrente, A.
I_f	- Corrente fotogerada pelo fotodiodo, A.
$I_{m\bar{a}x}$	- Corrente máxima gerada pelo fotodiodo no sensor, A.
I_{sc}	- Corrente de curto circuito do fotodiodo, A.
K	- Constante de Boltzman, $1,38 \cdot 10^{-23} J/K$.
K_C	- Distância entre duas transições consecutivas do código Gray impresso no detector; tamanho do retículo do código, m.
ℓ	- Largura do detector, m.
ℓ_d	- Largura do fotodiodo, m.
ℓ_f	- Largura da imagem da fenda no detector, m.
L	- Radiância de um elemento de área, $W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1}$.
m	- Número de bits do código Gray do Sensor.
n	- Índice de refração do prisma de sílica.
n_a	- Índice de refração do ar.
\vec{n}	- Normal ao prisma.
\vec{n}_a, \vec{n}_b	- Normal à unidade sensora A/B.
n_{eq}	- Índice de refração equivalente.
N	- Número de fotodiodos de codificação do detector.
N_g	- Representação decimal do número associado ao código Gray fornecido pelo Sensor.
NEA	- Ângulo equivalente de ruído, Min. de arco.
NEA _{pp}	- Valor pico a pico do NEA.
R	- Resistência, Ω .
R_f	- Resistência em paralelo do modelo do fotodiodo, Ω .
R_p	- Resistência para compensação da corrente de polarização do amplificador do fotodiodo, Ω .
R_r	- Resistência da realimentação do amplificador do sinal do fotodiodo, Ω .
R_s	- Resistência série do modelo do fotodiodo, Ω .
$R(\lambda)$	- Responsividade espectral do fotodiodo, A/W.
S	- Área sensível do detector, m^2 .
T	- Temperatura absoluta, K.

- T_a - Período de amostragem, s.
 T_d - Igual a $32 \cdot T_i$, sinal enviado pelo Sensor para medida da rotação, s.
 T_i - Período de rotação do satélite, s.
 T_t - Período transmitido para Terra, s.
 T_v - Tempo de visada do satélite, s.
 $T(\lambda)$ - Transmitância espectral da óptica, %.
 V - Tensão, V.
 $V_{\text{máx}}$ - Tensão máxima de saída do amplificador para θ nas proximidades de θ_0 , V.
 V_n - Tensão de ruído na saída do amplificador, $V/\sqrt{\text{Hz}}$.
 V_o - Tensão de saída do amplificador LM108A, V.
 V_{oc} - Tensão de circuito aberto do fotodiodo, V.
 V_{ref} - Tensão de referência, V.
 x - Distância entre a incidência da luz no detetor e a reta normal passando pela fenda, m.
 x_0 - Valor de x no ponto de transição do código, m.
 x, y, z - Eixos da unidade sensora definidos na Fig. 3.11.
 x_a, y_a, z_a - Eixos da unidade sensora A/B.
 x_b, y_b, z_b - Eixos de referência do Sensor Solar.
 x_s, y_s, z_s - Variável intermediária.
 α - Ângulo entre o eixo de rotação do satélite e a direção do centro do Sol, Graus.
 β - Variáveis intermediárias.
 $\gamma_1, \gamma_2, \gamma_2', \gamma_{2m}'$ - Ângulo de desalinhamento entre a direção do Sol e a normal do detetor, Graus.
 δ - Valor de ruído de pico, V.
 ΔV_r - Acréscimo na largura da imagem da fenda devido a dispersão, m.
 Δx_d - Acréscimo na largura da imagem da fenda devido a divergência dos raios solares, m.
 Δx_c - Ângulo entre o eixo de rotação do satélite e a direção do centro da Terra, Graus.
 η

- θ - Ângulo entre a normal ao sensor e o vetor sensor-sol; ângulo me dido pelo sensor, Graus.
- θ_0 - Ângulo θ no ponto de transição do código de Gray, Graus.
- θ_s - Ângulo entre o raio refratado no prisma e a normal a este, Graus.
- θ_y^- - Ângulo entre a normal \vec{n}_a e o eixo z_s do sensor, Graus.
- θ_y^+ - Ângulo entre a normal \vec{n}_b e o eixo z_s do sensor, Graus.
- θ' - Ângulo dos raios solares refratados no prisma com a normal, Graus.
- θ^* - Leitura angular com erro, Graus.
- $\theta_x, \theta_y,$
 θ_z - Ângulos de rotação em torno dos eixos x, y e z , Graus
- λ - Comprimento de onda, μm .
- ρ - Albedo médio no equador, igual a pot.refletida/pot.incidente.
- σ - Variável auxiliar.
- τ - Constante de tempo de um filtro RC, seg.
- ϕ - Ângulo de rotação do satélite, Graus.
- ϕ_a - Potência luminosa do albedo, W.
- ϕ_m - Ângulo ϕ máximo em que a medida é feita, Graus.
- ϕ_s - Potência luminosa solar, W.
- ω - Variável auxiliar para cálculo da função de transferência (Fig. 3.1).
- ω_c - Frequência de um polo, Hz.

Índices

- i - I-ésima componente de um vetor.

Especiais

- $\frac{df}{dx}$ - Derivada da função f com relação a variável x .
- $\frac{\partial f}{\partial x}$ - Derivada parcial de f com relação a variável x .
- Δx - Variação infinitesimal na variável x .
- \oplus - Função Booleana *ou-exclusivo*.

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1 - APRESENTAÇÃO

Este trabalho descreve alguns aspectos gerais relativos ao desenvolvimento de um Sensor Solar para Satélite estabilizado por rotação. A ênfase dada é para o orçamento de erros do equipamento, em que a precisão de leitura de 40 minutos de arco é obtida, através da soma das componentes de erro. Esse orçamento é apresentado no Capítulo 3, juntamente com o modelamento do sensor, constituído pela função de transferência. Os processos de fabricação são analisados, no sentido de verificar a compatibilidade com a precisão do sensor solar.

No Capítulo 2 é apresentado o sensor, suas características de desempenho, partes constituintes e princípio de funcionamento; incluindo também as características do detetor integrado. As considerações radiométricas, que influenciaram no projeto óptico, são apresentadas no Capítulo 4. A discussão dos principais circuitos eletrônicos utilizados são vistos no Capítulo 5 e o Capítulo 6 apresenta os resultados de teste, que comprovam o funcionamento do equipamento.

1.2 - CONSIDERAÇÕES GERAIS SOBRE SENSORES SOLARES

O Sensor Solar é um dispositivo de medida, que normalmente pertence ao Sistema de Controle de Atitude de um Satélite. Sua função é efetuar medidas angulares entre o vetor satélite-sol e os eixos de referência do satélite; isto é, possui uma saída elétrica, que provê informação suficiente, que permita determinar um ângulo entre esses vetores (Fontana, 1965). Quando utilizado como entrada do Sistema de Controle, fornece a informação angular que possibilita orientar algum eixo específico do satélite, em relação ao disco solar.

Dos vários tipos de sensores existentes para determinação de atitude, os sensores solares são os mais utilizados, e têm voado em praticamente todos os satélites lançados até esta data.

A abertura angular do Sol é praticamente independente da órbita, e para muitas aplicações uma aproximação de fonte pontual é válida. Isto simplifica o projeto do Sensor Solar e os algoritmos de determinação de atitude. O Sol é suficientemente brilhante para permitir o uso de sensores confiáveis e simples, sem necessidade de discriminar fontes e com um mínimo de consumo de potência. A grande aplicação tem levado ao desenvolvimento de vários tipos de sensores, com campos de visada variando de alguns minutos de arco quadrados (10^{-7} sr), até 128° por 128° (aproximadamente π sr); e resolução de vários graus até menos de 1 segundo de arco (Wertz, 1978).

Existem dois tipos básicos de sensores solares: sensores analógicos, que apresentam um sinal de saída que é uma função contínua do ângulo de incidência dos raios solares; e sensores digitais, que fornecem uma saída discreta e codificada, que é função do ângulo solar.

O tipo mais comum de sensor solar analógico, com referência de aparecimento em 1965 (Hatcher, 1967), consiste de um par de células fotovoltaicas conectadas em uma configuração de ponte, de forma que os sinais sejam complementares: O arranjo físico dessas células no instrumento é tal que, como ilustra a Figura 1.1, com a inclinação dos raios solares em relação à normal ao sensor, uma célula recebe mais luz solar que a outra. A diferença dos sinais das células é então função dessa inclinação θ .

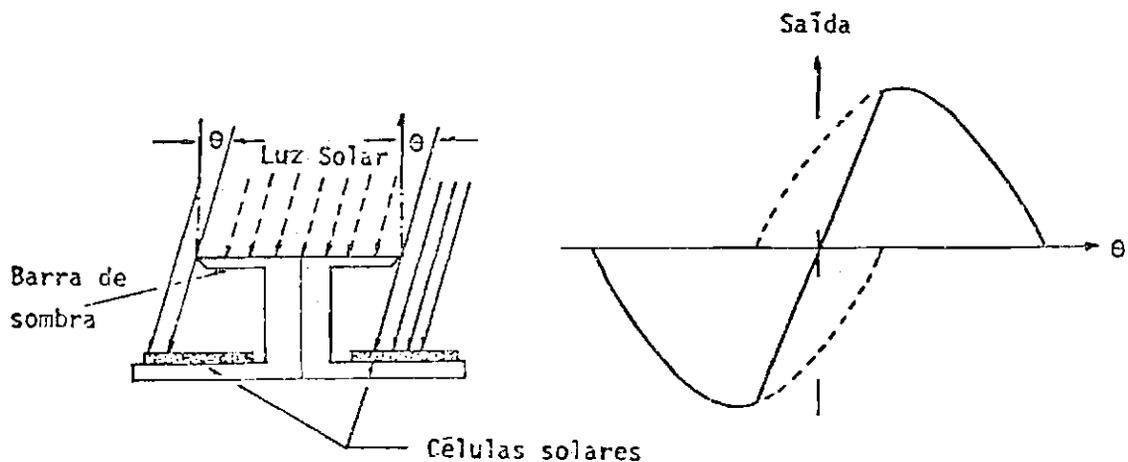


Fig. 1.1 - Sensor Solar Analógico.

FONTE: Lerner (1978), p.158.

Essa concepção de sensor analógico apresenta várias alternativas, que resultam em variações do campo de visada e precisão de leitura.

Um dos primeiros tipos de sensor solar digital, como apresentado por James S. Albus (1961), consistia de alguns fotodiodos colocados atrás de uma máscara com janelas para passagem da luz solar. Entre os fotodiodos eram colocados separadores opacos, de modo que cada fotodiodo vê apenas a janela de luz diretamente à sua frente. A máscara e os fotodiodos são alinhados, de modo que cada um dos fotodiodos tem um campo de visada em forma de leque e paralelo aos campos dos outros fotodiodos. A Figura 1.2 mostra o sensor digital com 3 bits de código.

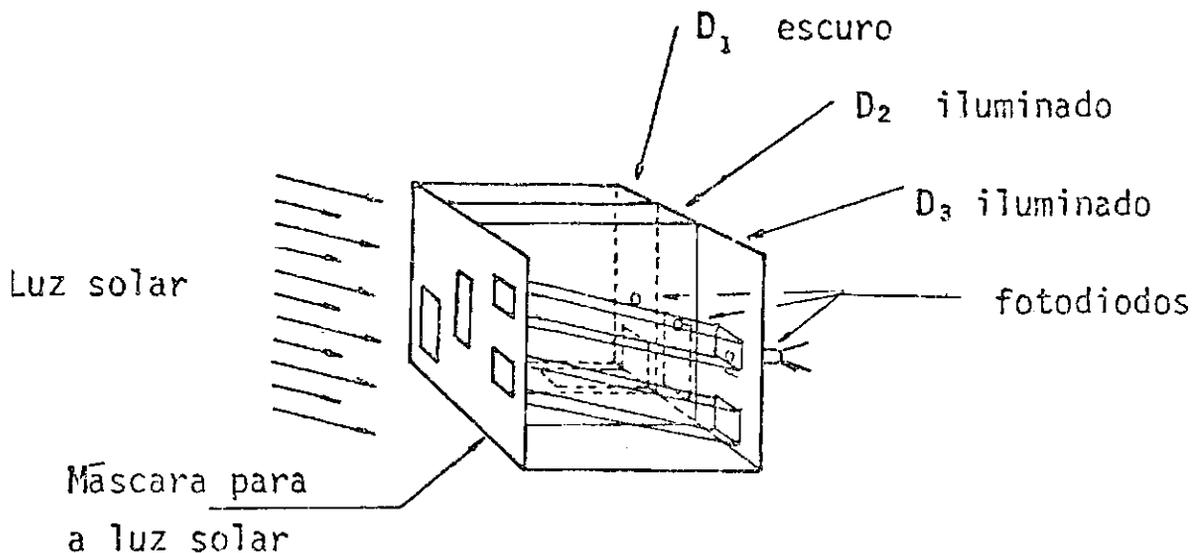


Fig. 1.2 - Primeiro modelo do Sensor Solar Digital.

FONTE: Albus e Schaefer (1963), p.2.

O código Gray é utilizado para configuração das janelas na máscara, devido as vantagens que apresenta e que serão vistas no Capítulo 2. A luz solar passa pelas janelas e incide nos fotodiodos. A combinação de detetores iluminados e não iluminados resulta em um código, que pode ser relacionado com o ângulo de inclinação dos raios solares em relação à normal do sensor.

Esse tipo de sensor digital passou por várias alterações ao longo dos anos. Mais tarde apresentaria duas máscaras: a primeira, de entrada da luz, com uma fenda estreita e a outra com o código Gray. Houve aumento do número de bits na máscara do código de 3 para 8 e a inclusão de bits de interpolação. Para a detecção da luz solar, utilizou-se células solares de forma retangular, isoladas entre si, sob cada bit do código. Em 1976, é apresentado o sensor com código de Gray impresso na própria pastilha dos fotodiodos, eliminando a necessidade da segunda máscara (Ninomiya et alii, 1976). Essa concepção de sensor solar é encontrada à venda em diversos fabricantes no mundo na atualidade. Seu princípio digital é marcado por alta confiabilidade e ausência de deriva.

O sensor solar digital apresentado nesse trabalho procurou atender aos requisitos do Satélite de Coleta de Dados da Missão Espacial Completa Brasileira. Apresenta 7 Bits de código Gray, impresso no próprio detetor integrado e 1° de resolução angular.

A implementação do código Gray no próprio detetor, que contém os fotodiodos, é o maior desafio tecnológico do sensor digital; pois envolve toda a tecnologia e infraestrutura de fabricação necessárias para desenvolver circuitos integrados. O detetor utilizado foi desenvolvido e fabricado pelo Laboratório de Microeletrônica da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. A obtenção da máscara da fenda por evaporação de filme fino e fotolitografia e os alinhamentos necessários entre as partes internas do sensor, também representam etapas tecnológicas importantes na sua fabricação.

O sensor solar faz parte de um satélite, que é submetido a condições ambientais rigorosas: larga faixa de operação de temperatura, vácuo e níveis de vibração elevados durante o lançamento. A escolha dos materiais utilizados para fabricação do sensor e a montagem das partes devem estar compatíveis com essas condições ambientais. Essa qualificação para voo é uma etapa importante na realização desse dispositivo, particularmente na cabeça óptica que envolve o detetor e a máscara da fenda.

Geralmente, os problemas tecnológicos presentes na realização do sensor solar e o seu custo final estão relacionados com os requisitos de desempenho. Quanto mais apurados esses requisitos; tais como: precisão de leitura ou resolução angular, estabilidade temporal, etc.; mais o custo e a realização irão estar dificultados.

1.3 - UTILIZAÇÃO DO SENSOR SOLAR NO CONTROLE DE ATITUDE

Os sensores solares são utilizados para a determinação da atitude de uma espaçonave. A atitude é a orientação da espaçonave no espaço, relativa a uma referencial inercial ou a algum objeto específico, tal como a Terra (Wertz, 1978). A orientação é obtida por um sensor de atitude, que mede os ângulos entre um vetor de referência e os eixos fixos na estrutura da espaçonave. Os vetores de referência são vetores unitários em direções conhecidas, relativos a espaçonave; tais como: a direção do Sol, a direção de uma estrela conhecida e a direção do centro da Terra.

Supondo um satélite estabilizado por rotação, com um sensor solar fornecendo o ângulo β , e com um sensor de horizonte fornecendo o ângulo η . O ângulo β é o existente entre o eixo de rotação e a direção do Sol, e η é o ângulo entre o eixo de rotação e a direção do centro da Terra. A solução da direção do eixo de rotação deve estar nas intersecções dos cone solar e cone nadir. O cone solar é obtido da revolução do eixo de rotação em torno da direção do Sol. O cone nadir é o resultante da revolução do eixo de rotação em torno da direção do centro da Terra. A Figura 1.3 ilustra como é obtida a direção do eixo de rotação.

A ambiguidade das duas intersecções dos cones pode ser resolvida através de uma terceira medida, ou através de uma estimativa prévia de provável atitude do satélite.

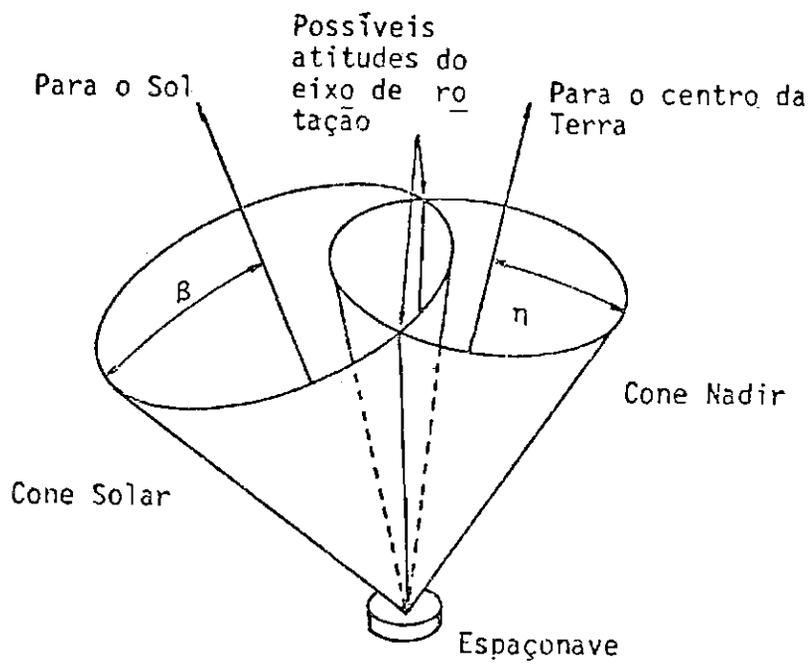


Fig. 1.3 - Solução da direção do eixo de rotação na intersecção dos cones nadir e solar.

FONTE: Wertz (1978), p.12.

CAPÍTULO 2

DESCRIÇÃO DO PROTÓTIPO DE UM SENSOR SOLAR DIGITAL

2.1 - FUNÇÕES DO EQUIPAMENTO

Os Satêlites de Coleta de Dados da Missão Espacial Completa Brasileira são estabilizados em rotação e apresentam no subsistema de Controle de Atitude dois sensores solares, para monitoração da posição do eixo de rotação do satélite em relação ao Sol.

A função do Sensor Solar Digital, a ser utilizado nessa primeira missão, é fornecer uma leitura correspondente ao ângulo existente entre o eixo de rotação do satélite e o vetor satélite-sol.

Por motivo de redundância, serão utilizados dois sensores, localizados em painéis laterais opostos no satélite. A Figura 2.1 ilustra a posição de fixação dos sensores, a leitura angular requerida e o campo de visada em forma de leque.

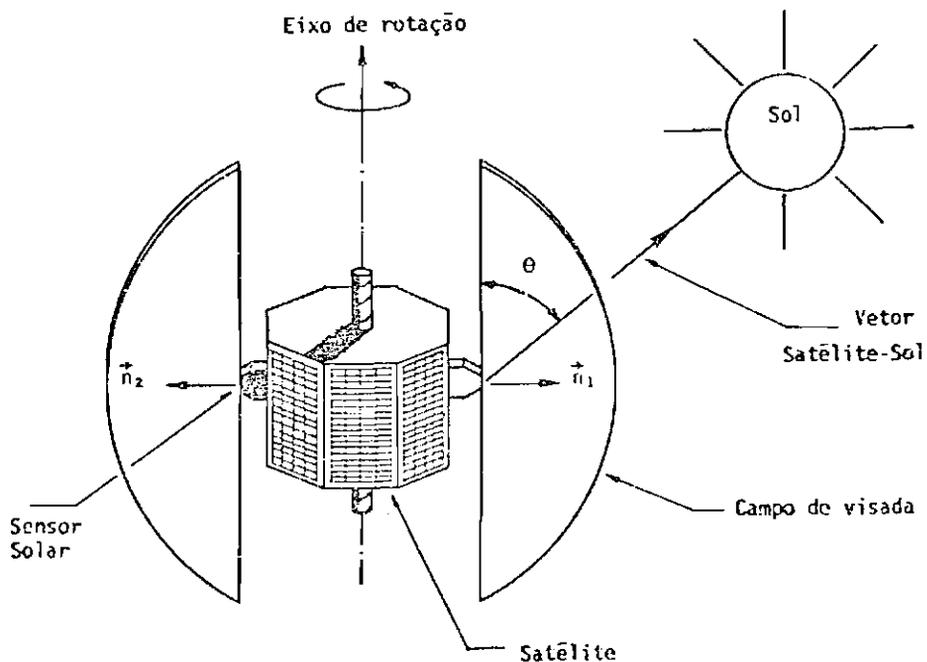


Fig. 2.1 - Leitura do ângulo θ fornecido pelo Sensor Solar Digital.

Uma outra função é apresentar um sinal de saída, que permita medir o período de rotação do satélite.

2.2 - CARACTERÍSTICAS DO SENSOR

Na Seção 1.2 foi apresentado os tipos de sensores solares e a evolução do tipo digital. O protótipo construído possui essa concepção, e assim será designado de Sensor Solar Digital. É composto por uma cabeça óptica e uma caixa de eletrônica, e apresenta as seguintes características:

- massa: 1,2 kg
- dimensões da cabeça óptica: 52 x 75 x 60 mm
- dimensões da caixa de eletrônica: 97 x 60 x 148 mm
- tensões de alimentação: + 15V a 10 mA
 - 15V a 6 mA
 - + 5V a 15 mA
- consumo total de potência: 315 mW
- rotação do satélite permitida: 20 a 200 rpm
- saídas digitais (0 - 5V): 7 Bits de informação angular
 - 1 Bit de identificação
 - 1 Bit de medida de rotação
- resolução angular: 1°
- precisão de leitura: ± 40 min de arco
- campo de visada: 176° em forma de leque
- estabilidade térmica: melhor que 30 min de arco em toda a faixa de operação (- 30. °C a + 60°C).

A Figura 2.2 apresenta uma foto do Sensor.

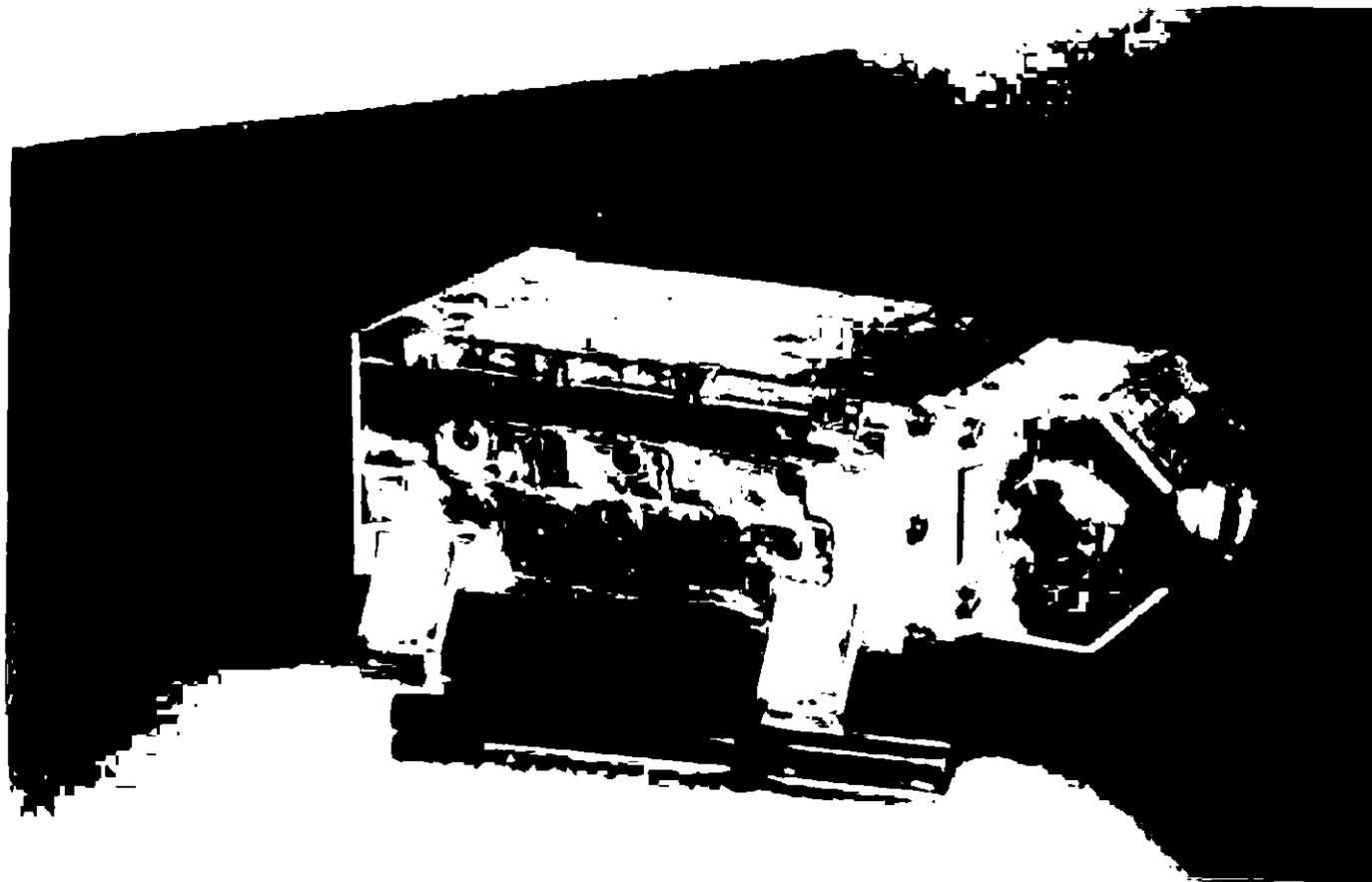


Fig. 2.2 - Sensor Solar Digit

2.3 - PARTES CONSTITUINTES E PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO

Como já visto, o sensor apresenta uma cabeça óptica e uma caixa de eletrônica. A cabeça óptica contém a parte fundamental de medição angular, que é denominada unidade sensora. Essa unidade consiste basicamente de um fenda, e uma cadeia de fotodiodos em código Gray.

A fenda possui $100 \mu\text{m} \times 16 \text{ mm}$ e é formada por fotolitografia e ataque químico em um filme fino de cromo, evaporado em um prisma de sílica fundida. A Figura 2.3 apresenta uma foto do prisma com a fenda.

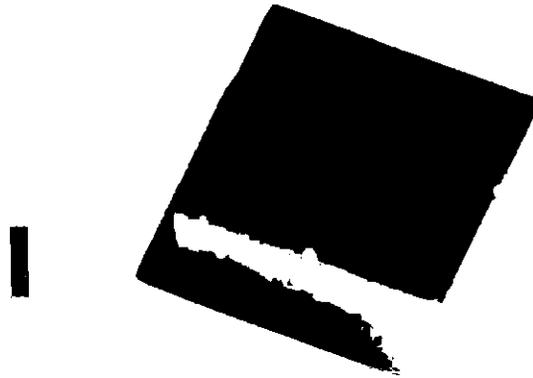


Fig. 2.3 - Prisma com fenda.

O código Gray está impresso em uma cadeia de 9 fotodiodos de silício (veja Seção 2.4), que é usada como transdutor fotoelétrico. Esse conjunto, Prisma com fenda e fotodiodos, montado em uma estrutura de alumínio constitui a unidade sensora, cujo princípio de funcionamento digital é marcado por alta confiabilidade e ausência completa de deriva.

A luz solar, com um ângulo incidente θ , passa através da fenda, é refratada no prisma com um índice de refração $n = 1,4553$ e incide nos fotodiodos numa posição AA', como mostrado na Figura 2.4.

Para esse ângulo incidente θ , há uma combinação de fotodiodos iluminados e não iluminados que resulta, depois do processamento eletrônico, no código 0100100.

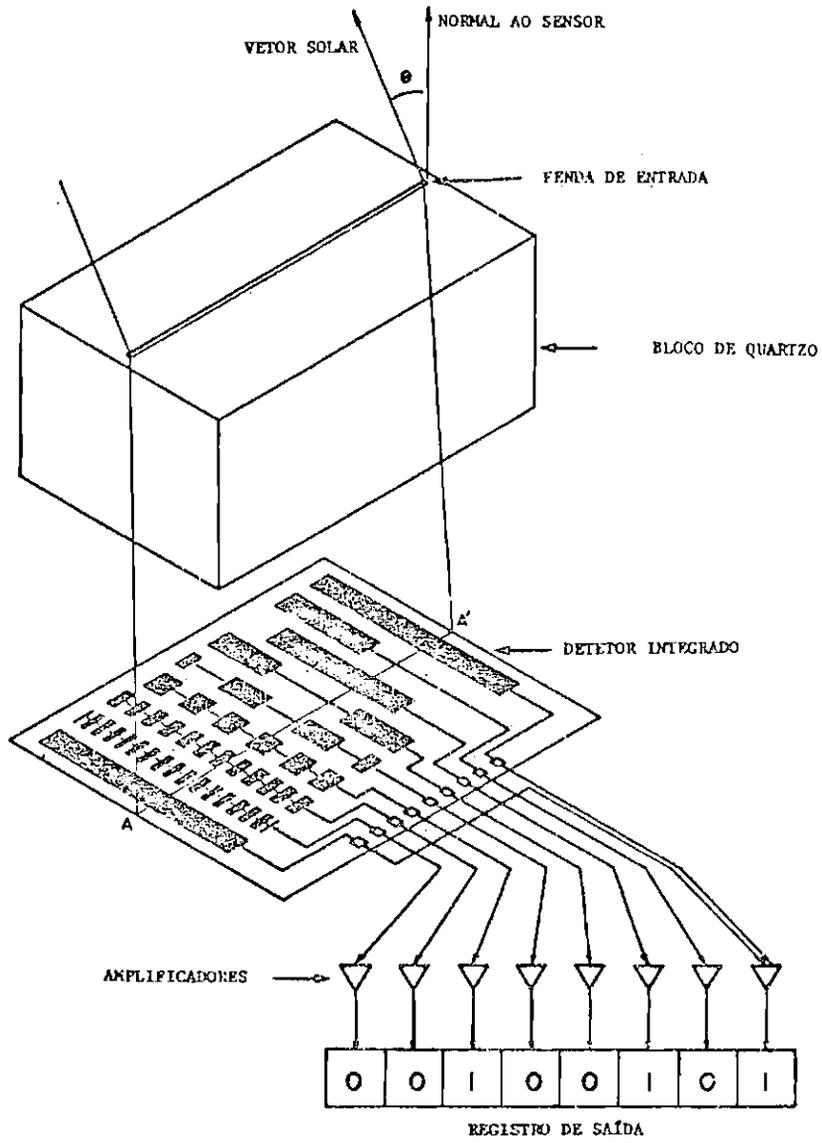


Fig. 2.4 - Operação do Sensor Solar (código gerado 0100100).

As regiões em preto dos fotodiodos respondem com uma corrente aproximada de $53\mu\text{A}$ à luz solar, enquanto as outras partes não fornecem sinal (esse valor de corrente será calculado na Seção 4.2). Então, para várias inclinações angulares obtêm-se combinações diferentes dos Bits e através da função de transferência (Seção 3.1) é possível relacionar essa palavra digital com o ângulo de incidência θ .

O sinal de corrente fotografada resultante da varredura do ângulo solar para os dois Bits menos significativos é mostrado na Figura 2.5. Note que a envoltória das formas de onda dos Bits é proporcional a $\cos\theta$ e a saída do ATA (Automatic Threshold Adjust) segue essa envoltória.

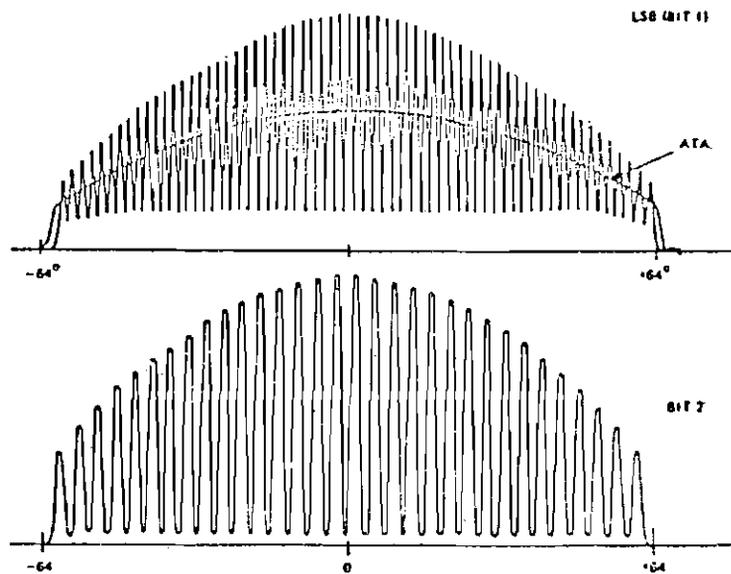


Fig. 2.5 - Variação da corrente em função do ângulo de incidência.

FONTE: Lerner (1978), p.165.

Os sinais dos fotodiodos ATA são usados, primeiro, para detectar quando o sensor está cruzando o Sol e segundo como nível de referência para converter os sinais analógicos dos Bits em uma forma digital. Um determinado Bit é considerado alto ($= 1$), se a saída do fotodiodo é maior que metade do ATA e baixo ($= 0$), caso contrário.

A precisão da medida da elevação do ângulo do Sol depende, como veremos na Seção 3.2, do número de linhas de fotodiodos e de outros fatores. Para N linhas de diodos, o campo de visada é quantizado em 2^{N-1} segmentos.

O código de Gray é utilizado na elaboração da configuração dos fotodiodos. A Tabela 2.1 permite comparar os códigos Gray e Binário e a Figura 2.6 apresenta o formato dos retículos para os dois códigos.

TABELA 2.1

CÓDIGOS GRAY E BINÁRIO

DECIMAL	BINÁRIO	GRAY	DECIMAL	BINÁRIO	GRAY
0	0	0	11	1011	1110
1	1	1	12	1100	1010
2	10	11	13	1101	1011
3	11	10	14	1110	1001
4	100	110	15	1111	1000
5	101	111	16	10000	11000
6	110	101	17	10001	11001
7	111	100	18	10010	11011
8	1000	1100	19	10011	11010
9	1001	1101	20	10100	11110
10	1010	1111	21	10101	11111

Uma vantagem importante do código Gray é que existe apenas uma mudança de bit para cada transição de códigos consecutivos. Isto pode ser visto na Tabela 2.1, comparando-se os códigos Gray e Binário para o equivalente decimal próximo a 16. Quando o ângulo solar caminha para a transição, o código binário muda de 001111 para 010000 e o código Gray de 101000 para 111000. Então, 5 bits do código binário mudam, mas apenas 1 bit Gray muda. "Por inspeção, o código Gray é um código equidistante" (Lerner, 1978, p. 164). Com isto, tem-se menores problemas de transmissão dos dados, pois uma leitura na transição do código Gray teria sempre 1 bit alternando e para o código binário podem existir vários.

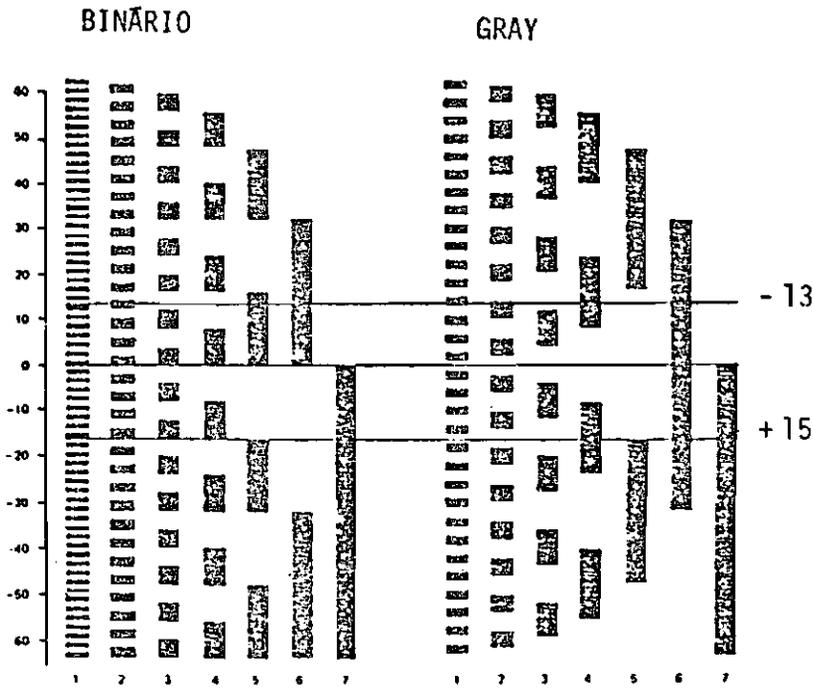


Fig. 2.6 - Configuração dos Retículos dos códigos Gray e Binário.
 FONTE: Lerner (1978), p.164.

Considerando-se um código Gray de n bits, composto por $G_{n-1} G_{n-2} \dots G_0$ e também o Binário por $B_{n-1} B_{n-2} \dots B_0$, a conversão do Gray para Binário é obtida igualando-se $B_{n-1} = G_{n-1}$ e efetuando $B_{n-2} = G_{n-2} \oplus B_{n-1}$ e assim sucessivamente realizando-se a função $B_i = G_i \oplus B_{i-1}$, onde o símbolo \oplus representa a operação lógica *ou-exclusivo*. A Figura 2.7 apresenta um esquema dessa conversão e a tabela verdade da função Booleana *ou-exclusivo*.

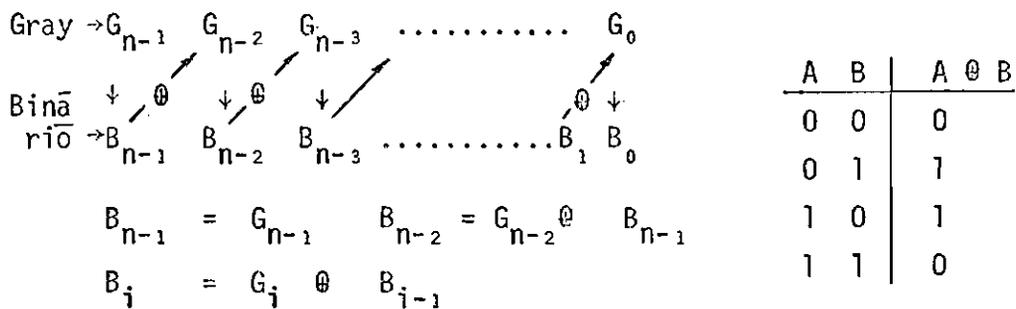


Fig. 2.7 - Conversão Gray para Binário.

Para um código Gray de 7 Bits, como o dos fotodiodos do sensor, existem $2^7 = 128$ possibilidades, o que resulta depois da conversão para Binário em números decimais $N_g = B_{n-1} \cdot 2^{n-1} + B_{n-2} \cdot 2^{n-2} + \dots + B_0 \cdot 2^0$ variando de 0 a 127. Isto possibilitaria a unidade sensora apresentar visada de $\pm 64^\circ$ com resolução de 1° . Porém, como na cabeça óptica existe a necessidade de cobertura de praticamente 180° , a opção foi colocar duas unidades sensoras dispostas a 90° e com visada de $\pm 46^\circ$ cada. Dessa forma os códigos de uma unidade sensora apresentam a variação de 18 a 109, portanto, 92 possibilidades.

A Figura 2.8 apresenta a cabeça óptica com as duas unidades sensoras instaladas. Estão representados também os dois espelhos

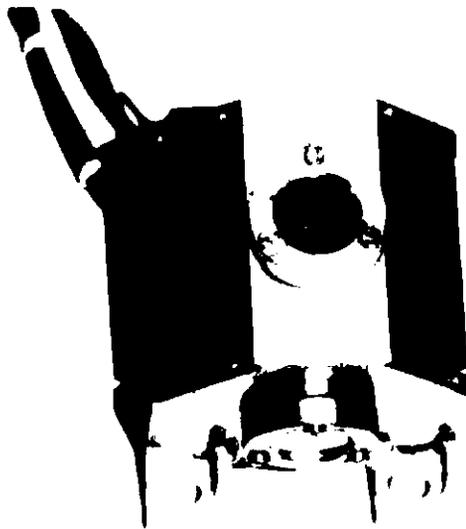


Fig. 2.8 - Cabeça óptica.

O instante em que o campo de visada em forma de leque passa pelo Sol é detetado pela igualdade dos sinais dos dois fotodiodos ATAs. A geometria dos fotodiodos e da cabeça óptica definem as formas de ondas de corrente com o tempo que são obtidas quando o satélite está estabilizado em rotação. Essas curvas serão discutidas na Seção 3.2.

A Eletrônica do Sensor Solar deteta esse instante de leitura pela igualdade dos ATA's e nesse momento, retém os dados num registro

para leitura pelo codificador de telemetria. O funcionamento da eletrônica será descrito no Capítulo 5.

2.4 - CARACTERÍSTICAS DO DETETOR INTEGRADO

Os fotodiodos utilizados no Sensor Solar apresentam a configuração de código de Gray. Esse código é obtido através de um filme metálico depositado numa cadeia de fotodiodos de silício, que são fabricados em uma única pastilha, usando tecnologia de circuito integrado.

Na pastilha estão dispostos 7 Bits de código Gray e mais dois detetores de referência em cada extremidade, chamados ATA ("Automatic Threshold Adjust") ou ajuste automático de limiar. A Figura 2.9 apresenta a configuração e uma foto dos detetores encapsulados em alumina.

As características do detetor são:

- material: silício n/p
- dimensões da pastilha: 17,70 mm x 16.40 mm
- responsividade $> 0,3A/W$
- uniformidade $< \pm 5\%$
- linearidade $> 99,9\%$
- dependência da corrente de curto circuito com a temperatura:
 $0,15\%/^{\circ}C$
- tempo de resposta $< 3 \mu\text{seg}$
- "Cross-talk" $< 3,5\%$
- responsividade espectral $> 0,5A/W\mu\text{m}$ a 850 nm

O detetor é colado em alumina com cola epoxi condutiva e os sinais são retirados com soldas de fio de ouro.

A curva da Figura 2.10 apresenta a resposta espectral do detetor.

O passo do código, isto é, a distância entre duas transições consecutivas na máscara é de 0,15 mm, constante referida nas fórmulas como K_C .

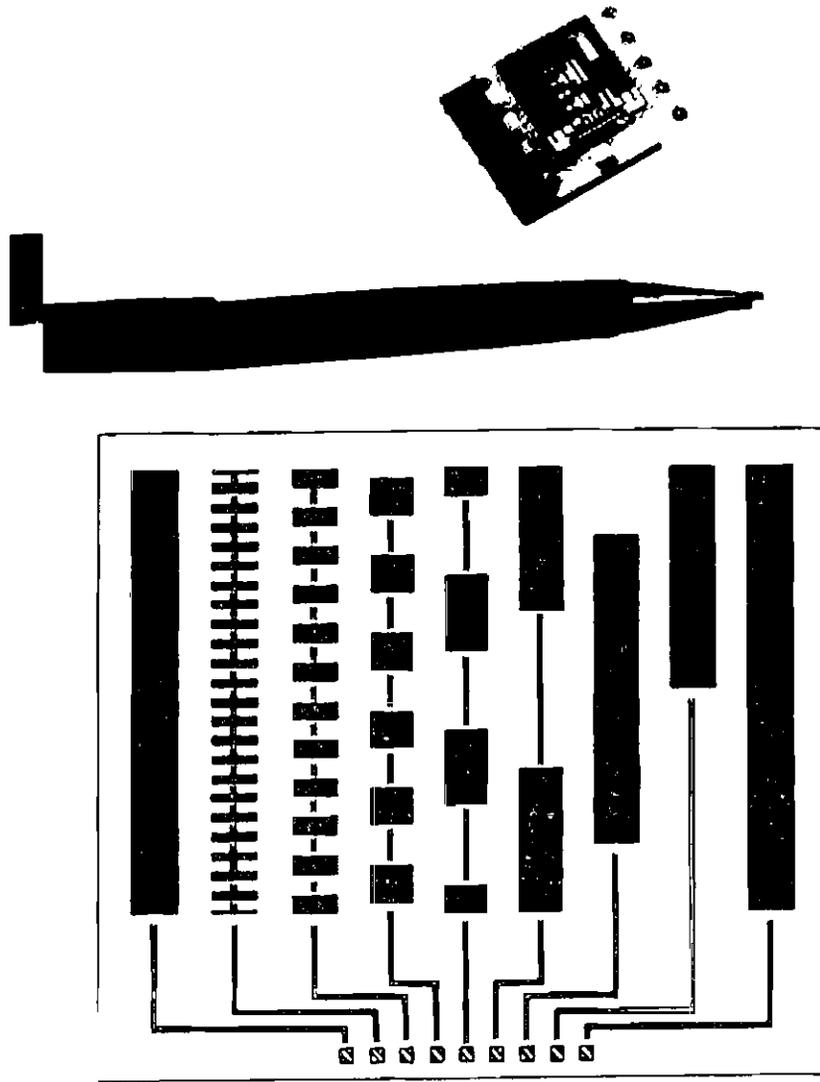


Fig. 2.9 - Detetor integrado.

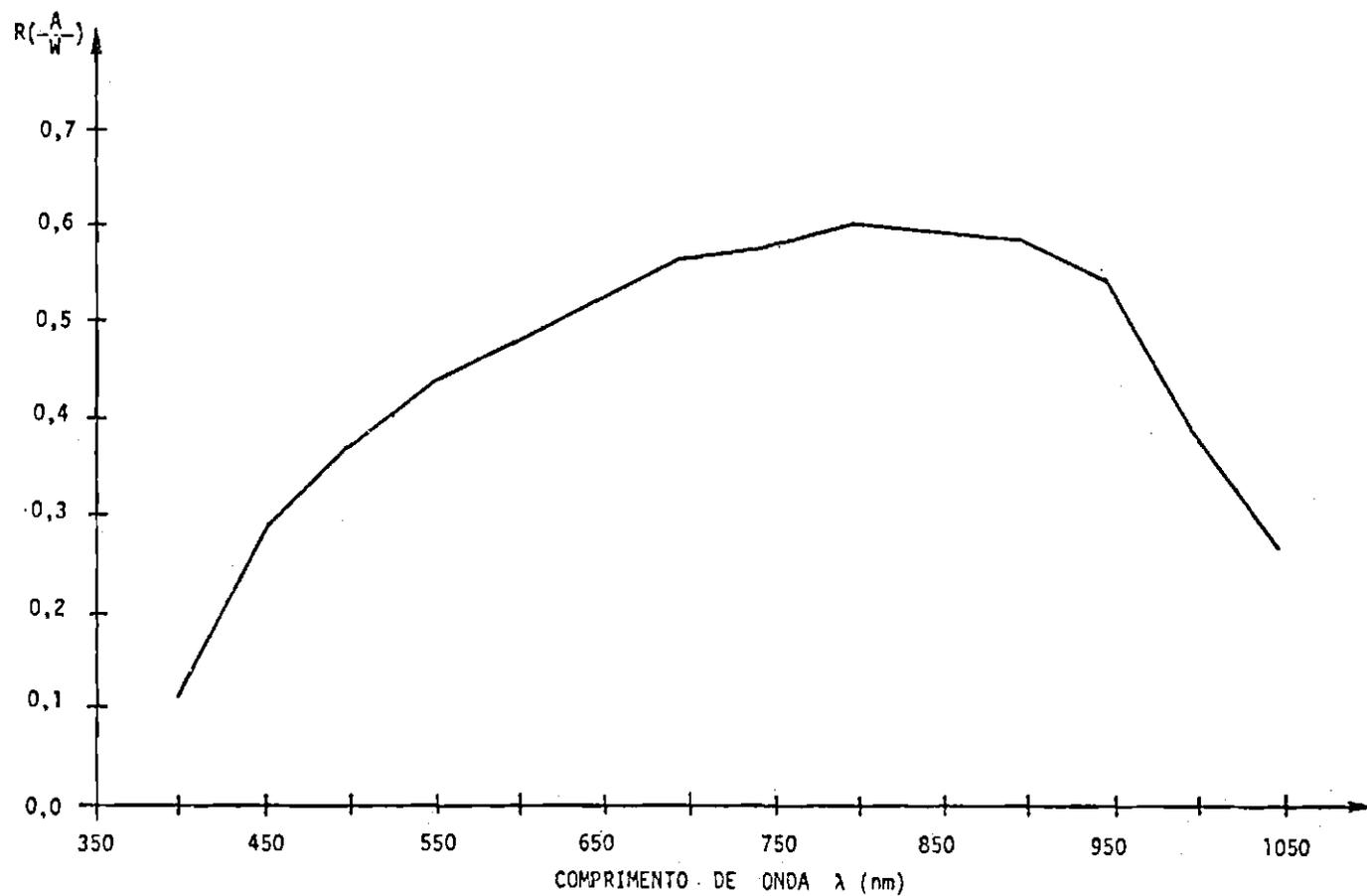


Fig. 2.10 - Resposta Espectral do fotodiodo.

CAPÍTULO 3

MODELAMENTO E ANÁLISE

3.1 - FUNÇÃO DE TRANSFERÊNCIA

A Unidade Sensora apresenta uma saída digital composta por 7 bits codificados em Gray. Esses bits apresentam 92 combinações possíveis (ver Seção 2.3) e cada uma deve corresponder a um ângulo entre a normal ao prisma de Sílica Fundida e o Sol. A relação entre a palavra binária e esse ângulo é feita através da função de transferência, cuja dedução será feita a seguir.

A Figura 3.1 ilustra a luz solar passando pela fenda do prisma e incidindo no detetor.

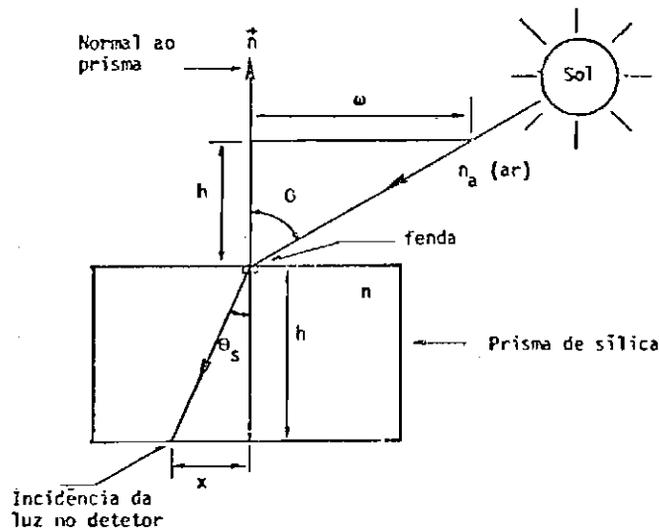


Fig. 3.1 - Refração da luz Solar no Prisma.

Aplicando a lei de Snell para a refração no prisma obtemos:

$$n_a \cdot \text{sen}\theta = n \cdot \text{sen}\theta_s \quad (3.1)$$

O índice de refração n_a é do ar, portanto $n_a = 1$. Sendo h a altura do prisma e x a distância entre a incidência da luz nos fotodiodos e a reta normal passando pela fenda, tem-se:

$$\text{sen}\theta_s = \frac{x}{\sqrt{x^2 + h^2}} \quad (3.2)$$

Combinando as Equações (3.1) e (3.2) obtêm-se:

$$\text{sen}\theta = \frac{nx}{\sqrt{x^2 + h^2}} \quad (3.3)$$

Dessa equação resulta a primeira forma de expressar θ como função de x , altura do prisma h e índice de refração n :

$$\theta = \text{sen}^{-1} \left[\frac{nx}{\sqrt{x^2 + h^2}} \right] \quad (3.4)$$

Uma outra forma de obter o ângulo θ é aplicando esta outra equação:

$$\text{sen}\theta = \frac{\omega}{\sqrt{\omega^2 + h^2}} \quad (3.5)$$

Igualando a Equação (3.3) com a Equação (3.5) resulta:

$$\frac{nx}{\sqrt{x^2 + h^2}} = \frac{\omega}{\sqrt{\omega^2 + h^2}} \quad (3.6)$$

Separando a variável ω :

$$\omega = \frac{nxh}{\sqrt{h^2 + (1 - n^2)x^2}} \quad (3.7)$$

Com a Equação(3.7) e sabendo que $\text{tg}\theta = \frac{\omega}{h}$, (3.8)

obtêm-se a outra forma de representar a função de transferência do Sen sor Solar:

$$\theta = \text{tg}^{-1} \left[\frac{nx}{\sqrt{h^2 + (1 - n^2)x^2}} \right] \quad (3.9)$$

As Equações(3.3) e (3.9) são as duas representações mais comuns de $\theta = \theta(x, h, n)$. Falta ainda obter x como função da saída di gital do Sensor.

A saída digital do sensor codificada em Gray pode ser con vertida para uma representação decimal que varia entre 18 e 109 (ver Se ção 2.3). Para uma inclinação θ próxima de zero o código varia de 63 pa ra 64.

O valor de x deve resultar da combinação do passo do côdi go K_C (tamanho do retículo), do número correspondente ao código de Gray N_g e do número de bits m do sensor, da seguinte forma (Chen e Lerner, 1978, p.224):

$$x = K_C \cdot (N_g - 2^{m-1} + 0,5) \quad (3.10)$$

Portanto, através dessas Equações (3.3) ou (3.9) e (3.10) pode -se expressar o ângulo θ como função da palavra digital fornecida pelo sensor.

Vale salientar que, se um código do sensor é válido entre 1° e 2° , a função de transferência gera um ângulo na metade dessa fai

xa angular em $1,5^\circ$, para assegurar que o erro $\bar{\epsilon} \pm 1/2 \text{ LSB}$ ("Least Significant Bit").

Para completar a transferência da informação digital para os espelhos de referência de alinhamento do Sensor, é necessário fornecer os dois ângulos existentes entre as duas unidades sensoras e esses espelhos, como visto na Figura 3.2.

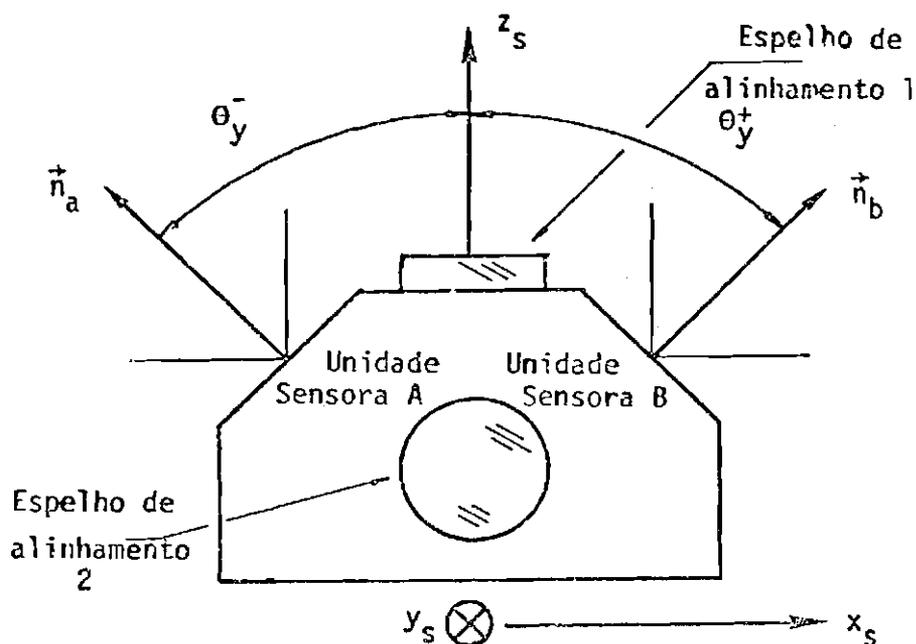


Fig. 3.2 - Ângulos de transposição da cabeça óptica.

θ_y^- é o ângulo existente entre a normal \vec{n}_a à unidade sensora A e o eixo z_s normal ao espelho de alinhamento 1. θ_y^+ é o ângulo existente entre a normal \vec{n}_b à unidade sensora B e o eixo z_s . De posse desses ângulos é possível transpor a informação digital para os eixos x_s , y_s e z_s do Sensor.

Os parâmetros típicos da função de transferência, do protótipo de Sensor Solar construído, são:

$$\left. \begin{aligned} K_c &= 0,15 \text{ mm} \\ n &= 1,4553 \\ m &= 7 \text{ bits} \\ h &= 12,135 \text{ mm} \\ \theta_y^+ &= \theta_y^- = 45^\circ \end{aligned} \right\} \quad (3.11)$$

Um sensor que apresenta esses dados, tem resolução angular de 1° e espaçamento entre códigos praticamente constante.

3.2 - ORÇAMENTO DE ERROS

A precisão do Sensor Solar Digital é resultante da composição de várias componentes de erro, presentes na óptica, mecânica e eletrônica, que constituem o equipamento, e nas calibrações feitas em terra. Nessa seção será apresentada uma análise dos tipos de erros existentes e de como podem ser combinados para obter-se a precisão final. Será feita uma lista dos erros previstos, onde e porquê aparecem, incluindo o procedimento e equações para o cálculo de cada um.

3.2.1 - TIPOS DE ERROS

Será considerado como erro de leitura do ângulo θ , obtido do Sensor Solar, toda diferença existente entre o ângulo θ real, e o computado através da função de transferência do sensor. Essa função é simples, constitui-se das equações (3.9) e (3.10) e dos ângulos de transição da cabeça óptica, apresentados na Seção 3.1. Se algum parâmetro influencia para que o sensor não obedeça a esse modelo, será analisado como fonte de erro.

Os erros previstos, e apresentados nas seções seguintes, são os resultantes de:

- 1) quantização do código;

- 2) ângulo equivalente de ruído;
- 3) tolerância de fabricação do código sobre os fotodiodos;
- 4) não-uniformidade da resposta dos fotodiodos;
- 5) "cross-talk" entre fotodiodos;
- 6) "offsets" dos amplificadores e comparadores;
- 7) incerteza na detecção do cruzamento;
- 8) incerteza no conhecimento do índice de refração equivalente;
- 9) precisão de posicionamento do detetor em relação ao prisma e fenda;
- 10) precisão de alinhamento da unidade sensora em relação aos espelhos de referência.

Esses erros podem ser classificados, de acordo com o caráter que possuem no processamento do sinal, como: aleatórios, de quantização, modeláveis e não-modeláveis. Entende-se por processamento do sinal, todo o caminho percorrido para obter-se a informação angular. Isto é, o caminho existente do ângulo θ real, entre a normal à unidade sensora e os raios solares, até a obtenção do ângulo θ medido pela função de transferência.

Sendo um sensor digital, existe uma região angular em que a palavra de saída se mantém constante, mesmo que o ângulo de incidência dos raios solares varie. Essa região é a resolução angular do equipamento e ocorre devido a quantização. O erro de quantização é a metade desse ângulo.

Se um dado parâmetro influencia no processamento do sinal e pode causar um erro na medida do ângulo θ , mas não faz parte do modelo apresentado, o erro causado será considerado não-modelável. Caso contrário, será pertencente ao modelo, ou modelável. Qualquer erro causado por um parâmetro pertencente ao modelo, poderá ser compensado por um fator obtido durante as calibrações do equipamento, chamado fator de calibração. O modelo facilita a fabricação e calibração do sensor, daí porque

certos erros que poderiam apresentar modelos mais complexos, serem considerados não modeláveis. A influência dos processos de fabricação neste tipo de erro será analisada na Seção 3.3. Na análise de cada erro, nas seções seguintes, será indicado se pode ou não ser compensado por um fator de calibração.

Os erros aleatórios aparecem na forma de ruído no sinal e podem ser filtrados, durante a operação do sensor.

Aplicando essa classificação aos erros apresentados, obtêm-se:

erro 1 - quantização

erro 2 - aleatório

erros 3 a 8 - não-modeláveis

erros de 9 a 10 - alguns alinhamentos são modeláveis, outros não.

Na região angular, na qual o código permanece constante, certos erros não influenciam; como por exemplo: a tolerância de fabricação do código, o ângulo equivalente de ruído, etc. Eles passam a ser sentidos apenas nas transições do código. Para exemplificar essa abordagem, consideremos o erro de tolerância de fabricação. A máscara do código de Gray apresenta uma tolerância de fabricação, na faixa de $\pm 5 \mu\text{m}$. Existe então, em toda transição do código, uma pequena região angular que a transição efetiva poderá ocorrer. A priori, não se sabe qual detector será utilizado e em qual posição estarão essas transições. Esse erro irá contribuir para deformar as transições de maneira aleatória, ao longo do campo de visada. Uma vez montado o sensor, as transições estarão levemente deslocadas em relação ao modelo, mas ficarão sempre nas mesmas posições. Isso contribui para piorar o erro em alguns códigos e melhorar em outros. Esse tipo de erro é não-modelável, pois ocorre de maneira diferente em cada uma das 92 transições, e também porque não existe no modelo apresentado um parâmetro que permita computar a sua influência.

Da abordagem feita surge a forma de solução adotada para combinar os erros e obter a precisão final do equipamento. A maioria dos

erros atuam nas transições do código e a quantidade delas é elevada, de modo a permitir que se admita uma distribuição normal. Faz-se, então, o valor rms. Isto é, computa-se a raiz quadrada da soma quadrática dos erros e, posteriormente, soma-se com o erro de quantização. Porque todos os erros influenciam para agravar o erro de quantização, atuando nas transições do código.

Nas seções seguintes serão analisados cada erro apresentado.

3.2.2 - QUANTIZAÇÃO DO CÓDIGO

A configuração do código no detetor e a função de transferência do sensor solar definem um distanciamento entre códigos, que apresenta uma resolução angular de aproximadamente 1 grau.

A visada pretendida para cada unidade sensora, composta por prisma de quartzo e fotodiodos é de $\pm 46^\circ$ e os parâmetros típicos da função de transferência foram apresentados pelas Equações (3.11).

O erro de quantização pode ser definido como metade da distância angular, existente entre dois códigos consecutivos. As equações a seguir permitem o cálculo desse erro:

$$\left. \begin{aligned}
 x_i &= 0,15 (N_g^i - 63,5) \\
 x_{i+1} &= 0,15 (N_g^{i+1} - 63,5) \\
 \theta_i &= \text{tg}^{-1} \left[\frac{1.4553 \cdot x_i}{\sqrt{(12.135)^2 + (1 - 1.4553^2) x_i^2}} \right] \\
 \theta_{i+1} &= \text{tg}^{-1} \left[\frac{1.4553 \cdot x_{i+1}}{\sqrt{(12.135)^2 + (1 - 1.4553^2) x_{i+1}^2}} \right] \\
 E_q &= (\theta_{i+1} - \theta_i) / 2
 \end{aligned} \right\} \quad (3.12)$$

O número N_g a ser utilizado nas equações deve ser somado de 0,5. Isto é, para obter o erro de quantização para $N_g = 63$, utiliza-se $N_g^i = 62,5$ e $N_g^{i+1} = 63,5$ nas equações.

Esse cálculo foi feito para toda a visada de 92° e obteve-se o pior caso do erro de quantização E_q . O valor obtido para E_q foi de 30,9 minutos de arco no máximo.

3.2.3 - TOLERÂNCIA DE FABRICAÇÃO DO CÓDIGO SOBRE OS FOTODIÓDOS

A tolerância de fabricação do código de Gray na cadeia de fotodiodos solicitada ao LME/USP é de $\pm 5 \mu\text{m}$. Esse deslocamento de Δx nas transições do código equivale a uma incerteza $\Delta\theta$, que pode ser calculada diferenciando-se a função de transferência em relação a x . A equação abaixo mostra essa função:

$$\frac{\partial\theta}{\partial x} = \frac{nh^2}{(h^2 + (1 - n^2)x^2)^{3/2}} \cos^2\theta \quad (3.13)$$

Para $x = 0$, tem-se que:

$$\left. \frac{\partial\theta}{\partial x} \right|_{x=0} = \frac{n}{h} \quad (3.14)$$

Para os parâmetros do Sensor $n = 1.4553$ e $h = 12.135 \text{ mm}$ resulta que:

$$E_f = \frac{n}{h} \cdot \Delta x = 2,1 \text{ min de arco} \quad (3.15)$$

Pode-se plotar um gráfico de $E_f \times \theta$ para toda a visada do Sensor e isto é apresentado na Figura 3.3.

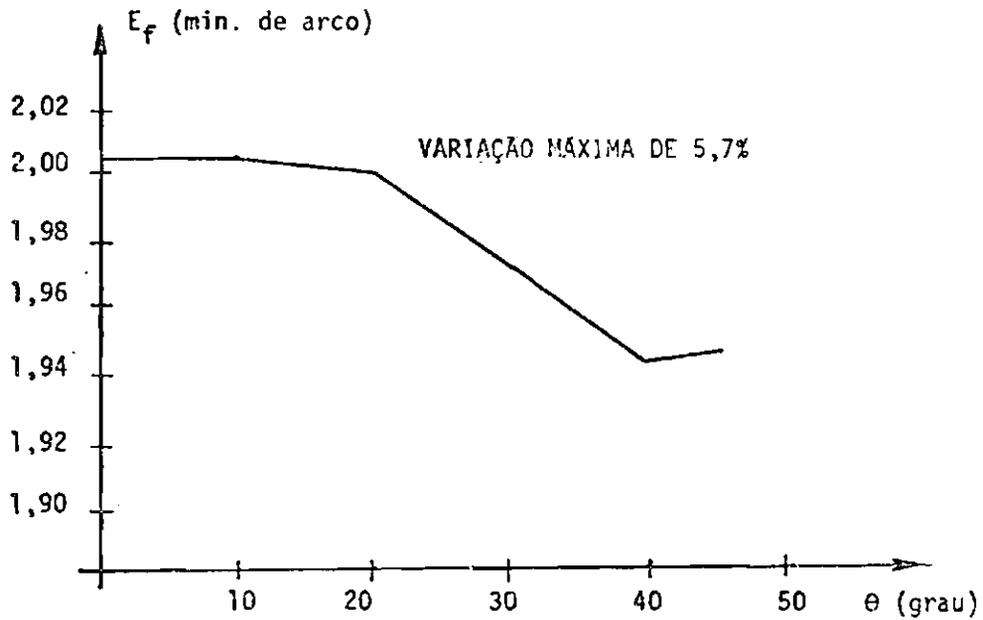


Fig. 3.3 - Erro resultante da tolerância de fabricação do código, em função do ângulo de incidência θ .

Esse erro de fabricação não pode ser compensado por um fator de calibração, porque atua de forma diferente em cada uma das 92 transições do campo de visada da unidade sensora, como visto na Seção 3.2.1.

3.2.4 - ÂNGULO EQUIVALENTE DE RUÍDO OU NEA ("NOISE EQUIVALENT ANGLE")

Cada sinal dos fotodiodos é amplificado e o ruído na saída desse estágio, comparado com o sinal, representa uma incerteza angular, que é chamada ângulo equivalente de ruído.

O tipo de ligação utilizada do fotodiodo ao amplificador é mostrado na Figura 3.4.

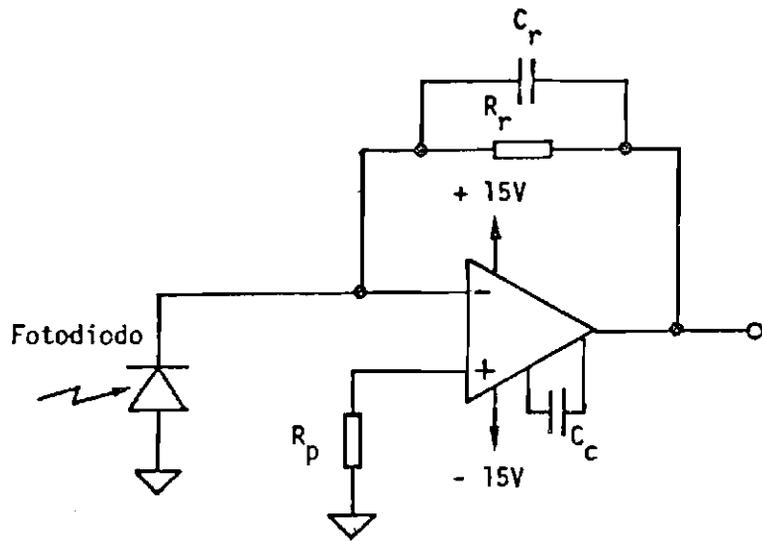


Fig. 3.4 - Ligação do Fotodiodo e amplificador.

Em termos de cálculo teórico de contribuição de ruído, o circuito pode ser representado na forma:

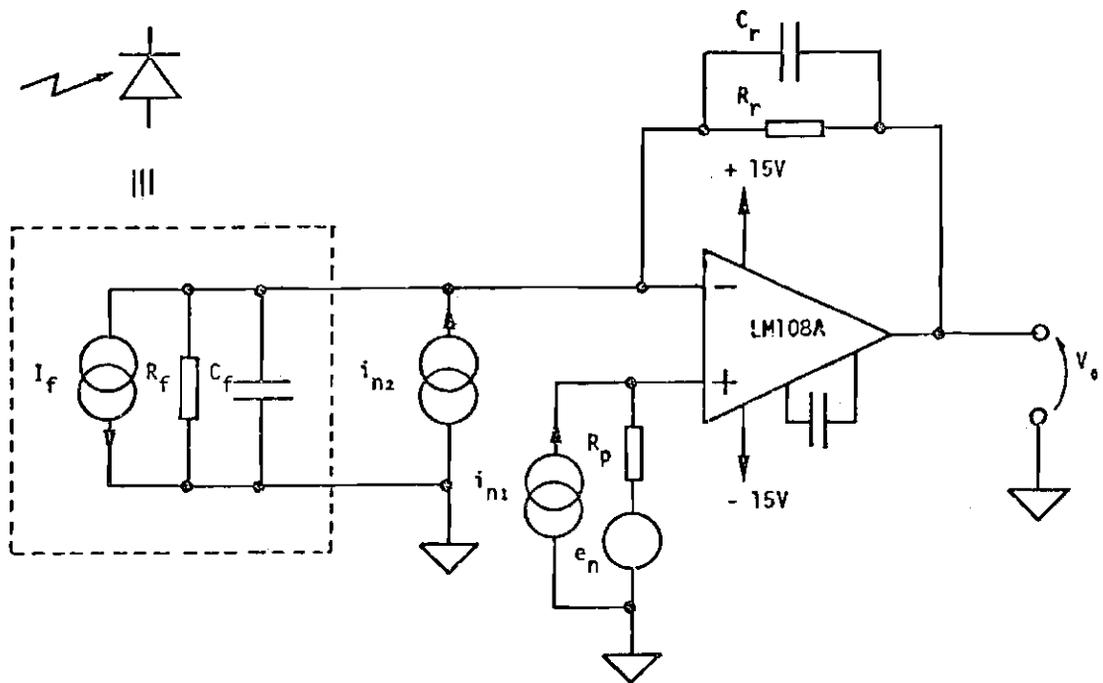


Fig. 3.5 - Circuito equivalente de cálculo de ruído.

FONTE: Analog devices (1984), p.20.8.

Nesse esquema é colocado o modelo equivalente dos fotodiodos e as fontes de ruído equivalente do amplificador. A contribuição de cada termo é apresentada na tabela abaixo.

TABELA 3.1
ORÇAMENTO DAS COMPONENTES DE RUÍDO
DO AMPLIFICADOR LM108A E FOTODIODO

COMPONENTE	CAUSA	EQUAÇÃO DE CONTRIBUIÇÃO NA SAÍDA (*)	VALOR EM nV/ $\sqrt{\text{Hz}}$ (rms)
$R_f = 10\text{K}\Omega$	Ruído Térmico	$\sqrt{4\text{KTBR}_f} \cdot \left[\frac{R_r}{R_f} \right]$	65
$R_p = 8,3\text{K}\Omega$	Ruído Térmico	$\sqrt{4\text{KTBR}_p} \cdot \left[\frac{R_r}{R_f} + 1 \right]$	70
$R_r = 50\text{K}\Omega$	Ruído Térmico	$\sqrt{4\text{KTBR}_r}$	29
$i_{n1} = 0$	Corrente de ruído equivalente	$i_{n1} \cdot R_r$	0
$i_{n2} = 0$	Corrente de ruído equivalente	$i_{n2} \cdot R_p \left[\frac{R_r}{R_f} + 1 \right]$	0
$e_n = 212\text{nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ (**) Térmico	Tensão de ruído térmico equivalente	$e_n \left[\frac{R_r}{R_f} + 1 \right]$	1270
$e_n = 86\text{nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ (**) "popcorn"	Tensão de ruído "pop-corn" equivalente	$e_n \left[\frac{R_r}{R_f} \right] + 1$	514

FONTE: (*) - Analog devices (1984), p.20-8; (**) US Department of defense (1979), p.59.

A soma dos quadrados resulta em: $1,37\mu\text{V}/\sqrt{\text{Hz}}$ (rms). A constante $\tau = R_r C_r$ restringe a banda em 1kHz, resultando portanto em $0,286\text{ mV}_{pp}$ de ruído.

O ângulo equivalente de ruído depende de como varia a tensão com o ângulo de incidência θ , para um bit qualquer próximo a transição, como ilustra a Figura 3.6.

Como pode ser observado na figura, para um dado nível de ruído no sinal do bit, menor será o NEA para uma derivada $\left. \frac{dV}{d\theta} \right|_{\theta_0}$ maior.

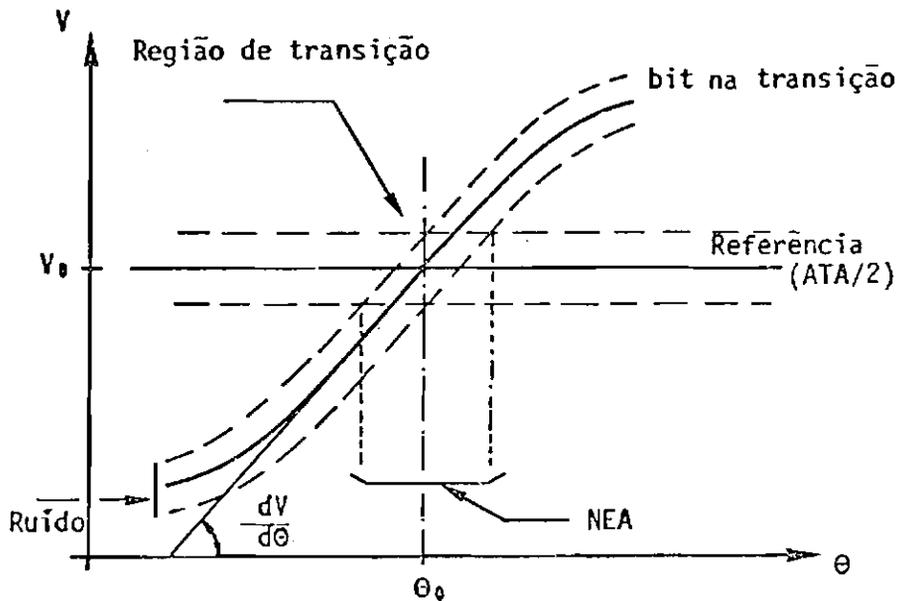


Fig. 3.6 - Variação do sinal do fotodiodo com θ , próximo à transição.

Se a região de transição for ampliada é possível observar melhor como pode ser calculado o NEA.

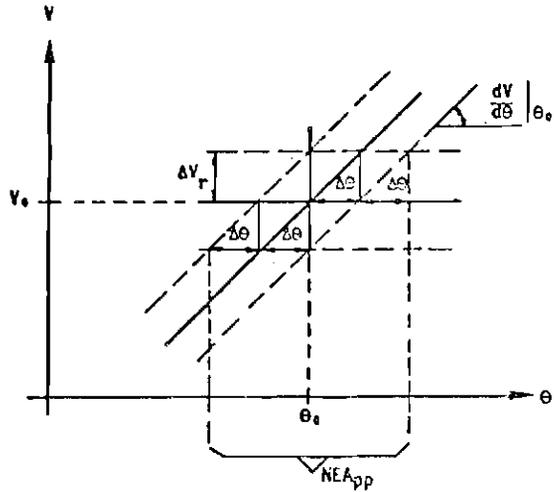


Fig. 3.7 - Ampliação da região de transição para cálculo do NEA.

Pode-se notar que:

$$NEA_{pp} = 4 \cdot \left. \frac{V_r}{\frac{dV}{d\theta}} \right|_{\theta_0} ; \quad (3.16)$$

onde ΔV_r é o ruído de pico existente nas tensões. O valor de $\left. \frac{dV}{d\theta} \right|_{\theta_0}$ nas transições dos bits pode ser estimado teoricamente, ou medido no protótipo construído. Para os cálculos dessa seção, será utilizado um valor estimado para a variação de V com θ , próximo à transição.

Se uma transição ocorre no ponto x_0 , à medida que a imagem da fenda desloca-se próxima a esse ponto, a tensão de saída do amplificador $V_0 = R_r \cdot I_f$ varia linearmente com x , pois a corrente foto gerada I_f é diretamente proporcional à potência incidente no detector, e conseqüentemente à área iluminada do mesmo. A Figura 3.8 ilustra essa colocação.

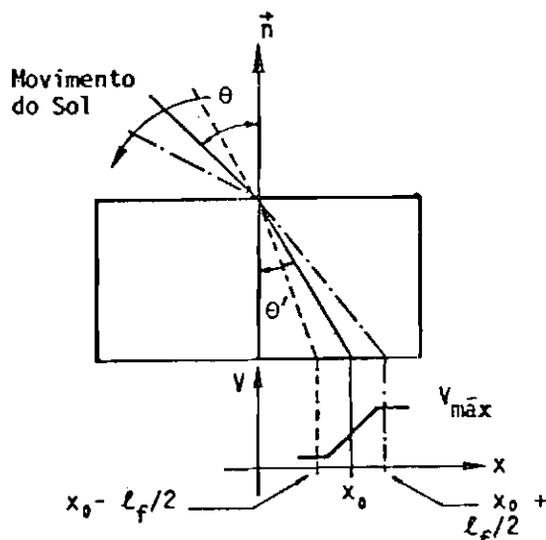


Fig. 3.8 - Variação do sinal próximo à transição x_0 .

Dessa forma, é possível obter a tensão V em função de x , supondo que para $x = x_0 - l_f/2$, onde l_f é a largura da imagem da fenda, a tensão V seja 0 e para $x = x_0 + l_f/2$ tenha-se $V = V_{\text{máx}}$. Essa equação $V(x)$ é:

$$V = \frac{V_{\text{máx}}}{l_f} \left(x - x_0 + \frac{l_f}{2} \right) \quad (3.17)$$

Assim, a taxa de variação $\frac{dV}{d\theta}$ pode ser obtida da forma:

$$\frac{dV}{d\theta} = \frac{dV}{dx} \cdot \frac{dx}{d\theta} = \frac{dV}{dx} \cdot \frac{1}{\frac{d\theta}{dx}} \quad (3.18)$$

Substituindo a Equação (3.13) em (3.18), obtêm-se:

$$\frac{dV}{d\theta} = \frac{V_{\text{máx}}}{l_f} \cdot \frac{(h^2 + (1-n^2)x^2)^{3/2}}{nh^2 \cdot \cos^2\theta} \quad (3.19)$$

Observa-se que $\frac{d\theta}{dx}$ não varia muito pela Figura 3.3 e se mantém praticamente igual para $\theta = 0$. Fazendo $\theta = 0$ em (3.19), resulta que:

$$\frac{dV}{d\theta} = \frac{V_{\text{m}\bar{x}}}{l_f} \cdot \frac{h}{n} \quad (3.20)$$

Considerando os seguintes parâmetros do sensor:

$$\left. \begin{array}{l} n = 1,4553 \\ l_f = 180 \mu\text{m} \\ h = 12,135 \text{ mm} \\ V_{\text{m}\bar{x}} = 2,65 \text{ V} \end{array} \right\} ; \quad (3.21)$$

onde a largura da imagem da fenda l_f é tomada como sendo igual a largura da fenda de $100 \mu\text{m}$ mais $80 \mu\text{m}$ devido a abertura angular do Sol, como calculado na Seção 4.3. A tensão $V_{\text{m}\bar{x}}$ de $2,65 \text{ V}$ é obtida com ganho de $R_p = 50\text{K}\Omega$ para o amplificador e corrente nominal de $53 \mu\text{A}$ para o fotodiodo. Substituindo esses valores de (3.21) em (3.20) resulta que

$$\frac{dV}{d\theta} = 35,7 \text{ mV/min de arco} \quad (3.22)$$

Da Equação (3.16) e os valores de (3.22) e $\Delta V_p = 0,143 \text{ mV}$, tem-se o valor do NEA:

$$\text{NEA}_{pp} \cong 1 \text{ segundo de arco} \quad (3.23)$$

O erro NEA é do tipo aleatório e pode ser filtrado, fazendo-se a média das medidas.

3.2.5 - NÃO-UNIFORMIDADE DA RESPOSTA DOS FOTODIODOS

Os fotodiodos que constituem a cadeia apresentam, ao longo de cada elemento e entre eles, uma variação na resposta de no máximo $\pm 5\%$ em relação à média.

Novamente, essa variação nos níveis para os valores nominais resulta numa incerteza angular, como pode ser visto na Figura 3.9.

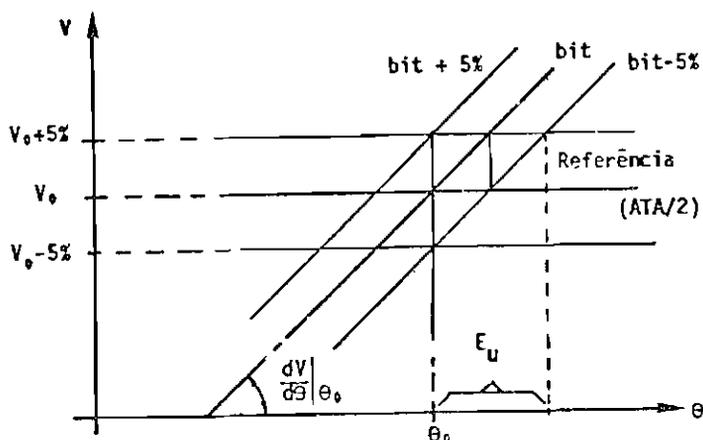


Fig. 3.9 - Região de transição para cálculo do erro de uniformidade.

O erro máximo devido a não-uniformidade é definido como:

$$E_U = 2 \cdot \frac{0,05V_0}{\left. \frac{dV}{d\theta} \right|_{\theta_0}} \quad (3.24)$$

onde

$$V_0 = \frac{V_{\max}}{2} \quad (3.25)$$

Das Equações (3.22) e (3.21) tem-se que:

$$E_U = 3,7 \text{ minutos de arco} \quad (3.26)$$

O erro resultante da não-uniformidade é não-modelável, pois atua de forma diferente para cada transição. Sendo assim, não pode ser compensado por um fator de calibração.

3.2.6 - "CROSS-TALK" ENTRE FOTODIODOS

Em cada detetor integrado existem 9 fotodiodos. Quando um deles é iluminado, os fotodiodos do lado apresentam um sinal, que quando do próximo da transição de código, pode resultar em um erro angular.

O valor especificado máximo e medido para os detetores é de 3,5% de "cross-talk".

Como no caso da uniformidade, esse erro é dado por:

$$E_{ct} = \frac{0,035 \cdot V_{m\grave{a}x}}{\left. \frac{dV}{d\theta} \right|_{\theta_0}} \quad (3.27)$$

A figura para cálculo é parecida com a Figura 3.9. Substituindo os valores de $V_{m\grave{a}x}$ e $\left. \frac{dV}{d\theta} \right|_{\theta_0}$ das Equações (3.22) e (3.21) na Equação (3.27), obtêm-se:

$$E_{ct} = 2,6 \text{ minutos de arco} \quad (3.28)$$

Como no caso do erro de não-uniformidade, pelas mesmas razões, o erro de "cross-talk" não pode ser compensado.

3.2.7 - "OFFSETS" DOS AMPLIFICADORES E COMPARADORES

Pelo fato de existir na eletrônica um amplificador LM108A distinto para cada fotodiodo e um comparador para cada Bit, as tensões de "offset" representam erros angulares, cometidos nas proximidades das transições.

O amplificador utilizado é o LM108A com tensão de "offset" equivalente de entrada de $e_{i0}(\text{m}\bar{x}) = \pm 1 \text{ mV}$. O comparador é o LM139 com $e_{i0}(\text{m}\bar{x}) = \pm 9 \text{ mV}$ em toda a faixa de temperatura.

O erro de "offset" total em tensão é dado por:

$$e_o = 1\text{mV} \times (\text{Ganho} + 1) + 9 \text{ mV} = 15 \text{ mV} \quad (3.29)$$

O erro angular pode ser deduzido pela Figura:

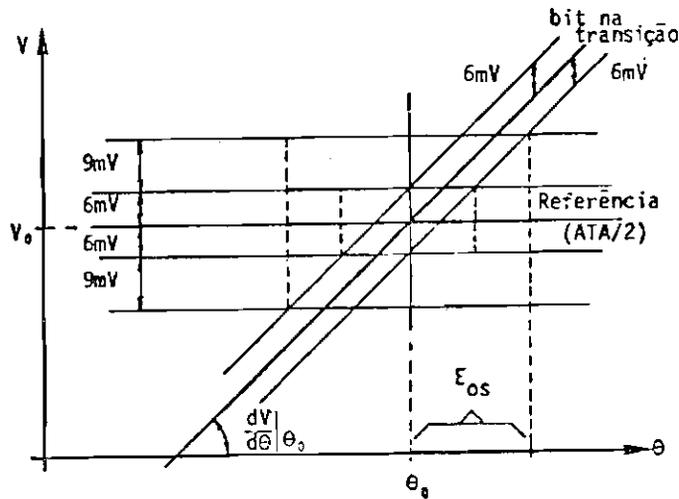


Fig. 3.10 - Região angular do erro de "offset".

Assim:

$$E_{os} = 2 \times \left. \frac{d\theta}{dV} \right|_{\theta_0} \cdot 6 \text{ mV} + \left. \frac{d\theta}{dV} \right|_{\theta_0} \cdot 9 \text{ mV} \quad (3.30)$$

ou

$$E_{os} = \left. \frac{d\theta}{dV} \right|_{\theta_0} \cdot 21 \text{ mV} \quad (3.31)$$

Substituindo o valor de $\left. \frac{d\theta}{dV} \right|_{\theta_0}$ de (3.22) resulta que:

$$E_{os} = 0,58 \text{ minutos de arco.} \quad (3.32)$$

O erro devido ao "offset" não pode ser compensado, pela mesma razão do erro de "cross-talk".

3.2.8 - PRECISÃO DE POSICIONAMENTO DO DETETOR EM RELAÇÃO AO PRISMA E FENDA DA

O posicionamento dos fotodiodos em relação à fenda e prisma é crítico e os erros cometidos refletem-se na função de transferência.

A Figura 3.11 define os eixos que serão considerados, para o cálculo das contribuições de erro.

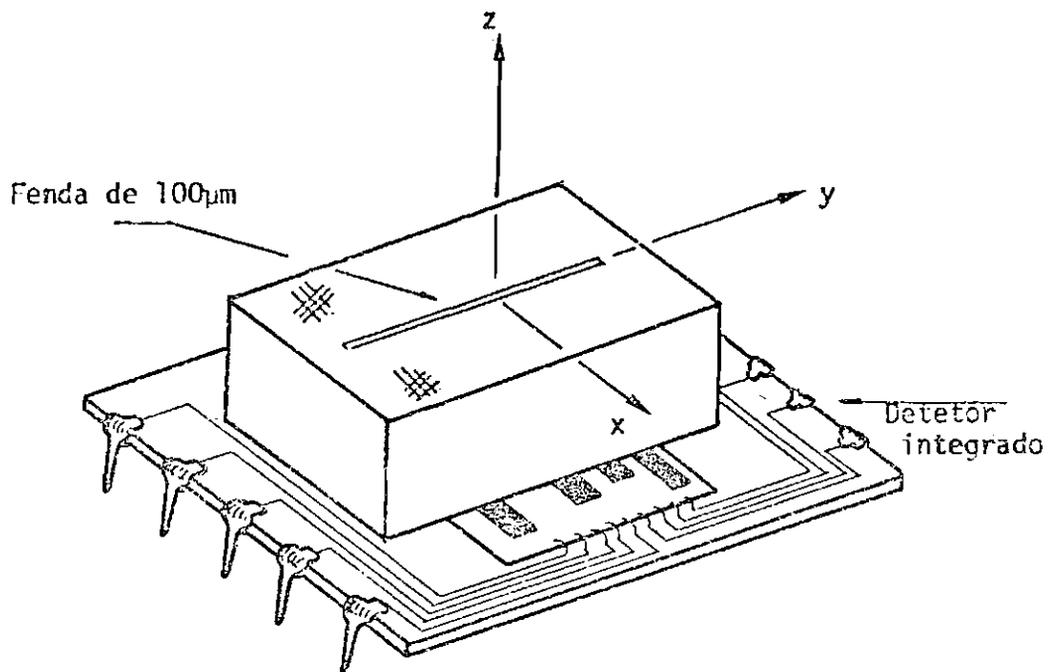


Fig. 3.11 - Definição dos eixos na unidade sensora.

Cada um dos desvios $\Delta x, \Delta y, \Delta z, \Delta \theta_x, \Delta \theta_z$ e $\Delta \theta_y$ podem introduzir um erro na função de transferência, que serão calculados a seguir.

3.2.8.1 - ERRO NA ALTURA Δz

Substituindo na função de transferência [Equação (3.9)] a variável h por z , obtêm-se:

$$\theta = \text{tg}^{-1} \left[\frac{nx}{\sqrt{z^2 + (1 - n^2) x^2}} \right] \quad (3.33)$$

Diferenciando essa equação em relação a z obtemos:

$$\frac{\partial \theta}{\partial z} = - \text{tg} \theta \cdot \frac{z}{z^2 + x^2} \quad (3.34)$$

Esse erro portanto cresce com θ e é máximo para $\theta = \pm 46^\circ$, resultando em um desvio $\Delta \theta$ de:

$$\Delta \theta = \left. \frac{\partial \theta}{\partial z} \right|_{\theta_0 = 46^\circ} \cdot \Delta z \quad (3.35)$$

Para os valores nominais do Sensor:

$$\left. \begin{array}{l} z = 12.135 \text{ mm} \\ x = 6,9 \text{ mm} \\ \theta = 46^\circ \end{array} \right\} , \quad (3.36)$$

obtêm-se:

$$\frac{\partial \theta}{\partial z} = - 3,69 \text{ graus/mm.} \quad (3.37)$$

Para $\Delta z = \pm 5 \mu\text{m}$ resulta que:

$$E_{\Delta z} = \pm 1,1 \text{ minutos de arco.} \quad (3.38)$$

Nesse caso do erro na altura Δz , não é necessário que o detetor seja posicionado em relação ao prisma com esta precisão de $\pm 5 \mu\text{m}$, e sim que exista o conhecimento da altura utilizada com esta tolerância. Esse erro pode, portanto, ser compensado por uma medida da altura após a fabricação. Na Seção 3.3 é apresentado o processo de fabricação e discute-se esse problema.

3.2.8.2 - ERRO DE POSICIONAMENTO Δx , NO EIXO x

Esse desvio gera uma rotação em todo o campo de visada da unidade sensora. A incerteza angular pode ser calculada através da Equação (3.13), dada por:

$$\frac{\partial \theta}{\partial x} = \frac{nz^2}{[z^2 + (1 - n^2) \cdot x^2]^{3/2}} \cdot \cos^2 \theta \quad (3.39)$$

Portanto, o erro será

$$E_{\Delta x} = \left. \frac{\partial \theta}{\partial x} \right|_{x_0} \cdot \Delta x \quad (3.40)$$

Para $\Delta x = \pm 5 \mu\text{m}$ resulta que:

$$E_{\Delta x} = \pm 2 \text{ min de ano} \quad (3.41)$$

Para esse erro pode haver uma compensação com uma leitura do posicionamento, que será discutida na Seção 3.3.

3.2.8.3 - ERRO Δy DE POSICIONAMENTO NO EIXO y

Olhando a unidade sensora de frente, tem-se a noção do desvio dy , como ilustra a figura abaixo.

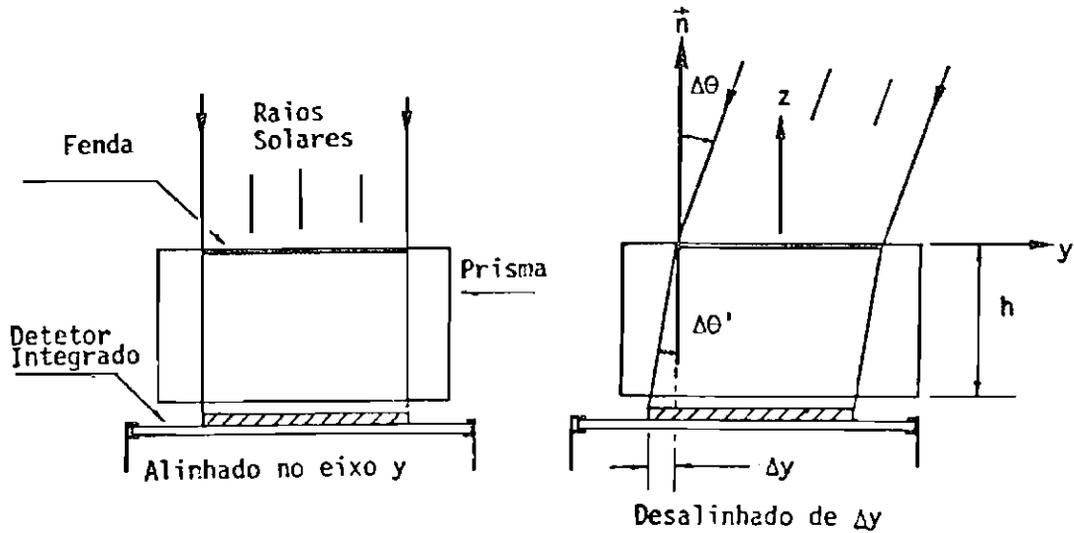


Fig. 3.12 - Inclinação do campo de visada causada pelo desvio Δy .

Esse erro Δy inclina o plano de leitura do Sensor de $\Delta\theta$, onde:

$$\Delta\theta = \text{sen}^{-1} \left\{ n \text{ sen} \left[\text{tg}^{-1} \left(\frac{\Delta y}{z} \right) \right] \right\} \quad (3.42)$$

Para $\Delta y = \pm 10 \mu\text{m}$, tem-se $\Delta\theta = \pm 4,1$ minutos de arco. A influência de $\Delta\theta$ será analisada na Seção 3.2.9.1.

3.2.8.4 - ERRO $\Delta\theta_x$

Esse desvio angular é equivalente a um desvio na altura Δz , como ilustra a figura a seguir.

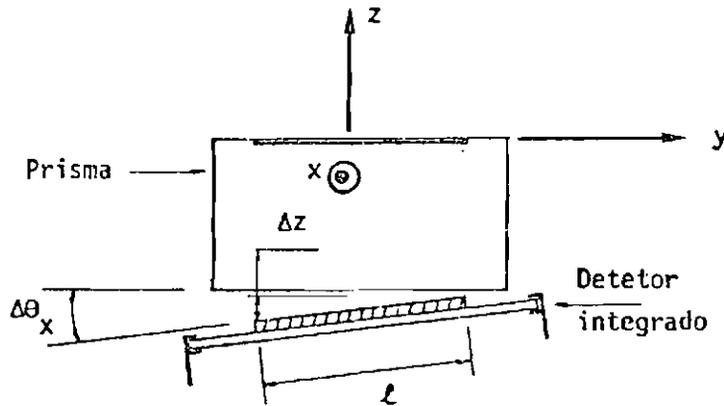


Fig. 3.13 - Geometria para cálculo do erro causado pelo desvio angular $\Delta\theta_x$.

O desvio Δz resultante é:

$$\Delta z = l \cdot \text{tg}(\Delta\theta_x) \quad (3.43)$$

onde l é a largura dos fotodiodos ($l = 15,4 \text{ mm}$). Para $\Delta\theta_x = \pm 1,1$ minuto, resulta que $\Delta z = \pm 5 \mu\text{m}$ e da Equação(3.37)tem-se:

$$E_{\Delta\theta_x} = 1,1 \text{ minuto de arco.} \quad (3.44)$$

Esse erro não é compensável por leitura posterior, pois gera assimetria nas transições do código de Gray. Isto é, faz com que as transições não fiquem igualmente espaçadas.

3.2.8.5 - ERRO $\Delta\theta_y$

Também é equivalente a erro na altura, dado por:

$$\Delta z = C \cdot \text{tg}(\Delta\theta_y) \quad (3.45)$$

Onde C é o comprimento do fotodiodo. Para $C = 6,9 \text{ mm}$ e $\Delta\theta_y = \pm 2,49$ minutos, resulta que $\Delta z = \pm 5 \mu\text{m}$ e o erro de:

$$E_{\Delta\theta_y} = \pm 1,1 \text{ minuto de arco.} \quad (3.46)$$

Não pode ser compensado, pois gera assimetria no código Gray.

3.2.8.6 - ERRO $\Delta\theta_z$

É equivalente a um deslocamento Δx , como ilustra a figura:

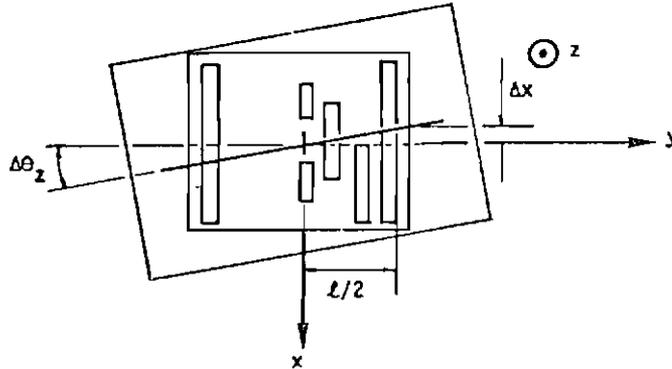


Fig. 3.14 - Geometria para cálculo do erro de $\Delta\theta_z$.

Onde:

$$\Delta x = \frac{\ell}{2} \operatorname{tg} (\Delta\theta_z) \quad (3.47)$$

Para $\Delta\theta_z = \pm 2,2$ minutos de arco e $\ell = 15,4$ (largura do detetor), resulta que $\Delta x = \pm 5\mu\text{m}$ e o erro de:

$$E_{\Delta\theta_z} = \pm 2 \text{ minutos de arco.} \quad (3.48)$$

A assimetria gerada por esse desvio angular não permite que seja compensado posteriormente.

3.2.9 - PRECISÃO DE ALINHAMENTO DA UNIDADE SENSORA EM RELAÇÃO AOS ESPELHOS DE REFERÊNCIA

Como os alinhamentos no satélite e testes em laboratório são feitos com base nos espelhos de referência, é necessário que exista

desvios angulares pequenos das unidades sensoras com relação a estes espelhos. A Figura 3.15 apresenta o sistema de coordenadas e os ângulos a serem especificados.

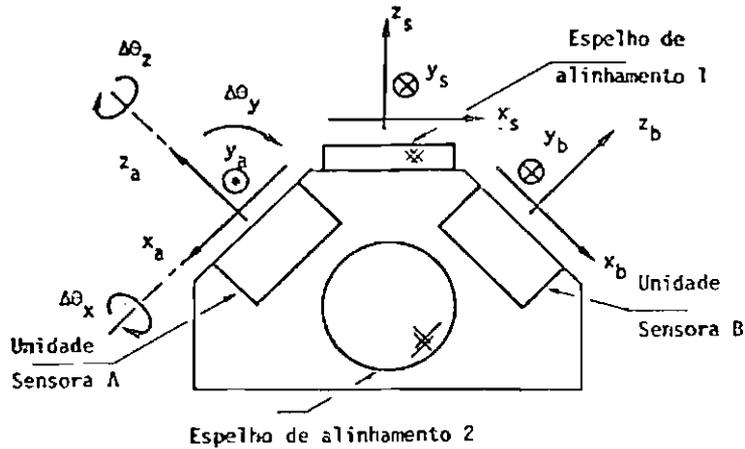


Fig. 3.15 - Desvios angulares de alinhamento das unidades sensoras na cabeça óptica.

Os eixos (x_a, y_a, z_a) e (x_b, y_b, z_b) formam os sistemas de coordenadas em cada unidade sensora, e (x_s, y_s, z_s) o sistema do sensor. O eixo de rotação do satélite estará paralelo ao eixo x_s .

Os ângulos, a serem especificados, são $(\Delta\theta_x, \Delta\theta_y, \Delta\theta_z)$ para os eixos das unidades sensoras em relação ao sistema de coordenadas do sensor, que é definido pelos espelhos. Isto é, o eixo z_s é normal ao espelho de alinhamento 1 e o eixo y_s é normal ao espelho 2. O eixo x_s sai do produto vetorial $\vec{z}_s = \vec{x}_s \times \vec{y}_s$.

3.2.9.1 - ERRO NA MEDIDA CAUSADO PELO DESVIO $\Delta\theta_x$

Como ilustra a Figura 3.16, o ângulo $\Delta\theta_x$ altera a leitura realmente efetuada. Essa leitura passa de θ para θ^* .

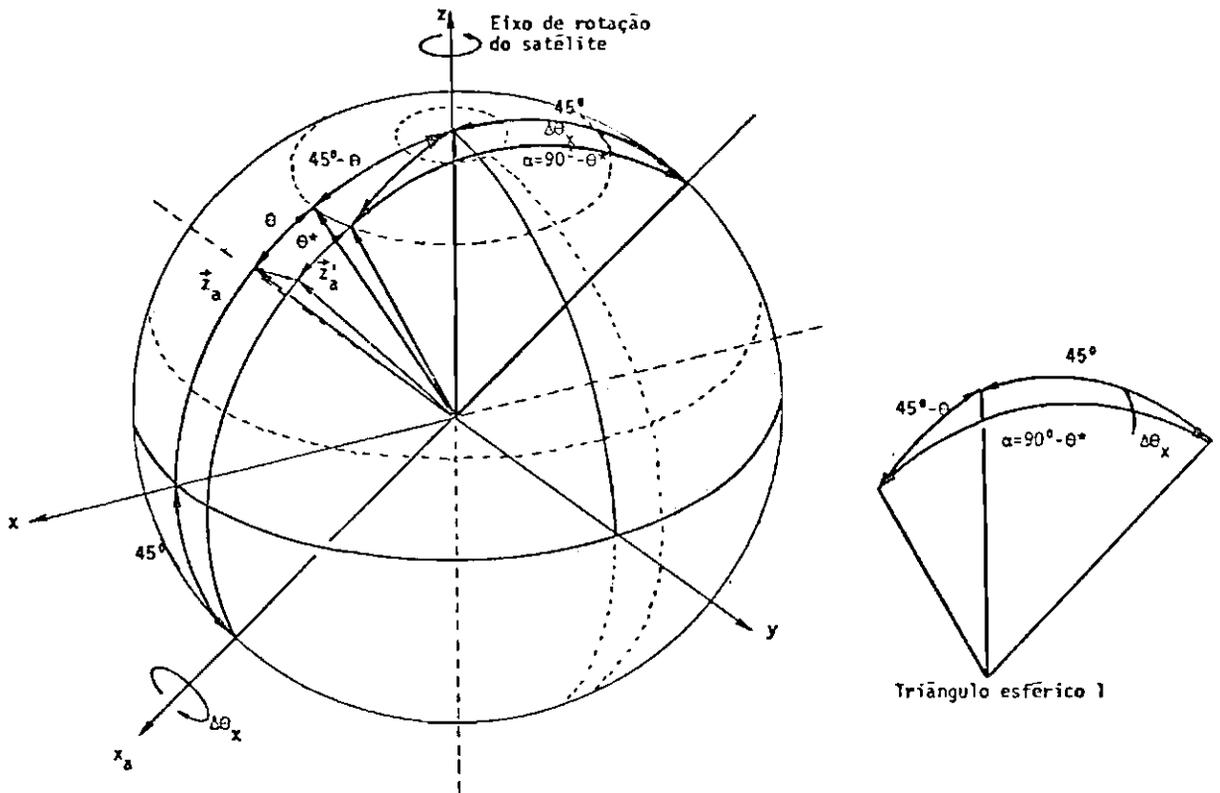


Fig. 3.16 - Geometria para cálculo do erro angular causado pelo desvio $\Delta\theta_x$ da unidade sensora.

Resolvendo para o triângulo esférico 1, indicado na figura, tem-se:

$$\cos(45-\theta) = \cos(90-\theta^*) \cos(45^\circ) + \sin(90-\theta^*) \cdot \sin(45^\circ) \cdot \cos \Delta\theta_x, \quad (3.49)$$

onde θ é o ângulo incidente sem o desvio e θ^* é o ângulo com o desvio angular $\Delta\theta_x$. Obtém-se dessa equação a seguinte expressão quadrática para $\sin(90-\theta^*)$:

$$\begin{aligned} \sin^2(90-\theta^*) \left[\frac{1}{2} \cos^2 \Delta\theta_x + \frac{1}{2} \right] + \sin(90-\theta^*) \left[-\sqrt{2} \cdot \cos \Delta\theta_x \cdot \right. \\ \left. \cdot \cos(45-\theta) \right] + \cos^2(45-\theta) - \frac{1}{2} = 0 \end{aligned} \quad (3.50)$$

Esse erro é crítico para inclinações próximas ao eixo de rotação. Portanto para $\theta = 43^\circ$ e $\Delta\theta_x = 10$ min de arco, resulta que

$$E_{\Delta\theta_x} = \theta^* - \theta = 0,22 \text{ minuto de arco.} \quad (3.51)$$

Como visto na Seção 3.2.1, esse erro é não compensável por não pertencer ao modelo do Sensor Solar. Poderia ser feito um equacionamento desse parâmetro, que permitisse a compensação, mas isto implicaria em dificultar a fabricação e calibração do equipamento.

3.2.9.2 - ERRO CAUSADO POR $\Delta\theta_y$

Pela Figura 3.15, nota-se que esse erro é apenas um fator a ser somado no ângulo existente entre a unidade sensora e o eixo z_s . Sendo assim, esse parâmetro faz parte do modelo apresentado como ângulo de transposição da unidade sensora em relação aos espelhos de referência. O erro pode ser compensado por uma medida durante as calibrações do equipamento. Especifica-se um valor de $E_{\Delta\theta_y} = \Delta\theta_y = 1$ minuto de arco máximo.

3.2.9.3 - ERRO CAUSADO POR $\Delta\theta_z$

Como ilustra a Figura 3.17, o desvio angular $\Delta\theta_z$ altera o ângulo de incidência lido de θ para θ^* . Resolvendo o triângulo esférico assinalado, tem-se:

$$\text{onde } \left. \begin{aligned} \text{sen}(\theta^* + \alpha) &= \frac{\cos(45 - \theta) \cdot \text{sen}\alpha}{\cos 45^\circ} \\ \alpha &= \cos^{-1}(\cos\Delta\theta_z) \end{aligned} \right\} \quad (3.52)$$

O erro angular também cresce com θ , portanto, para $\theta = 43^\circ$ e $\Delta\theta_z = \pm 20$ minutos de arco, resulta que:

$$E_{\Delta\theta_z} = \theta^* - \theta = 0,81 \text{ minuto de arco.} \quad (3.53)$$

Como não há no modelo do Sensor Solar um parâmetro, que descreva o comportamento em relação aos desvios $\Delta\theta_z$, o erro causado não é compensável. Seria possível incluí-lo no modelo, mas isso acarretaria acréscimo de problemas para a fabricação e calibração do Sensor.

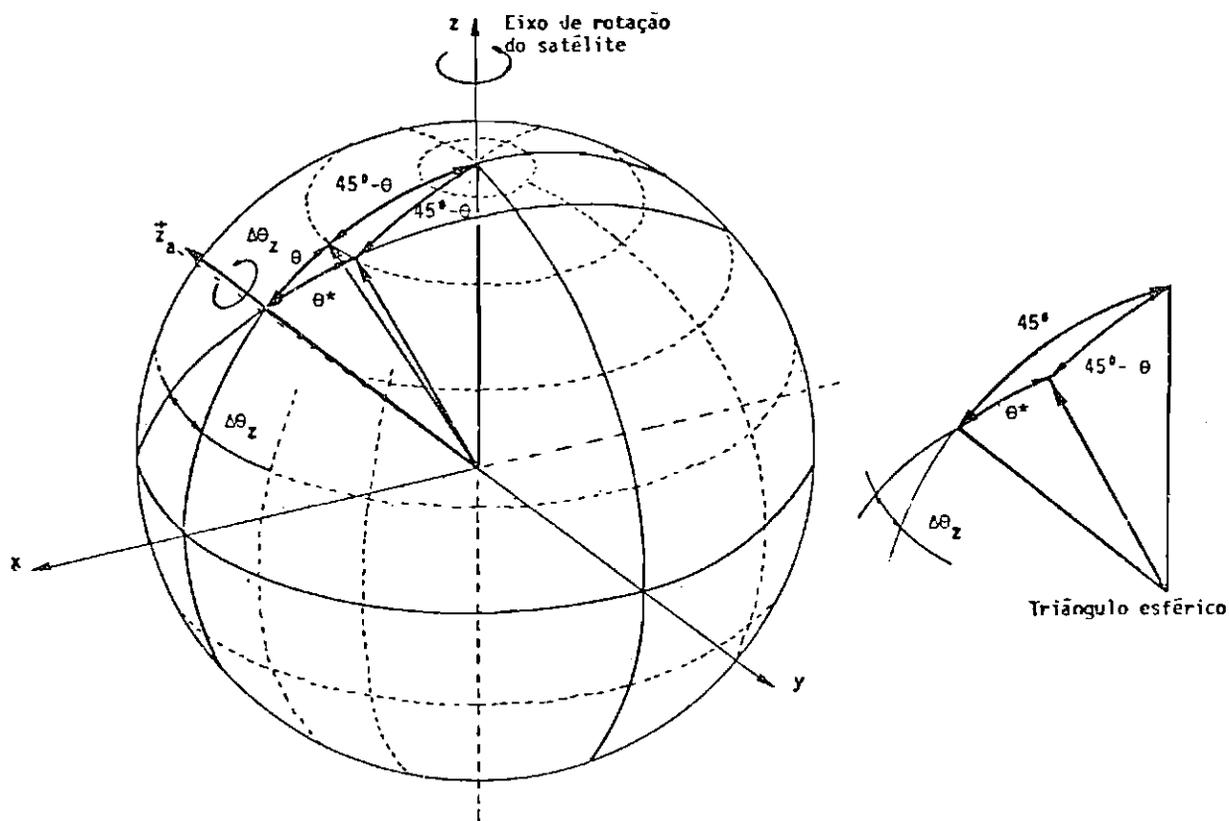


Fig. 3.17 - Geometria para cálculo do erro angular causado pelo desvio $\Delta\theta_z$ da unidade sensora em relação aos eixos da cabeça óptica.

3.2.10 - INCERTEZA NA DETEÇÃO DO CRUZAMENTO

O instante de gatilho dos dados é detetado quando da igualdade dos sinais dos dois fotodiodos ATA de uma unidade sensora. A não uniformidade entre eles e a geometria da cabeça óptica geram uma incerteza nessa detecção que se transforma em erro na medida angular. Existe um plano de leitura ideal, que se nele fossem tomadas as medidas, não have

ria esse erro. A análise exige o conhecimento da variação das curvas dos ATAs com o ângulo ϕ de rotação do satélite. A Figura 3.18 mostra o plano ideal de medida e os ângulos que serão utilizados para dedução das equações.

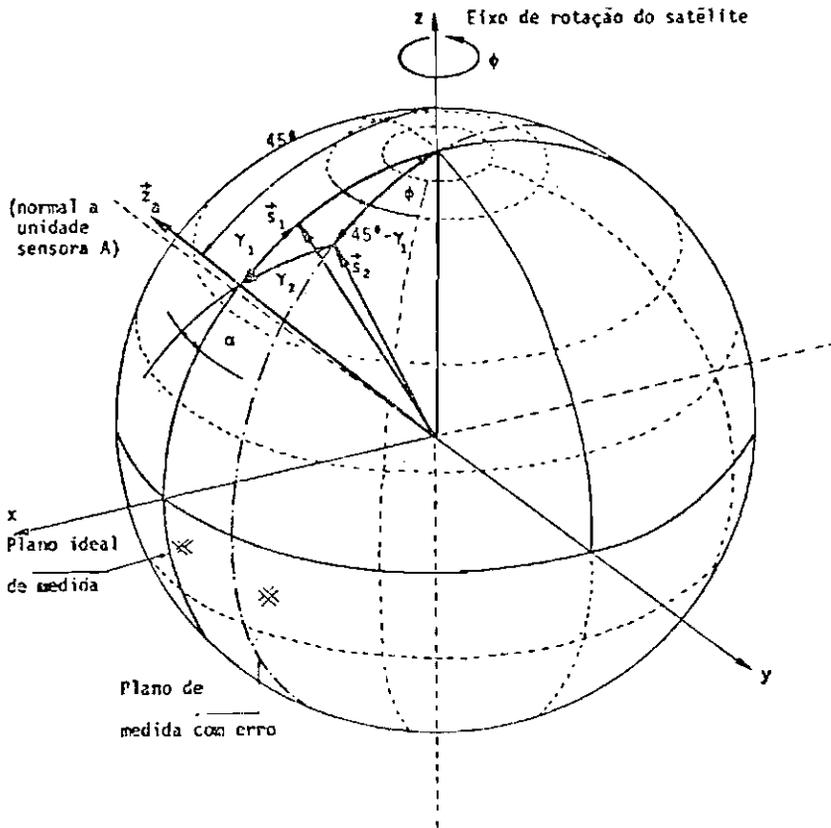


Fig. 3.18 - Definição dos ângulos e geometria para cálculo do erro causado pela incerteza na detecção do cruzamento.

Nessa figura, a posição \vec{s}_1 indica a situação ideal para leitura e \vec{s}_2 a posição do Sol em que a leitura é feita. São conhecidos os ângulos ϕ e γ_1 , e deseja-se conhecer γ_2 e α . É preciso fazer o gráfico das correntes I_1 e I_2 dos ATAs de uma unidade sensora em função do ângulo ϕ . Isto significa que o satélite girou ϕ graus até que a medida fosse adquirida.

Considerando o seguinte triângulo esférico:

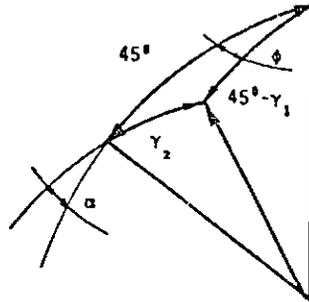


Fig. 3.19 - Triângulo esférico para cálculo de γ_2 .

e resolvendo para γ_2 , tem-se:

$$\cos \gamma_2 = \cos(45 - \gamma_1) \cos 45^\circ + \sin(45 - \gamma_1) \sin 45^\circ \cos \phi \quad (3.54)$$

Com esse ângulo γ_2 pode-se calcular o valor de α da forma

$$\sigma = \frac{1}{2} (90^\circ - \gamma_1 - \gamma_2)$$

$$\sin \frac{\alpha}{2} = \sqrt{\frac{\sin(\sigma - \gamma_2) \sin(\sigma - 45^\circ)}{\sin \gamma_2 \sin 45^\circ}} \quad (3.55)$$

Com os valores de γ_2 e α , pode-se calcular a posição de incidência dos raios solares no detetor. A Figura 3.20 mostra a geometria.

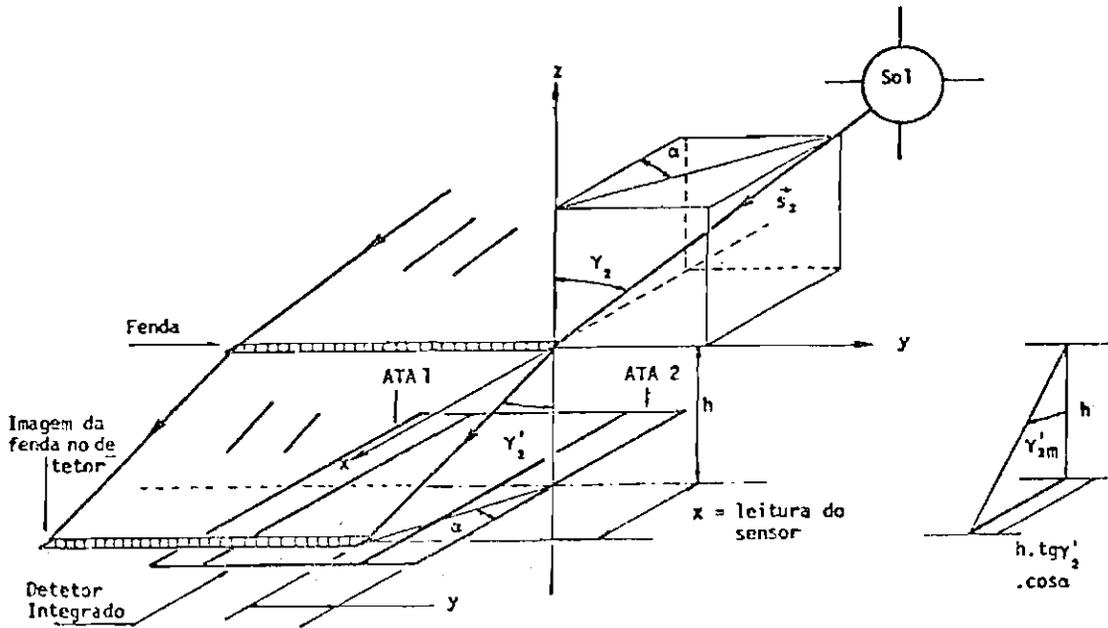


Fig. 3.20 - Incidência dos raios solares no detetor, com erro de α em relação ao plano ideal de leitura.

O ângulo refratado γ_2' é

$$\gamma_2' = \text{sen}^{-1} \left(\frac{\text{sen} \gamma_2}{n} \right). \quad (3.56)$$

As coordenadas (x,y) em que a imagem da fenda inicia, é da do por:

$$\left. \begin{aligned} x &= h \text{tg} \gamma_2' \cdot \text{cos} \alpha \\ y &= h \text{tg} \gamma_2' \cdot \text{sen} \alpha \end{aligned} \right\} \quad (3.57)$$

Com essas coordenadas, pode-se calcular qual a porcentagem dos fotodiodos que é iluminada. O programa no Apêndice A calcula esses parâmetros e imprime as curvas das correntes em função do ângulo ϕ . É possível introduzir um erro de uniformidade entre os ATAs. A diferença entre os ATAs aparece como resultado.

As figuras seguintes apresentam as curvas geradas para várias inclinações γ_1 . O ângulo máximo de disparo da medida ϕ_m , é obtido na faixa em que as diferenças cruzam por zero e está indicado na figura.

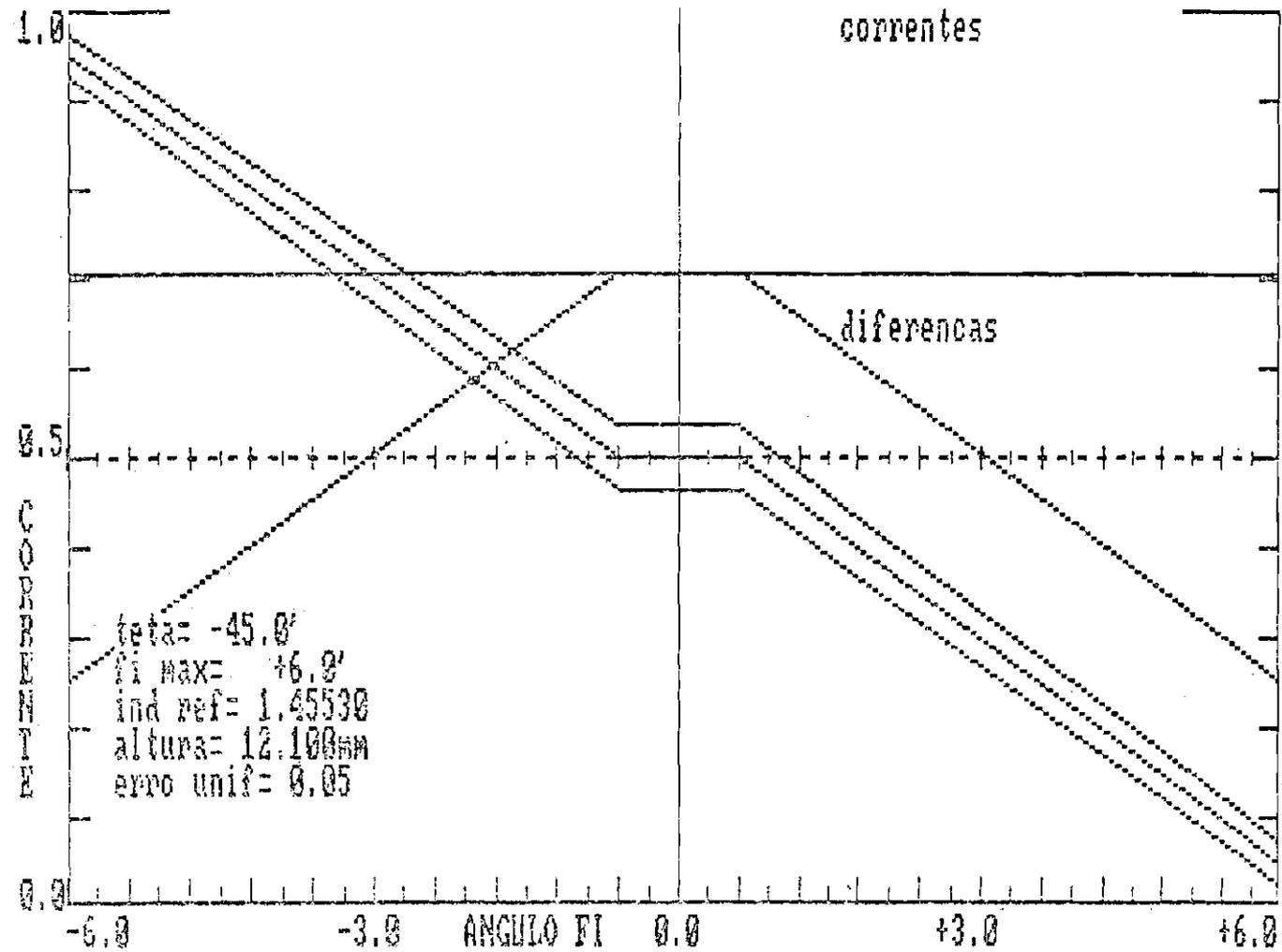


Fig. 3.21a - Curvas das correntes dos fotodiodos ATA e da diferença em função do ângulo de rotação do satélite.

(continua)

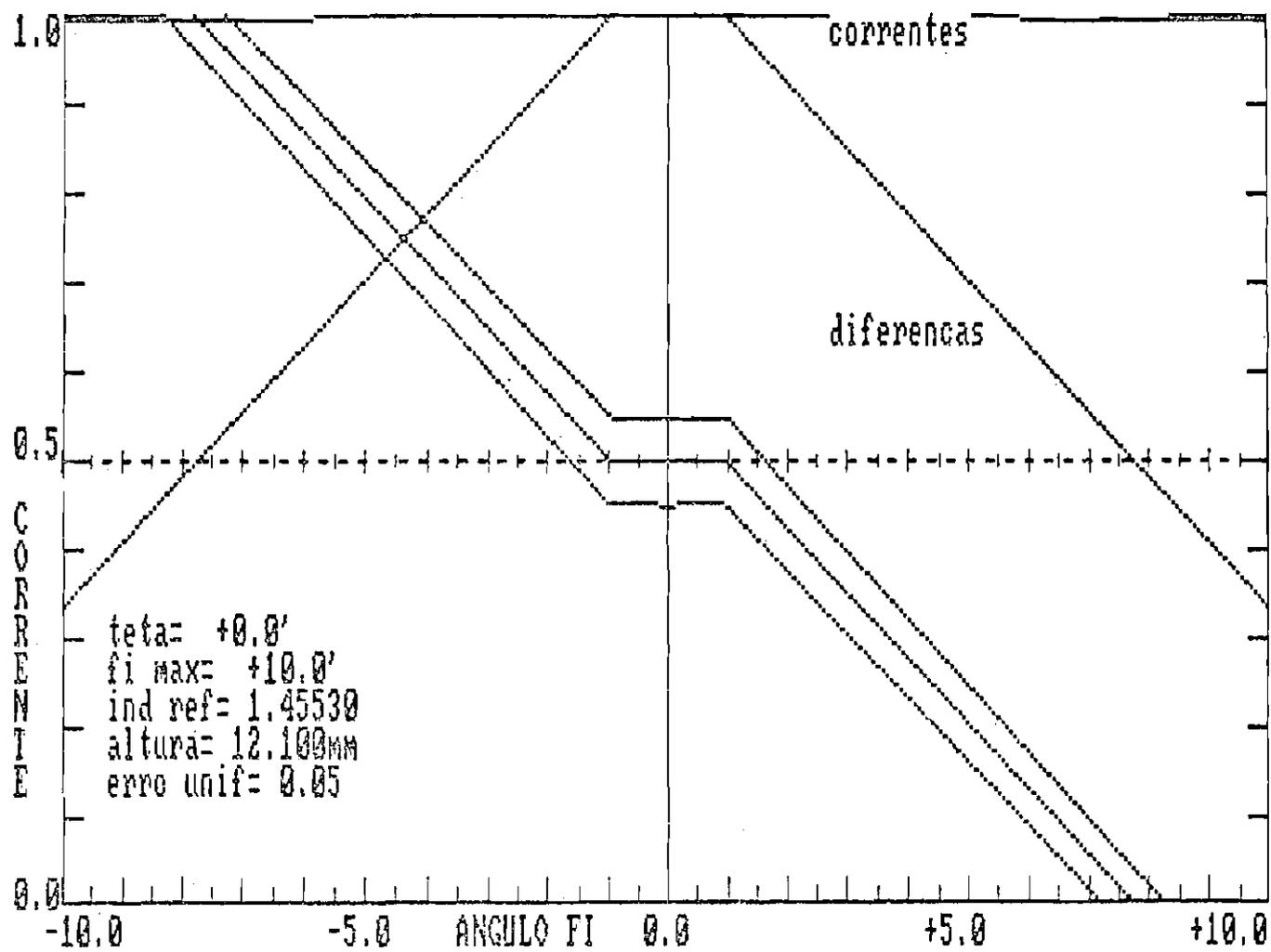


Fig. 3.21b - Continuação

(continua)

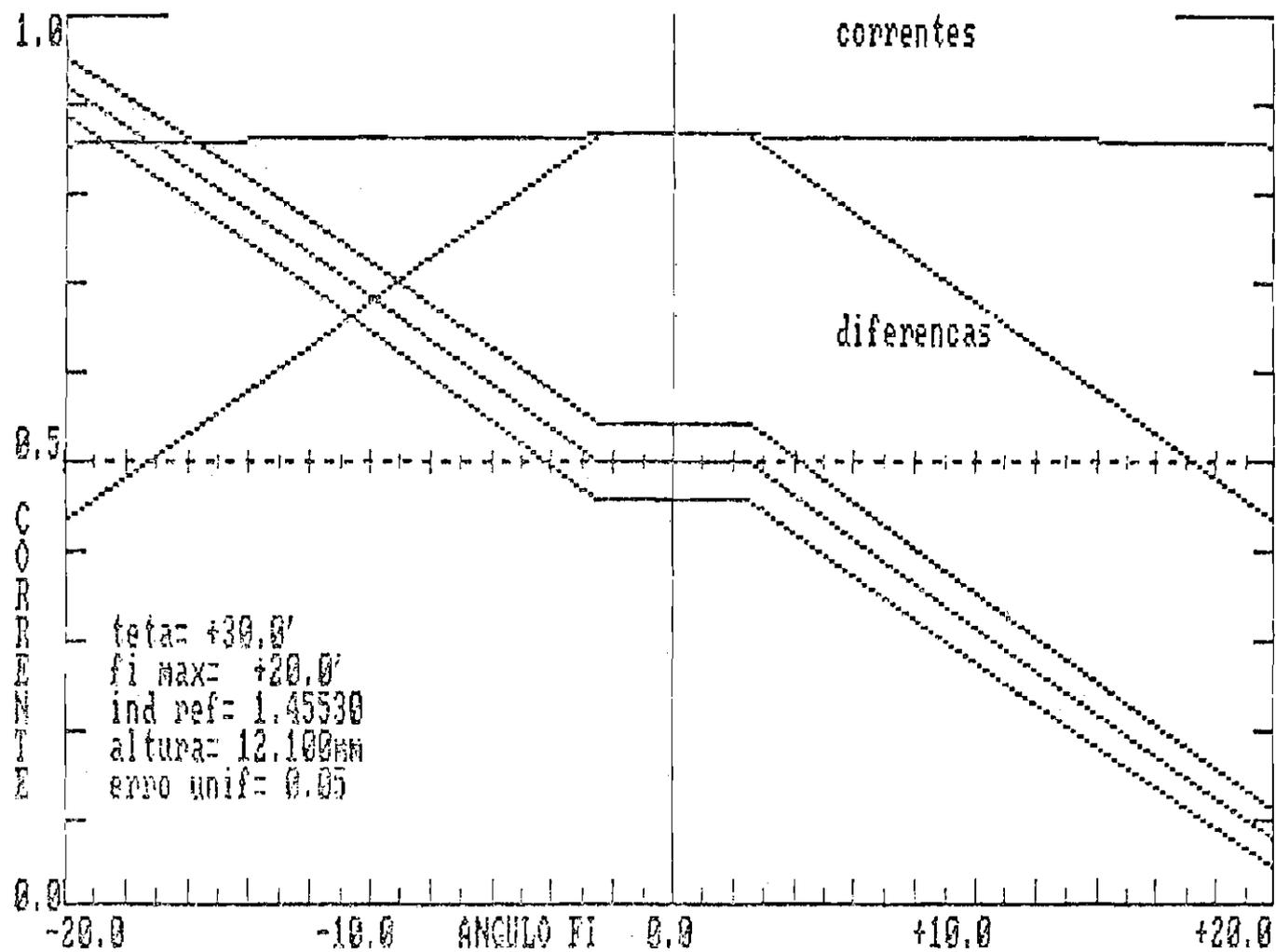


Fig. 3.21c - Continuação

(Continua)

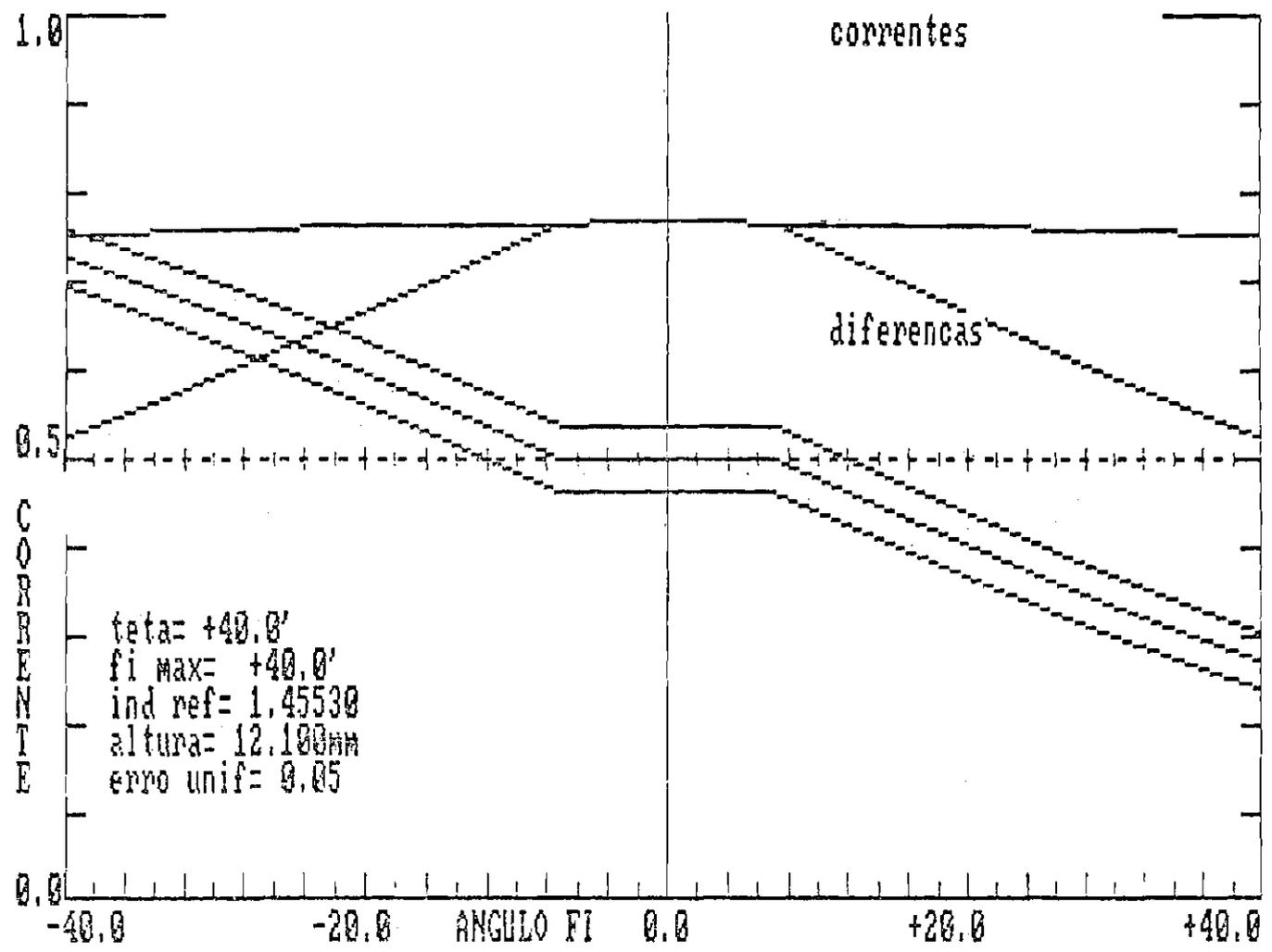


Fig. 3.21d - Continuação

(continua)

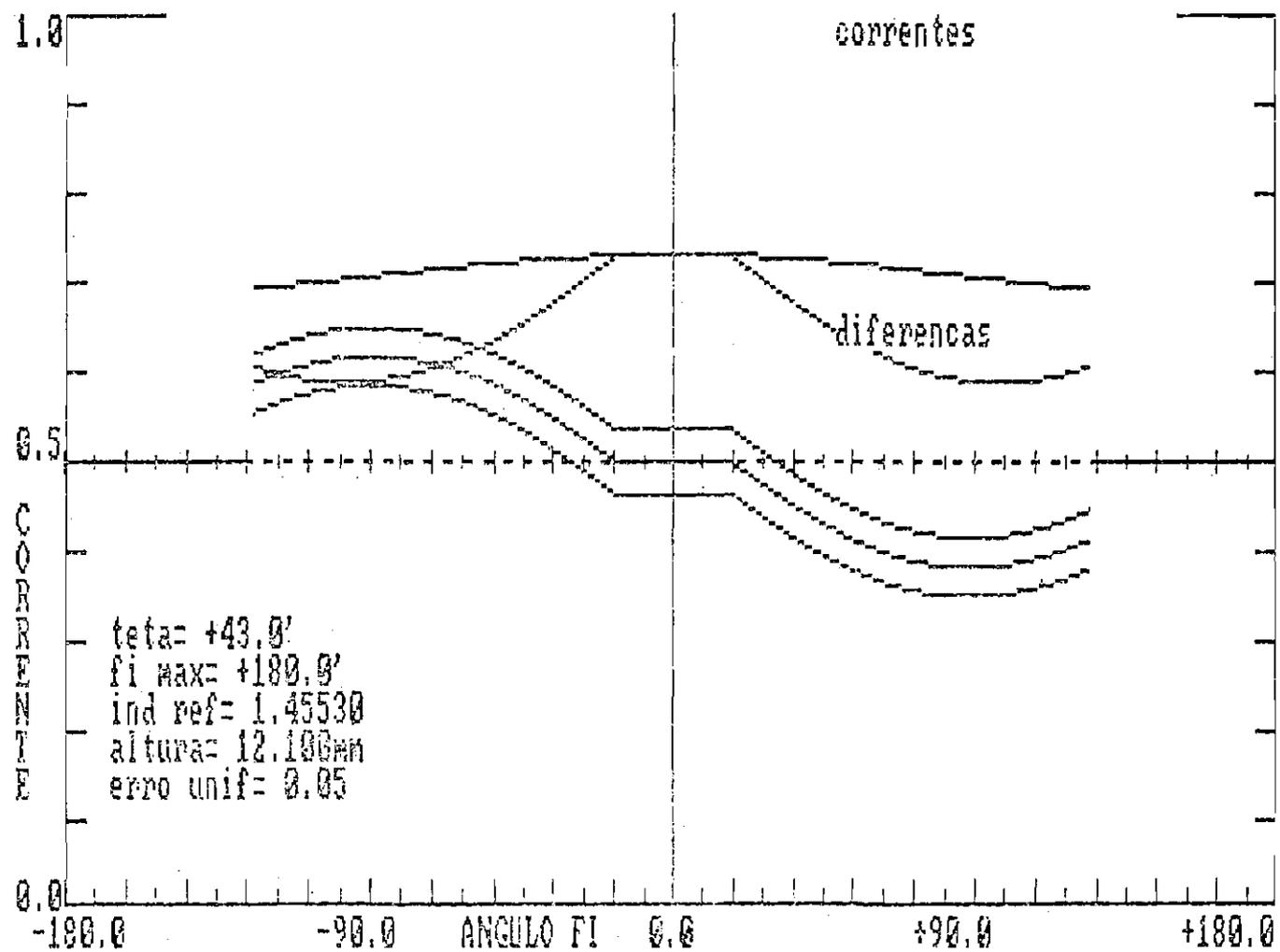


Fig. 3.21e - Conclusão

Quanto mais γ_1 tende a 45° , maiores são os ângulos ϕ de disparo máximo. Da Figura 3.20, nota-se que a leitura real a ser feita é a projeção do raio refratado no plano xz. Então, o ângulo medido refratado será:

$$\begin{aligned} \gamma'_{2m} &= \text{tg}^{-1} \left(\frac{x}{h} \right) = \text{tg}^{-1} \left(\frac{h \text{tg}\gamma'_2 \cos\alpha}{h} \right) = \\ &= \text{tg}^{-1} (\text{tg}\gamma'_2 \cos\alpha) \end{aligned} \quad (3.58)$$

O ângulo medido será:

$$\gamma_{2m} = \text{sen}^{-1} (n \text{sen}\gamma'_{2m}) \quad (3.59)$$

O erro na leitura resulta igual a:

$$E_{ic} = \gamma_{2m} - \gamma_1 \quad (3.60)$$

Das figuras apresentadas e com as equações acima, pode-se fazer a seguinte tabela de erro máximo em função da incidência.

TABELA 3.2

ERRO ANGULAR CAUSADO PELA INCERTEZA NA DETEÇÃO DO CRUZAMENTO

ÂNGULO DE INCIDÊNCIA γ_1	ÂNGULO DE DISPARO MÁXIMO ϕ_m	ERRO ANGULAR $E_{ic} = \gamma_{2m} - \gamma_1$ (MINUTOS DE ARCO)	FIGURA PARA ANÁLISE DE ϕ_m
45°	$1,1^\circ$	0,33	3.21a
0°	$1,7^\circ$	0,76	3.21b
$+ 30^\circ$	$4,3^\circ$	2,22	3.21c
$+ 40^\circ$	$12,2^\circ$	6,48	3.21d
$+ 43^\circ$	$32,3^\circ$	18,3	3.21e

Esse erro ocorre de maneira variada em todo o campo de visão, dependendo da uniformidade e da geometria em cada ponto. É, então, não modelável e não pode ser compensado por uma calibração.

3.2.11 - INCERTEZA NO CONHECIMENTO DO ÍNDICE DE REFRAÇÃO EQUIVALENTE

Através da função de transferência, tem-se a relação do ângulo de incidência θ com o índice de refração equivalente n , que é da forma:

$$\theta = \text{sen}^{-1} \left(\frac{nx}{\sqrt{x^2 + h^2}} \right) \quad (3.61)$$

O índice de refração, a ser utilizado nessa equação, é a média ponderada dos índices de refração da sílica, tendo como peso a corrente gerada em cada comprimento de onda. Daí porque o nome de índice de refração equivalente. Isto será visto na Seção 4.5.

Sendo assim, o cálculo desse índice envolve a realização de medidas em laboratório da resposta espectral do detetor e do espectro do simulador solar. Essas medidas apresentam uma incerteza, que representa uma incerteza no conhecimento do índice equivalente. Será calculado aqui, qual o erro no conhecimento do índice que é admissível.

Derivando-se a Equação (3.61) em relação a n , obtém-se

$$\frac{\partial \theta}{\partial n} = \frac{x}{\sqrt{x^2 + h^2}} \cdot \frac{1}{\cos \theta} \quad (3.62)$$

Essa derivada depende de θ e é máxima para $\theta_0 = 45^\circ$. Para os parâmetros típicos do sensor, resulta:

$$\left. \frac{\partial \theta}{\partial n} \right|_{\theta_0 = 45^\circ} = 40,05^\circ \quad (3.63)$$

Para $\Delta n = 0,001$, o que corresponde a uma faixa de comprimento de onda da luz de aproximadamente $\Delta\lambda = 40$ nm, resulta em:

$$E_n = 2,4 \text{ minutos de arco} \quad (3.64)$$

Não há compensação para esse erro.

3.2.12 - CONSIDERAÇÕES FINAIS

Estão sendo desprezados o envelhecimento dos fotodiodos por radiação, a variação da corrente fotogerada com a temperatura, devido ao ajuste automático de limiar (ATA) existente, que compensa esses fatores. Isto é, a referência, que é o fotodiodo ATA, varia igualmente aos bits e existe então uma compensação dessa variação. A Deriva térmica da eletrônica e da mecânica apresentam efeitos pequenos. A tabela completa de erros, com a soma que representa a precisão do sensor solar é apresentada a seguir.

TABELA 3.3

ORÇAMENTO DE ERROS

TIPO DE ERRO		ERRO EM MINUTOS
E_q	Quantização	$\pm 30,9$
E_f	Fabricação do código	$\pm 2,1$
NEA	Ângulo equivalente de ruído	$\pm 0,02$
E_u	Não-uniformidade dos fotodiodos	$\pm 3,7$
E_{ct}	"Cross-Talk" entre detetores	$\pm 2,6$
E_{os}	"Offset" eletrônico	$\pm 0,58$
$E_{\Delta z}$	Alinhamento do detetor com o prisma	$\pm 1,1$
$E_{\Delta x}$	Alinhamento do detetor com o prisma	$\pm 2,0$

(Continua)

Tabela 3.3 - Conclusão

TIPO DE ERRO		ERRO EM MINUTOS
$E_{\Delta\theta_x}$	Alinhamento do detetor com o prisma	$\pm 1,1$
$E_{\Delta\theta_y}$	Alinhamento do detetor com o prisma	$\pm 1,1$
$E_{\Delta\theta_z}$	Alinhamento do detetor com o prisma	$\pm 2,0$
$E_{\Delta\theta_x}$	Alinhamento da unidade sensora na cabeça óptica	$\pm 0,22$
$E_{\Delta\theta_y}$	Alinhamento da unidade sensora na cabeça óptica	$\pm 1,0$
$E_{\Delta\theta_z}$	Alinhamento da unidade sensora na cabeça óptica	$\pm 0,81$
E_{ic}	Incerteza na detecção do cruzamento (até 40° de incidência)	$\pm 6,48$
E_n	Conhecimento do índice de refração equivalente	$\pm 2,4$
E_{ss}	Precisão do Sensor = Quantização de $\pm 30,9$ mais a soma rms dos outros fatores	$\pm 40,2$

3.3 - PROCESSOS DE FABRICAÇÃO

Para os erros da seção anterior que podem ser compensados por fatores de calibração ou aqueles que dependem da fabricação, será feita uma análise da precisão realmente alcançada com os processos que foram usados para a implementação.

3.3.1 - POSICIONAMENTO DO DETETOR EM RELAÇÃO AO PRISMA COM FENDA

Para este alinhamento, o prisma com a fenda e o detetor são montados em um conjunto de posicionadores angulares e lineares, que permitem todos os graus de liberdade de ajuste. O conjunto todo é montado sobre um posicionador angular automatizado (PAA) com resolução angular de leitura de 18 segundos de arco.

As medidas angulares são corretamente feitas, quanto a fenda está no eixo de rotação do PAA e este é o primeiro alinhamento a ser feito. A fenda é projetada na parede através de uma objetiva de 50 mm,

com a iluminação do Simulador Solar. Quando a imagem se desloca na parede, menos que a largura da fenda dividido por 2, com a rotação do PAA, o alinhamento está alcançado. A precisão desse posicionamento é 11 minutos de arco. Esse erro, quando projetado para a medida, representa apenas 1 segundo de arco.

Os ajustes do detetor em relação ao prisma são feitos de tal forma a obter a melhor resposta possível em termos de desempenho do sensor. O primeiro alinhamento feito é o ângulo $\Delta\theta_z$, referente à Seção 3.2.8.6. Procura-se a igualdade dos sinais dos fotodiodos ATA, na extremidade do detetor, ajustando o posicionador angular $\Delta\theta_z$. Nesse ponto de transição do sinal, como visto na Equação (3.17), a variação da tensão com a distância x é

$$\frac{dV}{dx} = \frac{V_{\text{máx}}}{\ell_f} \quad (3.56)$$

Para $V_{\text{máx}} = 500 \text{ mV}$ e $\ell_f = 180 \text{ } \mu\text{m}$, resulta que:

$$\frac{dV}{dx} = 2,78 \cdot 10^3 \text{ V/m} \quad (3.66)$$

A figura abaixo ilustra o processo de alinhamento.

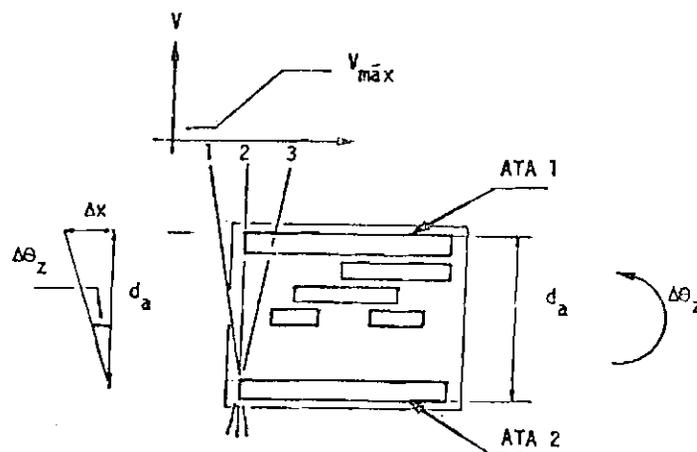


Fig. 3.22 - Ajuste do ângulo $\Delta\theta_z$ do detetor em relação à fenda.

Quando os dois ATAs estão alinhados na posição 2 da figura, os sinais na transição são iguais. Para compensar o erro de uniformidade nesse ponto, é possível dar ganhos diferentes para o ATA1 e para o ATA2, de tal modo a obter o mesmo $V_{\text{máx}}$ na posição 3. A distância entre os ATAs d_a é igual a 14,4 mm. Para obedecer a especificação de $\Delta\theta_z = \pm 2,2$ minutos de arco, é necessário que obtenha-se uma igualdade com:

$$\Delta V = \frac{dV}{dx} \cdot \text{tg}(\Delta\theta_z) \cdot d_a = 25,6 \text{ mV} \quad (3.67)$$

Obter os dois sinais dos ATAs com essa tolerância de igualdade é facilmente realizável, utilizando-se de multímetros para as medições.

O ajuste de $\Delta\theta_x$ é feito de forma semelhante. Inclinando o PAA a 45° do feixe de luz incidente, procura-se novamente a igualdade dos ATAs com o ajuste do ângulo $\Delta\theta_x$. A tensão $V_{\text{máx}}$ é multiplicada por $\cos 45^\circ$ e a largura da imagem da fenda é alterada pela dispersão do prisma. Considera-se então $\ell_f = 250 \mu\text{m}$ e obtêm-se:

$$\left. \frac{dV}{dx} \right|_{\theta = 45^\circ} = 1,41 \cdot 10^3 \text{ V/m} \quad (3.68)$$

Para $\Delta\theta_x = \pm 1,1$ minuto, da Seção 3.2.8.4 resulta que $\Delta z = \pm 5 \mu\text{m}$ e como o prisma está inclinado a 45° , tem-se que $\Delta x = \pm 5 \mu\text{m}$. Resulta:

$$\Delta V = 7,0 \text{ mV} \quad (3.69)$$

A igualdade dentro dessa faixa é também facilmente obtida.

O ângulo $\Delta\theta_y$ é ajustado movimentando-se o PAA de $\pm 45^\circ$ em relação à incidência normal, de tal forma a obter simetria para a transição de um dos fotodiodos ATA. Fixando-se a transição em um determina

do valor (por exemplo $180 \text{ mV} = V_{\text{máx}} \cdot \cos 45^\circ / 2$), o ajuste depende da leitura dos ângulos do PAA, que é ± 36 segundo de arco. Para obter um erro máximo de $E_{\Delta\theta_y} = \pm 1,1$ minuto de arco, e considerando que para a inclinação de 45° , tem-se:

$$\frac{d\theta}{dx} = 0,113 \text{ rad/mm}, \quad (3.70)$$

resulta que $\Delta x = \pm 2,8 \text{ } \mu\text{m}$. Da Equação (3.68) tira-se o valor de igualdade, nos dois extremos, dos sinais do ATA de $\pm 4 \text{ mV}$. É também obtível no laboratório.

O alinhamento Δx é conseguido apontando-se na direção de incidência normal para o simulador solar e movendo-se o posicionador linear Δx até conseguir a transição entre os códigos 63 e 64 do sensor. Para conseguir $\Delta x = \pm 5 \text{ } \mu\text{m}$ e com dV/dx dado por (3.66), resulta de $\Delta V = 14 \text{ mV}$. Esse valor é da ordem do erro eletrônico de "offset", sendo portanto realizável na prática.

O posicionamento no eixo y é feito de forma a conseguir simetria de alinhamento da fenda em relação aos fotodiodos ATAs, como ilustra a Figura 3.23.

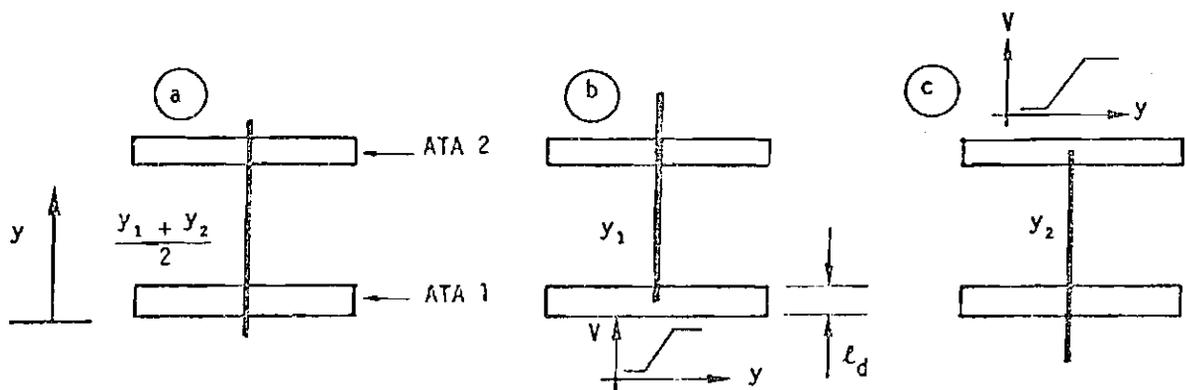


Fig. 3.23 - Ajuste do detector em relação ao prisma na direção y .

Neste caso a tensão V depende de quanto do fotodiodo ATA está sendo iluminado. É feito uma leitura do posicionador y , quando o sinal é metade do máximo para o ATA1, obtendo-se y_1 correspondente à Figura 3.23b. Faz-se o mesmo para o fotodiodo ATA2, resultando na medida y_2 , como mostra a Figura 3.23c. Coloca-se a fenda na metade das medidas, ajustando o posicionador y para $(y_1 + y_2)/2$, que é a posição de alinhamento da Figura 3.23a. Esse posicionador y tem precisão de $\pm 10 \mu\text{m}$, como especificado na Seção 3.2.8.3.

O último ajuste é o do eixo z . É feito de maneira a conseguir a visada especificada da unidade sensora de 46° . Corresponde a uma altura de $h = 12,135 \text{ mm}$. A leitura é feita com PAA, que apresenta precisão elevada de $\pm 36''$.

Tendo feito esses alinhamentos, introduz-se entre o prisma e o detetor três cunhas com cola para a fixação. Este é um ponto crítico, pois o esforço mecânico empregado tende a desalinhar as duas partes.

3.3.2 - ALINHAMENTO DAS UNIDADES SENSORAS NA CABEÇA ÓPTICA

A unidade sensora é presa na cabeça óptica por 3 parafusos com arruelas, que podem ser debastadas de forma a conseguir a melhor posição angular. Para esse alinhamento é utilizado um laser, colocado a uma distância de 6 m do sensor.

A normal ao espelho de alinhamento 2, como indicado na Figura 3.2, é colocada paralela ao eixo de rotação do posicionador angular automatizado. Faz-se com que a luz do laser incida no espelho 2 e volte sobre si mesma, através de um jogo de espelhos. Nota-se facilmente uma variação de 5 mm no retorno do laser em relação a saída do feixe, o que representa 1,43 minutos de desalinhamento entre a normal e o eixo de rotação. Como já visto, este erro representa pouco nas medidas angulares, menos de 1 segundo de arco.

O alinhamento em $\Delta\theta_z$, segundo a Figura 3.15 da Seção 3.2.9, é obtido projetando-se a fenda na parede com incidência da luz do simulador solar inclinada. O PAA é colocado no nível através de um ajuste de bolha e a imagem da fenda é também colocada no prumo com o ajuste das arruelas. A Precisão é a metade da largura da fenda dividido pelo comprimento da mesma, que resulta em ± 11 minutos de erro. Esta incerteza está dentro do valor especificado.

O ajuste em $\Delta\theta_x$ é feito com o laser novamente, alinhando o laser com o espelho de alinhamento 1, girando o PAA de 45° até a unidade sensora que será alinhada. Nesse ponto, ajusta-se a posição dessa unidade até conseguir o retorno do laser sobre si mesmo. Como já visto, para o laser a 6m do espelho, a precisão conseguida é bem melhor que a especificada.

O ângulo $\Delta\theta_y$ pode ser lido com a precisão do PAA, de 36 segundos de arco.

3.3.3 - ALINHAMENTO COM O SIMULADOR SOLAR

Um teodolito é colocado no feixe de luz do simulador solar. A imagem obtida na parede, que é a do disco solar, é alinhada com a cruz de referência do teodolito. Essa imagem apresenta 1 metro de diâmetro e corresponde a 0,7 graus de abertura do simulador. Um erro de 1 cm na definição da borda, resulta em 0,42' no alinhamento. Uma luneta autocolimadora é alinhada com o teodolito, através da cruz que esta emite. A luneta é, então, alinhada com a parte refletora do objeto a ser posicionado. O limitante a este alinhamento é o 0,42' e pode-se considerar que todo o processo é melhor que 1 minuto de arco.

3.3.4 - ERRO DE LEITURA DO POSICIONADOR ANGULAR AUTOMATIZADO

Este posicionador é constituído por um microcomputador, um codificador angular, um motor de passo com 1000 passos por volta e um sistema de engrenagens com redução de 72 vezes. A precisão de leitura é dada pelo codificador angular, que é de 36". A resolução é de 18".

3.3.5 - CARACTERÍSTICAS DO SIMULADOR SOLAR

Durante as calibrações do sensor, a relação Sinal/ Ruído do Simulador Solar vem a acrescentar no NEA, no sentido de aumentar o ângulo equivalente de ruído. A não-uniformidade do feixe do Simulador ao longo da fenda da unidade sensora contribue para diminuir a uniformidade do detetor. Esses dois parâmetros são os mais importantes e influenciam na precisão conseguida para o sensor. A estabilidade temporal não representa muito, pois o sensor possui o ATA que efetua o ajuste automático de limiar.

CAPÍTULO 4

CONSIDERAÇÕES RADIOMÉTRICAS

4.1 - CARACTERÍSTICAS DA RADIAÇÃO SOLAR

O astro de referência, em relação ao qual o Sensor Solar efetua a medida angular, é o Sol e para isso a radiação luminosa solar é utilizada. Dessa forma, surge a necessidade do conhecimento de todas as características dessa radiação no espaço, onde o Sensor deverá operar.

O Sol pode ser considerado uma esfera de gás aquecida por uma reação nuclear em seu interior. A superfície visível dessa esfera, chamada fotosfera, apresenta um diâmetro de $1,392 \cdot 10^6$ Km, usualmente considerado como o diâmetro do Sol (Slater, 1980).

A órbita da Terra ao redor do Sol, apresenta uma pequena excentricidade de 0,016722, com a distância terra-sol variando de 0,983AU a 1,0167AU, onde 1AU é a distância média de $149,6 \cdot 10^6$ Km, chamada unidade astronômica (ou "astronomical unit" = AU)(Slater, 1980).

Com esses dados, resulta que o ângulo subtendido médio, com o qual se vê o Sol da Terra, é de 0,5331 Graus (Wertz, 1978). Isto representa a divergência dos raios solares nas proximidades da Terra.

A potência luminosa por metro quadrado nas proximidades da Terra, chamada constante solar e a sua distribuição espectral tem sido tópico de muitas investigações em muitos lugares e vários diferentes valores foram propostos. Um grande número de medidas foram feitas e agora assume-se o valor médio da constante solar como 1353 W/m^2 . Isto foi aceito como critério de projeto para os veículos espaciais da NASA e como padrão de engenharia pela ASTM("American Society of Testing and Materials") (Thekaekara, 1976).

Esse padrão também inclui uma curva da irradiância espectral solar mostrada na Figura 4.1.

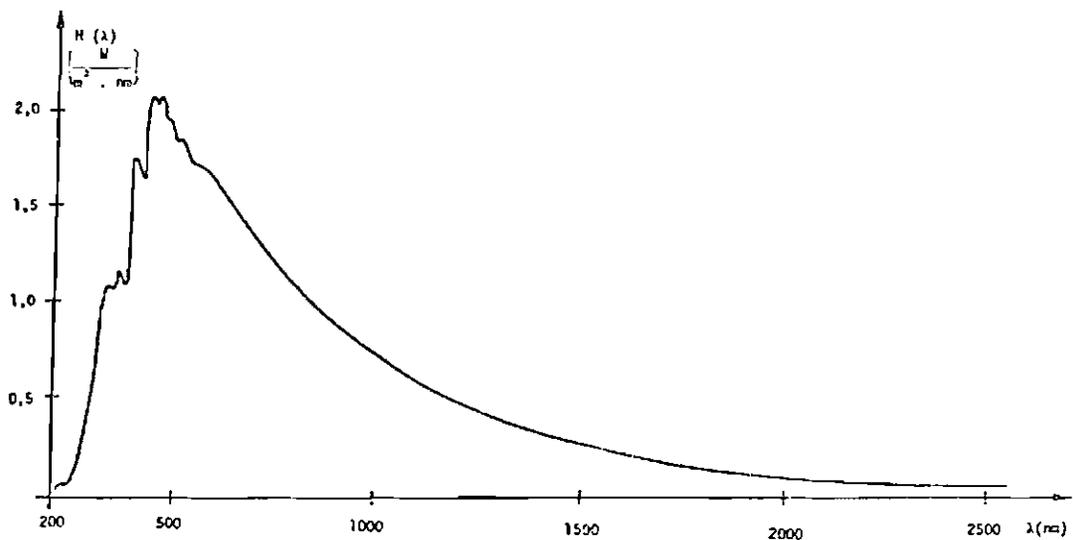


Fig. 4.1 - Padrão de Irradiância Solar espectral.

FONTE: Thekaekara (1976), p. 916.

Essa constante solar tem uma incerteza na medida de $\pm 21 \text{Wm}^{-2}$ ou $\pm 1,5\%$, que é muito grande para uma importante constante da geofísica e astronomia, quando consideramos que a maioria das outras constantes, como a velocidade da luz e constante de Planck, tem a precisão de algumas partes em um milhão (Thekaekara, 1976).

A incerteza na irradiância espectral é consideravelmente maior e varia com a faixa de comprimento de onda. A temperatura efetiva de corpo negro do Sol também depende do comprimento de onda. A Tabela 4.1 apresenta os valores que mais se assemelham a curva de irradiância espectral apresentada.

TABELA 4.1

DEPENDÊNCIA DA TEMPERATURA EFETIVA DE EMISSÃO
DO SOL COM O COMPRIMENTO DE ONDA

COMPRIMENTO DE ONDA, μm		TEMPERATURA EFETIVA DE CORPO NEGRO DA FOTOESFERA (K)	
0.2-0.25	5000	0.55-0.6	5800
0.3	5500	0.65-0.9	5700
0.35-0.4	5700	0.95-1.2	5800
0.45	5900	1.3-4.5	6000
0.48	5950	5.0	5500
0.50	5900	6.0-20	5000

FONTE: Slater (1980), p.42.

4.2 - CÁLCULO DA CORRENTE FOTOGERADA

Para fazer o cálculo da corrente foto gerada pelo fotodiodo considera-se a sua resposta espectral apresentada na Seção 2.4, a irradiação solar espectral vista na seção anterior e a transmitância da óptica.

A corrente foto gerada é obtida da seguinte forma:

$$I_f = S \cos \delta \cdot \int_0^{\infty} T(\lambda) \cdot H(\lambda) \cdot R(\lambda) d\lambda \quad (4.1)$$

onde

I_f = corrente foto gerada pelo fotodiodo (A)

S = área sensitiva do detetor (m^2)

δ = ângulo de desalinhamento entre a direção do Sol e a normal do detetor ($^\circ$)

$R(\lambda)$ = responsividade espectral do detetor (A/W)

$H(\lambda)$ = irradiância solar espectral $\left(\frac{W}{m^2 \cdot nm} \right)$

$T(\lambda)$ = transmitância espectral da óptica (%)

Na faixa de resposta do silício, a transmitância do prisma de sílica fundida é praticamente constante com o comprimento de onda e igual a $T_0 = 96\%$. Com isto, $T(\lambda) = T_0$ pode ser retirado da integral como uma constante multiplicativa.

Para facilitar a resolução da Integral, o espectro do Sol e a resposta do detetor podem ser divididos em várias faixas de comprimento de onda e em cada uma pode ser calculado um valor médio da irradiância e da responsividade. Essas curvas são apresentadas na Figura 4.2.

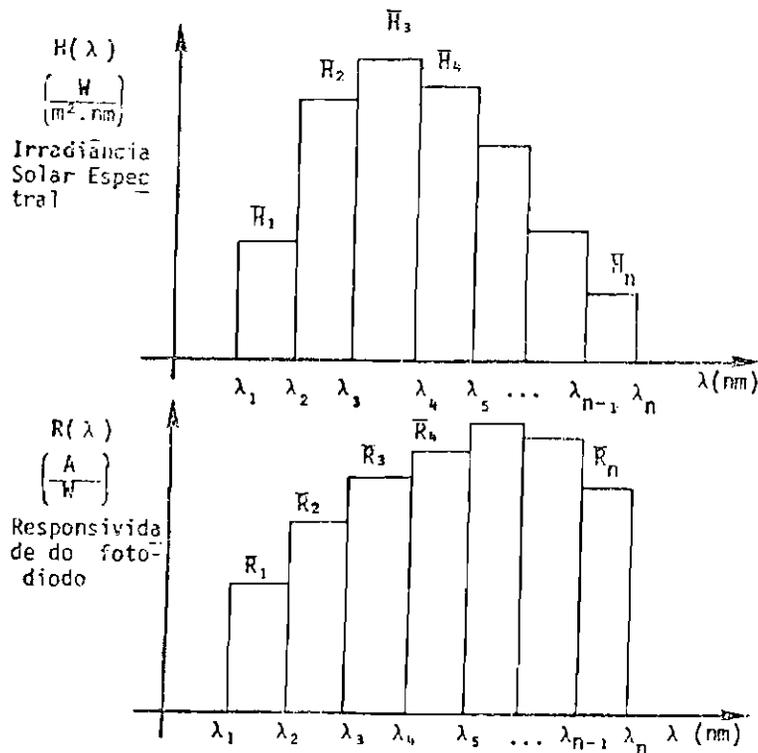


Fig. 4.2 - Divisão da Responsividade do fotodiodo e da Irradiância Solar espectral em faixas de comprimento de onda.

Dessa forma, a integral da Equação(4.1), para o intervalo de resposta do silício (λ_1, λ_n), ficaria:

$$\int_{\lambda_1}^{\lambda_n} H(\lambda) R(\lambda) d\lambda = \bar{H}_1 \bar{R}_1 (\lambda_2 - \lambda_1) + \bar{H}_2 \bar{R}_2 (\lambda_3 - \lambda_2) + \dots + \bar{H}_i \bar{R}_i (\lambda_{i+1} - \lambda_i) + \dots + \bar{H}_{n-1} \bar{R}_{n-1} (\lambda_n - \lambda_{n-1}). \quad (4.2)$$

A Tabela 4.2 apresenta a resolução da integral com as faixas de comprimento de onda adotadas, a irradiância solar média obtida a través da Figura 4.1 e a resposta do fotodiodo média da Figura 2.10.

TABELA 4.2

VALORES UTILIZADOS PARA RESOLUÇÃO DA INTEGRAL DA CORRENTE FOTOGERADA

i	λ_i (nm)	λ_{i+1} (nm)	IRRADIÂNCIA SOLAR $\bar{H}_i \left(\frac{W}{m^2 \cdot nm} \right)$	RESPONSIVIDADE $\bar{R}_i \left(\frac{A}{W} \right)$	$\Delta\lambda$ (nm)	$\Delta\Sigma$	
1	400	450	1,707	0,195	50	16,64	
2	450	500	2,021	0,325	50	32,84	
3	500	550	1,846	0,405	50	37,38	
4	550	600	1,709	0,460	50	39,31	
5	600	650	1,611	0,505	50	40,68	
6	650	700	1,456	0,550	50	40,04	
7	700	750	1,315	0,575	50	37,81	
8	750	800	1,185	0,595	50	35,25	
9	800	850	1,061	0,605	50	32,09	
10	850	900	0,948	0,595	50	28,20	
11	900	950	0,869	0,565	50	24,55	
12	950	1000	0,802	0,455	50	18,25	
13	1000	1050	0,487	0,315	50	7,67	
TOTAL					→	Σ	= 390,71 $\frac{A}{m^2}$

A área iluminada do fotodiodo é obtida da seguinte maneira:

$$S = \text{largura do fotodiodo} \cdot \text{largura da fenda}; \quad (4.3)$$

e portanto:

$$S = 1,4 \text{ mm} \times 100 \text{ } \mu\text{m} = 1,4 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2. \quad (4.4)$$

Considerando incidência normal, o ângulo δ é igual a zero e a corrente é obtida multiplicando-se o resultado da soma da Tabela 4.2 pela área iluminada da Equação (4.4) e transmitância do prisma T_0 , resultando em:

$$I_f = 53 \mu\text{A}. \quad (4.5)$$

4.3 - IMAGEM DA FENDA NO DETETOR

O prisma de quartzo apresenta um índice de refração que é função do comprimento de onda da luz incidente. Diz-se que existe uma dispersão da luz no prisma. Devido a isso, para uma incidência oblíqua, a imagem da fenda num determinado comprimento de onda λ_1 forma-se em posição diferente em relação a outro λ_n . A Figura 4.3 ilustra esse efeito.

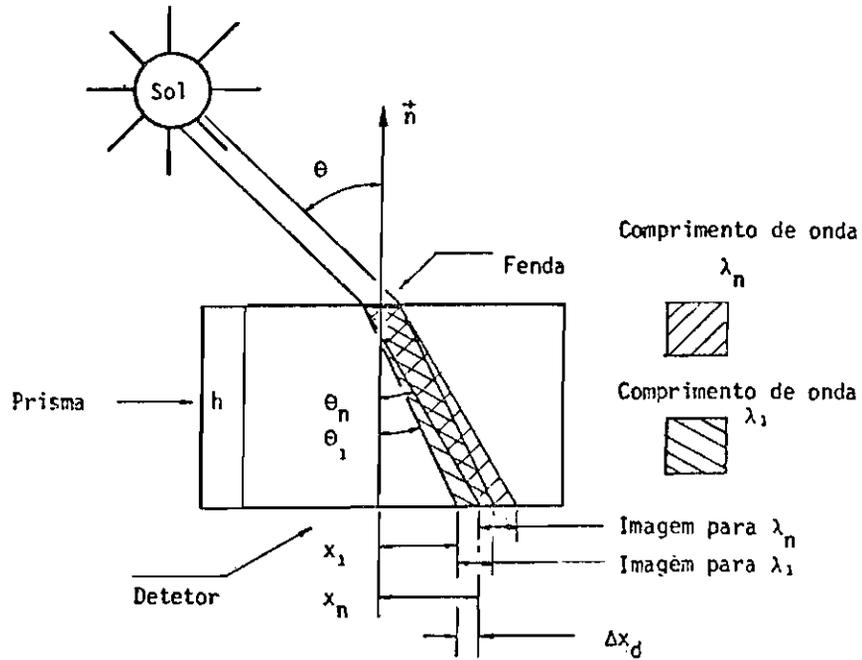


Fig. 4.3 - Variação da posição da imagem da fenda com o comprimento de onda, devido à dispersão no prisma.

A distância Δx_d , entre os centros das imagens que correspondem aos extremos da faixa de resposta do silício, para qualquer inclinação θ pode ser calculada. Supondo que a luz solar incida com ângulo θ no prisma e que os dois comprimentos de onda extremos de resposta do silício são λ_1 e λ_n com índices de refração n_1 e n_n , resulta da aplicação da lei de Snell que:

$$\text{sen}\theta = n_1 \text{sen}\theta_1 = n_n \text{sen}\theta_n \quad (4.6)$$

Tomando as tangentes dos ângulos refratados na Figura 4.3, tem-se:

$$\text{tg}\theta_1 = \frac{x_1}{h} \quad \text{e} \quad \text{tg}\theta_n = \frac{x_n}{h} \quad (4.7)$$

Associando as Equações (4.6) e (4.7) e sabendo que:

$$\Delta x_d = x_n - x_1, \quad (4.8)$$

tem-se a distância entre os centros das imagens:

$$\Delta x_d = h \left\{ \text{tg} \left[\text{sen}^{-1} \left(\frac{\text{sen}\theta}{n_n} \right) \right] - \text{tg} \left[\text{sen}^{-1} \left(\frac{\text{sen}\theta}{n_1} \right) \right] \right\} \quad (4.9)$$

Esse valor é máximo para a inclinação máxima θ de 45° . Substituindo a altura h típica do prisma de 12,135 mm e os índices de

$$\begin{aligned} n_1 &= 1,4701 \\ n_n &= 1,4498, \end{aligned} \quad (4.10)$$

associados aos comprimentos de onda $\lambda_1 = 400 \text{ nm}$ e $\lambda_n = 1050 \text{ nm}$, resulta que:

$$\Delta x_d = 120 \text{ } \mu\text{m} \quad (4.11)$$

A divergência dos raios solares também exerce influência na imagem da fenda, introduzindo um alargamento como pode ser observado na Figura 4.4.

Considerando que $\Delta\theta$ é essa abertura angular, os extremos da inclinação de incidência dos raios solares para um apontamento θ do sensor para o centro do Sol são:

$$\begin{aligned} \theta_1 &= \theta - \frac{\Delta\theta}{2} \\ \theta_2 &= \theta + \frac{\Delta\theta}{2} \end{aligned} \quad (4.12)$$

O alargamento da imagem de Δx_c é calculado de maneira análoga ao feito para a dispersão, ou seja, aplicando a lei de Snell para os dois extremos:

$$\text{sen}\theta_1 = n \cdot \text{sen}\theta_1' \quad (4.13)$$

$$\text{sen}\theta_2 = n \cdot \text{sen}\theta_2'$$

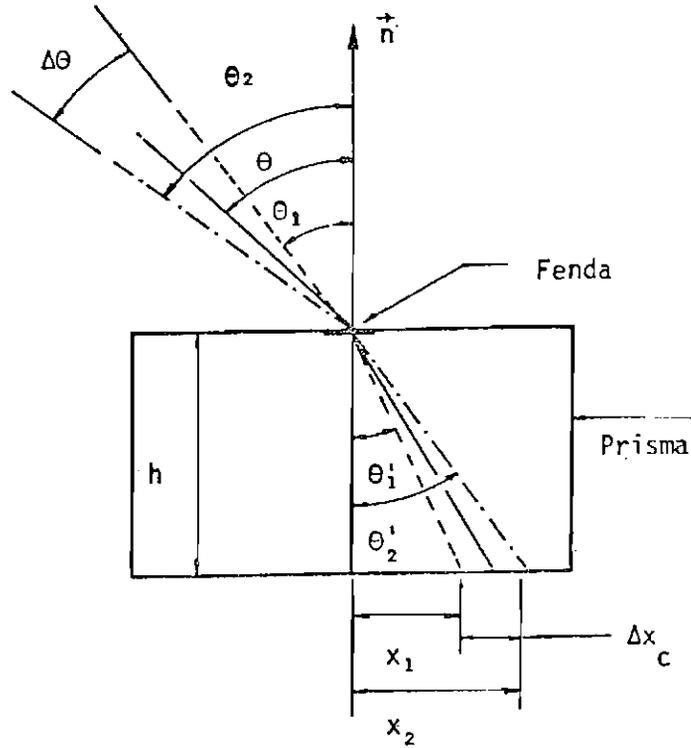


Fig. 4.4 - Efeito da divergência dos raios solares na imagem da fenda.

Com a aplicação das Equações (4.7), (4.8) e (4.12) resulta:

$$\Delta x_c = h \left\{ \text{tg} \left[\text{sen}^{-1} \left(\frac{\text{sen}(\theta + \frac{\Delta\theta}{2})}{n} \right) \right] - \text{tg} \left[\text{sen}^{-1} \left(\frac{\text{sen}(\theta - \frac{\Delta\theta}{2})}{n} \right) \right] \right\} \quad (4.14)$$

A Figura 4.5 apresenta um gráfico de Δx_c em função da inclinação θ , onde pode ser observado que o valor máximo é:

$$\Delta x_c = 82 \text{ } \mu\text{m} \quad (4.15)$$

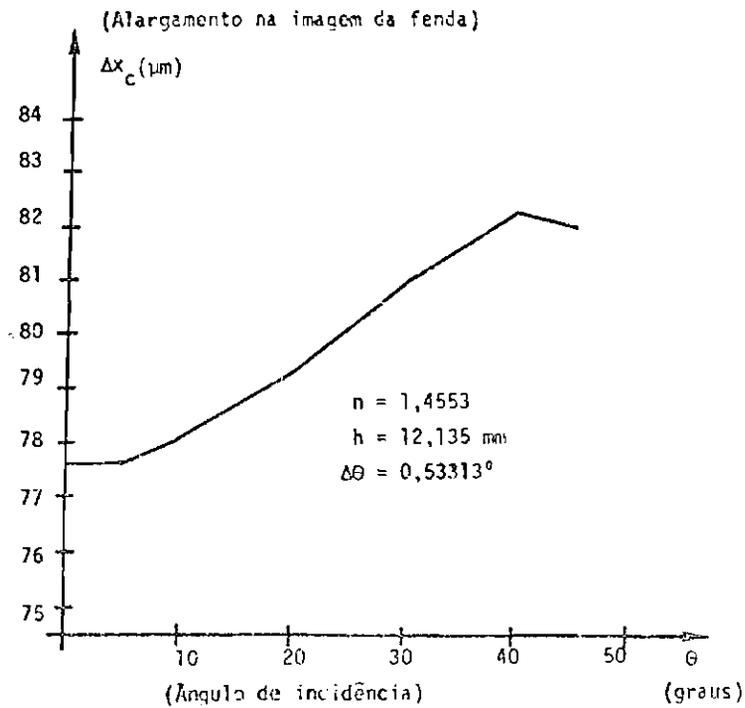


Fig. 4.5 - Gráfico do Alargamento na imagem da fenda Δx_c , ocasionado pela divergência dos raios solares.

Os raios solares, passando pela fenda, sofrem difração e esse efeito também influencia a imagem no detector. Para uma fenda de $100 \mu\text{m}$ de largura, distância ao anteparo de $12,2 \text{ mm}$ e comprimento de onda de 700 nm , a análise de difração pela aproximação de Fresnel resulta na distribuição da Figura 4.6. A largura entre os pontos de meia intensidade $\bar{\epsilon}$ é de aproximadamente $80 \mu\text{m}$.

A imagem da fenda no detector $\bar{\epsilon}$ é a composição dos efeitos de dispersão do prisma, abertura angular do Sol e da difração na fenda. A largura dessa imagem determina o menor tamanho do retículo do código de Gray K_c , que pode ser utilizado.

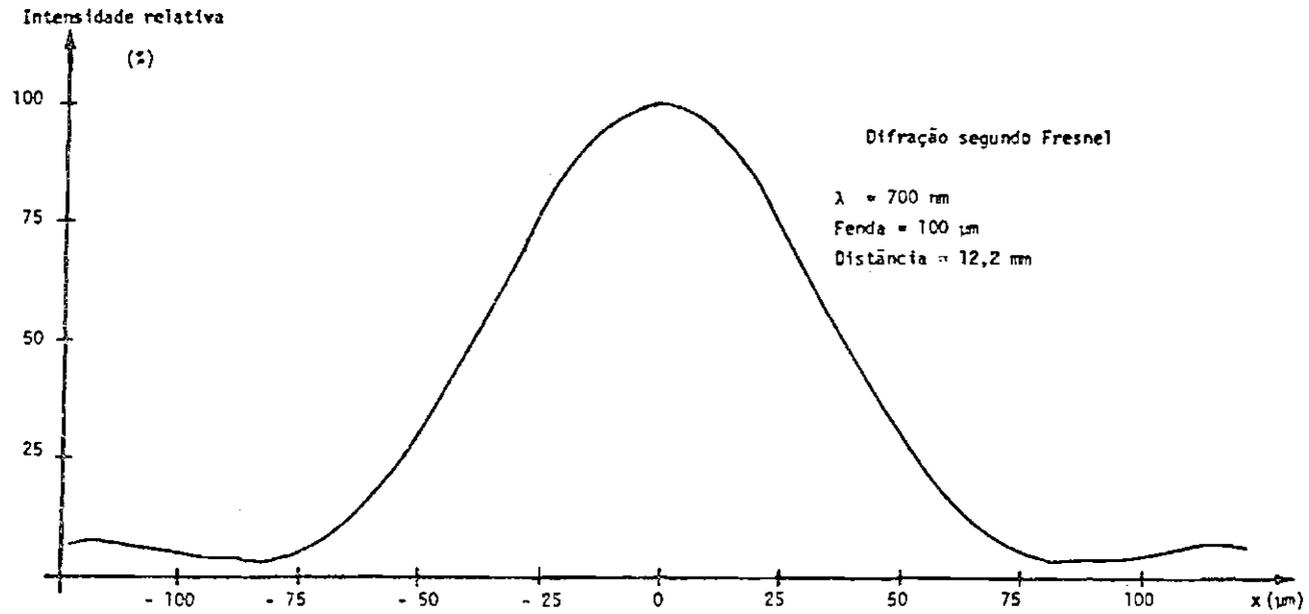


Fig. 4.6 - Distribuição da Intensidade de luz com λ de 700 nm, difratada em uma fenda de 100 μm, com distância ao anteparo de 12,2 mm.

4.4 - INFLUÊNCIA DO ALBEDO TERRESTRE

"O albedo de um objeto é a fração de energia incidente que é refletida de volta ao espaço" (Wertz, 1978, p. 83). A radiação solar refletida pela Terra, chamada albedo terrestre, exerce importante influência no funcionamento do Sensor Solar. A irradiância devido ao albedo, dependendo da visada do Sensor, pode atingir níveis de 30% a 40% da solar. Significa que o sinal, correspondente a esta radiação, deve ser bem determinado, para que a presença da terra no campo de visada não ocasiona um erro de leitura.

Essa radiação refletida depende das condições da atmosfera, tal como a existência de nuvens que refletem mais que a vegetação, e a localização na Terra. Na região dos polos, a reflexão é também maior, da ordem de 80%. Todos esses aspectos foram considerados em vários trabalhos e experimentos. A Figura 4.7 apresenta um mapa de reflexão para a faixa de 0.2 - 4.7 μm de comprimento de onda da luz.

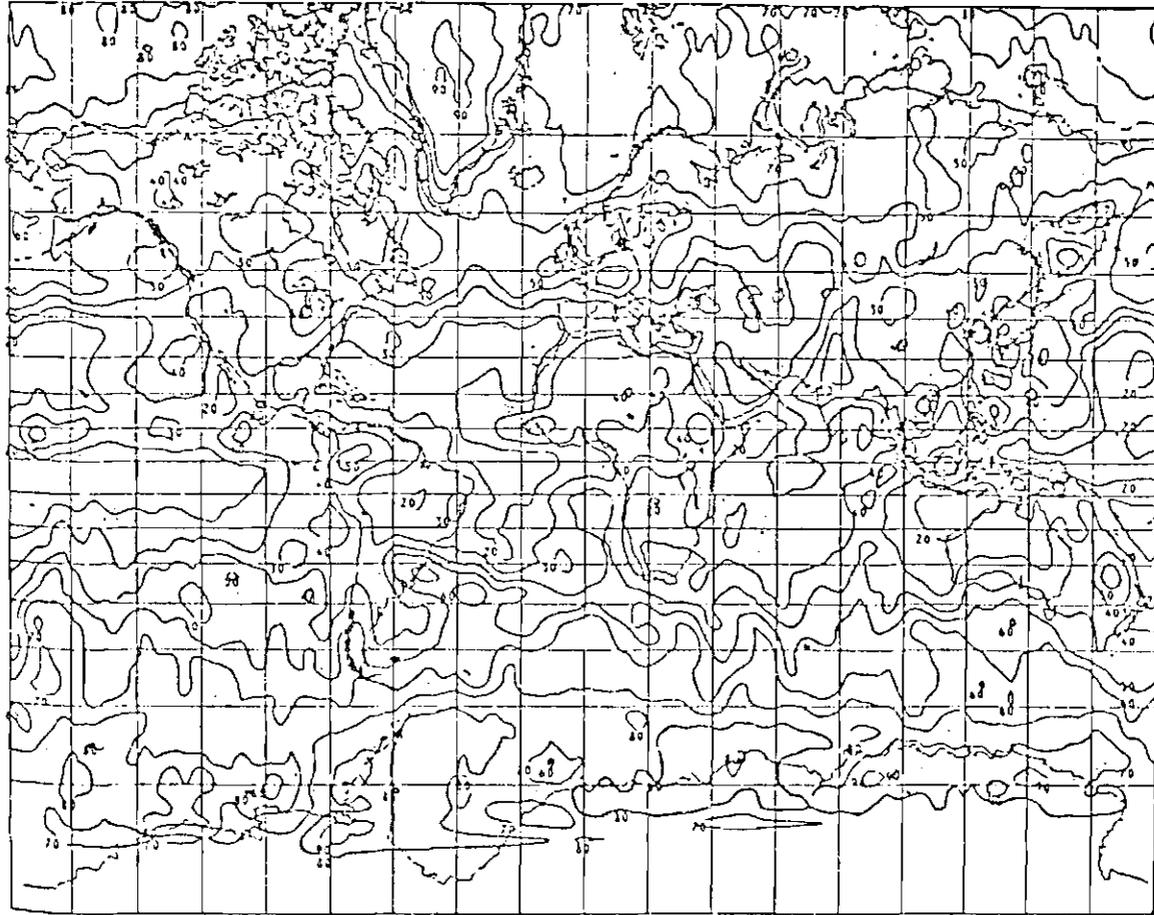


Fig. 4.7 - Mapa do Albedo em agosto de 1975 para 0.2-4.7 μm .

FONTE: Smith et alii (1977), p. 315.

Para o cálculo da potência incidente no detetor, referente ao albedo, é necessário o conhecimento da órbita do satélite ao redor da Terra. Para a Missão Coleta de Dados, a órbita é equatorial com inclinação de 25° e altura de 700 Km. A Figura 4.8 ilustra o posicionamento do Satélite.

A radiância de um elemento de área na terra é dada por:

$$L = \frac{E_0 \rho}{\pi} \cdot \cos \delta$$

onde:

$$L = \text{radiância do elemento em } \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{sr}}$$

$$E_0 = \text{irradiância solar na terra} = 1353 \text{ W/m}^2$$

$$\rho = \text{albedo médio no equador} = 0,34$$

$$\delta = \text{ângulo entre a normal ao elemento de área e a direção do Sol} = 2,5^\circ$$

Efetando o cálculo da radiância, obtém-se:

$$L = 146 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{sr}} \quad (4.16)$$

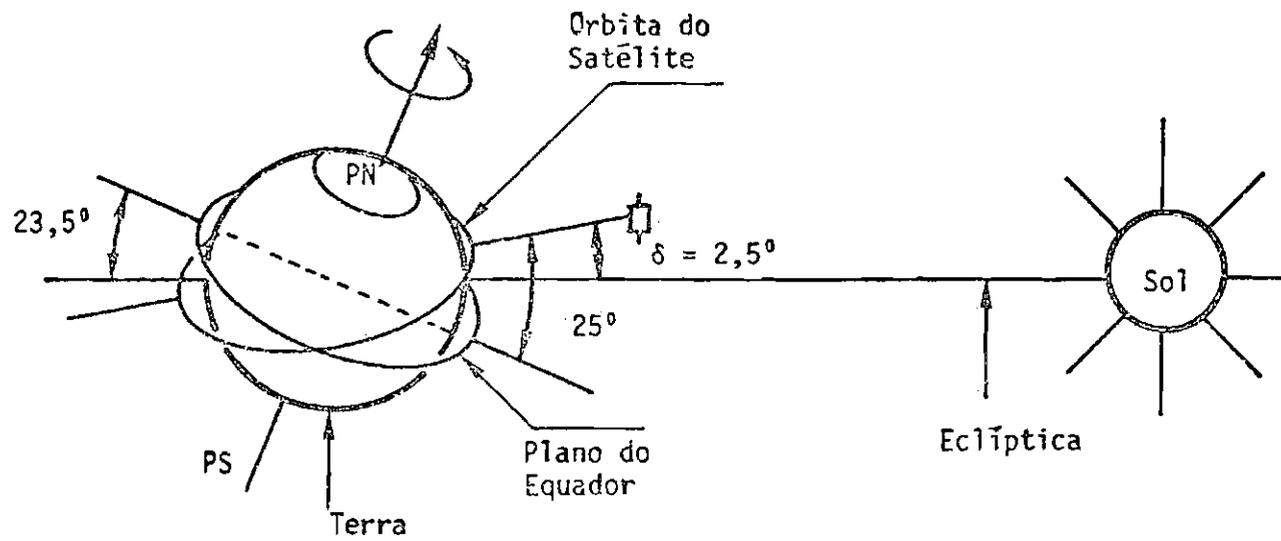


Fig. 4.8 - Órbita do Satélite.

Em uma análise de pior caso, considera-se que todos os pontos na superfície terrestre irradiam igualmente, e que devido à altura da órbita, a superfície é praticamente plana. Pode-se, então, assumir que os pontos da fenda da unidade sensora irradiam com os mesmos $146 \text{ W/m}^2 \cdot \text{sr}$. A Figura 4.9, mostra a geometria utilizada para cálculo

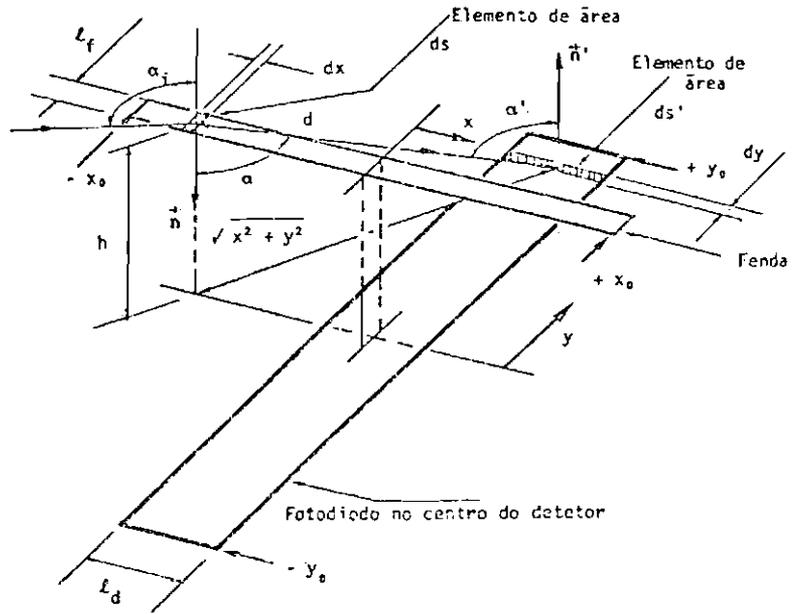


Fig. 4.9 - Geometria para cálculo da potência incidente no Fotodiodo, referente ao albedo.

A potência irradiada pelo elemento de área ds da fenda e incidente em ds' do fotodiodo, é dada por:

$$d^2\phi_a = L \cdot \cos\alpha \cdot \cos\alpha' \cdot ds \cdot ds' / d^2 \quad (4.17)$$

Da Figura 4.9 obtêm-se que:

$$ds = dx \cdot l_f$$

$$ds' = dy \cdot l_d \quad (4.18)$$

$$d = \sqrt{h^2 + x^2 + y^2}$$

Considerando a refração no prisma, o ângulo entre a normal ao elemento que irradia ds e a direção que o une a ds' , é dado por:

$$\cos\alpha = \cos\alpha_j = \sqrt{1 - \frac{n^2(x^2 + y^2)}{x^2 + y^2 + h^2}} \quad (4.19)$$

O valor de $\cos\alpha_j$ é conseguido de forma análoga à utilizada para obter as Equações de (3.5) a (3.9). O cosseno do ângulo entre a normal de ds' e essa direção é o mesmo. Assim, a potência total incidente no fotodiodo é:

$$\phi_a = L \cdot \ell_f \cdot \ell_d \cdot \int_{-y_0}^{+y_0} \int_{-x_0}^{+x_0} \frac{(1-n^2)x^2 + (1-n^2)y^2 + h^2}{(x^2 + y^2 + h^2)^2} dx dy \quad (4.20)$$

Resolvendo a integral para os parâmetros típicos do sensor, obtêm-se:

$$\phi_a \cong 19,3 \mu W \quad (4.21)$$

A potência diretamente do Sol, que incide no detetor, é:

$$\phi_s = E_0 \cdot \ell_f \cdot \ell_d, \quad (4.22)$$

onde $\ell_f = 100 \mu m$ e $\ell_d = 1,4 mm$, então:

$$\phi_s = 189 \mu W \quad (4.23)$$

Portanto, a potência de albedo equivale a aproximadamente 10% da Solar. Será visto na Seção 5.2.2 que, através de um circuito eletrônico, é possível evitar que o albedo ocasione um erro de leitura do sensor. Existe um limiar, no meio da faixa de iluminação compreendida entre a solar e o albedo terrestre, que limita o nível de potência luminosa a ativar o gatilho de dado do sensor. Abaixo desse valor, não é considerado como iluminação do Sol e o dado não é armazenado.

4.5 - ÍNDICE DE REFRAÇÃO EQUIVALENTE

Para a utilização da função de transferência é necessário que se conheça o índice de refração em que a unidade sensora responde. Esse índice equivalente depende da distribuição espectral da irradiância solar, da responsividade do fotodiodo e da dispersão no prisma. Pode-se definir um índice de refração que seja uma média ponderada, tendo como pesos as correntes obtidas para cada comprimento de onda. Da forma:

$$\eta_{eq} = \frac{\int H(\lambda) R(\lambda) n(\lambda) d\lambda}{\int H(\lambda) R(\lambda) d\lambda} \quad (4.24)$$

Os termos $H(\lambda_i)$ $R(\lambda_i)$ representam as correntes geradas para o comprimento de onda λ_i . O cálculo desse índice, para os parâmetros apresentados do sensor, resulta em:

$$\eta_{eq} = 1.4553. \quad (4.25)$$

CAPÍTULO 5

ELETRÔNICA

5.1 - MODELO EQUIVALENTE DOS FOTODIODOS E O AMPLIFICADOR

A análise do funcionamento da eletrônica requer o conhecimento dos dispositivos utilizados na detecção da radiação solar. Para isso, existem modelos onde todos os parâmetros de interesse são considerados. Na Figura 5.1 é apresentado um deles.

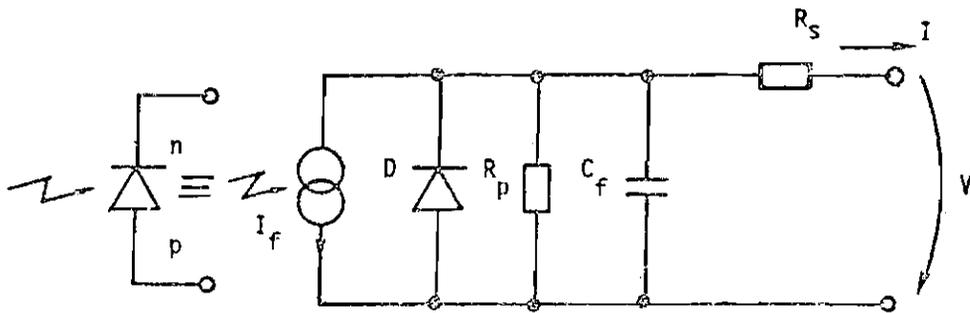


Fig. 5.1 - Modelo equivalente dos Fotodiodos.

Onde:

- I_f = corrente fotogerada proporcional à potência incidente.
- R_p = resistência em paralelo da ordem de $10K\Omega$
- R_s = resistência em série da ordem de 10Ω
- C_f = capacitância paralela de aproximadamente $6nF$

A este modelo é associada a curva $I \times V$ para vários níveis de iluminação, como visto na Figura 5.2.

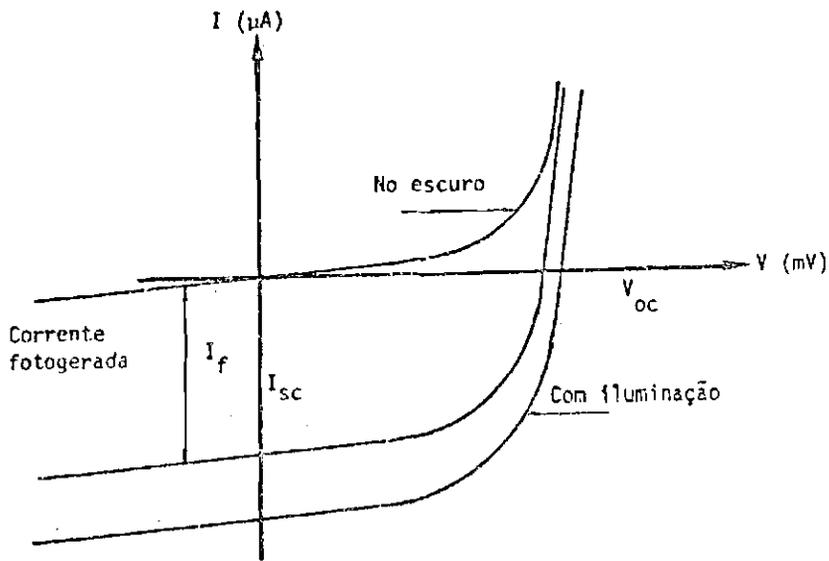


Fig. 5.2 - Característica $I \times V$ dos Fotodiodos.

Quando o fotodiodo está em curto, a corrente de curto circuito I_{sc} é praticamente igual à corrente fotoogerada e proporcional à potência luminosa incidente. No caso de circuito aberto, a tensão V_{oc} varia exponencialmente com a potência incidente. Por esta razão, os sinais dos fotodiodos são amplificados no modo corrente; isto é, é utilizado um amplificador que converte a corrente de curto circuito em tensão dando um ganho $V_o = R_r \cdot I_f$. O circuito utilizado é o da Figura 5.3.

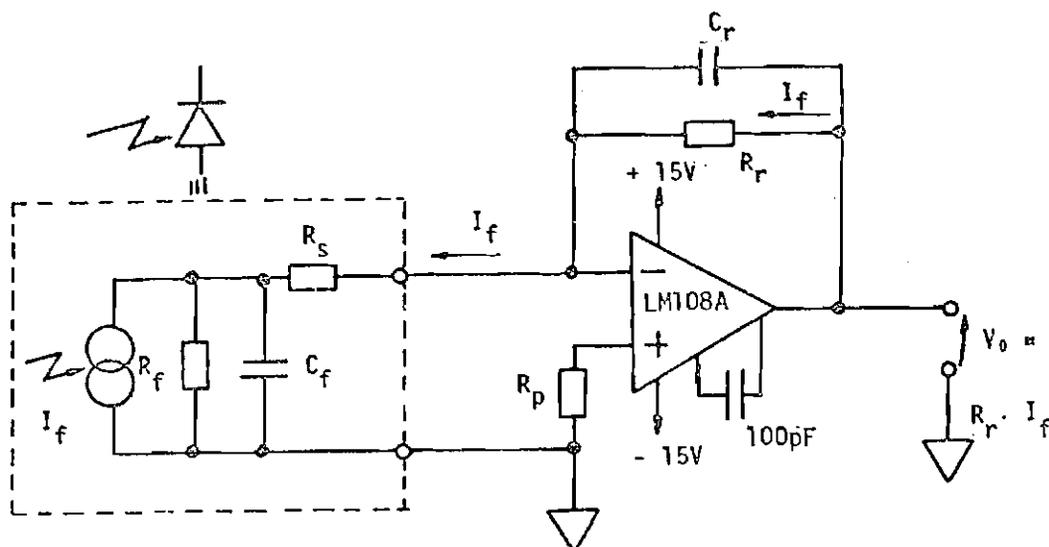


Fig. 5.3 - Circuito do Amplificador dos Fotodiodos.

Dessa forma, a corrente foto gerada \bar{I}_f é convertida em tensão através do resistor R_r , resultando em $V_o = R_r \cdot I_f$. O fotodiodo trabalha em curto-circuito, pois na entrada negativa do amplificador existe um terra virtual. Como visto na Seção 4.2, a corrente foto gerada será de $53 \mu\text{A}$ e com $R_r = 50\text{K}\Omega$, obtêm-se um sinal de saída de $2,6\text{V}$.

O resistor R_p é escolhido de tal forma a compensar a corrente de polarização do estágio diferencial do amplificador, da seguinte forma:

$$R_p = \frac{R_r \cdot R_f}{R_r + R_f} = 8,3\text{K}\Omega \quad (5.1)$$

O capacitor C_r é utilizado para compensação do amplificador em alta frequência, pois o capacitor equivalente do fotodiodo C_f introduz um zero para $\omega_c = \frac{1}{C_f (R_r // R_f)}$ e que deve ser compensado por um polo. Para isto, introduz-se C_r de modo que:

$$\frac{1}{C_r R_r} < \frac{1}{C_f (R_r // R_f)} \quad (5.2)$$

Isolando o valor de C_r , tem-se:

$$C_r > C_f \cdot \left(\frac{R_r // R_f}{R_r} \right) = 3nF \quad (5.3)$$

A frequência de corte do circuito fica:

$$f_c = \frac{1}{2\pi C_r \cdot R_r} \cong 1kHz \quad (5.4)$$

O amplificador LM108A possui uma tensão de "offset" equivalente de entrada e_{i0} de $\pm 1mV$ (máx), que aparece na saída como:

$$V_{of} = \left(1 + \frac{R_r}{R_f} \right) \cdot e_{i0} = \pm 6mV \quad (5.5)$$

O mesmo ganho de 6 ocorre para a tensão equivalente de ruído.

5.2 - PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO

A eletrônica do Sensor Solar tem por função amplificar, digitalizar e armazenar o código de informação angular, no instante de cruzamento do campo de visada do Sensor pelo Sol. O código fica disponível em um registro de saída e é atualizado com a detecção da passagem pelo Sol.

Além disso, é fornecida uma saída para medida da rotação do satélite.

Nesta seção, será analisado o funcionamento da Eletrônica e suas partes constituintes.

5.2.1 - DETEÇÃO DE CRUZAMENTO

O instante em que os dados são armazenados é definido pelas formas de onda dos sinais dos fotodiodos ATAs, que se obtêm quando

o satélite está estabilizado em rotação. Essas ondas são decorrentes da geometria existente na unidade sensora e a corrente de cada ATA é função da posição do Sol. A Figura 5.4 mostra essas curvas.

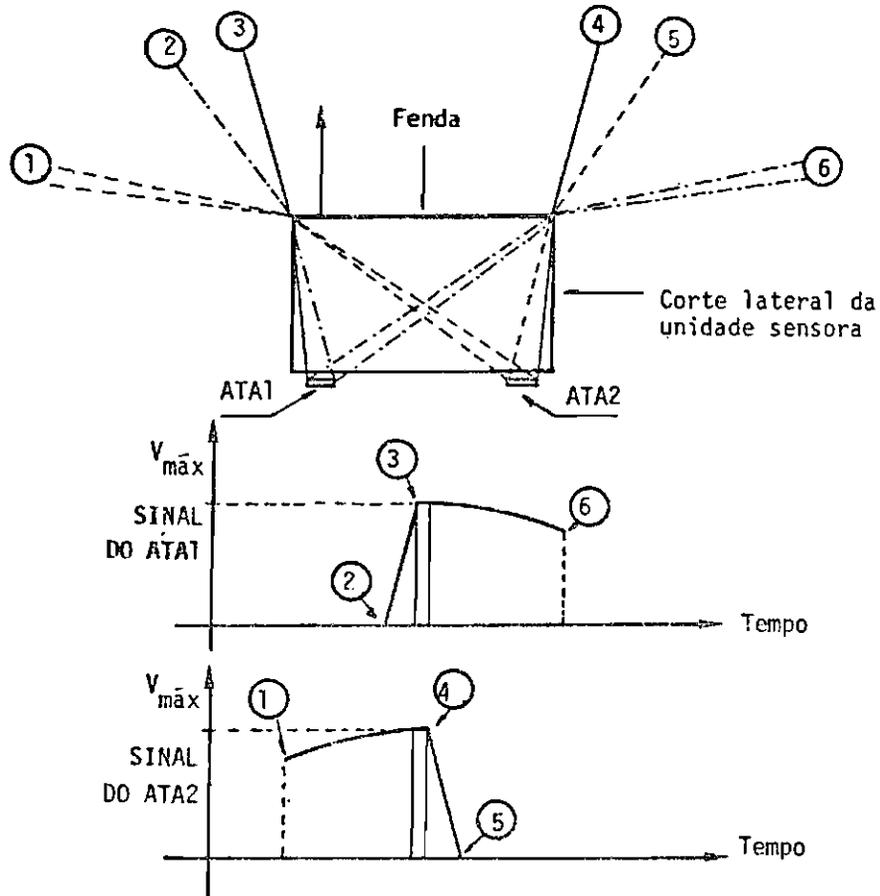


Fig. 5.4 - Formas de onda dos ATAs obtidas com a rotação do satélite.

A vista da unidade sensora é obtida fazendo-se um corte passando pela fenda e normal ao prisma de quartzo.

Quando o Sol surge na posição 1, o fotodiodo ATA2 já está fornecendo um sinal representado na Figura 5.4.

No ponto 2, o fotodiodo ATA1 começa a fornecer um sinal, até atingir o máximo no ponto 3. Entre 3 e 4 os sinais do ATA1 e ATA2 são praticamente iguais, com pequenas diferenças de uniformidade dos fotodiodos. Essa faixa angular é de aproximadamente 1° .

No ponto 4, o sinal do fotodiodo ATÁ2 começa a cair linearmente com o tempo até atingir o zero no ponto 5. No ponto 6, o ATÁ1 cessa de fornecer corrente.

A leitura dos dados é feita quando toda a unidade sensora está iluminada, entre os pontos 3 e 4 com a igualdade dos sinais dos dois ATAs.

O circuito que efetua esse processamento é o seguinte:

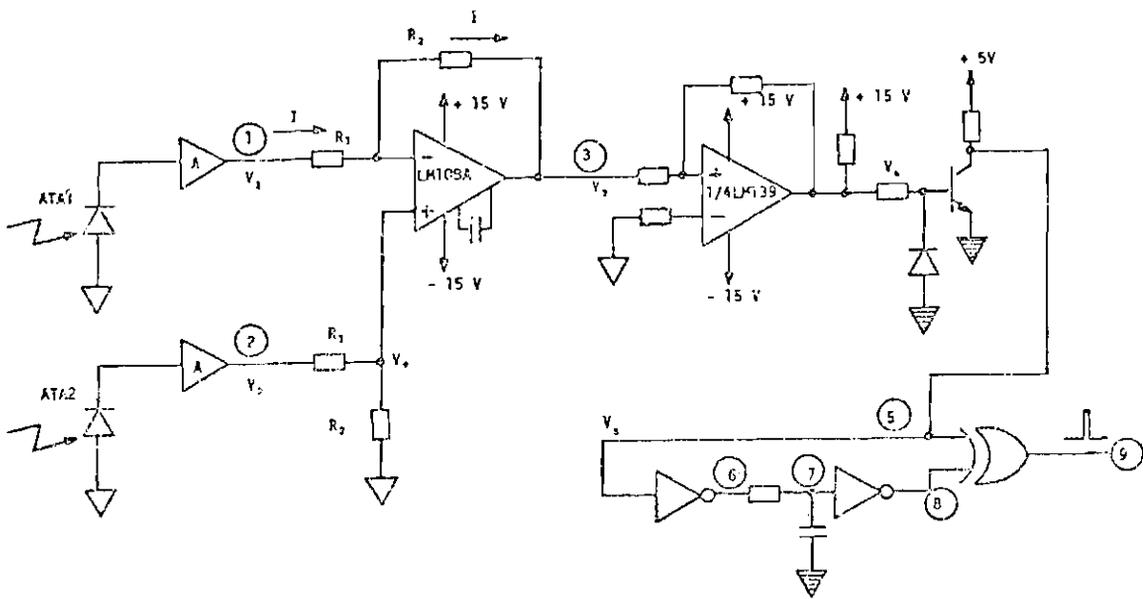


Fig. 5.5 - Amplificador dos ATAs e Detetor de Cruzamento.

Os sinais dos dois ATAs, de uma mesma unidade sensora, são amplificados separadamente pelo amplificador visto na seção anterior. Um outro estágio é utilizado para fazer a diferença. Quando essa diferença cruza por zero, é dado um pulso de disparo para armazenar o código dos bits.

Isto é feito da seguinte forma. A tensão V_+ , da entrada positiva do amplificador de diferença, é igual à tensão no ponto 2 (V_2), multiplicada pelo divisor resistivo:

$$V_+ = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot V_2 \quad (5.6)$$

Como V_+ é igual à tensão na entrada negativa V_- , a corrente I que passa pelo resistor R_1 , indicada na Figura 5.5, é:

$$I = \frac{V_1 - V_-}{R_1} = \frac{V_1 - V_2}{R_1} \cdot \left(\frac{R_2}{R_1 + R_2} \right) \quad (5.7)$$

A tensão no ponto 3 (V_3), que é a tensão de saída do amplificador, é igual à esta corrente vezes o resistor da realimentação R_2 , mais a tensão V_- :

$$\begin{aligned} V_3 &= -R_2 I + \frac{R_2}{R_1 + R_2} V_2 = \frac{-R_2}{R_1} V_1 + \frac{R_2}{R_1} V_2 \left(\frac{R_2}{R_1 + R_2} \right) + \frac{R_2}{R_1 + R_2} V_2 = \\ &= \frac{-R_2}{R_1} V_1 + V_2 \left(\frac{R_2}{R_1 + R_2} \right) \left(\frac{R_1 + R_2}{R_1} \right) = \frac{+R_2}{R_1} (V_2 - V_1) \end{aligned} \quad (5.8)$$

O comparador da Figura 5.5 muda de estado quando a diferença cruza por zero. O estágio seguinte, que é um detetor de borda, gera um pulso a partir dessa transição. Para isso, a onda é invertida, atrasada e invertida novamente. É feito então o *ou-exclusivo* com a onda inicial. A Figura 5.6 apresenta essas etapas de geração do pulso a partir da diferença, relacionando as tensões da Figura 5.5 com as formas de onda.

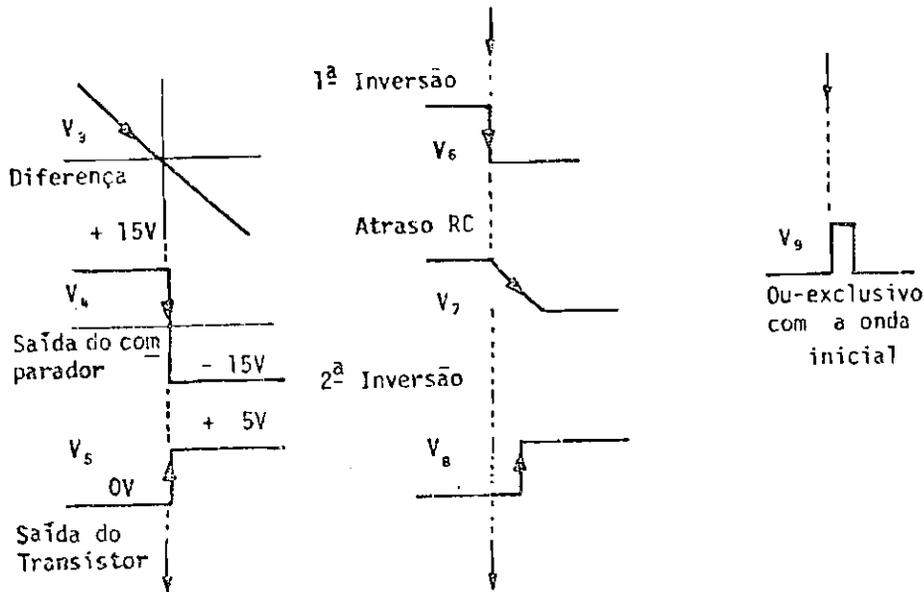


Fig. 5.6 - Geração do pulso de disparo dos dados.

5.2.2 - HABILITAÇÃO DE LEITURA

Para que possa ser efetuada a leitura dos dados e haja uma indicação segura de que o Sol está iluminando o Sensor, uma parte da eletrônica efetua a comparação dos sinais dos ATAs com uma referência. Quando os dois ATAs de uma mesma unidade sensora fornecem sinais, ao mesmo tempo, maiores que a tensão de referência V_{ref} , os comparadores fornecem saídas altas e a lógica habilita a escrita dos dados nos registros. O circuito utilizado é apresentado na Figura 5.7.

O valor da tensão de referência é escolhido de maneira a assegurar, que apenas o Sol é utilizado como fonte da informação. Inibe-se principalmente leituras que poderiam ocorrer devido ao albedo terrestre. Sendo assim, de acordo com os valores calculados na Seção 4.2 para a corrente foto gerada, e na Seção 4.4 para a corrente de albedo, o limiar é fixado entre a corrente mínima de $I_{m\acute{a}x} \cdot \cos 45^\circ$ e o albedo. Deve ser também considerado as incertezas no cálculo das correntes, as variações da época do ano e de órbita e os problemas de simulação em laboratório.

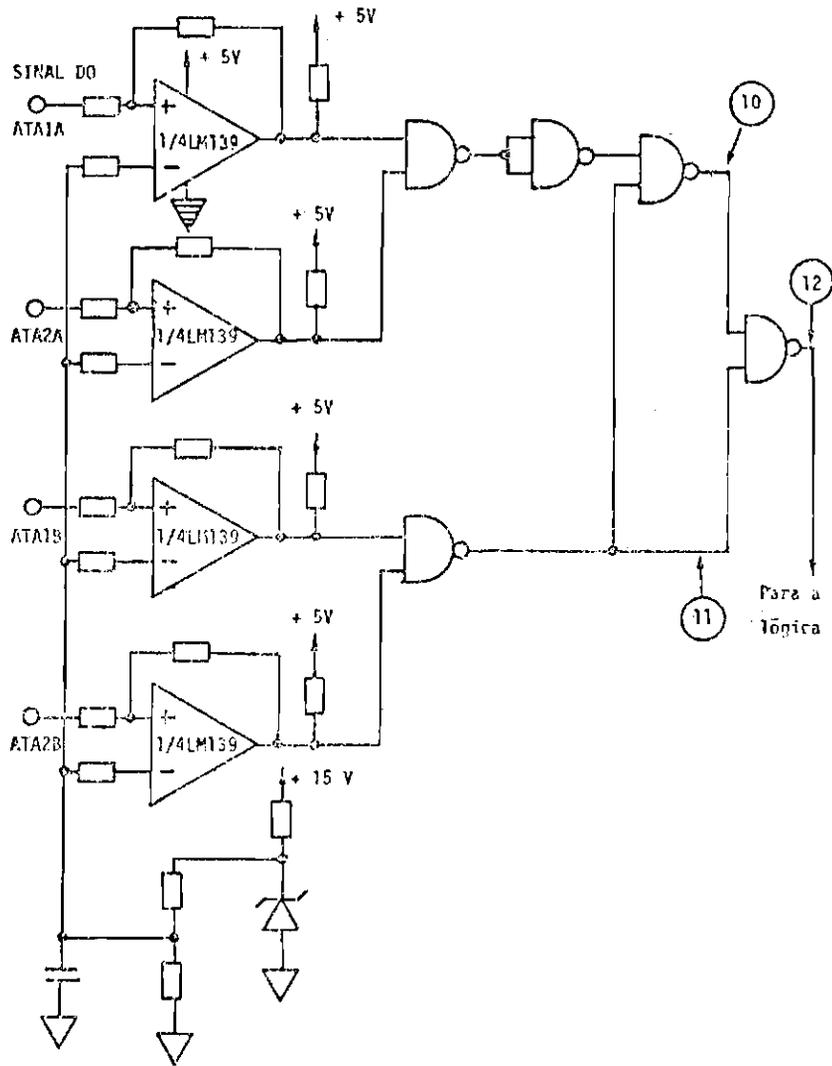


Fig. 5.7 - Circuito de habilitação de leitura.

Na parte l3gica da eletr3nica, como indicado na Figura 5.7, a unidade sensora B 3 priorit3ria com rela33o 3 unidade sensora A. Portanto, se as duas unidades s3o iluminadas ao mesmo tempo, apenas o c3digo fornecido pela unidade B 3 escrito. Isto ocorre na intersec333o dos dois campos de visada dessas unidades.

5.2.3 - PROCESSAMENTO DOS SINAIS DOS BITS

Os sinais de corrente dos fotodiodos, que fornecem o c3digo de informa333o angular das unidades sensoras, s3o convertidos para tens3o por um circuito semelhante ao da Figura 5.3. Existe uma diferen3a, uma chave anal3gica CMOS (4066) 3 introduzida entre o fotodiodo e o amplificador, para que possa ser feita a multiplexa333o das unidades. Isto 3, o operacional utilizado para converter o sinal do bit menos significativo, por exemplo, 3 o mesmo para o fotodiodo da unidade A e para o da unidade B. A Figura 5.8 apresenta o circuito.

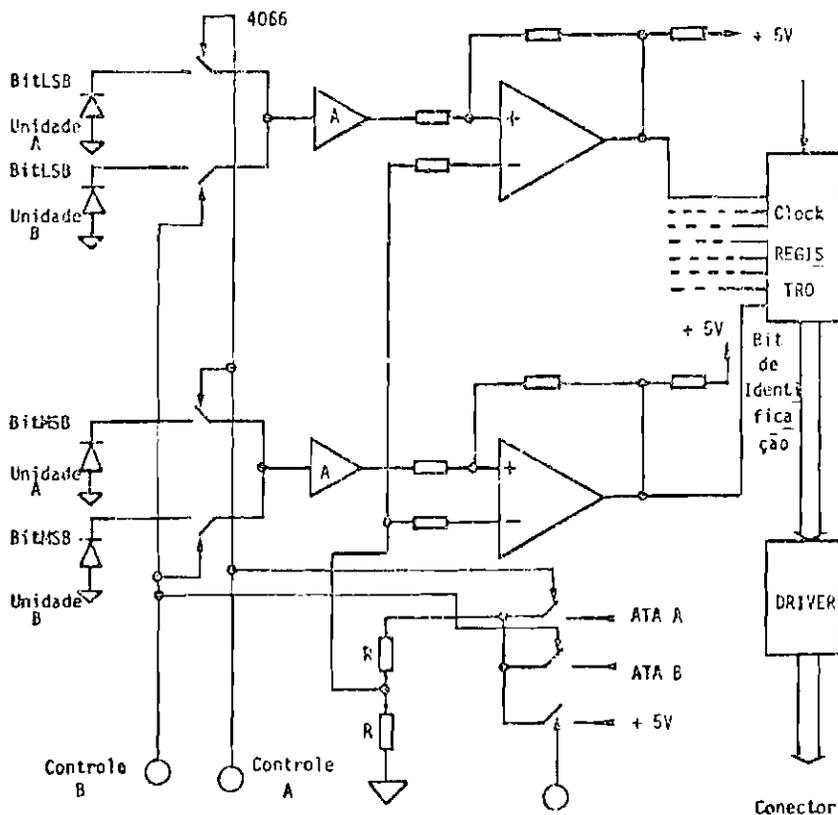


Fig. 5.8 - Circuito de Processamento dos Sinais dos bits.

Quando existe uma habilitação de leitura para a unidade A (tensão no ponto 10 da Figura 5.7 igual a 0), os controles A são ativados pela lógica. A informação angular é amplificada em paralelo, com parada com o sinal do fotodiodo ATA da mesma unidade dividido por 2. Esse código fica presente, em paralelo, na entrada do registro até que o pulso de cruzamento gatilhe os dados.

A habilitação deixa de existir, quando o Sol sai do campo de visada (então $V_{10} = "1"$ na Figura 5.7), os controles são desativados e fica-se esperando uma nova passagem do Sol.

Os sinais dos fotodiodos ATA também são multiplexados por chaves analógicas, como representado na figura. Os controles são os mesmos das chaves dos bits e permitem a passagem do sinal do ATA da unidade iluminada. Quando não há visada, uma chave é fechada com um sinal de + 5V, e esta tensão é colocada na entrada dos comparadores para assegurar a permanência em um estado único.

O bit de identificação da unidade é armazenado no registro. Quando esse bit é igual a 1, a unidade A está iluminada; caso contrário, é a unidade B.

Para cada saída do registro, que é ligada ao conector de Sinais, existe um "driver" inversor que efetua proteção contra curto circuito.

5.2.4 - LÓGICA DE CONTROLE

A parte lógica da eletrônica tem poucas funções, faz algumas proteções, converte sinais digitais do nível de + 5V para + 15V e vice-versa, armazena dados e controla o fluxo da informação. Alguns circuitos pertencentes à lógica já foram apresentados, os outros principais serão vistos a seguir.

O sinal de habilitação de leitura passa pelo seguinte circuito:

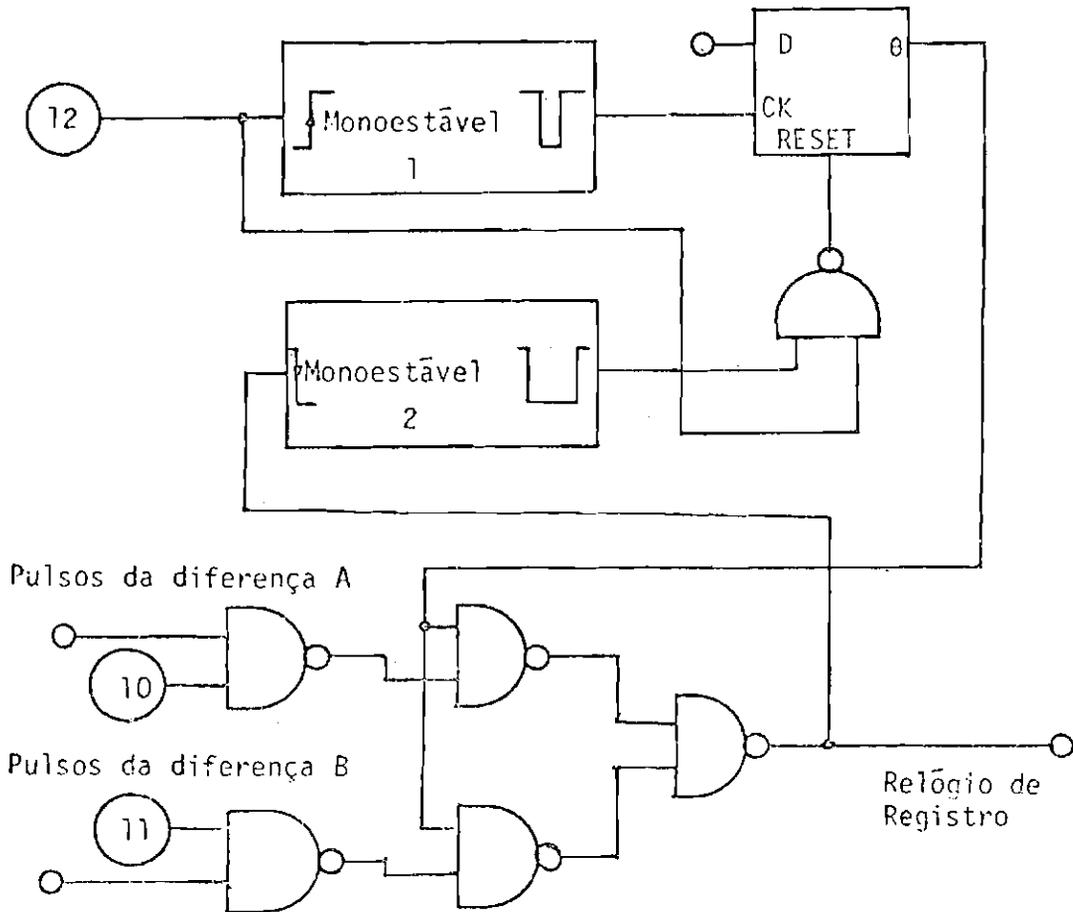


Fig. 5.9 - Lógica do controle.

Quando o sinal de habilitação de leitura muda para alto (tensão V_{12} da Figura 5.7), correspondendo à iluminação de uma das unidades, o monoestável 1 é acionado, gerando um pulso de relógio para o "flip-flop" D. O sinal 1 nesse ponto, permite a passagem do pulso de cruzamento da unidade selecionada pelo ponto 10 ou 11. Ocorrendo esse pulso, o "flip-flop" é resetado e a passagem dos pulsos é interrompida, até que o Sol volte a cruzar a visada.

5.2.5 - MEDIDA DA ROTAÇÃO DO SATÉLITE

Os pulsos utilizados para gatilhar o registro de saída, que ocorrem a cada cruzamento do campo de visada pelo Sol, são utilizados para fornecer um sinal que permita medir a rotação do Satélite. Esses

pulsos são usados como relógio de um contador, que efetua a divisão da frequência de rotação por 2^5 , isto é, o período obtido na saída desse contador é 32 vezes o período de rotação do Satélite.

Essa onda é amostrada pelo codificador de telemetria a cada 0,5 s, por um relógio de boa precisão. Pode-se, então, reconstituir em terra a onda inicial e obter o período da rotação. A Figura 5.10 ilustra esse processo.

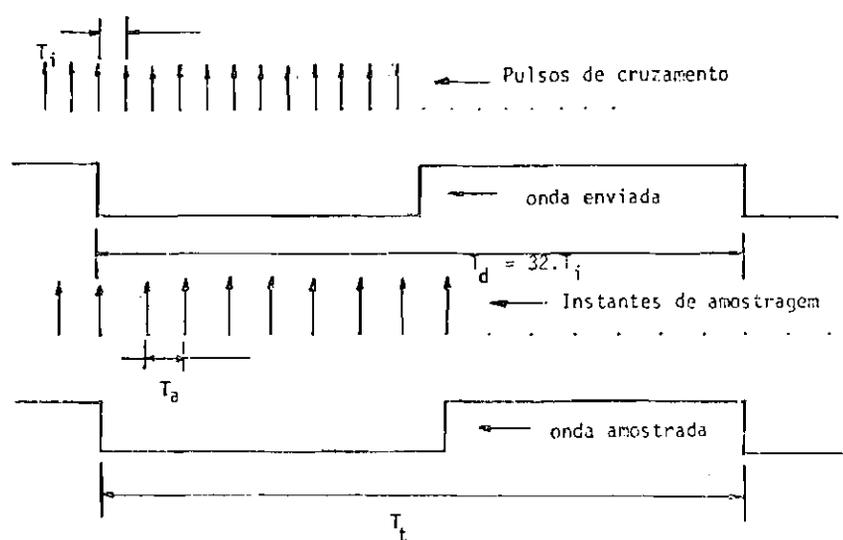


Fig. 5.10 - Amostragem do Sinal da Medida de Rotação.

O período T_i de rotação varia de 333 m seg para 180 rpm, a 3 seg para 20 rpm, que ocorre no final da vida do Satélite. O período T_d é o que se obtém depois da divisão do contador, sendo igual a $32.T_i$. O período T_d varia, portanto, de 10,666 seg a 96 seg. O período obtido após a amostragem e reconstituído em terra é T_t .

Se não for feita em terra uma média do período T_t , o erro desse período em relação ao original T_d é dado por:

$$F_{T_d} = \frac{0,5}{T_d}, \quad (5.9)$$

sendo, portanto, igual ao período de amostragem dividido pelo período total.

Esse erro E_{T_d} varia de 4,69% a 0,52% para os dois extremos de rotação. Percentualmente, esse erro se mantém para a medida de T_i .

Supondo que a visada do Satélite seja de 10 min, e que se já feita uma média dos períodos T_t em todo esse tempo, no caso de $T_d = 10,666$ seg consegue-se fazer uma média de 56 termos e para $T_d = 96$ seg outra de 6 termos. Com isto, a precisão da leitura melhora por um fator relacionado com o número de termos da média. Observando a Figura 5.11, vê-se que para um período de $T_t = T_d + \Delta T$ e uma média de n termos, para que exista variação na leitura de T_t é necessário que:

$$n \cdot \Delta T > 0,5 \quad \rightarrow \quad \Delta T > \frac{0,5}{n} \quad (5.10)$$

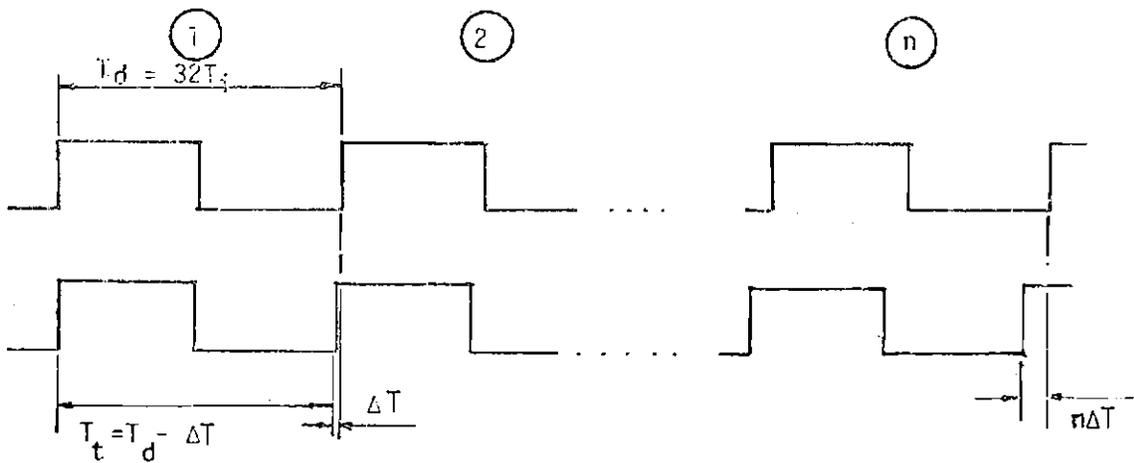


Fig. 5.11 - Menor variação no período perceptível para uma média de n termos.

O que significa que, para diferenças entre períodos menores que ΔT , a média obtida é a mesma. Portanto ΔT é a precisão da leitura. O número de termos da média é igual a:

$$n = \frac{T_v}{T_d} \quad (5.11)$$

onde T_v = tempo de visada do Satélite, portanto o erro percentual fica:

$$\Delta T\% = \frac{T_a}{T_v} \cdot \frac{T_d}{T_d} = \frac{T_a}{T_v} \times 100\% \quad (5.12)$$

Portanto, para os dados fornecidos, o erro percentual obtido para a média em qualquer rotação é:

$$\Delta T\% = 0,0833\% \quad (5.13)$$

5.3 - DIAGRAMA DE BLOCOS DA ELETRÔNICA

O Diagrama de Blocos da Eletrônica é apresentado na Figura 5.12.

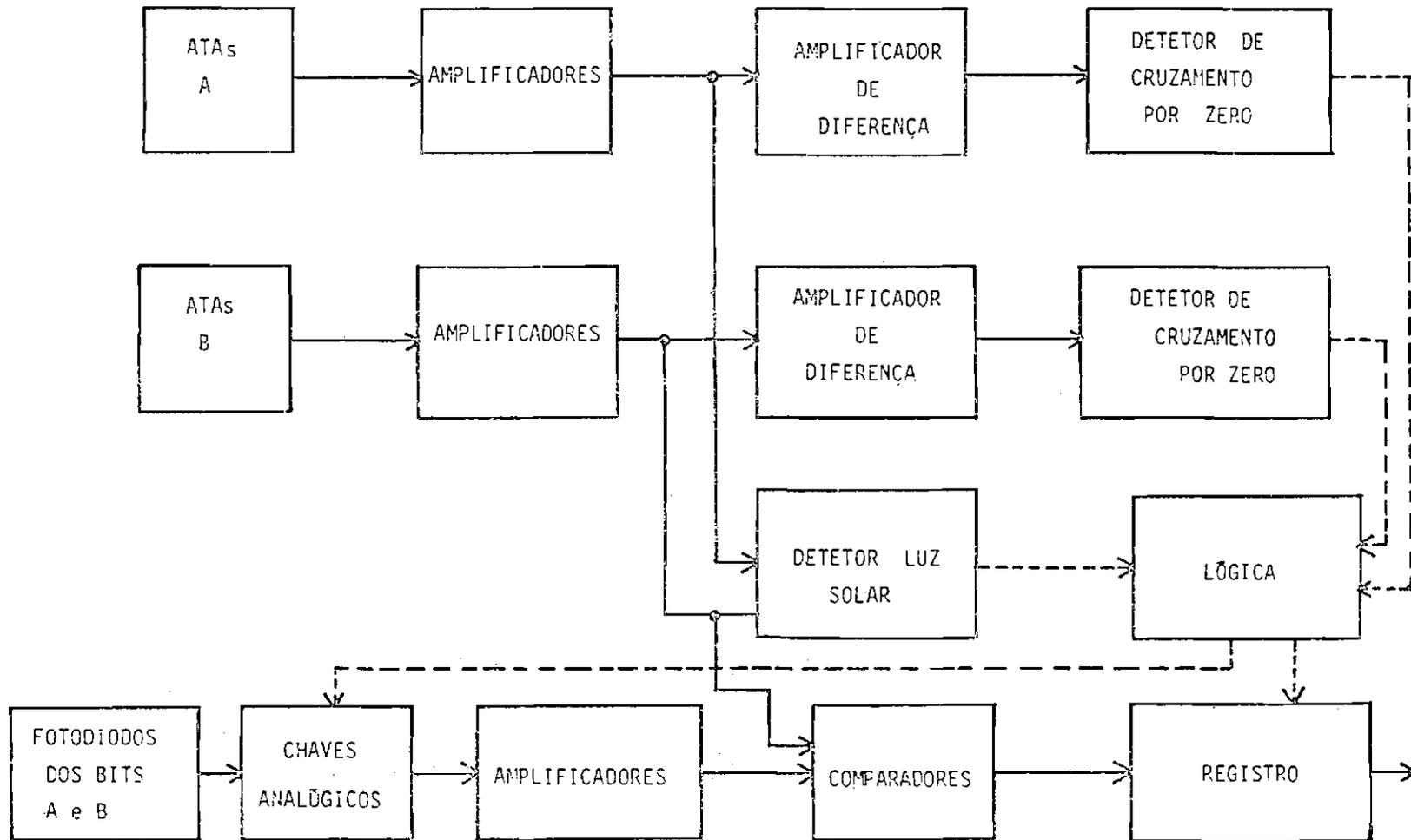


Fig. 5.12 - Diagrama de Blocos da Eletrônica.

CAPÍTULO 6

RESULTADOS

6.1 - MEDIDAS ANGULARES

6.1.1 - PROCEDIMENTO E MEIOS DE TESTE

Para o teste do Sensor Solar são empregados os seguintes e q i p a m e n t o s :

- Simulador Solar
- Posicionador angular automatizado
- Microcomputador
- Espelho rotatório
- Fontes de alimentação

O Simulador Solar apresenta um feixe de luz com diâmetro de 20 cm, distribuição espectral semelhante a solar, abertura angular de a p r o x i m a d a m e n t e 0,7 graus e potência de 200 W/m^2 . O equipamento é co m p o s t o p o r u m a p a r t e ó p t i c a, com espelho elíptico, difusor e lente co l i m a d o r a; uma lâmpada de xenônio e uma fonte de alimentação.

O Posicionamento Angular Automatizado constitui-se de um codificador angular óptico, um motor de passo acionado por m i c r o c o m p u t a d o r e um prato giratório com um conjunto de engrenagens. O codificador angular apresenta resolução de 18" e precisão de 36 segundos de arco. O seu eixo de leitura está acoplado diretamente com o eixo do prato g i r a t ó r i o. O motor de passo apresenta a configuração de 1000 passos por volta. Entre o eixo do prato e do motor existe um redutor de 72 vezes. Isto faz com que o prato, quando o motor move de 1 passo, mova-se de 18 segundos de arco, ficando compatível com a resolução do codificador angular. Uma interface conecta o microcomputador à eletrônica do motor e do co d i f i c a d o r. O micro envia pulsos ao motor e adquire a posição angular, o f e t u a n d o a leitura dos registros do codificador.

O Sensor Solar é montado sobre o posicionador angular, com a normal ao espelho de alinhamento 1 (indicado na Figura 3.2) paralela ao feixe de luz do Simulador. Entre o Simulador e o Sensor é colocado um conjunto de espelhos, que permite simular a rotação do satélite. Isto é, simula-se o cruzamento do Sol pelo campo de visada do Sensor. As saídas digitais do sensor são conectadas através da interface ao microcomputador. A montagem completa é ilustrada na Figura 6.1

O Sensor é alinhado com o feixe de luz do Simulador, pelo processo descrito na Seção 3.3, que resulta numa precisão de alinhamento melhor que 1 minuto de arco. Isto constitui a referência de zero. Obtidas essas condições, o microcomputador é acionado com um "software" completo de teste, que permite realizar vários ensaios constituídos pela varredura de todo o campo de visada do Sensor. O micro faz um mapeamento de todos os códigos do Sensor, monitorando sua saída e enviando pulsos ao motor. Quando ocorre a transição de código, o codificador angular é lido. Isto é realizado em até 10 varreduras. Posteriormente, outros programas são utilizados para efetuar as médias dos ensaios e comparar as transições medidas com as esperadas pela função de transferência.

1. SENSOR SOLAR
2. ESPELHO ROTATÓRIO
3. REDUTOR
4. CODIFICADOR ÓPTICO ANGULAR
5. MOTOR DE PASSO

6. MICROCOMPUTADOR
7. SIMULADOR SOLAR

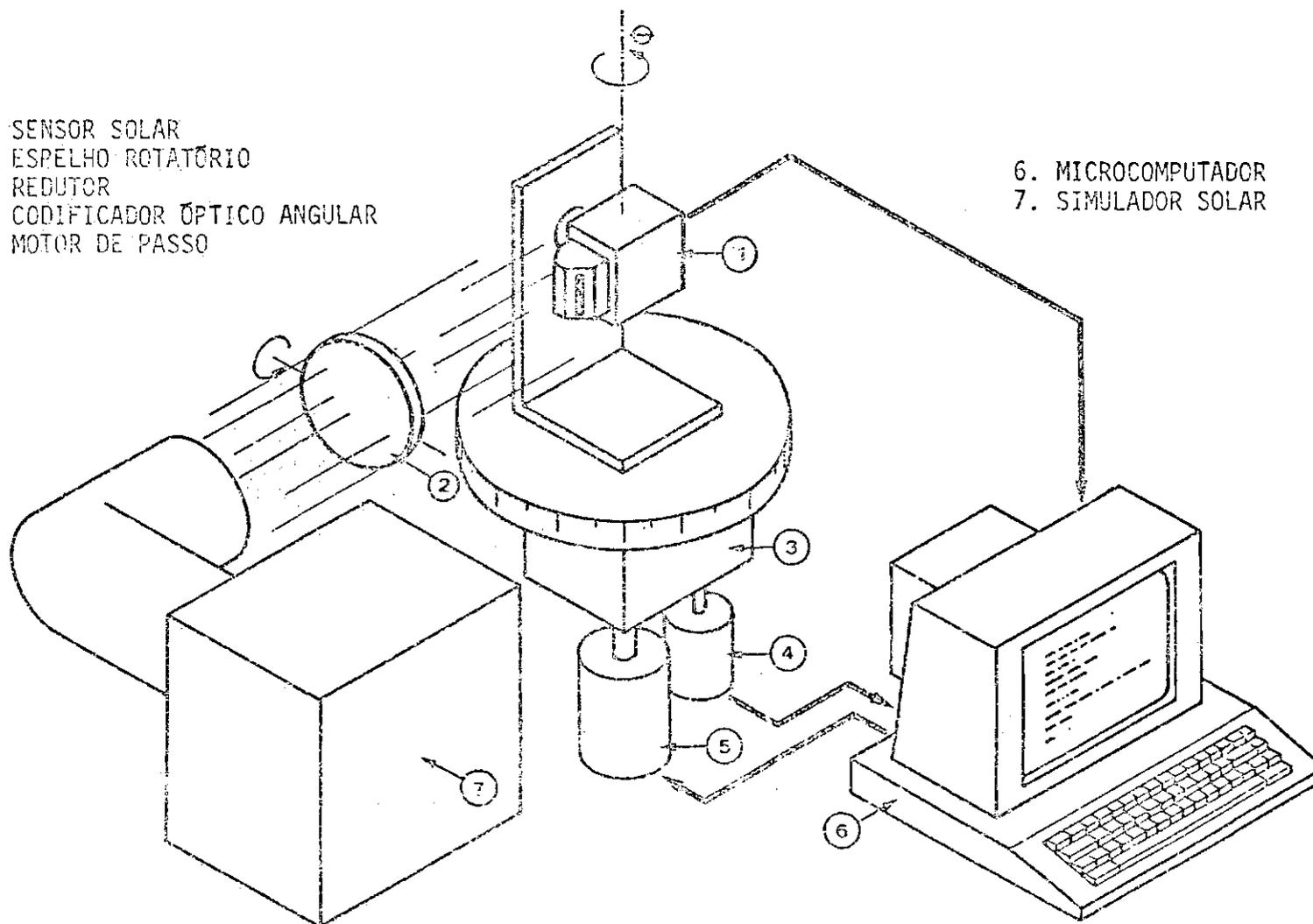


Fig. 6.1 - Montagem de Testes do Sensor Solar.

6.1.2 - RESULTADOS DOS ENSAIOS

Com o procedimento e sistema apresentados na seção anterior, o Sensor Solar foi testado e os resultados obtidos estão dentro das especificações. A rotação utilizada para o espelho foi de 180 rpm e realizou-se 6 varreduras do campo de visada, correspondendo a 3 ensaios, com duração aproximada de 2,5 horas. O Apêndice B apresenta a listagem fornecida por um dos programas, que permite comparar o ângulo calculado através da função de transferência (ângulo esperado) e o ângulo medido nas transições, para cada código fornecido pelo Sensor.

O índice de refração, utilizado na função de transferência, é o índice equivalente levando em conta a resposta espectral do fotodiodo e o espectro do Simulador Solar. A altura h do prisma, utilizada nessa função, foi ajustada para obtenção do menor erro. O ponto de diferença máxima ocorreu para $N_g = 104$, da unidade sensora B, com 439 segundos ou 7,3 minutos de arco. O erro médio em relação à função de transferência é 2,53 minutos. Os resultados do Apêndice B estão resumidos na Figura 6.2, que apresenta o erro em relação à função de transferência na forma de gráfico.

O valor angular associado a cada código, pela função de transferência, correspondente a saída digital do sensor é apresentado no Apêndice C.

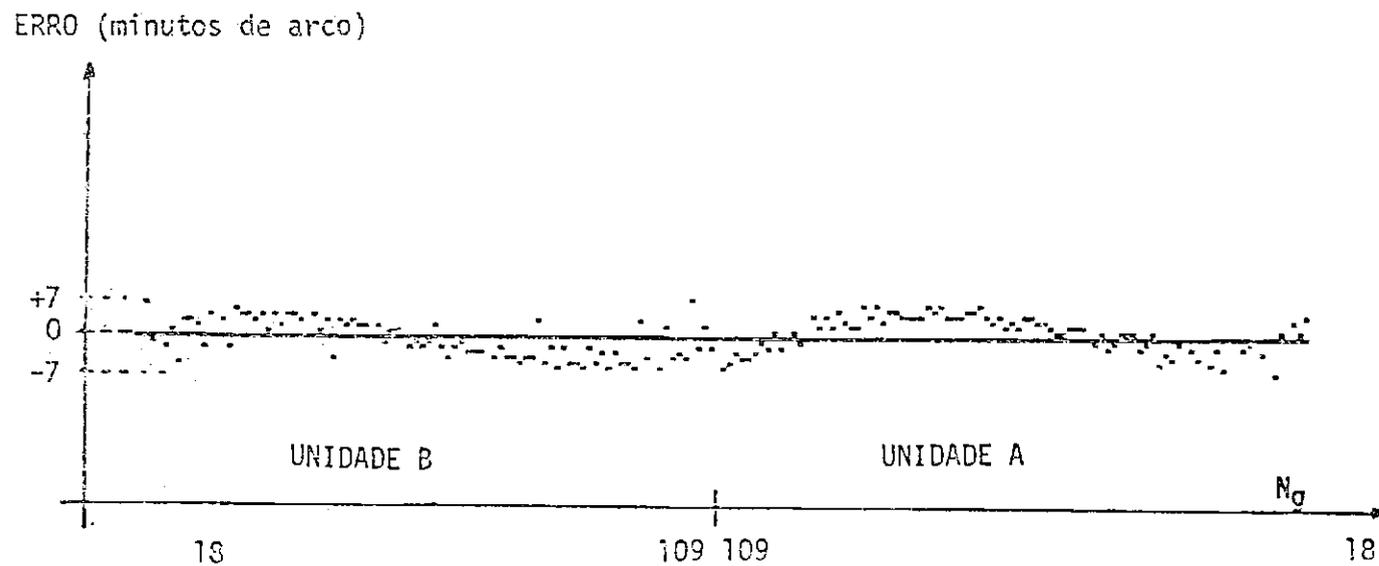


Fig. 6.2 - Diferença entre os ângulos fornecidos pela função de transferência e os ângulos medidos do Sensor Solar.

6.2 - MEDIDA DA VARIAÇÃO DO SINAL DO FOTODIODO COM O ÂNGULO DE INCIDÊNCIA θ ($dV/d\theta$)

No Capítulo 3, na Seção de Orçamento de Erros (3.2), foi utilizado um valor teórico estimado da variação da tensão com o ângulo de incidência θ , próximo à transição. Este valor de $dV/d\theta$ estimado esteve presente no cálculo de quase todos os erros. Fez-se a medida de $dV/d\theta$ para comparação com o estimado. A montagem utilizada é a mesma da seção anterior, com a introdução de um multímetro para medir o sinal do bit menos significativo, próximo à transição. Obteve-se as curvas da Figura 6.3.

Com os valores de $dV/d\theta$ obtidos, para incidência normal e inclinada a 45° , pode-se calcular a largura da imagem da fenda. Da Equação (3.20) resulta:

$$l_f = V_{\max} \cdot h / (n \cdot \frac{dV}{d\theta}) \quad (6.1)$$

Substituindo os valores medidos:

$$l_f (\theta = 0^\circ) = 160 \mu\text{m} \quad (6.2)$$

$$l_f (\theta = 45^\circ) = 184 \mu\text{m}$$

Nota-se que os valores estão próximos dos estimados.

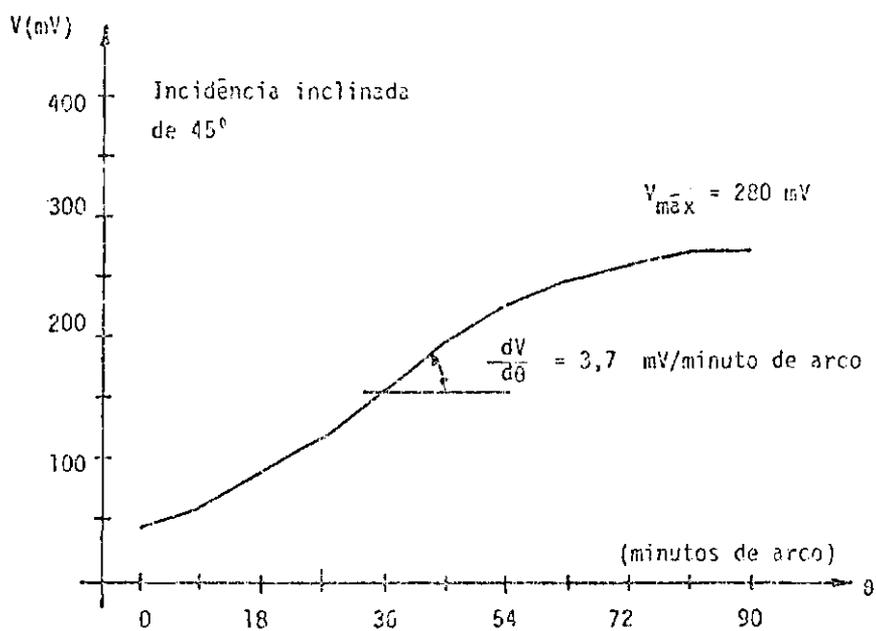
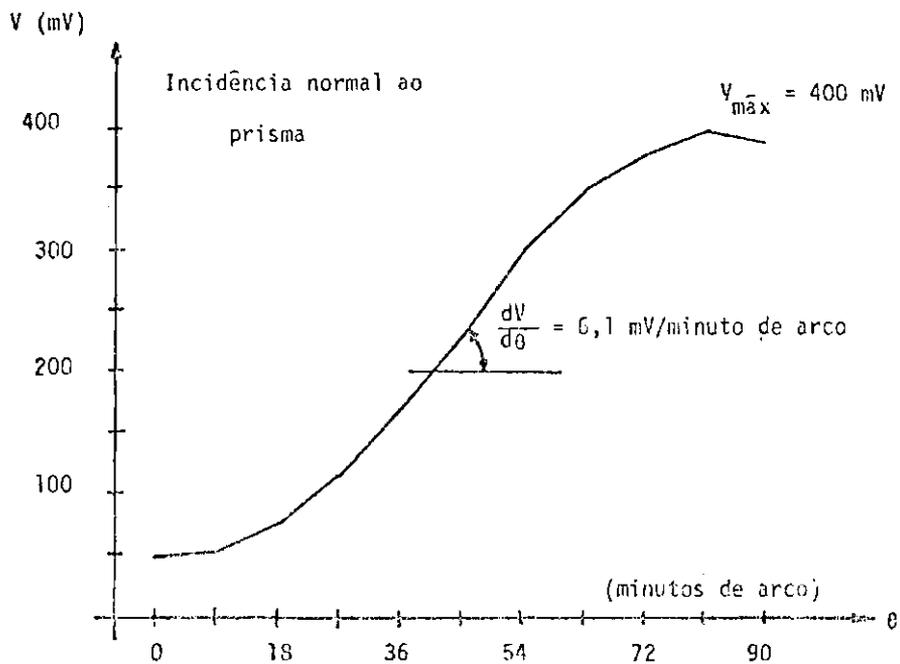


Fig. 6.3 - Medida de $dV/d\theta$.

Para comparação com a Figura 2.5, que mostra a variação do sinal dos fotodiodos com a varredura completa do campo de visada, apresenta-se as curvas obtidas para o Sensor Solar.

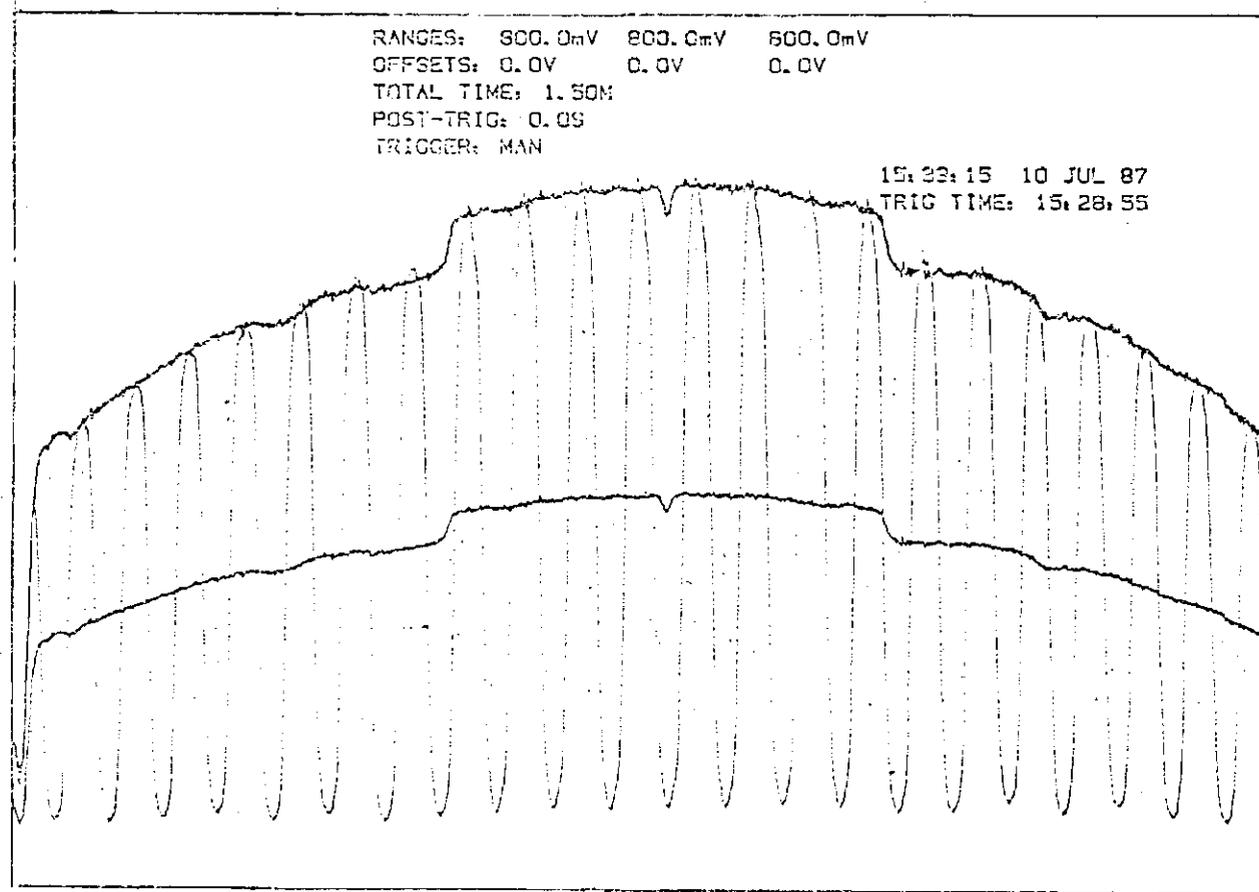


Fig. 6.4a - Curvas da Variação da corrente em função do ângulo de incidência para todos os fotodiodos.

Bit Menos Significativo e ATA.

(Continua)

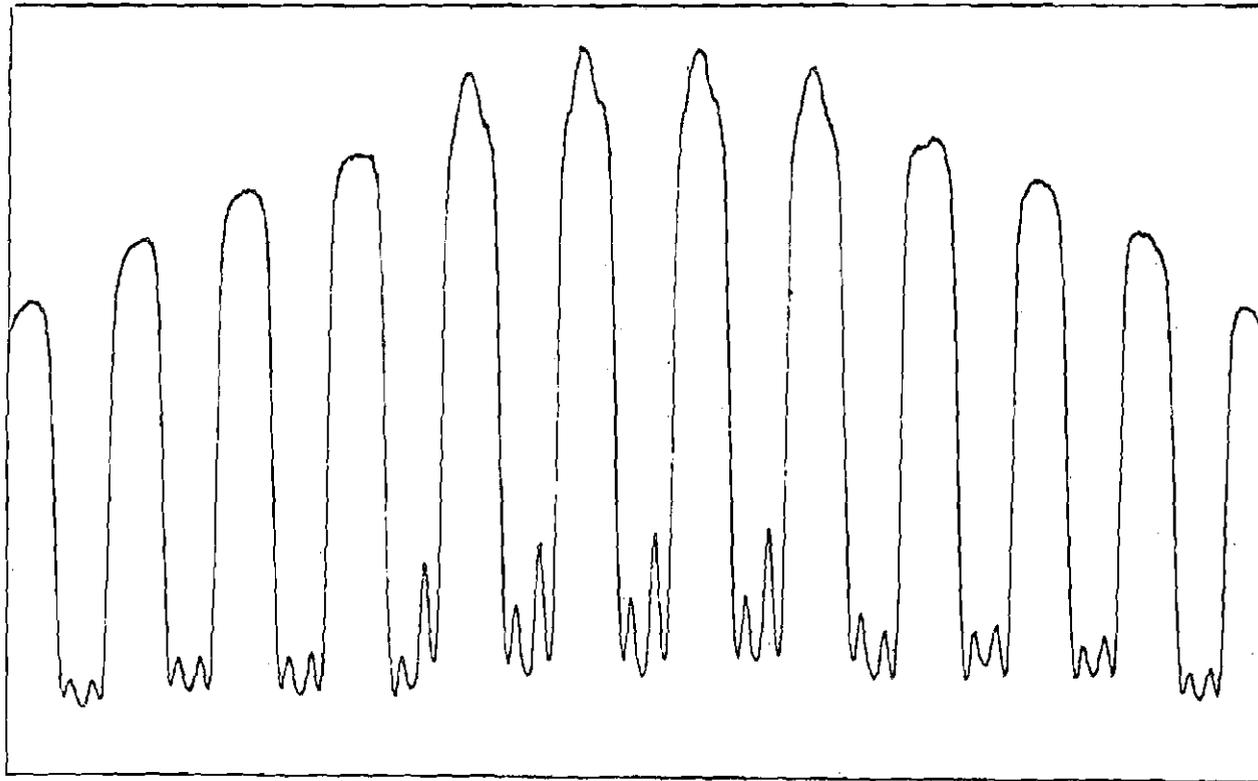


Fig. 6.4b - Bit 2 - Continuação

(continua)

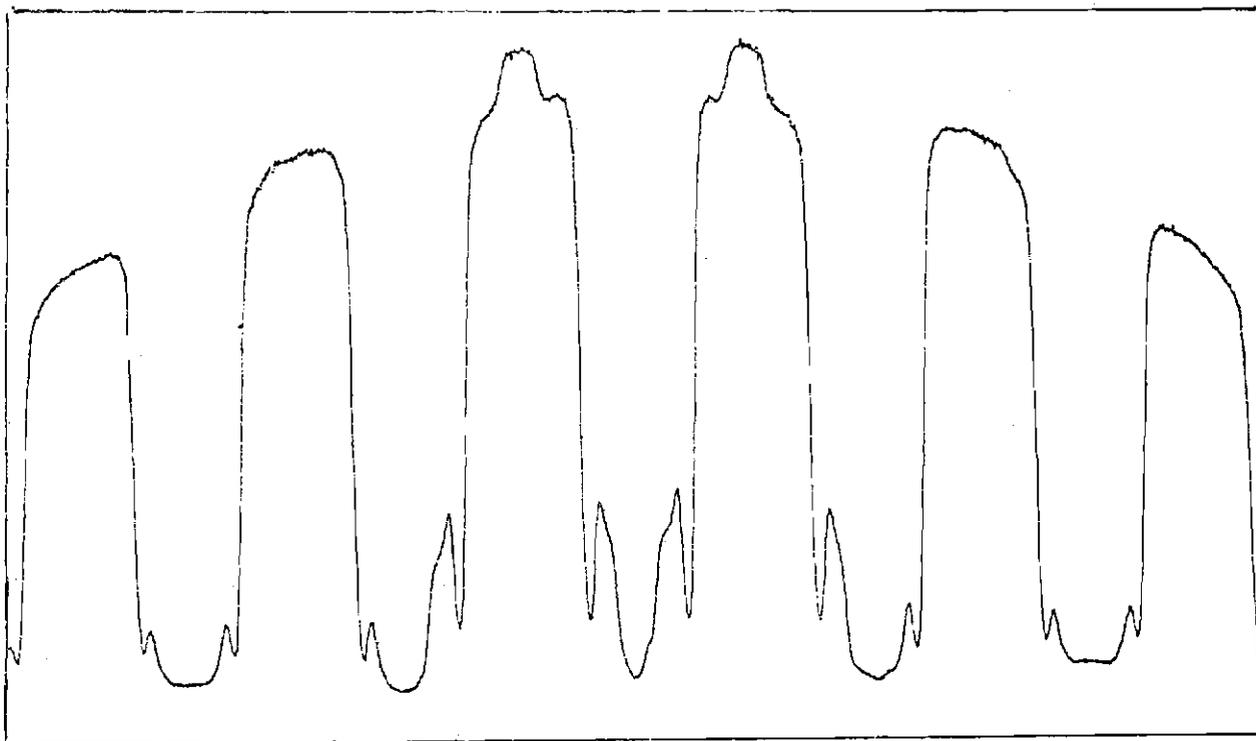


Fig. 6.4c - Bit 3 - Continuação

(continua)

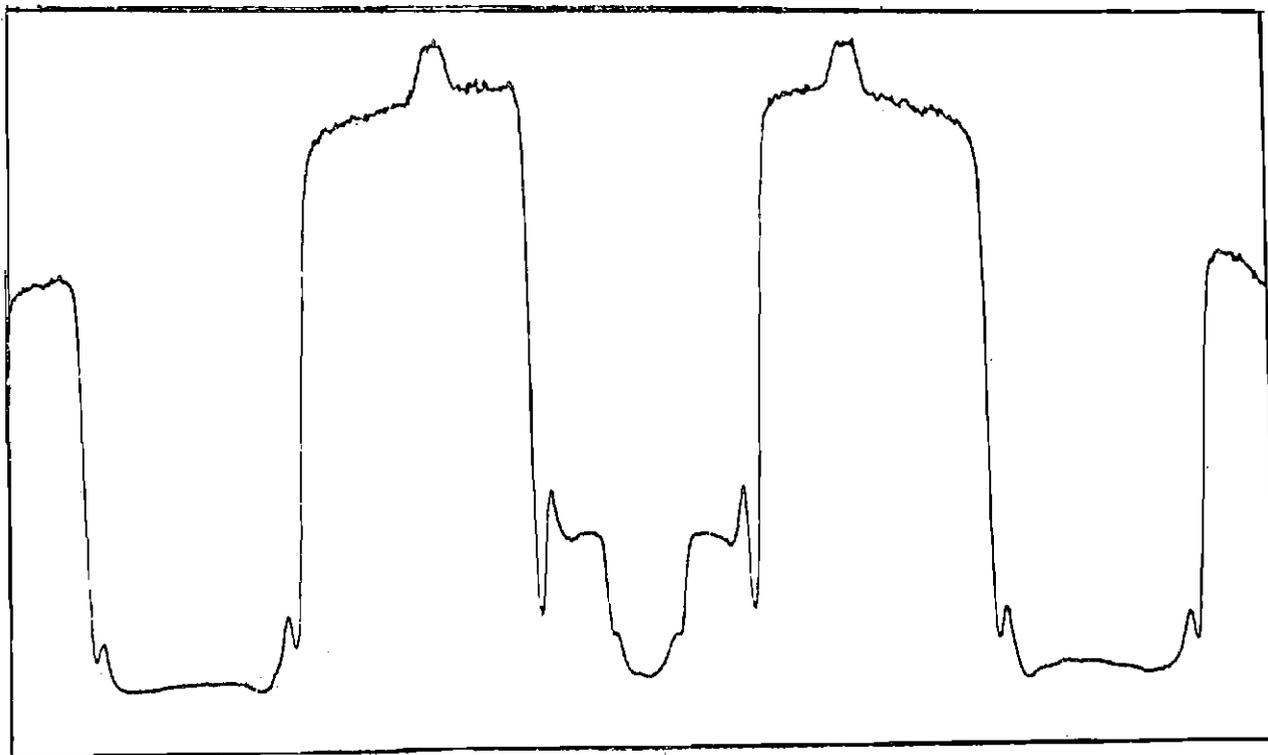


Fig. 6.4d - Bit 4 - Continuação

(continua)

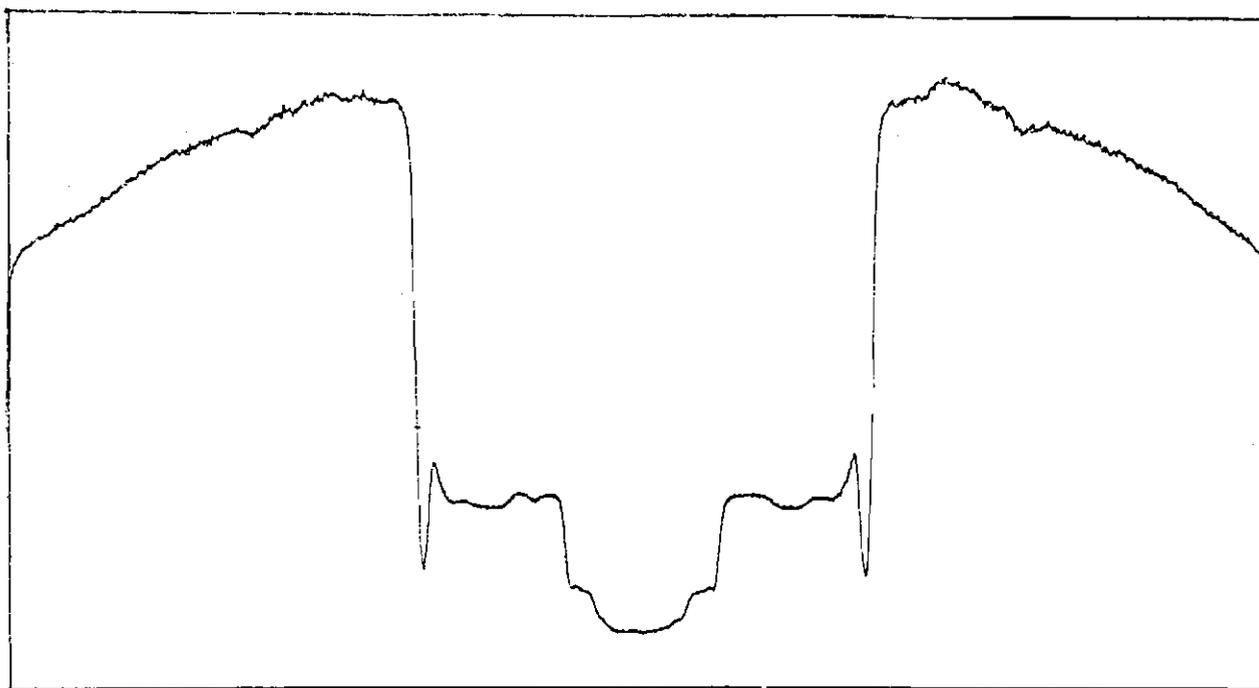


Fig. 6.4e - Bit 5 - Continuação

(continua)

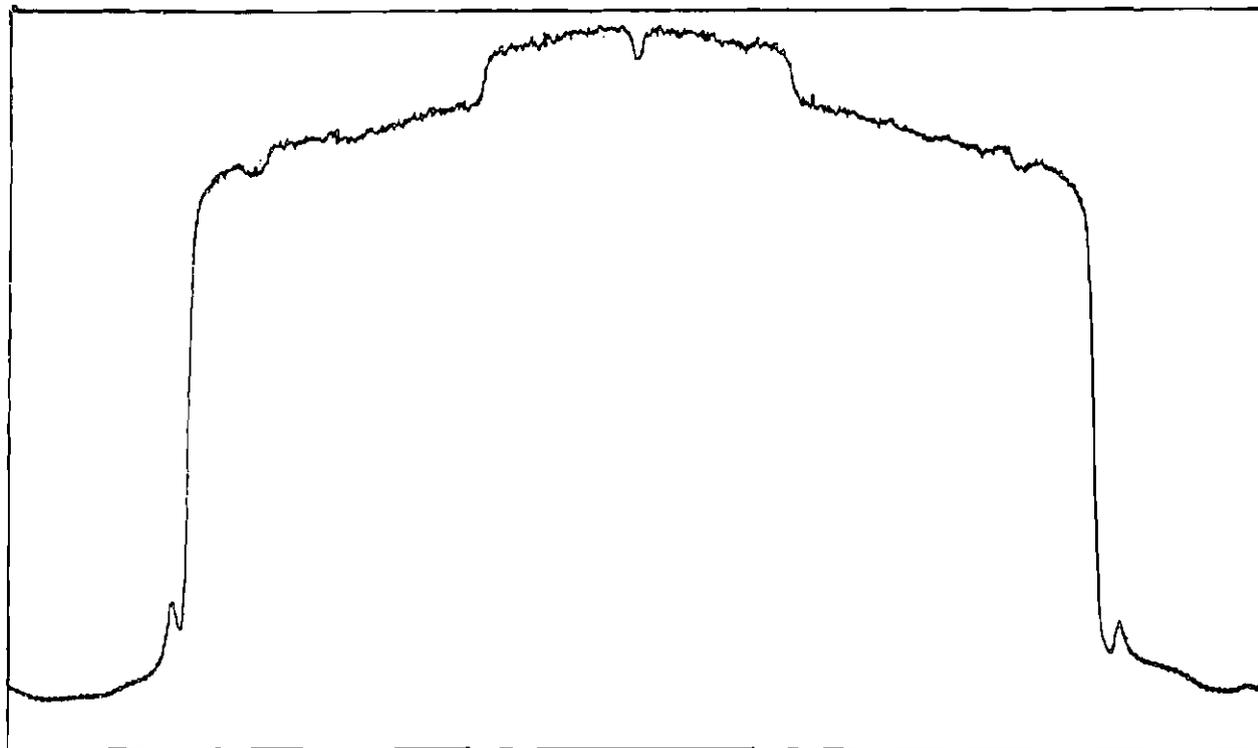


Fig. 6.4f - Bit 6 - Continuação

(continua)

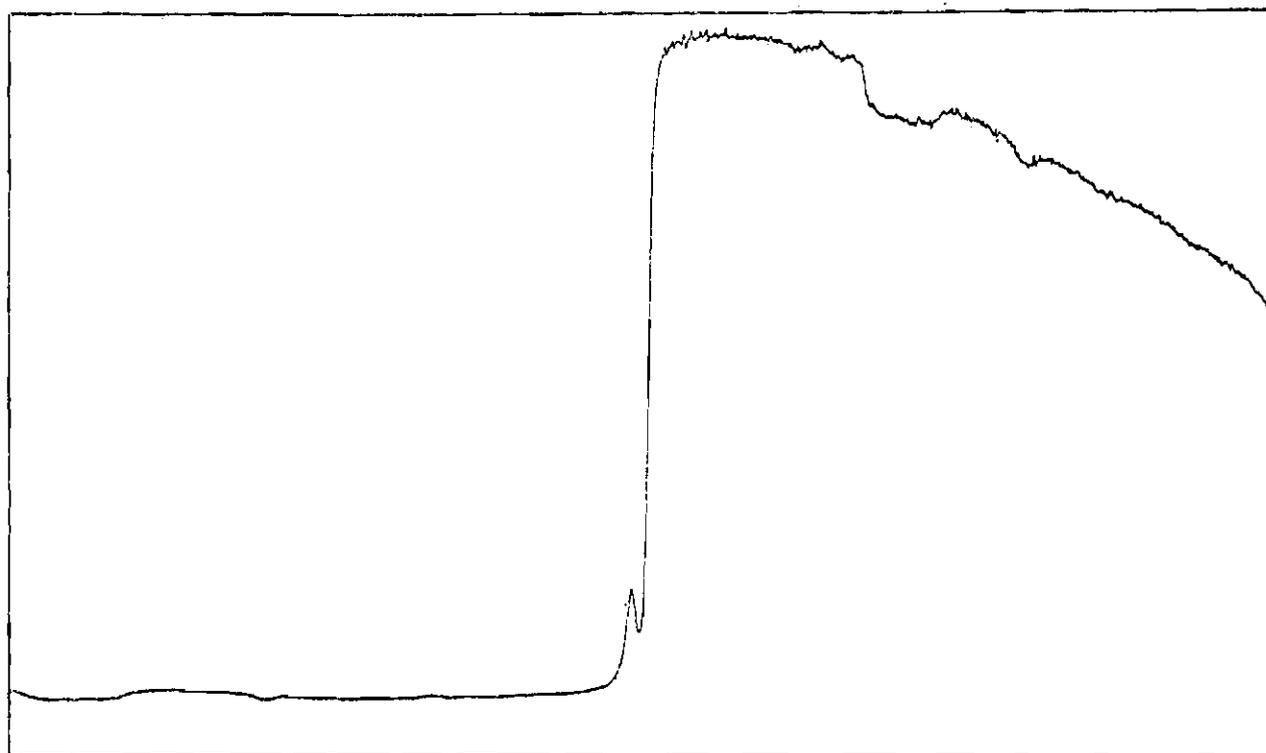


Fig. 6.4g - Bit 7 - Conclusão

6.3 - FORMAS DE ONDA DA ELETRÔNICA

Com o sistema funcionando, foram registrados alguns sinais da Eletrônica. A rotação utilizado no espelho é de 180 rpm. A Figura 6.5 apresenta os sinais dos fotodiodos ATA, da diferença e do bit menos significativo. O instante de gatilho dos dados está indicado.

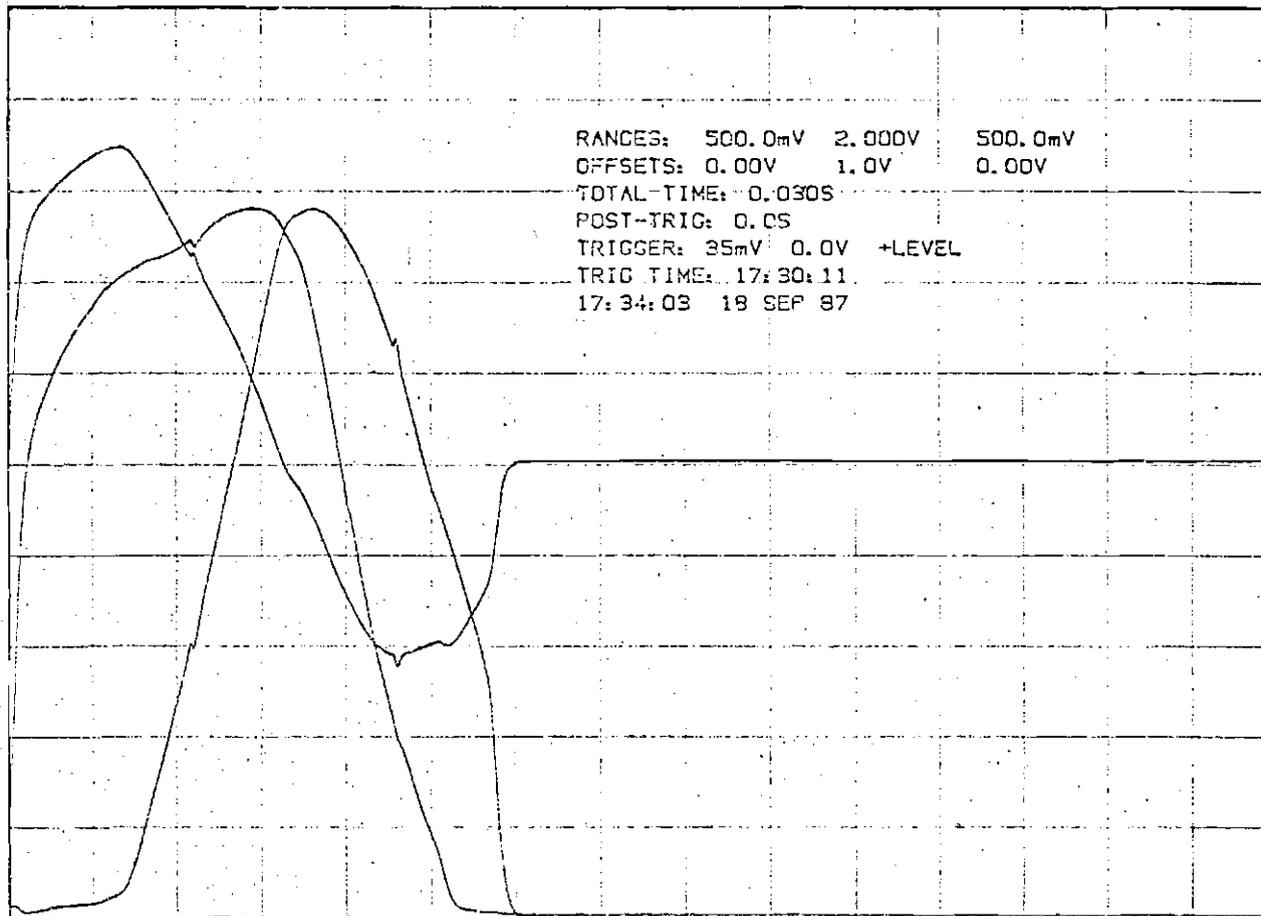


Fig. 6.5a - Formas de onda da Eletrônica

(continua)

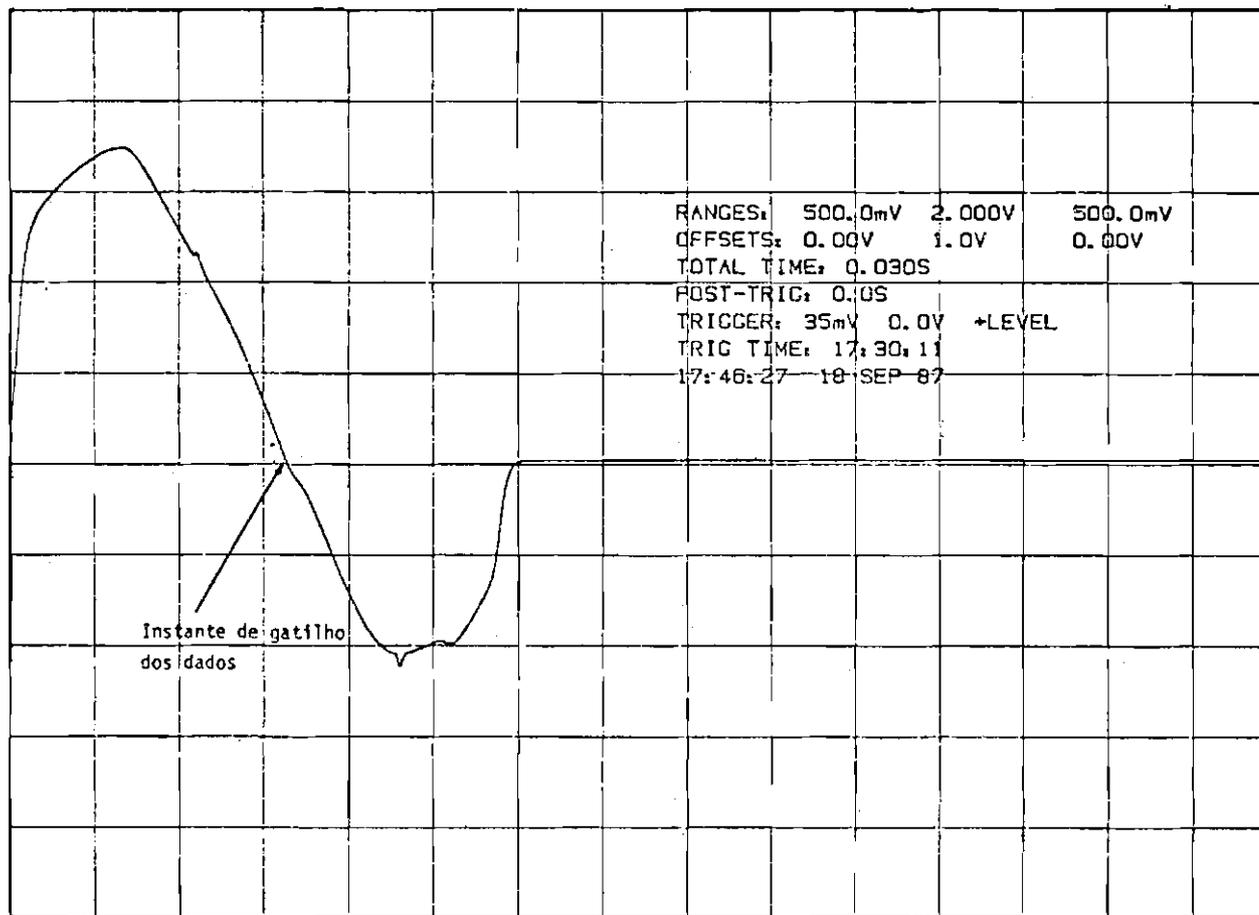


Fig. 6.5b - Continuação (Diferença dos sinais dos fotodiodos ATA)

(continua)

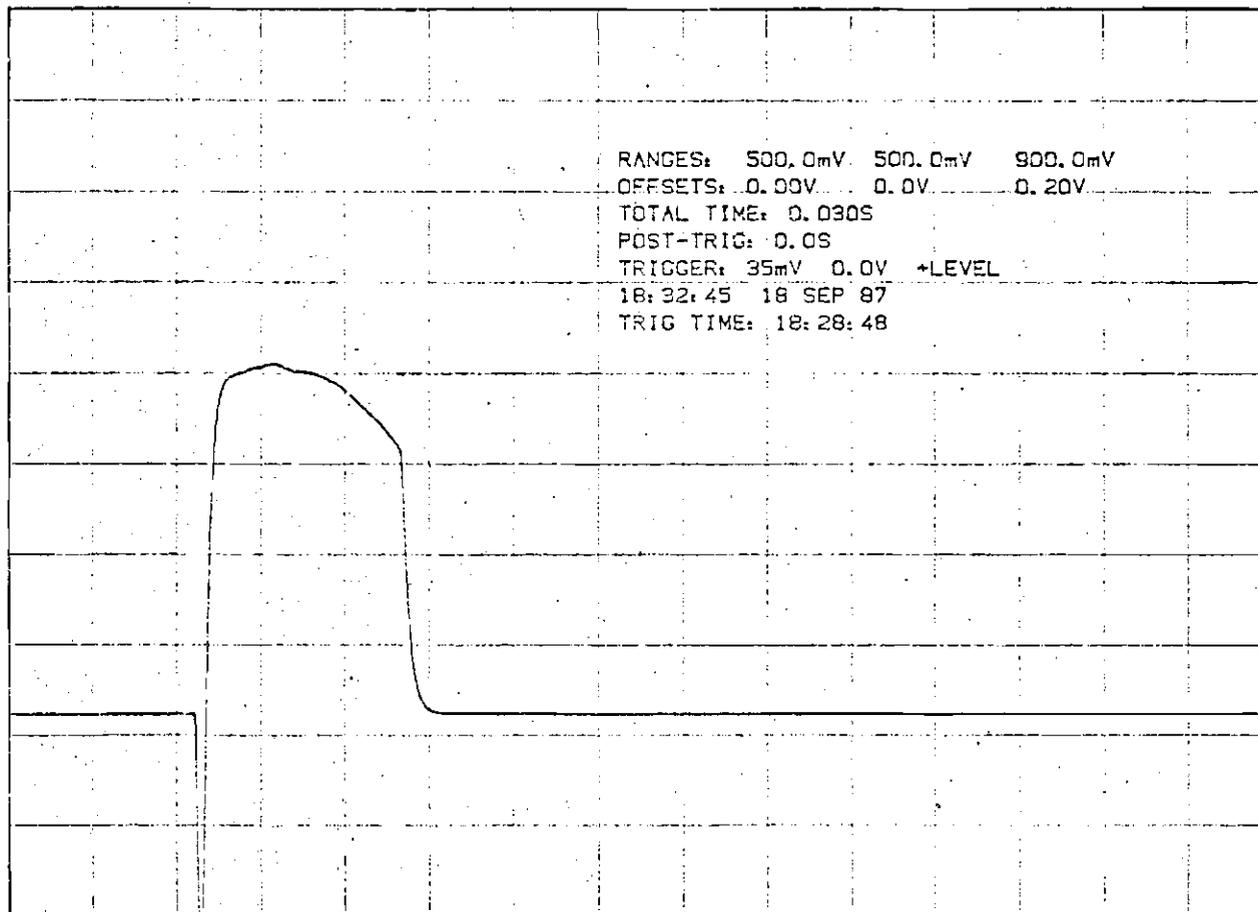


Fig. 6.5c - Conclusão (Sinal do Bit Menos Significativo).

6.4 - RELAÇÃO SINAL/RUÍDO NA SAÍDA DO AMPLIFICADOR

Com um voltímetro "lock-in" (PAR) conectado na saída do amplificador do fotodiodo ATA, mediu-se o ruído com banda de 1 Hz e frequência de 500 Hz. Sem a iluminação do Simulador, obteve-se a seguinte tensão V_n de ruído:

$$V_n = 200 \text{ nV}_{pp}/\sqrt{\text{Hz}} \quad (6.3)$$

Com a iluminação do Simulador, resultou a tensão de saída:

$$V_0 = 400 \text{ mV}$$

6.5 - CONCLUSÃO

Os testes realizados com o Sensor Solar mostraram que o seu desempenho é satisfatório, e que as análises efetuadas estão em concordância com o equipamento desenvolvido. O orçamento de erros, em uma visão de pior caso, estipulou um erro de $\pm 9,3$ minutos de arco nas transições do código, sendo que o valor resultante das medidas foi ± 7 minutos.

Os processos de fabricação utilizados foram compatíveis com as tolerâncias envolvidas, porém um cuidado melhor seria conveniente nos alinhamentos do prisma com o detetor. Nesse caso, os erros resultantes são importantes. A colagem final, entre as duas peças, introduz erros não considerados e é um ponto crítico dos processos. Uma estrutura que permitisse os ajustes e não introduzisse erros seria a solução ideal.

Esse primeiro protótipo de Sensor, ainda não muito preciso (± 40 min de arco), é um degrau para o desenvolvimento de Sensores Solares mais sofisticados e de precisão refinada.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALBUS, J.S. *A digital solar aspect sensor*. Washington, DC, NASA, Langley Research Center, 1961 (NASA TND-1062).
- ALBUS, J.S.; SCHAEFER, D.H. *Satellite attitude determination: digital sensing and on-board processing*. Greenbelt, MD, NASA, Goddard Space Flight Center, 1963. p.1-4. (NASA X-631.63.133).
- ANALOG DEVICES. How to select operational amplifiers. In: ——— *Data-acquisition databook 1984; Integrated circuits*. Norwood, MA, 1984. V.1, sec. 20.3-20.8. (Application Note).
- CHEN, L.C.; LERNER, G.M. Sun sensor models. In: WERTZ, J.R. *Spacecraft attitude determination and control*. Dordrecht, Holland, D. Reidel, 1978. part II, cap. 7, sec. 7.1, p.218-227.
- CLAYTON, G.B. Current to voltage conversion. In: ——— *Operational amplifiers*. 2.ed. London, Butterworth Scientific, 1979. sec.4.5.1, p.147-149.
- FONTANA, A. *A photovoltaic solar sensor for use in spacecraft orientation control systems*. Springfield, VA, NASA, Langley Research Center, 1965. p.1-2. (NASA TND-3279).
- HATCHER, N.M. Solar sensors. In: ——— *A survey of attitude sensors for spacecraft*. Washington, DC, NASA, Langley Research Center, 1967. p.7-9. (NASA SP-145)
- LERNER, G.M. Sun sensors. In: WERTZ, J.R. *Spacecraft attitude determination and control*. Dordrecht, Holland, D. Reidel, 1978. part II, cap.6, sec. 6.1, p.155-166.
- NINOMIYA, K.; KATHODA, T.; MIURA, S.; SEI, H.; ISHIDA, Y. Development of sun sensors. *FUJITSU Scientific & Technical Journal*, 12(3):147-165, Sept. 1976.
- SLATER, P.N. The sun. In: ——— *Remote sensing optics and optical systems*. Reading, MA, Addison-Wesley, 1980. cap.3, sec.V, p.38-42.
- The solar constant. In: ——— *Remote sensing optics and optical systems*. Reading, MA, Addison-Wesley, 1980. cap.3, sec. VI, p.43-46.

SMITH, W.L.; HICKEY, J.; HOWELL, H.B.; JACOBOWITZ, H.; HILLEARY, D.T.;
DRUMMOND, A.J. Nimbus-6 earth radiation budget experiment.
Applied optics, 16(2):306-318, Feb. 1977.

THEKAEKARA, M.P. Solar irradiance: total and spectral and its possible
variations. *Applied optics*, 15(4):915-916, Apr. 1976.

US DEPARTMENT OF DEFENSE. *Military specification, microcircuits, linear,
operational amplifiers, monolithic silicon. s.l., 1979.*
p.55-61. (MIL-M-38510/101F).

WERTZ, J.R. Introduction. In: ——— *Spacecraft attitude determination
and control*. Dordrecht, Holland, D. Reidel, 1978. part I, cap.1,
p.1-18.

——— Modeling the earth. In: ——— *Spacecraft attitude determination
and control*. Dordrecht, Holland, D. Reidel, 1978. part I, cap. 4,
p.82-83.

APÊNDICE A

PROGRAMA DAS CURVAS DOS FOTODIODOS ATAs

Apresenta-se o programa que plota as curvas das correntes fornecidas pelos fotodiodos ATAs com a rotação do Satélite. O Programa é em linguagem BASIC para Microcomputador IBM-PC . Os resultados aparecem em forma de gráfico na tela de alta resolução.

```

10 REM NOME DO PROGRAM = CURVAS3
    FUNCAO = CALCULAR AS CORRENTES DOS DETETORES 1ATA E 2ATA DO SENSOR SOLAR
    QUANDO O SOL CRUZA, FARA VAIDS ANGULOS TETA E MOSTRAR EN UM GRAFICO DE ALTA RE
    SOLUCAO.
20 DEFDBL D
30 DPI=3.1415926535898#
40 DRAD=DPI/180#
50 INPUT "ENTRE COM A ALTURA DO BLOCO:"; DALTURA
60 INPUT "ENTRE COM O ANGULO TETA:"; DTETA
70 INPUT "ENTRE COM O FI MAXIMO:"; DFIMAX
80 INPUT "ENTRE COM O INDICE DE REFRACAO:"; DINDREF
90 INPUT "ENTRE COM O ERRO DE UNIFORMIDADE DOS FOTODIODOS:"; DUNIF
100 SCREEN 2
110 OPEN "SCRN:" FOR OUTPUT AS #1
120 LOCATE 1,1
130 PRINT "1.0";
140 LOCATE 12,1
150 PRINT "0.5";
160 LOCATE 24,1
170 PRINT "0.0";
180 LOCATE 25,41
190 PRINT "0.0";
200 LOCATE 25,2
210 PRINT USING "+###.#";-DFIMAX;
220 LOCATE 25,75
230 PRINT USING "+###.#";DFIMAX;
240 LOCATE 25,20
250 PRINT USING "+##.#";-DFIMAX/2;
260 LOCATE 25,58
270 PRINT USING "+##.#";DFIMAX/2;
280 LOCATE 1,1
290 CLOSE #1
300 LINE (25,0)-(75,0):LINE (589,0)-(639,0)

```

```

310 LINE (639,0)-(639,189)
320 LINE (639,189)-(25,189)
330 LINE (25,189)-(25,0)
340 LINE (332,0)-(332,189)
350 FOR Y=0 TO 189 STEP 19
360 LINE (25,Y)-(35,Y)
370 LINE (629,Y)-(639,Y)
380 NEXT Y
390 FOR X = 25 TO 639 STEP 10
400 LINE (X,95)-(X+4,95)
410 NEXT X
420 FOR X=24 TO 639 STEP 30.8
430 LINE (X,184)-(X,189)
440 LINE (X,93)-(X,97)
450 NEXT X
460 FOR X=24 TO 639 STEP 15.4
470 LINE (X,186)-(X,189)
480 LINE (X,94)-(X,96)
490 NEXT X
500 DTETAR=DTETA*DRAD
510 DANGINTR=(45#-DTETA)*DRAD
520 DPASSOR=(DFIMAX/307#)*DRAD
530 DFIMAXR=DFIMAX*DRAD
540 DFIR=-DPASSOR
550 FOR I=1 TO 308
560 DFIR=DFIR+DPASSOR
570 DX=COS(DANGINTR)/SQR(2#)+COS(DFIR)*SIN(DANGINTR)/SQR(2#)
580 IF DX=1# THEN DGAMAR=0#:DALFAR=0#:GOTO 630
590 DGAMAR=-ATN(DX/SQR(-DX*DX+1#))+DPI/2#
600 DSIGMAR=(90#-DTETA+DGAMAR/DRAD)*DRAD/2#
610 DY=SQR(ABS(SIN(DSIGMAR-DGAMAR)*SIN(DSIGMAR-DPI/4#)/(SIN(DGAMAR)*SIN(DPI/4#))
))
620 DALFAR=2#+ATN(DY/SQR(ABS(-DY*DY+1#)))
630 IF DGAMAR/DRAD>90# THEN DCCRATA1=0# : DCCRATA2=0# : GOTO 700
640 DZ=SIN(DGAMAR)/DINDREF

```

```

650 DGAMALR=ATN(DZ/SQR(-DZ*DZ+1#))
660 DCOORDX=COS(DALFAR)*TAN(DGAMALR)*DALTURA
670 DCOORDY=SIN(DALFAR)*TAN(DGAMALR)*DALTURA
680 IF DCOORDY<15.8# THEN IF ABS(DCOORDX)<6.9# THEN IF DCOORDY<14.5# THEN DCORATA1=.14#*COS(DGAMAR) ELSE DCORATA1=.1#*(15.8#-DCOORDY)*COS(DGAMAR) ELSE DCORATA1=0# ELSE DCORATA1=0#
690 IF DCOORDY<1.5# THEN IF ABS(DCOORDX)<6.9# THEN IF DCOORDY<.1# THEN DCORATA2=.14#*COS(DGAMAR) ELSE DCORATA2=.1#*(1.5#-DCOORDY)*COS(DGAMAR) ELSE DCORATA2=0# ELSE DCORATA2=0#
700 DPY1=190#-(DCORATA1/.14#)*190#
710 DPY2=190#-(DCORATA2/.14#)*190#
720 DPX1=332#+(DFIR/DFIMAXR)*307#
730 DPX2=332#-(DFIR/DFIMAXR)*307#
740 IF DPY1>189# THEN DPY1=189#
750 IF DPY2>189# THEN DPY2=189#
760 PSET(DPX1,DPY1)
770 PSET(DPX2,DPY1)
780 PSET(DPX1,DPY2)
790 PSET(DPX2,DPY2)
800 DDY1=(DCORATA1-DCORATA2)*190#/.14#+95#
810 DDY2=(DCORATA2-DCORATA1)*190#/.14#+95#
820 IF DDY1>189# THEN DDY1=189#
830 IF DDY2>189# THEN DDY2=189#
840 PSET(DPX1,DDY1)
850 PSET(DPX2,DDY2)
860 DDY1E1=(DCORATA1*(1#-DUNIF/2#)-DCORATA2*(1#+DUNIF/2#))*190#/.14#+95#
870 DDY1E2=(DCORATA1*(1#+DUNIF/2#)-DCORATA2*(1#-DUNIF/2#))*190#/.14#+95#
880 DDY2E1=(DCORATA2*(1#-DUNIF/2#)-DCORATA1*(1#+DUNIF/2#))*190#/.14#+95#
890 DDY2E2=(DCORATA2*(1#+DUNIF/2#)-DCORATA1*(1#-DUNIF/2#))*190#/.14#+95#
900 IF DDY1E1>189# THEN DDY1E1=189#
910 IF DDY1E2>189# THEN DDY1E2=189#
920 IF DDY2E1>189# THEN DDY2E1=189#
930 IF DDY2E2>189# THEN DDY2E2=189#
940 PSET(DPX1,DDY1E1)
950 PSET(DPX1,DDY1E2)

```

```

960 PSET(DPX2,DDY2E1)
970 PSET(DPX2,DDY2E2)
980 NEXT I
990 OPEN "SCRN:" FOR OUTPUT AS #1
1000 LOCATE 1,53
1010 PRINT "correntes";
1020 LOCATE 9,53
1030 PRINT "diferencas";
1040 LOCATE 14,1: PRINT "C";: LOCATE 15,1: PRINT "O";: LOCATE 16,1: PRINT "R";:
  LOCATE 17,1: PRINT "R";: LOCATE 18,1: PRINT "E";: LOCATE 19,1: PRINT "N";: LOCA
TE 20,1: PRINT "T";: LOCATE 21,1: PRINT "E";
1050 LOCATE 25,29
1060 PRINT "ANGULO FI";
1070 LOCATE 17,7
1080 PRINT USING "_teta= +##.#_";DTETA;
1090 LOCATE 19,7
1100 PRINT USING "_fi max= +###.#_";DFIMAX;
1110 LOCATE 19,7
1120 PRINT USING "_ind ref= #.#####";DINDREF;
1130 LOCATE 20,7
1140 PRINT USING "_altura= ##.###_mm";DALTURA;
1150 LOCATE 21,7: PRINT USING "_erro unif= #.##";DUNIF;
1160 LOCATE 1,1
1170 CLOSE #1
1190 X$=INPUT$(1)
1200 PRINT X$
1210 END

```

APÊNDICE B

RESULTADOS DOS ENSAIOS DO SENSOR SOLAR

SENSOR (ABS.)	ÂNGULO ESPERADO	(GRAUS) MEDIDO	DIFERENÇA (SEGUNDOS)
18	-1.5138	-1.435	283
19	-5.52999	-6.4500	414
20	.452375	.460000	27
21	1.43365	1.42750	22
22	2.41421	2.4425	101
23	3.39439	3.36500	105
24	4.37451	4.45249	280
25	5.35466	5.29499	215
26	6.33569	6.27500	218
27	7.31724	7.27500	152
28	8.29973	8.33000	108
29	9.28334	9.26500	262
30	10.2682	10.2625	20
31	11.2546	11.2	196
32	12.2425	12.26	62
33	13.2322	13.1475	305
34	14.2237	14.1425	292
35	15.2171	15.15	241
36	16.2125	16.16	189
37	17.2099	17.13	287
38	18.2094	18.1825	96
39	19.2110	19.1425	246

- B.2 -

40	20.2148	20.18	125
41	21.2207	21.145	272
42	22.2288	22.1475	292
43	23.2390	23.18	212
44	24.2513	24.235	58
45	25.2657	25.1925	263
46	26.2822	26.26	60
47	27.3006	27.245	200
48	28.3210	28.375	194
49	29.3433	29.2825	218
50	30.3673	30.3275	143
51	31.3930	31.335	209
52	32.4204	32.38	145
53	33.4492	33.41	141
54	34.4795	34.4675	43
55	35.5110	35.4725	138
56	36.5438	36.56	58
57	37.5776	37.5575	72
58	38.6123	38.585	98
59	39.6479	39.635	46
60	40.6842	40.705	74
61	41.7210	41.73	32
62	42.7582	42.785	96
63	43.7957	43.805	33
64	44.8333	44.795	137
65	45.8709	45.9025	113
66	46.9084	46.9725	230

67	47.9456	47.9725	96
68	48.9824	48.985	9
69	50.0187	50.065	166
70	51.0542	51.1025	173
71	52.0890	52.13	147
72	53.1228	53.115	28
73	54.1559	54.2175	222
74	55.1871	55.2175	109
75	56.2174	56.2725	198
76	57.2462	57.3025	202
77	58.2736	58.345	257
78	59.2993	59.365	236
79	60.3233	60.385	221
80	61.3456	61.285	218
81	62.3659	62.4375	257
82	63.3844	63.4125	101
83	64.4008	64.485	302
84	65.4153	65.4325	61
85	66.4276	66.4975	251
86	67.4378	67.5175	286
87	68.4459	68.5375	329
88	69.4518	69.4725	74
89	70.4556	70.5275	258
90	71.4572	71.5025	162
91	72.4567	72.545	317
92	73.4541	73.4975	156

- B.4 -

93	74.4495	74.5225	262
94	75.4429	75.52	277
95	76.4343	76.5225	317
96	77.4240	77.3675	203
97	78.4120	78.4775	235
98	79.3984	79.395	12
99	80.3833	80.4675	303
100	81.3669	81.3225	159
101	82.3494	82.4025	191
102	83.3309	83.3725	149
103	84.3118	84.375	227
104	85.2921	85.17	439
105	86.2722	86.3025	108
106	87.2524	87.2025	179
107	88.2330	88.26	97
237	89.1504	89.2325	295
236	90.1273	90.1975	252
235	91.1029	91.13	97
234	92.0775	92.1275	179
233	93.0515	93.1075	201
232	94.0252	94.0575	116
231	94.9989	94.9975	5
230	95.9729	95.9925	70
229	96.9474	96.92	98
228	97.9227	97.9325	35
227	98.8990	98.8875	41

226	99.8764	99.85	95
225	100.855	100.852	9
224	101.835	101.832	10
223	102.817	102.745	260
222	103.800	103.762	137
221	104.786	104.71	274
220	105.773	105.737	129
219	106.762	106.682	288
218	107.753	107.702	184
217	108.747	108.712	124
216	109.742	109.707	126
215	110.740	110.642	351
214	111.739	111.677	223
213	112.741	112.647	338
212	113.745	113.705	145
211	114.751	114.687	229
210	115.759	115.702	204
209	116.769	116.73	141
208	117.781	117.74	148
207	118.795	118.755	144
206	119.810	119.77	147
205	120.828	120.755	263
204	121.847	121.8	170
203	122.868	122.8	245
202	123.890	123.85	145
201	124.913	124.887	95
200	125.938	125.91	103

199	126.964	126.917	170
198	127.991	127.95	150
197	129.019	128.96	215
196	130.048	130.027	76
195	131.078	131.065	47
194	132.108	132.082	92
193	133.138	133.137	3
192	134.169	134.162	24
191	135.2	135.197	8
190	136.230	136.21	74
189	137.261	137.232	104
188	138.291	138.287	15
187	139.321	139.307	51
186	140.351	140.352	4
185	141.380	141.405	89
184	142.408	142.43	78
183	143.435	143.432	9
182	144.461	144.467	22
181	145.486	145.48	21
180	146.509	146.535	91
179	147.531	147.58	173
178	148.552	148.557	17
177	149.571	149.637	236
176	150.589	150.622	120
175	151.604	151.61	18
174	152.618	152.617	4

173	153.630	153.625	20
172	154.640	154.697	204
171	155.648	155.677	103
170	156.654	156.657	10
169	157.658	157.745	311
168	158.660	158.717	205
167	159.659	159.725	234
166	160.657	160.675	63
165	161.652	161.647	19
164	162.646	162.668	121
163	163.637	163.707	252
162	164.626	164.625	5
161	165.613	165.687	265
160	166.599	166.625	92
159	167.582	167.672	323
158	168.564	168.557	25
157	169.544	169.537	26
156	170.523	170.54	59
155	171.500	171.51	32
154	172.477	172.46	62
153	173.452	173.477	89
152	174.427	174.415	43
151	175.401	175.492	329
150	176.374	176.342	116
149	177.348	177.327	75
148	178.322	178.26	224
147	179.297	179.27	97
146	180.272	180.185	315

APÊNDICE C

TABELA DE ÂNGULOS EM FUNÇÃO DOS CÓDIGOS DO SENSOR SOLAR

Parâmetros utilizados na função de transferência:

UNIDADE A: $K_c = 0,15$
 $n = 1,4597$
 $h = 12,17$
 $\theta_y^- = 45,20^\circ$

UNIDADE B: $K_c = 0,15$
 $n = 1,4597$
 $h = 12,09$
 $\theta_y^+ = - 45,17^\circ$

JRUM

BIN * COD. GRAY * B_IDENT *** ANGULO **

18	*	0011011	***	0	***	-1.022
19	*	0011010	***	0	***	-1.039
20	*	0011110	***	0	***	.943
21	*	0011111	***	0	***	1.923
22	*	0011101	***	0	***	2.904
23	*	0011100	***	0	***	3.884
24	*	0010100	***	0	***	4.864
25	*	0010101	***	0	***	5.845
26	*	0010111	***	0	***	6.826
27	*	0010110	***	0	***	7.808
28	*	0010010	***	0	***	8.791
29	*	0010011	***	0	***	9.775
30	*	0010001	***	0	***	10.761
31	*	0010000	***	0	***	11.748
32	*	0110000	***	0	***	12.737
33	*	0110001	***	0	***	13.727
34	*	0110011	***	0	***	14.721
35	*	0110010	***	0	***	15.714
36	*	0110110	***	0	***	16.711
37	*	0110111	***	0	***	17.709
38	*	0110101	***	0	***	18.709
39	*	0110100	***	0	***	19.712
40	*	0111100	***	0	***	20.717
41	*	0111101	***	0	***	21.724

42	*	0111111	***	0	***	22.733
43	*	0111110	***	0	***	23.744
44	*	0111010	***	0	***	24.758
45	*	0111011	***	0	***	25.773
46	*	0111001	***	0	***	26.791
47	*	0111000	***	0	***	27.81
48	*	0101000	***	0	***	28.831
49	*	0101001	***	0	***	29.855
50	*	0101011	***	0	***	30.879
51	*	0101010	***	0	***	31.906
52	*	0101110	***	0	***	32.934
53	*	0101111	***	0	***	33.964
54	*	0101101	***	0	***	34.995
55	*	0101100	***	0	***	36.027
56	*	0100100	***	0	***	37.06
57	*	0100101	***	0	***	38.094
58	*	0100111	***	0	***	39.13
59	*	0100110	***	0	***	40.166
60	*	0100010	***	0	***	41.202
61	*	0100011	***	0	***	42.239
62	*	0100001	***	0	***	43.276
63	*	0100000	***	0	***	44.314
64	*	1100000	***	0	***	45.352
65	*	1100001	***	0	***	46.389
66	*	1100011	***	0	***	47.427
67	*	1100010	***	0	***	48.464
68	*	1100110	***	0	***	49.5
69	*	1100111	***	0	***	50.536
70	*	1100101	***	0	***	51.571
71	*	1100100	***	0	***	52.606
72	*	1101100	***	0	***	53.639
73	*	1101101	***	0	***	54.671
74	*	1101111	***	0	***	55.702
75	*	1101110	***	0	***	56.732
76	*	1101010	***	0	***	57.76
77	*	1101011	***	0	***	58.786
78	*	1101001	***	0	***	59.811
79	*	1101000	***	0	***	60.834
80	*	1111000	***	0	***	61.856
81	*	1111001	***	0	***	62.875
82	*	1111011	***	0	***	63.892
83	*	1111010	***	0	***	64.908
84	*	1111110	***	0	***	65.921
85	*	1111111	***	0	***	66.933
86	*	1111101	***	0	***	67.942
87	*	1111100	***	0	***	68.949
88	*	1110100	***	0	***	69.953
89	*	1110101	***	0	***	70.956
90	*	1110111	***	0	***	71.957
91	*	1110110	***	0	***	72.955
92	*	1110010	***	0	***	73.952
93	*	1110011	***	0	***	74.946
94	*	1110001	***	0	***	75.938

- C.3 -

95	*	1110000	***	0	***	76.929
96	*	1010000	***	0	***	77.918
97	*	1010001	***	0	***	78.905
98	*	1010011	***	0	***	79.891
99	*	1010010	***	0	***	80.875
100	*	1010110	***	0	***	81.858
101	*	1010111	***	0	***	82.84
102	*	1010101	***	0	***	83.821
103	*	1010100	***	0	***	84.802
104	*	1011100	***	0	***	85.782
105	*	1011101	***	0	***	86.762
106	*	1011111	***	0	***	87.742
107	*	1011110	***	0	***	88.723
108	*	1011010	***	0	***	89.705
109	*	1011011	***	0	***	90.688
109	*	1011011	***	1	***	89.639
108	*	1011010	***	1	***	90.615
107	*	1011110	***	1	***	91.59
106	*	1011111	***	1	***	92.564
105	*	1011101	***	1	***	93.538
104	*	1011100	***	1	***	94.512
103	*	1010100	***	1	***	95.485
102	*	1010101	***	1	***	96.46
101	*	1010111	***	1	***	97.435
100	*	1010110	***	1	***	98.41
99	*	1010010	***	1	***	99.387
98	*	1010011	***	1	***	100.365
97	*	1010001	***	1	***	101.345
96	*	1010000	***	1	***	102.326
95	*	1110000	***	1	***	103.308
94	*	1110001	***	1	***	104.293
93	*	1110011	***	1	***	105.279
92	*	1110010	***	1	***	106.267
91	*	1110110	***	1	***	107.257
90	*	1110111	***	1	***	108.25
89	*	1110101	***	1	***	109.244
88	*	1110100	***	1	***	110.241
87	*	1111100	***	1	***	111.239
86	*	1111101	***	1	***	112.24
85	*	1111111	***	1	***	113.243
84	*	1111110	***	1	***	114.246
83	*	1111010	***	1	***	115.255
82	*	1111011	***	1	***	116.264
81	*	1111001	***	1	***	117.275
80	*	1111000	***	1	***	118.287
79	*	1101000	***	1	***	119.302
78	*	1101001	***	1	***	120.319
77	*	1101011	***	1	***	121.337
76	*	1101010	***	1	***	122.357
75	*	1101110	***	1	***	123.379
74	*	1101111	***	1	***	124.402
73	*	1101101	***	1	***	125.426
72	*	1101100	***	1	***	126.451
71	*	1100100	***	1	***	127.476

- C.4 -

70	*	1100101	***	1	***	128.505
69	*	1100111	***	1	***	129.534
68	*	1100110	***	1	***	130.563
67	*	1100010	***	1	***	131.593
66	*	1100011	***	1	***	132.623
65	*	1100001	***	1	***	133.653
64	*	1100000	***	1	***	134.684
63	*	0100000	***	1	***	135.715
62	*	0100001	***	1	***	136.746
61	*	0100011	***	1	***	137.776
60	*	0100010	***	1	***	138.806
59	*	0100110	***	1	***	139.836
58	*	0100111	***	1	***	140.865
57	*	0100101	***	1	***	141.894
56	*	0100100	***	1	***	142.921
55	*	0101100	***	1	***	143.948
54	*	0101101	***	1	***	144.973
53	*	0101111	***	1	***	145.997
52	*	0101110	***	1	***	147.02
51	*	0101010	***	1	***	148.042
50	*	0101011	***	1	***	149.062
49	*	0101001	***	1	***	150.08
48	*	0101000	***	1	***	151.097
47	*	0111000	***	1	***	152.112
46	*	0111001	***	1	***	153.124
45	*	0111011	***	1	***	154.135
44	*	0111010	***	1	***	155.144
43	*	0111110	***	1	***	156.151
42	*	0111111	***	1	***	157.156
41	*	0111101	***	1	***	158.159
40	*	0111100	***	1	***	159.16
39	*	0110100	***	1	***	160.158
38	*	0110101	***	1	***	161.155
37	*	0110111	***	1	***	162.149
36	*	0110110	***	1	***	163.142
35	*	0110010	***	1	***	164.132
34	*	0110011	***	1	***	165.12
33	*	0110001	***	1	***	166.106
32	*	0110000	***	1	***	167.091
31	*	0010000	***	1	***	168.073
30	*	0010001	***	1	***	169.054
29	*	0010011	***	1	***	170.034
28	*	0010010	***	1	***	171.012
27	*	0010110	***	1	***	171.989
26	*	0010111	***	1	***	172.964
25	*	0010101	***	1	***	173.939
24	*	0010100	***	1	***	174.914
23	*	0011100	***	1	***	175.887
22	*	0011101	***	1	***	176.861
21	*	0011111	***	1	***	177.835
20	*	0011110	***	1	***	178.809
19	*	0011010	***	1	***	179.784
18	*	0011011	***	1	***	180.76