

UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

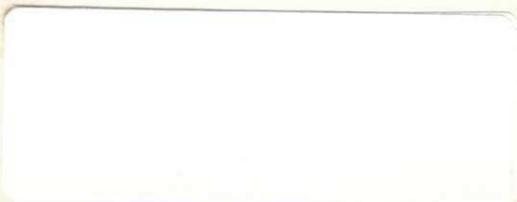
+ CONTROLE AUTOMÁTICO PARA UM HELIOSTATO SOLAR

por

RAIMUNDO CARLOS SILVÉRIO FREIRE

ORIENTADOR: PROF. JOSÉ IVAN CARNAÚBA ACCIOLY

CAMPINA GRANDE - Pb., 1982



CONTROLE AUTOMÁTICO PARA UM HELIOSTATO
SOLAR

por

RAIMUNDO CARLOS SILVÉRIO FREIRE

TESE DE MESTRADO

Apresentada à Coordenação Setorial de Pós-Graduação e Pesquisa da Pró-Reitoria para Assuntos do Interior da Universidade Federal da Paraíba, em cumprimento às exigências para obtenção do Grau de Mestre em Ciências.

Campina Grande, Março de 1982.



F866c Freire, Raimundo Carlos Silvério.
Controle automático para um heliostato solar / Raimundo Carlos Silvério Freire. - Campina Grande, 1982.
122 f.

Dissertação (Mestrado em Ciências) - Universidade Federal da Paraíba, Centro de Ciências e Tecnologia, 1982.
"Orientação : Prof. Dr. José Ivan Carnaúba Accioly".
Referências.

1. Controle Automático. 2. Heliostato Solar - Controle Automático. 3. Energia Solar - Aproveitamento. 4. Dissertação - Ciências. I. Accioly, José Ivan Carnaúba. II. Universidade Federal da Paraíba - Campina Grande (PB). III. Título

CDU 62-52(043)



CPqEE/CCT-UFPB

COORDENAÇÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA

UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA

PARECER FINAL DO JULGAMENTO DA DISSERTAÇÃO DO MESTRANDO

RAIMUNDO CARLOS SILVÉRIO FREIRE

TÍTULO: "Controle Automático para um Heliostato Solar"

CONCEITO: APROVADO COM DISTINÇÃO

COMISSÃO EXAMINADORA:

PROF. JOSÉ IVAN CARNAÚBA ACCIOLY - M.Sc

- Presidente -

PROF. JOÃO DAMASCO MANGUEIRA BRAGA - M.Sc

PROF. JÚLIO GOLDFARB - M.Sc

PROF. GURDIP SINGH DEEP - Ph.D

Campina Grande, 04 de março de 1982.

DEDICATÓRIA

Aos meus pais, irmãos e filhos.

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. JOSÉ IVAN CARNAÚBA ACCIOLY, pela sua orientação que foi de suma importância na elaboração deste trabalho, o meu mais profundo agradecimento.

Ao Prof. JOÃO DAMASCO MANGUEIRA BRAGA o meu agradecimento pela inestimável ajuda na correção final do texto.

Ao Prof. G. S. DEEP, pelo apoio dado, o meu reconhecimento.

À MARIA DE FÁTIMA FERREIRA PEREIRA, pela ajuda prestada na datilografia do texto, o meu agradecimento.

À JOSÉ AURÉLIO PESSOA, pela ajuda prestada na montagem do protótipo e na confecção dos desenhos, o meus agradecimento.

À APEL - Aplicações Eletrônicas Ltda, por ter facilitado o uso de suas instalações para testes e montagens, meu agradecimento.

Ao CNPq - Conselho Nacional de Pesquisa, pelo financiamento deste trabalho, meu agradecimento.

Finalmente, a todos que contribuíram direta ou indiretamente na realização deste trabalho o meu mais sincero agradecimento.

RESUMO

Dentre os meios de aproveitamento da energia solar por transformações diretas, destacam-se as centrais tipo torre, nas quais a concentração é feita mediante o direcionamento para um mesmo lugar dos raios refletidos por vários espelhos.

Este trabalho refere-se ao projeto e a implementação de um controle automático para um heliostato solar, parte essencial de uma central tipo torre.

ABSTRACT

Among the methods of using solar energy by direct transformation to other forms, one of the more useful is tower type concentrator receiving reflected energy from a number of plane mirrors.

In this thesis the design and construction of an automatic control system for a solar heliostat, which is an essential part of a tower type concentrator, is presented.

INDICE

	PÁGINA
CAPÍTULO I - CRISE ENERGÉTICA E ENERGIA SOLAR.....	1
1.1 - Aproveitamento da energia solar por transformação indireta e a necessida de de aproveitã-la diretamente.....	1
1.2 - Formas de aproveitamento da energia solar por transformação direta.....	2
1.2.1 - Células solares.....	2
1.2.2 - Coletores solares de concen- tração.....	3
1.3 - Apresentação do trabalho.....	3
CAPÍTULO II - HELIOSTATO SOLAR.....	5
2.1 - Mecânica Solar.....	5
2.1.1 - Movimentos do sol em relação a terra.....	5
2.1.2 - Movimento leste-oeste.....	6
2.1.3 - Movimento norte-sul-norte...	6
2.2 - Movimentos do espelho do heliostato.	11
2.3 - Soluções possíveis para o acionamen- to dos heliostatos.....	15
2.4 - Dimensionamento e soluções adotadas.	16
CAPÍTULO III - CAMPO HELIOSTÁTICO.....	19
3.1 - Posicionamento dos espelhos e da	

	PÁGINA
torre no terreno.....	19
3.2 - Forma e dimensão dos espelhos dos heliostatos.....	22
3.3 - Tolerância de enfoque.....	25
3.4 - Ângulo inicial no sentido leste-oeste e ângulos máximos e mínimos na direção norte-sul.....	26
3.5 - Exemplo de cálculo dos ângulos inicial, máximo e mínimo.....	29
 CAPÍTULO IV - SISTEMA DE CONTROLE.....	 31
4.1 - Soluções possíveis para o controle automático do heliostato solar.....	31
4.1.1 - Sistema completo de controle.....	31
4.1.2 - Sistema eletrônico de controle.....	33
4.2 - Considerações e soluções adotadas...	34
4.2.1 - Considerações para o movimento leste-oeste.....	34
4.2.2 - Considerações para o movimento norte-sul.....	35
4.3 - Diagrama de blocos.....	36
 CAPÍTULO V - SENSORES DE DIREÇÃO DE LUZ.....	 39
5.1 - Características de um sensor de di-	

	PÁGINA
reção luminosa.....	39
5.2 - Soluções possíveis para o sensor de direção de luz.....	39
5.2.1 - Sensor de direção luminosa com lente convergente.....	40
5.2.2 - Sensor de direção de luz por projeção de sombras.....	41
5.3 - Escolha do sensor de luminosidade...	44
5.4 - Implementação do sensor de direção de luz.....	47
5.4.1 - Aproveitamento dos fotodio- dos.....	47
5.4.2 - Escolha do sensor de direção luminosa e cálculo dos seus ângulos de captura e corre- ção.....	48
5.4.3 - Variação da área iluminada dos fotodiodos.....	48
5.4.4 - Cálculo da altura h do sen- sor de direção luminosa.....	52
 CAPÍTULO VI - CIRCUITO ANALÓGICO.....	 57
6.1 - Buffer's.....	57
6.2 - Somador - Subtrator.....	58
6.3 - Nível de luminosidade recebida pelos fotodiodos.....	59

	PÁGINA
6.4 - Comparadores.....	68
6.4.1 - Pequenos erros de direção lu- minosa.....	69
6.4.2 - Grandes erros de direção lu- minosa.....	72
6.5 - Nível de luminosidade refletida pe- los espelhos.....	74
6.6 - Comparador para indicador de baixa luminosidade.....	75
 CAPÍTULO VII - CIRCUITOS LÓGICOS.....	 79
7.1 - Circuitos lógicos para seleção de frequência e sentido de rotação dos motores.....	79
7.1.1 - Comandos lógicos.....	79
7.1.2 - Comandos comuns aos dois mo- vimentos.....	80
7.1.3 - Comandos para o movimento no sentido leste-oeste.....	80
7.1.4 - Comandos para o movimento na direção norte-sul.....	81
7.1.5 - Implementação da lógica para o movimento leste-oeste.....	82
7.1.5.1 - Seleção do sentido de rotação do mo- tor.....	82

7.1.5.2 - Seleção da frequên cia de comando pa- ra o motor.....	83
7.1.5.3 - Seleção da tensão de alimentação do motor.....	85
7.1.6 - Implementação da lógica pa- ra o movimento norte-sul....	85
7.1.6.1 - Seleção do sentido de rotação do mo- tor.....	86
7.1.6.2 - Seleção da frequên cia de comando pa- ra o motor.....	87
7.1.6.3 - Comando de desener gização do motor..	88
7.2 - Multivibradores e divisor de frequên cia.....	89
7.2.1 - Multivibrador astável e divi sor de frequência.....	89
7.2.2 - Geração de pulsos.....	90
7.3 - Comandos externos.....	90
7.3.1 - Acionamento, retorno e dese- nergização.....	90
7.3.2 - Velocidades rāpidas para os motores.....	92

	PÁGINA
7.4 - Comandos dos motores.....	93
7.4.1 - Movimento leste-oeste.....	94
7.4.2 - Movimento norte-sul.....	94
 CAPÍTULO VIII - ESTÁGIO DE POTÊNCIA.....	 96
8.1 - Estágios de potência dos motores...	96
8.2 - Regulador para alimentação dos circuitos integrados.....	98
 CAPÍTULO IX - CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	 99
9.1 - LED's Pilotos.....	99
9.2 - Montagem.....	100
9.2.1 - Separação em unidades eletrônicas.....	100
9.2.2 - Conectores.....	108
9.3 - Ajustes.....	108
9.3.1 - Posição do sensor de direção de luz.....	108
9.3.2 - Sensibilidade dos fotodiodos.....	108
9.3.3 - Sensibilidade do sensor de direção de luz.....	108
9.3.4 - Frequência dos multivibradores.....	117
9.4 - Considerações quanto à sensibilidade e à altura do sensor de dire	

	PÁGINA
ção luminosa.....	117
9.5 - Resultados.....	117
9.6 - Conclusão.....	119
REFERÊNCIAS.....	121

LISTA DOS PRINCIPAIS SÍMBOLOS

- E : densidade de fluxo de energia recebida
- σ : constante de STEPHAN - BOLTZMANN
- T : temperaturas em graus absolutos
- D : declinação solar
- d : tempo em dias
- H : altura da caldeira
- Y : distância do heliostato ao eixo N-S
- α : ângulo de desvio dos espelhos, no sentido leste-oeste, para um giro destes sobre o eixo N-S
- δ : ângulo sobre um plano vertical entre os raios incidentes e refletidos (para D = 23 graus)
- β : ângulo sobre um plano vertical entre os raios incidentes e refletidos (para D = -23 graus)
- \vec{NS} : vetor velocidade na direção norte-sul
- \vec{LO} : vetor velocidade na direção leste-oeste
- \vec{R} : resultante da adição dos vetores \vec{NS} e \vec{LO}
- θ : ângulo entre os vetores \vec{LO} e \vec{R}
- \vec{CT} : componente do vetor \vec{R}
- \vec{CZ} : componente do vetor \vec{R}
- Vel : velocidade média do motor na direção leste-oeste
- Rot : rotações do motor do sentido norte-sul no dia de máximo movimento
- r : maior raio interno da caldeira
- M : distância do espelho a caldeira
- Te : tolerância de enfoque

- λ : ângulo inicial na direção leste-oeste
 ϕ : ângulo entre o espelho e a superfície terrestre na direção norte-sul
 X : distância do heliostato ao eixo L-0
 h : altura do sensor de direção luminosa
 ℓ : altura da parede lateral do sensor de direção luminosa
 m : diâmetro do sensor de luminosidade
 n : largura da sombra
 v_{sk} : tensão na base do fotodiodo k
 I_k : corrente pela base do fotodiodo k
 I_{rk} : irradiação solar recebida pelo fotodiodo k
 A_{ik} : área iluminada do fotodiodo k
 V_e : tensão de erro
 V_ℓ : tensão proporcional ao nível de luminosidade recebida pelos fotodiodos
 V_δ : tensão proporcional ao nível de luminosidade recebida pelo fotodiodo mais iluminado
 Δn : variação da largura da sombra
 ΔA_{ik} : variação da área iluminada
 Δv_{sk} : variação da tensão nas bases dos fotodiodos
 V_c : nível para o primeiro erro padrão
 V_g : nível para o segundo erro padrão
 V_i : nível referente a luminosidade
 U/D : seleção do sentido de rotação dos motores
 f_δ : frequência para os motores
 A_t : nível para seleção da tensão de alimentação do motor do movimento leste-oeste

EN : nível para desenergização do motor do movimento N-S

MEI : entrada do monoestável

ME0 : saída do monoestável

I : comandos externos

F_{ki} : fase i do motor k

CAPÍTULO I

CRISE ENERGÉTICA E ENERGIA SOLAR

A energia é um fator preponderante do conforto e do bem-estar dos homens, porém suas fontes nem sempre são renováveis. Como o maior percentual de energia consumida atualmente é de fonte não renovável e como o consumo aumenta com o tempo, conclui-se que é necessário encontrar alguma fonte de energia que substitua as que deverão se extinguir e que seja, de preferência, renovável.

1.1 - APROVEITAMENTO DA ENERGIA SOLAR POR TRANSFORMAÇÃO INDIRETA E A NECESSIDADE DE APROVEITÁ-LA DIRETAMENTE.

Analisando-se a origem das diferentes formas de energia conhecidas chega-se na maioria dos casos ao sol:

- 1 - Energia hidráulica - resultado de um processo que começa com a evaporação das águas, provocada pelo sol;
- 2 - Energia das marés - sol e lua, pela força gravitacional, provocam as marés;
- 3 - Energia eólica - o aquecimento diferenciado das regiões terrestres pelo sol, acarreta diferentes pressões na atmosfera, as quais provocam os ventos;
- 4 - Combustíveis renováveis - madeira, álcool, óleos vegetais, etc, devem a energia que contêm ao sol,

através do processo da fotossíntese.

- 5 - Energia fóssil - carvão vegetal, petróleo, gás natural, novamente o sol e a fotossíntese desempenhando papéis preponderantes.

Não obstante, a energia solar não tem sido aproveitada em grande escala em transformações diretas.

A energia solar recebida na superfície terrestre é da ordem de 1 KW/m^2 em seu pico máximo, que em Campina Grande ocorre por volta das 11:40 horas. Durante o dia a absorção da radiação solar por refração na alta atmosfera conduz a variação de potência ao nível do solo segundo uma curva de Gauss, limitando-se o aproveitamento da radiação solar a 8 horas por dia.

Estima-se que todas as reservas de energia de formas convencionais disponíveis ainda não serão suficientes para atender as necessidades do próximo século.

1.2 - FORMAS DE APROVEITAMENTO DA ENERGIA SOLAR POR TRANSFORMAÇÃO DIRETA

O aproveitamento da energia solar por transformação direta pode ser feito basicamente de duas maneiras: através da transformação direta em energia elétrica por células solares ou por meio dos coletores solares de concentração.

1.2.1 - CÉLULAS SOLARES

Também chamadas de células fotovoltaicas, as células solares apresentam atualmente, os inconvenientes de ter um alto

custo e um baixo rendimento (da ordem de 10%).

1.2.2 - COLETORES SOLARES DE CONCENTRAÇÃO

Para o aproveitamento em grande escala da energia solar recebida na superfície terrestre, utilizam-se os coletores solares de concentração. Para estes converge a energia solar recebida em uma área muito superior à sua. A temperatura neles é então elevada segundo a relação de Stephan - Boltzmann.

$$E = \sigma T^4 \rightarrow T = \sqrt[4]{E/\sigma}$$

Com um rendimento térmico das caldeiras da ordem de 50%, pode-se obter um rendimento global de 15% para a produção de eletricidade, uma vez que o ciclo termodinâmico tem um rendimento aproximado de 30%. Para a utilização direta em metalurgia, pode-se obter um rendimento global de até 40% com os fornos solares.(1)

1.3 - APRESENTAÇÃO DO TRABALHO

Dentre os diversos tipos de coletores solares figuram as centrais tipo torre, nas quais se produz eletricidade ou os chamados combustíveis sintéticos como hidrogênio, amônia e hidrazina. A concentração das imagens solares é feita por vários espelhos direcionados para a mancha focal. Com o movimento aparente do sol, deve-se fazer com que os espelhos se desloquem de maneira que fiquem sempre refletindo para a mesma área.

Com este trabalho, propõe-se fazer a implementação de controle automático para esses espelhos ou seja, o controle auto-

mático para um heliostato solar.

CAPÍTULO II

HELIOSTATO SOLAR

Um heliostato solar, por definição, é um dispositivo destinado a manter em uma posição constante com referência ao disco solar, uma superfície absorvedora ou refletora, interposta ao percurso da radiação para utilizá-la no próprio heliostato ou para refletí-la em um terceiro elemento fora do dispositivo.

Para que se possam conhecer os movimentos de um heliostato solar, devem ser antes compreendidos os movimentos do sol em relação ao heliostato.

2.1 - MECÂNICA SOLAR

Os movimentos do sol em relação à terra têm, naturalmente, vital importância quanto ao projeto de um sistema de controle automático para um heliostato solar.

Na verdade o que realmente importa para este projeto é o conhecimento da incidência dos raios solares em função de diversas variáveis significativas tais como: latitude, época do ano e hora do dia.

2.1.1 - MOVIMENTOS DO SOL EM RELAÇÃO À TERRA

Dos inúmeros movimentos da terra, dois são significativos para o projeto proposto: o movimento de rotação em torno

do próprio eixo e o movimento de translação em torno do sol.

Tendo-se como referência o heliostato, estes dois movimentos se apresentam como um movimento diário do sol no sentido leste-oeste e outro na direção norte-sul.¹

2.1.2 - MOVIMENTO LESTE-OESTE

O sol faz uma volta completa ao redor da terra em aproximadamente 24 horas,² portanto com uma velocidade de 15 graus por hora.

O movimento do sol no sentido leste-oeste será referido aqui sempre como movimento leste-oeste.

2.1.3 - MOVIMENTO NORTE-SUL-NORTE

Com o movimento de rotação da terra, os raios solares que

- 1 - Usa-se nesse trabalho "sentido" leste-oeste, porém "direção" norte-sul, devido a que o movimento do sol em determinadas épocas do ano é de norte para sul e noutras, de sul para norte.
- 2 - Na realidade a terra faz uma volta completa em torno do seu próprio eixo em 23 horas, 56 minutos e 4 segundos, e o tempo que o sol leva para fazer uma volta completa ao redor da terra (visto da terra) depende da distância entre os dois variando em torno de 24 horas (5,6,7,8).

atingem perpendicularmente a superfície terrestre percorrem curvas paralelas ao equador³ que variam sua distância angular deste com a época do ano, sendo os valores de pico de 23 graus⁴. A esta distância angular chama-se declinação solar e a estas curvas, paralelos.(8,9)

Nos dias 23 de setembro e 21 de março o sol aparentemente está percorrendo a linha do equador, são os equinócios, com declinação nula. Nos dias 21 de junho e 21 de dezembro ocorrem os solstícios, que correspondem aos valores máximo e mínimo de declinação solar.

A figura 2.1.3.1 é uma tabela de declinação solar. Para obter-se o ângulo entre a vertical de um lugar qualquer e a projeção dos raios solares sobre o plano do meridiano que passa por esse lugar, basta somar-se aos valores da tabela a latitude desse lugar (no caso de Campina Grande é de -7,3 graus). Esse ângulo será chamado, neste trabalho, de ângulo de incidência na direção norte-sul.

Por essa tabela pode-se aproximar o valor da declinação solar por uma senoide e o valor do ângulo de incidência na direção norte-sul por uma senoide deslocada de um nível constante, onde esse nível constante é a latitude do lugar que se quer encontrar o valor do ângulo de incidência.

3 - Essas curvas não são exatamente paralelas ao equador, porém como a variação diária é muito pequena, pode-se assim considerar.

4 - Na realidade é de 23 graus e 27 minutos. (7, 8)

Figura 2.1.3.1 - TABELA DE DECLINAÇÃO SOLAR

Meses	DECLINAÇÃO								
	dias	01	05	09	13	17	21	25	29
Janeiro		+23	+22	+22	+21	+20	+20	+19	+18
Fevereiro		+17	+16	+14	+13	+12	+10	+09	
Março		+ 7	+ 6	+ 4	+ 3	+ 1	0	- 1	- 3
Abril		- 4	- 5	- 7	- 8	-10	-11	-12	-14
Maiο		-14	-16	-17	-18	-19	-20	-20	-21
Junho		-21	-22	-22	-23	-23	-23	-23	-23
Julho		-23	-22	-22	-21	-21	-20	-19	-18
Agosto		-18	-17	-16	-14	-13	-12	-11	- 9
Setembro		- 8	- 7	- 5	- 4	- 2	- 1	0	+ 2
Outubro		+ 2	+ 4	+ 5	+ 7	+ 8	+10	+11	+13
Novembro		+14	+15	+16	+17	+18	+19	+20	+21
Dezembro		+21	+22	+22	+23	+23	+23	+23	+23

Se a contagem do tempo for feita em dias, considerando 31 de dezembro como zero, 1 de janeiro como 1 e 30 de dezembro como 364 pode-se escrever a seguinte equação para a declinação solar:

$$D = 23 \operatorname{sen}\left\{\frac{360}{365} (d + 102)\right\} \quad 2.1.3.1$$

Onde D é declinação e d é o tempo em dias.

Um gráfico da declinação solar, feito ponto a ponto com os valores da tabela da figura 2.1.3.1 é mostrado na figura 2.1.3.2. A figura 2.1.3.3 mostra um gráfico da equação 2.1.3.1; vê-se que esta é uma boa aproximação. A figura 2.1.3.4 é um gráfico do ângulo de incidência na direção norte-sul para Campina Grande, que é o mesmo gráfico da figura 2.1.3.3 com um deslocamento de -7,3 graus no eixo D.

Algumas análises feitas a seguir, com base na equação 2.1.3.1 são válidas para qualquer região e não apenas para o equador terrestre, pois um valor constante diferenciativo eliminar-se-ia seja na derivada seja na subtração, em que apareceria nos dois termos.

Para determinar a velocidade máxima do sol na direção norte-sul deve-se derivar a equação da declinação.

$$D' = \frac{360}{365} 23 \operatorname{cos}\left\{\frac{360}{365} (d + 102)\right\} \quad 2.1.3.2$$

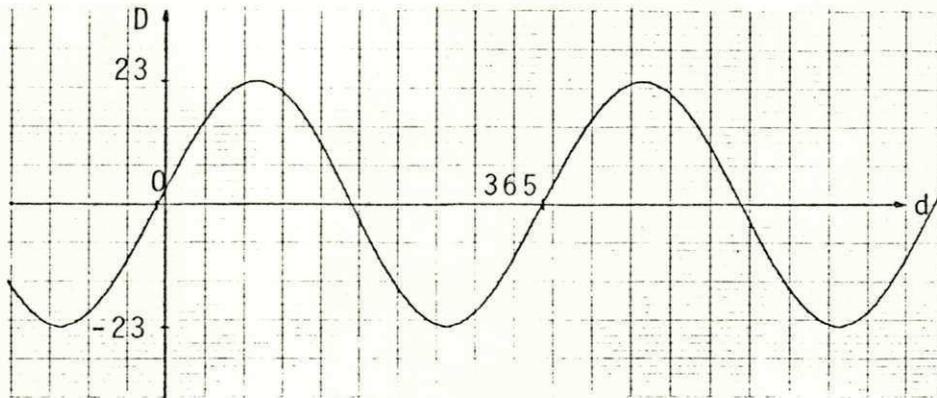


Figura 2.1.3.3 - gráfico da equação 2.1.3.1

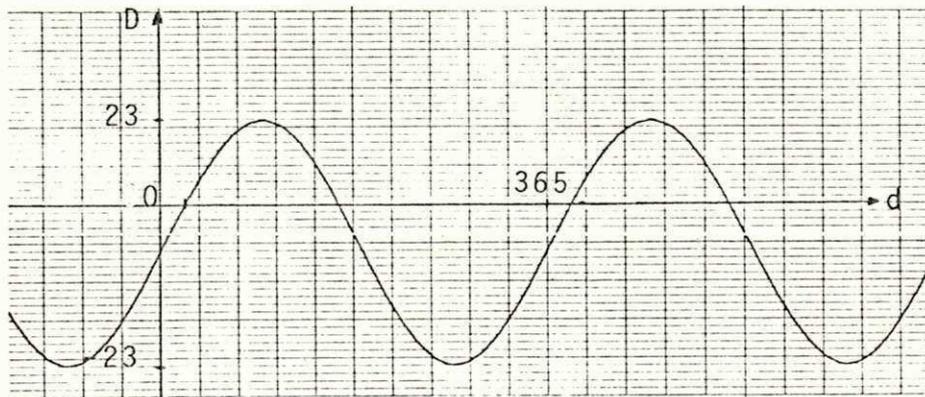


Figura 2.1.3.4 - ângulo de incidência na direção norte-sul para Campina Grande

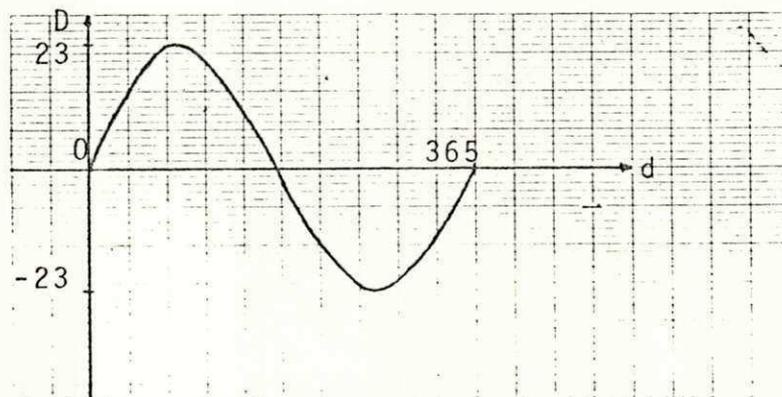


Figura 2.1.3.2 - gráfico da declinação solar

A velocidade máxima nesta direção sendo:

$$\frac{360}{365} 23 \text{ graus/dia} \approx 23 \text{ graus/dia}$$

Nos dias de maior ou menor velocidade (21 de março e 23 de setembro) a distância angular percorrida pelo sol é de aproximadamente 0,4 grau, como se mostra a seguir:

$$\text{Percurso} \approx 23 \left\{ \sin \frac{360}{365} 181,5 - \sin \frac{360}{365} 182,5 \right\} \approx 0,4 \text{ grau}$$

Este cálculo feito para $d = 80$ que corresponde ao dia 21 de março.

Esse valor pode ser também tirado da tabela da figura 2.1.3.1 ou dos gráficos das figuras 2.1.3.2, 2.1.3.3 e 2.1.3.4.

2.2 - MOVIMENTOS DO ESPELHO DO HELIOSTATO

Para que o espelho do heliostato esteja sempre refletindo numa mesma direção é preciso que ele tenha movimentos em torno de dois de seus eixos, os quais, por simplicidade, podem ser analisados como se fossem no sentido leste-oeste e na direção norte-sul.

Numa mesma direção, o deslocamento angular do espelho do heliostato será de apenas a metade do deslocamento do sol. Esta análise será feita a seguir:

Tomando-se como referência uma normal à superfície do espelho, vê-se que para este espelho estar sempre refletindo os

raios solares para a caldeira (como na figura 2.2.1), estando o sol no horizonte leste, esta normal faz 45 graus com a direção leste-oeste e com o sol no horizonte oeste este ângulo é de -45 graus; assim, enquanto o sol percorre 180 graus, a normal so mente terá de girar 90 graus.

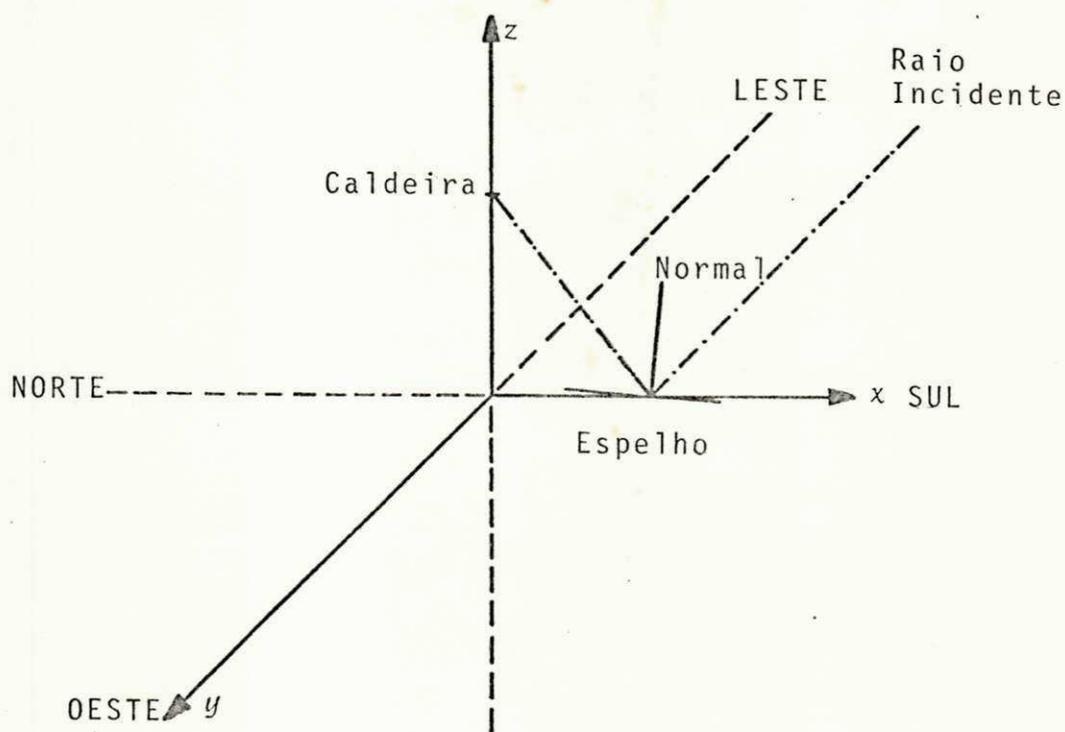


Figura 2.2.1 - Incidência e reflexão dos raios solares no heliostato com a linha que une este à torre é paralela à direção norte-sul.

Na figura 2.2.1 está esquematizado um caso particular em que a linha que une o espelho à torre é paralela à direção norte-sul. Na figura 2.2.2, um caso geral será analisado a seguir.

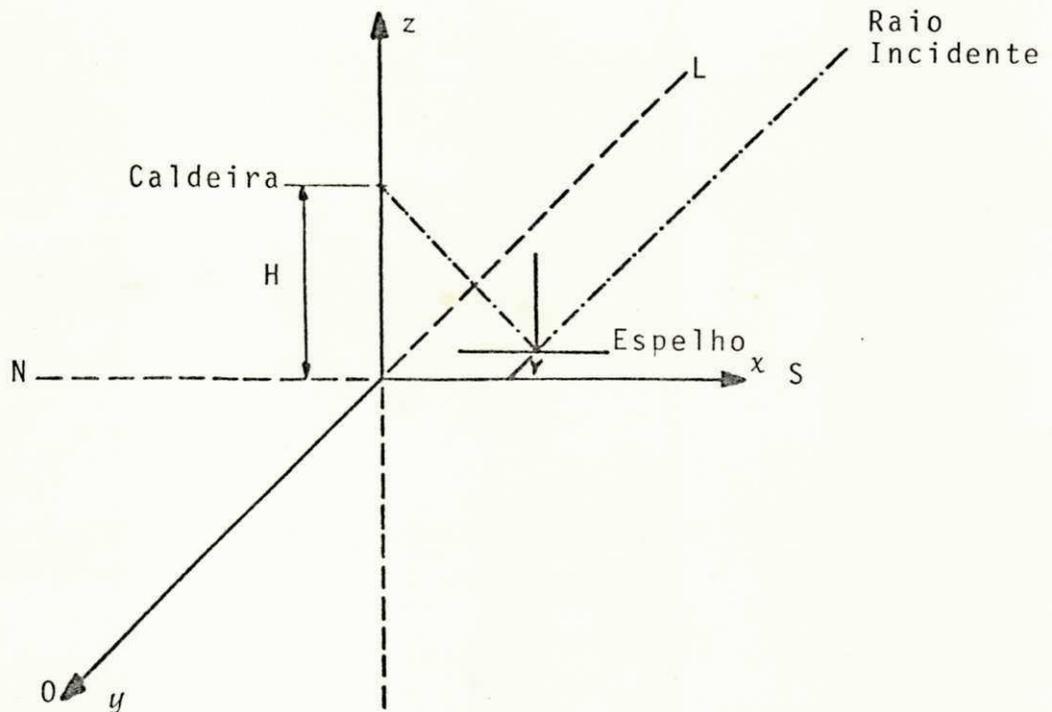


Figura 2.2.2 - Incidência e reflexão dos raios solares no espelho do heliostato com este em uma posição qualquer.

Neste caso, os ângulos que a componente da normal do espelho paralela ao plano yz faz com a direção leste-oeste são os seguintes:

Quando o sol está no horizonte leste, este ângulo é de 45 graus + α e quando está no horizonte oeste -45 graus + α , o que dá um deslocamento total do espelho no sentido leste-oeste de 90 graus.

O ângulo α tem seu valor dado por $\frac{1}{2} \text{ arc tg } \frac{Y}{H}$.

Na figura 2.2.3 vê-se o caso do movimento na direção norte-sul, onde β é o maior ângulo que fazem as componentes paralelas ao plano xz dos raios incidentes e δ é o menor ângulo.

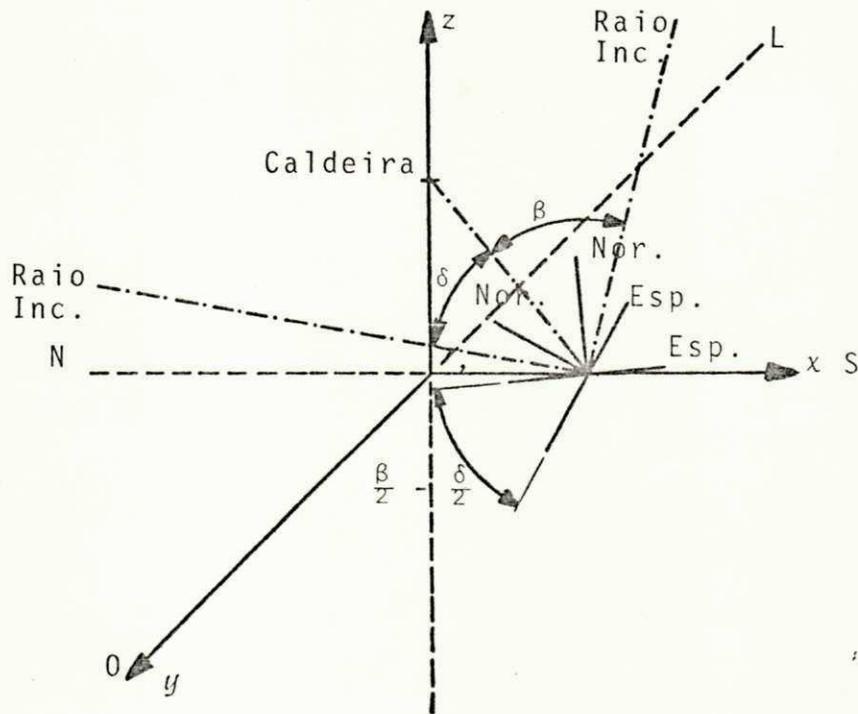


Figura 2.2.3 - Variação da posição normal com a declinação solar.

A componente paralela ao plano xz da normal do espelho é sempre bissetriz das componentes neste plano dos raios incidentes e refletidos, tendo nos casos extremos os valores $\frac{\beta}{2}$ e $\frac{\delta}{2}$. Com $\beta - \delta = 46$ graus (valor pico a pico da senoide da equação de declinação solar), conclui-se que o deslocamento do espelho é aproximadamente a metade ($\frac{\beta}{2} - \frac{\delta}{2}$) do deslocamento angular

da declinação solar durante meio ano.

O espelho do heliostato deverá então ter uma velocidade de aproximadamente 7,5 graus/hora no sentido leste-oeste e na direção norte-sul aquele espelho deverá ter um deslocamento máximo de 0,2 grau, nos equinócios.

2.3 - SOLUÇÕES POSSÍVEIS PARA O ACIONAMENTO DOS HELIOSTATOS

Num diagrama vetorial de velocidade (como o da figura 2.3.1), vê-se que a correção de posição do espelho pode ser feita por quaisquer dois vetores ortogonais, cujos módulos possam variar de acordo com a variação da resultante (\vec{R}) dos vetores velocidade leste-oeste ($\vec{L0}$) e norte-sul (\vec{NS}).

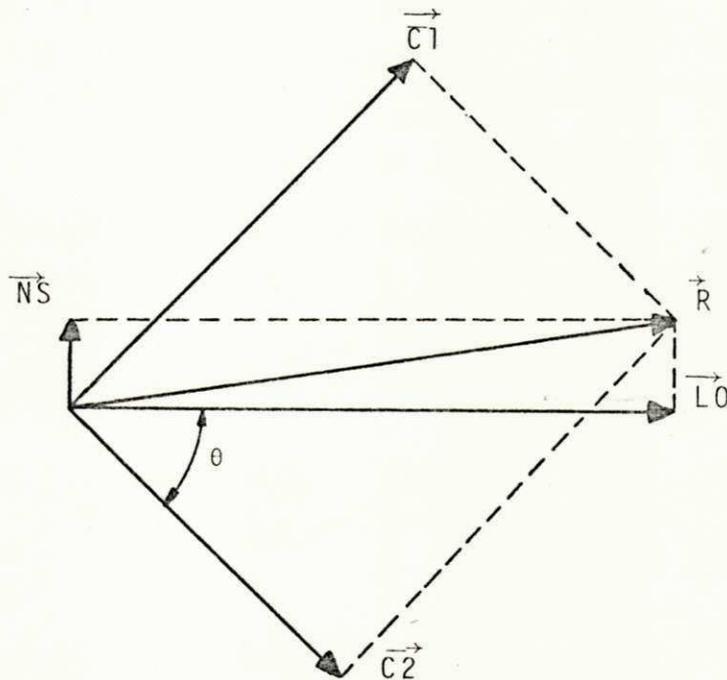


Figura 2.3.1 - Diagrama vetorial de velocidades dos eixos do espelho do heliostato.

Se existe interesse em que os sistemas de comando dos movimentos do espelho sejam semelhantes; deve-se fazer com que os vetores $\vec{C1}$ e $\vec{C2}$ sejam ortogonais e que tenham módulos de mesma ordem; para que isto ocorra, deve-se considerar o seguinte:

Como o vetor \vec{NS} tem módulo médio nulo, o valor de θ deve ser igual a 45 graus, ficando os módulos médios de $\vec{C1}$ e $\vec{C2}$ iguais a:

$$|\vec{C1}| = |\vec{C2}| = \frac{\sqrt{2}}{2} 180 \text{ graus/dia} = 90 \sqrt{2} \text{ graus/dia}$$

Os vetores $\vec{C1}$ e $\vec{C2}$ devem então ficar nos sentidos sudoeste-nordeste e noroeste-sudeste; com a variação de seus módulos será sempre possível obter os vetores leste-oeste (\vec{LO}) e norte-sul (\vec{NS}).

Outra maneira de acionamento do heliostato é fazer com que $\vec{C1} = \vec{NS}$ e $\vec{C2} = \vec{LO}$.

O uso da segunda maneira possibilita as vantagens de só ser necessário retrocesso ao final do dia no sentido oeste-leste, pois na direção norte-sul o deslocamento diário é muito pequeno; outra vantagem ainda é a de ser menor o consumo de potência pelos motores que comandam os movimentos.

2.4 - DIMENSIONAMENTO E SOLUÇÕES ADOTADAS

Como o espelho deve ter movimentos muito lentos, necessário se faz uma redução mecânica de velocidade para os motores. Utilizando-se os motores comuns haveria um alto desgaste mecânico devido às suas velocidades altas, torna-se necessário então

encontrar um motor que possa assumir velocidades bem baixas, o que se pode conseguir com os motores passo a passo.

Esse motor tem também a vantagem de poder ter sistemas de comando semelhantes, mesmo quando os movimentos do espelho são no sentido leste-oeste e na direção norte-sul.

No heliostato usado neste trabalho há uma redução de velocidade para o motor da ordem de 50.000, tanto no sentido leste-oeste quanto na direção norte-sul.

No sentido leste-oeste a velocidade que o motor deverá ter quando o espelho estiver alinhado na direção da caldeira será:

$$vel = 180 \text{ graus/dia} \times 50.000 \approx 17,36 \text{ rpm}$$

O motor utilizado neste trabalho tem um passo de 15 graus; sua velocidade em passos por segundo será:

$$vel = \frac{17,36}{60} \times \frac{360}{15} \approx 7 \text{ passos por segundo}$$

Na direção norte-sul, no dia de máximo deslocamento, o eixo do motor dará o seguinte número de rotações:

$$Rot = \frac{0,2 \times 50.000}{360} = 27,8 \text{ rotações}$$

Se a cada deslocamento de 15 graus do eixo do motor, for dado a este um pulso de comando, então a quantidade de pulsos de comando durante o dia de máximo deslocamento será de:

$$Q_p = 27,8 \times \frac{360}{15} = 666 \text{ pulsos}$$

2.5 - RESULTADOS

Dentre as perdas mecânicas da potência fornecida pelo motor ao espelho podem-se destacar o atrito em todo o conjunto de redução de velocidade e a ação dos ventos sobre a superfície do espelho.

O motor utilizado é um motor com tensão nominal de 24 volts e corrente de 0,9 ampères.

Em laboratório foi feito teste com o motor associado ao espelho e ao conjunto redutor de velocidade (redução de 50.000) e este atingiu a velocidade de até 370 pulsos por segundo (925 μpm) com alimentação de 24 volts e de até 120 pulsos por segundo (300 μpm) com alimentação de 12 volts.

Vê-se desta maneira que o motor utilizado tem potência suficiente para movimentar o espelho do heliostato na velocidade antes mencionada (17,36 μpm ou 7 pulsos por segundo) e também para fazer correções rápidas que como será visto em capítulo posterior serão 16 vezes mais velozes, ou seja, serão de 112 pulsos por segundo ou 277 μpm .

CAPÍTULO III

CAMPO HELIOSTÁTICO

Para a implementação do sistema de controle automático do heliostato solar, é de vital importância conhecer a posição do heliostato em relação à torre, assim como a altura desta, o diâmetro da caldeira e a área do espelho do heliostato.

Os dados aqui apresentados foram retirados do projeto "usina eólico-solar para produção de hidrogênio eletrolítico" de autoria de Serey Lopez, Júlio Goldfarb e Pedro Abraão Died.(3)

3.1 - POSICIONAMENTO DOS ESPELHOS E DA TORRE NO TERRENO

O posicionamento dos heliostatos no terreno deve ser fixado com o critério de evitar a projeção de sombras de uns espelhos sobre seus adjacentes e diminuir ao máximo as distâncias dos heliostatos à caldeira, pois se os espelhos não projetam sombras sobre seus adjacentes, haverá máxima recepção de raios solares pela caldeira e com a diminuição da distância dos heliostatos àquela aumenta-se a tolerância de enfoque (ver item 3.3).

A figura 3.1.1 ilustra o posicionamento dos espelhos para um sistema com um máximo de 104 unidades, embora o número suficiente para atingir a área receptora seja 96. Distribuíram-se os eixos dos heliostatos em 8 arcos concêntricos, cujas distâncias à torre estão na tabela da figura 3.1.2, além dos valores de posição angular de cada um.

A torre deve ter uma altura de 25 metros. A caldeira deve

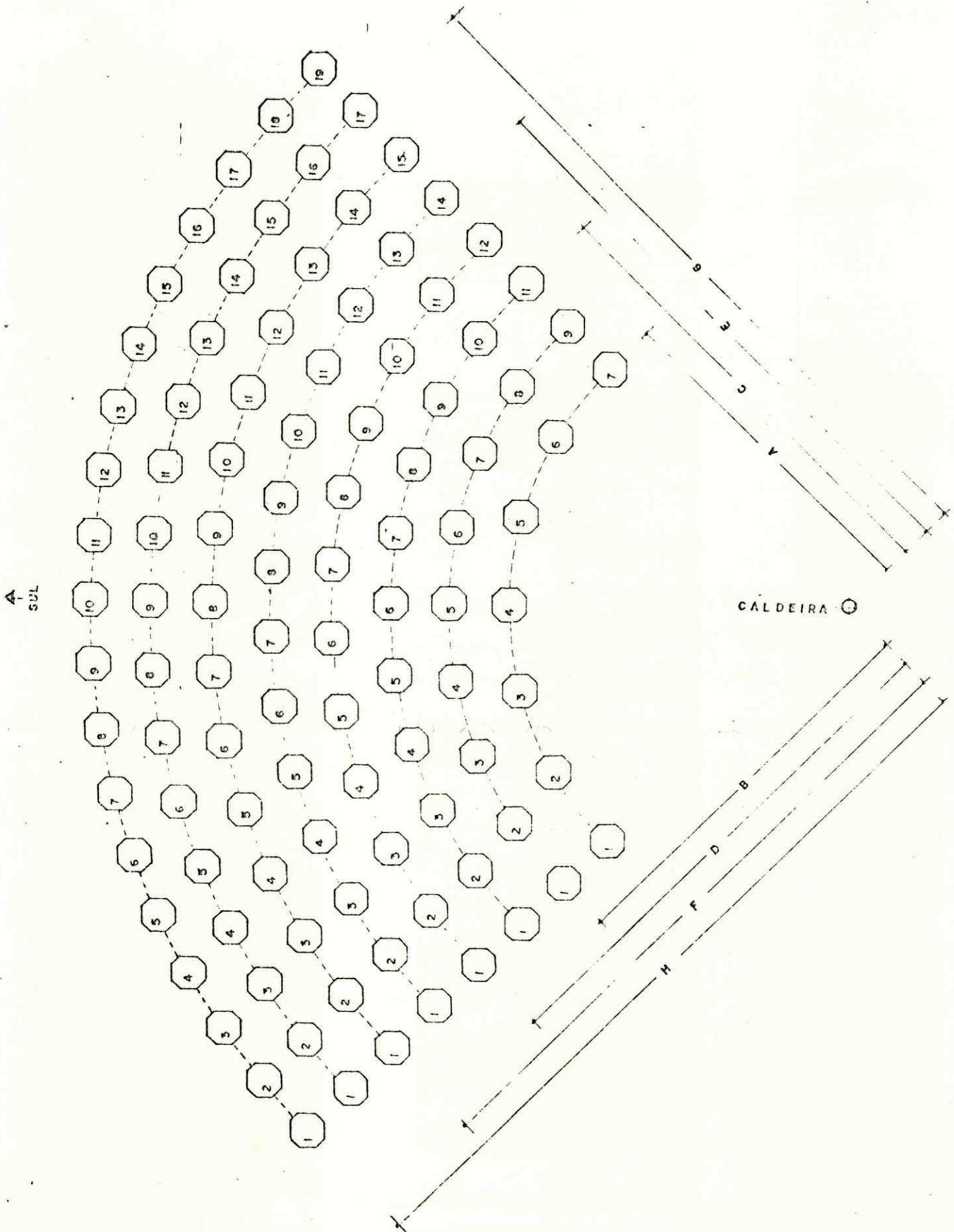


Figura 3.1.1 - Posicionamento dos espelhos e da torre no terreno

Figura 3.1.2 - Tabela dos valores de posição angular e distância à torre dos heliostatos

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	
A	0	15	30	45	60	75	90														
B	0	11,3	22,5	33,8	45	56,3	67,5	78,8	90												
C	0	9	18	27	36	45	54	63	72	81	90										
D	0	8,2	16,4	24,6	32,8	40,9	49,1	57,3	65,5	73,7	81,9	90									
E	0	8,3	13,9	20,8	27,7	34,6	41,5	48,6	55,4	62,3	69,2	76,2	83,1	90							
F	0	6,4	12,9	19,3	25,7	32,1	38,6	45	51,4	57,9	64,3	70,7	77,1	83,6	90						
G	0	5,6	11,3	16,9	22,5	28,1	33,8	39,3	45	50,6	56,3	61,9	67,5	73,1	78,7	84,3	90				
H	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90		

valores da distância a. origem (torre) [m]

A	16,00	E	27,40
B	16,25	F	30,25
C	21,70	G	33,10
D	24,55	H	35,95

ter um ângulo sólido mínimo de recepção de 71 graus e seu eixo na direção norte deve estar 44,5 graus abaixo da horizontal para que possa cobrir toda a área nas condições da planta da figura 3.1.1. A torre e a caldeira estão representadas na figura 3.1.3.

3.2 - FORMA E DIMENSÃO DOS ESPELHOS DOS HELIOSTATOS

Os espelhos deverão sofrer um encurvamento, de modo que seu foco fique no centro da caldeira. A melhor maneira de se obter esse encurvamento sem que se danifique o espelho é fazer com que estes tenham o formato de um polígono regular com o maior número possível de lados, escolhendo-se por questões práticas, a forma de um octógono regular. A figura 3.2.1 mostra o desenho do heliostato e do espelho.

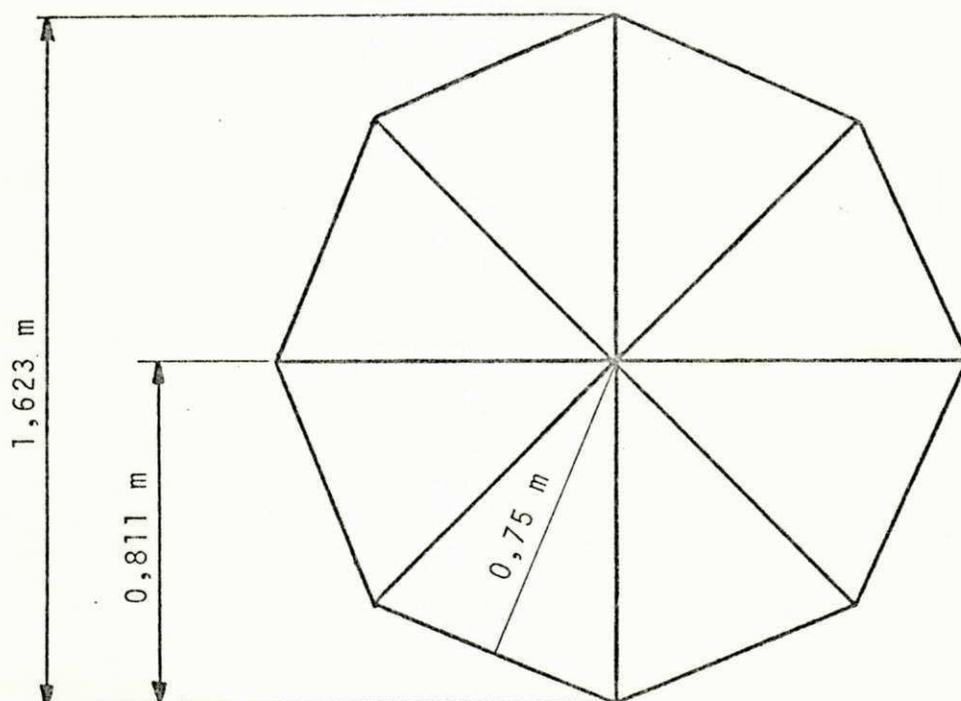


Figura 3.2.2 - Formato do espelho

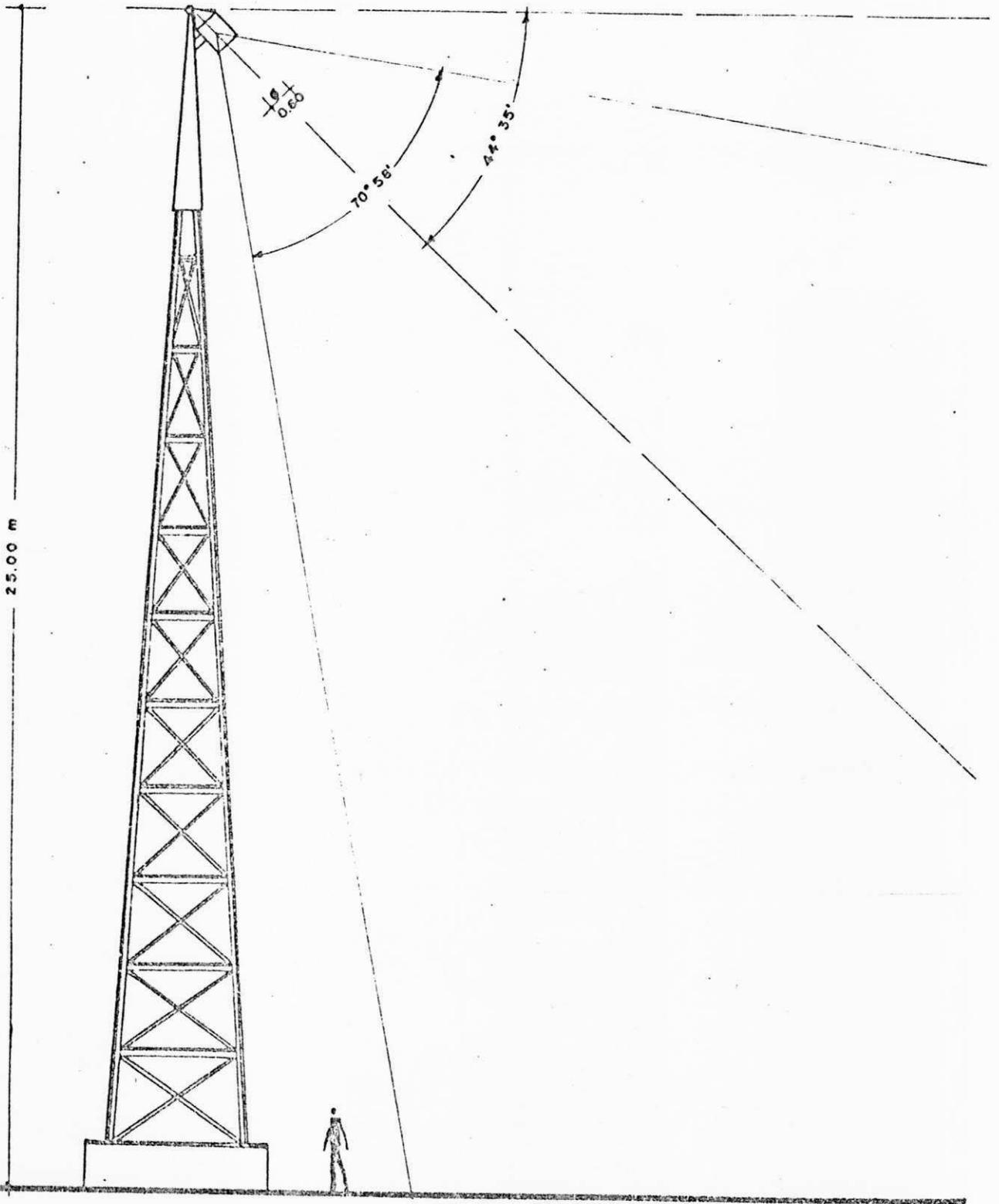


Figura 3.1.3 - Torre e caldeira

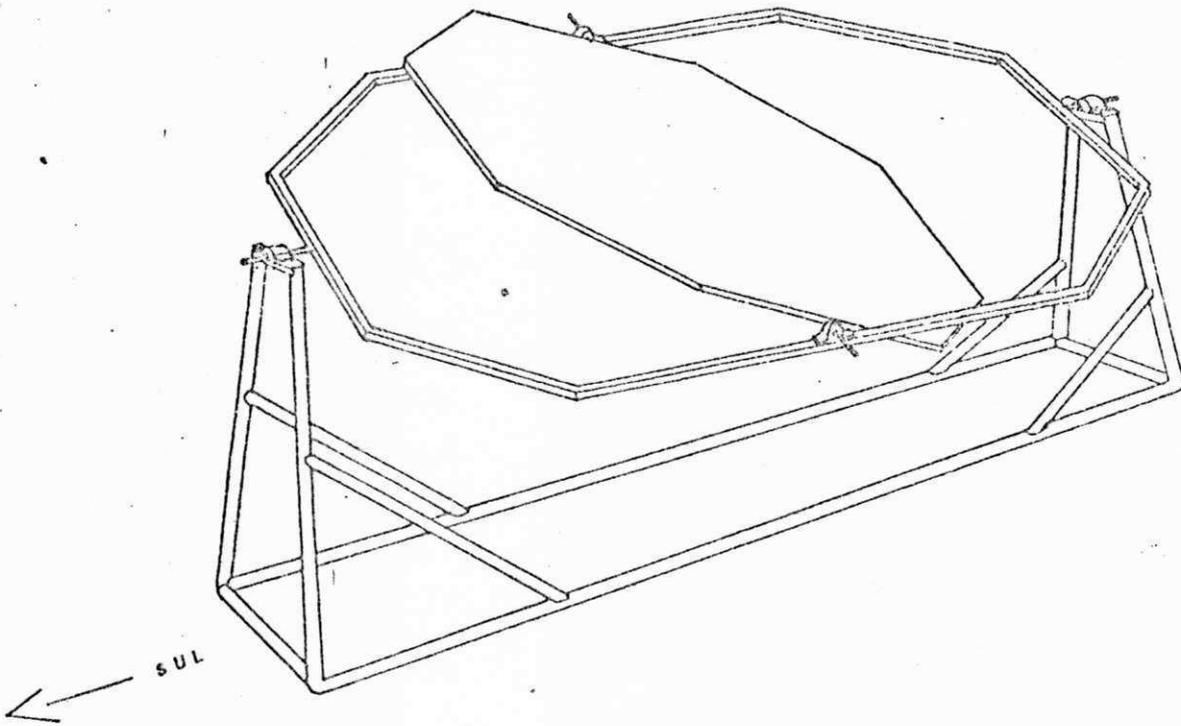


Figura 3.2.1 - Desenho do heliostato e do espelho

A figura 3.2.2 representa o espelho, em separado. Com as dimensões indicadas na figura e considerando-se neste cálculo o octôgono regular como sendo formado por oito triângulos semelhantes, sua área é:

$$\begin{aligned} \text{Área} &= 8 \times 0,75 \times 0,75 \times \text{tg } 22,5 \\ &= 1,863661 \text{ m}^2 \end{aligned}$$

3.3 - Tolerância de enfoque

O feixe luminoso refletido por cada espelho deve concentrar-se, no caso ideal, no centro da caldeira, como está ilustrado na figura 3.3.1.

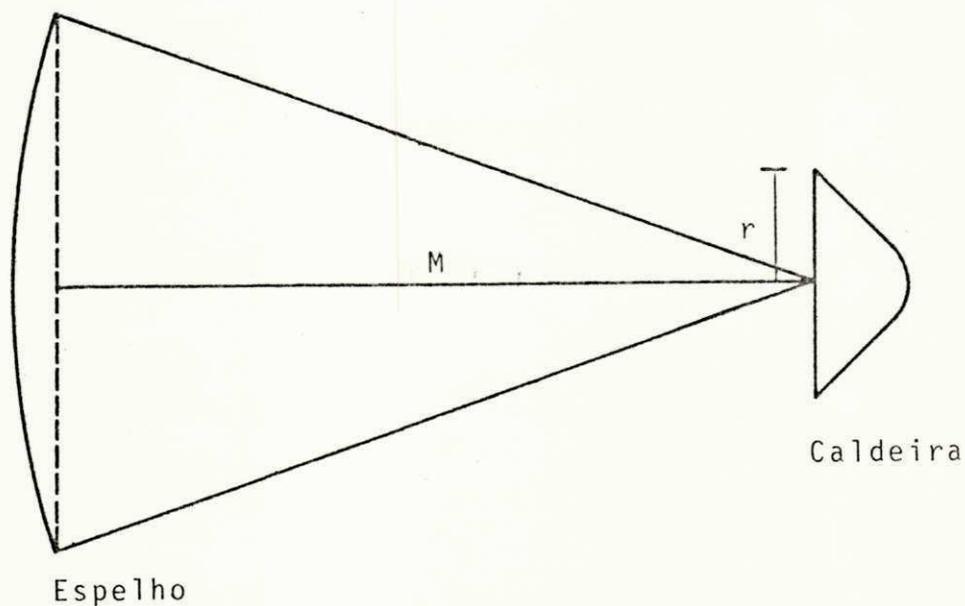


Figura 3.3.1 - Concentração dos raios refletidos pelo espelho na caldeira

A tolerância de enfoque, ou seja, o erro angular máximo dos raios refletidos pelos espelhos de modo que eles atinjam integralmente a caldeira é dada pelo arco cuja tangente é a razão entre o maior raio interno da caldeira e a distância desta ao espelho.

Para os espelhos que estão mais distantes da caldeira a tolerância de enfoque é dada por:

$$Te = \text{arc tg} \frac{0,28}{\sqrt{25^2 + (35,95)^2}} = 0,36636 \text{ grau ou}$$

$$Te = 25'59''$$

A tabela da figura 3.3.2 dá os valores da abertura ótica e a tolerância de enfoque dos espelhos em função de suas distâncias à torre.

3.4 - ÂNGULO INICIAL NO SENTIDO LESTE-OESTE E ÂNGULOS MÁXIMOS E MÍNIMOS NA DIREÇÃO NORTE-SUL

Chamar-se-á aqui de ângulo inicial no sentido leste-oeste, relacionando-se com o início do dia, ao ângulo entre uma reta que passa pela superfície do espelho paralela ao plano yz e a superfície terrestre.

O ângulo inicial de cada espelho depende da sua posição angular em relação à torre.

A partir da figura 3.4.1 pode-se mostrar que o ângulo inicial que o espelho faz com a superfície terrestre no sentido leste-oeste é dado por $\lambda = 45 + \frac{1}{2} \text{arc tg}(-\frac{Y}{H})$ e os ângulos máximo e

Figura 3.3.2 - Tabela da tolerância de enfoque e abertura ótica

	Te	Ab
A	32'26"	0.05390
B	30'40"	0,05110
C	29'05"	0,04833
D	27'28"	0,04560
E	25'57"	0,04313
F	24'31"	0,04077
G	23'06"	0,03857
H	21'59"	0,03653

Te Tolerância de enfoque

Ab Abertura ótica

mínimo na direção norte-sul são:

$$\phi_{\max} = \frac{1}{2} \left(\text{arc tg} \frac{X}{H} + 23 - 7,3 \right) \quad \text{e}$$

$$\phi_{\min} = \frac{1}{2} \left(\text{arc tg} \frac{X}{H} - 23 - 7,3 \right)$$

Os ângulos máximo e mínimo na direção norte-sul referem-se ao ângulo entre uma reta que passa sobre a superfície do espelho paralela ao plano xz e a superfície terrestre.

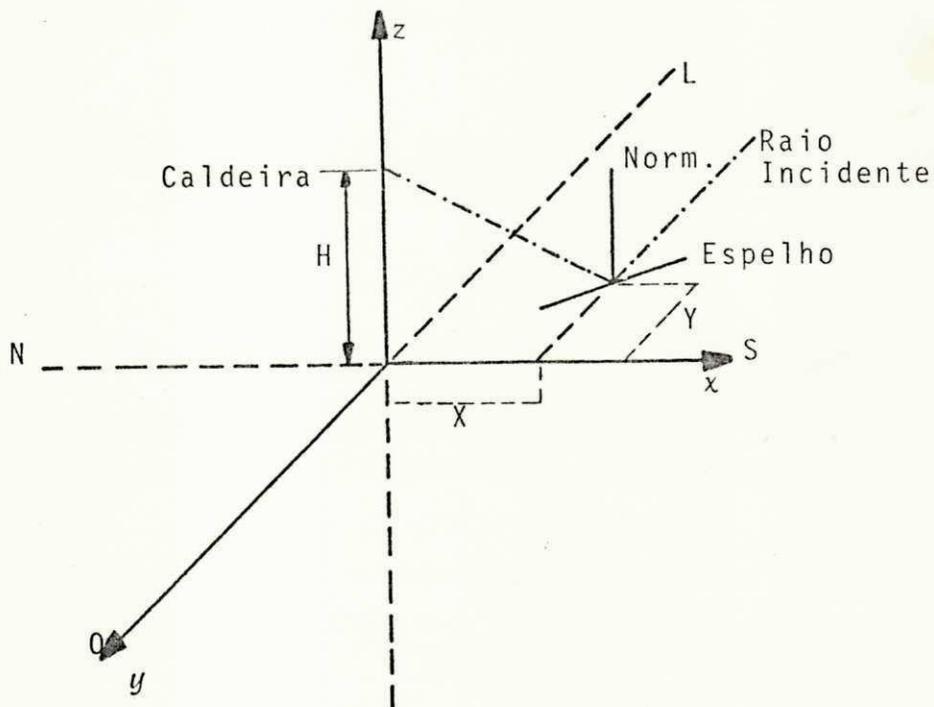


Figura 3.4.1 - Incidência e reflexão dos raios solares com o heliostato numa posição qualquer

Como o aproveitamento da energia solar limita-se a 8 horas

diárias (120 graus do movimento do sol), deve-se dar um acréscimo de 15 graus ($\frac{90 - 60}{2}$) no ângulo inicial da direção leste-oeste.

3.5 - EXEMPLO DE CÁLCULO DOS ÂNGULOS INICIAL, MÁXIMO E MÍNIMO

Tomando como exemplo o espelho do heliostato de radial F e número 2 da figura 3.1.1 cujos valores das coordenadas vêm-se na figura 3.1.2 podem-se encontrar os seguintes valores de X e de Y da figura 3.4.1.

$$X = 30,25 \cos(45 - 6,4) = 23,641 \text{ m}$$

$$Y = -30,25 \sin(45 - 6,4) = -18,872 \text{ m}$$

Sabendo-se que H (altura da torre) é 25 metros, pode-se encontrar λ , ϕ_{\max} e ϕ_{\min} :

$$\lambda = 45 + \frac{1}{2} \text{arc tg} \left(-\frac{18,872}{25} \right) = 26,475 \text{ graus}$$

$$\phi_{\max} = \frac{1}{2} \left(\text{arc tg} \frac{23,641}{25} + 23 - 7,3 \right) = 29,55 \text{ graus}$$

$$\phi_{\min} = \frac{1}{2} \left(\text{arc tg} \frac{23,641}{25} - 23 - 7,3 \right) = 6,55 \text{ graus}$$

O espelho do heliostato em estudo deve portanto fazer um movimento no sentido norte-sul desde 6,55 graus até 29,55 graus durante meio ano. Este espelho deve ter um ângulo inicial na direção leste-oeste de 26,475 graus (considerando-se apenas 8 horas de aproveitamento por dia, este é de 41,475 graus), a cada novo dia.

Poder-se-ia fazer uma tabela desses valores para cada heliostato, contudo não é relevante para este trabalho.

CAPÍTULO IV

SISTEMA DE CONTROLE

Nos capítulos II e III foram feitas algumas considerações sobre o sistema de controle automático do heliostato solar, tais como: direção de correção do movimento do heliostato, disposição dos espelhos no terreno, etc.

Neste capítulo será analisado o sistema completo de controle do heliostato solar, assim como o sistema eletrônico de controle.

4.1 - SOLUÇÕES POSSÍVEIS PARA O CONTROLE AUTOMÁTICO DO HELIOSTATO SOLAR

4.1.1 - SISTEMA COMPLETO DE CONTROLE

Dentre as soluções possíveis para o sistema completo de controle do heliostato solar, existem as seguintes:

- 1 - Um comando central é usado para corrigir a posição dos espelhos, a partir da informação da posição do sol na esfera celeste enviada por um sensor;
- 2 - A correção da posição dos espelhos é feita por um comando central, a partir das informações das direções luminosas dos raios refletidos por cada espelho, enviados por sensores associados a cada heliostato;
- 3 - Cada heliostato tem seu próprio comando, e a correção da posição do espelho é feita a partir da informação

da direção luminosa dos raios refletidos pelo espelho, enviada por um sensor (para cada heliostato).

A análise das vantagens e desvantagens destas soluções, leva às considerações seguintes:

Solução 1 - Vantagens - necessidade de poucos componentes eletrônicos para o controle.

Desvantagens - o sistema eletrônico é complexo;
- necessidade de grande precisão no sistema mecânico;
- todos os heliostatos ficam na dependência do funcionamento do comando central.

Solução 2 - Vantagens - necessidade de poucos componentes eletrônicos para o controle.

Desvantagens - o sistema eletrônico é complexo;
- todos os heliostatos ficam na dependência do funcionamento do comando central.

Solução 3 - Vantagens - o sistema eletrônico é mais simples e igual para todos os heliostatos;

- comandos independentes para cada heliostato;
- não é necessário que o sistema mecânico tenha grande precisão.

Desvantagens - uso de uma maior quantidade de componentes eletrônicos.

4.1.2 - SISTEMA ELETRÔNICO DE CONTROLE

Dentre as soluções possíveis para o sistema eletrônico de controle existem as seguintes:

- 1 - O erro de direção luminosa é integrado no tempo, e o resultado da integração comanda um oscilador controlado por tensão, cuja frequência é um múltiplo da frequência de pulso do motor.
- 2 - Quando o erro de direção luminosa é maior que um erro padrão, o motor é acionado com uma velocidade um pouco maior do que a de acompanhamento do sol. Quando o erro de direção luminosa é maior do que um segundo erro padrão, ainda dentro da tolerância de enfoque, mas próximo do limite, o motor é acionado com uma velocidade bem maior do que a de acompanhamento do sol.

Analisando-se as vantagens e desvantagens destas duas soluções chega-se ao seguinte:

Solução 1 - Vantagens - quando o sistema de controle encontra-se estável, o erro de direção luminosa é nulo.

Desvantagens - o tempo de correção é maior do que na segunda solução;

- esta solução não deve ser usada para o movimento norte-sul, pois neste, como as correções diárias são poucas, para reduzir-se o consumo, deve-se desenergizar o motor enquanto não houver correções.

Solução 2 - Vantagens - o tempo de correção é menor do que na primeira solução;

- pode facilmente ser usado para o movimento norte-sul.

Desvantagens - o sistema permanece estável com o erro de direção luminosa entre o valor positivo e negativo do menor erro padrão.

4.2 - CONSIDERAÇÕES E SOLUÇÕES ADOTADAS

As soluções adotadas foram as de número 3 do item 4.1.1 e de número 2 do item 4.1.2.

Para o projeto consideram-se também as soluções já adotadas nos capítulos II e III: que o motor de comando seja um motor passo a passo, com um passo de 15 graus, que a redução mecânica seja de 50.000 e que a menor tolerância de enfoque seja de 0,36 grau .

4.2.1 - CONSIDERAÇÕES PARA O MOVIMENTO LESTE-OESTE

Para o movimento leste-oeste, o seguinte procedimento foi definido:

- 1 - O maior erro aceitável da direção luminosa seria de 0,1 grau, sendo este o valor do primeiro erro padrão. Quando o erro da direção luminosa for maior do que 0,1 grau, o motor deve assumir uma velocidade de 39,72 rpm (14 pulsos por segundo), velocidade duas vezes maior do que a de acompanhamento do sol.

- 2 - Quando o erro da direção luminosa for maior do que 0,15 grau, segundo erro padrão, a velocidade do motor deve ser de 277 μpm (112 pulsos por segundo), ou seja 16 vezes maior do que a velocidade de acompanhamento do sol.
- 3 - Quando a luminosidade refletida pelo espelho estiver abaixo de um valor aceitável, de modo que a luz difusa recebida pelos sensores de luminosidade já seja considerável, o motor deve assumir uma velocidade igual à de acompanhamento do sol, ou seja, de 17,36 μpm (7 pulsos por segundo), para evitar a necessidade de grandes correções quando as condições normais forem restabelecidas.
- 4 - Quando o erro da direção luminosa for menor do que 0,1 grau o motor deve ficar parado, mas energizado.
- 5 - Para reduzir o consumo, deve-se alimentar o motor com uma tensão menor do que a nominal, quando sua velocidade for de 7 pulsos por segundo ou de 14 pulsos por segundo. Para estes casos, escolheu-se uma alimentação de 14,4 volts.

4.2.2 - CONSIDERAÇÕES PARA O MOVIMENTO NORTE-SUL

Para o movimento norte-sul as seguintes normas foram consideradas:

- 1 - Quando o erro da direção luminosa for maior do que 0,15 grau, o motor deve assumir uma velocidade de correção de 34,72 μpm (14 pulsos por segundo).

- 2 - Quando o erro da direção luminosa for maior do que 0,1 grau e menor do que 0,15 grau, o motor deve receber pulsos de 5 segundos de duração (tempo este maior do que o tempo de resposta do sistema mecânico).
- 3 - Quando o erro da direção luminosa for menor do que 0,1 grau, o motor deve ser desenergizado.
- 4 - Quando a luminosidade refletida pelo espelho estiver abaixo de um valor aceitável, o motor deve ser desenergizado.
- 5 - A alimentação do motor far-se-á sempre com uma tensão de 15,2 volts, por motivo de redução no consumo.

4.3 - DIAGRAMA DE BLOCOS

A figura 4.3.1 é um diagrama de blocos do sistema completo de controle automático para o heliostato solar.

O sensor de direção luminosa detecta a direção da luz refletida pelo espelho do heliostato.

Os somadores NS, SN, LO e OL geram tensões de erro, de acordo com o erro angular dos raios refletidos visto pelo sensor de direção luminosa, nos sentidos norte-sul, sul-norte, leste-oeste e oeste-leste, respectivamente.

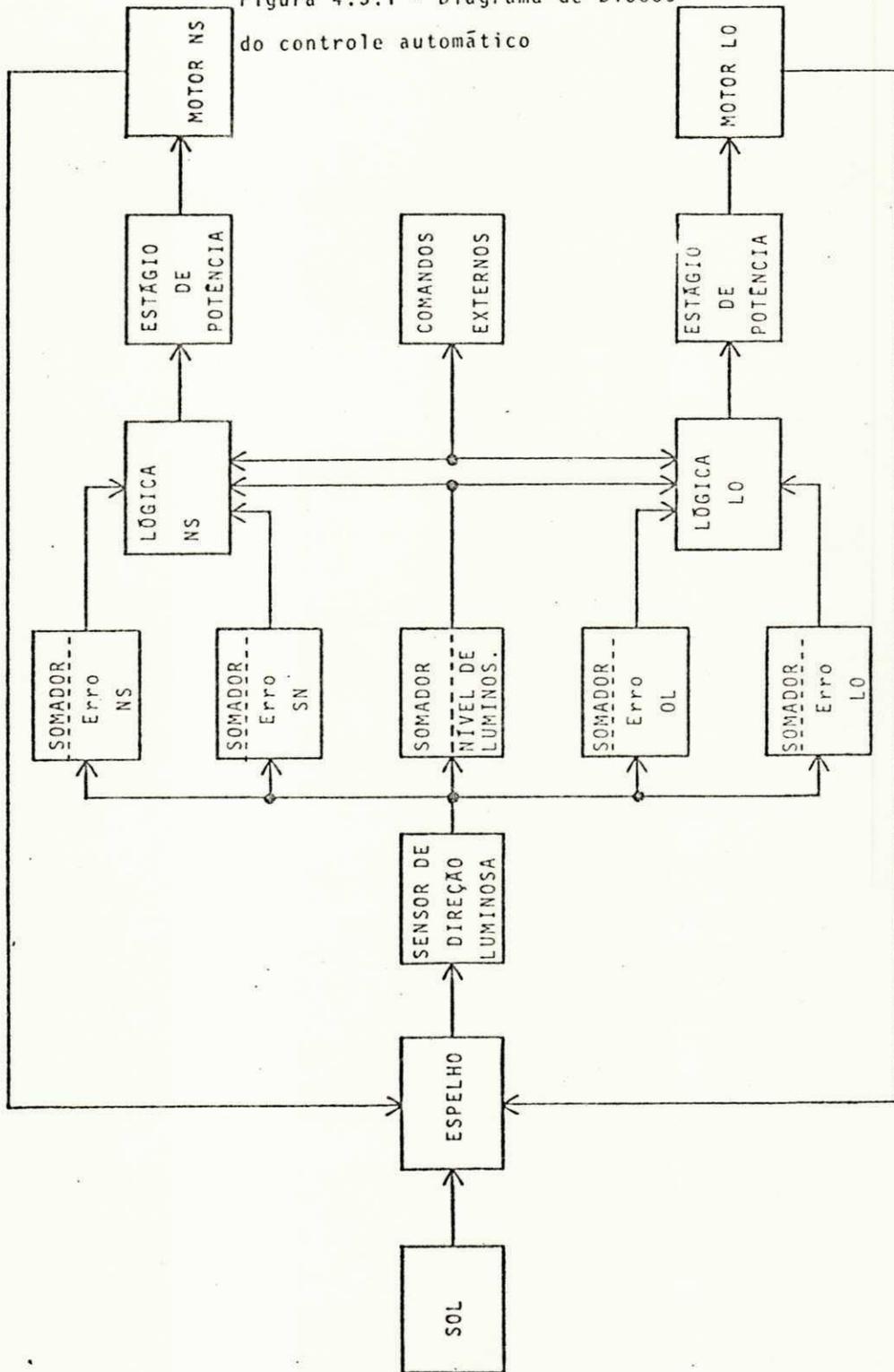
Quando a tensão gerada num desses somadores é maior do que a tensão de referência de erro, a saída lógica comanda o estágio de potência e o motor para haver correção da posição do espelho em sentido contrário ao do erro.

No bloco somador-nível de luminosidade gera-se uma tensão

proporcional à luminosidade que chega ao sensor de direção luminosa, que servirá para fazer a variação dos níveis de referência, para os erros de 0,1 e 0,15 graus, dos comparadores NS, SN, OL e LO no bloco da lógica. Esta tensão também serve de entrada para o comparador de nível de luminosidade.

Os comandos externos são para a energização do sistema, correções rápidas para frente e para trás, retorno rápido automático e desligamento automático.

Figura 4.3.1 - Diagrama de blocos do controle automático



CAPÍTULO V

SENSORES DE DIREÇÃO DE LUZ

Como o sistema de controle escolhido é um sistema realimentado torna-se necessário o uso de sensores de direção de luz para detetarem a direção dos raios refletidos pelos espelhos dos heliostatos.

5.1 - CARACTERÍSTICAS DE UM SENSOR DE DIREÇÃO LUMINOSA

Para a escolha do tipo de sensor de direção luminosa a ser usado neste projeto, devem-se observar em especial duas características:

- 1 - Sensibilidade a pequenos erros da direção luminosa - a esta sensibilidade está associado o ângulo de correção que é de 0,1 grau.
- 2 - Ângulo de captura - é o ângulo máximo de erro do feixe luminoso, para o qual ainda haverá acionamento dos sensores no sentido da correção.

5.2 - SOLUÇÕES POSSÍVEIS PARA O SENSOR DE DIREÇÃO DE LUZ

É importante que o mesmo sensor de direção luminosa detete os erros nas direções leste-oeste e norte-sul, para isto, podendo-se fazer este sensor de direção luminosa com quatro sensores de luminosidade como indicado nas figuras 5.2.1.1, 5.2.1.2, 5.2.2.1 e 5.2.2.2.

5.2.1 - SENSOR DE DIREÇÃO LUMINOSA COM LENTE CONVERGENTE

Um tipo de sensor de direção luminosa está ilustrado na figura 5.2.1.1.

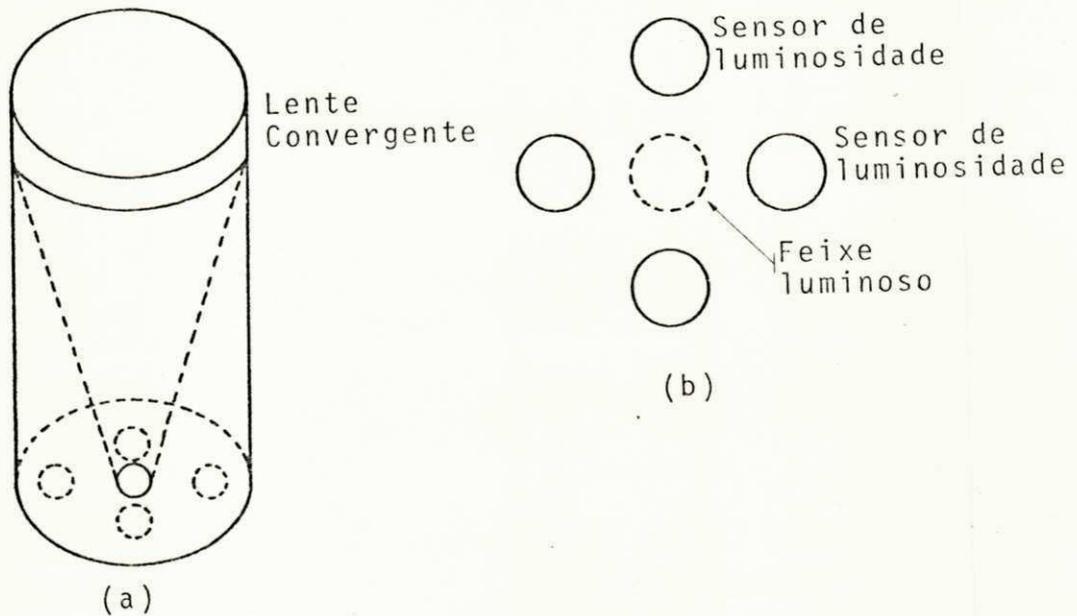


Figura 5.2.1.1 - Sensor de direção luminosa com lente convergente: a - perspectiva, b - vista frontal

Quando o feixe de luz refletida pelo espelho está na direção do centro da caldeira, a lente concentra a luz recebida no centro dos sensores de luminosidade. Quando há erro de direção luminosa, um ou dois sensores de luminosidade são iluminados e deve haver correções na posição do espelho, para que o feixe luminoso concentre-se novamente entre os sensores de luminosidade.

Este tipo de sensor tem um pequeno ângulo de captura, o qual pode ser aumentado se for colocado um maior número de

sensores de direção luminosa, como na figura 5.2.1.2

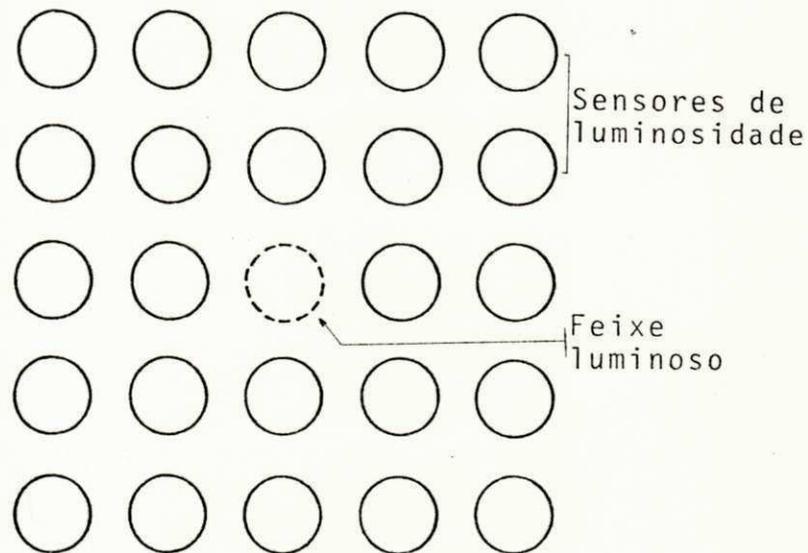


Figura 5.2.1.2 - Vista frontal de sensor de direção luminosa com vários sensores de luminosidade

Com o aumento do número de sensores de luminosidade, aumenta-se também o custo e a complexidade da lógica eletrônica.

5.2.2 - SENSOR DE DIREÇÃO DE LUZ POR PROJEÇÃO DE SOMBRAS

Um tipo de sensor de direção luminosa que pode ter um grande ângulo de captura aliado a um pequeno ângulo de correção (alta sensibilidade) é o ilustrado na figura 5.2.2.1.

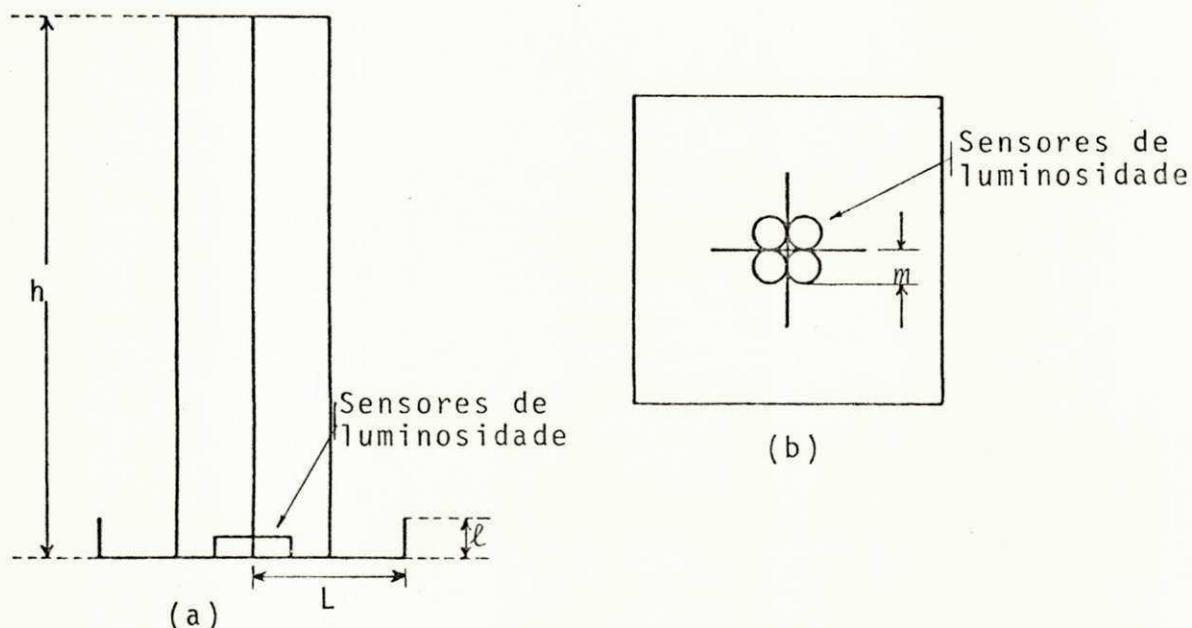


Figura 5.2.2.1 - Sensor de direção de luz por projeção de sombras: a - vista lateral, b - vista frontal

Neste tipo de sensor de direção luminosa o ângulo de captura é dado pelo arco cuja tangente é o quociente do comprimento da parede lateral ℓ e da largura L .

Como os raios refletidos pelos espelhos dos heliostatos não são paralelos, porém convergentes, se o sensor de direção luminosa usado for o da figura 5.2.2.1 haverá um erro no ângulo de correção. Para se evitar esse erro, devem-se colocar sombras parciais sobre os sensores de luminosidade como na figura 5.2.2.2.

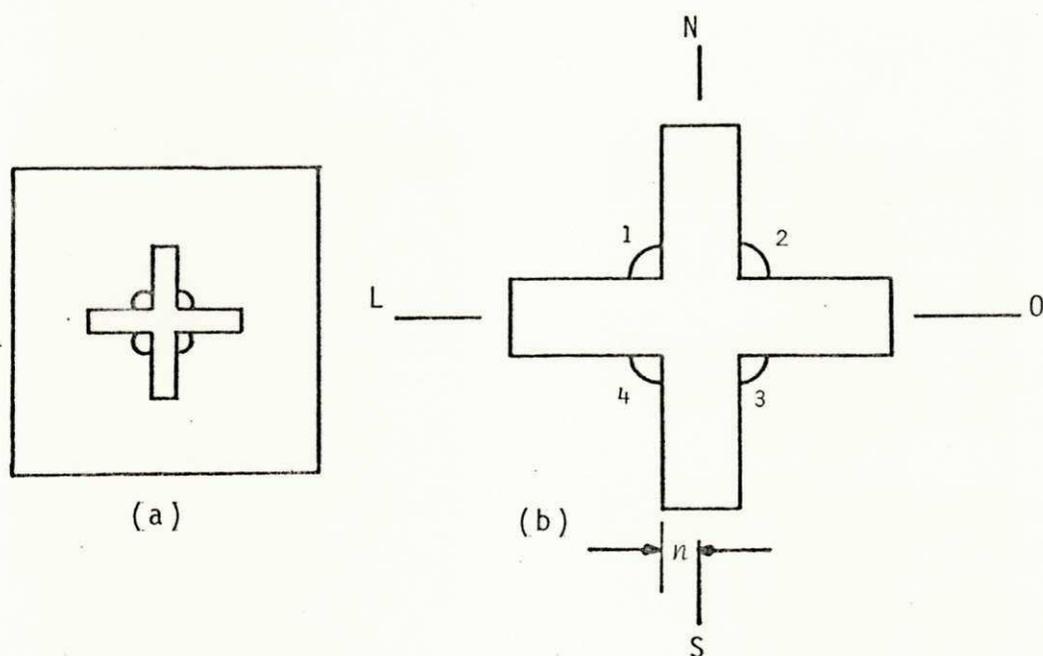


Figura 5.2.2.2 - Sensor de direção luminosa com sombras parciais: a - vista frontal, b - detalhe da vista frontal

Como os sensores de direção luminosa localizam-se próximo aos espelhos dos heliostatos, já há uma minimização dos efeitos do não paralelismo dos raios refletidos.

Para que se tenha uma melhor sensibilidade dos sensores de luminosidade em relação à luz difusa, pode-se fazer com que a dimensão de n da figura 5.2.2.2 seja de $1/4$ do diâmetro dos sensores de luminosidade.

5.3 - ESCOLHA DO SENSOR DE LUMINOSIDADE

Entre os sensores de luminosidade que podem ser usados existem os LDR's, os fotodiodos e os fototransistores. Foi dada preferência ao fotodiodo devido à sua característica de resposta de corrente em relação à irradiação recebida ser uma função afim.

Para a escolha do fotodiodo, considerou-se especialmente o ângulo de captura. O fotodiodo escolhido foi o FPT 131 para o qual foi levantado em laboratório o gráfico de corrente versus irradiação, em comparação com o TIL 81, cuja característica era conhecida. Este gráfico está representado na figura 5.3.1.

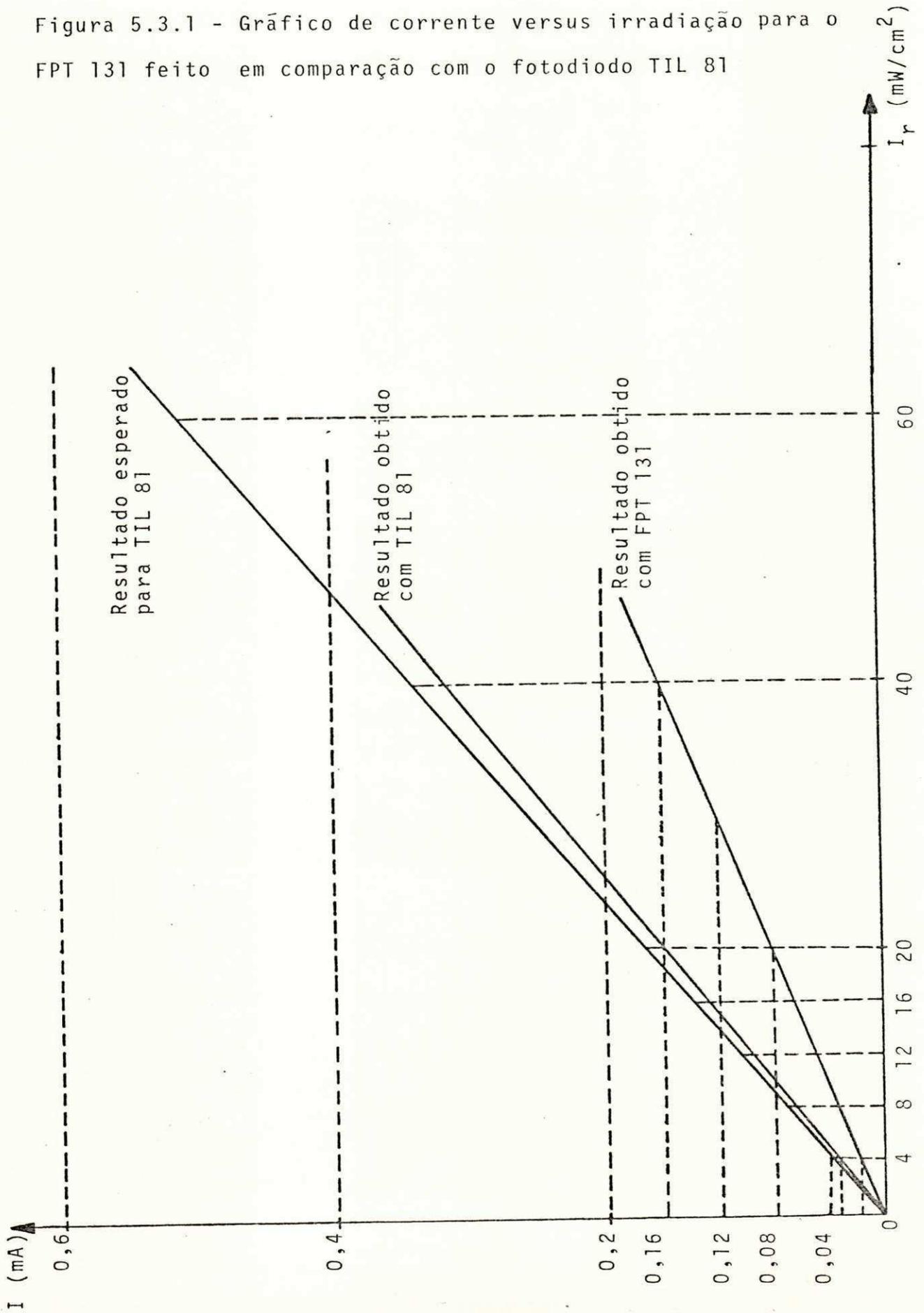
A partir do gráfico da figura 5.3.1, pode-se chegar à expressão da corrente pelo fotodiodo em função da luminosidade recebida:

$$I_k = 4 I_{rk}, \quad 5.3.1$$

onde I_k é a corrente pelo fotodiodo k em microampère e I_{rk} é a irradiação recebida pelo fotodiodo em mW/cm^2 .

A figura 5.3.2 ilustra o modo de ligação dos fotodiodos para que se transforme a informação de corrente em tensão.

Figura 5.3.1 - Gráfico de corrente versus irradiação para o FPT 131 feito em comparação com o fotodiodo TIL 81



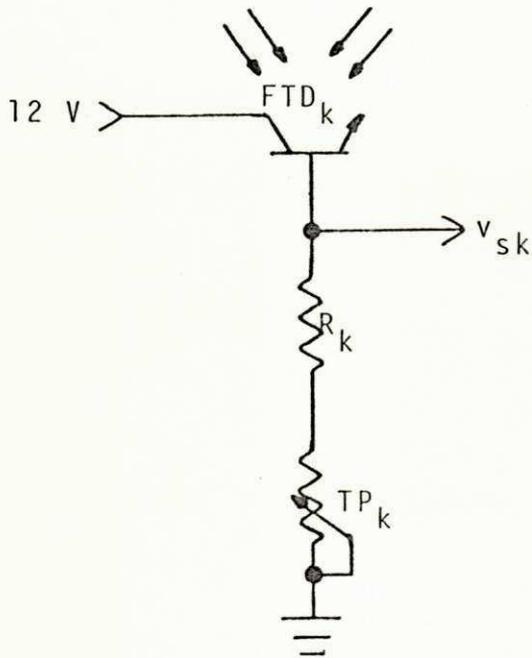


Figura 5.3.2 - Ligação dos fotodiodos

A tensão v_{sk} é uma função da luminosidade recebida na superfície do sensor e é dada pela seguinte expressão:

$$v_{sk} = I_k (R_k + TP_k) \quad 5.3.2$$

O trimpot k tem como função o ajuste da tensão v_{sk} , devido às variações de características de um fotodiodo para outro.

A irradiação solar máxima está em torno de 100 mW/cm^2 . Quando um dos fotodiodos está recebendo esta irradiação solar, a tensão v_s deve ser aproximadamente $2/3 V_{CC}$, para que se tenha uma maior faixa dinâmica sem perigo de saturação. Usando a expressão 5.3.1 e 5.3.2, determinam-se R_k e TP_k .

$$R_k + TP_k = \frac{V_{sk}}{I_k} = \frac{2/3 \times 12 \text{ V}}{400 \text{ } \mu\text{A}} = 20 \text{ K}\Omega$$

Os valores que podem ser usados para que se tenha uma melhor faixa de ajuste para o trimpot k, \bar{e} de 4,7 K Ω para R_k e de 47 K Ω para TP_k .

Quando os raios refletidos pelo espelho do heliostato estiverem na direção do centro da caldeira, a área iluminada de cada fotodiodo, A_{ik} , conforme a figura 5.2.2.2, deve ser:

$$A_{ik} = \pi n^2 \left(\frac{7}{3} + \frac{1 + \sqrt{3}}{\pi} \right) \approx 3,2 \pi n^2 \quad 5.3.3$$

Daí se determina v_{sk} , com o sistema estável:

$$v_{sk} = \frac{3,2 \pi}{4 \pi} \times 8 = 6,4 \text{ V}$$

5.4 - IMPLEMENTAÇÃO DO SENSOR DE DIREÇÃO DE LUZ

No item 5.3 foi feito a escolha do sensor de luminosidade; neste, será feito o projeto do sensor de direção de luz, usando-se os resultados obtidos no item 5.3.

5.4.1 - APROVEITAMENTO DOS FOTODIODOS

Para um melhor aproveitamento dos fotodiodos, pode-se fazer com que todos sejam usados para a geração das tensões de erro tanto no sentido leste-oeste como na direção norte-sul. para isso, basta que se faça V_e (tensão de erro) como segue:

$$V_{elo} = v_{s_2} + v_{s_3} - v_{s_1} - v_{s_4}, \text{ para o sentido LO} \quad 5.4.1.1$$

$$V_{ens} = v_{s_3} + v_{s_4} - v_{s_1} - v_{s_2}, \text{ para o sentido NS} \quad 5.4.1.2$$

Das expressões 5.4.1.1 e 5.4.1.2 e da figura 5.2.2.2 conclui-se que se houver um erro de direção luminosa no sentido leste-oeste, este não afetará a tensão de erro no sentido norte-sul e vice-versa.

5.4.2 - ESCOLHA DO SENSOR DE DIREÇÃO LUMINOSA E CÁLCULO DOS SEUS ÂNGULOS DE CAPTURA E CORREÇÃO

Pelas características apresentadas, o sensor de direção luminosa que deve ser escolhido é o que utiliza projeção de sombras.

O ângulo de captura para o sensor de direção luminosa da figura 5.2.2.1 é dado pelo arco cuja tangente é o quociente entre L e ℓ . Para $L = 2\ell$, o ângulo de captura é de 63,43 graus.

O ângulo de correção para o sensor de direção luminosa das figuras 5.2.2.1 e 5.2.2.2 deve ser menor ou igual ao arco cuja tangente é o quociente entre m e h .

O desenho completo do sensor de direção luminosa está nas figuras 5.4.2.1 e 5.4.2.2.

5.4.3 - VARIAÇÃO DA ÁREA ILUMINADA DOS FOTODIODOS

A figura 5.4.3.1 detalha a variação da área iluminada dos fotodiodos quando ocorre erro de direção luminosa em apenas uma direção de correção do movimento do heliostato (fato que não perde em generalidades, pois as direções são ortogonais).

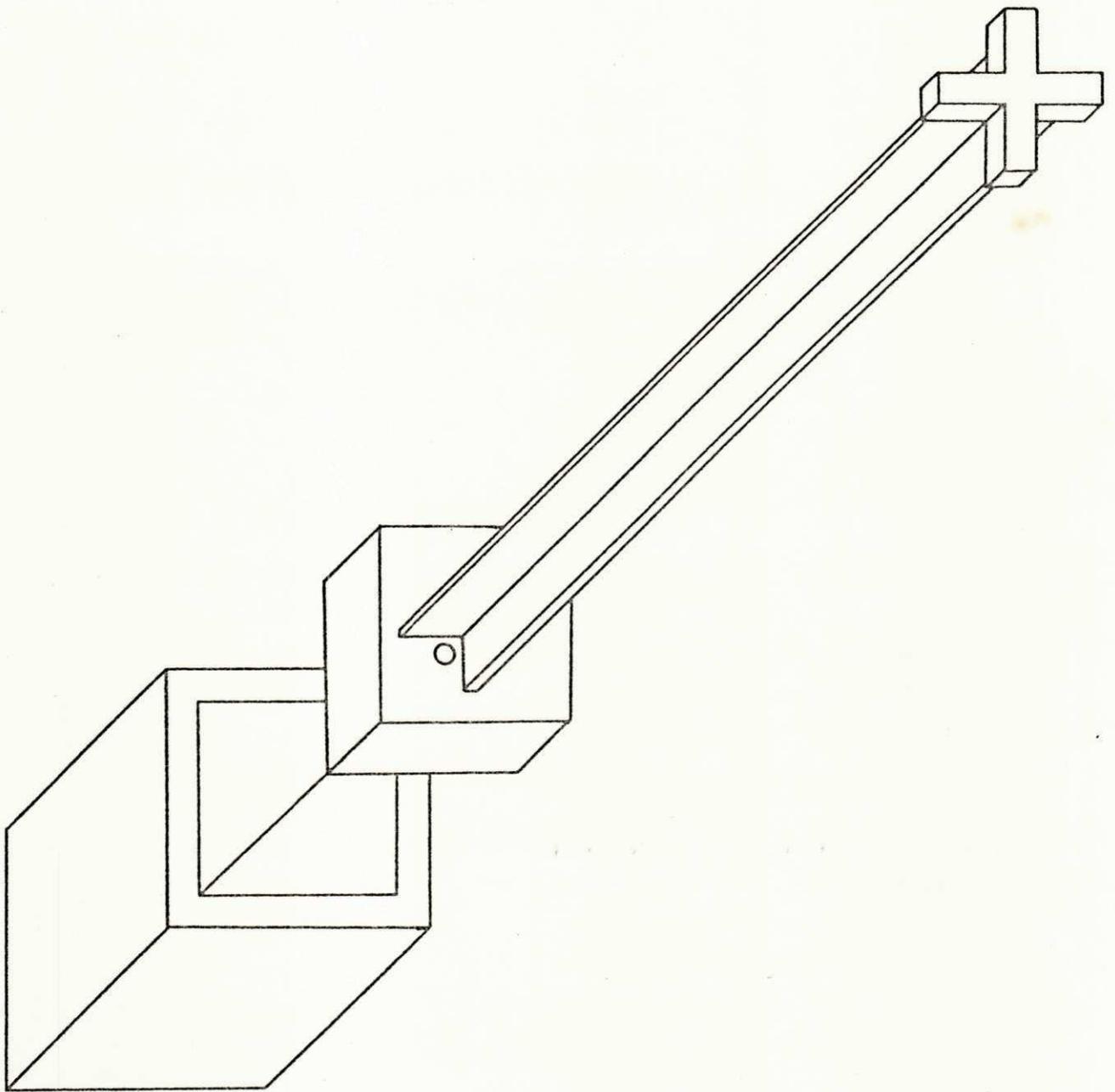


Figura 5.4.2.1 - Desenho do sensor de direção de luz

Escala 1:1

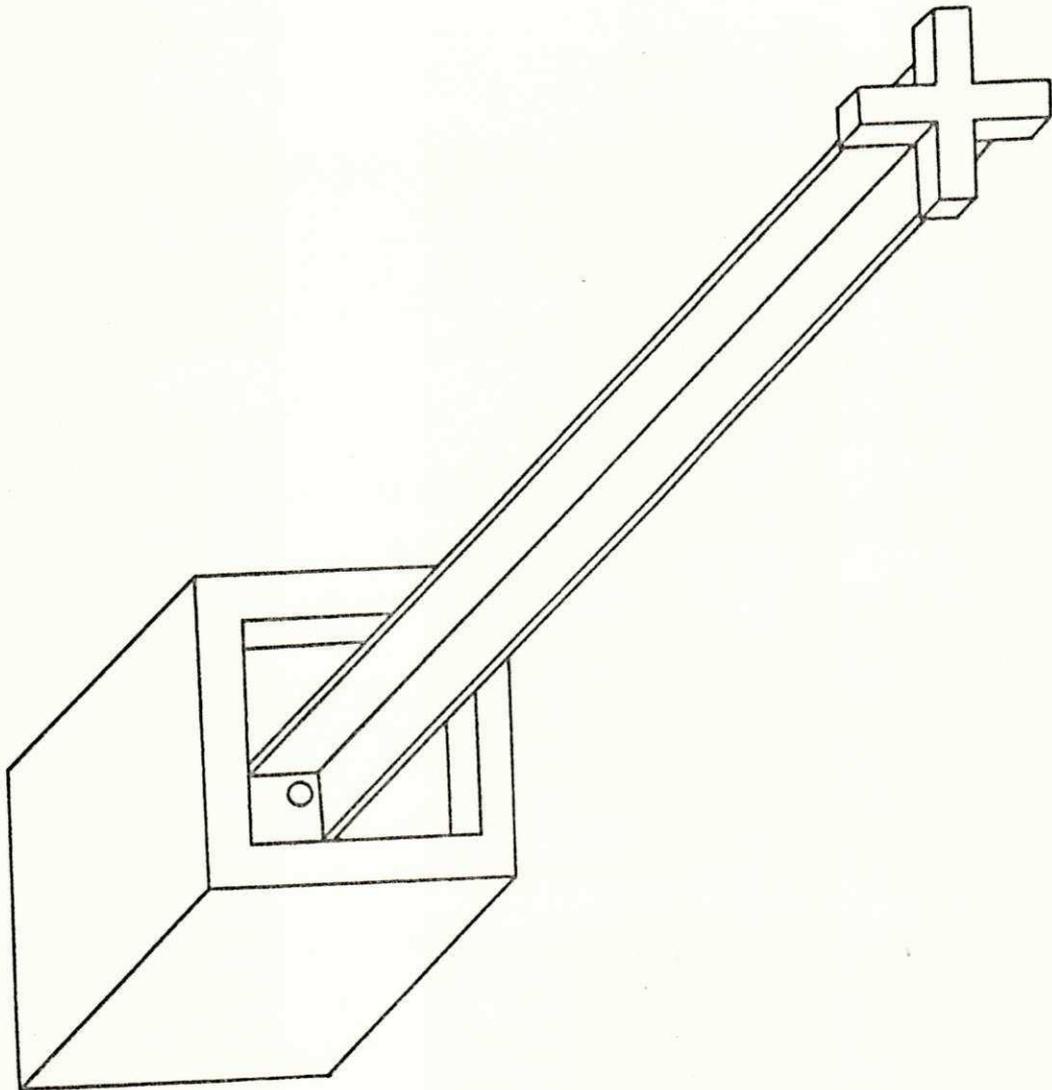


Figura 5.4.2.2 - Desenho do sensor de direção de luz
Escala 1:1

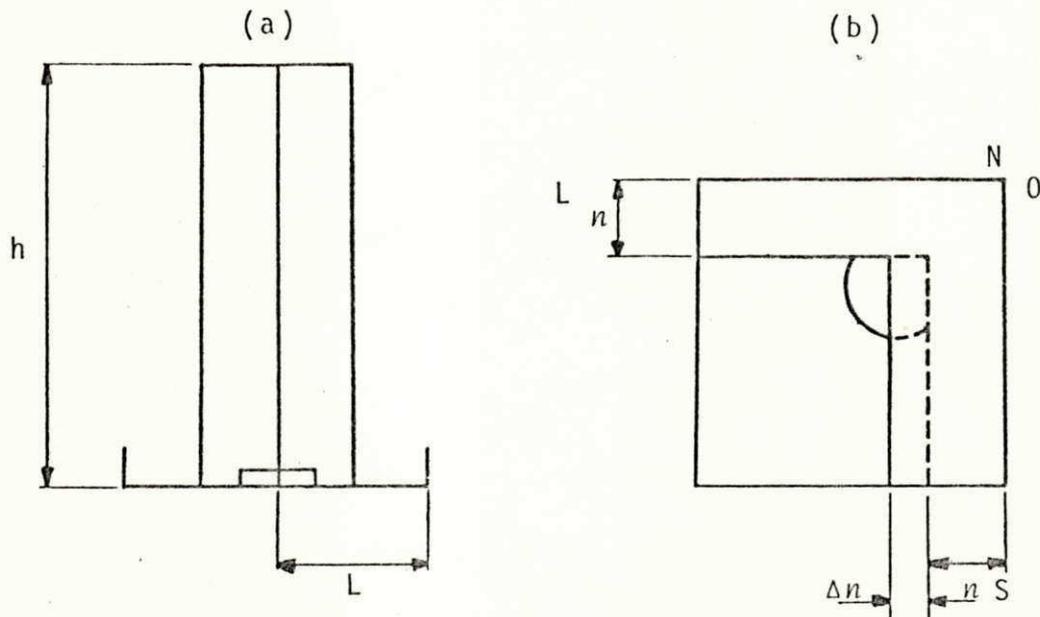


Figura 5.4.3.1 - Variação da área iluminada do fotodiodo:
 a - vista lateral do sensor de direção de luz, b - detalhe da variação da área iluminada

Pela figura 5.4.3.1 conclui-se que as variações das áreas iluminadas em cada fotodiodo são iguais. Considerando-se que deve haver correção quando houver variação de 10% da área iluminada em cada fotodiodo, pode-se encontrar uma expressão para a altura h das figuras 5.2.2.1 e 5.4.3.1.

A variação da área iluminada representada na figura 5.4.3.1 pode ser dada por:

$$\Delta A_{ik} = n^2 \left(\frac{\Delta n}{n} + \frac{2\Delta n}{n} \sqrt{1 - \left(\frac{\Delta n}{2n}\right)^2} + 2 \arccos \sqrt{1 - \left(\frac{\Delta n}{2n}\right)^2} \right)$$

5.4.3.1

Esta expressão dá a variação da área iluminada em função da variação da dimensão da sombra sobre o fotodiodo em apenas uma direção de correção. A partir da expressão 5.3.3 pode-se chegar aos 10% de variação da área iluminada.

$$\Delta A_{ik} = n^2 \frac{\pi}{10} \left(\frac{7}{3} + \frac{1 + \sqrt{3}}{\pi} \right) \quad 5.4.3.2$$

Igualando-se as expressões 5.4.3.1 e 5.4.3.2 chega-se ao seguinte:

$$\frac{\Delta n}{n} + \frac{2\Delta n}{n} \sqrt{1 - \left(\frac{\Delta n}{2n}\right)^2} + 2 \arccos \sqrt{1 - \left(\frac{\Delta n}{2n}\right)^2} = \frac{\pi}{10} \left(\frac{7}{3} + \frac{1 + \sqrt{3}}{\pi} \right) \quad 5.4.3.3$$

Encontra-se o valor de $\frac{\Delta n}{n}$:

$$\frac{\Delta n}{n} \approx 0,2524011$$

Como o valor de n é de aproximadamente 5/4 mm (para o fotodiodo FPT 131),

$$\Delta n \approx \frac{5}{4} \times 0,2524011 \approx 0,3155014 \text{ mm}$$

5.4.4 - CÁLCULO DA ALTURA h DO SENSOR DE DIREÇÃO LUMINOSA

No pior caso, a tolerância de enfoque é de 0,36 grau. Dando-se uma margem de segurança, pode-se considerar que deve haver correções a partir de erros de 0,1 grau. O valor de h pode então ser encontrado:

$$\operatorname{tg} 0,1 = \frac{\Delta n}{h}$$

$$h \approx 180,77 \text{ mm}$$

Como o sensor de direção luminosa ficará exposto ao vento, é importante que a dimensão de h não seja grande. Assim, se for reduzida esta dimensão para 130 mm, não se alterará muito o projeto inicial, pois a variação da área iluminada, para que haja correções sempre que houver erro de direção luminosa de 0,1 grau, passa a ser de 7,2%.

As figuras 5.4.4.1, 5.4.4.2 e 5.4.4.3 são fotografias dos protótipos do sensor de direção luminosa, deste sensor na sua torre e do conjunto do heliostato com este sensor em sua torre, respectivamente.

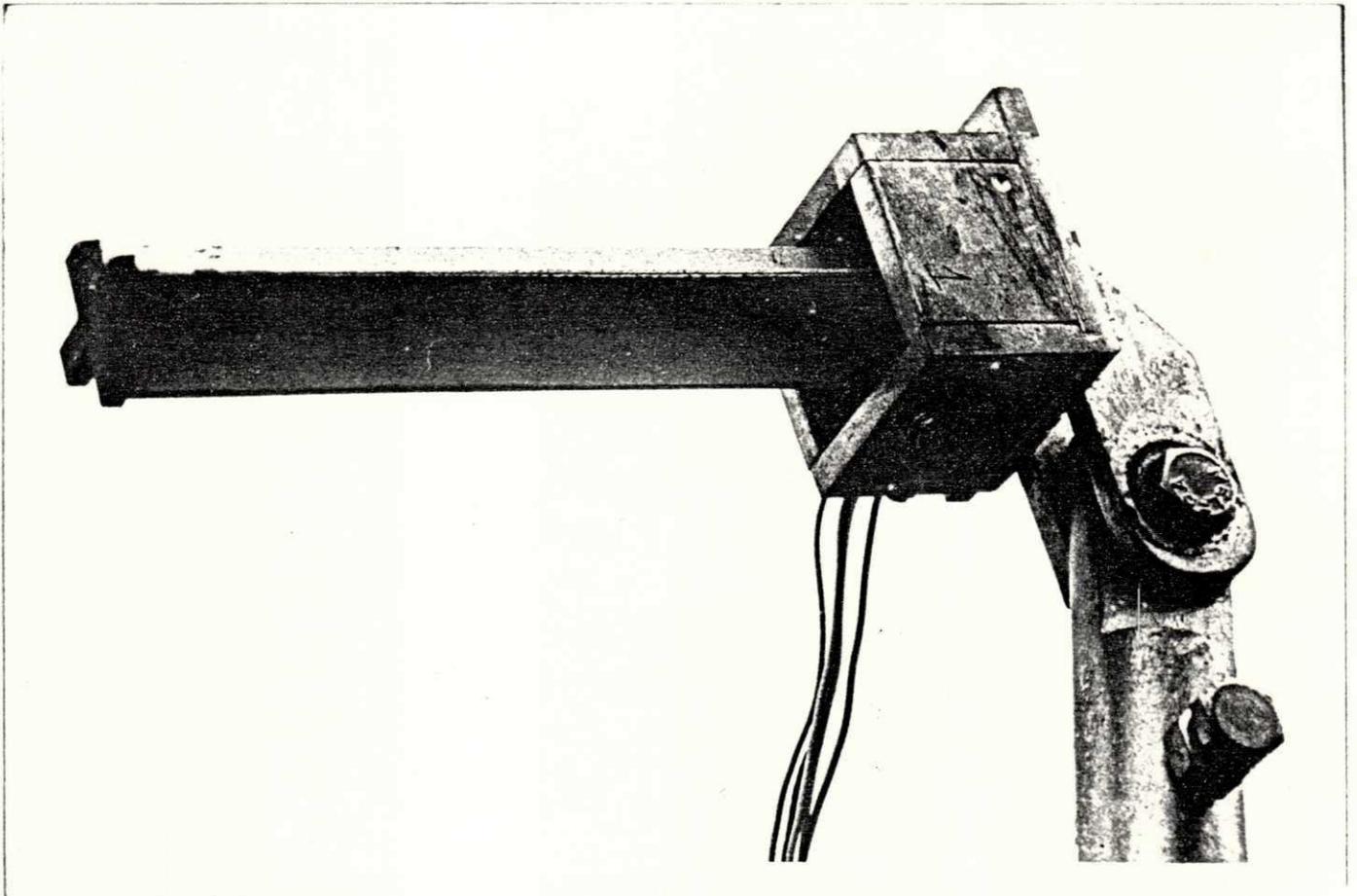


Figura 5.4.4.1 - Protótipo do sensor de direção luminosa

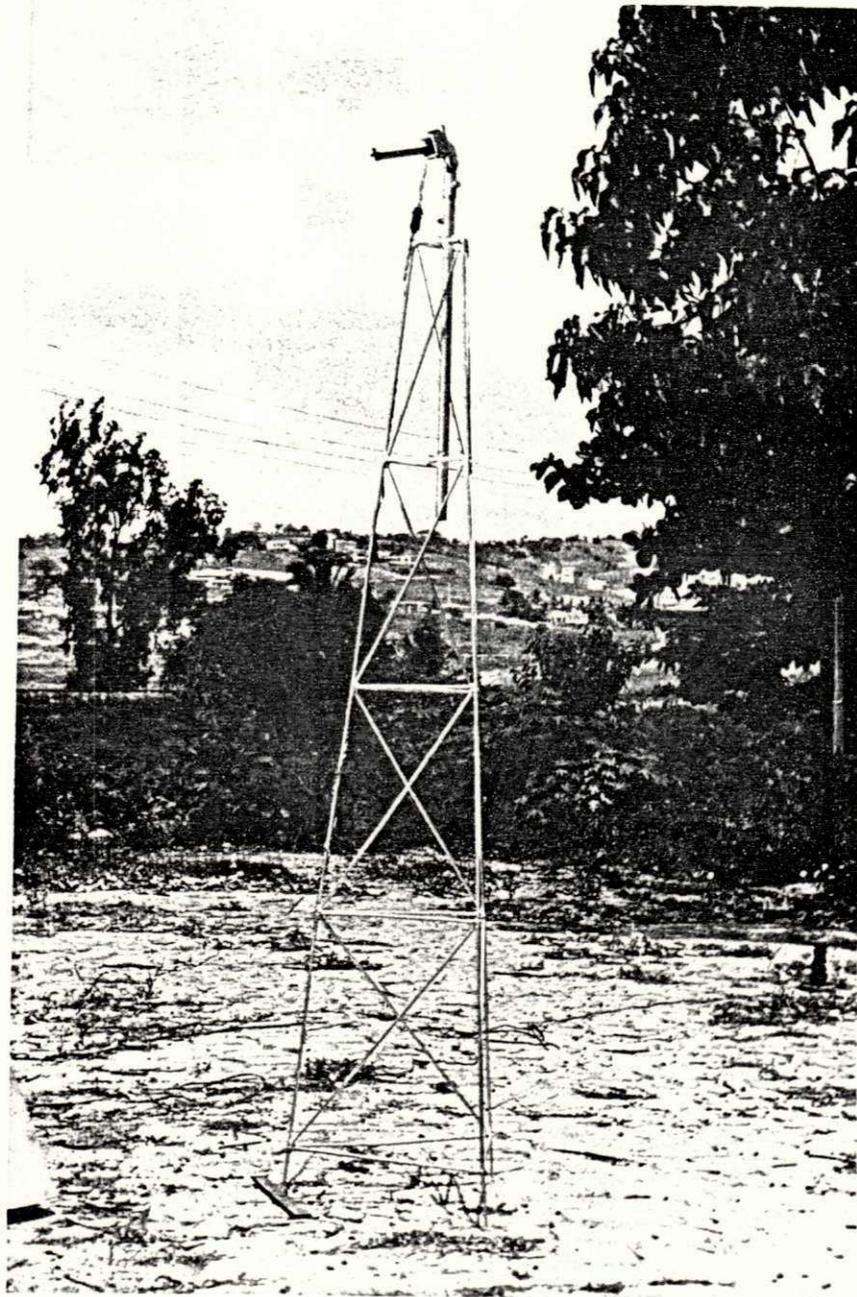


Figura 5.4.4.2 - Protótipo do sensor de direção luminosa e da sua torre

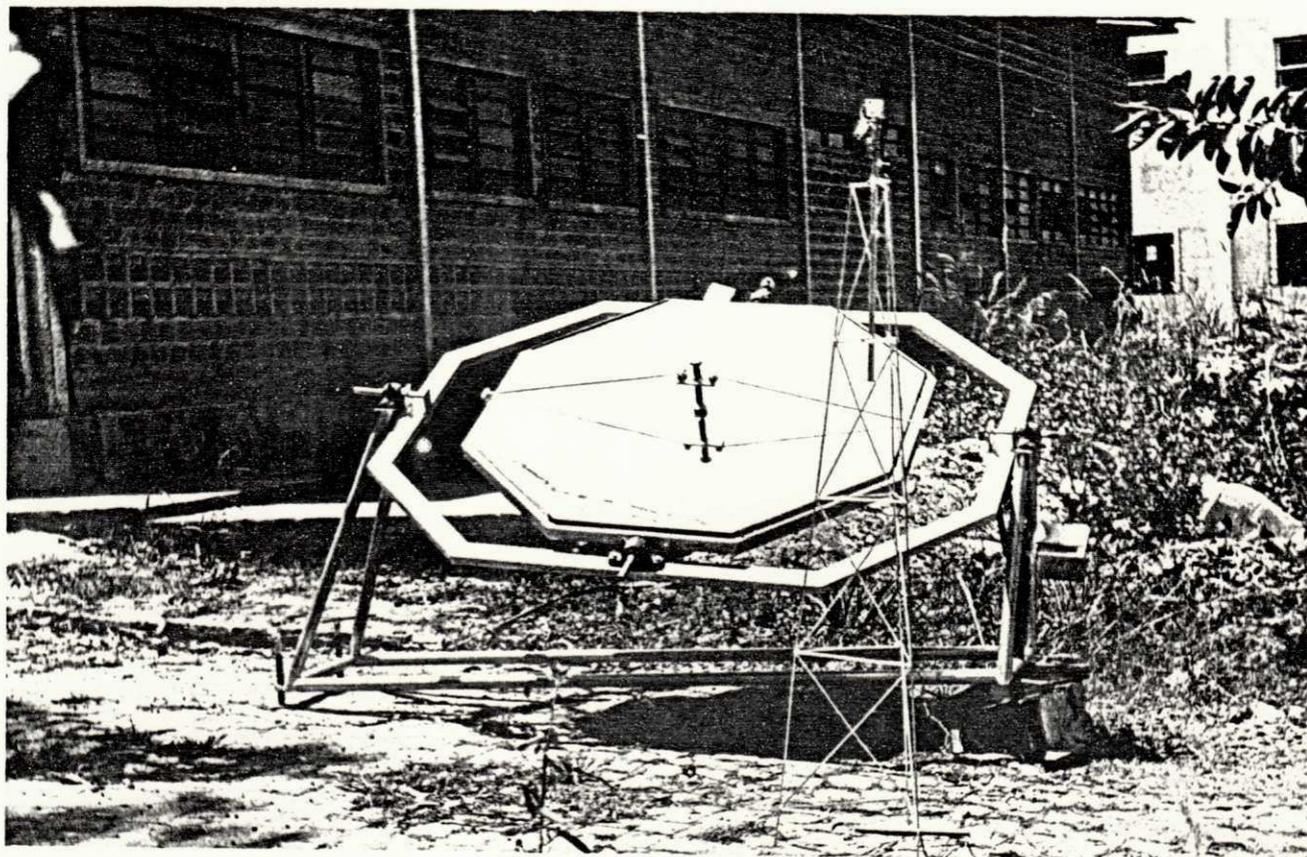


Figura 5.4.4.3 - Protótipos do heliostato, do sensor de direção luminosa e da sua torre

CAPÍTULO VI

CIRCUITO ANALÓGICO

Os circuitos analógicos necessários para o processamento inicial do sinal analógico recebido do sensor de direção luminosa são analisados neste capítulo. Estes circuitos são mostrados em conjunto na figura 9.2.1.1.

6.1 - BUFFER'S

O sinal gerado nos fotodiodos em forma de corrente, é convertido em tensão pelos resistor R_k e trimpot TP_k , como foi visto no capítulo anterior. Essa conversão ocorre na unidade analógica, pois a transmissão do sinal deve ser feita em corrente para que se evitem ruídos.

Buffer's, como ilustrado na figura 6.1.1, são usados para que se tenha o sinal recebido, e já convertido em tensão, com impedância baixa.

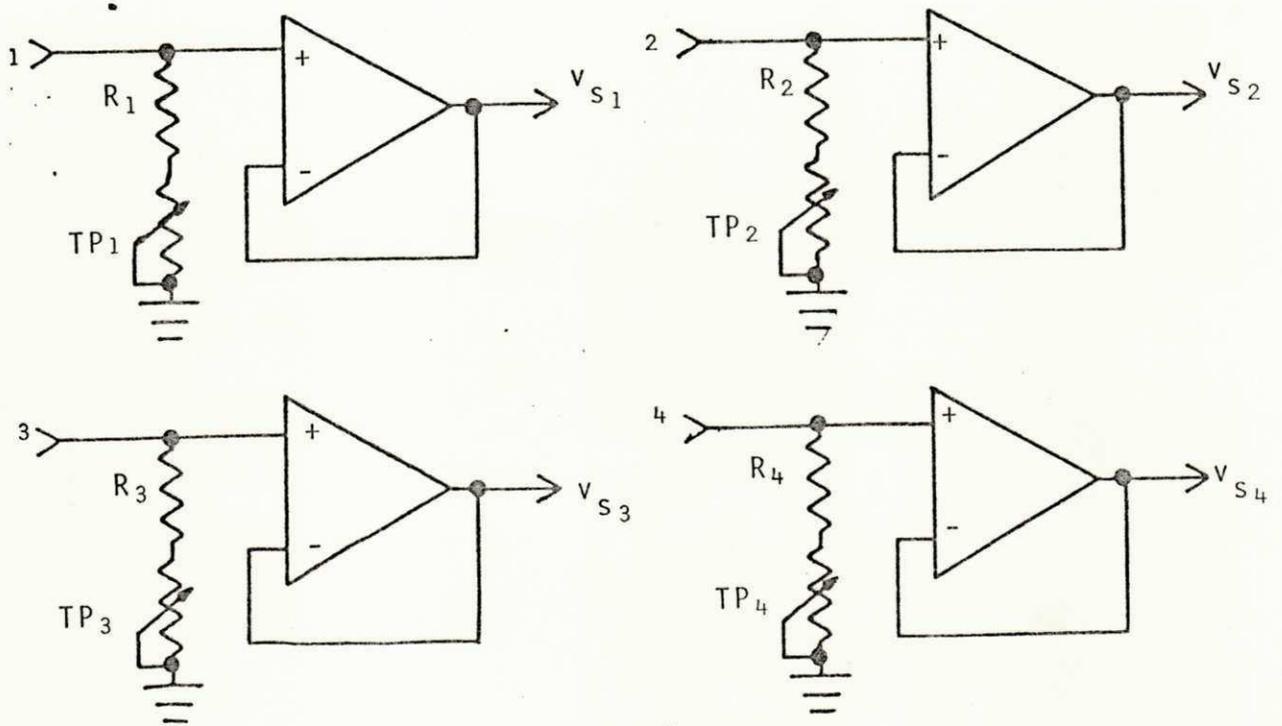


Figura 6.1.1 - Buffer's

6.2 - SOMADOR - SUBTRATOR

A partir das informações de luminosidade em v_{S1} , v_{S2} , v_{S3} e v_{S4} obtêm-se informações de erros angulares nos sentidos leste-oeste e direção norte-sul, consoante as expressões 5.4.1.1 e 5.4.1.2, todavia estas expressões sã são válidas para erros positivos, pois para erros negativos haveria saturação dos circuitos que realizam essas expressões, uma vez que sua alimentação é bipolar. Para erros negativos devem existir também circuitos que realizem as seguintes operações:

$$V_{eol} = v_{s1} + v_{s4} - v_{s2} - v_{s3}, \text{ para o sentido OL} \quad 6.2.1$$

$$V_{esn} = v_{s1} + v_{s2} - v_{s3} - v_{s4}, \text{ para o sentido SN} \quad 6.2.2$$

A figura 6.2.1 mostra o circuito que implementa as expressões 5.4.1.1, 5.4.1.2, 6.2.1 e 6.2.2.

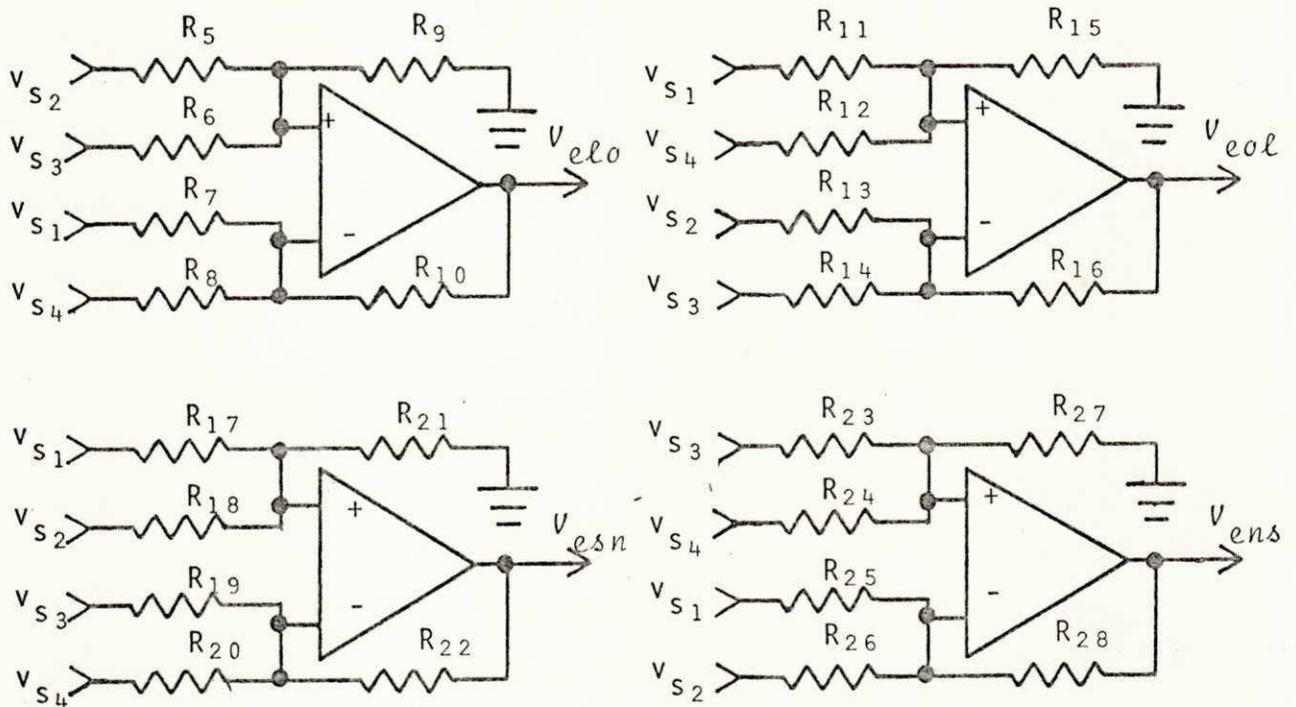


Figura 6.2.1 - Somadores

Fazendo-se $R_5 = R_6 = R_7 = \dots = R_{28} = 100 \text{ K}\Omega$, encontram-se as expressões desejadas.

6.3 - NÍVEL DE LUMINOSIDADE RECEBIDA PELOS FOTODIODOS

Pelas expressões 5.3.1 e 5.3.2 determina-se a tensão gerada a partir de cada fotodiodo.

$$v_{sk} = 4 I_{rk} (R_k + TP_k) \quad 6.3.1$$

Os gráficos das figuras 6.3.1, 6.3.2, 6.3.3, 6.3.4, 6.3.5 e 6.3.6 são actinogramas de Campina Grande, do ano de 1975.⁵ O gráfico da figura 6.3.7 dá a integração diária média da irradiação solar em Campina Grande, do ano de 1975.⁶ Por esses gráficos conclui-se que a irradiação solar tem uma variação instantânea relativamente grande.

Com uma variação da irradiação solar de um fator f , as tensões de erro V_{elo} , V_{eol} , V_{ens} e V_{esn} também variam de um fator f . Torna-se então necessário um controle automático de ganho, para que as tensões de erro não variem com a irradiação solar recebida pelos fotodiodos e sim, somente, com o erro angular de direção luminosa.

Para se fazer o controle automático citado, uma tensão proporcional ao nível de luminosidade recebida é gerada a partir das tensões v_{s1} , v_{s2} , v_{s3} e v_{s4} como está ilustrado na figura 6.3.8.

5 - Estes gráficos são cópias obtidas dos originais do laboratório de meteorologia da UFPb - Campina Grande.

6 - Dados obtidos no laboratório de meteorologia acima citado.

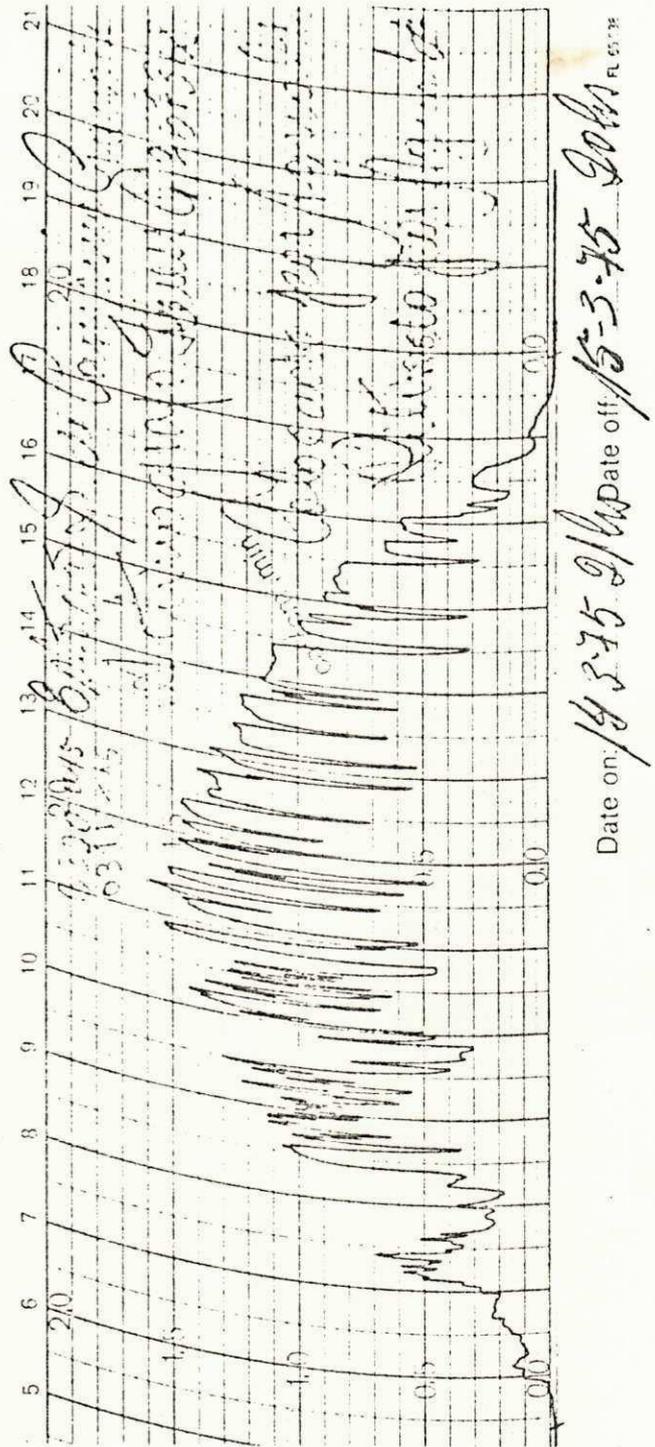
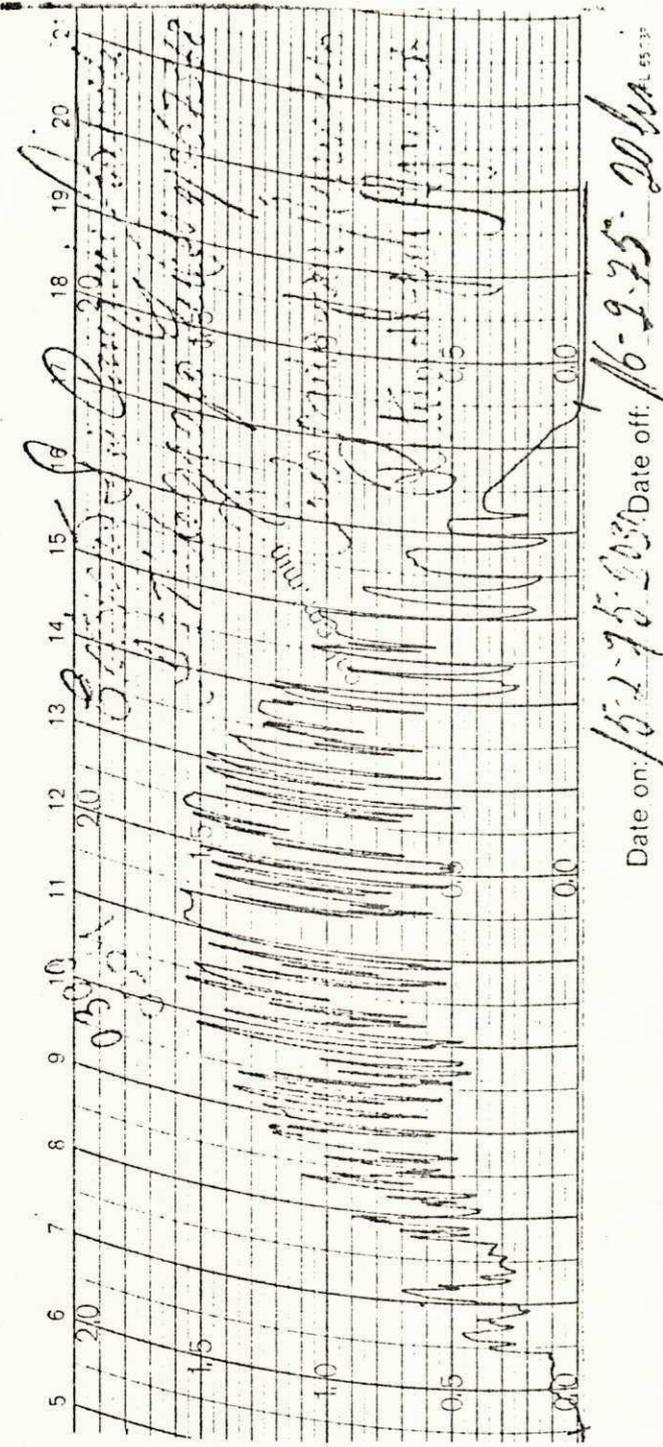
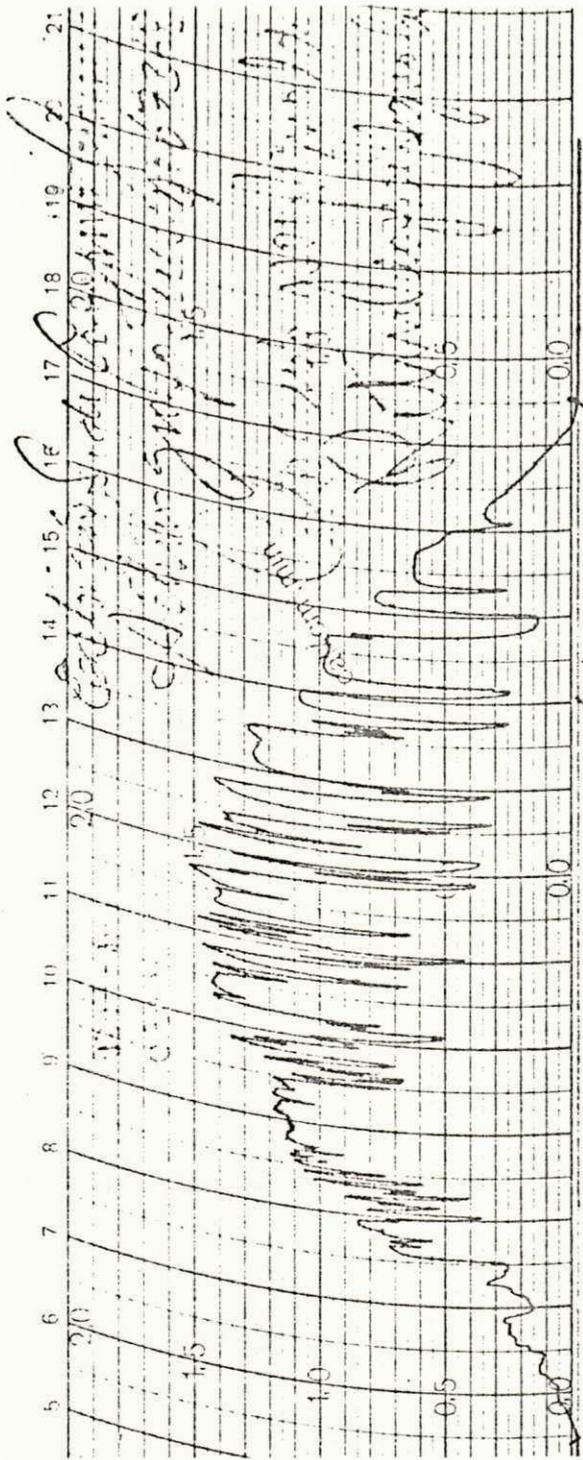
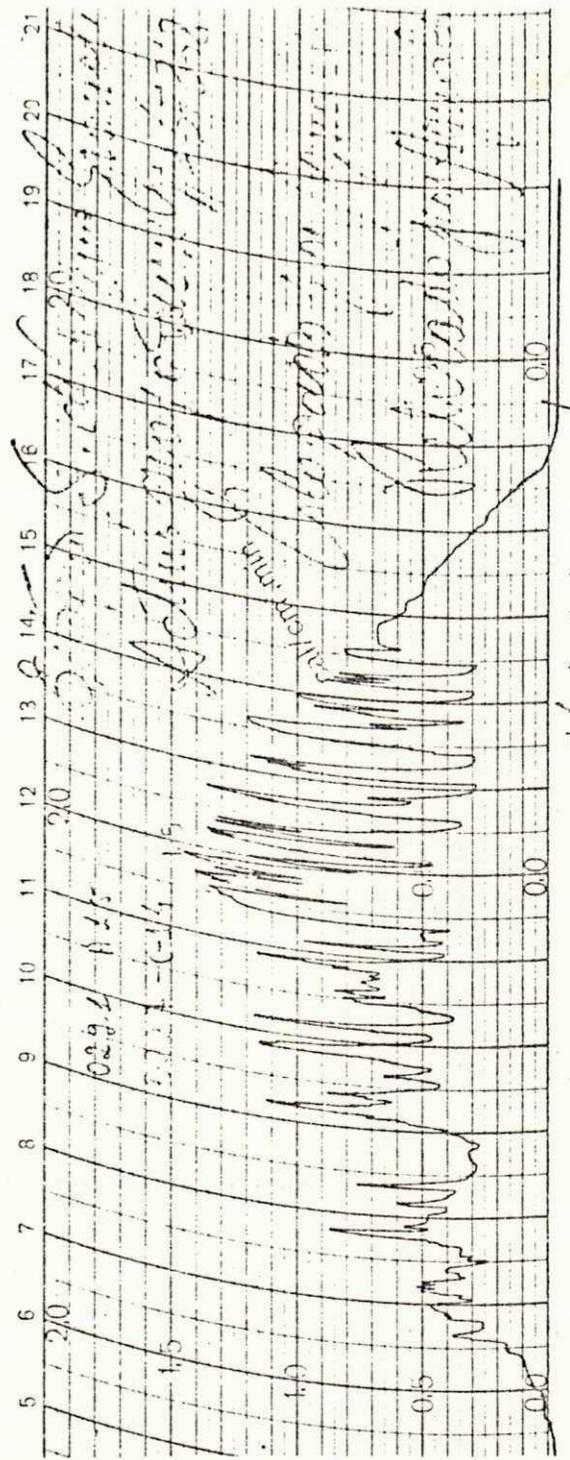


Figura 6.3.1 - Actinogramas de Campina Grande dos dias 16/2/75 e 15/3/75

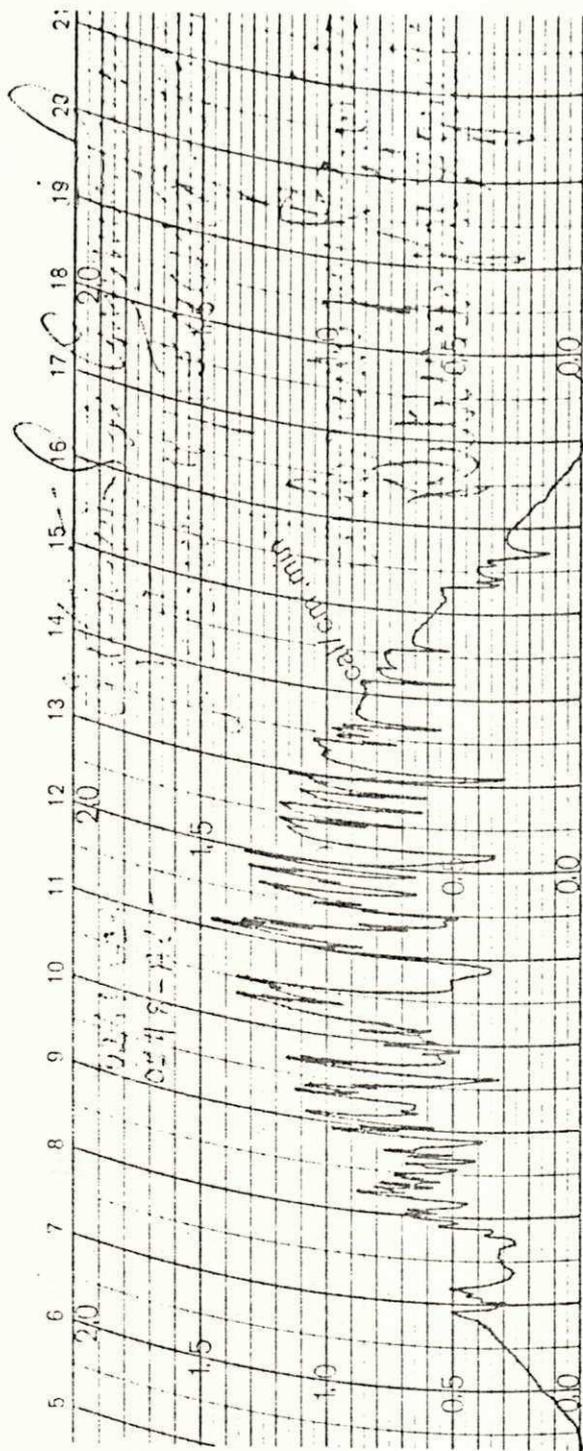


Date on: 15-4-75 Date off: 15-4-75 20:30

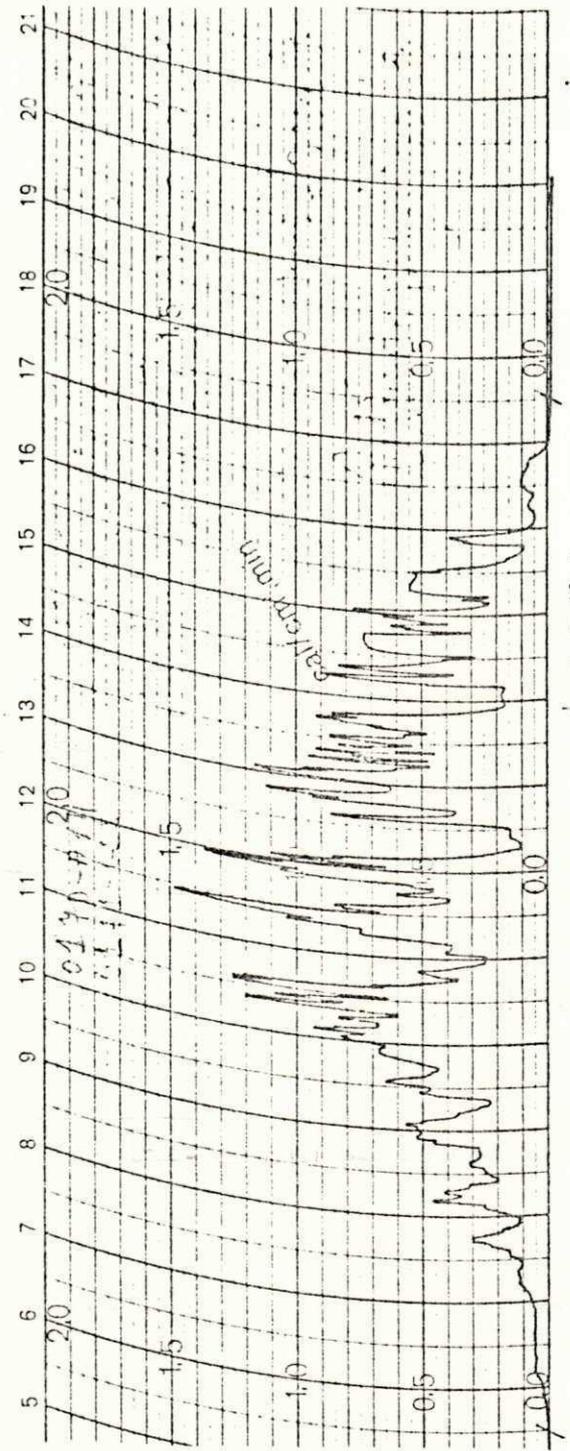


Date on: 15-5-75 Date off: 15-5-75 20:30

Figura 6.3.2 - Actinogramas de Campina Grande dos dias 15/4/75 e 15/5/75

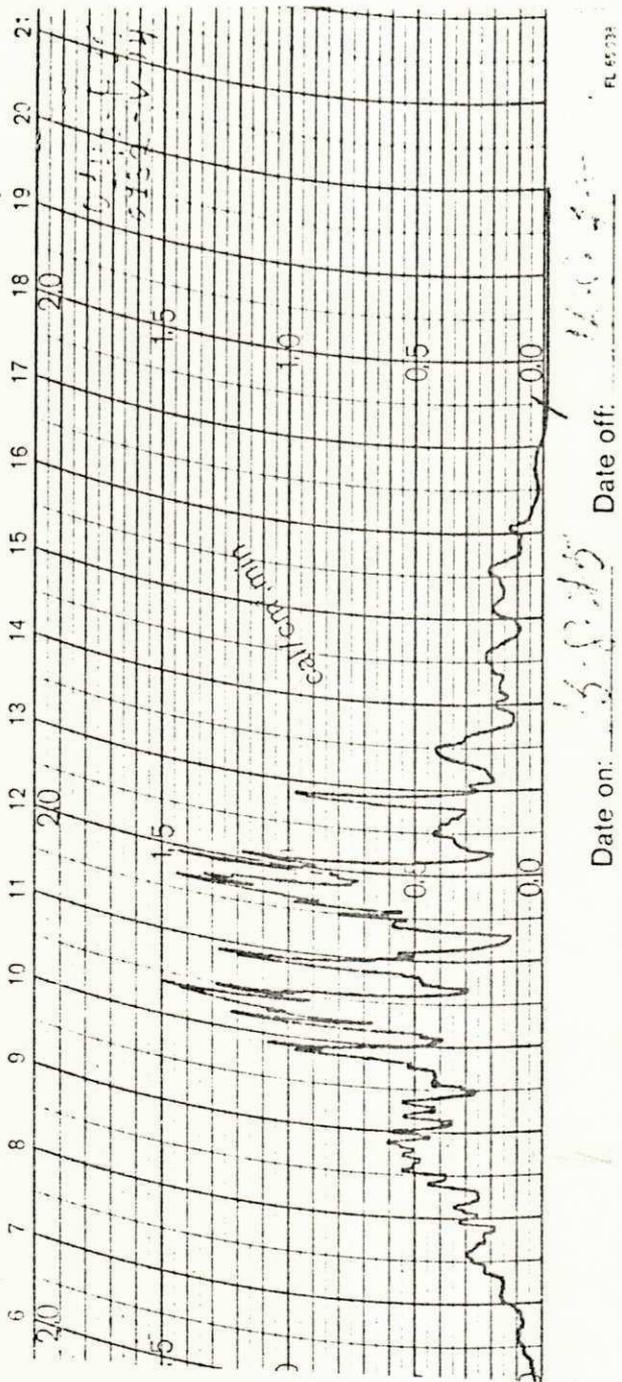


Date on: 14-6-75 20.30 Date off: 15-6-75 00.00 FL 65.033 93



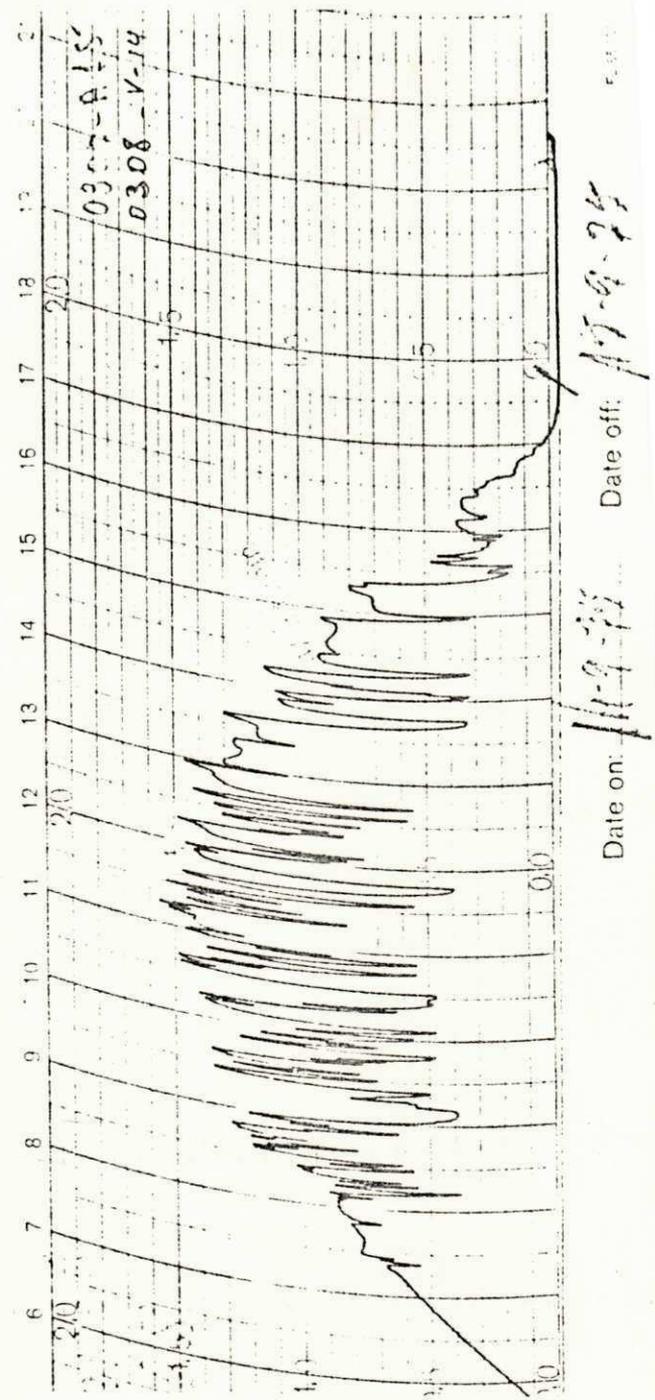
Date on: 14-7-75 20.58 Date off: 15-7-75 20.00 FL 65.033

Figura 6.3.3 - Actinogramas de Campina Grande dos dias 15/6/75 e 15/7/75



FL 65738

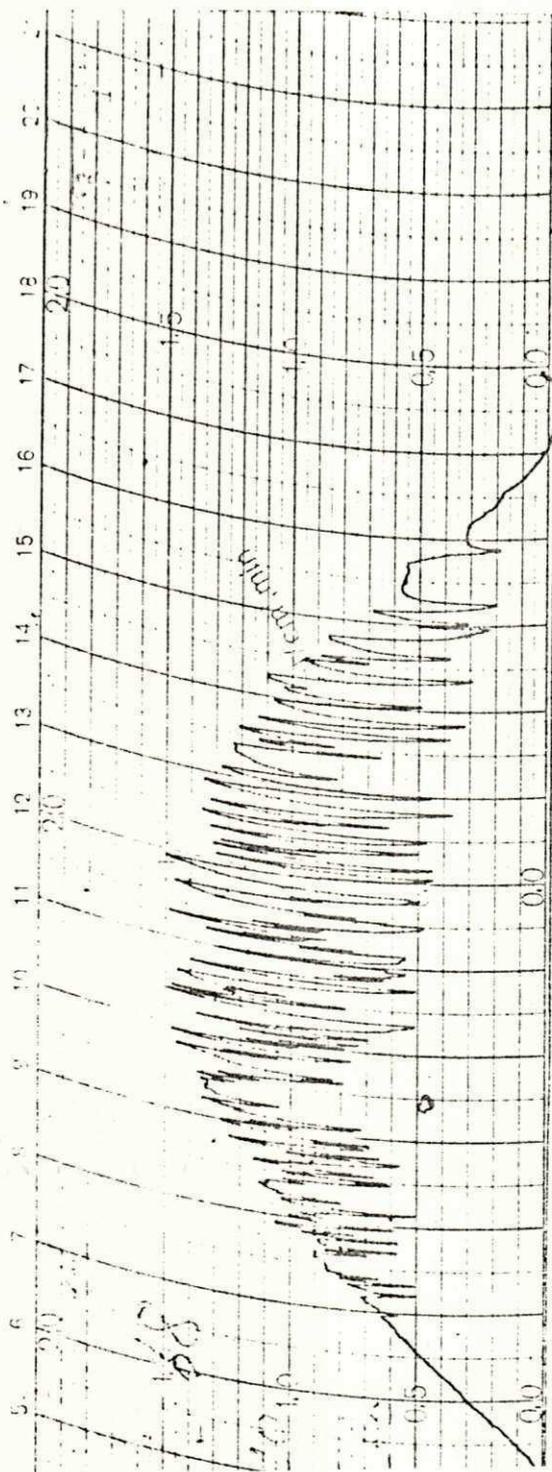
Date on: 16/8/75 Date off: 17/8/75



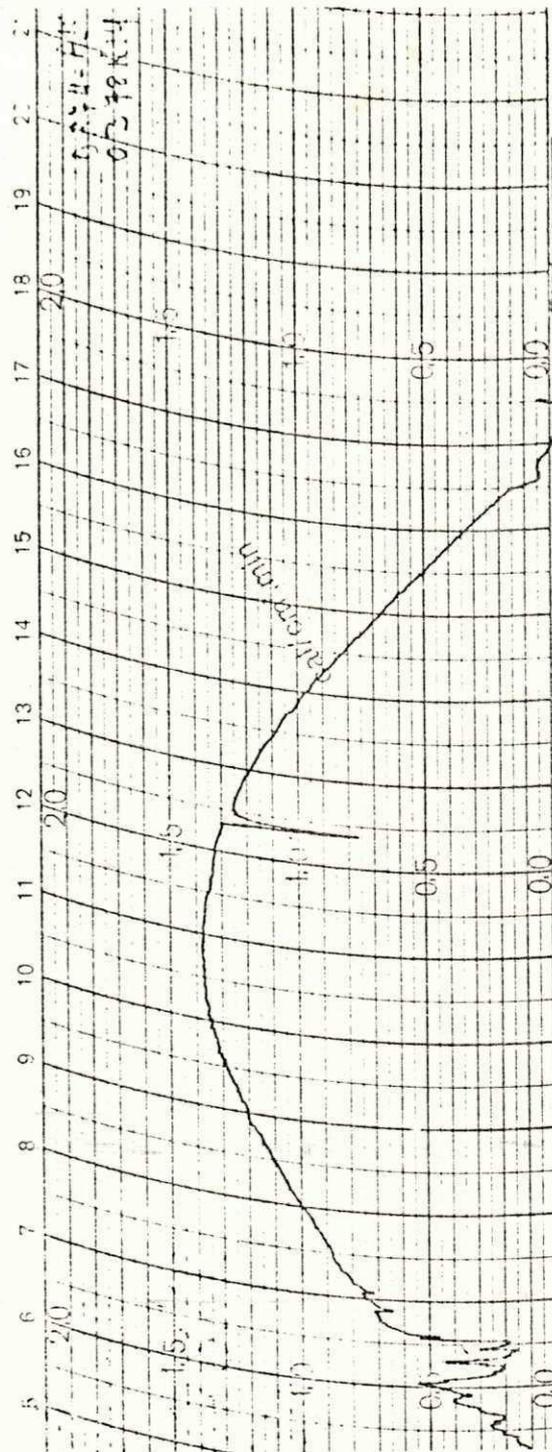
FL 65738

Date on: 15/9/75 Date off: 17/9/75

Figura 6.3.4 - Actinogramas de Campina Grande dos dias 16/8/75 e 15/9/75

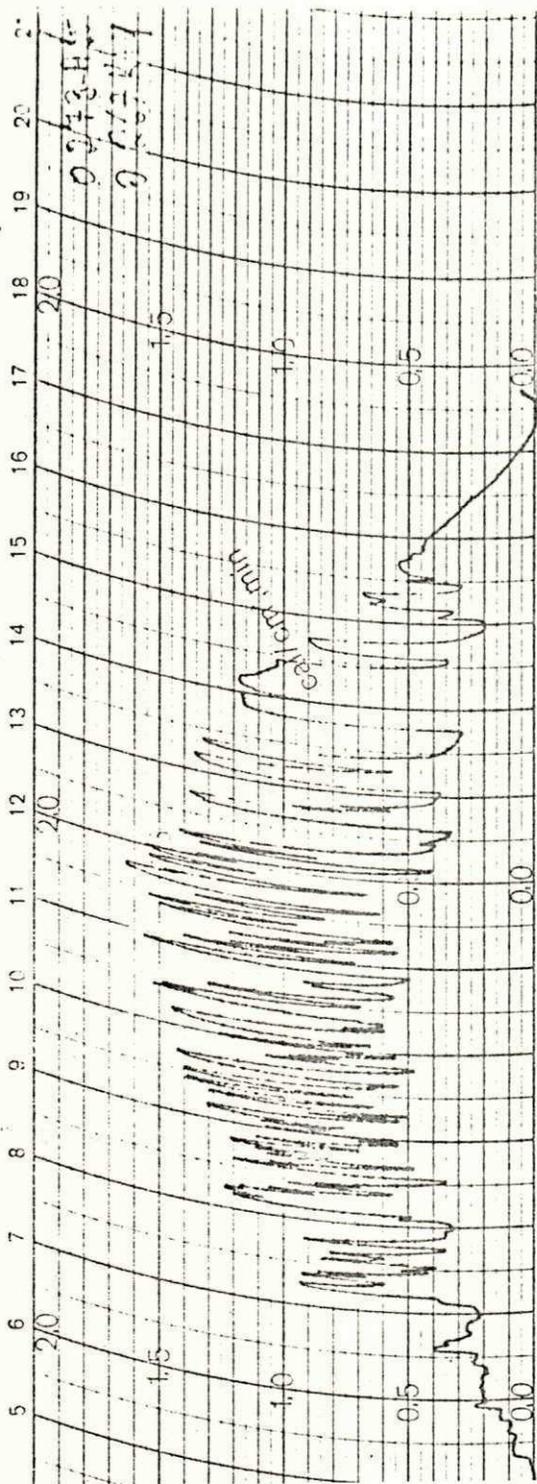


Date on: 15/10/75 Date off: 15/10/75

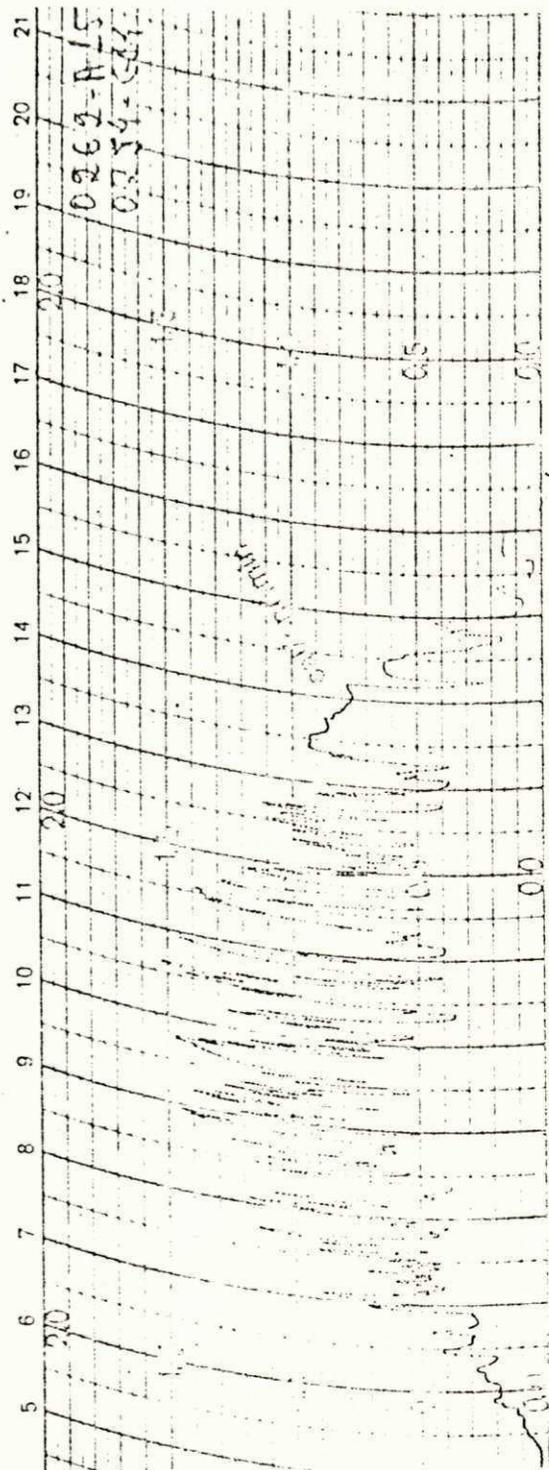


Date on: 31/10/75 Date off: 1/11/75

Figura 6.3.5 - Actinogramas de Campina Grande dos dias 15/10/75 e 1/11/75



Date on: 14-11-75 Date off: 15-11-75

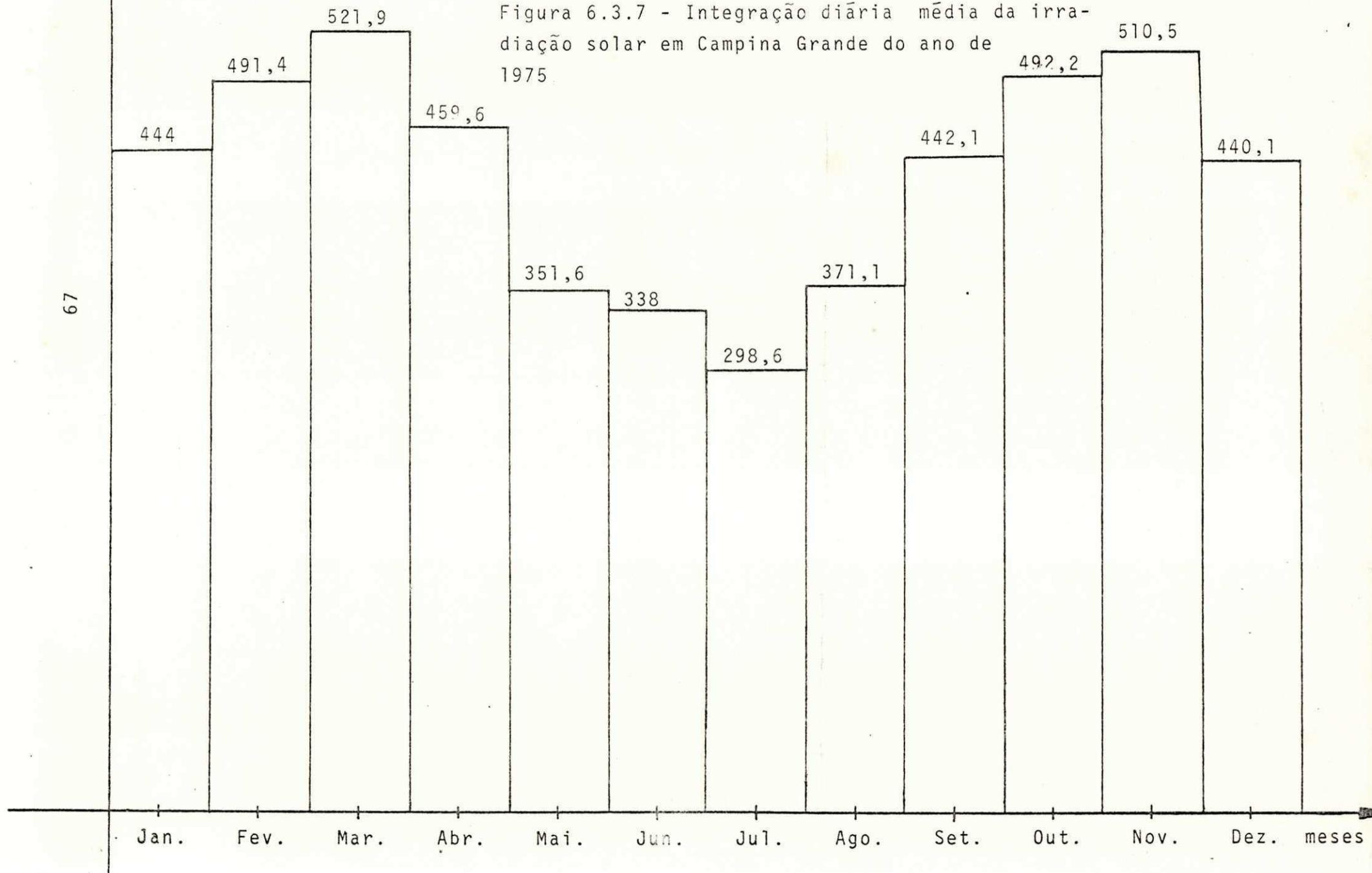


Date on: 14-12-75 Date off: 15-12-75

Figura 6.3.6 - Actinogramas de Campina Grande dos dias 15/11/75 e 15/12/75

cal/cm².dia

Figura 6.3.7 - Integração diária média da irradiação solar em Campina Grande do ano de 1975.



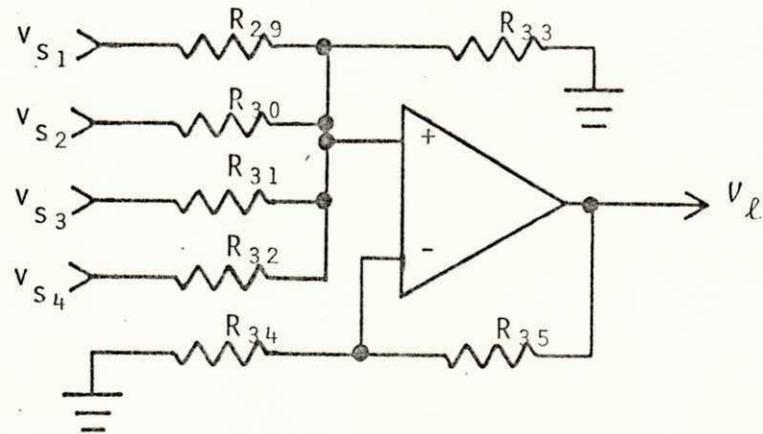


Figura 6.3.8 - Somador para gerar tensão proporcional ao nível de luminosidade recebida

Fazendo-se $R_{29} = R_{30} = R_{31} = R_{32} = R_{33} = 100 \text{ K}\Omega$ e $4 R_{35} = R_{34} = 100 \text{ K}\Omega$, a expressão para v_l é a seguinte:

$$v_l = \frac{1}{4} (v_{S1} + v_{S2} + v_{S3} + v_{S4}) \quad 6.3.2$$

Usando-se valores comerciais, R_{34} deve ser $100 \text{ K}\Omega$ e R_{35} deve ser $27 \text{ K}\Omega$. A expressão 6.3.2 modifica-se para:

$$v_l = 0,254 (v_{S1} + v_{S2} + v_{S3} + v_{S4}) \quad 6.3.3$$

6.4 - COMPARADORES

A partir das tensões de erro v_{elo} , v_{eol} , v_{esn} e v_{ens} geram

-se níveis lógicos que indicam a necessidade de correções nos sentidos leste-oeste, oeste-leste, sul-norte e norte-sul, respectivamente.

Esses níveis lógicos serão obtidos a partir de comparadores que têm como referência uma tensão gerada por um divisor resistivo da tensão .

Se houver variação na irradiação de um fator f , este afetará tanto as tensões de erro como a tensão V_L e as saídas dos comparadores tornam-se insensíveis à variação de irradiação.

6.4.1 - PEQUENOS ERROS DE DIREÇÃO LUMINOSA

Quando o erro da direção do feixe luminoso é maior do que 0,1 grau, deve haver correção. Essa correção é acionada por uma mudança de estado em um comparador.

Para erros de direção luminosa apenas na direção leste-oeste (sem perda de generalidade, como foi visto no capítulo anterior), de 0,1 grau, a variação da área iluminada em cada fotodiodo deve ser de 7,20%. Como a tensão nas bases dos fotodiodos é de 6,4 volts quando o feixe luminoso está concentrado no centro da caldeira e com 1 kW/m^2 de irradiação solar, a variação de tensão nas bases dos fotodiodos deve ser:

$$\Delta v_{sk} = 7,2\% \times 6,4 = 0,4608 \text{ V}$$

A tensão em V_{elo} ou em V_{eol} (dependendo do erro ser de leste para oeste ou vice-versa), dada pela expressão 6.2.1, deve ser:

$$V_{eol} = 4 \times 0,4608 = 1,8432 \text{ V}$$

Se o erro fosse no sentido leste-oeste, V_{elo} é que seria igual a 1,8432 Volt. Se a direção do erro fosse norte-sul, V_{esn} ou V_{ens} é que seria igual àquela.

Quando a irradiação solar for de 1 kW/m^2 , cada vez que V_{eol} , V_{elo} , V_{esn} ou V_{ens} atingir o valor de 1,8432 volt, a tensão de saída correspondente, V_{col} , V_{clo} , V_{csn} ou V_{cns} , deverá assumir um nível lógico alto. O circuito está ilustrado na figura 6.4.1.1.

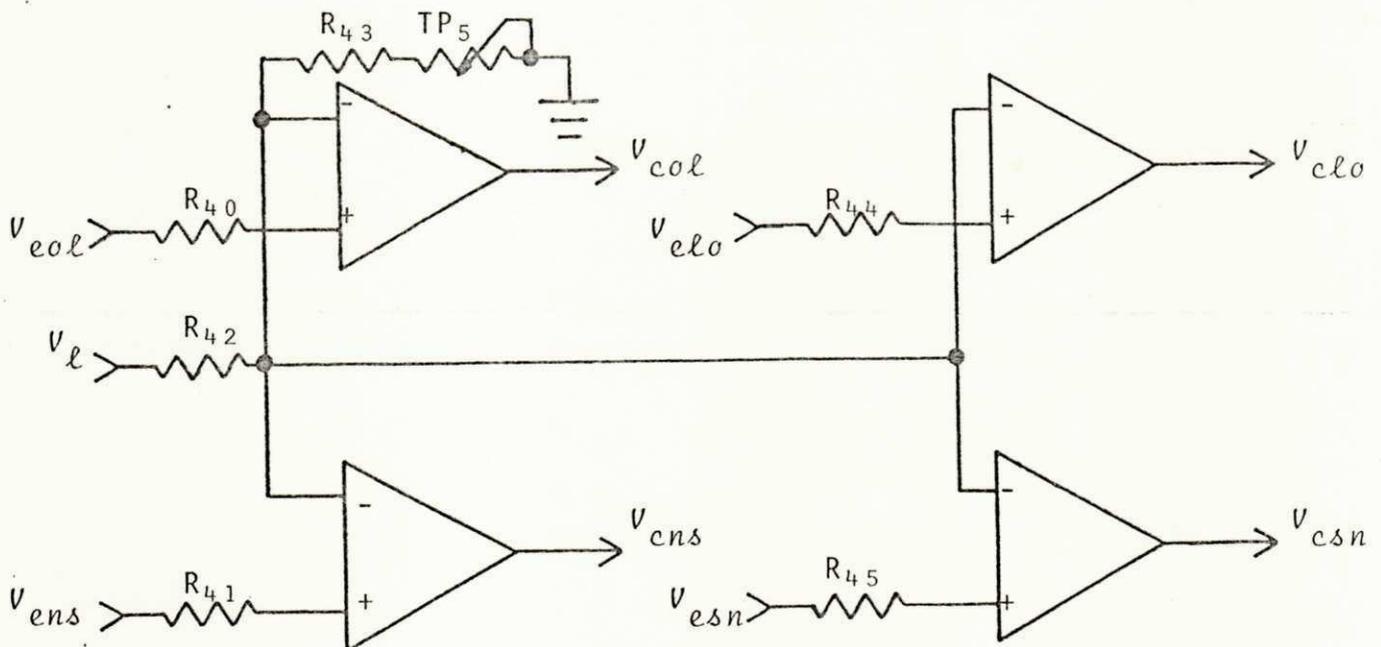


Figura 6.4.1.1 - Comparadores para pequenos erros de direção luminosa

Como V_{ℓ} depende da irradiação recebida pelos fotodiodos, o divisor de tensão formado por R_{42} , R_{43} e TP_5 fará o controle automático do nível de tensão de referência para o comparador.

Fazendo-se $R_{40} = R_{41} = R_{44} = 100 \text{ K}\Omega$ e sabendo-se que para uma irradiação solar de 1 kW/m^2 , com um erro de direção luminosa de $0,1$ grau, a tensão de erro na direção e no sentido do erro deve ser $1,8432$ volt e V_{ℓ} deve ser $0,254 \times (4 \times 6,4) = 6,50240 \text{ V}$. Os valores R_{42} , R_{43} e TP_5 devem ser então:

$$\frac{R_{43} + TP_5}{R_{43} + TP_5 + R_{42}} \times 6,5024 = 1,8432$$

$$R_{42} = 2,527 (R_{43} + TP_5)$$

Fizeram-se $R_{42} = 100 \text{ K}\Omega$, $R_{43} = 22 \text{ K}\Omega$ e $TP_5 = 100 \text{ K}\Omega$.

Com o sistema de controle estável, a direção dos raios refletidos pelo espelho do heliostato deve ficar oscilando em torno de $\pm 0,1$ grau, com correções de $\mp 15:50.000 = \mp 0,0003$ grau, como está ilustrado na figura 6.4.1.2.

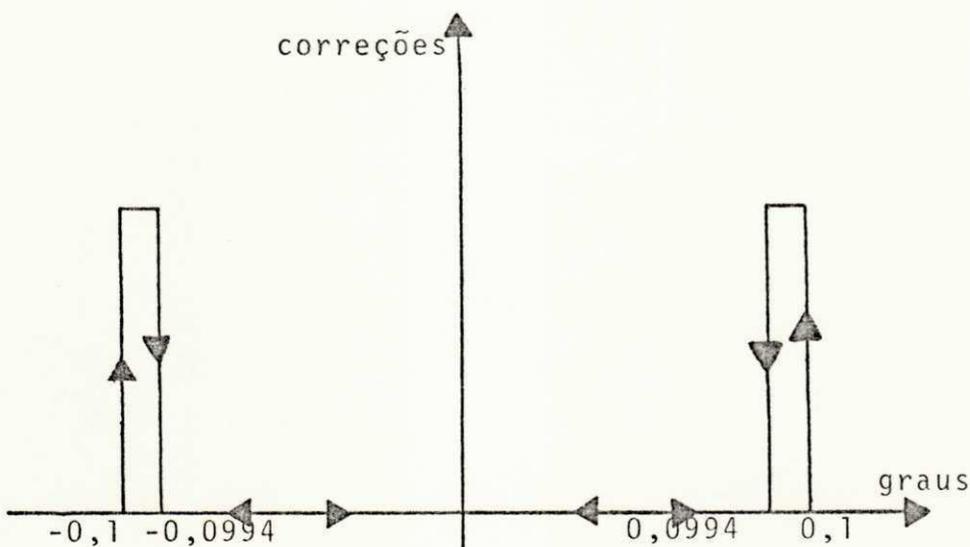


Figura 6.4.1.2 - Gráfico de correções

6.4.2 - GRANDES ERROS DE DIREÇÃO LUMINOSA

Quando o erro angular da direção luminosa for menor do que 0,1 grau, não deverá haver correção da posição do espelho. Quando este erro for maior do que 0,1 grau e menor do que 0,15 grau, deverá haver correção da posição do espelho como foi analisado no item 6.4.1. Quando o erro da direção luminosa for maior do que 0,15 grau, far-se-ão correções mais rápidas até que o erro angular caia para 0,15 grau, e daí em diante a velocidade de correção deve baixar.

Para execução dessas correções rápidas nos sentidos leste-oeste, oeste-leste, norte-sul e sul-norte geram-se os níveis lógicos V_{glo} , V_{gol} , V_{gns} , V_{gsn} , respectivamente, de modo que eles, assume o valor alto sempre que o erro de direção luminosa na sua direção e sentido é maior do que 0,15 grau.

A figura 6.4.2.1 representa os comparadores que geram estes níveis lógicos.

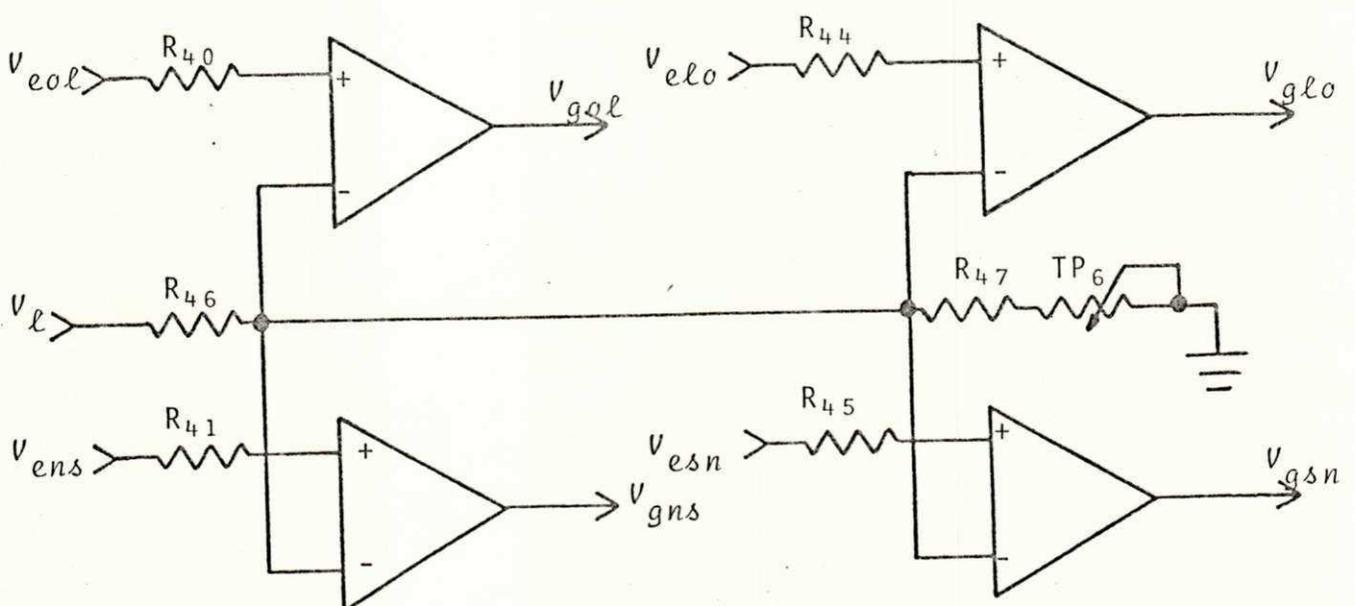


Figura 6.4.2.1 - Comparadores para grandes erros de direção luminosa

Para encontrar a variação de tensão nas bases dos fotodiodos, quando o erro angular for de 0,15 grau, pode-se partir da expressão 5.4.3.4 encontrando-se a variação da dimensão na sombra:

$$\Delta n = h \operatorname{tg} 0,15$$

$$\Delta n = 0,34034 \text{ mm}$$

Pela expressão 5.4.3.1 encontra-se a variação da área iluminada de cada fotodiodo:

$$\Delta A_{ik} = \left(\frac{5}{4} \right)^2 \left(\frac{0,34}{5/4} + 2 \frac{0,34}{5/4} \sqrt{1 - \left(\frac{0,34}{2 \times 5/4} \right)^2} + \right. \\ \left. + 2 \operatorname{arc} \cos \sqrt{1 - \left(\frac{0,34}{2 \times 5/4} \right)^2} \right)$$

$$\Delta A_{ik} = 1,6951039 \text{ mm}^2$$

A variação percentual pode ser encontrada usando-se o valor da área iluminada, dado na expressão 5.3.3:

$$\frac{\Delta A_{ik}}{A_{ik}} = \frac{1,6951039}{\pi (5/4)^2 \left(\frac{7}{3} + \frac{1 + \sqrt{3}}{\pi} \right)} = 0,1078 \approx 10,78\%$$

Com essa variação percentual, encontra-se a variação da tensão nas bases dos fotodiodos:

$$\Delta v_{sk} = 6,4 \times 0,1078 = 0,69$$

Os valores de R_{46} , R_{47} e TP_6 podem então ser encontrados:

$$\frac{R_{47} + TP_6}{R_{46} + R_{47} + TP_6} \times 6,5024 = 4 \times 0,69$$

$$R_{46} = (R_{47} + TP_6) \times 1,3559195$$

Os valores escolhidos para R_{46} e R_{47} foram de $100 \text{ K}\Omega$ e $47 \text{ K}\Omega$ e para TP_6 , $100 \text{ K}\Omega$.

6.5 - NÍVEL DE LUMINOSIDADE REFLETIDA PELOS ESPELHOS

O circuito da figura 6.3.8 dá na sua saída uma tensão proporcional à irradiação recebida pelos fotodiodos, quando o erro angular da direção luminosa não é muito grande; serve para fazer o controle automático do nível de referência para os comparadores, pois o sistema fica estável quando o erro angular é menor do que $0,1$ grau. Este circuito tem sua precisão limitada pela variação da sombra nos fotodiodos. Quando a sombra deixa de existir em uns e continua variando em outros, a tensão de saída não tem mais uma variação linearmente proporcional à irradiação refletida pelo espelho.

Para o controle do nível de referência dos comparadores, o circuito da figura 6.3.8 pode ser usado, porquanto se o erro da direção luminosa é muito grande, a tensão de erro também o é e o sistema responde com uma velocidade rápida de correção da posição do espelho. No entanto, precisa-se também de um sensor de luminosidade, para indicar se o movimento deve ser feito com a velocidade de acompanhamento do sol, no caso da irradiação solar estar baixa.

Usa-se o circuito da figura 6.5.1 para indicar o nível da

irradiação refletida pelo espelho.

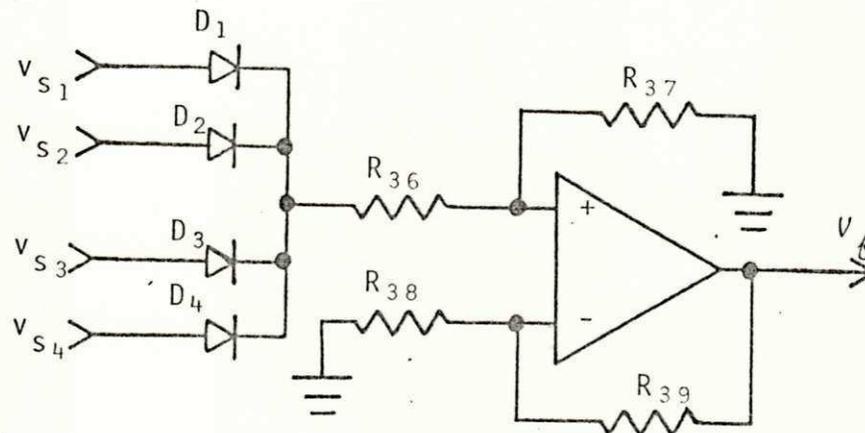


Figura 6.5.1 - Amplificador para a maior tensão de entrada

Com $R_{36} = R_{37} = R_{38} = R_{39} = 100 \text{ K}\Omega$, a tensão V_f será igual à maior tensão de entrada v_{s1} , v_{s2} , v_{s3} ou v_{s4} .

Esse circuito, no entanto, pode introduzir um erro na tensão, que crescerá com o erro da direção dos raios refletidos pelo espelho, até que um dos fotodiodos fique totalmente iluminado. Quando a dimensão n da sombra for igual a $1/4$ do diâmetro do fotodiodo, o erro na tensão V_f será nulo, e quando um dos fotodiodos estiver totalmente iluminado, a tensão V_f terá erro máximo; esse erro, em percentagem, será:

$$\frac{\Delta V_{f\text{máx}}}{V_{f\text{máx}}} = \frac{8 - 6,4}{6,4} = 0,25 = 25\%$$

6.6 - COMPARADOR PARA INDICADOR DE BAIXA LUMINOSIDADE

Quando a irradiação solar estiver baixa, por qualquer fa-

Figura 6.6.1 - Tabela dos fatores de correções para os actinogramas das figuras 6.3.1 a 6.3.6

MESES	FATOR DE CORREÇÃO
Janeiro	1,01
Fevereiro	1,03
Março	1,04
Abril	1,03
Maió	1,01
Junho	1,00
Julho	1,01
Agosto	1,02
Setembro	1,03
Outubro	1,04
Novembro	1,03
Dezembro	1,02

tor (passagem de nuvem, início ou final do dia, etc), o espelho deverá assumir a velocidade de 7,5 graus/hora no sentido leste-oeste e não deverá ter movimento na direção norte-sul. O sensor de direção luminosa deixará de atuar no sistema, pois este estará então recebendo uma quantidade de luz difusa considerável em relação à luz refletida pelo espelho.

A tabela da figura 6.6.1 dá o fator de correção para os actinogramas das figuras 6.3.1, 6.3.2, 6.3.3, 6.3.4, 6.3.5 e 6.3.6. Por estas figuras pode-se escolher o valor mínimo aceitável de irradiação solar como sendo igual a $0,5 \text{ cal/m}^2 \cdot \text{min}$.

O comparador da figura 6.6.2 assume o nível lógico alto sempre que a irradiação estiver abaixo desse valor mínimo aceitável.

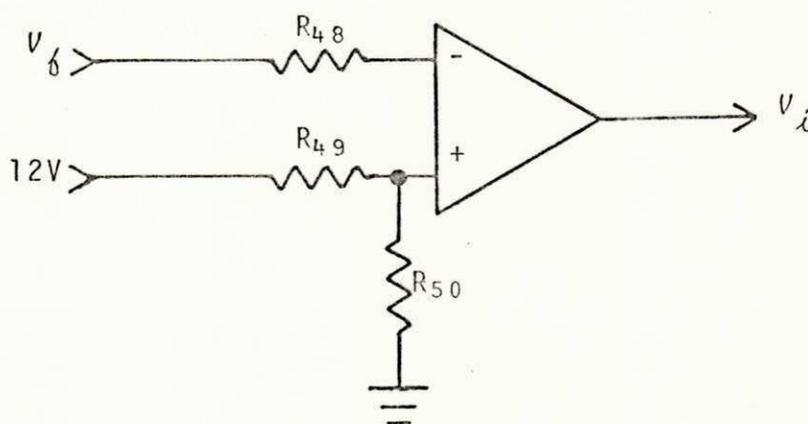


Figura 6.6.2 - Comparador para nível de luminosidade

Quando a irradiação solar for de $0,5 \text{ cal/cm}^2 \cdot \text{min}$, a tensão V_{δ} deverá ser:

$$V_f = 6,4 \times \frac{0,5 \times 4,2}{60 \times 10^{-4}} \times \frac{1}{1000} = 2,24 \text{ V}$$

Os valores de R_{49} e R_{50} são dados por:

$$\frac{R_{50}}{R_{50} + R_{49}} \times 12 = 2,24$$

$$R_{49} = 4,337 R_{50}$$

Os valores escolhidos foram: $R_{50} = 39 \text{ K}\Omega$, $R_{49} = 150 \text{ K}\Omega$ e $R_{48} = 33 \text{ K}\Omega$.

CAPÍTULO VII

CIRCUITOS LÓGICOS

Os circuitos lógicos utilizados serão apresentados neste capítulo, o qual contém quatro itens; o primeiro item trata de toda a lógica de seleção de frequência e sentido de rotação dos motores e os três últimos, dos comandos e decodificadores para o circuito analisado no item 7.1.

7.1 - CIRCUITOS LÓGICOS PARA SELEÇÃO DE FREQUÊNCIA E SENTIDO DE ROTAÇÃO DOS MOTORES

Neste item será analisado o funcionamento dos circuitos lógicos que fazem a escolha da frequência dos pulsos de comando dos motores que causarão os movimentos do espelho do heliostato (tanto no sentido leste-oeste como na direção norte-sul); com estes circuitos faz-se também a escolha do sentido de rotação dos motores.

Os desenhos desses circuitos estão nas figuras 9.2.1.1 e 9.2.1.2.

7.1.1 - COMANDOS LÓGICOS

Como estes circuitos operam uma lógica intermediária entre os circuitos analógicos, os controles externos e os circuitos lógicos para o controle dos motores, serão considerados aqui os comandos de entrada e saída referidos a seguir.

7.1.2 - COMANDOS COMUNS AOS DOIS MOVIMENTOS

Sõ existe um comando de entrada comum aos dois movimentos, que ẽ o comando de insuficiẽncia de irradiaçãõ solar V_i , visto no capítulo anterior.

Nãõ existe nenhum comando de saída comum aos dois movimentos.

7.1.3 - COMANDOS PARA O MOVIMENTO NO SENTIDO LESTE-OESTE

Para o movimento no sentido leste-oeste serãõ considerados os seguintes comandos de entrada:

- 1 - I_{lo} - comando externo que estabelece uma velocidade para o motor do movimento leste-oeste de 277 rpm (112 pulsos por segundo) neste sentido;
- 2 - I_{ol} - comando externo que estabelece uma velocidade para o motor do movimento leste-oeste de 277 rpm (112 pulsos por segundo) no sentido oeste-leste;
- 3 - V_{glo} - comando, citado no capítulo anterior, que estabelece uma velocidade para o motor do movimento leste-oeste de 277 rpm (112 pulsos por segundo) neste sentido, se $V_i = I_{ol} = "0"$;
- 4 - V_{gol} - comando, referido tambẽm no capítulo anterior, que estabelece uma velocidade para o motor do movimento leste-oeste de 277 rpm (112 pulsos por segundo) no sentido oeste-leste se $V_i = I_{lo} = "0"$;

- 5 - V_{clo} - comando, visto no capítulo anterior, que estabelece uma velocidade para o motor do movimento leste-oeste de 39 rpm (14 pulsos por segundo) neste sentido se $V_i = I_{lo} = I_{ol} = "0"$ e se $V_{gol} = V_{glo} = "0"$;
- 6 - V_{col} - comando, visto igualmente no capítulo anterior, que estabelece uma velocidade para o motor do movimento leste-oeste de 39 rpm (14 pulsos por segundo) no sentido oeste-leste se $V_i = I_{lo} = I_{ol} = V_{gol} = V_{glo} = "0"$.

Os comandos de saída para o movimento no sentido leste-oeste são os seguintes:

- 1 - U/D_1 - estabelece se o movimento deve ter sentido leste-oeste ou oeste-leste;
- 2 - δ_{s_1} - estabelece a frequência de pulso para o motor do movimento leste-oeste;
- 3 - A_t - comanda a seleção da tensão de trabalho do motor do movimento leste-oeste.

7.1.4 - COMANDOS PARA O MOVIMENTO NA DIREÇÃO NORTE-SUL

Os comandos de entrada para o movimento na direção norte-sul são análogos aos dos movimentos no sentido leste-oeste, no entanto, nesta direção de movimento não existe o comando A_t e existe o comando que faz com que o eixo do motor do movimento norte-sul fique livre quando $V_i = "1"$ e $I_{ns} = I_{sn} = "0"$.

7.1.5 - IMPLEMENTAÇÃO DA LÓGICA PARA O MOVIMENTO LESTE-OESTE

A implementação da lógica para o movimento leste-oeste será analisada a partir dos seus comandos de saída.

7.1.5.1 - SELEÇÃO DO SENTIDO DE ROTAÇÃO DO MOTOR

u/D_1 - para a seleção do sentido de rotação do motor do movimento leste-oeste, deve-se considerar o seguinte:

1 - $u/D_1 = "1"$ se $I_{lo} = "1"$ ou

se $V_i = "1"$ e $I_{ol} = "0"$ ou

se $V_{clo} = "1"$ e $I_{ol} = "0"$;

2 - $u/D_1 = "0"$ se $I_{ol} = "1"$ ou

se $V_{col} = "1"$ e $I_{lo} = "0"$ e $V_i = "0"$

Os níveis lógicos de V_{gol} e V_{glo} não foram considerados pois se V_{glo} tiver nível alto, necessariamente V_{clo} terá nível alto ou se V_{gol} tiver nível alto, necessariamente V_{col} terá também nível alto.

Em nenhum caso V_{clo} e V_{col} podem ter níveis lógicos altos ao mesmo tempo. I_{lo} e I_{ol} não devem ter também níveis lógicos altos ao mesmo tempo, pois são comandos de chaves externas, para o motor girar no sentido leste-oeste ou oeste-leste que não devem ser ligadas ao mesmo tempo.

A figura 7.1.5.1.1 mostra o circuito que realiza o comando de saída u/D_1 e sua tabela de estados.

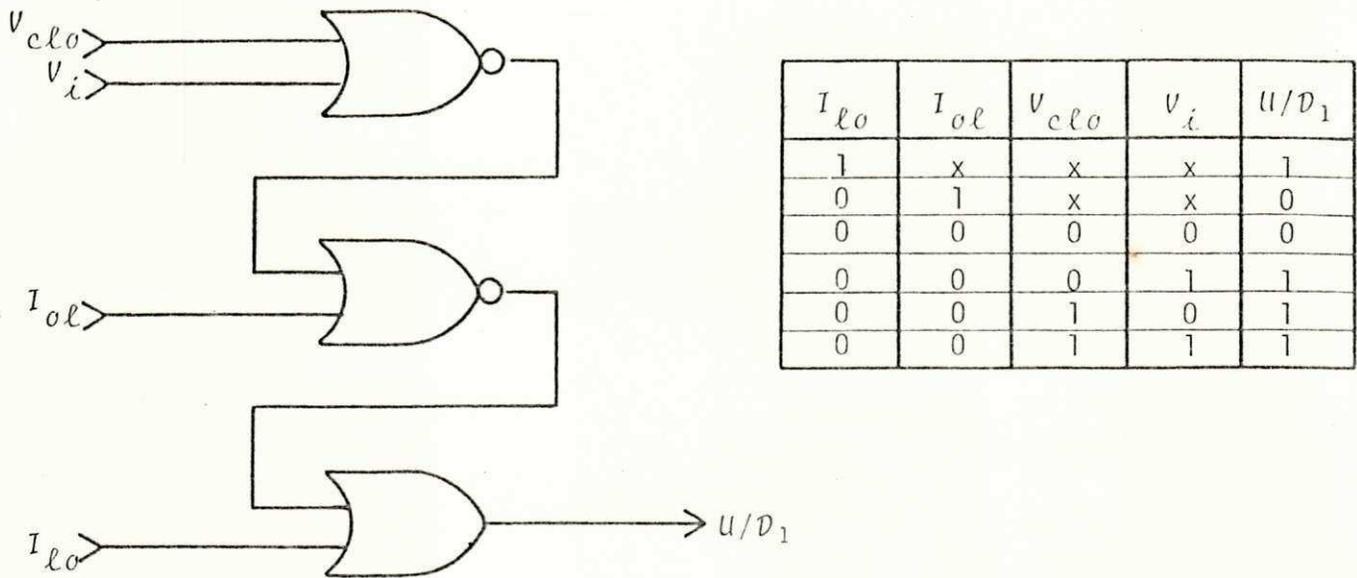


Figura 7.1.5.1.1 - Circuito para o comando de saída U/D_1

7.1.5.2 - SELEÇÃO DA FREQUÊNCIA DE COMANDO PARA O MOTOR

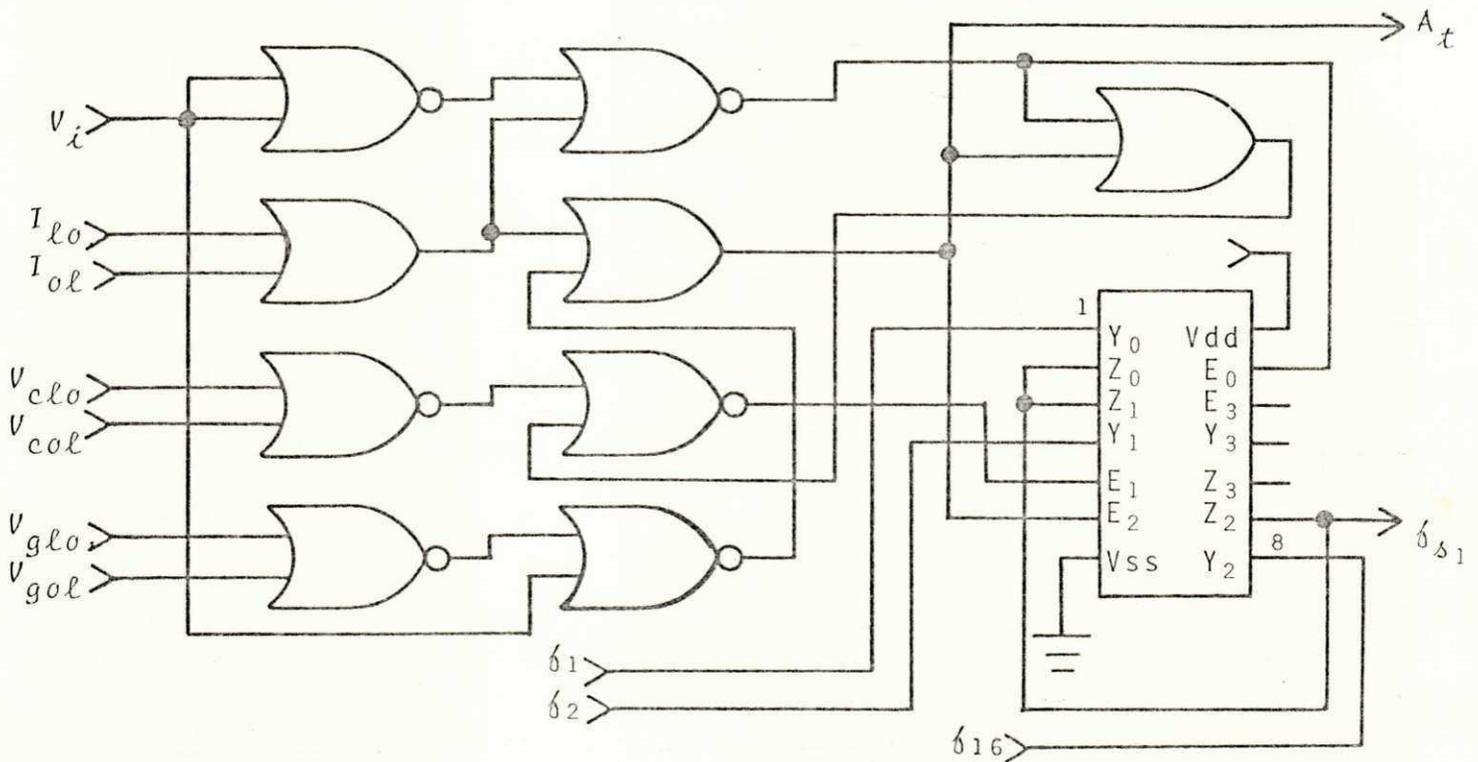
f_{s1} - as frequências dos pulsos de entrada devem ser f_{16} , f_2 e f_1 com $f_{16} = 112$ Hz, $f_2 = 14$ Hz e $f_1 = 7$ Hz; para a seleção dessa frequência deve-se considerar o seguinte:

- 1 - $f_{s1} = f_{16}$ se $I_{lo} + I_{ol} = "1"$ ou
se $(V_{glo} + V_{gol}) \overline{V_i} = "1"$;
- 2 - $f_{s1} = f_2$ se $V_{clo} + V_{col} = "1"$ e $I_{lo} + I_{ol} = "0"$ e
 $V_{glo} + V_{gol} = "0"$ e $V_i = "0"$;
- 3 - $f_{s1} = f_1$ se $V_i = "1"$ e $I_{lo} + I_{ol} = "0"$;
- 4 - $f_{s1} = 0$ Hz se $I_{lo} + I_{ol} + V_{clo} + V_{col} + V_i = "0"$.

Para a implementação desse circuito podem-se usar chaves eletrônicas, como a CMOS 4016, escolhida neste trabalho. Com as saídas interligadas (pinos 2, 3 e 9), colocam-se os sinais de

frequências δ_1 , δ_2 e δ_{16} nas entradas (pinos 1, 4 e 8) e faz-se a seleção (pinos 13, 5 e 6).

A figura 7.1.5.2.1 mostra o circuito que realiza o comando de saída δ_{s1} e sua tabela da verdade.



I_{lo}	I_{ol}	V_i	V_{glo}	V_{gol}	V_{clo}	V_{col}	δ_{s1}
1	x	x	x	x	x	x	δ_{16}
x	1	x	x	x	x	x	δ_{16}
x	x	0	1	0	1	0	δ_{16}
x	x	0	0	1	0	1	δ_{16}
0	0	1	x	x	x	x	δ_1
0	0	0	0	0	1	0	δ_2
0	0	0	0	0	0	1	δ_2
0	0	0	0	0	0	0	0 Hz

Figura 7.1.5.2.1 - Circuito para comandos de saída δ_{s1} e A_t .

7.1.5.3 - SELEÇÃO DA TENSÃO DE ALIMENTAÇÃO DO MOTOR

A_t - o comando de saída A_t , para a seleção da tensão de alimentação do motor do movimento leste-oeste, deve ter nível lógico "1" quando a frequência f_{Δ_1} for igual a f_{16} e nível lógico "0" nos outros casos.

O comando A_t pode ser o mesmo que comanda a seleção de f_{16} , como na figura 7.1.5.2.1.

7.1.6 - IMPLEMENTAÇÃO DA LÓGICA PARA O MOVIMENTO NORTE-SUL

O movimento na direção norte-sul é muito lento em relação ao movimento no sentido leste-oeste. Durante um dia deverão ser dados poucos pulsos de correção, pois o conjunto mecânico de redução de velocidade da direção norte-sul deve ser, por questões de simplicidade, igual ao do sentido leste-oeste.

Nos dias de maior variação da declinação solar, esta é de 0,4 grau. A correção do heliostato deve ser de 0,2 grau, portanto nestes dias a quantidade de pulsos para o movimento do motor na direção norte-sul deverá ser de:

$$Q_p = \frac{0,2}{15} \times 50.000 = 666 \text{ pulsos}$$

Neste cálculo da quantidade de pulsos foi considerado que a redução mecânica de velocidade é de 50.000 e que o passo do motor é de 15 graus.

Como essa quantidade de pulsos é muito pequena, não é interessante que o motor fique consumindo energia durante o dia todo; dessa maneira ele só será energizado quando tiver que fazer

correções.

O sistema mecânico de transmissão de deslocamento de posição angular leva um determinado tempo para responder a estímulos. Se o motor for desenergizado antes desse tempo, haverá um retorno do eixo do motor. Por isso, para correções pequenas de posição na direção norte-sul, os pulsos de comando devem vir de um monoestável cuja largura de pulso deve ser maior ou igual ao tempo de resposta do sistema mecânico.

7.1.6.1 - SELEÇÃO DO SENTIDO DE ROTAÇÃO DO MOTOR

u/D_2 - para a seleção do sentido de rotação do motor do movimento norte-sul deve-se considerar o seguinte:

- 1 - $u/D_2 = "1"$ se $I_{ns} = "1"$ ou
se $V_{cns} = "0"$ e $I_{sn} = "0"$;
- 2 - $u/D_2 = "0"$ se $I_{sn} = "1"$ ou
se $V_{cns} = "1"$ e $I_{ns} = "0"$.

Leva-se em conta aqui que em nenhum caso V_{cns} e V_{cns} podem ter níveis lógicos altos ao mesmo tempo, assim como que I_{ns} e I_{sn} não devem ter níveis lógicos altos simultaneamente, pois são comandos externos manuais, para movimentos rápidos do motor, com sentidos contrários.

A figura 7.1.6.1.1 mostra o circuito que realiza o comando de saída u/D_2 e sua tabela de estados.

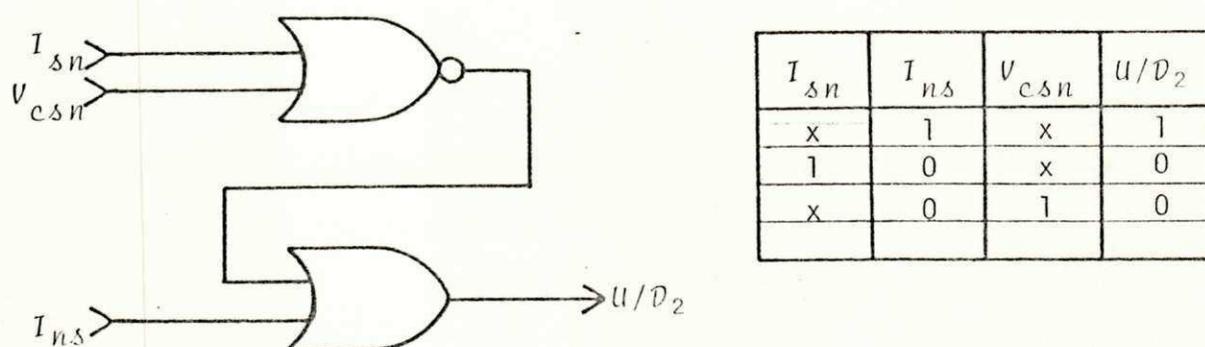


Figura 7.1.6.1.1 - Circuito para o comando de saída U/D_2

7.1.6.2 - SELEÇÃO DA FREQUÊNCIA DE COMANDO PARA O MOTOR

$\delta_{\Delta 2}$ - como o deslocamento angular na direção norte-sul é muito menor do que no sentido leste-oeste, a frequência dos pulsos de correção rápida para aquela direção será . Quando o erro for pequeno, deverão haver pulsos de correção cujos períodos devem ser maiores ou iguais ao tempo de resposta do sistema mecânico, os quais se conseguem com o uso de um monoestável.

As considerações a serem feitas são as seguintes:

- 1 - existirão as entradas $\delta_2 = 14$ Hz e pulsos de períodos determinados e ajustáveis sempre que houver um erro pequeno;
- 2 - $\delta_{\Delta 2} = \delta_2$ se $I_{ns} + I_{\Delta n} = "1"$ ou
se $(V_{gns} + V_{g\Delta n}) \overline{V_i} = "1"$;
- 3 - $\delta_{\Delta 2}$ = pulsos de período maior ou igual ao tempo de resposta do sistema mecânico se:

$$(V_{cns} + V_{c\Delta n}) \overline{V_i} \overline{I_{ns}} \overline{I_{\Delta n}} \overline{V_{gns}} \overline{V_{g\Delta n}} = "1";$$

4 - $\delta_{s2} = 0$ Hz se $V_i \overline{I_{ns}} \overline{I_{sn}} = "1"$ ou

se $V_{cns} + V_{csn} + I_{ns} + I_{sn} = "0"$.

O circuito que realiza o comando δ_{s2} está representado na figura 7.1.6.2.1.

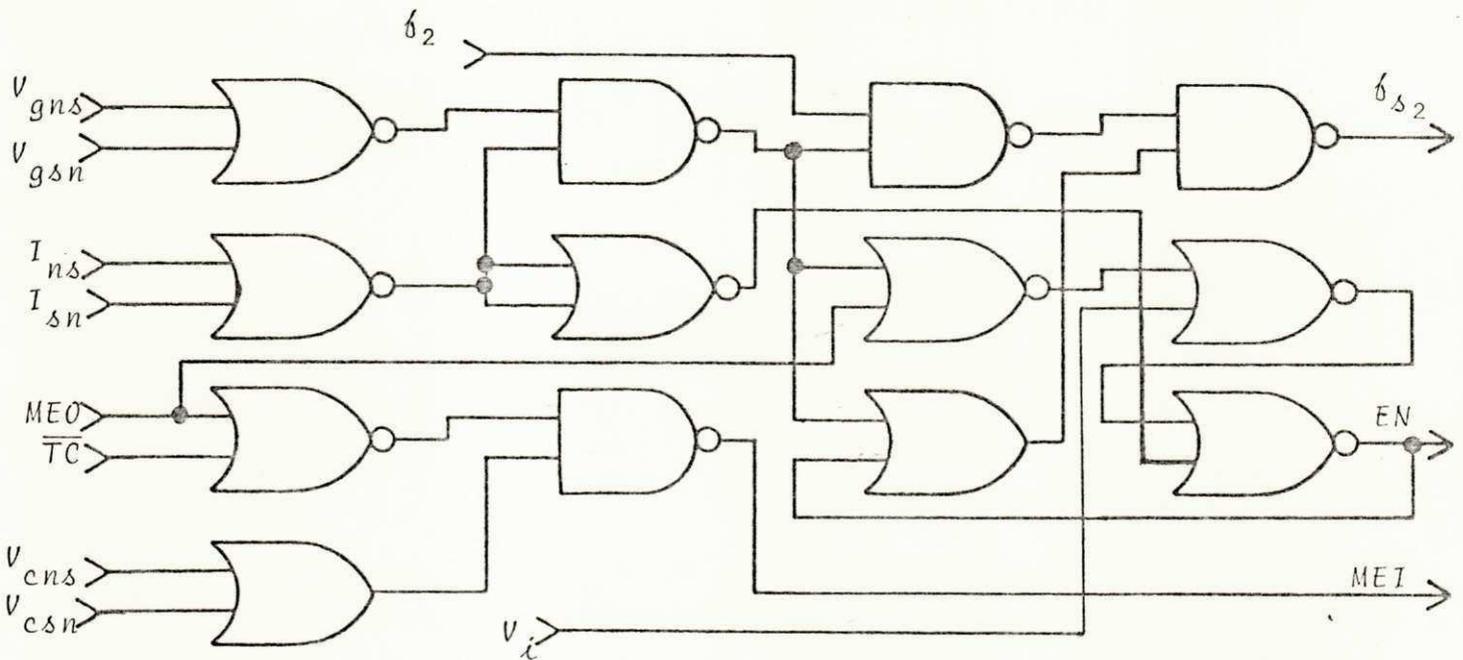


Figura 7.1.6.2.1 - Circuito para os comandos de saída δ_{s2} e EN

7.1.6.3 - COMANDO DE DESENERGIZAÇÃO DO MOTOR.

EN - na maior parte do tempo, o motor do movimento norte-sul deve ficar parado. Para consumir menos energia, é importante que ele seja desenergizado quando não houver movimento e não houver pulsos na saída do monoestável. As considerações são as seguintes:

1 - EN = "1" se $V_i \overline{I_{ns}} \overline{I_{sn}} = "1"$ ou

se $V_{cns} + V_{csn} + I_{ns} + I_{sn} + MEO = "0"$;

2 - EN = "0" se $(MEO + V_{csn} + V_{cns}) \overline{V_i} + I_{ns} + I_{sn} = "1"$.

O circuito que realiza o comando EN está representado na figura 7.1.6.2.1.

7.2 - MULTIVIBRADORES E DIVISOR DE FREQUÊNCIA

No item anterior foi vista a necessidade de geração de frequências de 112 Hz, 14 Hz e 7 Hz, assim como a de se gerar em pulsos em um monoestável. A geração destas frequências e dos pulsos é mostrada neste item.

7.2.1 - MULTIVIBRADOR ASTÁVEL E DIVISOR DE FREQUÊNCIA

A obtenção das frequências citadas é feita com um multivibrador que usa um circuito integrado 555, cuja frequência pode ser ajustada em torno de 112 Hz e um divisor binário de 4 bits que dará as frequências de 14 Hz e 7 Hz. O circuito está representado na figura 7.2.1.1.

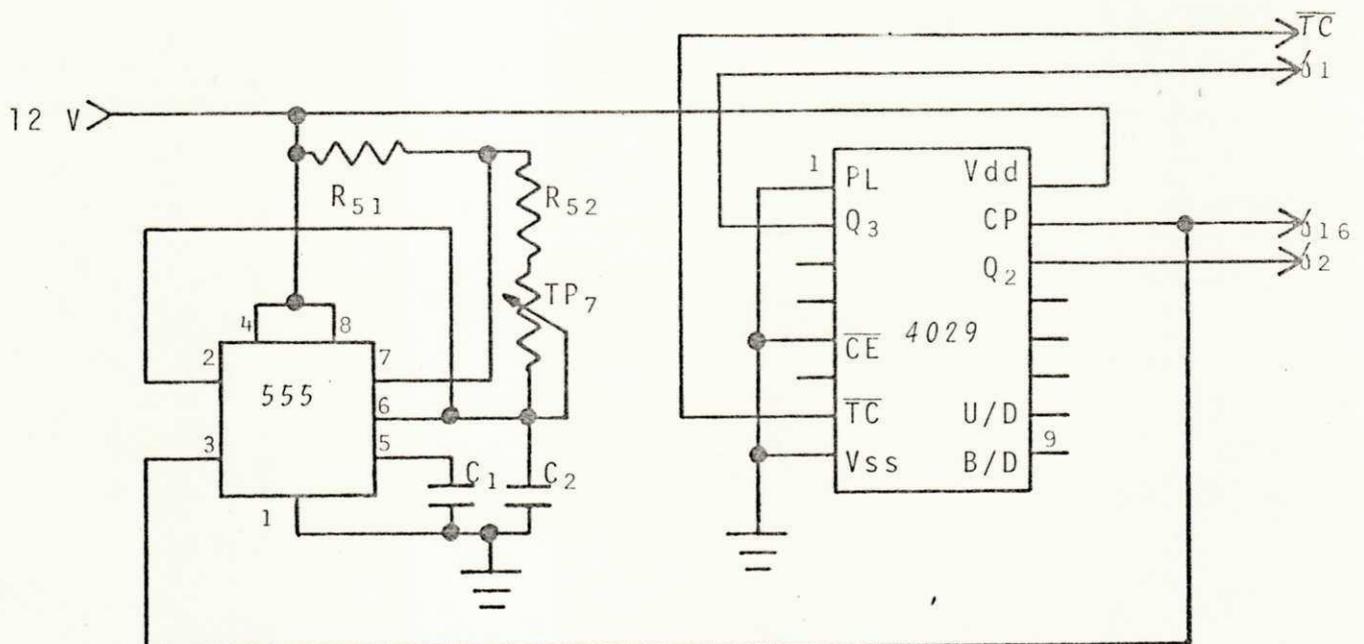


Figura 7.2.1.1 - Multivibrador astável e divisor de frequência

7.2.2 - GERAÇÃO DE PULSOS

A geração de pulsos será feita com um multivibrador monoestável, usando um 555, como está representado na figura 7.2.2.1.

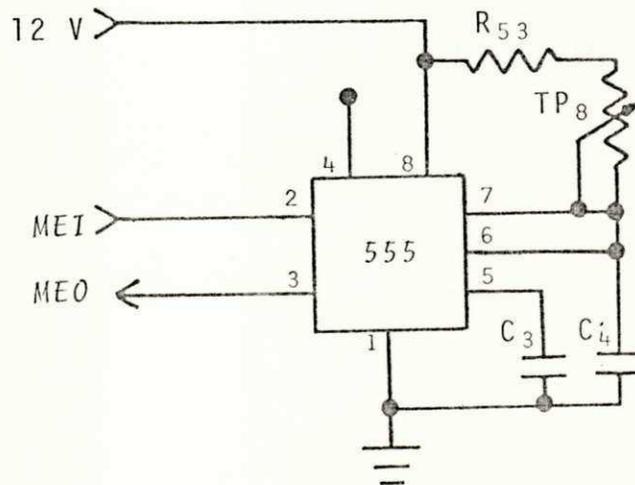


Figura 7.2.2.1 - Monoestável

A largura do pulso do monoestável deve ser igual ou maior que o tempo de resposta do sistema mecânico. Para o heliostato utilizado, verificou-se experimentalmente que 5 segundos é uma largura de pulso suficiente para o bom funcionamento do sistema.

Os desenhos dos circuitos apresentados neste item estão na figura 9.2.1.3.

7.3 - COMANDOS EXTERNOS

Chama-se aqui de comandos externos, a todos os comandos feitos por chaves mecânicas liga-desliga ou de pressão.

7.3.1 - ACIONAMENTO, RETORNO E DESENERGIZAÇÃO

Estes comandos estão representados nas figuras 9.2.1.4 e

9.2.1.5.

No início do dia, um operador deverá acionar um comando de energização do sistema, mediante uma chave de pressão, ao ser premida a chave, um flip-flop será atuado mantendo o circuito energizado. Este comando poderá ser remoto.

Ao fim do dia, o espelho deverá acionar uma chave de pressão que o fará retornar à sua posição inicial, numa velocidade rápida (116 , ou 277 rpm). Este comando também funcionará como uma chave eletrônica para o comando a ser analisado a seguir:

Após o retorno, o próprio deslocamento do espelho fará acionar uma chave de pressão, que desenergizará os circuitos, desligando o sistema. Este comando só será acionado, se antes o tiver sido o comando de retorno e uma vez acionado, mesmo que a chave de pressão permaneça ligada, pode-se acionar novamente o comando de energização.

Para evitar danos no sistema mecânico, caso uma das chaves de retorno ou desligamento não funcione, devem-se colocar chaves de pressão, normalmente fechadas, pelas quais passará a alimentação, a uma altura um pouco menor do que a das chaves de retorno e desligamento como mostrado na figura 7.3.1.1.

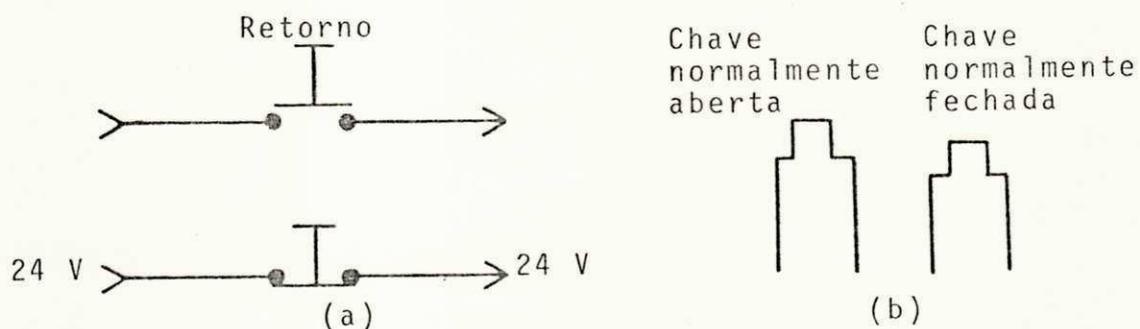


Figura 7.3.1.1 - Chaves de comandos: a - representação esquemática, b - altura relativa

O esquema desses comandos está representado na figura 7.3.1.2.

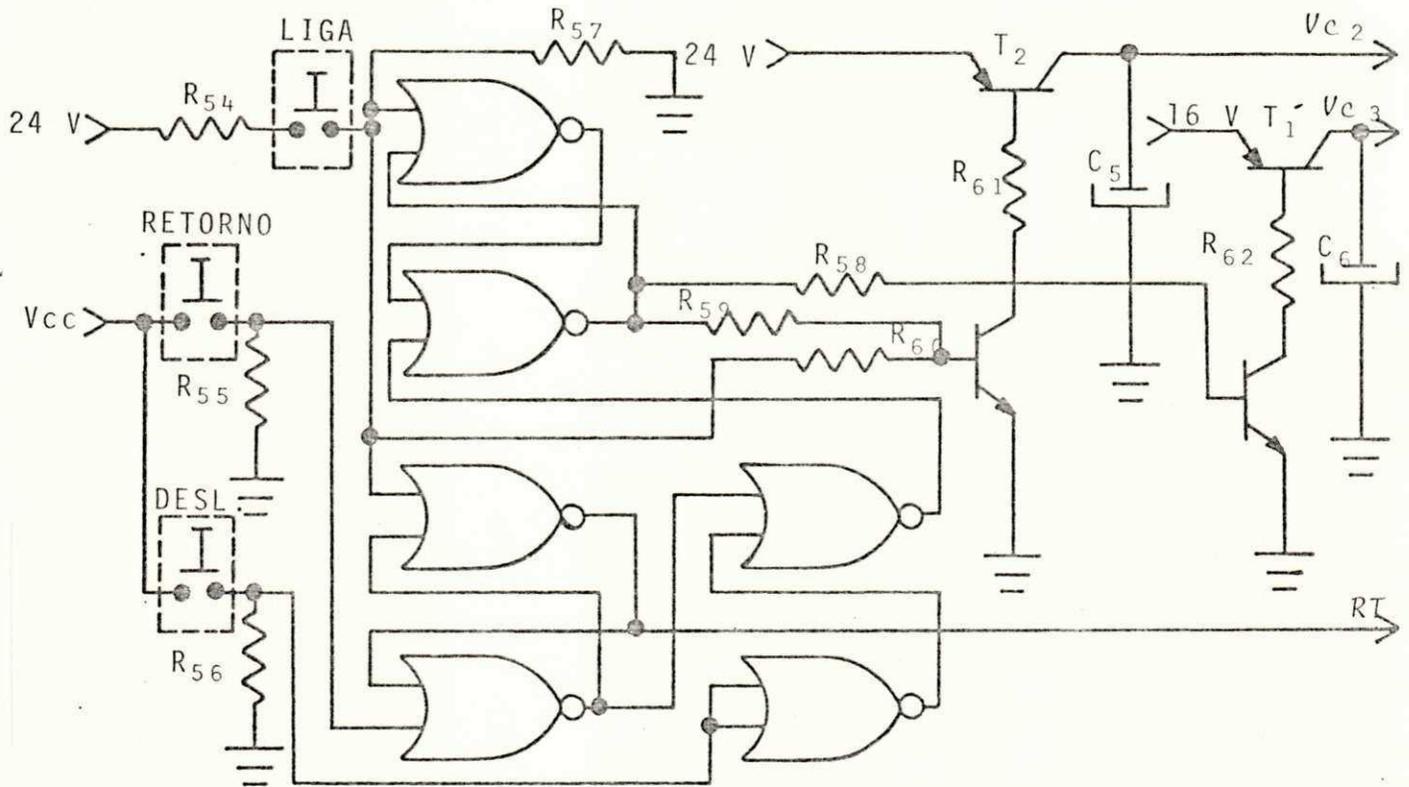


Figura 7.3.1.2 - Comandos de energização, retorno e desligamento automático do sistema

7.3.2 - VELOCIDADES RÁPIDAS PARA OS MOTORES

Estes comandos estão representados na figura 9.2.1.4.

Pode ser necessário que, independentemente da posição do sol, queira-se fazer um movimento no espelho num determinado sentido e direção. Este comando pode ser remoto e deverá ser feito com chaves liga-desliga. A lógica para acionamento do motor já foi vista em capítulo anterior.

O comando RT da figura 7.3.2.1 é o comando de retorno; de-

pois que a chave de retorno \bar{e} é acionada, este deverá acionar I_{ol} . Os comandos I_{lo} , I_{ol} , I_{ns} e I_{sn} estão representados na figura 7.3.2.1.

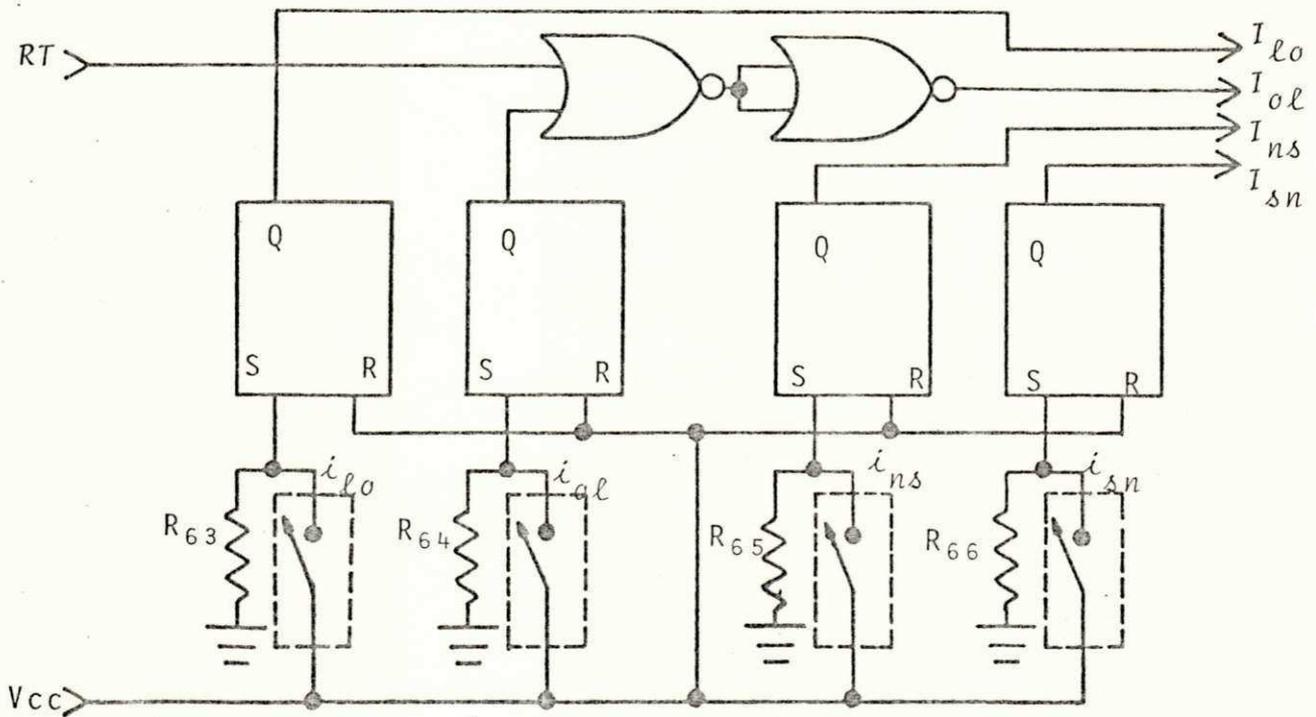


Figura 7.3.2.1 - Comandos para velocidades rāpidas

7.4 - COMANDOS DOS MOTORES

Os motores passo a passo usados nos dois movimentos, têm 4 fases e cada uma deve ser acionada de cada vez. Como se dispõe da frequência de pulsos para o motor, deve-se fazer um contador em anel para o acionamento das fases do motor. Este contador em anel pode ser feito com um divisor binário do tipo 4029 e um demultiplexador do tipo 4051.

Os circuitos estão na figura 9.2.1.3.

7. 4.1 - MOVIMENTO LESTE-OESTE

O motor do movimento leste-oeste estará sempre energizado. Como entrada para os circuitos de comandos do motor deste movimento deve-se ter os comandos δ_{Δ_1} e U/D_1 . O esquema está representado na figura 7.4.1.1.

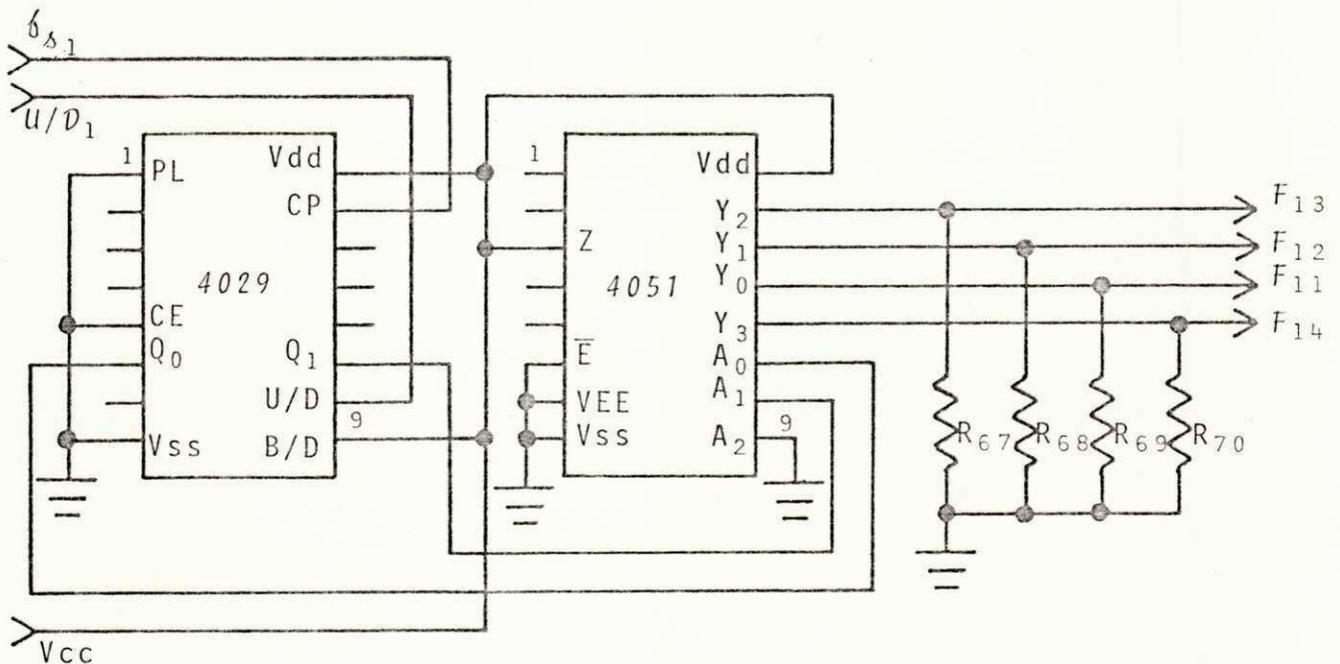


Figura 7.4.1.1 - Contador em anel

7.4.2 - MOVIMENTO NORTE-SUL

O motor do movimento norte-sul deverá ser desenergizado quando $EN = "1"$; neste caso nenhuma das fases do motor estará acionada. Como entrada para os circuitos de comando do motor deste movimento, tem-se, além de EN , δ_{Δ_2} e U/D_2 . O esquema está mostrado na figura 7.4.2.1.

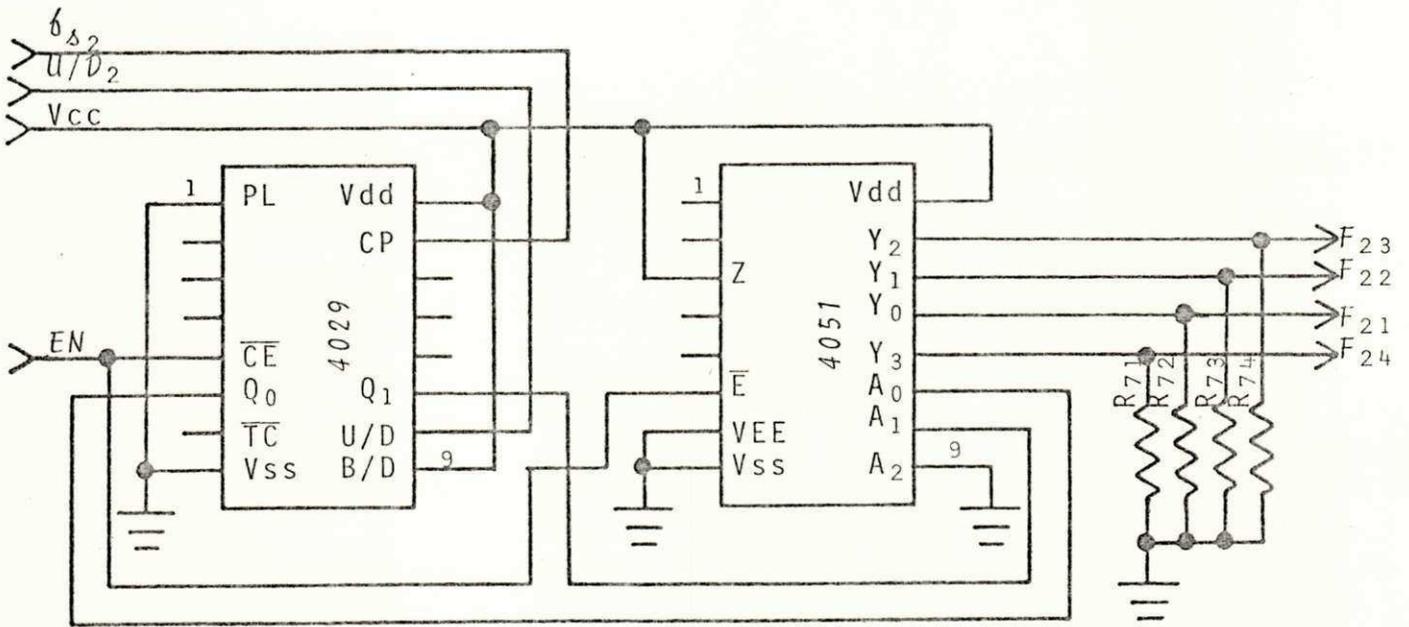


Figura 7.4.2.1 - Contador em anel com inibição de contagem

CAPÍTULO VIII

ESTÁGIO DE POTÊNCIA

Os circuitos apresentados neste capítulo são mostrados nas figuras 9.2.1.6, 9.2.1.7 e 9.2.1.8.

8.1 - ESTÁGIOS DE POTÊNCIA DOS MOTORES

Usar estágio de potência faz-se necessário para o acionamento de cada motor; estes precisam de uma corrente em torno de 0,9 ampère, em sua potência máxima.

A maneira como são acionados os motores está ilustrada na figura 8.1.1.

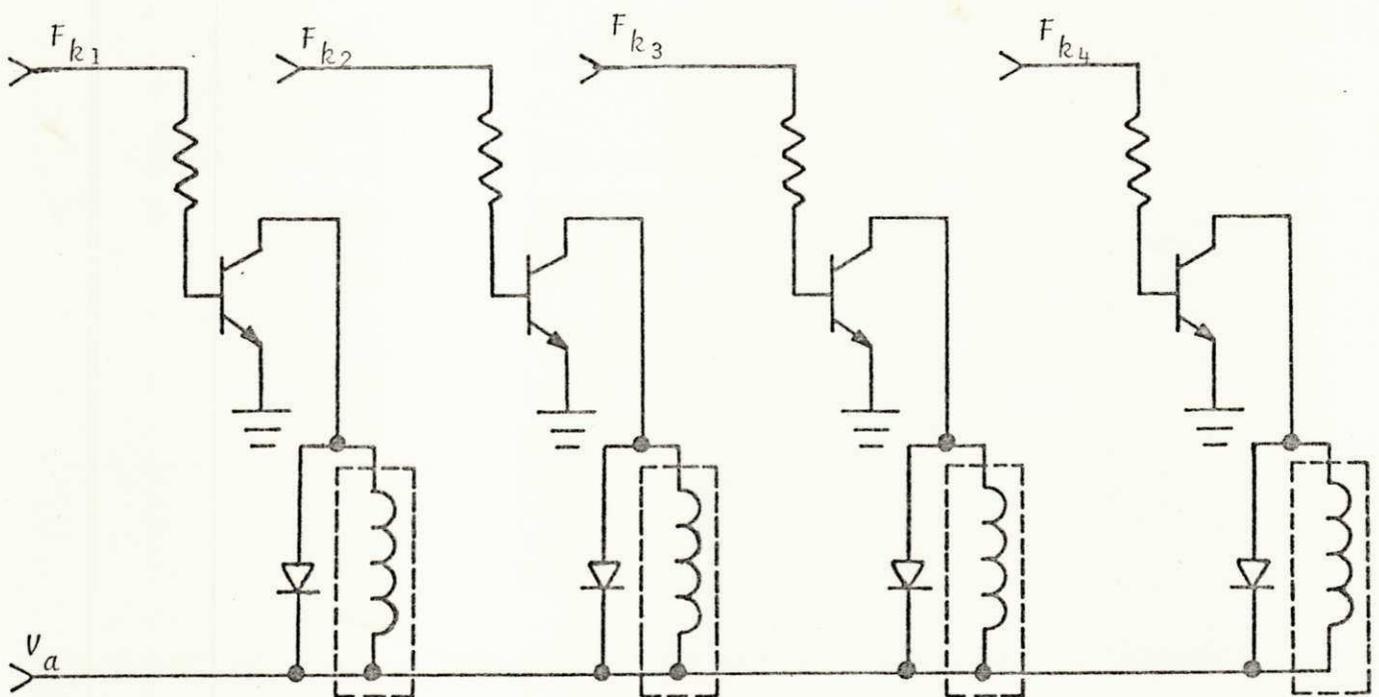


Figura 8.1.1 - Acionamento dos motores

Para o movimento na direção norte-sul, pode-se alimentar o motor com uma tensão baixa para que haja um menor consumo; essa tensão pode ser V_{c3} , que é de 15,2 V, sendo, portanto, a alimentação do motor do movimento norte-sul, feita como na figura 8.1.1, com $V_a = 15,2 \text{ V} = V_{c3}$.

Ao motor do movimento leste-oeste em determinados momentos deve ser fornecida potência máxima (quando está com velocidade alta), no entanto é importante que em velocidades baixas o consumo do motor seja baixo.

O consumo de potência pode ser controlado pelo nível de A_t (visto no capítulo VII) com o circuito da figura 8.1.2.

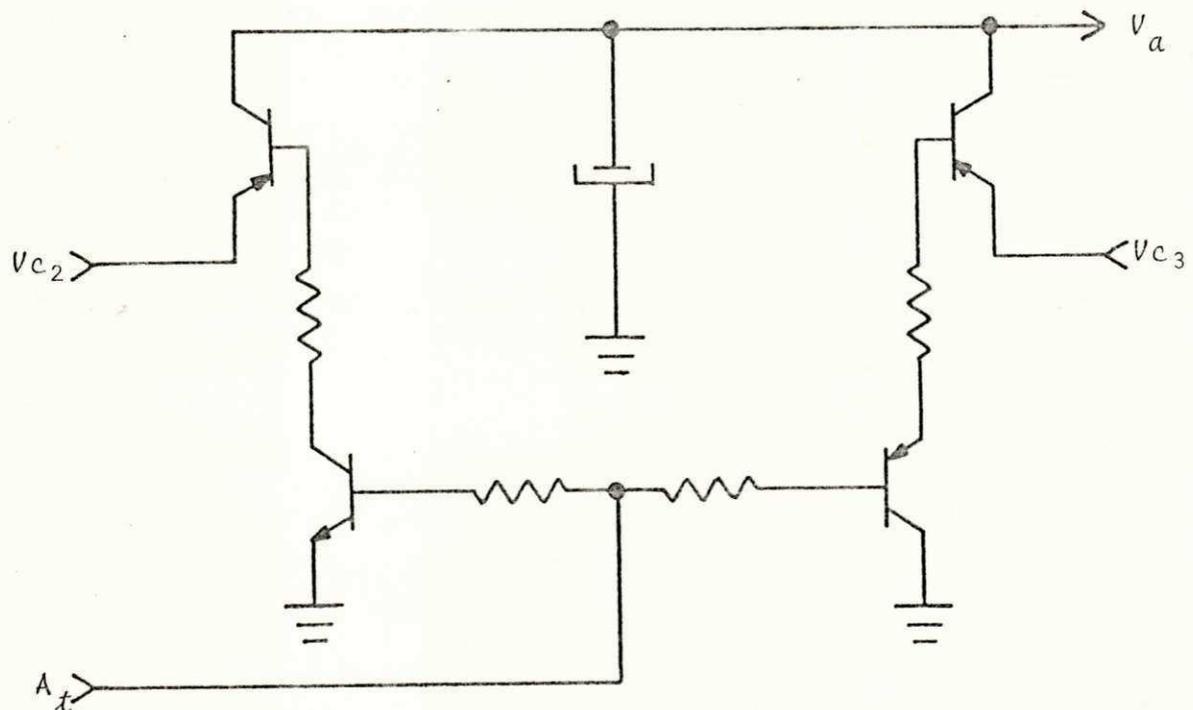


Figura 8.1.2 - Seleção da tensão de alimentação do motor do movimento leste-oeste

Quando Λ_x estiver alto o valor de V_a será de aproximadamente 22,4 volts e quando estiver baixo, de 14,4 volts.

8.2 - REGULADOR PARA ALIMENTAÇÃO DOS CIRCUITOS INTEGRADOS

Em todas as unidades que tenham circuitos integrados deverão haver um regulador para 12 volts como o da figura 8.2.1.

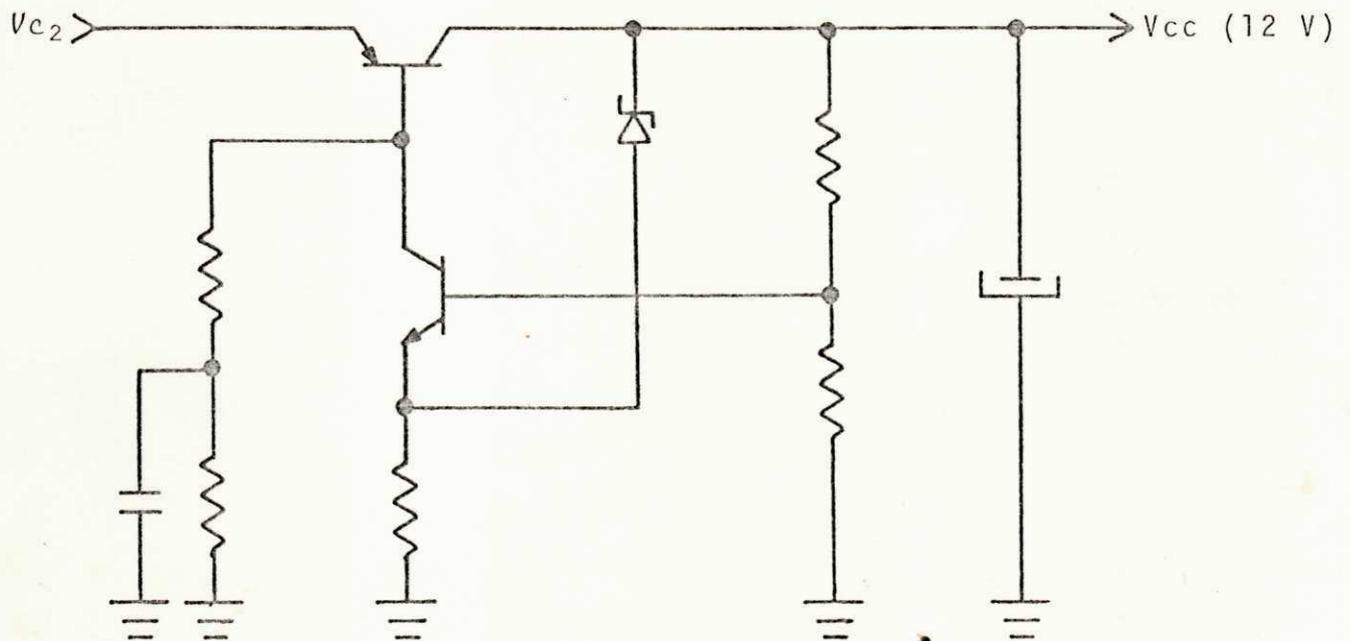


Figura 8.2.1 - Regulador de tensão

CAPÍTULO IX

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho completa-se com a análise da montagem e dos ajustes do controle automático do heliostato solar.

9.1 - LED's PILOTOS

As informações de velocidade e sentido de rotação dos motores, assim como de baixa luminosidade, são dadas por LED's, cuja ligação é feita como na figura 9.1.1.

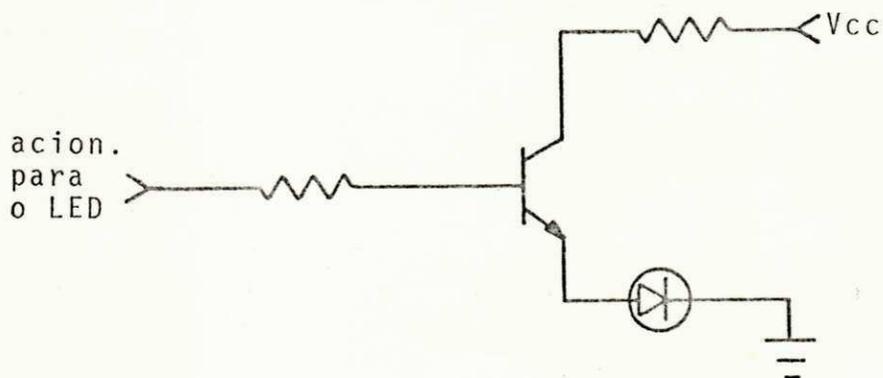


Figura 9.1.1 - Circuito de alimentação para os LED's

Esse circuito é mostrado também com os demais das unidades de que fazem parte nas figuras 9.2.1.1 e 9.2.1.2.

Para o movimento norte-sul deve haver um LED piloto para o sentido de rotação, um para a velocidade ω_2 e um para a frequência de pulso.

Para o movimento leste-oeste deve haver um LED piloto para

o sentido de rotação, um para a velocidade δ_{16} , um para δ_2 e outro para δ_1 .

Além desses, deve haver também LED's pilotos indicadores de baixa luminosidade e de energização.

9.2 - MONTAGEM

Os circuitos analisados nos capítulos anteriores foram montados em unidades e acondicionados em caixa de alumínio de dimensão 13,5 cm X 26,5 cm X 44 cm.

9.2.1 - SEPARAÇÃO EM UNIDADES ELETRÔNICAS

Para a separação em unidades eletrônicas, foram levados em consideração os seguintes critérios: se a informação processada era analógica e se era de baixa ou alta potência; foi considerado também o número de interconexões de cada unidade, pois o conector utilizado era de 18 pinos.

As unidades foram montadas em placas de fenolite de tamanho 23 cm X 10,5 cm e em número de 7, e constituem:

Unidade 1 - circuito analógico, mostrado nas figuras 9.2.1.1.a e 9.2.1.1.b;

Unidade 2 - circuito lógico, na figura 9.2.1.2;

Unidade 3 - comando dos motores, na figura 9.2.1.3;

Unidade 4 - comandos externos, na figura 9.2.1.4;

Unidade 5 - energização, na figura 9.2.1.5;

Unidade 6 - estágio de potência para o movimento norte-sul, na figura 9.2.1.6;

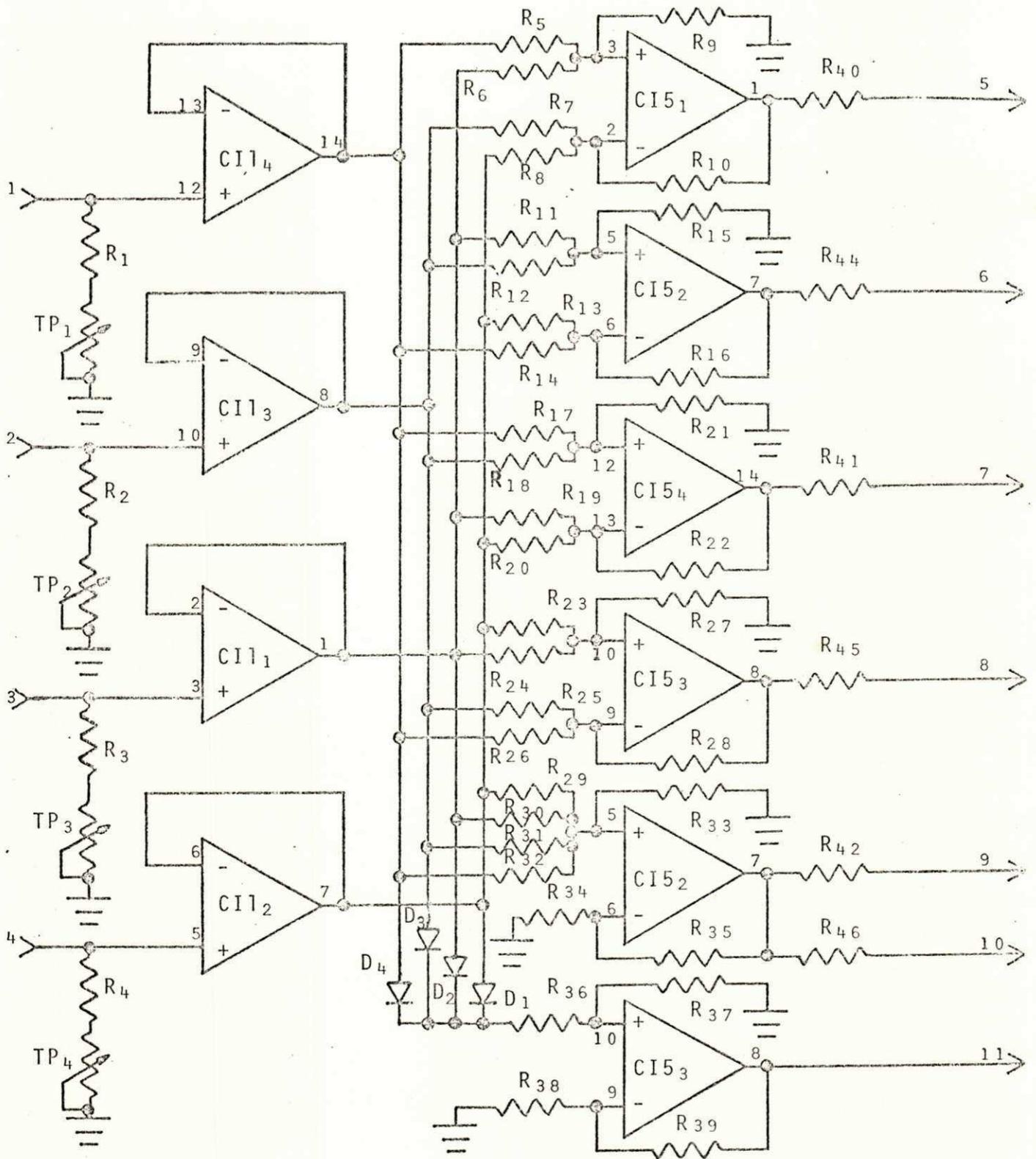


Figura 9.2.1.1.a - Circuito analógico

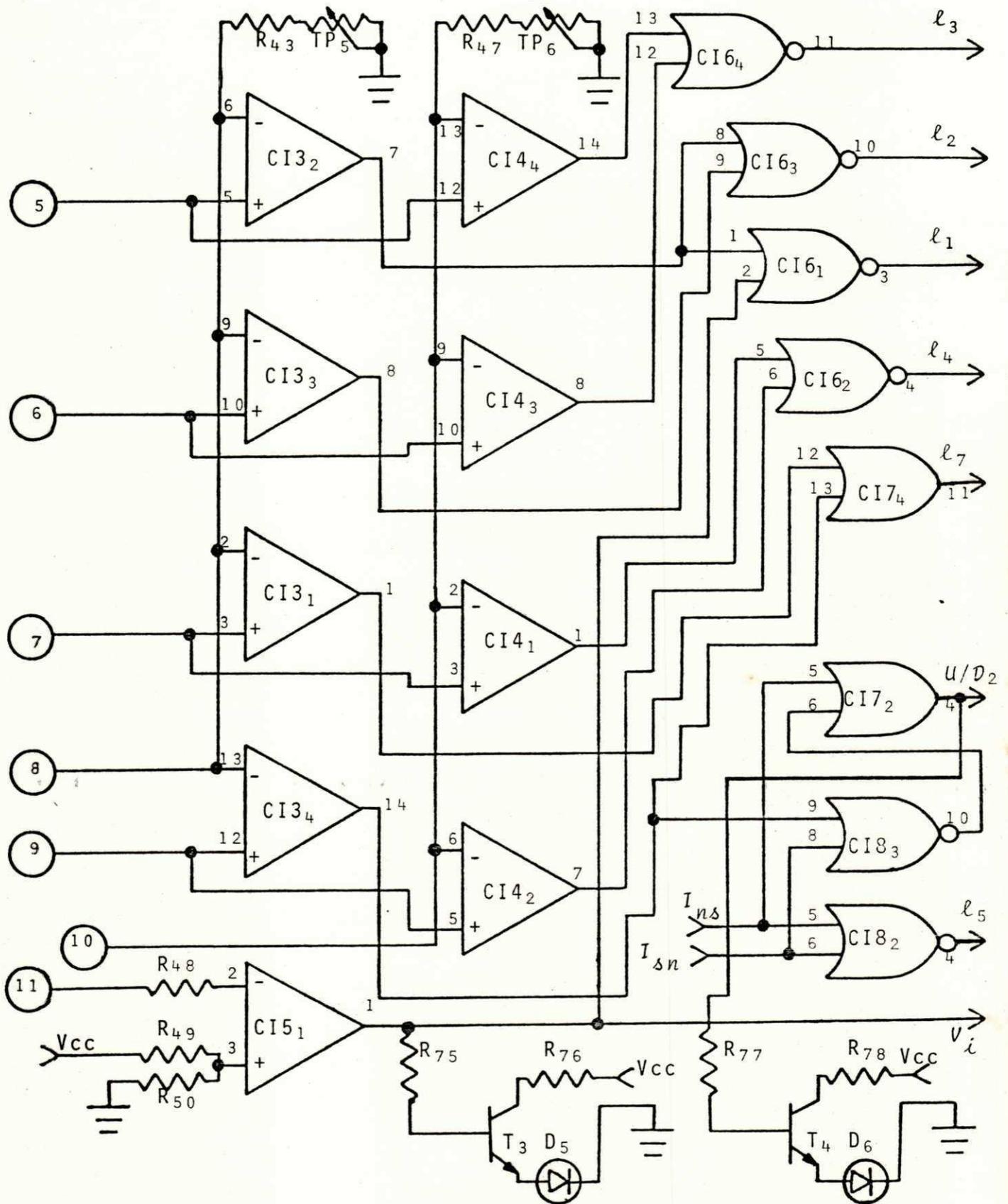


Figura 9.2.1.1.b - Circuito analógico

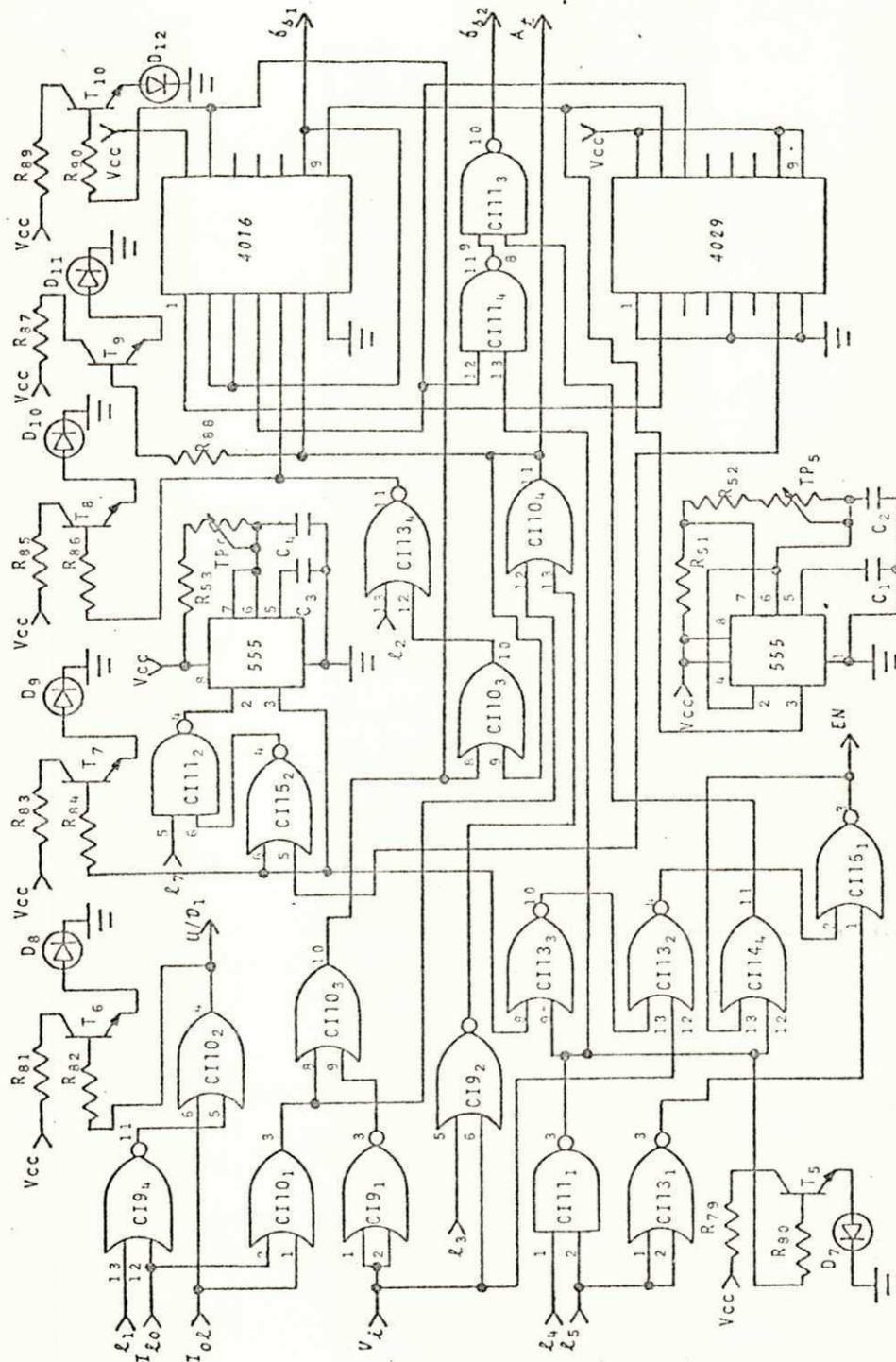


Figura 9.2.1.2 - Circuito lógico

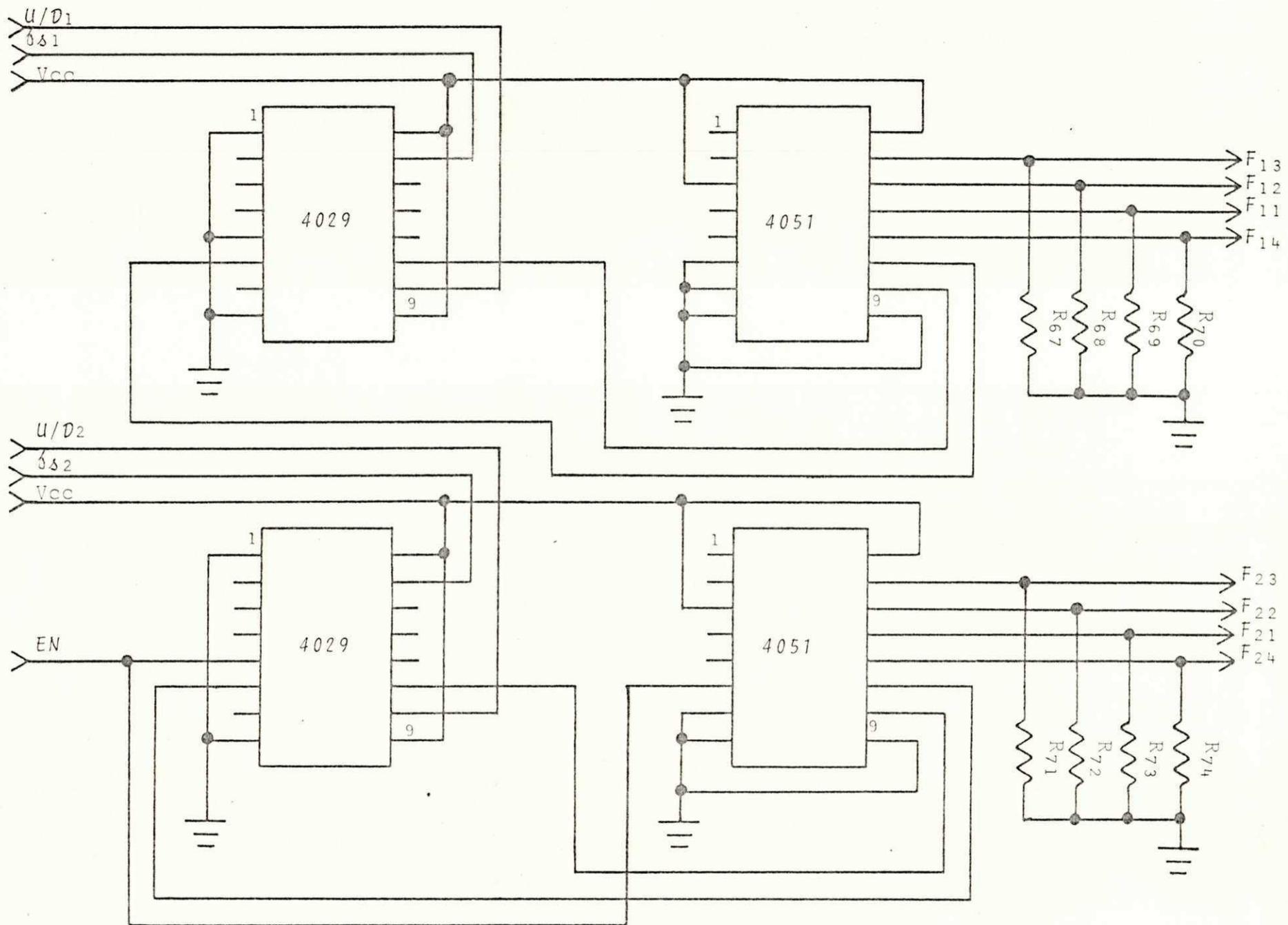


Figura 9.2.1.3 - Comando dos motores

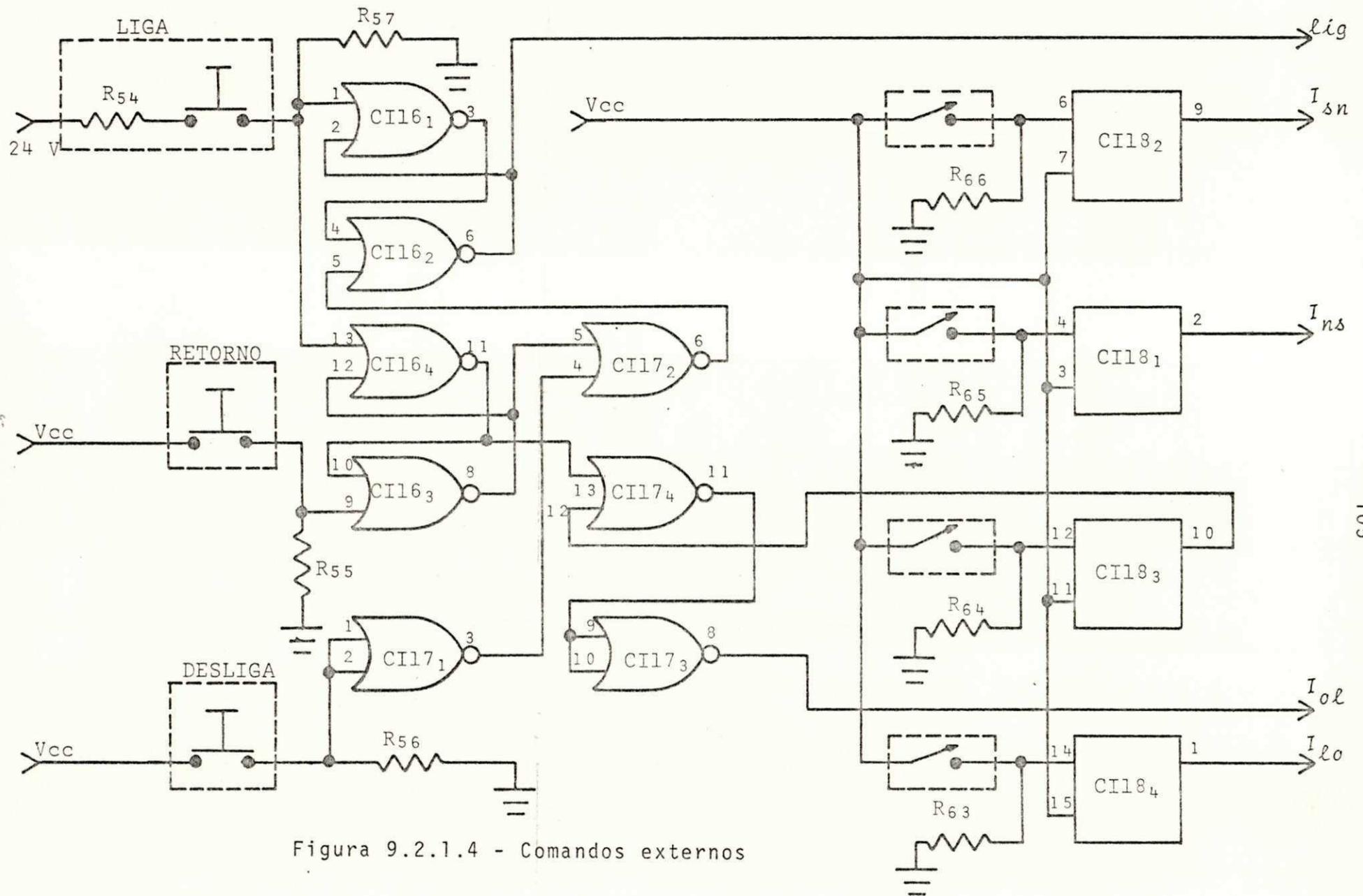


Figura 9.2.1.4 - Comandos externos

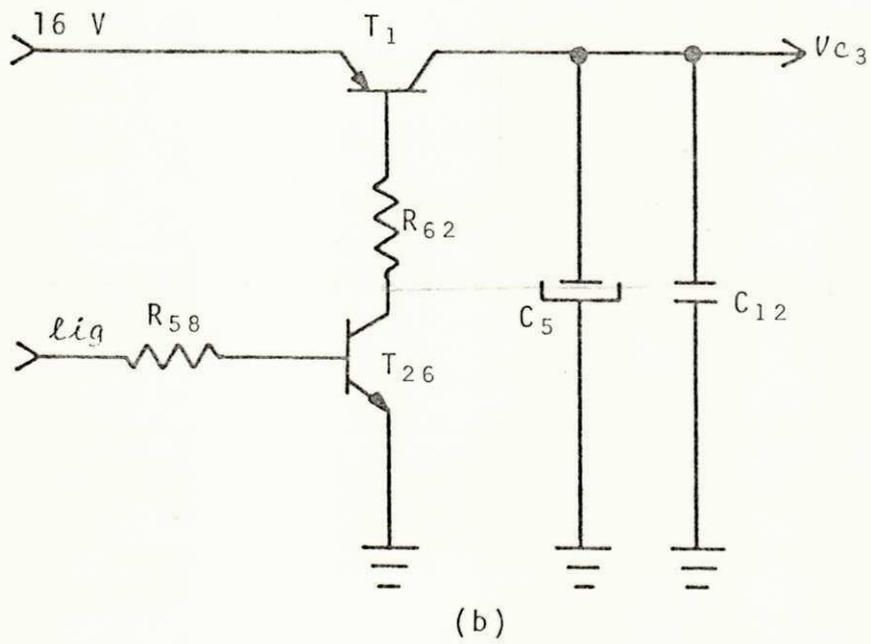
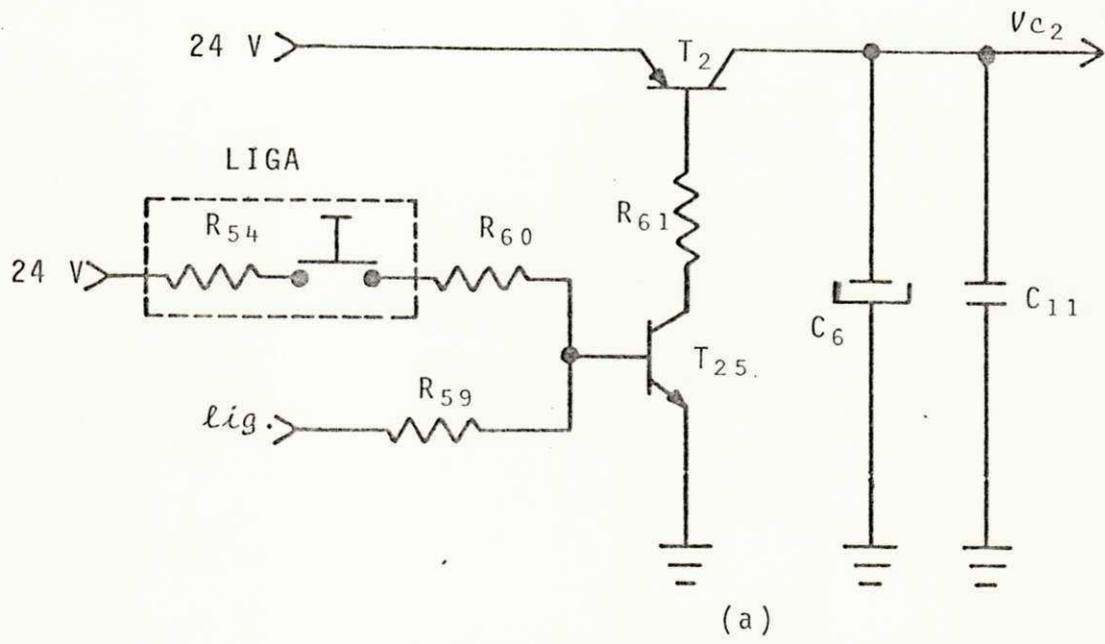


Figura 9.2.1.5 - Energização: a - 24 V, b - 16 V

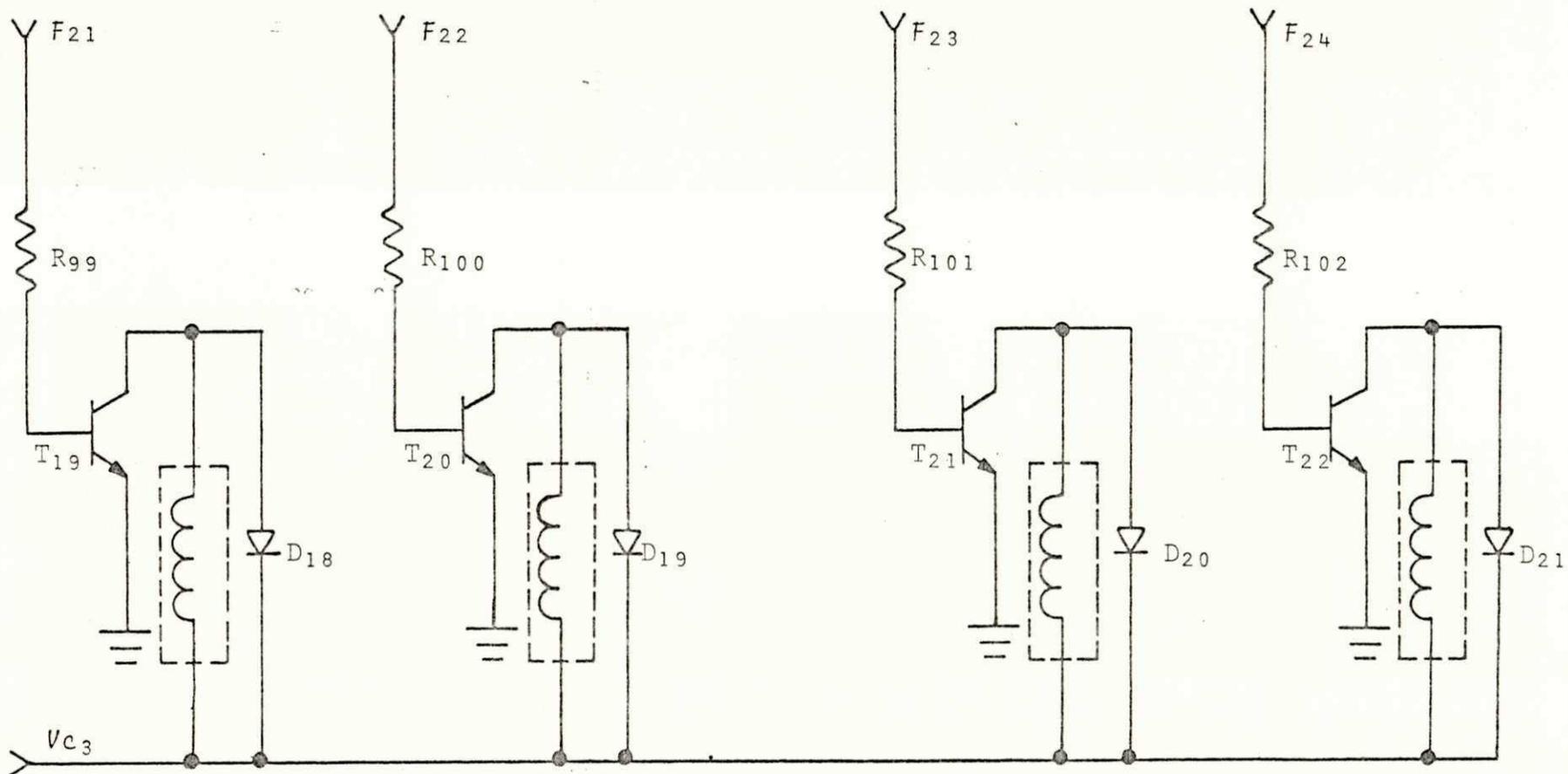


Figura 9.2.1.6 - Estãgio de potênciã para o movimento norte-sul

Unidade 7 - estágio de potência para o movimento leste-oeste, na figura 9.2.1.7.

9.2.2 - CONECTORES

Na figura 9.2.2.1 mostram-se fotografias do protótipo montado. Na foto de sua parte traseira, aparecem conectores que estão desenhados com destaque na figura 9.2.2.2.

9.3 - AJUSTES

Depois de montado o controle, devem ser feitos os seguintes ajustes:

9.3.1 - POSIÇÃO DO SENSOR DE DIREÇÃO DE LUZ

Deve-se ajustar a posição do sensor de direção de luz, de modo que quando houver variação da posição do espelho em uma direção, a sombra sobre os fotodiodos varie também apenas em uma direção.

9.3.2 - SENSIBILIDADE DOS FOTODIODOS

Deve-se ajustar os trimpots TP₁, TP₂, TP₃ e TP₄ para que quando os fotodiodos estiverem recebendo uma irradiação de 100 mW/cm², a tensão nas suas bases seja de 8 volts.

9.3.3 - SENSIBILIDADE DO SENSOR DE DIREÇÃO DE LUZ

O ajuste da sensibilidade do sensor de direção de luz se faz pelas tensões de referências dos comparadores de erro.

Para os comparadores do primeiro erro padrão, deve-se

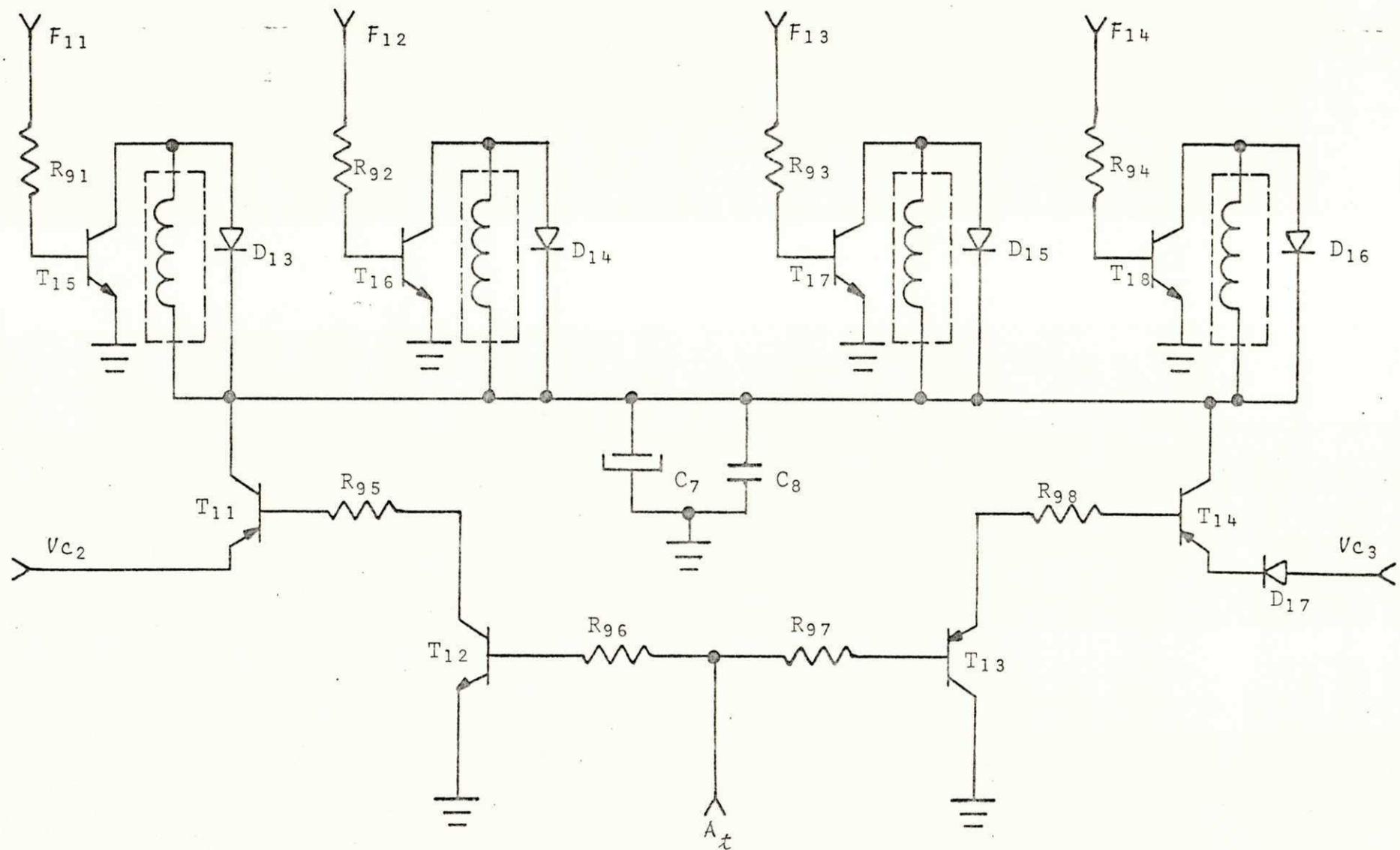


Figura 9.2.1.7 - Estágio de potência para o movimento leste-oeste

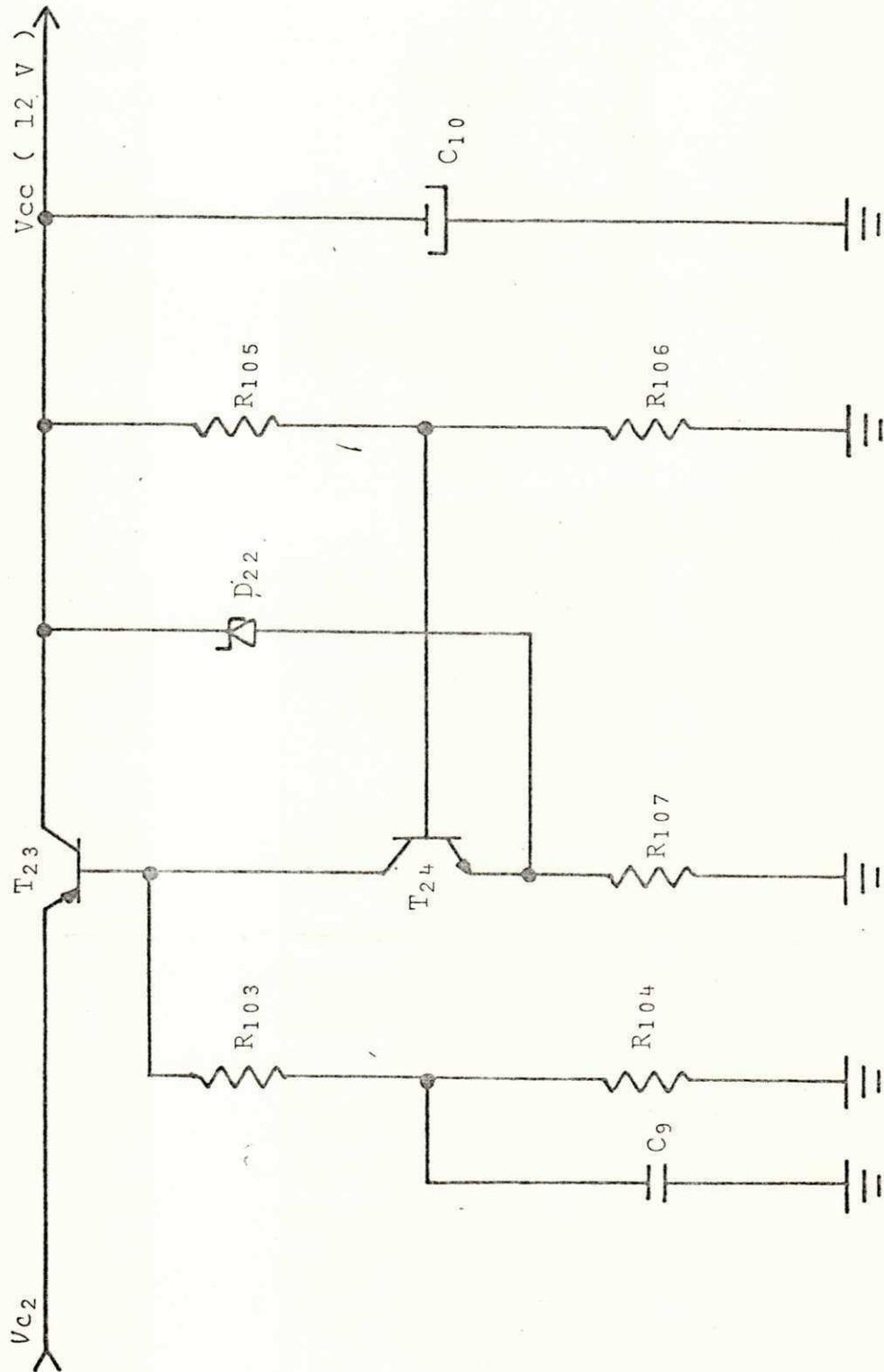


Figura 9.2.1.8 - Regulador de tensão

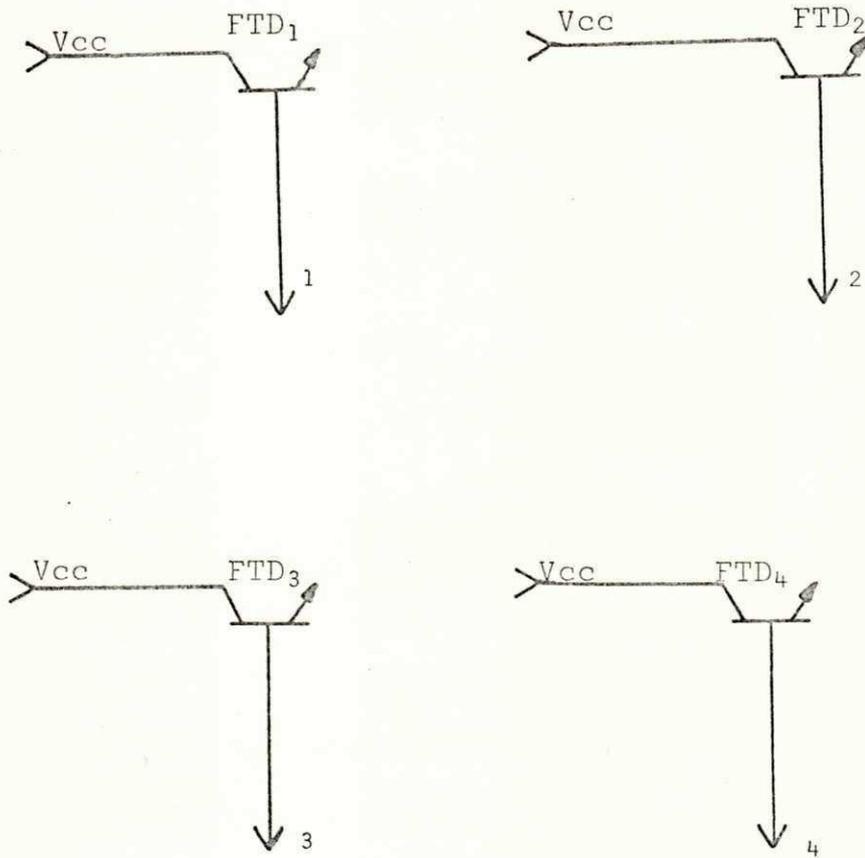


Figura 9.2.1.9 - Fotodiodos

Figura 9.2.1.10 - Relação dos componentes utilizados

RESISTORES

R ₁	= 4,7 KΩ	R ₂₅	= 100 KΩ	R ₄₉	= 150 KΩ	R ₇₃	= 15 KΩ
R ₂	= 4,7 KΩ	R ₂₆	= 100 KΩ	R ₅₀	= 39 KΩ	R ₇₄	= 15 KΩ
R ₃	= 4,7 KΩ	R ₂₇	= 100 KΩ	R ₅₁	= 22 KΩ	R ₇₅	= 47 KΩ
R ₄	= 4,7 KΩ	R ₂₈	= 100 KΩ	R ₅₂	= 47 KΩ	R ₇₆	= 6,8 KΩ
R ₅	= 100 KΩ	R ₂₉	= 100 KΩ	R ₅₃	= 47 KΩ	R ₇₇	= 47 KΩ
R ₆	= 100 KΩ	R ₃₀	= 100 KΩ	R ₅₄	= 4,7 KΩ	R ₇₈	= 6,8 KΩ
R ₇	= 100 KΩ	R ₃₁	= 100 KΩ	R ₅₅	= 4,7 KΩ	R ₇₉	= 47 KΩ
R ₈	= 100 KΩ	R ₃₂	= 100 KΩ	R ₅₆	= 4,7 KΩ	R ₈₀	= 6,8 KΩ
R ₉	= 100 KΩ	R ₃₃	= 100 KΩ	R ₅₇	= 4,7 KΩ	R ₈₁	= 47 KΩ
R ₁₀	= 100 KΩ	R ₃₄	= 100 KΩ	R ₅₈	= 100 KΩ	R ₈₂	= 6,8 KΩ
R ₁₁	= 100 KΩ	R ₃₅	= 27 KΩ	R ₅₉	= 100 KΩ	R ₈₃	= 47 KΩ
R ₁₂	= 100 KΩ	R ₃₆	= 100 KΩ	R ₆₀	= 100 KΩ	R ₈₄	= 6,8 KΩ
R ₁₃	= 100 KΩ	R ₃₇	= 100 KΩ	R ₆₁	= 6,8 KΩ	R ₈₅	= 47 KΩ
R ₁₄	= 100 KΩ	R ₃₈	= 100 KΩ	R ₆₂	= 6,8 KΩ	R ₈₆	= 6,8 KΩ
R ₁₅	= 100 KΩ	R ₃₉	= 100 KΩ	R ₆₃	= 4,7 KΩ	R ₈₇	= 47 KΩ
R ₁₆	= 100 KΩ	R ₄₀	= 100 KΩ	R ₆₄	= 4,7 KΩ	R ₈₈	= 6,8 KΩ
R ₁₇	= 100 KΩ	R ₄₁	= 100 KΩ	R ₆₅	= 4,7 KΩ	R ₈₉	= 47 KΩ
R ₁₈	= 100 KΩ	R ₄₂	= 100 KΩ	R ₆₆	= 4,7 KΩ	R ₉₀	= 6,8 KΩ
R ₁₉	= 100 KΩ	R ₄₃	= 22 KΩ	R ₆₇	= 15 KΩ	R ₉₁	= 5,6 KΩ
R ₂₀	= 100 KΩ	R ₄₄	= 100 KΩ	R ₆₈	= 15 KΩ	R ₉₂	= 5,6 KΩ
R ₂₁	= 100 KΩ	R ₄₅	= 100 KΩ	R ₆₉	= 15 KΩ	R ₉₃	= 5,6 KΩ
R ₂₂	= 100 KΩ	R ₄₆	= 100 KΩ	R ₇₀	= 15 KΩ	R ₉₄	= 5,6 KΩ
R ₂₃	= 100 KΩ	R ₄₇	= 47 KΩ	R ₇₁	= 15 KΩ	R ₉₅	= 6,8 KΩ
R ₂₄	= 100 KΩ	R ₄₈	= 33 KΩ	R ₇₂	= 15 KΩ	R ₉₆	= 100 KΩ

Figura 9.2.1.10 - continuação

RESISTORES

R ₉₇ = 100 KΩ	R ₁₀₀ = 5,6 KΩ	R ₁₀₃ = 220 KΩ	R ₁₀₆ = 5,6 KΩ
R ₉₈ = 6,8 KΩ	R ₁₀₁ = 5,6 KΩ	R ₁₀₄ = 1 MΩ	R ₁₀₇ = 560 Ω
R ₉₉ = 5,6 KΩ	R ₁₀₂ = 5,6 KΩ	R ₁₀₅ = 6,8 KΩ	

CAPACITORES

C ₁ = 0,01 μF	C ₄ = 0,1 μF	C ₇ = 100 μF	C ₁₀ = 100 μF
C ₂ = 0,1 μF	C ₅ = 100 μF	C ₈ = 0,1 μF	C ₁₁ = 0,1 μF
C ₃ = 0,01 μF	C ₆ = 100 μF	C ₉ = 0,1 μF	C ₁₂ = 0,1 μF

TRANSISTORES

T ₁ - TIP127	T ₇ - BC547	T ₁₃ - BC557	T ₁₉ - TIP122
T ₂ - TIP127	T ₈ - BC547	T ₁₄ - TIP127	T ₂₀ - TIP122
T ₃ - BC547	T ₉ - BC547	T ₁₅ - TIP122	T ₂₁ - TIP122
T ₄ - BC547	T ₁₀ - BC547	T ₁₆ - TIP122	T ₂₂ - TIP122
T ₅ - BC547	T ₁₁ - TIP127	T ₁₇ - TIP122	T ₂₃ - TIP127
T ₆ - BC547	T ₁₂ - BC547	T ₁₈ - TIP122	T ₂₄ - BC547
	T ₂₅ - BC547	T ₂₆ - BC547	

DIODOS

D ₁ - 1N4148	D ₆ - LED	D ₁₁ - LED	D ₁₆ - 1N4002
D ₂ - 1N4148	D ₇ - LED	D ₁₂ - LED	D ₁₇ - 1N4002
D ₃ - 1N4148	D ₈ - LED	D ₁₃ - 1N4002	D ₁₈ - 1N4002
D ₄ - 1N4148	D ₉ - LED	D ₁₄ - 1N4002	D ₁₉ - 1N4002
D ₅ - LED	D ₁₀ - LED	D ₁₅ - 1N4002	D ₂₀ - 1N4002
	D ₂₁ - 1N4002	D ₂₂ - zener de 6,1 V.	

Figura 9.2.1.10 - continuação

CIRCUITOS INTEGRADOS

CI ₁ - LM324	CI ₇ - 4071	CI ₁₃ - 4001	CI ₁₉ - 4016
CI ₂ - LM324	CI ₈ - 4001	CI ₁₄ - 4071	CI ₂₀ - 4029
CI ₃ - LM324	CI ₉ - 4001	CI ₁₅ - 4001	CI ₂₁ - LM555
CI ₄ - LM324	CI ₁₀ - 4071	CI ₁₆ - 4001	CI ₂₂ - 4029
CI ₅ - LM324	CI ₁₁ - 4011	CI ₁₇ - 4001	CI ₂₃ - 4029
CI ₆ - 4001	CI ₁₂ - LM555	CI ₁₈ - 4043	CI ₂₄ - 4051
	CI ₂₅ - 4051		

TRIMPOT'S

TP ₁ - 47 K Ω	TP ₃ - 47 K Ω	TP ₅ - 100 K Ω	TP ₇ - 47 K Ω
TP ₂ - 47 K Ω	TP ₄ - 47 K Ω	TP ₆ - 100 K Ω	TP ₈ - 1 M Ω

DIVERSOS

- 4 chaves liga-desliga
- 3 chaves de pressão normalmente abertas
- 2 chaves de pressão normalmente fechadas
- 2 motores passo a passo
- 2 conectores de 5 pinos
- 2 conectores de 6 pinos
- 1 conector de 10 pinos
- 4 fotodiodos FPT 131

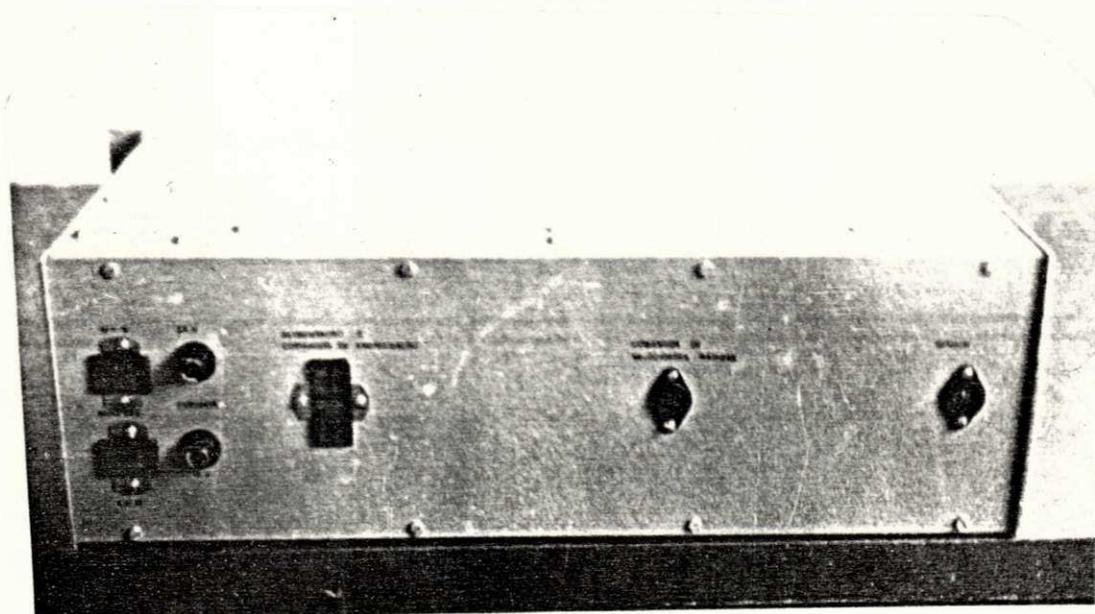
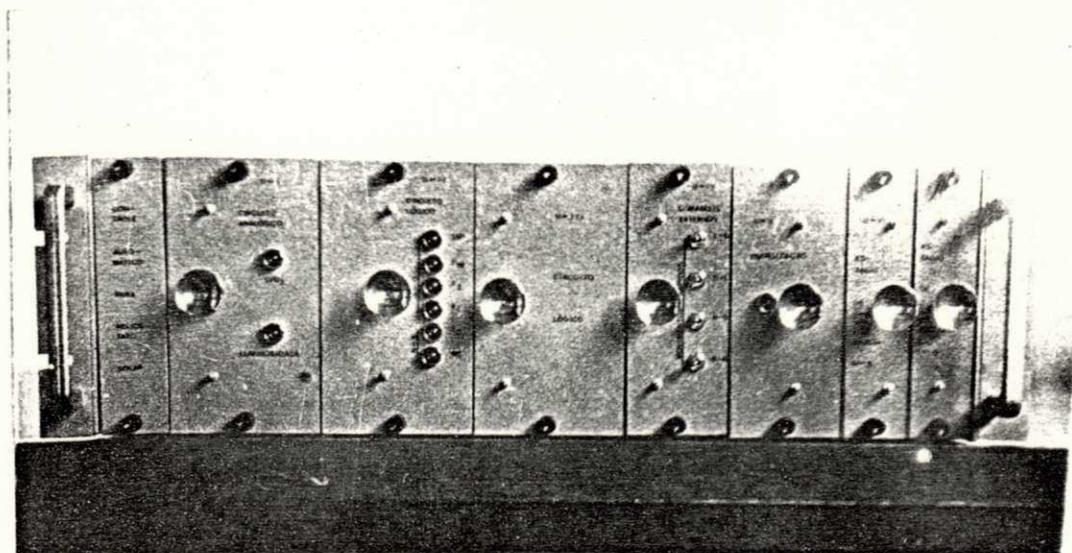


Figura 9.2.2.1 - Fotografias do protótipo do controle automático para um heliostato solar

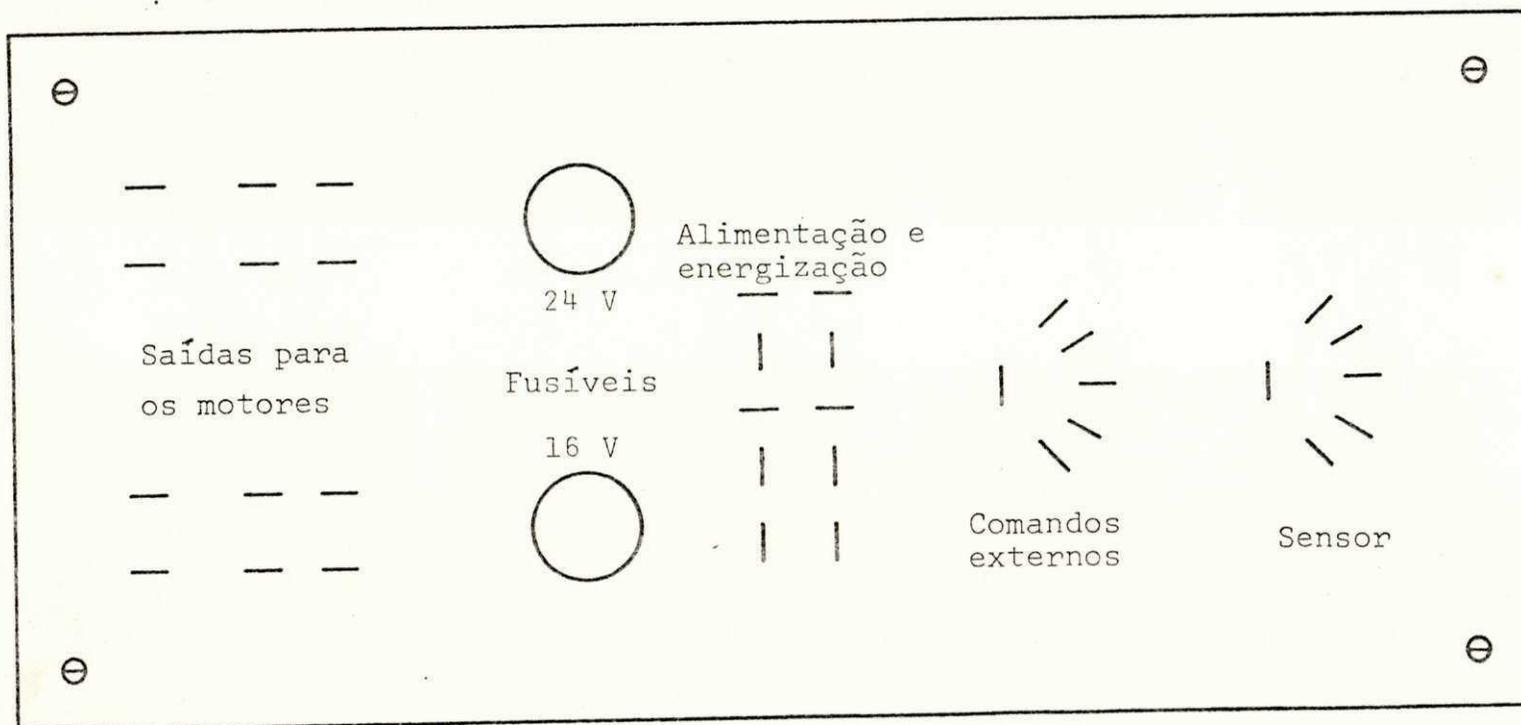


Figura 9.2.2.2 - Desenho da parte traseira do protótipo do controle automático para um heliostato solar

ajustar TP₅ para que a tensão de referência seja de 1,8432 volt quando a irradiação for de 100 mW/cm² e, para os comparadores do segundo erro padrão, deve-se ajustar TP₆ para que a tensão de referência seja de 2,76 volts com a mesma irradiação.

9.3.4 - FREQUÊNCIA DOS MULTIVIBRADORES

Com o ajuste de TP₇ deve-se conseguir uma frequência δ_{16} igual a 112 Hz e com o ajuste de TP₈, uma largura de 5 segundos na saída no monoestável.

9.4 - CONSIDERAÇÕES QUANTO À SENSIBILIDADE E À ALTURA DO SENSOR DE DIREÇÃO LUMINOSA

Para aumentar a sensibilidade do sensor de direção luminosa, deve-se aumentar a altura, h, deste sensor ou diminuir o nível de referência dos comparadores de erro. A primeira solução leva a que o sensor sofra mais interferência do vento e a segunda torna a comparação mais sensível a ruídos.

Caso seja necessário diminuir a interferência da luz difusa sobre o sensor de direção luminosa (sempre considerando os limites de variação da área iluminada nos fotodiodos), deve-se aumentar a altura deste sensor e elevar o nível de referência dos comparadores de erro. Havendo necessidade de diminuir a interferência do vento sobre o sensor de direção luminosa, deve-se fazer o contrário.

9.5 - RESULTADOS

Após montado o protótipo, fizeram-se experiências com o

heliostato e o controle automático. O alvo usado nos testes estava a uma distância de 25 m do heliostato e a uma altura de 5 m.

Depois que o sistema atingiu a estabilidade foi feito o teste de precisão da direção luminosa, como descrito a seguir.

Inicialmente, forçou-se o espelho para que ele girasse num dos sentidos de movimento, até que o motor começasse a mover-se e marcou-se a posição do feixe refletido, depois, forçou-se o espelho no sentido contrário, até que o motor começasse a mover-se em sentido contrário, marcando-se a nova posição do feixe luminoso no alvo.

No instante em que o motor começa a mover-se com velocidade de 14 pulsos por segundo, a direção luminosa deve ter um erro igual ao primeiro erro padrão e no instante em que o motor passa a ter velocidade de 112 pulsos por segundo, esse erro deve ser igual ao segundo erro padrão.

A diferença de posição do feixe luminoso no alvo, para o primeiro erro padrão foi de 10 cm e para o segundo erro padrão de 15 cm.

O primeiro erro padrão pode então ser calculado:

$$\text{primeiro erro padrão} = \frac{1}{2} \text{arc tg} \frac{0,1}{\sqrt{25^2 + 5^2}} = 0,112 \text{ grau,}$$

O segundo erro padrão é de:

$$\text{segundo erro padrão} = \frac{1}{2} \text{arc tg} \frac{0,15}{\sqrt{25^2 + 5^2}} = 0,1685 \text{ grau.}$$

Estes resultados são próximos dos esperados.

A figura 9.5.1 é uma fotografia do protótipo do dispositivo de controle automático para um heliostato solar.

9.6 - CONCLUSÃO

Os valores dos erros padrões encontrados são bem próximo dos esperados, podendo ainda ser melhorados através de ajustes da montagem como referido nos itens 9.3 e 9.4, mesmo que já estejam dentro da tolerância de enfoque.

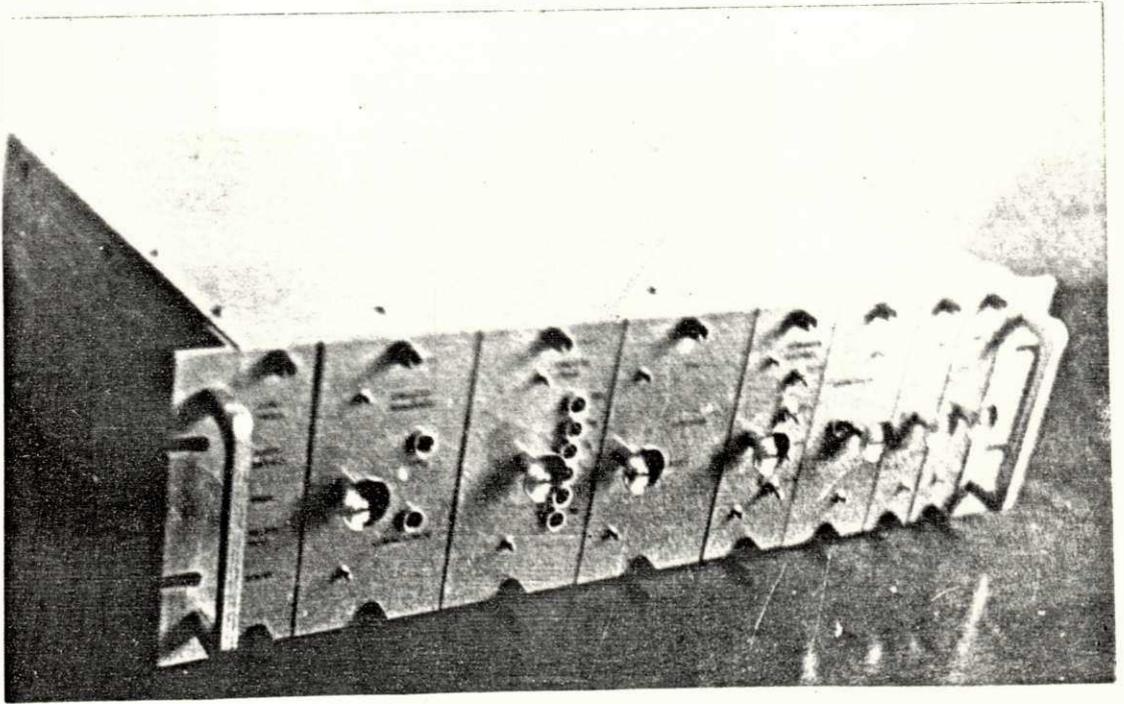


Figura 9.5.1 - Fotografia do protótipo do controle automático para um heliostato solar

REFERÊNCIAS

- 01 - J. Goldfarb, Boletim do Laboratório de energia solar da UFPB - Nº 02, dezembro de 1974.
- 02 - J. Goldfarb, Curso de Energia Solar do Projeto Rondon, Rio de Janeiro, 1978.
- 03 - S. Lopez - J. Goldfarb - P. A. Died, "Usina Eólico-solar pa produção de hidrogênio eletrolítico", Banco do Brasil, 1980
- 04 - Laboratório de Meteorologia da UFPB
- 05 - E. V. P. Smith - K. C. Jacobs, Introductory Astronomy Astro_uphycs, W. B. Saunders Company, USA, 1973
- 06 - V. Kourganoff, Astronomie Fundamentale Élémentaire, France, 1961.
- 07 - J. J. Nassau, Practical Astronomy, McGRAW HILL BOOK COMPANY, 1948.
- 08 - A. H. Mattos, Astronomia de Campo, F. Briguiet & Cia, 1952.
- 10 - J. A. Kuecken, Solid-State Motor Controls, TAB Books, USA, 1978.
- 11 - F. Kreith, Princípios de Transmissão de Calor, Editora Edgar Blucher Ltda, 1973.
- 12 - Linear Integration Circuits, National, USA.
- 13 - The Transistor and Diode Data Book for design engineers, Texas Instruments, USA, 1973.
- 14 - The Linear Control Circuits Data Book for design engineers, Texas Instruments, USA, 1980.
- 15 - The Optoelectronics Data Book for design engineers, Texas Instruments, USA.

16 - MOS/CCD Data Book, Fairchild Semiconductor, USA, 1975.