


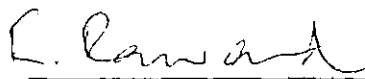
1. Publicação nº INPE-3892-TDL/224	2. Versão	3. Data Maio, 1986	5. Distribuição <input type="checkbox"/> Interna <input checked="" type="checkbox"/> Externa <input type="checkbox"/> Restrita
4. Origem DRH-DEN	Programa FRH/ECO		
6. Palavras chaves - selecionadas pelo(s) autor(es) PAINEL SOLAR ARRANJO SOLAR DESCASAMENTO DE CÉLULAS SOLARES SOMBREAMENTO DE CÉLULAS SOLARES			
7. C.D.U.: 621.383.5			
8. Título INPE-3892-TDL/224 ESTIMATIVA DA PERDA DE POTÊNCIA POR DESCASAMENTO E SOMBRA EM PAINÉIS SOLARES DE USO ESPACIAL		10. Páginas: 148	
		11. Última página: B-29	
9. Autoria Geraldo José Adabo		12. Revisada por Ronald D.P.K.C. Ravaud	
Assinatura responsável 		13. Autorizada por Marco Antonio Raupp Diretor Geral	
14. Resumo/Notas Este trabalho apresenta um estudo de perdas de potência em arranjos fotovoltaicos de uso espacial devido ao descasamento das células e aos efeitos do sombreamento. O estudo foi feito através de modelamento e simulação em computador digital.			
15. Observações Dissertação de mestrado em Eletrônica e Telecomunicações aprovada em outubro de 1985.			

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

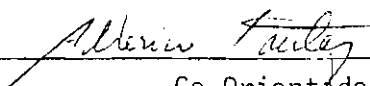
Dr. Eduardo Whitaker Bergamini


Presidente

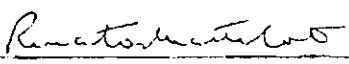
Dr. Ronald D.P.K.C. Ranvaud


Orientador

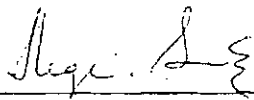
Dr. Alderico Rodrigues de Paula Jr.


Co-Orientador

Engº Renato Duarte Costa, Mestre


Co-Orientador

Dr. Rege Romeu Scarabucci


Membro da Banca
-convidado-

Candidato: Geraldo José Adabo

São José dos Campos, 31 de outubro de 1985

ABSTRACT

This work presents a study of power losses in solar arrays for space applications due to solar cell mismatching and shadow effects. The study was done with modelling and simulation using a digital computer.

À minha esposa Rosângela
e à minha filha Lígia.

AGRADECIMENTOS

Ao Dr. Ronald D.P.K.C. Ranvaud pela orientação, ao Dr. Al_
derico R. de Paula Junior e ao Eng. Renato Duarte Costa pela co-orienta_
ção.

A todos aqueles cujo apoio permitiu a realização deste
trabalho.

SUMÁRIO

	<u>Pág.</u>
LISTA DE FIGURAS	<i>xi</i>
LISTA DE TABELAS	<i>xv</i>
LISTA DE SÍMBOLOS	<i>xviii</i>
<u>CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO</u>	1
<u>CAPÍTULO 2 - FUNDAMENTOS DE ARRANJOS FOTOVOLTAICOS</u>	3
2.1 - Célula Fotovoltaica	3
2.1.1 - Modelo para simulação	4
2.1.2 - Importância relativa dos parâmetros na equação de uma célula solar	9
2.1.2.1 - Corrente foto gerada	10
2.1.2.2 - Resistência em série	10
2.1.2.3 - Corrente de saturação	11
2.1.2.4 - Fator de idealidade do diodo	12
2.1.3 - Efeitos do ângulo de incidência	13
2.2 - Arranjos fotovoltaicos	15
2.2.1 - Cadeias	15
2.2.1.1 - Células idênticas	16
2.2.1.2 - Células não-idênticas	17
2.2.2 - Submódulos	19
2.2.3 - Módulos	21
2.2.4 - Arranjos	22
2.3 - Perdas por processamento em arranjos fotovoltaicos	22
2.4 - Arranjos sombreados	24
2.5 - Diodos de proteção	25
2.5.1 - Diodo de bloqueio	25
2.5.2 - Diodo paralelo	26
<u>CAPÍTULO 3 - ESTIMATIVA DA PERDA DE POTÊNCIA POR DESCASAMENTO EM PAINÉIS SOLARES DE USO ESPACIAL</u>	29
3.1 - Descrição do arranjo	29
3.2 - Programa simulador	38
3.2.1 - Descrição do algoritmo	39

	<u>Pág.</u>
3.2.2 - Entrada dos dados	45
3.2.3 - Saída de resultados	46
3.3 - Estudos de perdas por descasamento	48
3.3.1 - Perdas por descasamento em cadeias de células solares	48
3.3.2 - Perdas por descasamento em submódulos de células solares .	49
3.3.3 - Perdas por descasamento em módulos de células solares	50
3.3.4 - Comentários gerais	52
<u>CAPÍTULO 4 - ESTIMATIVA DA PERDA DE POTÊNCIA POR SOMBRA EM PAINÉIS SOLARES</u>	53
4.1 - Modelamento temático de uma célula solar sob sombra parcial.	53
4.2 - Características geométricas da sombra no painel antigeocêntrico	60
4.3 - Programa simulador	64
4.3.1 - Descrição do algoritmo	65
4.3.2 - Entrada de dados	73
4.3.3 - Saída de resultados	74
4.4 - Estudos de sombreamento	74
4.4.1 - Perda de potência por sombreamento no painel antigeocêntrico sem diodos paralelos	75
4.4.2 - Perda de potência por sombreamento no painel antigeocêntrico com diodos paralelos	83
4.4.3 - Análise comparativa dos efeitos do sombreamento na perda de potência do painel antigeocêntrico com e sem diodos paralelos	85
<u>CAPÍTULO 5 - CONCLUSÕES</u>	87
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	89
APÊNDICE A - DESCRIÇÃO DO ARRANJO FOTOVOLTAICO DO SATÉLITE DE COLETA DE DADOS	
APÊNDICE B - PROGRAMA SIMULADOR	

LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>
2.1 - Célula fotovoltaica	4
2.2 - Características I-V de uma célula solar com convenção de corrente positiva quando fluindo no sentido inverso dentro da célula	5
2.3 - Circuito equivalente de uma célula solar	5
2.4 - Características inversas de células solares de silício (20 x 40mm) obtidas experimentalmente	7
2.5 - Pontos principais da curva I-V de uma célula	8
2.6 - Curva P-V de uma célula solar	9
2.7 - Efeito da mudança na corrente fotogerada na curva I-V de uma célula solar	10
2.8 - Efeito de mudanças na resistência em série na curva I-V de uma célula solar	11
2.9 - Efeito de uma mudança na corrente de saturação na curva I-V de uma célula solar	12
2.10 - Efeito de mudanças no fator de idealidade de diodo na curva I-V de uma célula solar	13
2.11 - Célula solar recebendo iluminação a um ângulo alfa	14
2.12 - Medidas experimentais da corrente de curto-circuito normalizada em função do ângulo de incidência (célula Spectrolab K6700)	15
2.13 - Circuito equivalente de uma cadeia de células solares ...	16
2.14 - Esquema elétrico de um submódulo genérico	19
2.15 - Submódulo constituído de N células em paralelo	21
2.16 - Módulo genérico constituído de N submódulos	22
2.17 - Características I-V (linha tracejada) de uma associação em série de duas células descasadas	23
2.18 - Diodos de bloqueio num arranjo fotovoltaico	25
2.19 - Características I-V de um módulo fotovoltaico com diodo de bloqueio	26
2.20 - Célula solar ligada com diodo em paralelo	27
2.21 - Curva I-V (linha tracejada) de uma célula solar com diodo em paralelo	27
3.1 - Painéis lateral e antigeocêntrico previstos para os primeiros satélites da MECB	30
3.2 - Esquema elétrico do painel antigeocêntrico	31

	<u>Pág.</u>
3.3 - Esquema elétrico do painel lateral	32
3.4 - Distribuição normal com média e desvio padrão	33
3.5 - Curvas características inversas da amostra de células Spectrolab	36
3.6 - Sequência de operações para cálculo da perda por descasamento de um módulo	38
3.7 - Fluxograma funcional da sub-rotina cadeia	40
3.8 - Fluxograma funcional da sub-rotina submódulo	43
3.9 - Fluxograma funcional do programa simulador	44
3.10 - Perdas por descasamento em submódulo de células solares ..	49
3.11 - Perda de potência por descasamento em submódulos em função do número de células	50
4.1 - Características I-V de uma célula solar para variações a nível de iluminação e área iluminada	55
4.2 - Características de desempenho de uma célula solar para variações de I ₀	56
4.3 - Comparação entre a razão potência máxima com sombra e potência máxima ao nível de iluminação equivalente em função da área não-sombreada	57
4.4 - Tensão de circuito aberto e potência máxima relativas em função da corrente de saturação inversa relativa de uma célula espacial	58
4.5 - Fator multiplicativo da corrente de saturação em função da razão entre área iluminada e área total da célula	59
4.6 - Sombra e penumbra do mastro iluminado com incidência perpendicular ao seu eixo longitudinal	60
4.7 - Vista lateral do satélite sob iluminação	62
4.8 - Geometria da sombra do mastro	62
4.9 - Comprimento de sombra da antena	64
4.10 - Fluxograma funcional do programa simulador de arranjos fotovoltaicos sombreados	65
4.11 - Fluxograma funcional da sub-rotina SOMBRA	66
4.12 - Célula solar com suas coordenadas cartesianas	67
4.13 - Distribuição de células para o estudo de sombra do mastro (a) e antena (b)	68
4.14 - Posicionamento geométrico dos setores do painel antigeocêntrico para estudo de sombra	69
4.15 - Fluxograma funcional da sub-rotina CALCULAKS	70

	<u>Paġ.</u>
4.16 - Coordenadas básicas da sombra do mastro	71
4.17 - Perda de potência por sombra do mastro com ângulo de incidência de 45°	78
4.18 - Perda de potência por sombra da antena num setor do painel antigeocêntrico para o ângulo de incidência de 45°	79
4.19 - Perda por sombra dos elementos estruturais no painel anti geocêntrico com ângulo de incidência de 45°	82
4.20 - Perda por sombra no painel antigeocêntrico usando células com diodo integrado a um ângulo de 45°	85

LISTA DE TABELAS

	<u>Pág.</u>
3.1 - Dados de especificação das células spectrolab de uso espacial (tipo K6700)	34
3.2 - Faixas de valores dos parâmetros de um lote de células de uso espacial	34
3.3 - Valores de corrente direta para tensões inversas em células solares 20 x 40mm - spectrolab	35
3.4 - Média e desvio padrão dos parâmetros de um lote de células solares real	37
3.5 - Dados de células geradas aleatoriamente pelo programa módulo	47
3.6 - Perda de potência por descasamento num módulo fotovoltaico com diferentes configurações elétricas	51
4.1 - Influência da condutância inversa das células na perda de potência do arranjo fotovoltaico	75
4.2 - Perda de potência média por sombra relativa ao mastro	77
4.3 - Perda de potência por sombra da antena num setor do painel antigeocêntrico	80
4.4 - Perda média de potência por sombra das antenas no potencial antigeocêntrico	81
4.5 - Valores médios e máximos da perda de potência por sombra no painel antigeocêntrico	83
4.6 - Comparação entre os valores médio e máximo da perda de potência por sombra no painel antigeocêntrico com e sem diodos paralelos	86

LISTA DE SÍMBOLOS

A	- Fator de idealidade do diodo
A_c	- Fator de idealidade da cadeia
A_{sm}	- Fator de idealidade do submódulo
d_{sm}	- Distância entre o mastro e o Sol
K_S	- Fator multiplicativo da corrente de diodo de uma célula solar sombreada parcialmente
F_α	- Fator de transmissão da cobertura
$F.P.$	- Fator de preenchimento
G	- Condutância inversa da célula
i	- Corrente de terminal
I_c	- Corrente da cadeia
I_{cc}	- Corrente de curto-circuito
i_d	- Corrente de diodo
I_{dp}	- Corrente do diodo paralelo
I_L	- Corrente fotogerada
I_{Lc}	- Corrente fotogerada da cadeia
I_{L0c}	- Corrente fotogerada da cadeia na condição de circuito aberto
I_{Lsm}	- Corrente fotogerada do submódulo
I_m	- Corrente do módulo
I_{mp}	- Corrente de máxima potência
I_0	- Corrente de saturação inversa
I_{0c}	- Corrente de saturação inversa da cadeia
I_{0sm}	- Corrente de saturação inversa do submódulo
i_p	- Corrente na resistência em paralelo
K	- Coeficiente de nível de iluminação
l_s	- Comprimento da sombra
PD	- Perda por descasamento

- P_{Max_a} - Potência máxima do arranjo
- P_{Max_n} - Potência máxima de uma célula
- K_R - Razão entre a área iluminada e a área total de uma célula com sombra parcial
- R_s - Resistência em série
- R_p - Resistência em paralelo
- R_{s_c} - Resistência em série da cadeia
- R_{p_c} - Resistência em paralelo da cadeia
- $R_{s_{sm}}$ - Resistência em série do submódulo
- $R_{p_{sm}}$ - Resistência em paralelo do submódulo
- S - Intensidade solar efetiva
- S_0 - Intensidade de luz solar
- v - Tensão de terminal
- V_c - Tensão da cadeia
- V_{ca} - Tensão de circuito aberto
- V_{ca_c} - Tensão de circuito aberto da cadeia
- V_d - Tensão de condução do diodo
- V_{db} - Tensão do diodo de bloqueio
- V_m - Tensão do módulo
- V_{mp} - Tensão de máxima potência
- V_r - Tensão inversa máxima permissível de uma célula

- λ_n - Parâmetro da equação da célula solar relacionado com o fator de idealidade do diodo e a temperatura
- λ_c - Parâmetro da equação da cadeia similar a λ_n
- α - Ângulo de incidência
- μ - Média da distribuição
- σ - Desvio padrão da distribuição
- ϕ_m - Diâmetro do mastro
- ϕ_{sol} - Diâmetro do sol
- β - Ângulo azimutal

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

Um satélite artificial necessita de energia elétrica para manter seus subsistemas em funcionamento e atingir os objetivos da missão.

O subsistema de Suprimento de Energia é responsável pelo fornecimento da energia aos demais e é constituído basicamente de um gerador primário, regulador de tensão, baterias recarregáveis e eletrônica de condicionamento e distribuição de potência.

A mais usual fonte de energia primária para satélite é de natureza fotovoltaica; o gerador consiste em um conjunto de painéis de células solares.

Além da otimização do rendimento das células solares e da resistência às degradações impostas pelo ambiente espacial, o aproveitamento pleno da energia solar requer um casamento das características elétricas das células, o que só ocorre no caso ideal em que todas as células são idênticas.

Neste trabalho são estudados dois tipos de descasamento, sendo um inevitável e outro accidental. O primeiro é devido ao processo de fabricação e o segundo, muito mais indesejável, é causado por sombra dos elementos estruturais do satélite sobre as células.

O objetivo deste trabalho é estimar as perdas de potência causadas por um e outro fenômeno.

Dentro deste propósito e considerando a quantidade de informação envolvida no assunto, apresenta-se no Capítulo 2 uma pesquisa bibliográfica, assim como os fundamentos teóricos utilizados no trabalho.

No Capítulo 3 é apresentado um estudo do descasamento natural de células, para o qual foi desenvolvido um programa simulador implementado em computador digital. Este estudo se baseia em parâmetros reais de uma célula espacial e estima a perda de potência por descasamento em diversas combinações série e paralelo, objetivando aplicar os resultados ao arranjo solar do Satélite de Coleta de Dados da Missão Espacial Completa Brasileira.

O Capítulo 4 descreve o estudo da perda de potência por sombreamento parcial do painel antigeocêntrico do satélite causado pelo mastro e antenas. Uma ampliação do programa já mencionado fez-se necessária, uma vez que a simulação de arranjos sombreados requer o conhecimento do desempenho elétrico da célula sob essa situação e do comportamento da sombra dos elementos estruturais do satélite. Com base nos requisitos desenvolvidos faz-se uma estimativa da perda de potência por sombra no arranjo solar do satélite, considerando também a utilização de diodos paralelos para minimização de perdas.

No Capítulo 5 são apresentadas as conclusões obtidas a partir dos resultados das simulações constantes nos Capítulos 3 e 4.

CAPÍTULO 2

FUNDAMENTOS DE ARRANJOS FOTOVOLTAICOS

Neste capítulo são apresentadas as bases teóricas nas quais este trabalho se fundamenta.

Dentro desse propósito, faz-se uma descrição da célula fotovoltaica que abrange o modelo adotado para simulação, os parâmetros envolvidos no modelo e os efeitos do ângulo de incidência na curva característica corrente-tensão do dispositivo.

Em seguida, apresenta-se o conceito de cadeia de células solares e as equações $I(V)$ para cadeias constituídas de células idênticas e não-idênticas. Outras considerações são feitas sobre a arquitetura elétrica de arranjos fotovoltaicos, incluindo os conceitos de submódulo, módulo, descasamento de células solares e sombreamento parcial em arranjos de células solares.

Finalmente, apresentam-se os diodos de proteção, suas aplicações e efeitos na característica $I-V$ de arranjos fotovoltaicos.

2.1 - CÉLULA FOTOVOLTAICA

Célula fotovoltaica é um dispositivo semicondutor que gera eletricidade por efeito fotovoltaico, quando exposto a algum tipo de radiação eletromagnética. Constituída de uma junção p-n, sua eficiência é a razão entre a potência elétrica máxima de saída e o produto da área da célula pela irradiância.

Neste trabalho será considerada a célula solar de silício monocristalino, de uso espacial, de dimensões 20 x 40mm.

A Figura 2.1 mostra esquematicamente uma célula solar típica.

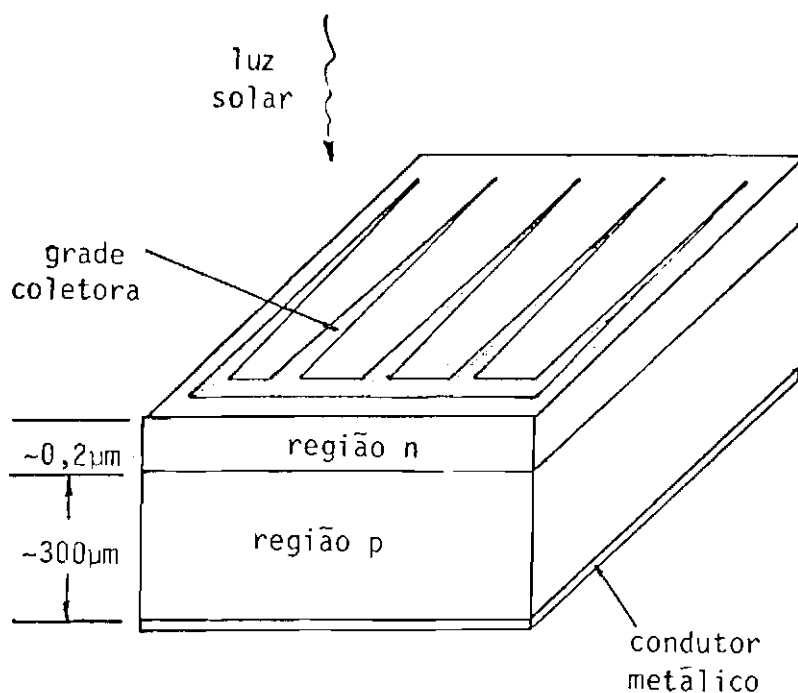


Fig. 2.1 - Célula fotovoltaica.

O pólo positivo da célula da Figura 2.1 é o condutor metálico ligado ao material dopado com impurezas do tipo p. O pólo negativo é a grade coletora que serve para coletar os portadores gerados pelos fótons incidentes na superfície da célula.

2.1.1 - MODELO PARA SIMULAÇÃO

A célula solar possui uma curva característica I-V como a da Figura 2.2.

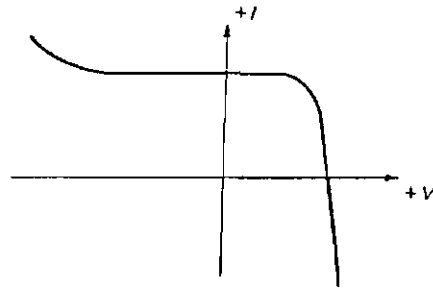


Fig. 2.2 - Característica I-V de uma célula solar com convenção de corrente positiva quando fluindo no sentido inverso dentro da célula.

Como pode ser visto na figura anterior, existem duas regiões distintas na característica I-V: região de tensões diretas ($V > 0$) e região de tensões inversas ($V < 0$).

Um circuito equivalente de uma célula solar que opera em tensões diretas, adotado neste trabalho, cujos parâmetros são descritos a seguir, é apresentado na Figura 2.3. Este modelo foi adotado por ser freqüentemente utilizado em trabalhos de engenharia, inclusive em Shechter (1983), cujos resultados são aplicados neste trabalho.

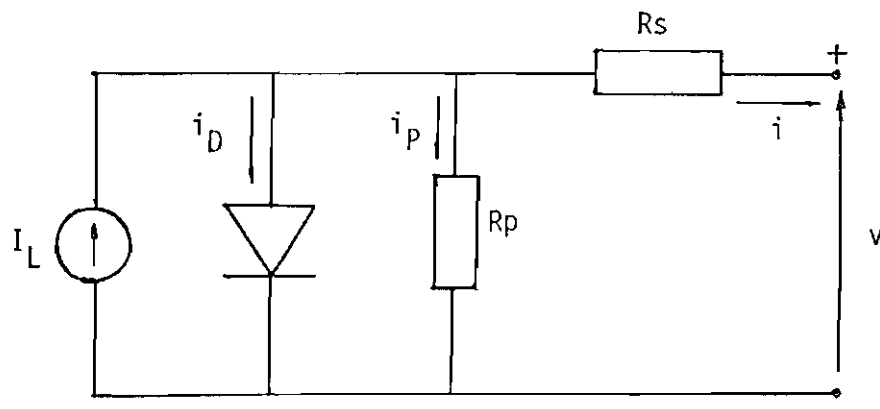


Fig. 2.3 - Circuito equivalente de uma célula solar.

A equação matemática que representa o circuito equivalente da Figura 2.3 é:

$$i = I_L - I_d - I_p, \quad (2.1)$$

onde:

$$i_d = I_0 (\exp(q \cdot (v + R_s \cdot i) / (A \cdot K \cdot T)) - 1),$$

$$i_p = (v + R_s \cdot i) / R_p.$$

Assim, tem-se:

$$i = I_L - I_0 (\exp(q \cdot (v + R_s \cdot i) / (A \cdot K \cdot T)) - 1) - (v + R_s \cdot i) / R_p, \quad (2.2)$$

onde:

- v : tensão de terminal.
- i : corrente de terminal.
- I_L : corrente foto gerada, produto da geração de portadores através da incidência de fótons na superfície da célula.
- I_0 : corrente de saturação inversa do diodo é a corrente resultante da injeção de portadores minoritários de um lado para outro da junção (predominantemente com tensões diretas altas) e ao mecanismo de recombinação dos portadores minoritários na região de carga espacial (predominantemente com tensões diretas baixas).
- A : fator de idealidade do diodo, utilizado no ajuste de curvas de células reais à característica exponencial da junção. Varia entre 1 e 2 ao longo da curva característica I-V do diodo e está relacionado com o mecanismo de transporte dominante, injeção ($A=1$) e geração e recombinação de portadores minoritários ($A=2$).

- R_s : resistência em série da célula, que representa uma idealização das perdas dissipativas que podem ocorrer numa célula; tais como, resistência de folha, resistência do contato e da metalização na base da célula e resistência do filme fino que forma a grade coletora.
- R_p : resistência em paralelo da célula, consequência de fugas através da junção p-n (corrente de recombinação), pelas bordas da célula (fuga de superfície) e fendas de superfície. A ordem de grandeza de R_p para células 20 x 40mm de uso espacial varia de 1Kohm a 100Kohm, sendo seu efeito usualmente considerado desprezível no projeto de arranjos.
- q : carga do elétron.
- K : constante de Boltzmann: 8,617 E-5 e V/K.
- T : temperatura em graus Kelvin.

A característica inversa de células solares de silício monocristalino é dependente do processo de fabricação, diferindo muito mesmo entre células de um mesmo lote, conforme mostra a Figura 2.4.

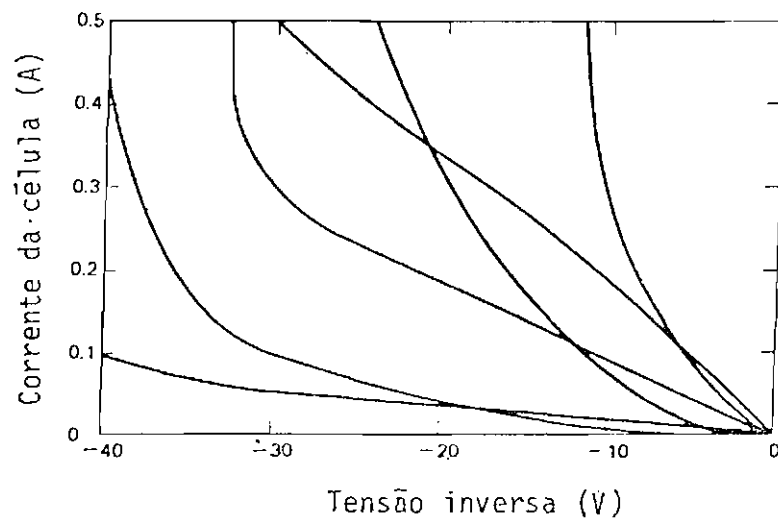


Fig. 2.4 - Características inversas de células solares de silício (20 x 40mm) obtidas experimentalmente.

FONTE: Rauschenbach, (1980).

A Figura 2.2, que representa a curva característica I-V de uma célula solar, mostra que a referida curva é contínua e possui derivada monotônica.

Três pontos da curva I-V de uma célula são de importância primordial na sua análise de desempenho: corrente de curto-circuito (I_{cc}), tensão de circuito aberto (V_{ca}) e ponto de máxima potência caracterizado pela tensão de máxima potência (V_{mp}) e corrente de máxima potência (I_{mp}).

As Figuras 2.5 e 2.6 mostram os parâmetros principais da curva I-V de uma célula.

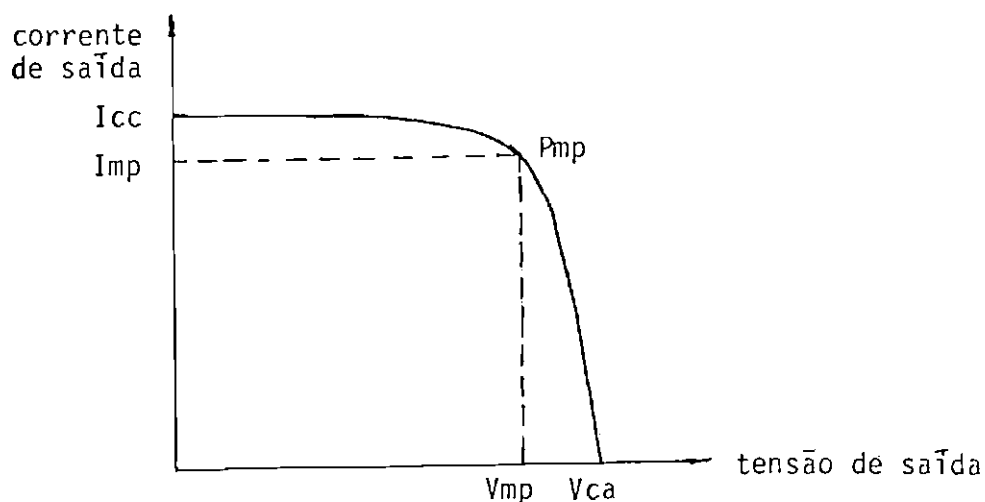


Fig. 2.5 - Pontos principais da curva I-V de uma célula.

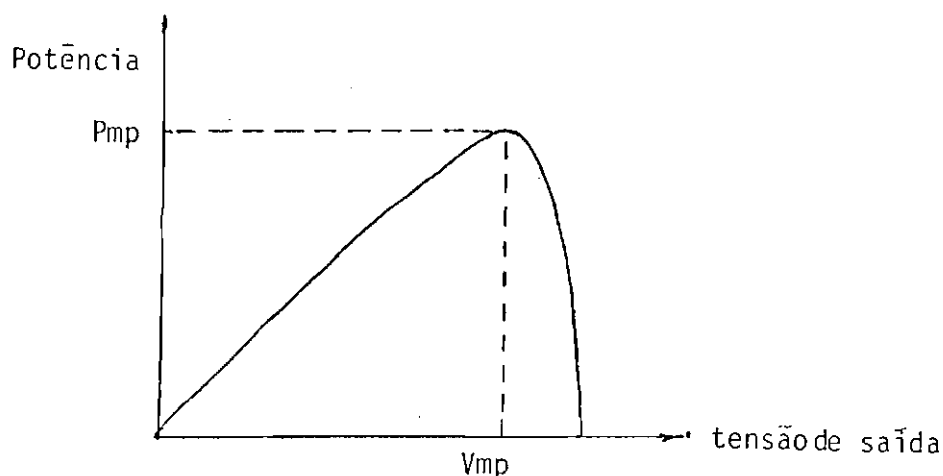


Fig. 2.6 - Curva P-V de uma célula solar.

Um parâmetro que relaciona os pontos principais da curva I-V de uma célula é o fator de preenchimento, que é definido como:

$$F.P. = (V_{mp} \times I_{mp}) / (V_{ca} \times I_{cc}). \quad (2.3)$$

O fator de preenchimento é um indicador da qualidade da célula solar, sendo este a razão entre a área abaixo da curva e a área do retângulo, cujas coordenadas são a corrente de curto-circuito e a tensão de circuito aberto.

Uma célula é tanto melhor quanto mais próximo de 1 é seu fator de preenchimento. Células de uso espacial possuem fator de preenchimento melhor que 0,75.

2.1.2 - IMPORTÂNCIA RELATIVA DOS PARÂMETROS NA EQUAÇÃO DE UMA CÉLULA SOLAR

Variações nos parâmetros do modelo da célula solar, apresentados na Subseção 2.1.1., modificam diferentemente a característica I-V de uma célula solar.

2.1.2.1 - CORRENTE FOTOGERADA

Variações do nível de iluminação provocam mudanças de I_L , as quais por sua vez acarretam modificações na corrente de curto-circuito e na tensão de circuito aberto, conforme é mostrado na Figura 2.7.

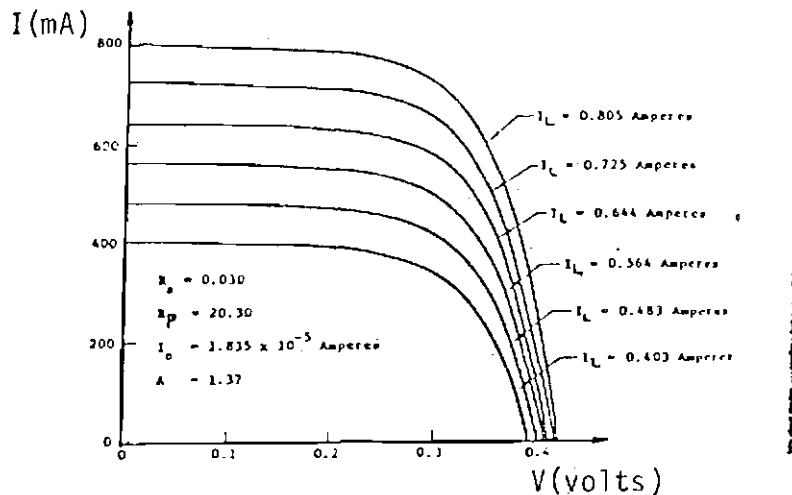


Fig. 2.7 - Efeito da mudança na corrente foto gerada na curva I-V de uma célula solar.

FONTE: Kennerud (1969).

Variações do nível de iluminação podem ser representadas matematicamente pela Equação 2.4:

$$i = K \cdot I_L - I_0 \left(q \cdot (v + R_s \cdot i) / A \cdot K \cdot T - 1 \right), \quad (2.4)$$

onde K é o modificador de intensidade luminosa e $0 \leq K \leq 1$ (Rauschenbach, 1980).

2.1.2.2 - RESISTÊNCIA EM SÉRIE

Como se pode verificar no circuito equivalente da figura 2.3, a resistência em série é um parâmetro que reduz a potência máxima de saída de uma célula solar, quanto maior for a sua magnitude.

A Figura 2.8 mostra as curvas I-V de uma célula para diversos valores de R_s .

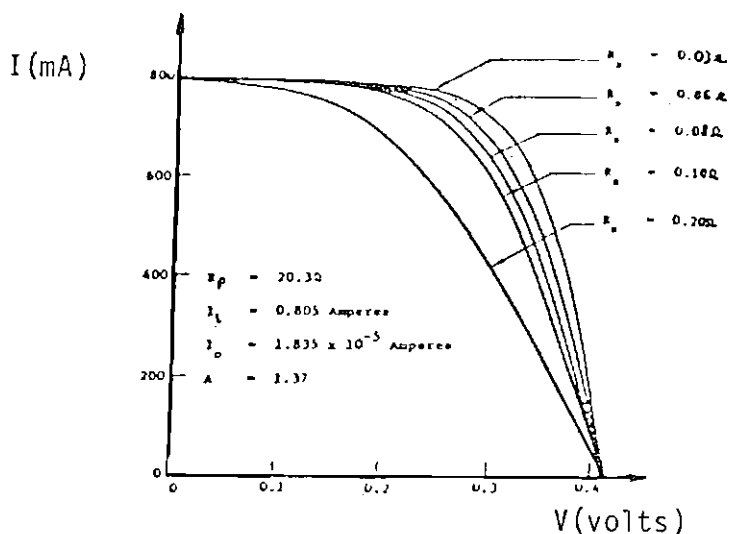


Fig. 2.8 - Efeito de mudanças na resistência em série na curva I-V de uma célula solar.

FONTE: Kennerud (1969).

2.1.2.3 - CORRENTE DE SATURAÇÃO

A corrente de saturação inversa da junção p-n está relacionada com a tensão de circuito aberto da célula solar; esse efeito pode ser observado na Figura 2.9. Isto ocorre devido ao fato de I_0 ser o equilíbrio entre os portadores gerados termicamente e o potencial da barreira e será tanto menor quanto maior for este potencial. Mas, a tensão de circuito aberto é uma medida do potencial da barreira, sendo os dois praticamente proporcionais.

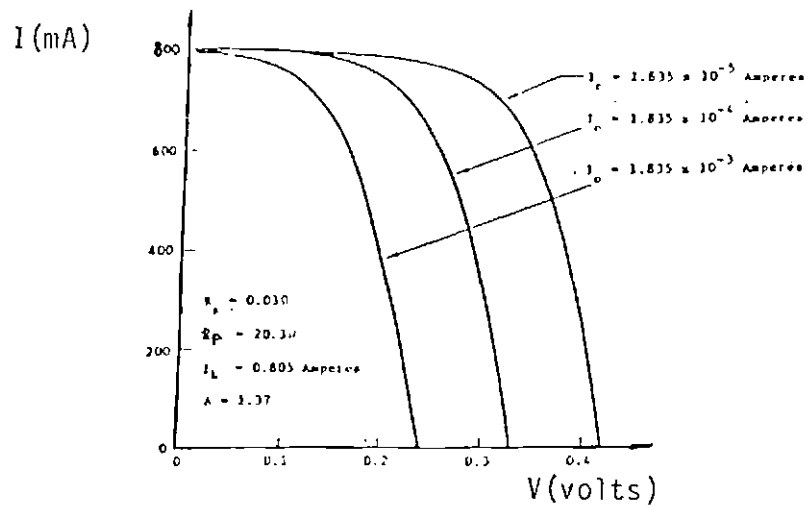


Fig. 2.9 - Efeito de uma mudança na corrente de saturação na curva I - V de uma célula solar.

FONTE: Kennerud (1969).

2.1.2.4 - FATOR DE IDEALIDADE DO DIODO

Mudanças de valores da constante de ajuste de curva (A), mencionada na Subseção 2.1.1, resulta em mudanças na tensão de circuito aberto da célula solar, como mostra a Figura 2.10. Isto resulta do fato de $A=1$ representar uma célula em que não há geração e recombinação de portadores minoritários, sendo a corrente de saturação resultante do mecanismo de transporte por injeção de portadores somente, e no caso de $A > 1$ o mecanismo de transporte por geração e recombinação de portadores minoritários é também considerado, requerendo um potencial de barreira maior para que seja mantida a corrente I_0 . Uma vez que a tensão de circuito aberto é praticamente proporcional ao potencial da barreira, verifica-se um aumento desta tensão para valores de A crescentes.

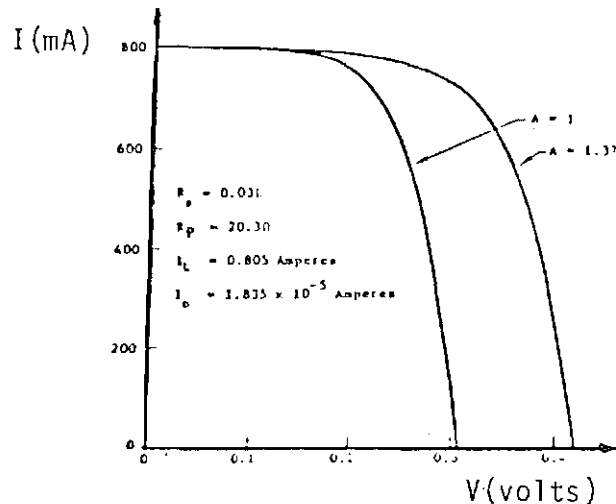


Fig. 2.10 - Efeito de mudanças no fator de idealidade do diodo na curva I - V de uma célula solar.

FONTE: Kennerud (1969).

Segundo Kennerud (1969), um aumento no fator de idealidade do diodo resulta numa diminuição do fator de preenchimento da célula solar. Este parâmetro varia com a tensão de terminal da célula, sendo próximo de 2 para tensões inferiores a 0,4V e próximo de 1 para valores acima de 0,4V em células solares de silício monocristalino (Hovel, 1975).

2.1.3 - EFEITOS DO ÂNGULO DE INCIDÊNCIA

Num ângulo oblíquo de iluminação solar, a capacidade de saída de potência das células solares diminui.

A intensidade solar efetiva (S) é definida como o nível de luz efetivo incidente na superfície ativa da célula solar, que é dado por:

$$S = S_0 \times F_{\alpha} \cos_{\alpha}, \quad (2.5)$$

onde:

S : intensidade solar efetiva,

S_0 : intensidade da luz solar (em unidades de constante solar),

F_α : fator de transmissão da cobertura da célula solar,

α : ângulo de incidência (Rauschenbach, 1980).

A Figura 2.11 mostra uma célula solar recebendo luz solar a um ângulo alfa.

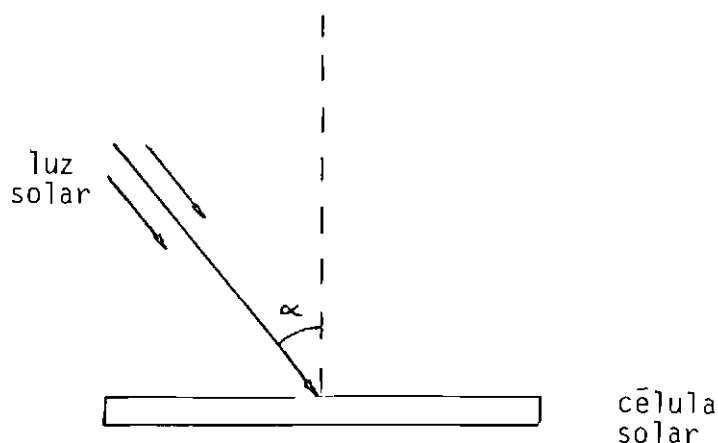


Fig. 2.11 - Célula solar recebendo iluminação a um ângulo alfa.

Para valores de alfa até 30 graus, a lei dos co-senos é aceitável (Rauschenbach, 1980); isto pode ser verificado na Figura 2.12 que mostra a corrente de curto-circuito normalizada em função do ângulo de incidência, obtida experimentalmente pelo fabricante. Verifica-se que a 50° o erro é inferior a 5%.

Para ângulos superiores a 30° a lei dos co-senos não ocorre, uma vez que a fração de luz refletida na superfície aumenta com o ângulo de incidência, fazendo com que a intensidade de luz efetiva que alcança a junção da célula seja menor. Além disto o espectro da luz que alcança a junção da célula varia com o ângulo de incidência, por causa dos efeitos associados à interferência na camada refletora.

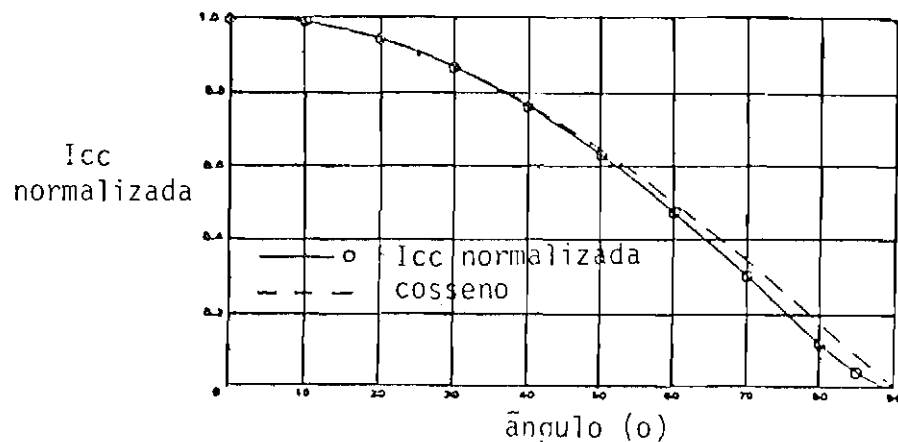


Fig. 2.12 - Medidas experimentais da corrente de curto-circuito normalizada em função do ângulo de incidência (célula Spectrolab K6700).

2.2 - ARRANJOS FOTOVOLTAICOS

As células solares são ligadas em agrupamentos em série e em paralelo com o objetivo de fornecer energia elétrica a uma determinada carga.

No caso ideal de arranjos constituídos de células idênticas, a tensão do arranjo é igual à tensão de uma célula multiplicada pelo número de células em série, a corrente do arranjo é igual à corrente de uma célula multiplicada pelo número de células em paralelo e a potência do arranjo é igual à potência de uma célula multiplicada pelo número de células do arranjo.

No caso real de células não-idênticas, o mesmo não se verifica.

2.2.1 - CADEIAS

Neste trabalho o termo cadeia significa um conjunto de células solares associadas em série. Apresentam-se, a seguir, as equações $I(V)$ de cadeias constituídas de células idênticas.

2.2.1.1 - CÉLULAS IDÊNTICAS

Tomando o circuito equivalente de uma cadeia, mostrado na Figura 1.13, análogo ao circuito equivalente de uma célula já apresentada na Figura 2.3,

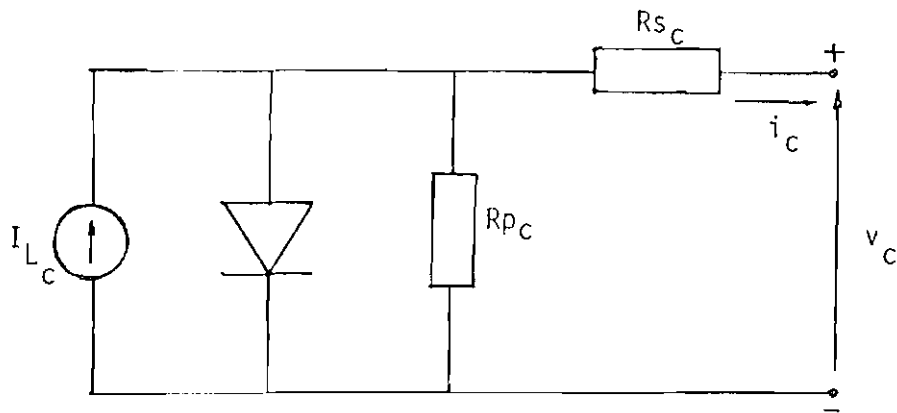


Fig. 2.13 - Circuito equivalente de uma cadeia de células solares.

a equação da cadeia fica:

$$I_c = I_{L_c} - I_{0_c} \cdot (\exp(\lambda_c \cdot (v + R_{s_c} \cdot I_c)) - 1) - (v + R_{s_c} \cdot I_c) / R_{p_c}, \quad (2.6)$$

onde:

I_{L_c} : corrente fotogerada da cadeia,

I_{0_c} : corrente de saturação da cadeia.

$$\lambda_c = q / A_c \cdot K \cdot T \quad (2.7)$$

A_c : fator de idealidade da cadeia,

R_{s_c} : resistência em série da cadeia,

R_{p_c} : resistência em paralelo da cadeia,

I_c : corrente da cadeia,

V_c : tensão da cadeia.

Os parâmetros equivalentes de uma cadeia de N células guardam relações com os parâmetros de uma célula, como mostrado nas Equações 2.8, 2.9, 2.10, 2.11 e 2.12:

$$I_{L_c} = I_L, \quad (2.8)$$

$$R_{S_c} = N \cdot R_S \quad (2.9)$$

$$R_{p_c} = N \cdot R_p, \quad (2.10)$$

$$I_{0_c} = I_0, \quad (2.11)$$

$$\lambda_c = \lambda_n / N, \quad (2.12)$$

onde $\lambda_n = q/A \cdot K \cdot T$ (2.13) e A é o fator de idealidade do diodo de uma célula.

2.2.1.2 - CÉLULAS NÃO-IDÊNTICAS

Um estudo de cadeias constituídas de células não-idênticas foi feito por Shechter (1983), considerando as equações de uma célula genérica e de uma cadeia como aquela da Equação 2.14 e da 2.16, respectivamente:

$$V_n = -I \cdot R_{S_n} + V_{c_{an}} + 1/\lambda_n \cdot \ln(1 - I/I_{L_n}), \quad (2.14)$$

$$V_{ca_n} = 1/\lambda_n \cdot \ln (I_{L_n}/I_{0_n}), \quad (2.15)$$

$$V_c = -I_c \cdot R_{s_c} + V_{ca_c} + 1/\lambda_c \cdot \ln (1 - I_c/I_{L_c}), \quad (2.16)$$

$$V_{ca_c} = 1/\lambda_c \cdot \ln (I_{L_{0_c}}/I_{0_c}), \quad (2.17)$$

onde:

V_{ca_n} : tensão de circuito aberto da célula,

V_{ca_c} : tensão de circuito aberto da cadeia,

$I_{L_{0_c}}$: corrente fotogerada da cadeia na condição de circuito aberto,

I_{L_c} : corrente fotogerada da cadeia na condição de carga, que é dependente da corrente de carga.

Os demais símbolos são como descritos anteriormente.

Uma vez que a corrente de uma cadeia é a mesma corrente de todas as células, a Equação 2.18 é aplicada:

$$V_c(I_c) = \sum_{n=1}^n V_n(I_c). \quad (2.18)$$

Substituindo as Equações 2.14 e 2.16 em 2.18, obtêm-se as relações entre os parâmetros das células e os parâmetros da cadeia, mostradas nas Equações 2.19 a 2.24:

$$R_{s_c} = \sum_{n=1}^n R_{s_n}, \quad (2.19)$$

$$1/\lambda_c = \sum_{n=1}^N 1/\lambda_n, \quad (2.20)$$

$$\eta_n = \lambda_n / N \cdot \lambda_c, \quad (2.21)$$

$$I_{L_{0c}} = \sqrt[N]{\frac{N}{\pi} (I_{L_n})^{1/\eta_n}}, \quad (2.22)$$

$$I_{0c} = \sqrt[N]{\frac{N}{\pi} (I_{0n})^{1/\eta_n}}, \quad (2.23)$$

$$I_{L_c} = I_c / \left(1 - \sqrt[N]{\frac{N}{\pi} (1 - (1 - I_c/I_{L_n})^{1/\eta_n})} \right). \quad (2.24)$$

2.2.2 - SUBMÓDULOS

Neste trabalho o termo módulo significa um certo número de cadeias de células solares associadas em paralelo como na figura 2.14.

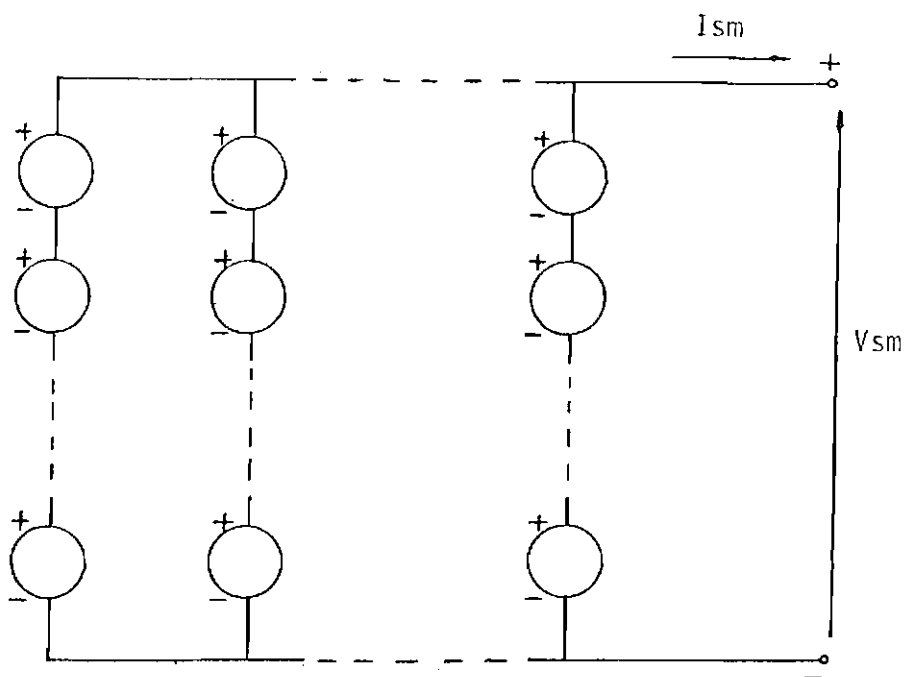


Fig. 2.14 - Esquema elétrico de um submódulo genérico.

O caso mais simples de submódulo é uma associação em paralelo de células solares como mostra a Figura 2.15.

Os parâmetros equivalentes de um submódulo de N células idênticas têm relações com os parâmetros de uma célula, como mostram as Equações 2.25 a 2.30:

$$I_{L_{sm}} = N \cdot I_L, \quad (2.25)$$

$$R_{S_{sm}} = R_S / N, \quad (2.26)$$

$$R_{P_{sm}} = R_P / N, \quad (2.27)$$

$$I_{O_{sm}} = N \cdot I_0, \quad (2.28)$$

$$\lambda_{sm} = \lambda, \quad (2.29)$$

onde:

$$\lambda = q/A \cdot K \cdot T,$$

$I_{L_{sm}}$: corrente foto gerada do submódulo,

$I_{O_{sm}}$: corrente de saturação inversa do submódulo,

$$\lambda_{sm} = q/A_s \cdot K \cdot T, \quad (2.30)$$

A_{sm} : fator de idealidade do submódulo,

$R_{S_{sm}}$: resistência em série do submódulo,

$R_{P_{sm}}$: resistência em paralelo do submódulo.

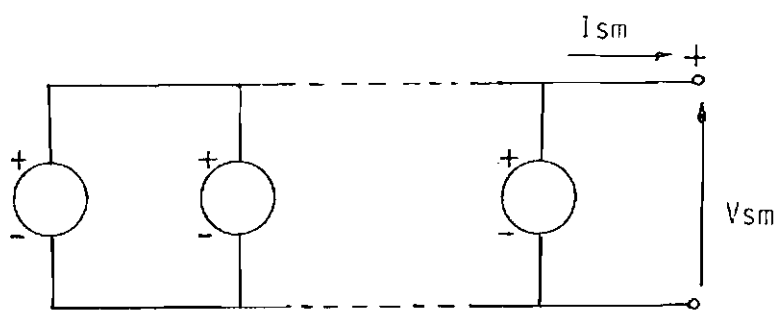


Fig. 2.15 - Submódulo constituído de N células em paralelo.

2.2.3 - MÓDULOS

Neste trabalho, chama-se módulo todo conjunto de células solares eletricamente ligadas que é conectado ao barramento do arranjo.

Os módulos geralmente são ligados ao barramento através de diodos de proteção, e todas as células de um módulo são montadas num mesmo painel solar para receberem um mesmo nível de iluminação (desconsiderando sombras espúrias).

Tendo em vista os conceitos de cadeia e submódulo citados anteriormente, considera-se, neste trabalho, que um módulo é constituído de submódulos associados em série como mostra a Figura 2.16.

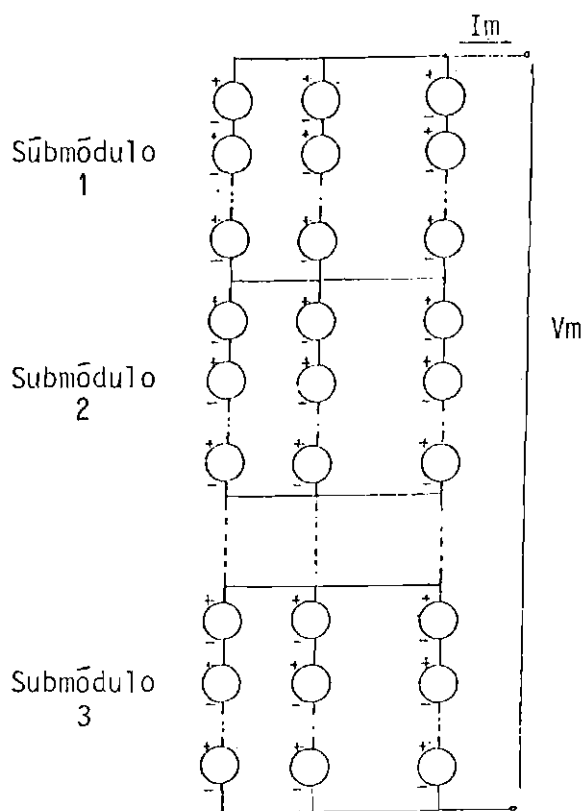


Fig. 2.16 - Módulo genérico constituído de N submódulos.

2.2.4 - ARRANJOS

Os arranjos fotovoltaicos são constituídos de um certo número de módulos ligados a um barramento, os quais podem ou não pertencer todos a um só painel.

2.3 - PERDAS POR DESCASAMENTO EM ARRANJOS FOTOVOLTAICOS

Quando se constrói um painel solar, utilizam-se células solares com características elétricas não-idênticas devido a imperfeições nos processos de fabricação. Esta dispersão de parâmetros é denominada descasamento de células solares.

O descasamento acarreta uma perda de potência do arranjo. Isto ocorre porque no ponto de máxima potência do arranjo as células operam fora do seu ponto de máxima potência. A Figura 2.17 mostra a característica I-V de uma associação em série de duas células não-idênticas.

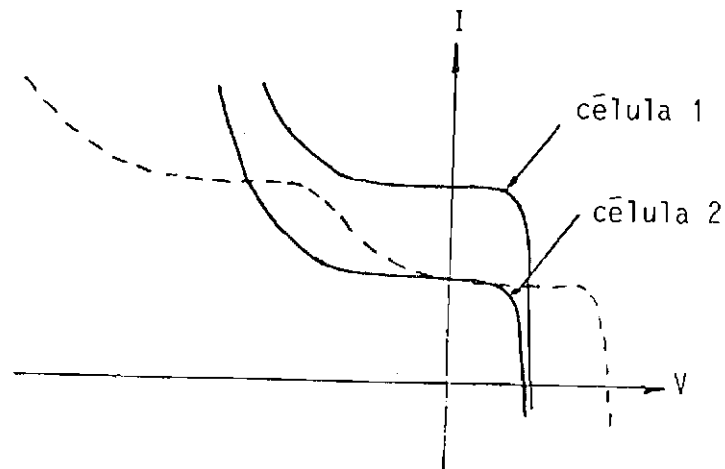


Fig. 2.17 - Característica I-V (linha tracejada) de uma associação em série de duas células descasadas.

O conceito de perda por descasamento utilizado neste trabalho, é dado na Equação 2.25 (Bany et alii, 1977):

$$PD = 1 - P_{\max_a} / \sum_{n=1}^N P_{\max_n} . \quad (2.25)$$

onde:

PD: perda por descasamento,

P_{\max_a} : potência máxima do arranjo,

P_{\max_n} : potência máxima de uma célula.

Bany et alii (1977) e Appelbaum et alii (1982) estudaram as perdas por descasamento em arranjos de células solares e, para isto, consideram a curva característica I-V de uma célula linearizada. Os resultados finais são função da média e desvio padrão dos parâmetros envolvidos no modelo linearizado de uma célula.

Watkins e Burgess (1978) estudaram o efeito da dispersão da resistência em série e da corrente fotogerada em arranjos em série. Concluíram que a dispersão da resistência em série afeta insignificantemente a potência máxima do arranjo em série, ao contrário da dispersão na corrente fotogerada. Concluíram, ainda, que a potência de saída do arranjo é função da corrente de curto-circuito mínima. Isto pode ser observado na Figura 2.17. Este trabalho foi executado usando um progrma de simulação em computador. Os resultados eram esperados, uma vez que numa cadeia as células operam a uma mesma corrente, sendo, portanto, a corrente máxima a menor corrente de curto-circuito.

Tada et alii (1982) realizaram medidas para estimativa da variação da potência máxima de células solares de silício de uso espcial. Utilizaram-se lotes representativos de vários fabricantes e selecionaram 14 células de cada lote, localizadas mais próximas ao centro da distribuição do respectivo lote. Uma comparação do desvio padro para cada tipo de célula, antes e depois de expostos a uma fluência de $1,0 \text{ E}+15 \text{ e/cm}^2$, revelou não haver alteração significativa na dispersão. Conclui-se, a partir destes resultados, que a radiação corpuscular não deverá contribuir para o aumento da dispersão dos parâmetros das células solares para o Satélite de Coleta de Dados da MECB, uma vez que sua fluência equivalente em elétrons de 1MeV deverá ser da ordem de $1,0 \text{ E}+13 \text{ e/cm}^2$.

2.4 - ARRANJOS SOMBREADOS

Elementos estruturais do satélite freqüentemente sombreiam o arranjo fotovoltaico, como é o caso dos primeiros satélites da MECB.

Rauschenbach (1971) estudou a saída elétrica de arranjos sombreados através de simulação em computador, considerando sombra como a região do espaço que recebe iluminação nula. Não considerou a região de penumbra, e as transições entre áreas iluminadas e sombreadas são consideradas abruptas. Nesta referência e em Bardwell et alii (1980), em que foram estudados arranjos específicos, as células foram consideradas totalmente iluminadas ou totalmente sombreadas.

Neste trabalho considera-se o sombreamento parcial das células, porém com a mesma definição de sombra utilizada em Rauschenbach (1971). A corrente de curto-circuito da célula é proporcional à área iluminada (Rauschenbach, 1980).

2.5 - DIODOS DE PROTEÇÃO

Arranjos de células solares de uso espacial utilizam diodos como proteção aos fenômenos indesejáveis que prejudicam seu desempenho elétrico, como por exemplo a sombra.

2.5.1 - DIODO DE BLOQUEIO

Os diodos de bloqueio são utilizados com o objetivo de conservar a energia de cada módulo. São instalados entre módulos de células solares e o barramento de potência do sistema de tal forma que conduzem corrente do módulo iluminado para o barramento, mas bloqueiam a corrente do barramento para o módulo, quando a tensão do módulo de células solares é menor do que a tensão do barramento. Isto ocorre quando o módulo está na sombra.

A corrente que seria drenada pelo módulo, neste caso, depende da tensão do barramento e da forma da curva I-V do módulo.

A Figura 2.18 mostra uma ligação com diodos de bloqueio.

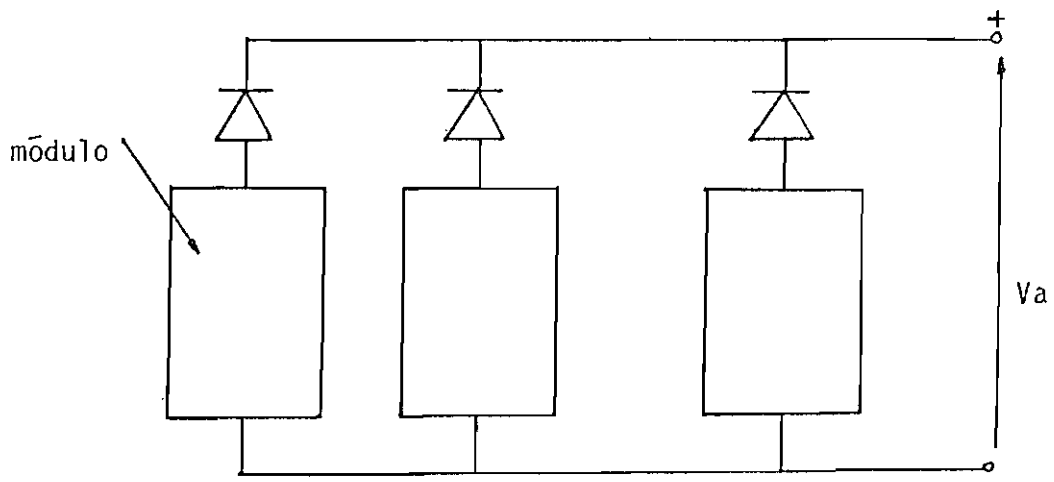
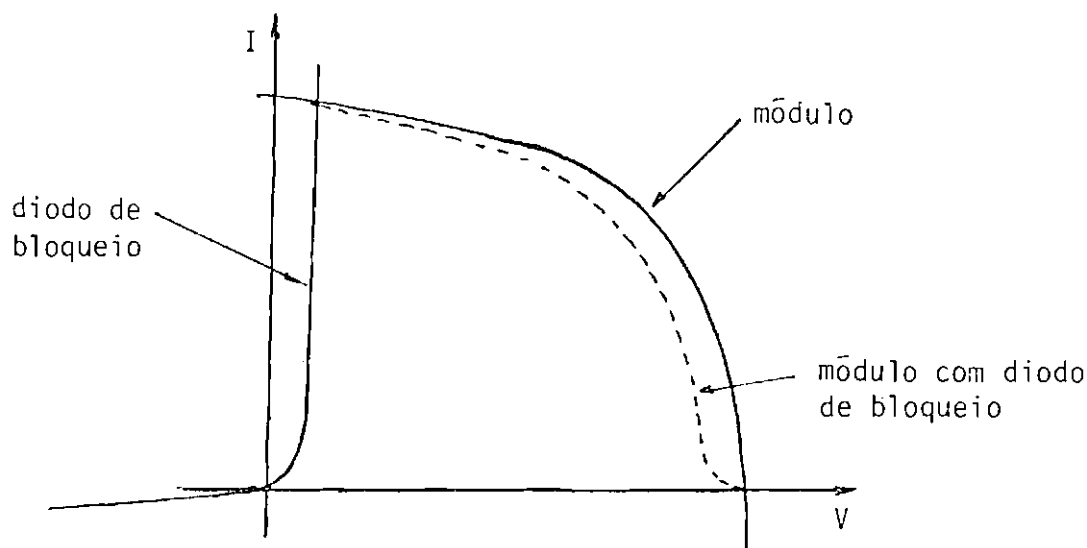


Fig. 2.18 - Diodos de bloqueio num arranjo fotovoltaico.

O uso de diodos de bloqueio acarreta uma perda de energia do módulo quando este fornece energia ao barramento. Esta perda se deve à polarização do diodo e é mostrada graficamente na Figura 2.19.



2.19 - Característica I-V de um módulo fotovoltaico com diodo de bloqueio.

Diodos de bloqueio são ainda úteis quando ocorrem falhas de curto-circuito em terminais ou substratos metálicos.

Neste trabalho considera-se que os módulos de um arranjo são interligados através de diodos de bloqueio com características reais e iguais aos utilizados pela empresa SPECTROLAB que fabrica painéis solares para uso espacial.

2.5.2 - DIODO PARALELO

Diodos paralelos são ligados a células solares ou submódulos de células solares de tal forma que, quando as células são iluminadas, os diodos são polarizados inversamente e quando as células são sombreadas, quebradas ou falham em circuito aberto, os diodos tornam-se diretamente polarizados, permitindo assim o fluxo de corrente na parte afetada da cadeia ou módulo preservando uma contribuição, mesmo que parcial, da cadeia ou módulo ao fornecimento de energia. A Figura 2.20 mostra uma célula solar conectada com um diodo paralelo onde se observa que, quando a célula solar opera com tensões diretas, o diodo paralelo

não influencia no circuito, por não conduzir corrente. Na situação de a célula solar estar inversamente polarizada, sua tensão fica limitada pela tensão de condução do diodo, garantindo assim que o ponto de operação da célula esteja numa região de segurança contra falha.

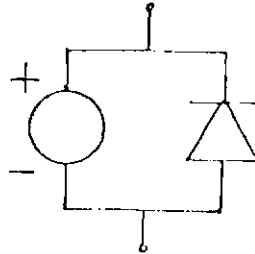


Fig. 2.20 - Célula solar ligada com diodo em paralelo.

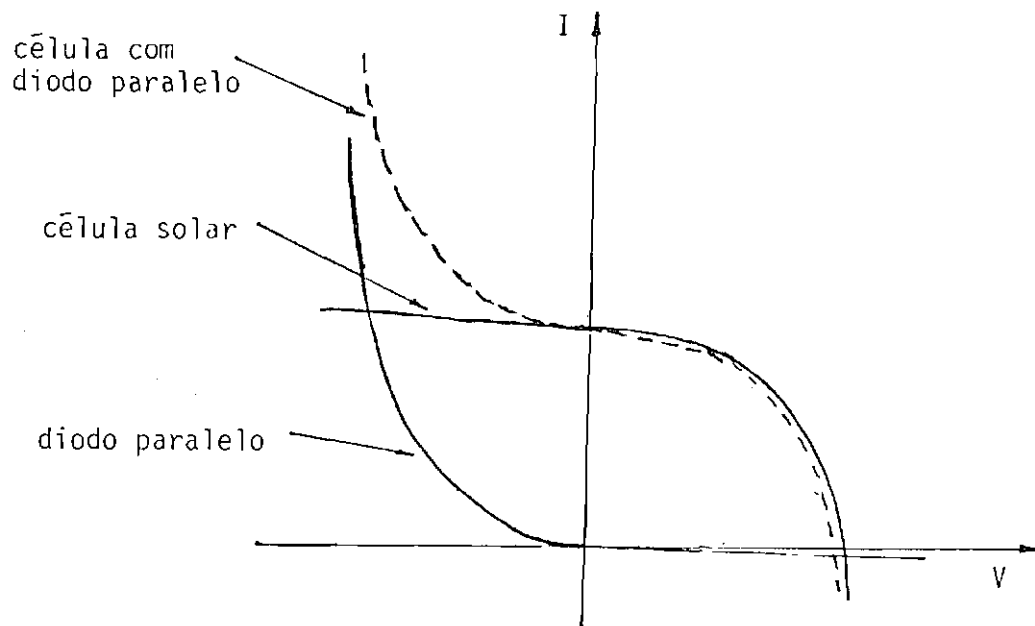


Fig. 2.21 - Curva I-V (linha tracejada) de uma célula solar com diodo em paralelo.

Consideram-se neste trabalho diodos paralelos de uso espacial com características de condução reais, medidas experimentalmente pela empresa SPECTROLAB. Pode-se esperar que a corrente de fuga máxima dos diodos não ultrapasse $1.0E-6$ A, permitindo que a característica inversa destes possa ser aproximada para fuga nula, com tensões inferiores a de ruptura.

Gupta e Milnes (1981) estudaram o efeito de diodos paralelos em arranjos com arquiteturas específicas, utilizando um modelo linearizado da célula solar. Neste trabalho estuda-se o efeito de diodos em paralelo, utilizando o modelo de célula solar da Equação 2.14.

Quando se deseja proteger as células solares individualmente com diodos em paralelo convencionais, ocorrem problemas relacionados com a disponibilidade de área, quantidade de furos no substrato e custos de componentes e montagem. Uma alternativa para o uso de diodos convencionais é a célula solar com diodo integrado. Estes dispositivos são constituídos de uma célula solar e de um diodo, fabricados na mesma pastilha. A perda de eficiência da célula, devido ao processo de fabricação é inferior a 1% da eficiência da célula que não possui diodo integrado (Diamond and Steele, 1970) e sua qualificação para o uso espacial foi verificada por Diamond (1972).

CAPÍTULO 3

ESTIMATIVA DA PERDA DE POTÊNCIA POR DESCASAMENTO EM PAINÉIS SOLARES DE USO ESPACIAL

Neste capítulo faz-se um estudo de perdas por descasamento aplicado ao arranjo fotovoltaico do satélite de coleta de dados previsto para a MECB. Inicialmente é efetuada uma descrição do arranjo fotovoltaico que inclui ligações em série e em paralelo de células, dimensões das células e parâmetros considerados para o modelo matemático. Em seguida descreve-se o programa simulador e, finalmente, é apresentado o estudo de perda de potência por descasamento.

3.1 - DESCRIÇÃO DO ARRANJO

O arranjo fotovoltaico do satélite de coleta de dados da MECB é composto de 8 painéis laterais e 1 painel antigeocêntrico. Cada painel lateral possui 68 células em série por 4 em paralelo, formando um módulo de 272 células. O painel antigeocêntrico é composto de 10 módulos de 68 células em série. O arranjo utiliza células solares de silício monocristalino 20 x 40mm. A Figura 3.1 mostra a distribuição geométrica das células solares e as Figuras 3.2 e 3.3 apresentam os esquemas elétricos dos painéis lateral e antigeocêntrico.

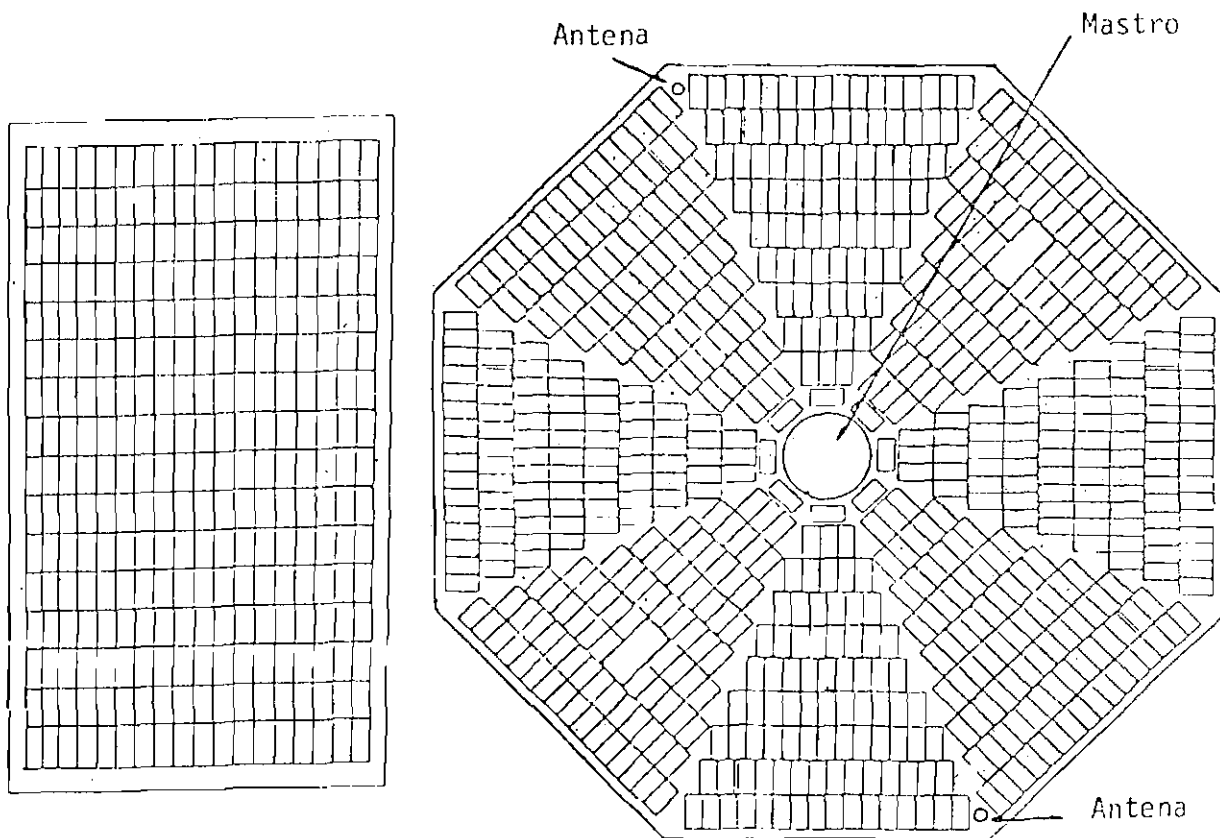


Fig. 3.1 - Painéis lateral e antigeocêntrico previstos para os primeiros satélites da MECB.

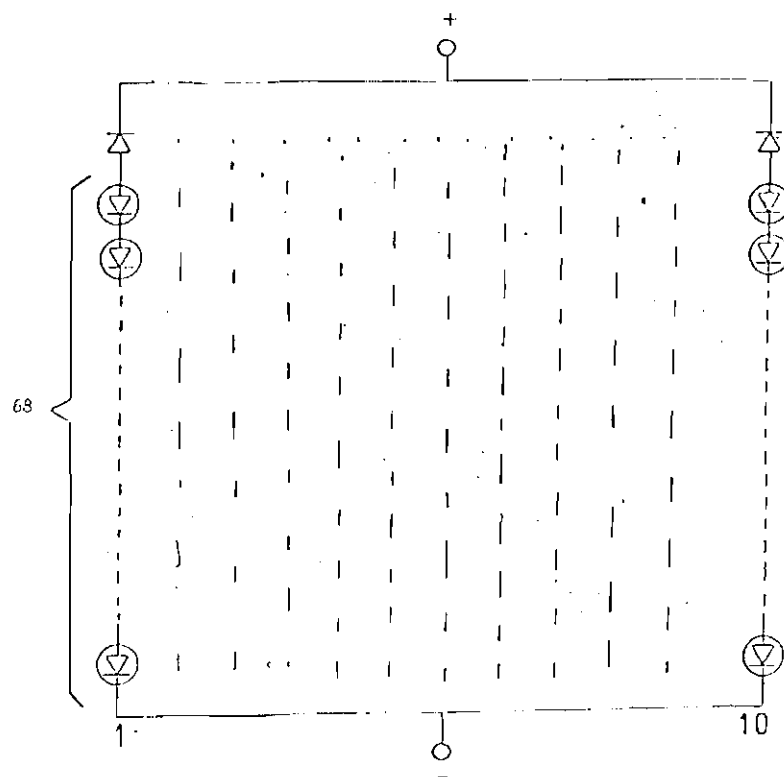


Fig. 3.2 - Esquema elétrico do painel antigeocêntrico.

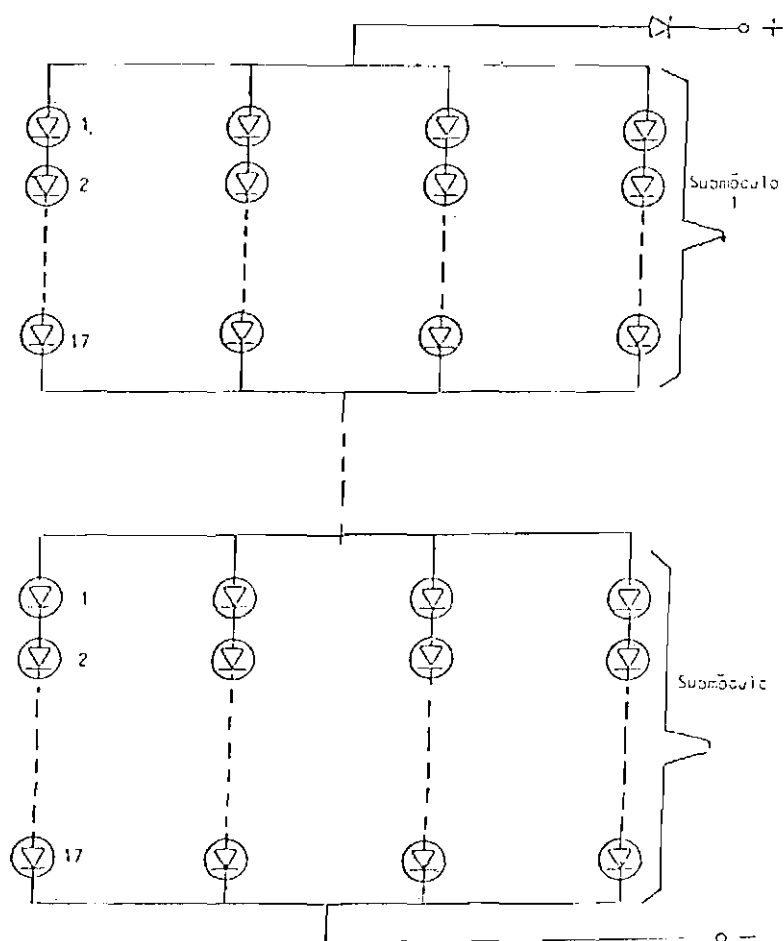


Fig. 3,3 - Esquema elétrico do painel lateral.

O estudo de perdas por descasamento aplicado ao satélite de coleta de dados da MECB foi feito através de um programa simulador implementado em computador digital, que é descrito na seção seguinte. Este programa determina a característica I-V de arranjos constituídos de células não-idênticas. Para simular o arranjo real geram-se aleatoriamente os parâmetros das células solares, levando em conta o circuito equivalente de Figura 2.3. Considera-se neste trabalho que os parâmetros têm uma distribuição normal com média e desvio padrão próprios do lote de células utilizado para fabricação do arranjo. A Figura 3.4 mostra uma distribuição normal.

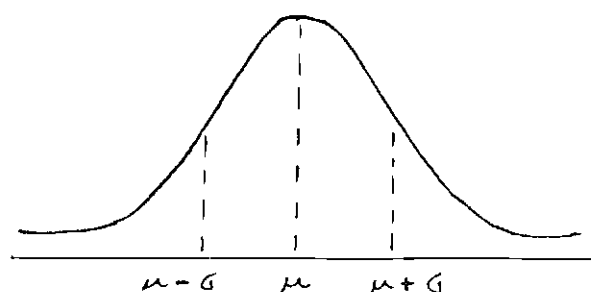


Fig. 3.4 - Distribuição normal com média e desvio padrão.

Os dados utilizados para as células solares foram obtidos da empresa SPECTROLAB que fabrica células e painéis solares de qualificação espacial, mostrados na Tabela 3.1.

Fazendo $K = 1$ na Equação 2.4 e impondo a condição de circuito aberto ($I = 0$), obtém-se a equação seguinte:

$$I_{mp}/V_{mp} = (I_L - I_{mp}) \cdot (q/A \cdot K \cdot T) \cdot (1 - (I_{mp}/V_{mp}) \cdot R_s). \quad (3.2)$$

Fez-se um estudo analítico da melhor célula através da Equação 3.1, considerando que a corrente fotogerada é aproximadamente igual à corrente de curto-circuito. Supondo a condição de melhor fator de idealidade do diodo ($A=1$), determina-se o valor da menor corrente de saturação, $I_0 = 1.0E - 11$ A.

TABELA 3.1

DADOS DE ESPECIFICAÇÃO DAS CÉLULAS SPECTROLAB
DE USO ESPACIAL (TIPO K6700)

I _{cc}	336mA	± 5%
V _{ca}	605mV	± 3%
V _{mp}	490mV	± 5%
P _{max}	156mW	± 10%

Através de um estudo semelhante da pior célula ($I_L = I_{cc}$ da pior célula e $A=1$), utilizando a Equação 3.2, determina-se o maior valor da resistência em série, $R_s=0,2$ ohm. Mantendo a condição de pior corrente fotogerada e estudando o caso de melhor resistência em série ($R_s=0$), determina-se o pior valor de fator de idealidade do diodo e da corrente de saturação, $A = 1, 15$ e $I_s = 7E - 10$ A, através das Equações 3.1 e 3.2.

A partir do estudo descrito definem-se faixas de valores possíveis para os parâmetros das células mostradas na Tabela 3.2.

TABELA 3.2

FAIXAS DE VALORES DOS PARÂMETROS DE UM LOTE
DE CÉLULAS DE USO ESPACIAL

PARÂMETRO	MÍNIMO	MÁXIMO
I_L	0,319A	0,353A
I_s	$1,10^{-11}$ A	$7,10^{-10}$ A
A	1	1,15
R_s	0Ω	0,2Ω

Neste trabalho fez-se o modelamento da característica inversa das células solares com base em dados experimentais fornecidos pela empresa Spectrolab. Através de carta, a mesma referência fornece os valores de tensão inversa destrutiva, os quais vão desde 40V até 80V, variando de célula para célula. A Tabela 3.3 apresenta os dados da característica I-V das células Spectrolab para tensões inversas até 35V.

TABELA 3.3

VALORES DE CORRENTE DIRETA PARA TENSÕES INVERSAS EM
CÉLULAS SOLARES 20X40 mm - SPECTROLAB

CÉLULA	TENSÕES INVERSAS						
k	5V	10V	15V	20V	25V	30V	35V
1	2 mA	4 mA	6 mA	8 mA	10 mA	12 mA	14 mA
2	1 mA	2 mA	4 mA	5 mA	7 mA	9 mA	12 mA
59	2 mA	4 mA	6 mA	8 mA	10 mA	12 mA	14 mA
108	1 mA	2 mA	2 mA	3 mA	4 mA	6 mA	7 mA
94	11 mA	22 mA	31 mA	41 mA	50 mA	60 mA	71 mA
89	1 mA	2 mA	3 mA	4 mA	5 mA	6 mA	10 mA
27	6 mA	13 mA	20 mA	27 mA	34 mA	40 mA	48 mA
41	5 mA	9 mA	14 mA	18 mA	23 mA	28 mA	33 mA
77	11 mA	23 mA	33 mA	42 mA	53 mA	63 mA	75 mA
103	2 mA	6 mA	9 mA	13 mA	16 mA	20 mA	24 mA

A partir dos dados da Tabela 3.3, é possível verificar uma certa linearidade nas características inversas da célula, conforme mostra a Figura 3.5.

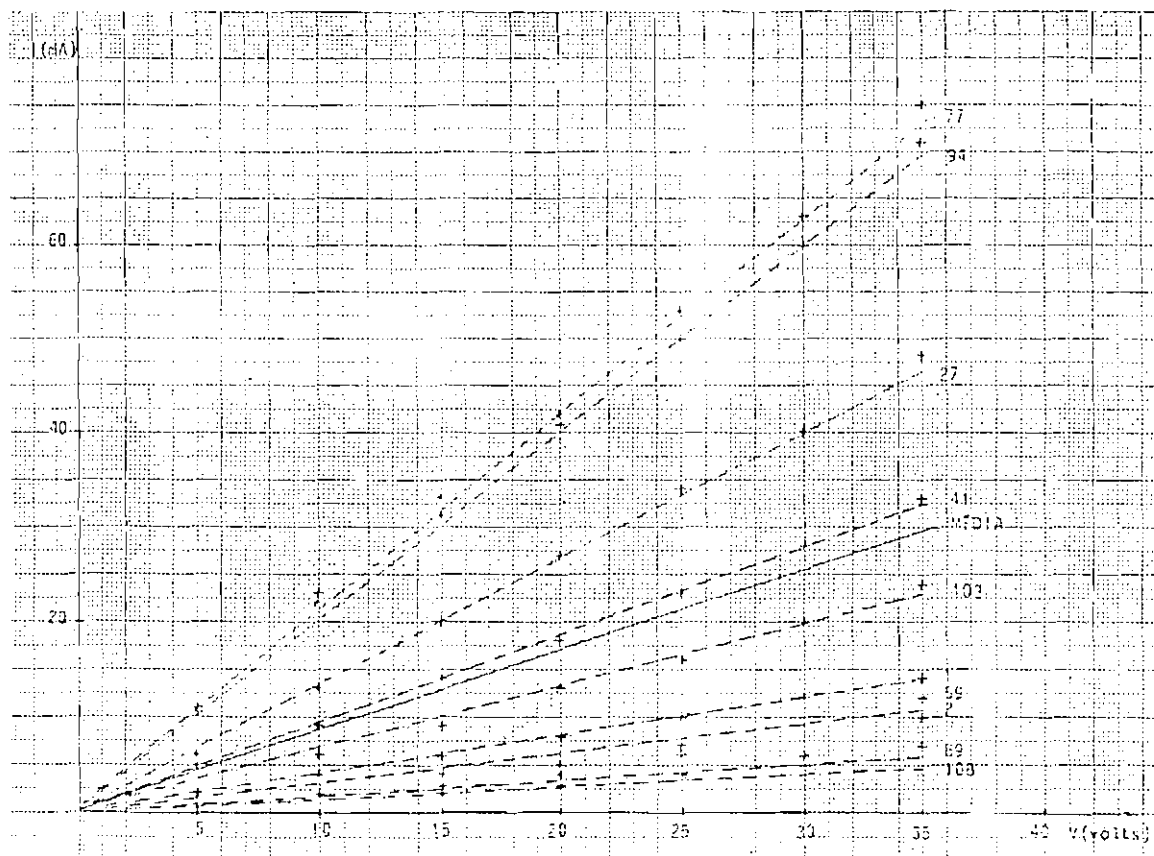


Fig. 3.5 - Curvas características inversas da amostra de células Spectrolab.

Portanto, considera-se neste trabalho uma característica inversa linear das células solares, conforme a Equação 3.3:

$$I = G.V, V < 0 \quad (3.3)$$

onde G é a condutância inversa da célula.

Da Tabela 3.3 e da Figura 3.5 determina-se a faixa de valores aproximada de G como $0,19E-3 \leq G \leq 2,1E-3$ e tendo como valor médio $0,85E-3$. Define-se a partir destes dados e dos constantes da Tabela 3.2 distribuições gaussianas dos valores dos parâmetros, para geração aleatória, tal que simulem um lote de células real. Os valores definidos para média e desvio padrão são apresentados na Tabela 3.4. Cabe salientar que as considerações feitas para definição de distribuições gaussianas foram: valor mínimo do parâmetro igual à média - desvio padrão e valor máximo do parâmetro igual à média + desvio padrão.

TABELA 3.4

MÉDIA E DESVIO PADRÃO DOS PARÂMETROS DE UM
LOTE DE CÉLULAS SOLARES REAL

PARÂMETRO	MÉDIA	DESVIO PADRÃO
I_L	336mA	16,8 mA
$\text{Log } I_0$	- 10	- 1,0
A	1,075	0,075
R_s	0,1 Ω	0,1
G	0,85.10 ⁻³ A/V	0,25.10 ⁻³ A/V

A condição de que as distribuições de parâmetros da Tabela 3.4 caracterizam o universo de valores admissíveis não garante que numa geração aleatória de parâmetros de células solares a combinação de les resulte numa característica I-V dentro dos padrões da Tabela 3.1. Tendo em vista este detalhe, implementou-se uma geração aleatória em duas etapas, sendo a primeira a geração propriamente dita e a segunda uma comparação de I_{cc} , V_{ca} , V_{mp} e P_{max} com a Tabela 3.1.

Dessa forma, os valores dos parâmetros físicos de uma célula são gerados aleatoriamente dentro das respectivas faixas de tolerância e, em seguida, esta mesma célula tem suas características elétricas comparadas com as faixas de referência. Se estiverem dentro dos padrões são incluídas no arranjo, caso contrário uma nova é gerada e comparada.

3.2 - PROGRAMA SIMULADOR

Tendo em vista a análise das perdas por descasamento em arranjos fotovoltaicos, foi desenvolvido um programa para computador digital, usando linguagem Algol, que possibilita a análise de combinações em série e em paralelo de células solares cujos parâmetros são gerados aleatoriamente. A análise se baseia nos conceitos de módulo, submódulo e cadeia descritos na Subseção 2.2.3. Desta forma determina-se a característica I-V dos submódulos e finalmente a do módulo.

A Figura 3.6 apresenta a seqüência de operações básicas para obter a característica I-V de um módulo.

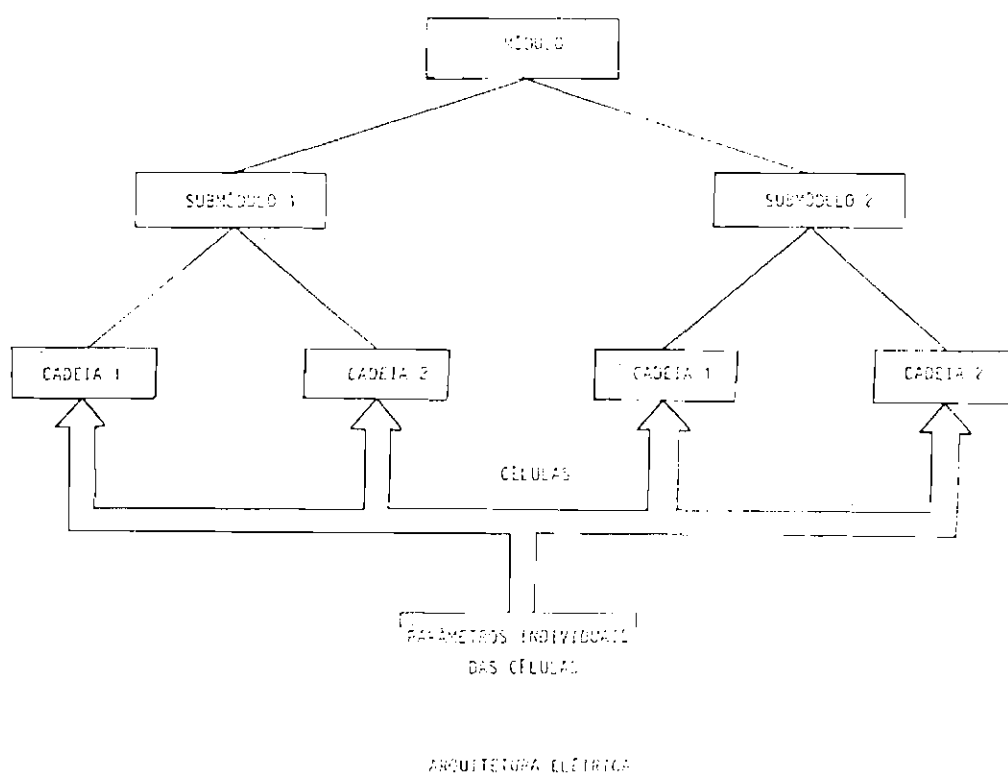


Fig. 3.6 - Seqüência de operações para cálculo da perda por descasamento de um módulo.

A característica I-V das cadeias é determinada analiticamente usando as Equações 2.16 a 2.24. A partir deste modelo a cadeia fica armazenada no computador na forma de um conjunto de pares de pontos I-V.

Para a determinação da característica I-V de submódulos, deve-se basear nos dados das cadeias, utilizando o princípio que, num submódulo, as cadeias estão a uma mesma tensão, porém com correntes próprias. Assim, determina-se a corrente de um submódulo a uma dada tensão pela soma das correntes de cada cadeia na mesma tensão. A curva I-V do submódulo é armazenada no computador na forma de um conjunto de pares de pontos. A inviabilidade desta etapa do procedimento ser efetuada de forma analítica advém da natureza transcendental da equação da cadeia, sendo $I_c = f(V_c, I_c)$, onde V_c é a tensão da cadeia e I_c é a corrente da cadeia.

Para a determinação da característica I-V do módulo, utiliza-se o princípio de que num módulo a uma dada corrente tem-se a mesma corrente em todos os submódulos, porém, com tensões próprias. Assim, a tensão do módulo a uma dada corrente é a soma das tensões dos submódulos na mesma corrente.

3.2.1 - DESCRIÇÃO DO ALGORITMO

O programa simulador analisa o desempenho de um arranjo fotovoltaico partindo da geração de cadeias; daí em diante, monta submódulos e finalmente analisa o módulo fotovoltaico. A sub-rotina básica do programa é a que gera cadeias. A Figura 3.7 mostra o fluxograma da sub-rotina cadeia.

A geração aleatória de parâmetros normalmente distribuídos, usada neste programa, utiliza o método apresentado em Shannon (1975), o qual é bastante rápido e tem como princípio a geração de um par de números aleatórios com distribuição normal de média zero e desvio padrão 1, a partir de 2 números aleatórios (r_1 e r_2) entre 0 e 1 de uma distribuição uniforme. O procedimento prossegue com o cálculo de v_1 , v_2 e s onde:

$$v_1 = 1 + 2 \cdot r_1, \quad (3.4)$$

$$v2 = 1 + 2 \cdot r2, \quad (3.5)$$

$$s = v1^{**} 2 + v2^{**} 2. \quad (3.6)$$

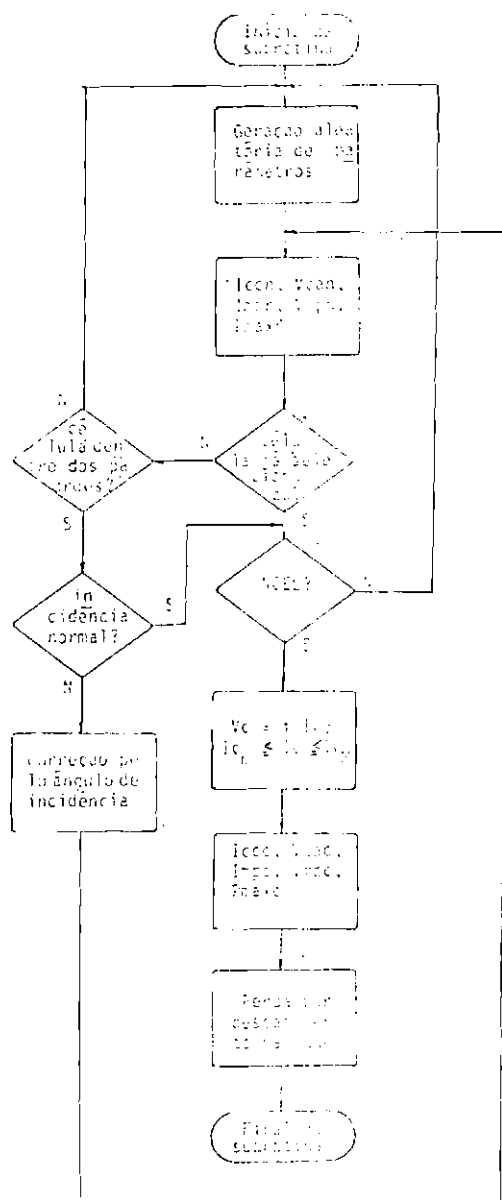


Fig. 3.7 - Fluxograma funcional da sub-rotina cadeia.

Se $s < 1$, o procedimento prossegue, caso contrário retorna-se à geração de novos valores de $r1$ e $r2$.

O cálculo do par de números aleatórios normalmente distribuídos (x_1 e x_2) é feito da seguinte forma:

$$x_1 = v_1 \cdot \sqrt{(-2 \cdot \ln s)/s} , \quad (3.7)$$

$$x_2 = v_2 \cdot \sqrt{(-2 \cdot \ln s)/s} . \quad (3.8)$$

Os números aleatórios x_1 e x_2 são utilizados para a geração dos parâmetros das células solares com valores específicos de média e desvio padrão, conforme a Equação 3.9:

$$P = \mu_p + x \cdot \sigma_p \quad (3.9)$$

onde:

P = valor do parâmetro,

μ_p = média da distribuição do parâmetro,

σ_p = desvio padrão da distribuição do parâmetro,

x = número aleatório de uma distribuição normal com $\mu = 0$ e $\sigma = 1$.

Depois de gerados os parâmetros corrente fotogerada, resistência em série, corrente de saturação, fator de idealidade do diodo e condutância inversa, determinam-se os pontos principais da curva característica I-V da célula, ou seja, I_{ccn} , V_{can} , I_{mpn} , V_{mpn} , P_{maxn} .

Em seguida, é feita uma comparação das características da célula com um padrão preestabelecido de faixas de valores admissíveis de I_{cc} , V_{ca} , I_{mp} , V_{mp} e P_{max} . Se a célula gerada não estiver dentro dos padrões, o programa retorna ao início da sub-rotina e repete o procedimento, caso contrário segue normalmente.

Se a incidência não é normal, faz-se uma correção do valor de IL através do fator mostrado na Figura 2.12. Em seguida, determinam-se os novos valores de I_{ccn} , V_{can} , V_{mpn} , I_{mpn} e P_{maxn} .

Depois de o processo descrito ter sido repetido para o número de células especificado para a cadeia, é determinada a sua característica I-V, utilizando para isto as Equações 2.16 e 2.24. O método de cálculo é analítico, porém, a curva é armazenada na forma de pares de valores I-V para correntes de cadeia que variam dentro de uma faixa predeterminada, ficando entre os valores mínimo e máximo de I_c (I_{cm} e I_{cM}). Considerando que tanto a forma da curva característica I-V de uma cadeia como a de uma célula possuem duas regiões distintas no semiplano direito do plano I-V (região de derivada baixa e região de derivada alta), são utilizados dois incrementos de I_c adequados a cada região. Para a região de derivada alta, o incremento é maior que o da região de derivada baixa.

Uma vez obtida a curva característica I-V da cadeia, determinam-se os pontos principais da curva, ou seja, I_{ccc} , V_{cac} , V_{mpc} , I_{mpc} e P_{maxc} . Finalmente obtém-se o valor da perda de potência devido ao descasamento das células solares.

A sub-rotina cadeia é chamada o número necessário de vezes dentro da sub-rotina submódulo, cujo fluxograma é mostrado na Figura 3.8.

O papel desta sub-rotina é montar submódulos com cadeias geradas pela sub-rotina CADEIA. Esta sub-rotina é acessada um número especificado de vezes até gerar as cadeias necessárias para a constituição do submódulo.

Uma vez disponíveis as curvas características I-V das cadeias, armazenadas na forma de pares I-V, procede-se à determinação da curva I-V do submódulo. O princípio utilizado é o de que num submódulo as cadeias operam em tensões iguais e correntes próprias. Assim, uma

vez fixada uma tensão, a corrente do submódulo é a soma das correntes das cadeias naquela tensão. Esta operação é efetuada para uma faixa de valores de tensão entre os valores de tensão de submódulo mínima e tensão de submódulo máxima (V_{smm} e V_{smM}).

Em seguida, são determinados os pontos principais da curva característica I-V do submódulo, ou seja, I_{ccsm} , V_{mpsm} , I_{mpsm} , V_{casm} e P_{maxsm} .

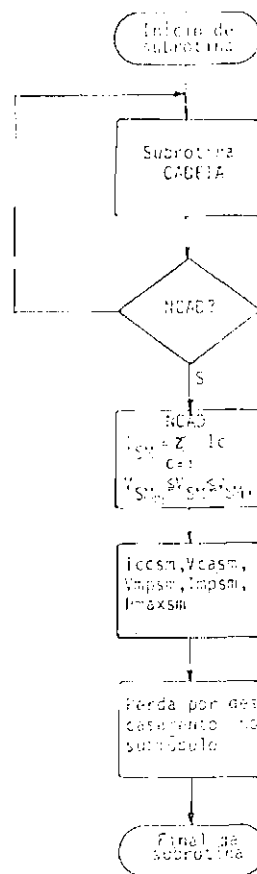


Fig. 3.8 - Fluxograma funcional da sub-rotina submódulo.

Finalmente, obtém-se a perda de potência do submódulo relativa ao descasamento das células solares. Neste cálculo são levadas em consideração a potência máxima do submódulo e a soma das potências máximas de cada célula constituinte do submódulo. Esta sub-rotina é acessada pelo programa principal um número de vezes especificado. O fluxograma do programa principal é apresentado na Figura 3.9.

O programa principal determina e armazena a curva característica I-V de um módulo fotovoltaico, constituído de um número especificado de submódulos. Os submódulos são montados pela sub-rotina correspondente.

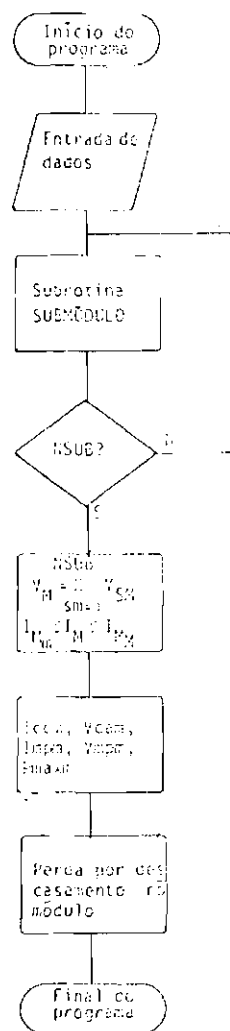


Fig. 3.9 - Fluxograma funcional do programa simulador.

A partir das curvas características dos submódulos armazenadas na forma de pares I-V, determina-se a curva I-V do módulo. Num módulo os submódulos operam numa mesma corrente, porém, a tensões próprias. Assim, para um dado valor de corrente de módulo, a tensão do módulo é a soma das tensões dos submódulos naquela particular corrente de módulo.

Em seguida são determinados os valores de I_{ccm} , V_{cam} , I_{mpm} , V_{mpm} e P_{maxm} e, finalmente, determina-se a perda de potência relativa ao descasamento, considerando a potência máxima do módulo e a soma das potências máximas das células solares constituintes do módulo fotovoltaico.

3.2.2 - ENTRADA DE DADOS

O programa simulador usa dados de entrada referentes à células solares utilizadas e à arquitetura elétrica do módulo.

Quanto às células solares, os dados de entrada se classificam em dois tipos: valores de média e desvio padrão de cada parâmetro para geração aleatória e faixa de valores admissíveis de I_{cc} , V_{ca} , I_{mp} , V_{mp} e P_{max} para seleção de células. Para o primeiro tipo utilizam-se neste trabalho os dados da Tabela 3.4. Para o segundo tipo utilizam-se os valores extremos da Tabela 3.1, considerando a tolerância especificada.

Para a determinação da arquitetura elétrica do módulo em estudo, são especificados, na forma de dados de entrada, o número de submódulos (NSUB), número de cadeias por submódulos (NCAD) e o número de células por cadeia (NCEL).

Como mencionado na Subseção 3.2.1, a determinação da curva I-V de uma cadeia é efetuada para uma faixa de valores de corrente, cujos extremos são especificados como I_{cm} e I_{cM} . São especificados ainda os dois incrementos I_{Ic} e I_{Ic} , sendo que o primeiro é utilizado para

determinar pares I-V na região de derivada alta, e o segundo, menor, é utilizado na região de derivada baixa. O ponto de mudança de incremento é determinado por um valor de tensão de referência (V_{refc}) que é comparado, passo a passo, com a diferença de tensão entre os dois últimos pontos calculados. A mudança ocorre quando este valor excede a referência.

Analogamente, porém, com varredura em tensão (V_{smm} , V_{smM} , IV_{sm} , $IV_{sm'}$) e referência em corrente (I_{refsm}), são especificados dados de entrada para determinação da curva I-V de submódulos.

Para o módulo, o procedimento é semelhante ao utilizado para cadeia com dados de entrada I_{mm} , I_{mM} , $II_{m'}$, V_{refm} .

Para correção da corrente fotogerada com relação ao ângulo de incidência, especifica-se um fator que multiplica IL .

3.2.3 - SAÍDA DE RESULTADOS

O programa módulo tem capacidade de apresentar como opção de saída uma tabela de parâmetros e dados da curva I-V de cada célula gerada. Como opção existe também a possibilidade de ter na saída os conjuntos de pares I-V das cadeias e submódulos constituintes do módulo, bem como do próprio módulo. Podem ainda ser apresentados, após a determinação da curva de uma cadeia, submódulo ou módulo os valores de corrente de curto-circuito, tensão de circuito aberto, corrente e tensão de máxima potência e potência máxima da curva.

Ao final do programa é apresentado o valor da perda de potência relativa ao descasamento das células.

Um exemplo de recurso de saída é apresentado na Tabela 3.5 que mostra os parâmetros e dados da curva I-V de 17 células geradas aleatoriamente.

TABELA 3.5

DADOS DE CÉLULAS GERADAS ALEATORIAMENTE PELO PROGRAMA MÓDULO

N	I_L	R_S	LAMBDA	IO	VCA	VMP	IMP	PMAX
1	0,3233	0,0432	36,4159	$1,01E^{-10}$	0,601	0,507	0,307	0,155
2	0,3416	0,0640	36,0125	$1,48E^{-10}$	0,599	0,497	0,323	0,161
3	0,3347	0,0499	35,7175	$1,64E^{-10}$	0,600	0,503	0,317	0,159
4	0,3772	0,0580	36,6487	$7,57E^{-11}$	0,605	0,507	0,310	0,157
5	0,3257	0,0734	36,9499	$9,52E^{-11}$	0,594	0,493	0,308	0,152
6	0,3301	0,0254	37,2246	$9,30E^{-11}$	0,591	0,503	0,313	0,158
7	0,3218	0,0842	35,8722	$7,97E^{-11}$	0,617	0,510	0,305	0,155
8	0,3207	0,0607	37,0225	$5,73E^{-11}$	0,606	0,508	0,304	0,154
9	0,3418	0,0456	35,4272	$1,50E^{-10}$	0,608	0,511	0,324	0,165
10	0,3326	0,0455	35,8131	$1,17E^{-10}$	0,608	0,511	0,315	0,161
11	0,3405	0,0890	36,6542	$5,27E^{-11}$	0,616	0,508	0,322	0,164
12	0,3522	0,0392	36,6384	$9,44E^{-11}$	0,602	0,508	0,334	0,170
13	0,3349	0,0424	34,8874	$2,47E^{-10}$	0,603	0,506	0,317	0,160
14	0,3294	0,0536	37,3167	$9,10E^{-11}$	0,590	0,494	0,312	0,154
15	0,3449	0,0127	37,1100	$9,78E^{-11}$	0,592	0,508	0,328	0,166
16	0,3277	0,0564	34,7577	$3,16E^{-10}$	0,597	0,497	0,309	0,154
17	0,3419	0,0266	36,0375	$1,33E^{-10}$	0,601	0,511	0,324	0,166

3.3 - ESTUDOS DE PERDAS POR DESCASAMENTO

Fez-se um estudo de perdas por descasamento em módulos fotovoltaicos aplicado ao satélite de coleta de dados da MECB, com o objetivo de determinar a magnitude da perda e sua dependência com relação à arquitetura elétrica.

Inicialmente foram feitas simulações para estudar o descasamento em cadeias e submódulos e, finalmente, em combinações em série e em paralelo mais complexas.

3.3.1 - PERDAS POR DESCASAMENTO EM CADEIAS DE CÉLULAS SOLARES

Fez-se um estudo das perdas por descasamento em cadeias de células solares para um número de células variável a fim de verificar, além da magnitude da perda, sua dependência com o número de células.

Foram utilizados os dados da Tabela 3.4, de média e desvio padrão, para os parâmetros das células da cadeia.

O número máximo de células por cadeia do arranjo fotovoltaico do satélite é 68.

Considerando que a geração dos parâmetros das células é feita aleatoriamente, as simulações foram efetuadas levando em conta alguns requisitos estatísticos. As considerações para determinação do tamanho da amostra foram:

a) teorema do limite central,

b) probabilidade de 95% da média calculada \bar{x} estar no intervalo.

$$\mu - d \leq \bar{x} \leq \mu + d,$$

c) erro máximo (d) da média calculada igual a $\sigma/4$.

A partir destes requisitos calculou-se o tamanho da amostra como $n=61$ (Shannon, 1975).

A Figura 3.10 apresenta os resultados de simulações de cadeias de células solares, sendo que num eixo tem-se o número de células da cadeia e no outro a perda de potência relativa ao descasamento em termos de média e desvio padrão da amostra.

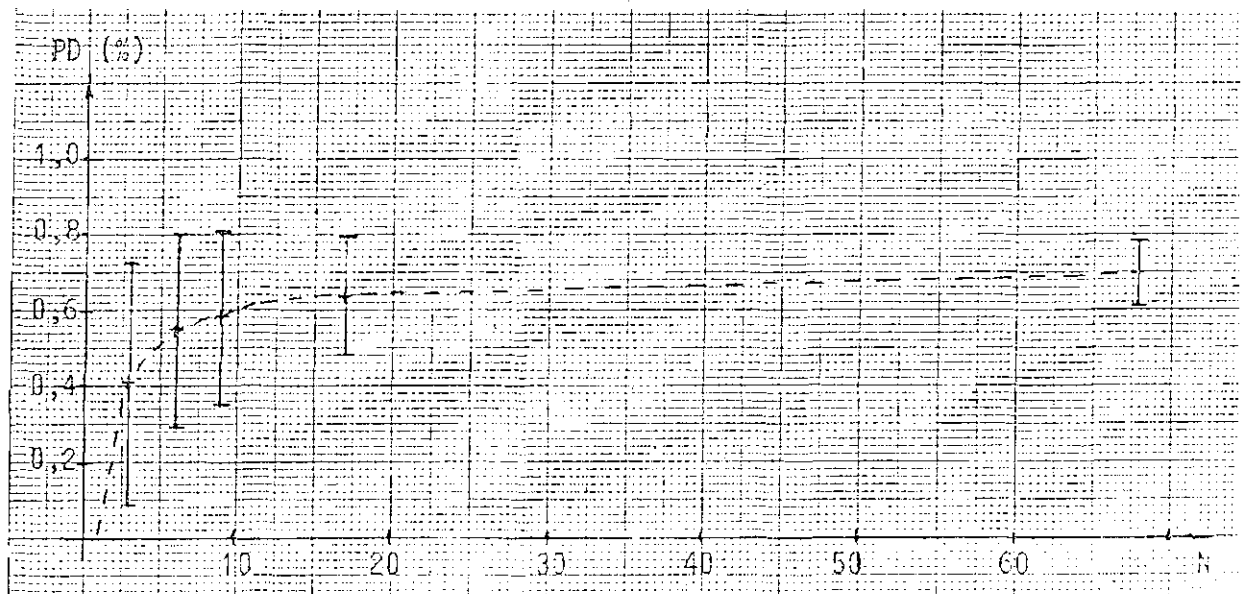


Fig. 3.10 - Perda de potência por descasamento em cadeias em função do número de células.

3.3.2 - PERDAS POR DESCASAMENTO EM SUBMÓDULOS DE CÉLULAS SOLARES

O estudo de perdas por descasamento em submódulos de células solares foi feito considerando os mesmos requisitos estatísticos utilizados no estudo de perdas por descasamento em cadeias. Portanto, o tamanho da amostra utilizado foi $n=61$.

Assim como na Subseção 3.3.2, os dados de entrada relativos aos valores de média e desvio padrão dos parâmetros das células utilizados na geração aleatória foram extraídos da Tabela 3.4.

Esta parte do estudo se limitou a considerar submódulos formados pela ligação em paralelo de um certo número de células.

A influência do número de células na perda de potência do submódulo é apresentada na Figura 3.11.

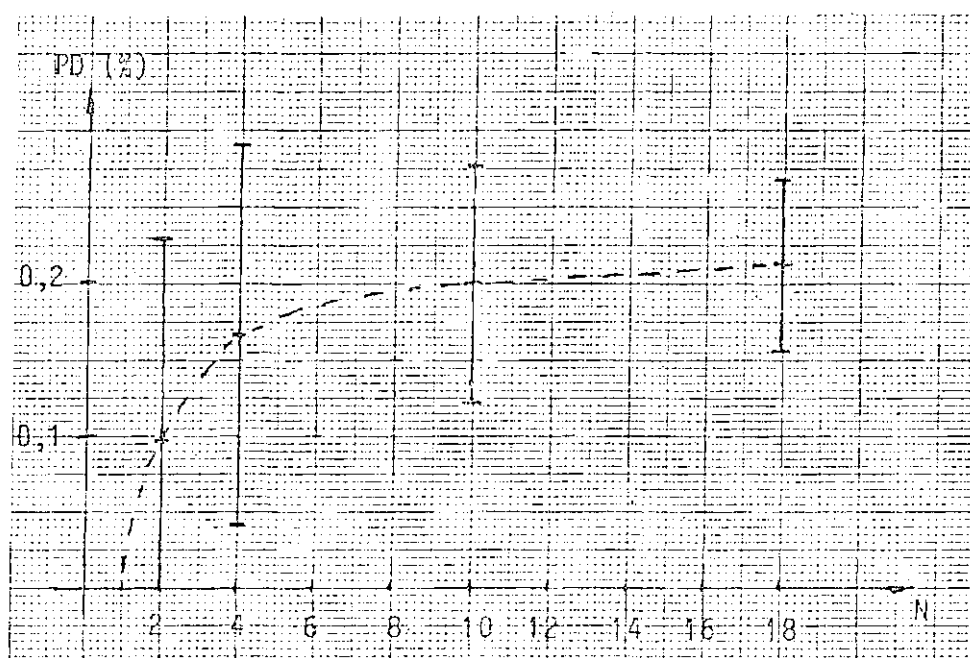


Fig. 3.11 - Perda de potência por descasamento em submódulos em função do número de células.

3.3.3 - PERDAS POR DESCASAMENTO EM MÓDULOS DE CÉLULAS SOLARES

O estudo de perda de potência por descasamento em módulos fotovoltaicos foi aplicado ao arranjo fotovoltaico do satélite de coleta de dados da MECB. Foi considerado o maior módulo do arranjo, ou seja, o montado no painel lateral. Serão efetuadas configurações que têm o mesmo número aproximado de células.

Foram consideradas quatro opções de arquitetura elétrica do módulo para verificar sua influência nas perdas por descasamento, a saber:

- a) módulo constituído de um único submódulo de 4 cadeias de 68 células,
- b) módulo constituído de 4 submódulos de 4 cadeias de 17 células,
- c) módulo constituído de 8 submódulos de 4 cadeias de 9 células,
- d) módulo constituído de 12 submódulos de 4 cadeias de 6 células.

A Tabela 3.5 apresenta os resultados das simulações, com tamanho da amostra $n=61$, para as quatro opções citadas em termos de média e desvio padrão.

TABELA 3.6

PERDA DE POTÊNCIA POR DESCASAMENTO NUM MÓDULO FOTOVOLTAICO
COM DIFERENTES CONFIGURAÇÕES ELÉTRICAS

OPÇÃO	NÚMERO DE SUBMÓDULOS	NÚMERO DE CADEIAS POR SUBMÓDULOS	NÚMERO DE CÉLULAS POR CADEIA	PERDA DE POTÊNCIA MÉDIA (%)	DESVIO PADRÃO (%)
a	1	4	68	0,704	0,078
b	4	4	17	0,701	0,043
c	8	4	9	0,707	0,045
d	12	4	6	0,706	0,042

Os requisitos estatísticos e as distribuições de parâmetros utilizados foram os mesmos das subseções anteriores.

3.3.4 - COMENTÁRIOS GERAIS

As simulações efetuadas e descritas neste capítulo revelaram que a perda por descasamento em cadeias não varia linearmente com o número de células, mas tendem para 0,7% ($N_s = 68$) no caso das células espaciais consideradas. Para submódulos constituídos de cadeias de uma célula, o mesmo fenômeno se verifica e o valor para $N_p = 20$ é da ordem de 0,3%.

O estudo da perda por descasamento no painel lateral revelou que a arquitetura elétrica do módulo não a influencia e seu valor aproximado é de 0,7%.

De maneira geral pode-se dizer que a perda de potência por descasamento em cada módulo é inferior a 1%.

CAPÍTULO 4

ESTIMATIVA DA PERDA DE POTÊNCIA POR SOMBRA EM PAINÉIS SOLARES

Elaborou-se um estudo da perda de potência relativa à sombra em painéis solares aplicado ao arranjo fotovoltaico descrito na Seção 3.1. Os efeitos de sombra recaem sobre o painel antigeocêntrico devido à presença de um mastro no centro e duas antenas nas bordas do painel, simetricamente posicionadas em relação ao mastro, como mostra a Figura 3.1.

Este capítulo apresenta um modelamento matemático da célula solar com sombreamento parcial, um estudo da geometria da sombra no painel, o programa simulador e os resultados obtidos, por simulação, da perda de potência por sombra no painel antigeocêntrico. Considera-se o uso de diodos paralelos para minimização de perdas.

4.1 - MODELAMENTO MATEMÁTICO DE UMA CÉLULA SOLAR SOB SOMBRA PARCIAL

Como descrito no Capítulo 2, uma célula solar pode ser matematicamente equacionada através de um circuito equivalente caracterizado por alguns parâmetros, como corrente fotogerada, fator de idealidade do diodo, corrente de saturação inversa e resistência em série. Quando um célula é sombreada parcialmente, o seu circuito equivalente torna-se uma associação em paralelo de duas células distintas: uma iluminada e outra no escuro, cada uma delas com parâmetros individuais e distintos daqueles originais.

Dada a dificuldade de modelar a variação de cada parâmetro em função da porção iluminada da célula, partiu-se do principal parâmetro, corrente fotogerada, e em seguida determinou-se um fator de correção para a corrente de diodo da forma que é descrita a seguir.

Compararam-se experimentalmente as curvas I-V de uma célula solar para vários níveis de iluminação com as curvas da mesma célula sombreada parcialmente. A célula utilizada foi fabricada pela Solarex, com tecnologia espacial, e o simulador solar utilizado é da marca Oriel, modelo 6732/6741, com lâmpada de xenônio de 1000 W.

Foram medidas as curvas características I-V para níveis de iluminação correspondentes a situações de 1/4, 1/2, 3/4 e 1 AMO.

As medidas com sombra parcial foram efetuadas, cobrindo 1/4, 1/2 e 3/4 da área total da célula.

Como resultado obteve-se o gráfico da Figura 4.1, que mostra a curva I-V da célula em AMO, cuja corrente de curto-circuito é 290 mA, as curvas para níveis de iluminação variáveis e as curvas de sombreamento parcial com áreas iluminadas variáveis.

Deve-se ressaltar que uma célula a um nível de iluminação que seja uma fração de AMO recebe a mesma energia que uma célula em AMO com a mesma fração de área iluminada em relação à área total da célula. No entanto, observa-se nos resultados que o sombreamento parcial provoca uma perda adicional na energia de saída, que pode ser entendida como a fuga de corrente pela região sombreada da célula. Para imular este efeito foi utilizado um fator multiplicativo da corrente do diodo na equação da célula solar, que matematicamente é equivalente a um fator multiplicativo da corrente de saturação inversa (I_0).

A comparação entre as curvas da Figura 4.1 sugere que o desvio apresentado é da mesma natureza que as modificações devidas ao parâmetro I_0 da Figura 2.9. Modificações na corrente de saturação de uma célula provocam uma diminuição na potência máxima e tensão de circuito aberto, permanecendo inalterada a corrente de curto-circuito como mostra a Figura 4.2.

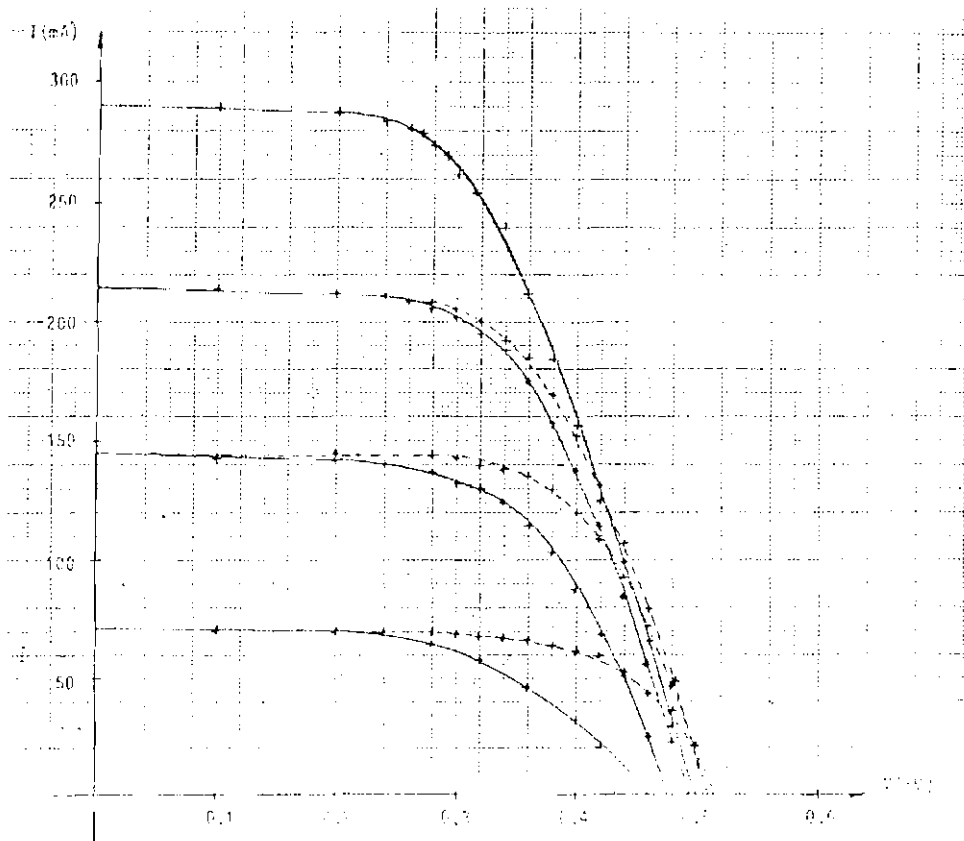


Fig. 4.1 - Característica I-V de uma célula solar para variações de nível de iluminação e área iluminada.

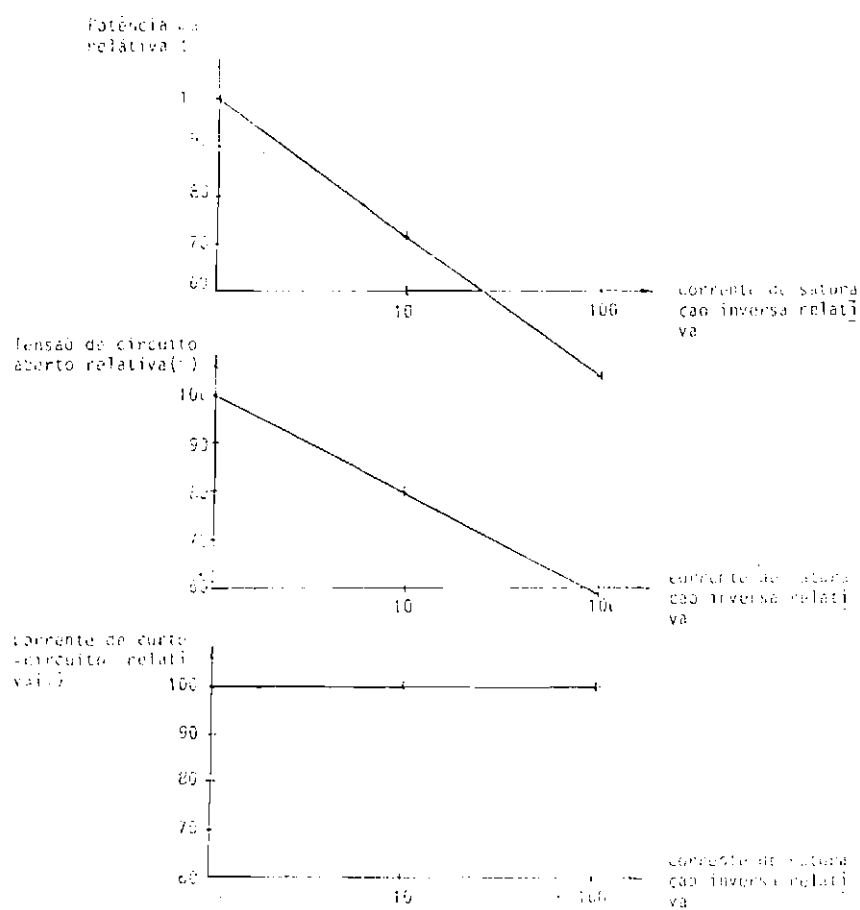


Fig. 4.2 - Características de desempenho de uma célula solar para variações de I_0 .

FONTE: Kennerude (1969).

Tomando por base as curvas da Figura 4.1, chegou-se ao gráfico da Figura 4.3 que mostra a razão entre as potências máximas com sombra e com nível de iluminação equivalente em função da área não-sombreada.

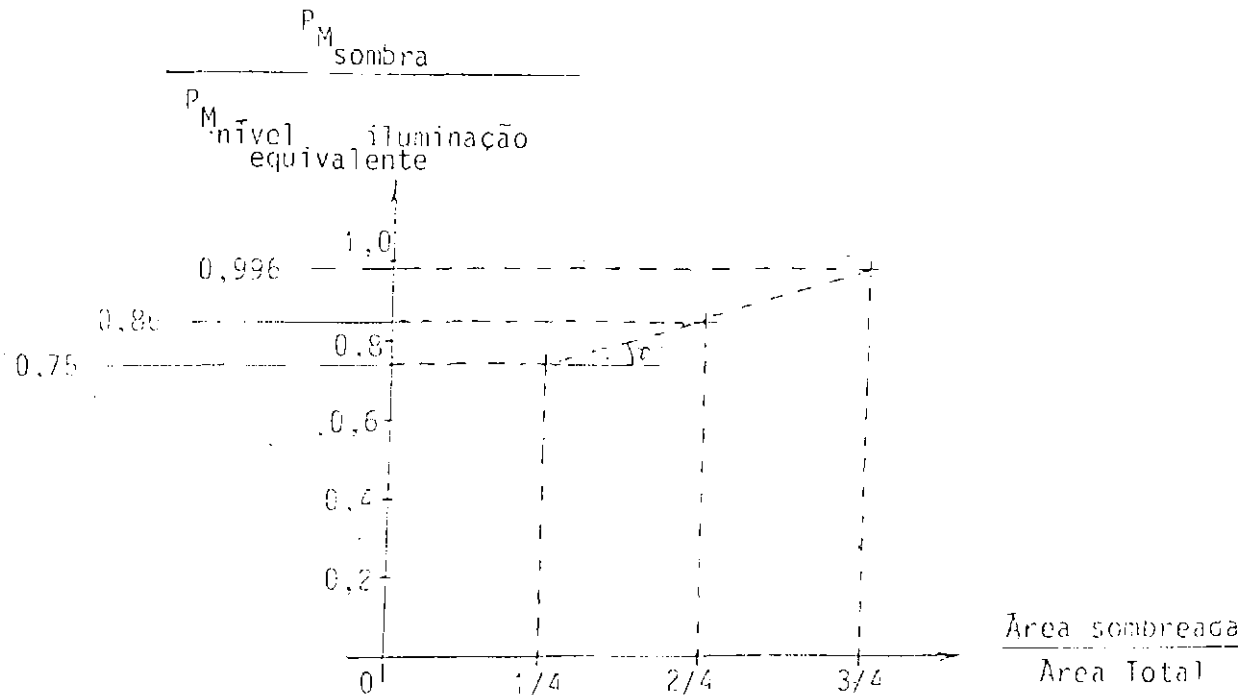


Fig. 4.3 - Comparação entre a razão potência máxima como sombra e potência máxima ao nível de iluminação equivalente em função da área não-sombreada.

Fez-se um estudo semelhante ao de Kennerud (1969) apresentado na Figura 4.2. Utilizando dados de uma célula solar de qualificação espacial, 20 X 40 mm, obteve-se o gráfico da Figura 4.4.

Do que foi exposto conclui-se que a equação que representa uma célula sombreada deve ser como a 4.2, acrescida de um fator multiplicativo da corrente de saturação.

Para estabelecer o fator multiplicativo da corrente de saturação (K_S), foram utilizados os resultados das Figuras 4.3 e 4.4. Da Figura 4.3 extraíram-se os valores de correção de potência máxima desejados para os casos de área iluminada 1/4, 1/2 e 3/4 da área total da

célula. A partir destes valores recorreu-se à Figura 4.4. que fornece os valores de corrente de saturação inversa relativa. Com estes resultados elaborou-se um gráfico do fator de correção, KS, em função da razão entre área iluminada e área total da célula, conforme mostra a Figura 4.5.

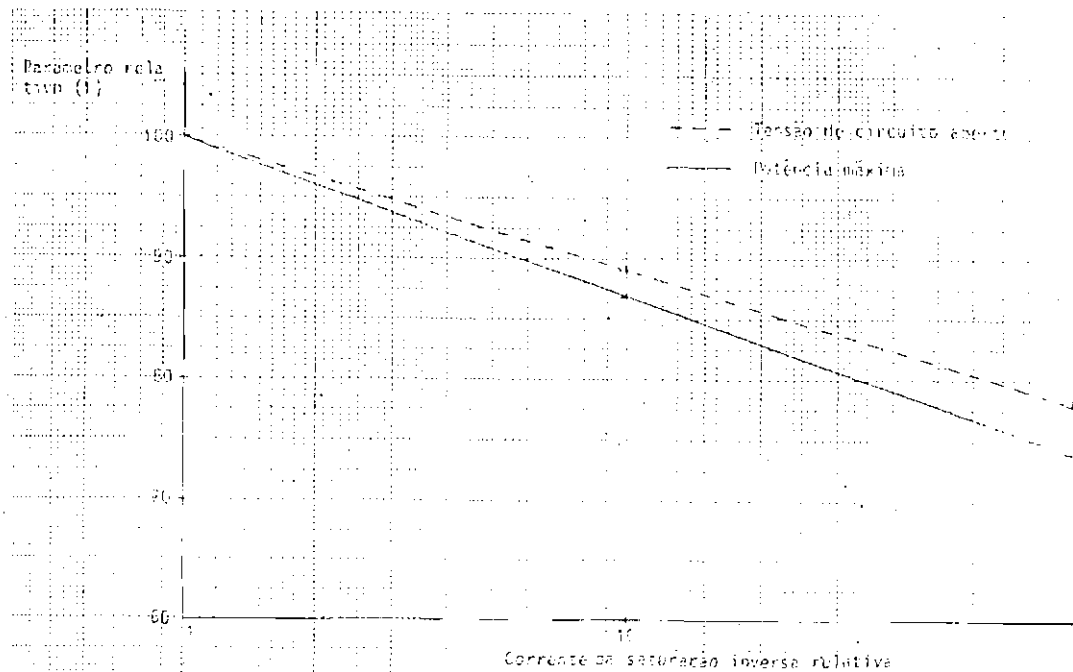


Fig. 4.4 - Tensão de circuito aberto e potência máxima relativas em função da corrente de saturação inversa relativa de uma célula espacial.

Considerando o estudo apresentado, adotou-se um fator multiplicativo da corrente de saturação (KS), sendo:

$$KS = 10^{(2,687 - 3,031 \cdot KR)} \quad , \quad 1/4 \leq KR \leq 3/4, \quad (4.1)$$

onde KR é a razão entre a área iluminada e a área total da célula com sombra parcial. Neste trabalho considera-se que para $KR > 3/4$ o coeficiente KS é igual a 1 e para $KR < 1/4$ a célula é considerada totalmente sombreada.

Dessa forma a equação de uma célula com área iluminada variável de 0 a 100% fica como na Equação 4.2.

$$I = KR.I_L - KS.I_0, (\exp(q.(v+R_s.I)/.A.K.T) = -1). \quad (4.1)$$

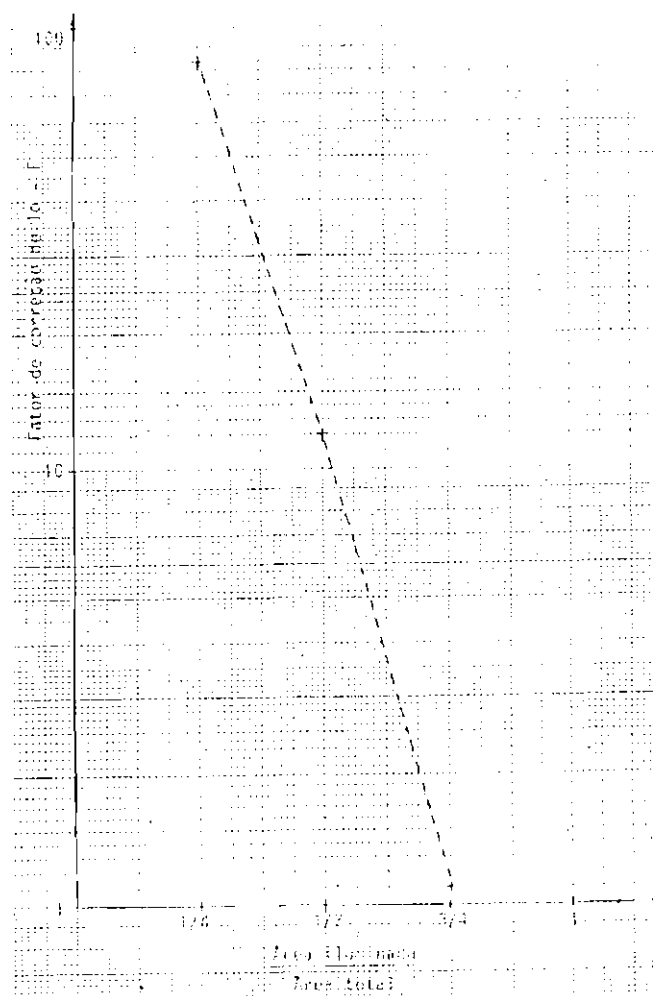


Fig. 4.5 - Fator multiplicativo da corrente de saturação em função da razão entre área iluminada e área total da célula.

Pode ser verificado através das Figuras 4.1 e 4.4 que as correções para potência máxima por este método implicam uma diminuição da tensão de circuito aberto. Com esta correção, a tensão de circuito aberto cai abaixo do valor real, preservando no entanto a condição de pior caso.

Os efeitos do sombreamento parcial em arranjos fotovoltaicos são semelhantes aos do descasamento porém de consequências mais graves. O gráfico da Figura 2.17 se presta também para exemplificar uma associação em série de uma célula sombreada parcialmente com outra não-sombreada. O sombreamento parcial de arranjos fotovoltaicos, assim como o descasamento, pode resultar em células que operam com tensão inversa. Esta condição pode provocar falhas nas células e, conseqüentemente, reduzir a capacidade do arranjo permanentemente.

4.2 - CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS DA SOMBRA NO PAINEL ANTIGEOCÊNTRICO

No painel solar em estudo ocorre sombreamento parcial, causando pela presença de elementos estruturais com formatos basicamente cilíndricos, ou seja, mastro e antenas.

A sombra resultante tem formato triangular, como pode ser visto na Figura 4.6.

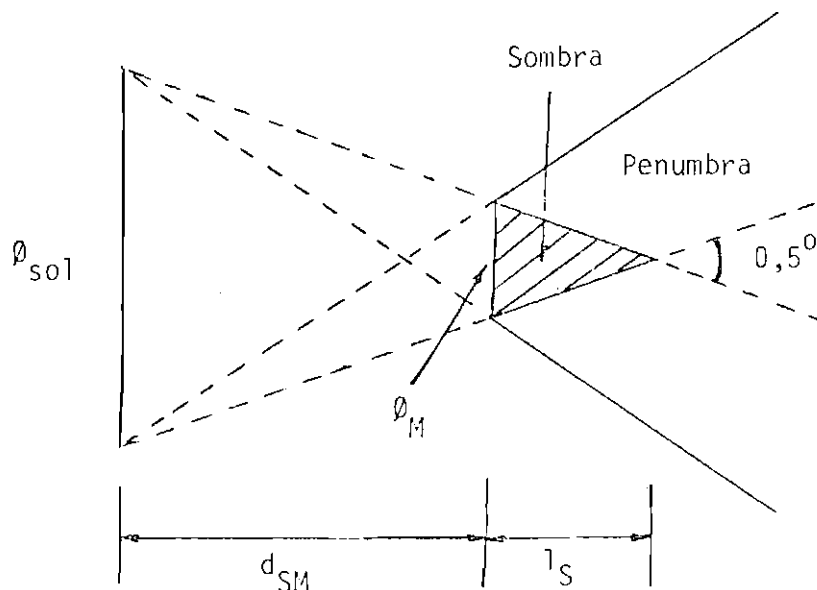


Fig. 4.6. - Sombra e penumbra do mastro iluminado com incidência perpendicular ao seu eixo longitudinal.

Da Figura 4.6 deduz-se a Equação 4.3, que dá a altura do triângulo de sombra, l_s , em função do diâmetro do mastro e da distância entre este e o Sol:

$$l_s = d_{sm} \cdot \varnothing_m / \varnothing_{sol}, \quad (4.3)$$

onde:

l_s : comprimento da sombra,

d_{sm} : distância entre o mastro e o Sol,

\varnothing_m : diâmetro do mastro,

\varnothing_{sol} : diâmetro do Sol.

A região de penumbra é caracterizada por ter iluminação nula em qualquer ponto localizando nas arestas do triângulo de sombra e iluminação total em qualquer ponto localizado num dos segmentos de reta que limitam a região, sendo variável a iluminação entre estes extremos.

O mastro do satélite possui diâmetro $\varnothing_m = 2\text{cm}$ e altura $h_m = 10\text{m}$.

Considerando uma incidência luminosa perpendicular ao eixo longitudinal do mastro e usando a Equação 4.3, foi calculado o valor de $l_s = 2,29\text{m}$.

A Figura 4.7 apresenta uma vista lateral do satélite e define o ângulo de incidência luminosa como α .

O período da órbita do satélite é 99 min e corresponde a uma velocidade angular $W = 3,64^\circ/\text{min}$. A partir deste dado, do valor do diâmetro do painel $\varnothing_p = 1\text{m}$ e da altura do mastro, calculou-se o valor, de α acima do qual o comprimento da sombra do mastro l_s é maior do que

o raio do painel, e obteve-se $\alpha = 5,7^\circ$. Analisando a órbita de maior noite (Sol contido no plano da órbita) em que o ângulo varia de -90 a $+90$ em 49,5 min., conclui-se que $\alpha > 5,7^\circ$ durante 93,7% da órbita. Por esta razão, será considerado neste trabalho que ls_α é maior que o raio do painel para qualquer valor de α .

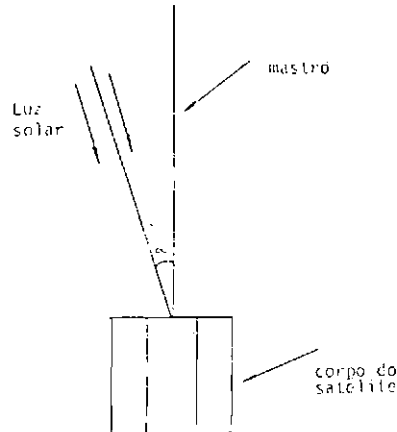


Fig. 4.7 - Vista lateral do satélite sob iluminação.

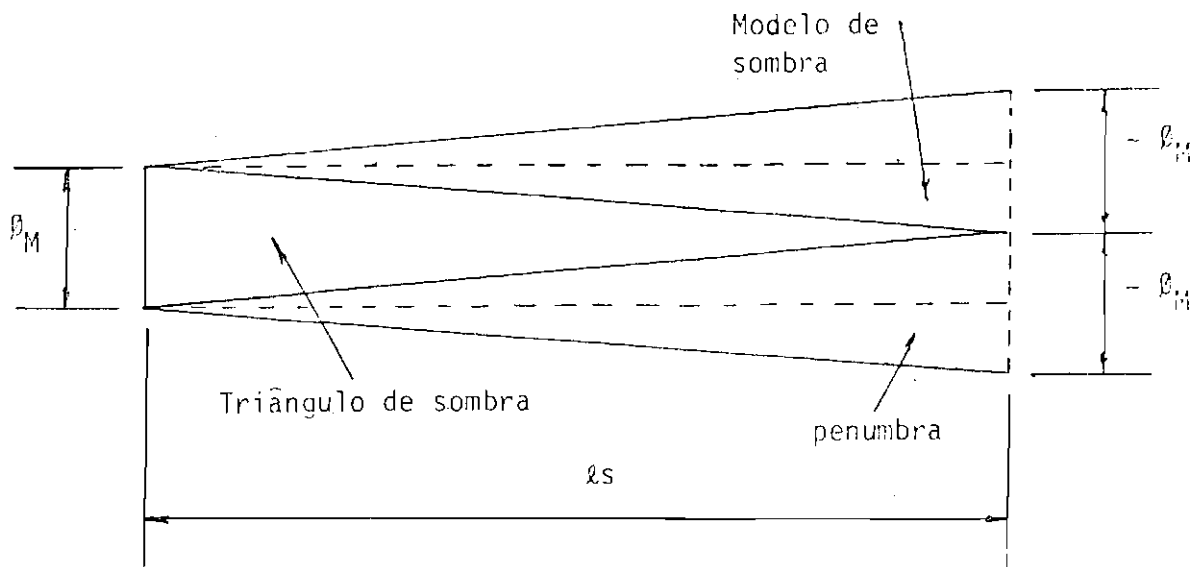


Fig. 4.8 - Geometria da sombra do mastro.

Tendo em vista o trabalho de simulação, a geometria da sombra do mastro foi modelada de tal forma a considerar a região de sombra como retangular. A Figura 4.8 mostra o triângulo de sombra, penumbra e o modelo retangular de sombra. O modelo para simulação não considera a região de penumbra. Apesar disto, este modelo é conservativo, uma vez que a área de sombra retangular é o dobro da triangular.

O mastro do satélite em estudo é flexível e possui uma massa na extremidade; no entanto, o modelo de simulação o considera rígido e os efeitos da massa são desprezados uma vez que, dada sua distância em relação ao painel, seus efeitos de sombra são desprezíveis em magnitude e período de ocorrência. Cabe ressaltar, ainda, que o satélite não é estabilizado ao redor do seu eixo longitudinal e, por isto, o estudo requer uma análise abrangente com relação ao posicionamento da sombra sobre o painel antigeocêntrico.

Como pode ser visto na Figura 3.1, o painel antigeocêntrico possui 8 setores, cada um deles contendo um módulo de 68 células em série e uma porção de outro módulo, perfazendo um total de 10 módulos de 68 células em série como foi mostrado na Figura 3.2. Existem ainda 2 sensores solares localizados em setores distintos e simétricos em relação ao eixo.

Neste trabalho considera-se um único tipo de setor para simulação com o número máximo de células, ou seja, um módulo completo de 68 e uma porção de módulo de 18 células, num total de 86. Desta forma, pode-se estudar a perda por sombra na condição de pior caso com relação ao setor afetado.

Assim, considerando todos os setores iguais, a perda média pode ser estimada analisando apenas uma porção do painel.

As antenas do satélite possuem diâmetro $\phi_a = 1,5$ cm e altura $h_a = 4,5$ cm.

Como já foi mencionado anteriormente através de Equação 4.3, o comprimento da sombra de um objeto sob incidência luminosa normal varia com seu diâmetro. Para outros ângulos de incidência, o comprimento da sombra ls_α é dado pela Equação 4.4:

$$ls_\alpha = ls \cdot \text{sen}\alpha. \quad (4.4)$$

No caso de objetos com alturas pequenas como a antena, o comprimento efetivo da sombra é menor que l_s , como mostra a Figura 4.9.

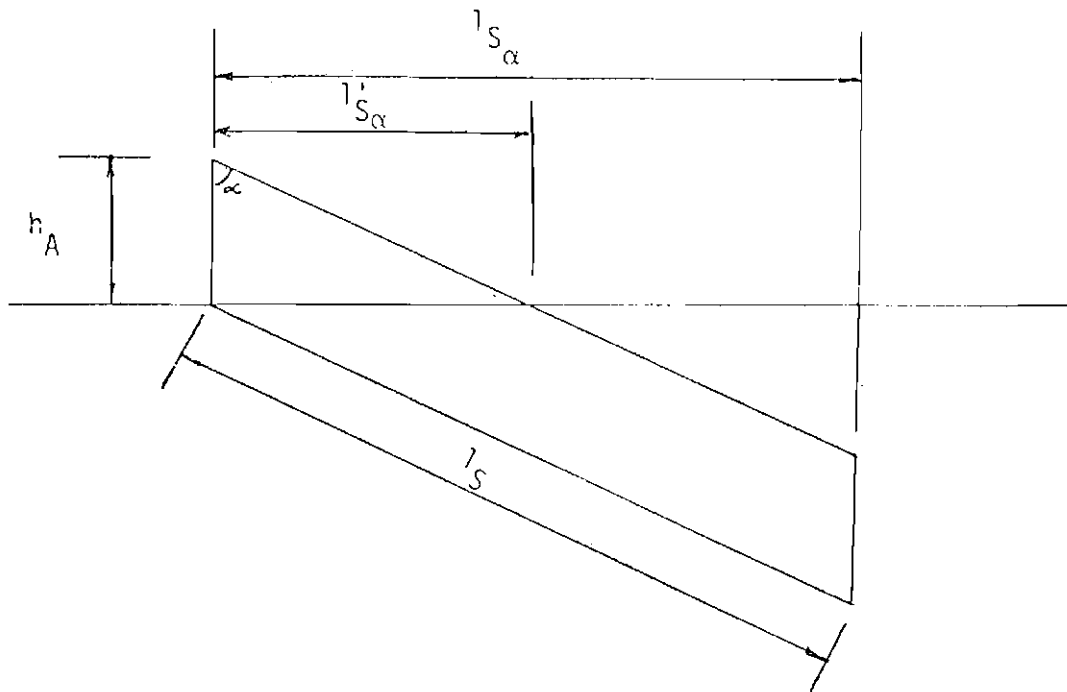


Fig. 4.9 - Comprimento de sombra da antena.

O comprimento de sombra para o caso da antena, l_{s_α}' será considerado.

Todas as demais considerações feitas para a sombra do mastro são tomadas para as antenas.

4.3 - PROGRAMA SIMULADOR

Com o objetivo de estudar os efeitos do sobreamento na máxima potência de saída de um painel solar, desenvolveu-se um programa em computador digital na linguagem ALGOL.

Este programa tem como cerne, o programa Módulo, descrito com detalhes no Capítulo 3, o qual tem a capacidade de simular módulos de células solares com arquiteturas específicas.

Uma sub-rotina para cálculo da área sombreada de cada célula é agregada ao programa Módulo, e a simulação de diodos de proteção é também implementada.

4.3.1 - DESCRIÇÃO DO ALGORÍTMO

O programa simulador de arranjos fotovoltaicos sombreados possui duas sub-rotinas especialmente importantes, as quais constituem o corpo do programa, a saber: sub-rotina SOMBRA e sub-rotina MÓDULO. A Figura 4.10 apresenta o fluxograma funcional do programa.

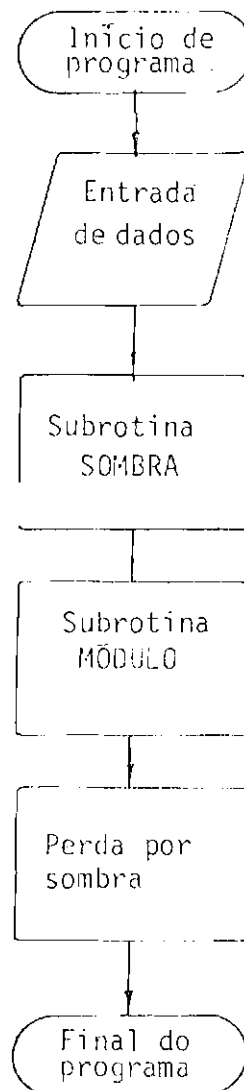


Fig. 4.10 - Fluxograma funcional do programa simulador de arranjos fotovoltaicos sombreados.

Para fazer a estimativa da curva característica I-V de um arranjo de células solares sombreado parcialmente, é essencial que se conheça quantas células estão sob sombra, que percentual da área da célula é iluminado e, no caso de arranjos reais, quais são os parâmetros da célula em questão. Este cálculo é efetuado através da sub-rotina sombra cujo fluxograma funcional é apresentado na Figura 4.11.

Como mencionado anteriormente, a estimativa da perda por sombra no painel antigeocêntrico é efetuada com base na análise de uma porção do painel. Esta porção corresponde a 2 setores dos 8 existentes no painel. Eletricamente, 2 setores correspondem a 2 módulos de 68 células em série e uma porção de módulo.

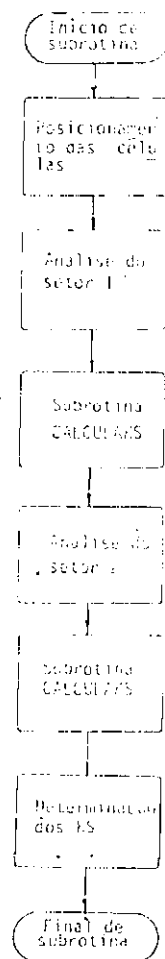


Fig. 4.11 - Fluxograma funcional da sub-rotina SOMBRA.

A sub-rotina é inicializada com o posicionamento das células solares de um setor. Com o objetivo de sistematizar o posicionamento, o setor é dividido em seções, que são grupos de células alinhadas horizontalmente. São especificados o número de seções, o número de células de cada seção, o intervalo entre seções e as coordenadas da primeira célula.

A distribuição de células é efetuada tomando como referência um sistema de eixos de coordenadas cartesianas. Cada célula possui 4 coordenadas que lhe são atribuídas durante a execução da sub-rotina, a saber: coordenada esquerda no eixo X, coordenada direita no eixo X, coordenada superior no eixo Y e coordenada inferior no eixo Y.

A Figura 4.2 mostra uma célula solar com suas coordenadas.

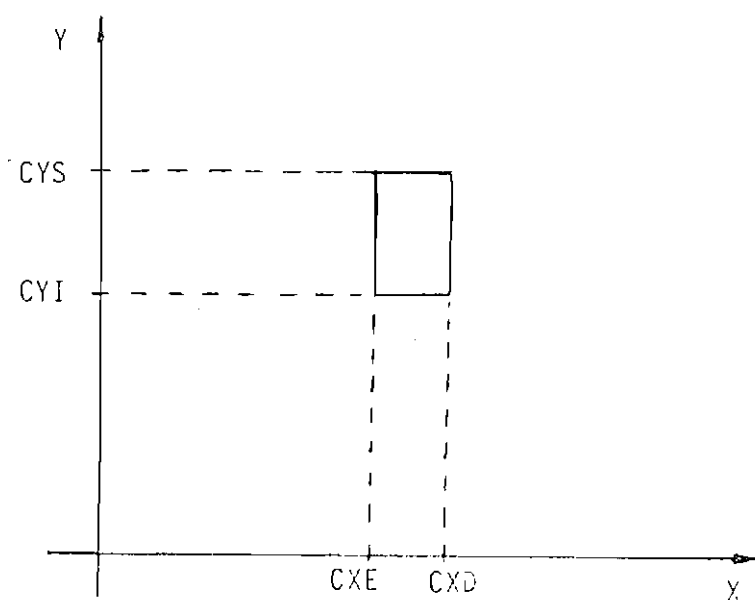


Fig. 4.12 - Célula solar com suas coordenadas cartesianas.

O centro do elemento estrutural (mastro ou antena) é posicionado sobre o eixo X e as células são posicionadas considerando este posicionamento.

Quando se estuda a sombra do mastro, a primeira célula é posicionada próxima ao eixo X, levando em conta o arranjo físico do painel da Figura 3.1. As demais células são posicionadas com coordenadas em Y crescentes.

No caso da antena, posiciona-se a primeira célula no ponto mais distante do eixo X de modo que as demais sejam posicionadas com coordenadas decrescentes em Y.

A Figura 4.13 ilustra ambos os casos, incluindo o posicionamento do elemento estrutural.

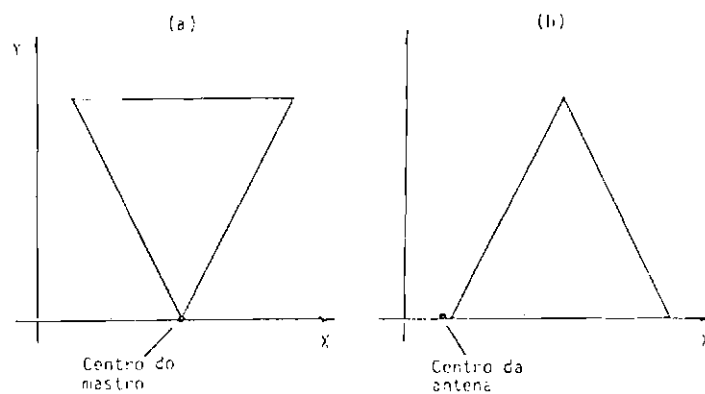


Fig. 4.13 - Distribuição de células para o estudo de sombra do mastro (a) e antena (b).

Todas as decisões mencionadas anteriormente são tomadas por programação.

Em seguida são calculados os Índices Ks de cada célula do setor, chamado 1, que representa o percentual de área, iluminada da célula através da sub-rotina CALCULAKS, que será descrita posteriormente.

No caso do mastro, por razões de dimensão, o posicionamento deste na interface de dois setores pode resultar no sombreamento parcial de células pertencentes a cada um dos setores. Por esta razão, o estudo de perdas por sombra no painel antigeocêntrico é efetuado com base em 2 setores que envolvem 3 módulos, sendo um completo por setor e uma parcela de módulo semicircular distribuída em ambos os setores em 2 grupos de 18 células.

Desta forma, o próximo passo a ser executado pela sub-rotina é o posicionamento para análise do setor 2. Isto se dá por uma rotação da sombra do mastro igual ao ângulo entre setores, no caso 45° . Assim, simula-se a análise em 2 setores, conforme mostra a Figura 4.14.

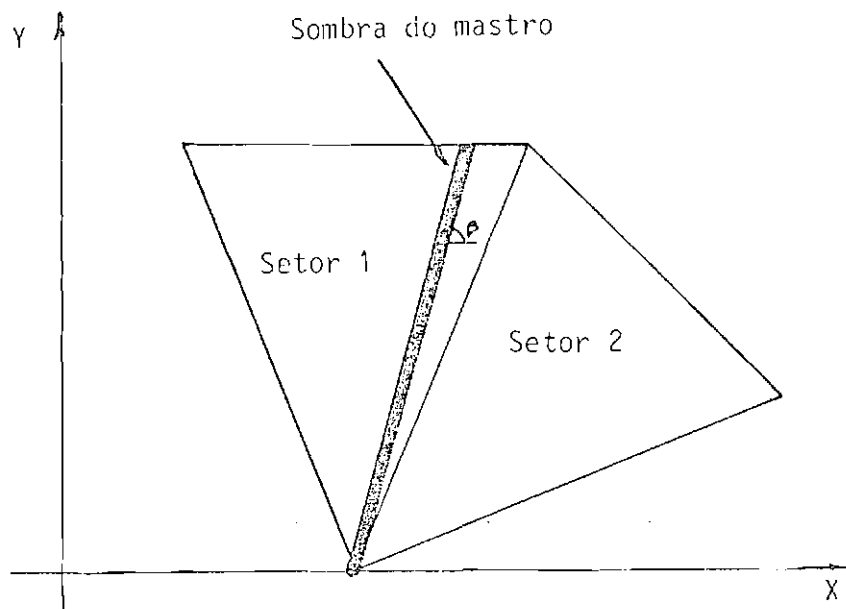


Fig. 4.14 - Posicionamento geométrico dos setores do painel antigeocêntrico para estudo de sombra.

Conforme citado anteriormente, a determinação do índice K_s de cada célula do setor é efetuada pela sub-rotina CALCULAKS, cujo fluxograma funcional é descrito na Figura 4.15.

Quando se estuda os efeitos do sombreamento do painel de vido às antenas determina-se o comprimento da sombra através da Equação 4.4, o que não ocorre com a sombra do mastro.

A determinação do índice K_s de cada célula é efetuada fazendo uma intersecção da geometria da sombra com a distribuição de células.

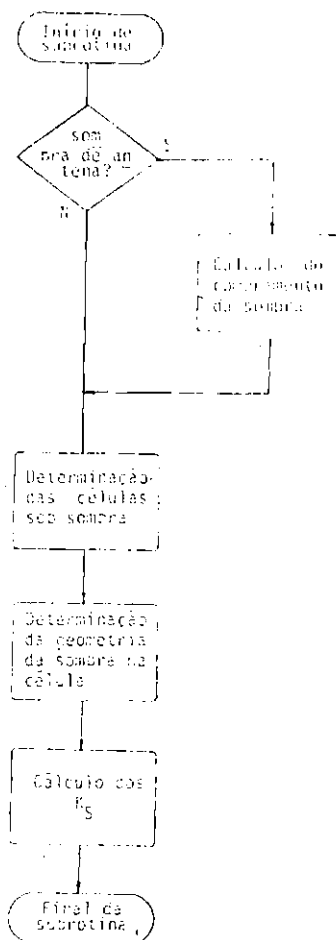


Fig. 4.15 - Fluxograma funcional da sub-rotina CALCULAKS.

Cada célula é verificada individualmente através de suas coordenadas estabelecidas na sub-rotina SOMBRA. A geometria da sombra é representada por duas retas, a saber: o contorno direito da sombra e o contorno esquerdo da sombra, representadas pelas Equações 4.5 e 4.6, no caso do mastro.

Contorno direito do mastro:

$$y = x.tg\beta - CDM.tg\beta + CIM. \quad (4.5)$$

Contorno esquerdo do mastro:

$$y = x.tx\beta - CEM.tg\beta + CSM. \quad (4.6)$$

No caso do mastro estuda-se o sombreamento de 50% do setor 1 e 50% do setor 2, ou seja, $45 \leq \beta \leq 90$.

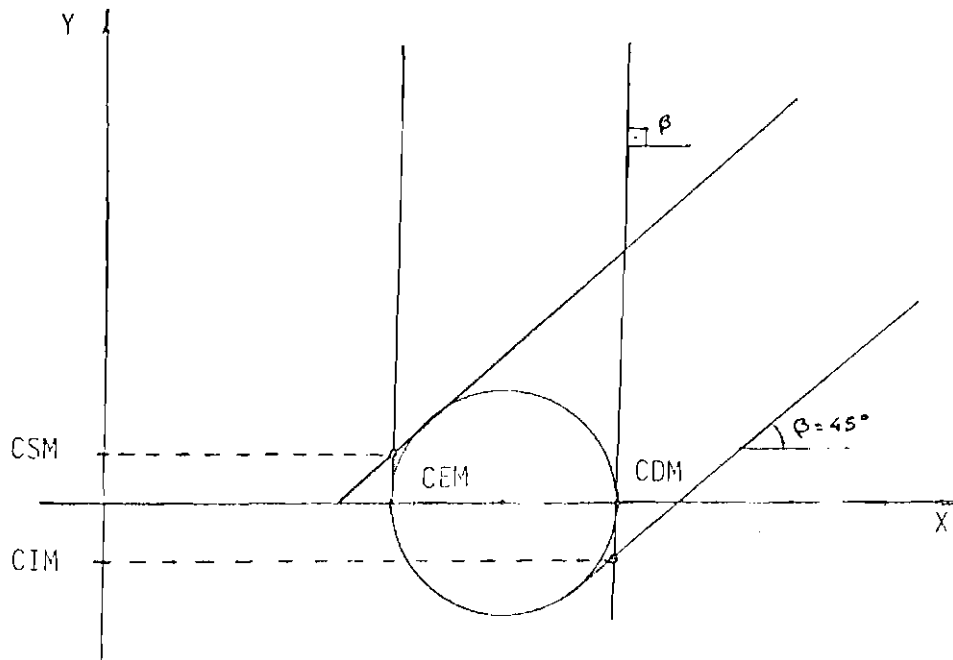


Fig. 4.16 - Coordenadas básicas da sombra do mastro.

A Figura 4.15 mostra as coordenadas da sombra do mastro, ou seja, a reta que caracteriza o contorno esquerdo da sombra sempre passa pelo ponto (CEM, CSM) e a reta que caracteriza o contorno direito da sombra sempre passa pelo ponto (CDM, CIM), ambas variando de inclinação na faixa já citada. Desta forma a largura mínima do retângulo de sombra ocorre nos ângulos extremos, e é igual ao diâmetro, do mastro, e a largura máxima ocorre no ângulo médio, e é 8,2% superior ao diâmetro do mastro.

Um estudo semelhante foi feito para a sombra da antena, diferindo apenas na faixa de ângulos de inclinação, sendo $0 \leq \beta \leq 67,5^\circ$, sendo que a largura máxima do retângulo de sombra é 20,3% maior que o diâmetro da antena.

Tanto no caso do mastro como da antena a condição de pior caso foi assegurada.

Para o cálculo dos índices de iluminação individuais das células faz-se, inicialmente, uma verificação de posicionamento de cada célula com relação à sombra e determina-se quais células estão afetadas.

Em seguida procede-se ao cálculo das coordenadas de intersecção entre as retas de contorno da sombra e as faces das células afetadas.

De posse desses dados determina-se a geometria da parte sombreada de cada célula afetada e, finalmente, calcula-se o percentual de área não afetada, do que decorre o valor do índice K_s , que é igual a 1 para células não afetadas e é menor que 1 para as células sombreadas. Os valores do índice K_s para células individuais são agora referenciados ao modelo elétrico do arranjo para atuar conforme mostram as Equações 4.1 e 4.2. Considera-se que 68 células do setor 1 são integrantes do módulo 1, 68 células do setor 2 são integrantes do módulo 2, e as demais 18 células de cada setor integram o módulo 3 que possui também 68 células; porém 32 delas não estão no alcance da sombra.

Em seguida procede-se à análise elétrica dos módulos de células, utilizando para tanto a sub-rotina MODULOM que nada mais é que o programa Módulo modificado.

A modificação com relação à Figura 3.8 reside no bloco que faz a somatória das tensões dos submódulos para valores de corrente dentro da faixa estabelecida e consiste na inclusão da queda de tensão no diodo na somatória de tensões, ficando portanto:

$$V_m(I_m) = \sum_{sm=1}^{NSUB} V_{sm}(I_m) + V_{db}(I_m). \quad (4.7)$$

O cálculo é efetuado através de interpolação linear.

A sub-rotina MODULOM, assim como o programa que a originou, utiliza uma sub-rotina SUBMODULOM que nada mais é que a sub-rotina submódulo, da Figura 3.7, modificada para estudos de sombreamento.

A modificação consistiu em introduzir a capacidade de análise de submódulos protegidos com diodos paralelos. Na Figura 3.7, ao bloco que faz a somatória de correntes de cadeia, com a finalidade de determinar a corrente do submódulo, é adicionado um termo correspondente à corrente do diodo paralelo como mostra a Equação 4.8:

$$I_{sm}(V_{sm}) = \sum_{C=1}^{NCAD} I_c(V_{sm}) + I_{dp}(V_{sm}). \quad (4.8)$$

Finalmente, uma vez de posse das potências máximas dos módulos, determina-se a perda de potência do arranjo com base na somatória de potências máximas de cada célula do arranjo comparada à potência máxima do arranjo sombreado.

4.3.2 - ENTRADA DE DADOS

Os dados de entrada utilizados no programa podem ser classificados em dois tipos, a saber: dados referentes à simulação elétrica e dados referentes à simulação geométrica.

Os dados da simulação elétrica são basicamente os mesmos já citados no Capítulo 3, por ocasião da descrição do programa Módulo, acrescidos da opção de utilizar diodos paralelos nos submódulos e da curva do diodo, utilizada nas simulações que incluem diodos de bloqueio e diodos paralelos.

No que se refere aos dados da simulação geométrica, deve-se mencionar o número de seções (NSEC), número de células de cada seção (NCS), comprimento de cada seção (LSEC), intervalo entre seções (INTSEC), raio do mastro ou antena (RM, RA), ângulo (ALFA), fator de

correção de IL devido ao (CTC) e centro do mastro ou antena (CM, CA). A partir destes dados o programa distribui as células no plano XY e calcula a área sombreada das células afetadas com base nas equações das retas de contorno de sombra.

Dessa forma o programa possui boa versatilidade, uma vez que pode simular o sombreamento de painéis com número de células variável, geometria não necessariamente triangular, diversas configurações em série e em paralelo, ângulo de incidência variável e diversas opções de proteção ao sombreamento parcial.

4.3.3 - SAÍDA DE RESULTADOS

As opções de saída do programa são as mesmas já descritas no Capítulo 3, durante a apresentação do programa Módulo, acrescidas da curva I-V do arranjo sombreado na forma de pares (I, V) e pontos principais da curva como corrente de curto-circuito (I_{cca}), tensão de circuito aberto (V_{caa}), corrente de máxima potência (I_{mpa}), tensão de máxima potência (V_{mpa}) e potência máxima (P_{maxa}).

Quanto aos resultados geométricos do sombreamento, existe a opção de obter uma tabela de índices de iluminação de cada uma das 68 células dos 3 módulos em estudo.

4.4 - ESTUDOS DE SOMBREAMENTO

Fez-se um estudo de perdas por sombreamento aplicado ao satélite de coleta de dados da MECB, com o intuito de conhecer a magnitude da perda, levando em conta o ângulo de incidência variável no painel antigocêntrico, a sombra do mastro e antenas, e o posicionamento variável do satélite com relação ao eixo longitudinal.

4.4.1 - PERDA DE POTÊNCIA POR SOMBREAMENTO NO PAINEL ANTIGEOCÊNTRICO SEM DIODOS PARALELOS

Considerando a magnitude dos valores de perda por desca-
samento dos parâmetros das células em módulos fotovoltaicos estimados
por simulação no Capítulo 3, o estudo que se segue baseia-se em cêlu-
las com parâmetros da característica direta iguais aos valores médios
da Tabela 3.4.

Para avaliar a faixa de variação percentual da perda de
potência, com relação aos valores possíveis de condutância na região
inversa, procedeu-se a 3 casos de simulação da perda por sombra do mas-
tro, a saber: condutância inversa máxima (melhor caso), condutância in-
versa mínima (pior caso) e condutância inversa média. Os dados foram ti-
rados da Tabela 3.4.

A Tabela 4.1 apresenta os resultados das simulações que
demonstram haver diferença percentual inferior a 0,2% entre o melhor
e o pior caso.

TABELA 4.1

INFLUÊNCIA DA CONDUTÂNCIA INVERSA DAS CÉLULAS NA PERDA DE POTÊNCIA DO ARRANJO FOTOVOLTAICO

CONDUTÂNCIA INVERSA	PERDA DE POTÊNCIA (%)
MÁXIMA	14,29
MÉDIA	14,36
MÍNIMA	14,44

As simulações foram efetuadas para um ângulo de incidência igual a 45° e ângulo , mostrado na Figura 4.14, igualmente em 45° .

Com base nos resultados da Tabela 4.1 considerar-se-á a condição de pior caso em termos de condutância inversa..

Como mencionado anteriormente, o sombreado do painel antigeocêntrico é devido ao mastro e as duas antenas.

Pela Figura 3.1 observa-se que as antenas guardam uma posição de simetria com relação ao mastro, e que para uma dada posição do satélite em seu eixo longitudinal apenas uma das antenas produz sombra sobre o painel antigeocêntrico. Desta forma, é suficiente estudar o sombreado de uma delas.

Devido ao posicionamento dos elementos estruturais e do comprimento da sombra das antenas no painel antigeocêntrico, ocorre ainda que as sombras da antena e do mastro afetam módulos distintos, do tipo contido em um setor. A fim de simular o pior caso, serão considerados distintos os módulos semicirculares afetados por um e outro elemento.

Pelo que foi exposto serão estudados os efeitos de cada elemento isoladamente. No que se refere à perda de potência devida ao mastro, simulações foram efetuadas variando a posição da sombra numa faixa que vai de 45° a 90° como na Figura 4.14. O resultado da simulação neste intervalo é repetitivo com relação a outros intervalos semelhantes como $0 - 45^{\circ}$, $90^{\circ} - 135^{\circ}$, etc., considerando as condições de pior caso já estabelecidas.

As simulações tiveram incremento angular de $1,5^{\circ}$ e variou-se o ângulo de incidência. Devido ao comprimento do mastro ser 20 vezes superior ao raio do painel, a área sombreada não varia, e assim os percentuais de perda média verificados são muito próximos, conforme mostra a Tabela 4.2.

TABELA 4.2

PERDA DE POTÊNCIA MÉDIA POR SOMBRA RELATIVA AO MASTRO

ÂNGULO DE INCIDÊNCIA (%)	PERDA DE POTÊNCIA MÉDIA (%)	DESVIO PADRÃO (%)
15	15,63	6,08
30	15,63	6,08
45	15,63	6,07
60	15,63	6,06
75	15,60	6,04

A Figura 4.17 mostra um gráfico da perda de potência em função do ângulo, onde se observa uma região de perda inferior a 1% entre 20° e 25° , referente à região de interface entre setores. Observa-se, ainda, a ocorrência de uma variação no restante da curva aproximadamente na faixa de 14% a 20%. Esta variação se deve à geometria da disposição de células no painel.

De forma semelhante ao estudo do mastro, foram feitas simulações para estimar a perda de potência por sombra da antena. Verificou-se que ao contrário da sombra do mastro a da antena tem área variável com o ângulo de incidência. Isto se deve ao fato de a antena ter altura inferior a 10% do raio do painel. A Tabela 4.3 apresenta os resultados da perda de potência num setor, em termos de média e desvio padrão.

A Figura 4.18 apresenta um gráfico da perda de potência relativa a sombra da antena num setor do painel, para um ângulo de incidência 45° .

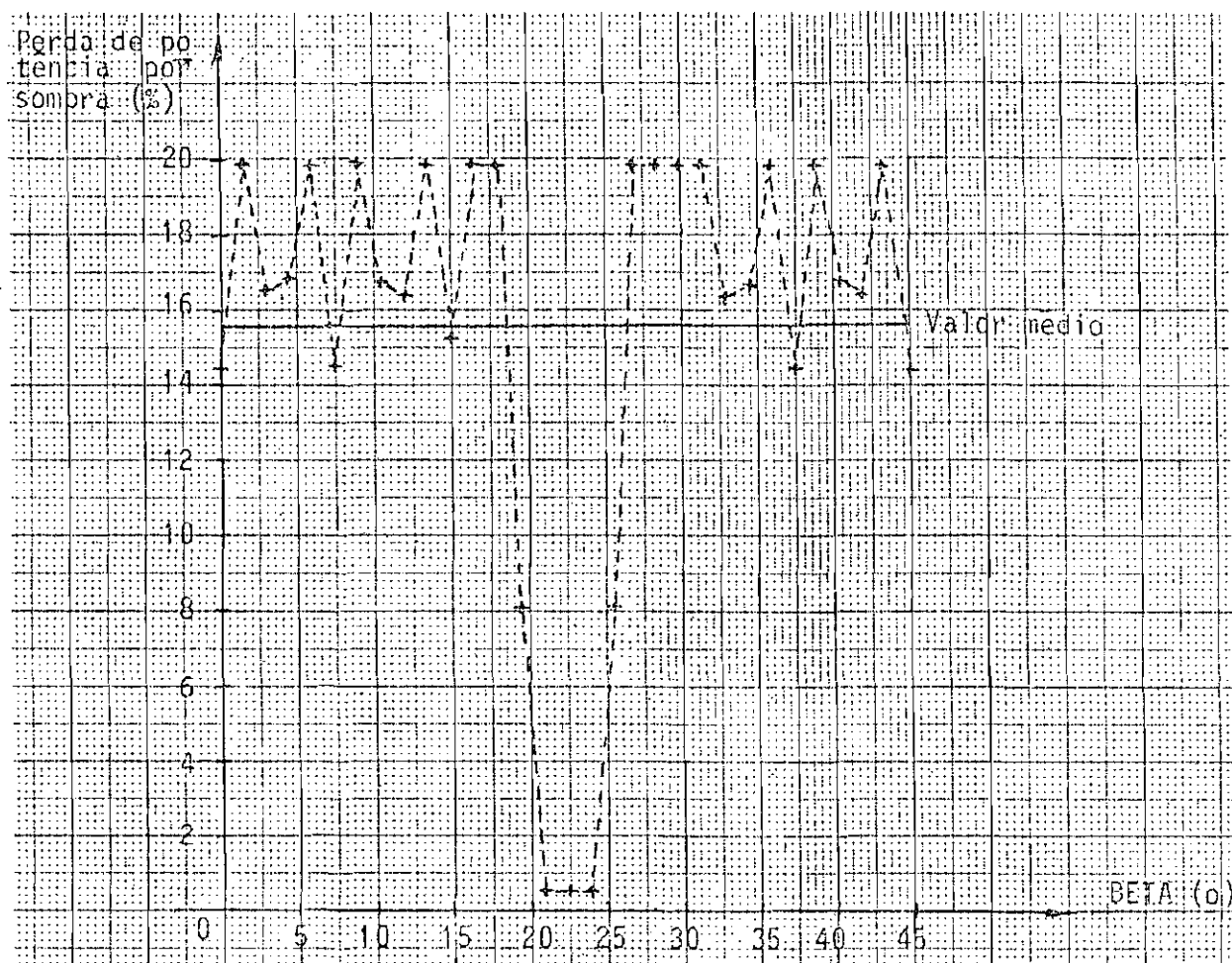


Fig. 4.17 - Perda de potência por sombra do mastro com ângulo de incidência de 45° .

Observa-se na Figura 4.18 que o contrário da sombra do mastro a da antena tem uma curva suave.

A Tabela 4.3 fornece os valores da perda média no setor, no entanto, o valor de perda média no painel deve considerar uma variação angular de 0 a 180° que envolve 2 setores ($2 \times 66,5^{\circ}$), mais 45° referentes ao intervalo em que a sombra da antena se projeta para fora do painel.

Este valor de perda média, somado à perda média relativa ao mastro, dá o valor da perda de potência por sombra dos elementos estruturais em termos de valor médio.

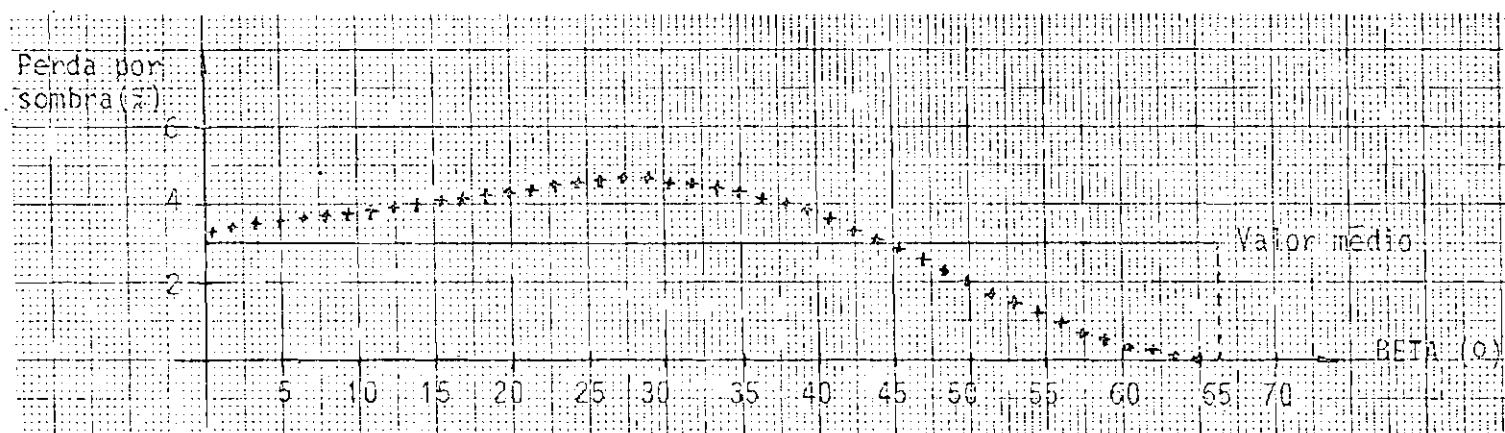


Fig. 4.18 - Perda de potência por sombra da antena num setor do painel antigeocêntrico para o ângulo de incidência de 45° .

TABELA 4.3

PERDA DE POTÊNCIA POR SOMBRA DA ANTENA NUM SETOR
DO PAINEL ANTIGEOCÊNTRICO

ÂNGULO DE INCIDÊNCIA (%)	PERDA DE POTÊNCIA MÉDIA (%)	DESVIO PADRÃO (%)
15 ^o	0	0
30 ^o	3,02	1,50
40 ^o	3,07	1,52
60 ^o	4,94	1,95
75 ^o	6,89	2,23

A Tabela 4.4 dá a perda de potência média relativa à antena, considerando o painel antigeocêntrico inteiro.

Com base nos gráficos das Figuras 4.17 e 4.18, pode-se dizer que a maior perda de potência ocorre no intervalo entre 0 e 45°. A Figura 4.19 mostra a perda de potência por sombra do mastro e antenas nesse intervalo.

TABELA 4.4

PERDA MÉDIA DE POTÊNCIA POR SOMBRA DAS ANTENAS
NO POTENCIAL ANTIGEOCÊNTRICO

ÂNGULO DE INCIDÊNCIA (%)	PERDA MÉDIA DE POTÊNCIA (%)
15	0
30	2,26
45	2,27
60	3,71
75	5,17

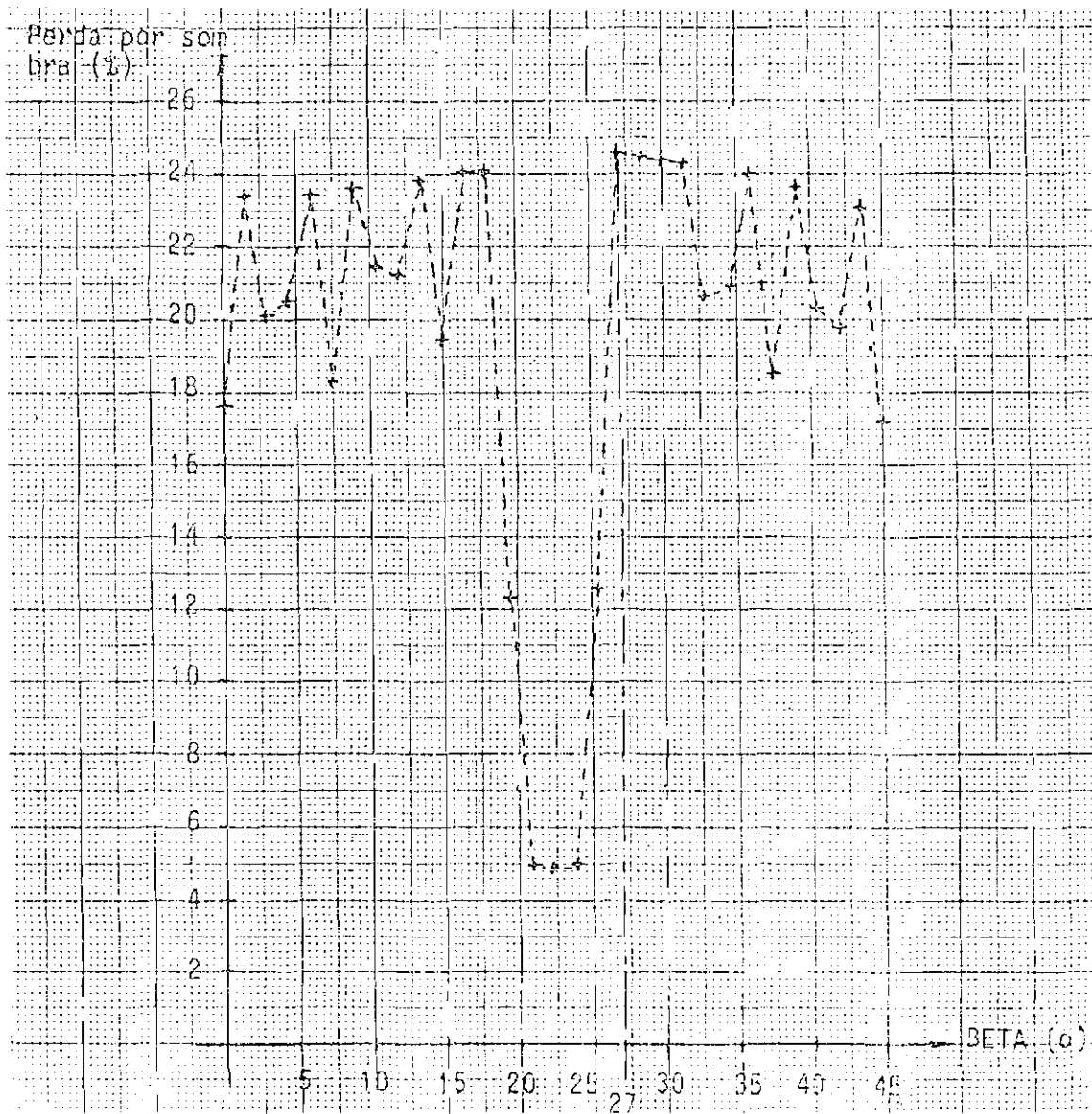


Fig. 4.19 - Perda por sombra dos elementos estruturais no painel antigeocêntrico com ângulo de incidência de 45°.

Uma análise dos resultados das simulações efetuadas para ângulos de incidência entre 15° e 75° , permitiu a estimativa da perda média de potência no painel antigeocêntrico, assim como a perda máxima e a posição em que ocorre para os mesmos ângulos de incidência. Estes dados são apresentados na Tabela 4.5.

TABELA 4.5

VALORES MÉDIOS E MÁXIMOS DA PERDA DE POTÊNCIA
POR SOMBRA NO PAINEL ANTIGEOCÊNTRICO

ÂNGULO DE INCIDÊNCIA (%)	PERDA MÉDIA DE POTÊNCIA (%)	PERDA MÁXIMA DE POTÊNCIA (%)	ÂNGULO DE PERDA MÁXIMA ($^{\circ}$)
15	15,6	15,6	-
30	17,9	24,6	27
45	17,9	24,6	27
60	19,3	29,1	39
75	20,8	29,3	31

Os valores de perda média são maiores para ângulos de incidência mais elevados, em função da componente de perda relativa à sombra da antena.

4.4.2 - PERDA DE POTÊNCIA POR SOMBREAMENTO NO PAINEL ANTIGEOCÊNTRICO COM
DIODOS PARALELOS

A perda de potência em painéis solares, devido à sombra, pode ser minimizada com a utilização de diodos paralelos, como foi descrito na Subseção 2.5.2. No caso específico do painel solar em estudo, constituído de módulos de 68 células em série, o sombreamento de uma

célula significa a perda do módulo inteiro, como é possível verificar através de uma análise dos resultados apresentados na Subseção 4.4.1.

Considerou-se neste estudo a utilização de células do tipo "com diodo integrado", descritas na Subseção 2.2.5.

Para a elaboração deste estudos, foi utilizado o mesmo programa desenvolvido para a análise de perdas por sombra descrita na Seção 4.3, acrescentando apenas a possibilidade de associar uma célula em paralelo com um diodo a fim de simular células com diodo integrado. A curva característica $I-V$, considerada para o diodo, foi obtida através de dados experimentais da empresa Spectrolab.

As mesmas condições geométricas e de iluminação consideradas no estudo de sombra sem diodos paralelos foram consideradas, e os efeitos de sombra do mastro foram simulados separadamente aos efeitos de sombra das antenas.

Semelhantemente à Subseção 4.4.1, consideraram-se vários ângulos de incidência luminosa para o caso das antenas e verificou-se que a perda de potência por sombra das antenas é inferior a 0,5% sendo, portanto, da mesma ordem de grandeza da perda de potência por descasamento de células analisada no Capítulo 3.

Na subseção anterior verificou-se que a perda de potência por sombra do mastro é aproximadamente constante com relação ao ângulo de incidência e, tendo em vista este fato, considerou-se um ângulo de incidência igual a 45° para esta análise. A Figura 4.20 apresenta um gráfico da perda de potência em função do ângulo azimutal.

Desta Figura podem-se extrair os valores máximos e médio de perda de potência, sendo 10,7% e 3,2% respectivamente. Verificou-se também que o ângulo de 27° ocorre perda máxima.

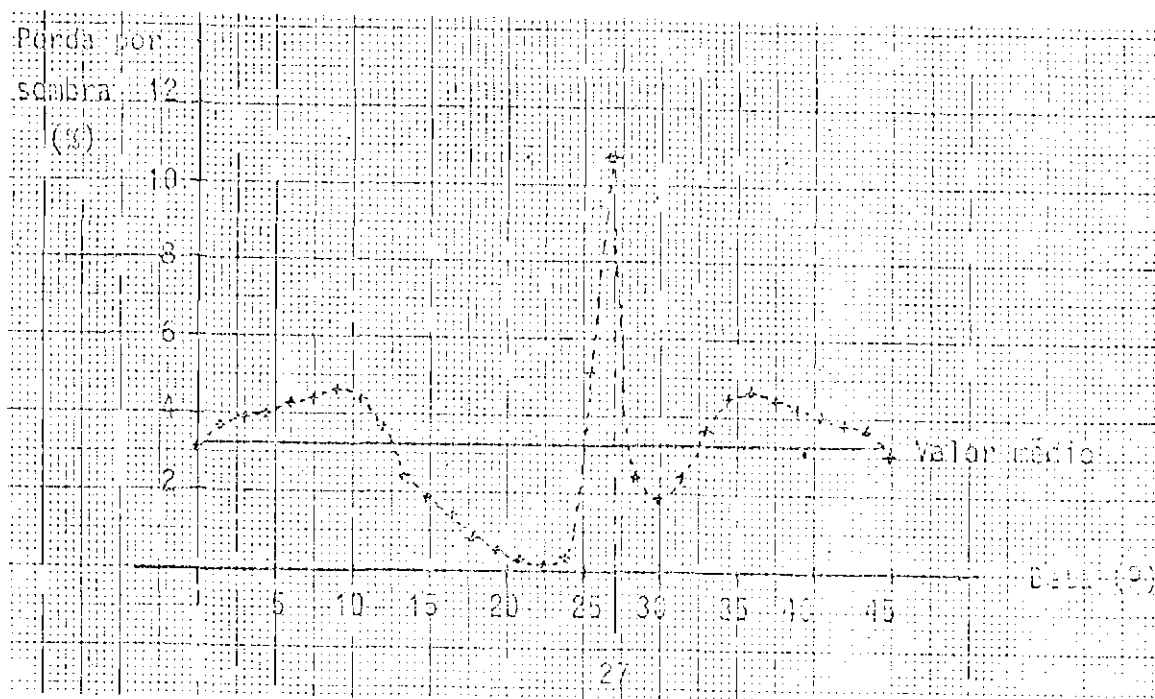


Fig. 4.20 - Perda por sombra no painel antigecêntrico usando células com diodo integrado a um ângulo de 45° .

A característica não-simétrica da curva da Figura 4.20 se deve ao fato de o setor do painel antigecêntrico não ser simétrico com relação às conexões elétricas das células.

4.4.3 - ANÁLISE COMPARATIVA DOS EFEITOS DO SOMBREAMENTO NA PERDA DE POTÊNCIA DO PAINEL ANTIGECÊNTRICO COM E SEM DIODOS PARALELOS

Com base nos resultados obtidos nas Subseções 4.4.1 e 4.4.2, pode-se fazer uma análise comparativa para a perda de potência por sombra com e sem diodos paralelos.

A Tabela 4.6 apresenta os valores de perda máxima e média para os dois casos, considerando o ângulo de incidência de 45° .

Segundo os resultados desta comparação, pode-se afirmar que, no pior caso em que ocorrer perda máxima, o uso de diodos paralelos

los representa uma redução da perda a um valor inferior a 50% do valor da perda sem o uso de diodos. No entanto, em termos de média, o uso de diodos reduz a perda a menos de 20% daquele caso quando não se usam diodos.

TABELA 4.6

COMPARAÇÃO ENTRE OS VALORES MÉDIO E MÁXIMO DA PERDA DE
POTÊNCIA POR SOMBRA NO PAINEL ANTIGEOCÊNTRICO COM
E SEM DIODOS PARALELOS

	SEM DIODOS	COM DIODOS	<u>PERDA C/ DIODO</u> <u>PERDA S/ DIODO</u>
PERDA MÉDIA	17,9%	3,2%	17,8%
PERDA MÁXIMA	24,6%	10,7%	43,5%

CAPÍTULO 5

CONCLUSÕES

O fenômeno do descasamento das características elétricas de células solares pode afetar significativamente a capacidade de um arranjo fornecer energia.

Neste trabalho verificou-se como o descasamento natural de células solares influencia a potência máxima de saída de um painel, considerando células de qualificação espacial (Spectrolab). Verificou-se que, tanto para cadeias como para submódulos de células solares, a perda por descasamento não é uma função linear do número de células, mas tende para aproximadamente 0,7% em cadeias e 0,3% em submódulos. Através de uma análise aplicada ao painel lateral do satélite em estudo, constatou-se que a arquitetura elétrica do módulo não influencia significativamente sua perda por descasamento, sendo seu valor aproximadamente 0,7% em média. É razoável dizer que a perda por descasamento em cada painel lateral é inferior a 1%.

Além do descasamento natural, estudou-se um outro tipo de descasamento, no caso acidental, de importância muito significativa no que diz respeito à perda de potência. Trata-se do fenômeno da sombra parcial em arranjos fotovoltaicos. Através de um ajuste na corrente de diodo do circuito equivalente da célula solar fez-se o modelamento matemático da célula solar sob sombra. Com o estudo de perda por sombra dos elementos estruturais, aplicado ao painel antigeocêntrico do satélite considerado, constatou-se que a perda por sombra relativa ao mastro está numa faixa de valores entre 14% e 20%, exceto na região entre setores onde a perda é inferior a 1%, ficando a média em torno de 15,6%.

Verificou-se que a perda de potência média devida à sombra da antena, varia desde 0% em 15° de ângulo de incidência luminosa até 6,9% em 75° , sendo a perda máxima em 45° inferior a 5%.

A perda de potência, média relativa à sombra para incidência luminosa de 45° é da ordem de 17,9% e a máxima de 24,6%, sendo esta última mais significativa uma vez que o satélite deverá ter apenas uma velocidade residual em torno de seu eixo longitudinal, podendo operar durante toda uma órbita na condição de perda máxima.

Estudou-se, finalmente, a minimização da perda de potência do painel antigeocêntrico com o uso de diodos paralelos e verificou-se neste caso uma perda média de 3,2% e máxima de 10,7% a um ângulo de incidência de 45° . A perda relativa às antenas foi inferior a 0,5%.

A comparação dos resultados de perda de potência no painel composto de células com e sem diodos paralelos revelou que, em termos de média, o uso de diodos reduz a perda a menos de 20% do valor da perda no caso das células sem diodo. Em termos de valor máximo, o percentual é inferior a 50%. Em suma, estes resultados vêm afirmar a conveniência da utilização de células do tipo "com diodo integrado" ou uma arquitetura que inclua diodos em paralelo no painel antigeocêntrico do Satélite de Coleta de Dados da MECB.

A perda de potência média do gerador solar, considerando que o painel antigeocêntrico contribui com 30% da potência total, é aproximadamente 9%, sem o uso de diodos, e 1% com o uso de diodos paralelos.

Para trabalhos posteriores pode-se sugerir um estudo dos efeitos da temperatura na perda de potência em painéis e arranjos fotovoltaicos, e um estudo de arquitetura ótima para painéis solares de uso espacial do ponto de vista de confiabilidade.

BIBLIOGRAFIA

- APPELBAUM, J.; SHECHTER, M.; BANY, J.; YEKUTIELI, G. Array representation of nonidentical cells. *IEEE Transactions on Electron Devices*, ED-29(8):1145-1151. Aug. 1982.
- BANY, J.; APPELBAUM, J.; BRAUSTEIN, A. The influence of parameters dispersion of electrical cells on the array power output. *IEEE Transactions on Electron Devices*, ED-24 (8):1032-1040, Aug. 1977.
- BARDWELL, K.; LAMBARSKI, T. J.; TURFLER, R.M.; ROGERS, C.B. Minimizing end shadowing effects on parabolic concentrator arrays. In: IEEE PHOTOVOLTAIC SPECIALISTS CONFERENCE, 14. San Diego, Jan. 7-10, 1980. *Conference Record*. New York, IEEE, 1980, p. 765-770.
- BARROS, C. J. C. *Estimativa da curva corrente-tensão de painéis fotovoltaicos em satélites artificiais, considerando ângulos de incidência, efeitos da temperatura e degradação por radiação*. Dissertação de Mestrado em Eletrônica e Comunicações. São José dos Campos, INPE, Abr. 1985. 108p. (INPE-3497-TDL/191).
- BARROS, C. J. C.; ADABO, G. J. *Cálculo para especificação preliminar do gerador solar do Satélite de Coleta de Dados da MECB*. São José dos Campos, INPE, no prelo.
- BRICKER, R. W.; RICHERTT, H. H. S-band resonant quadifilar antenna for satellite communications. *RCA Engineer*, 20(5):70-73, Feb. 1975.
- DIAMOND, R. M.; STEELE, E. D. Solar arrays with integral diodes. *International Colloquium on solar cells*, Toulouse, July, 1970. 17p.
- DIAMOND, R. M. Advanced developments of integral diode solar cells. *IEEE Photovoltaic Specialists Conference*, 9., Silver Spring, IEEE, May 25, 1972, 12p.
- GUPTA, A.; MILNES, A. G. Effects of shading and defects in solar cell arrays: a simple approach. In: IEEE PHOTOVOLTAIC SPECIALISTS CONFERENCE, 15., Kissimmee, May 12-15, 1981. *Conference record*. New York, IEEE, 1981, p. 1111-1116.

- HOVEL, H. J. *Semiconductors and Semimetals*. New York, Academic Press. 1975. v.2. 253p.
- KENNERUD, K. L. Analysis of performance degradation in CdS solar cells. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, AES-5(6):912-917, Nov. 1969.
- LAMBARSKI, T. J.; KADLEC, D. L.; ROGERS, C. B. Effects of cell sorting and module matching on array output. In: IEEE PHOTOVOLTAIC SPECIALISTS CONFERENCE, 15., Kissimmee, May 12-15, 1981. *Conference record*. New York, IEEE, 1981, P. 841-844.
- LAMBARSKI, T. J.; TURFLER, R. M.; BARDWELL, K. E.; ROGERS, C.B. PV-TAP. A program for performing electrical and thermal analyses on photovoltaic elements. In: IEEE PHOTOVOLTAIC SPECIALISTS CONFERENCE, 14., San Diego. Jan. 7-10, 1980. *Conference record*. New York, IEEE, 1980, p. 1272-1276.
- RAUSCHENBACH, H. S. Electrical output of shadowed solar arrays. *IEEE Transactions on Electron Devices*, ED-18(8):483-490, Aug. 1971.
- RAUSCHENBACH, H. S. *Solar cell array design handbook*. New York, Van Nostrand Reinhold, 1980. 550p.
- SHANNON, R.E. *System simulation the art and science*. Englewood Cliffs, N. J., Prentice-Hall, 1975. 387p.
- SHECHTER, M.; APPELBAUM, J.; YEKUTIELI, G. Parameters of solar cell arrays. *IEEE Transactions on Electron Devices*, ED-30 (6):616-618, June 1983.
- SINGH, V. N.; SINGH, R. P. A method for the measurement of solar cell series resistance. *Journal of Physical D; Applied Physics.*, 16: 1823-1825, Apr. 1983.
- TADA, H. Y.; CARTER, J. R.; ANSPAUGH, B. E.; DOWNING, R. G. *Solar Cell Radiation Handbook*. Pasadena JPL, 1982.
- TURFLER, R. M.; LAMBARSKI, T. J.; BARDWELL, K. E.; ROGERS, C. B. Technique for aggregating cells in series and parallel. In: IEEE PHOTOVOLTAIC SPECIALISTS CONFERENCE, 14. San Diego, Jan. 7-10, 1980. *Conference record*. New York, IEEE, 1980. p.518-522.

VEISSID, N.; BELOTO, A.F.; NUBILE, P.; ADABO, G. J. *Glossário de termos fotovoltaicos para aplicação espacial*. São José dos Campos, INPE, mar. 1985. 14p. (INPE-3450-NTE/231).

WATKINS, J. L.; BURGESS, E. L. The effect of solar cell parameter on array power output. In: IEEE PHOTOVOLTAIC SPECIALISTS CONFERENCE, 13., Washington, June 5-8, 1978. *Conference record*. New York, IEEE, 1978, p. 1061-1066.

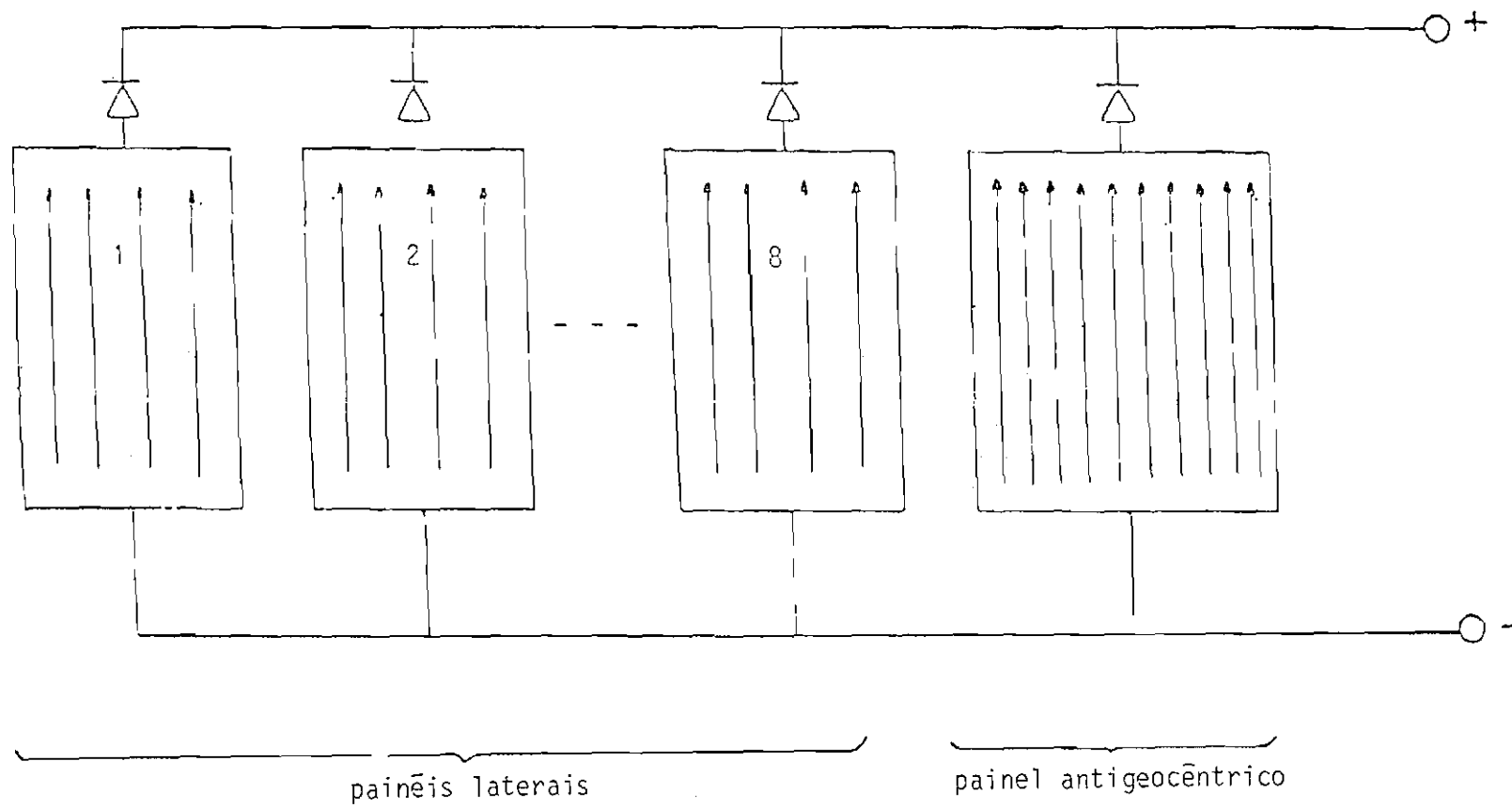
APÊNDICE A

DESCRIÇÃO DO ARRANJO FOTOVOLTAICO DO SATÉLITE DE COLETA DE DADOS

O arranjo solar do satélite de coleta de dados tem as seguintes características:

- a) 8 painéis laterais, cada um com um módulo de 68 células em série por 4 em paralelo;
- b) 1 painel antigeocêntrico com 10 módulos de 68 células solares;
- c) total de células = $(4 \times 8 + 10) \times 68 = 2856$ células;
- d) dimensão da célula = $(20 \times 40\text{mm}^2)$;
- e) temperatura de operação = -65°C a $+70^{\circ}\text{C}$;
- f) altitude = 700km;
- g) inclinação da órbita = 26° .

A Figura A.1 apresenta o diagrama de blocos funcional do arranjo solar.



- A.2 -

Fig. A.1 - Diagrama de blocos funcional do arranjo solar.

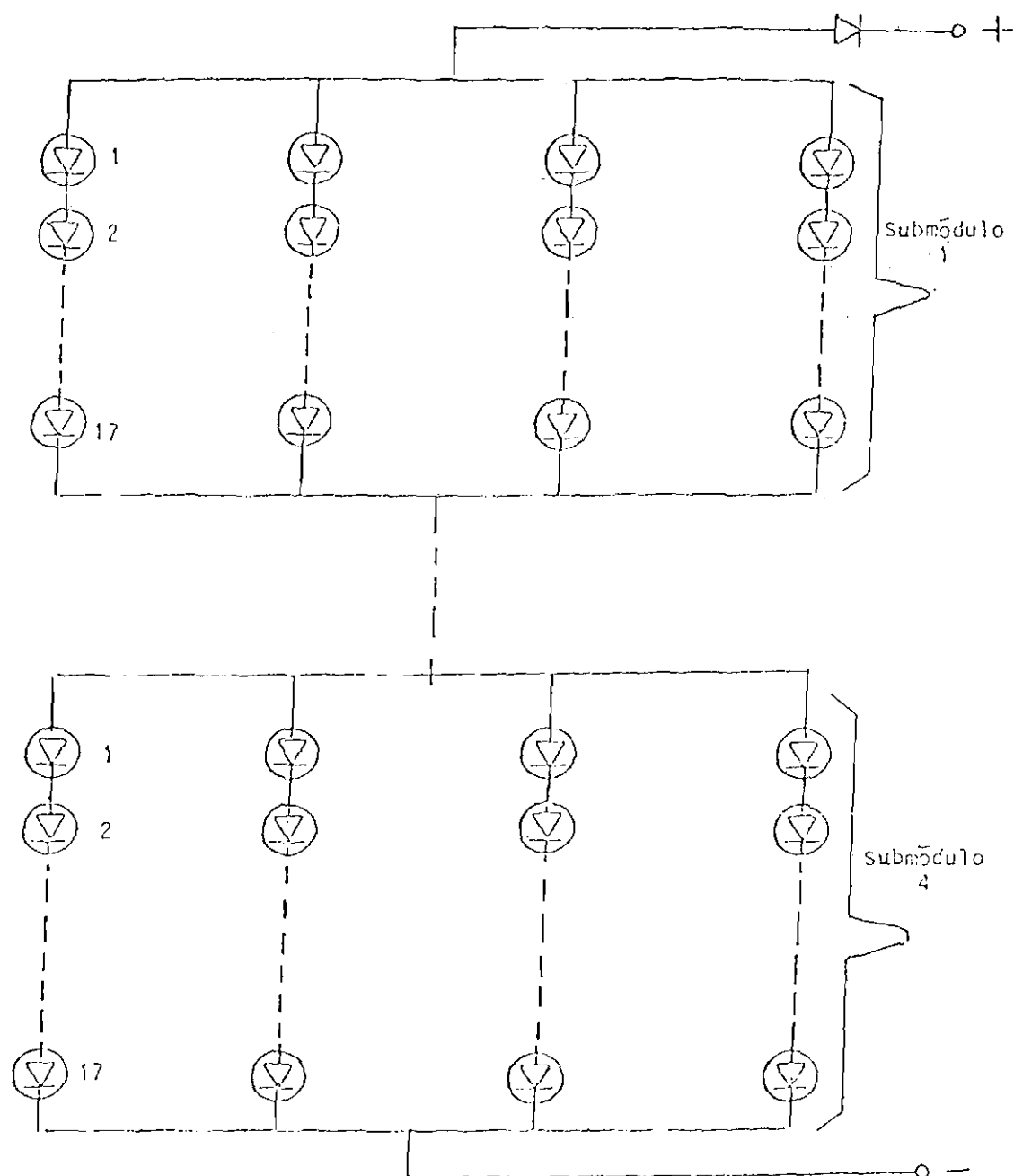


Fig. A.3 - Esquema elétrico do painel lateral.

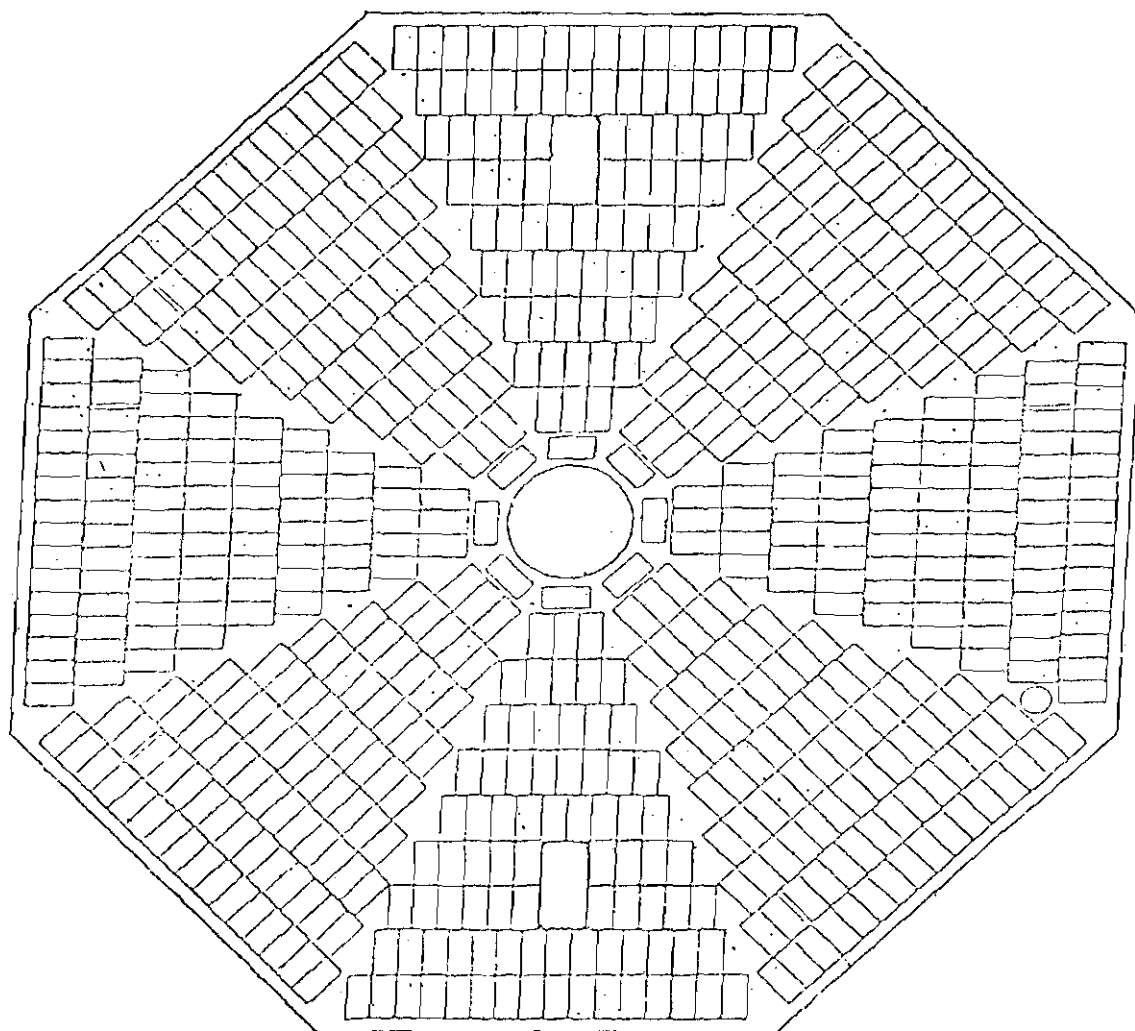


Fig. A.4 - Painei antigeocêntrico.

APÉNDICE B

PROGRAMA SIMULADOR

```

X
X
X
X
X
X
X   ESTE PROGRAMA CALCULA A CARACTERISTICA IV DE UM SUBMODULO
X   CONSTITUIDO DE CELULAS NAO IDENTICAS
X
X
X
X
REGIM

FILE TERMINAL(KIND=REMOTE,MYUSE=IO);

FILE SAIDA(KIND=PRINTER);

FILE TESTE3(KIND=DISK,TITLE="TESTE3.",FILETYPE=7);

FILE TESTE3A(KIND=DISK,TITLE="TESTE3A.",FILETYPE=7);

FILE TESTE5(KIND=DISK,TITLE="TESTE5.",FILETYPE=7);

FILE TESTE4(KIND=DISK,TITLE="TESTE4.",FILETYPE=7);

FILE TESTE7(KIND=DISK,TITLE="TESTE7.",FILETYPE=7);

FILE TESTE4L(KIND=DISK,TITLE="TESTE4L.",FILETYPE=7);

FILE TESTE6(KIND=DISK,TITLE="TESTE6.",FILETYPE=7);

FILE CURVACADEIA
(KIND=DISK,TITLE="P10.",MAXRECSIZE=14,BLOCKSIZE=420,
AREAS=1,AREASIZE=300);

X
X   DECLARACAD DE VARIAVEIS
X
INTEGER NTEST,
      NT,
      I,
      P,
      NF,
      NC,
      IN,
      CARAIV,
      NCAD,
      CAD,
      PS,
      NCM,
      J,
      RETA,
      PACE,

```



```
JL,
  NSUB,
  CARACM,
  SUB,
  LIN,
  PMD,
  PGCAD,
  PGSUB,
  PARS,
  MOD,
  PGAR,
  CIVAR,
  PGMOD,
  CIVSM,
  N,
  NP,
  N1,
  N2,
  M1,
  M2;
REAL ICI,
      ICF,
      VC,
      VCFE,
      VCDE,
      DV,
      CTC,
      RSC,
      LAMBDAINV,
      LAMBDAC,
      VCAC,
      IIC,
      IICP,
      IICL,
      IIN,
      INI,
      IDN,
      VN,
      PN,
      PN1,
      VMPN1,
      IMPN1,
      ICC,
      VCAC1,
      VMPC,
      IMPC,
      PMAXC,
      IMI,
      IMF,
      IMODI,
      IMODE,
      DVM,
      PMAXTTT,
      PMAXTTTT,
      VCAAR,
      ICCAR,
      PMAR,
      VMPAR,
      IMPAR,
      PSAR,
```

```
IMODI,
VCA,MOD,
ICCMOD,
VMPMOD,
IMPMOD,
PWAMOD,
PDMOD,
  DI,
  IVSME,
  IVSMI,
    ICCNMA,
    ICCNMI,
    VCANMA,
    VCANMI,
    IMPNMA,
    IMPNMI,
    VMPNMA,
    VMPNMI,
    PMAXNMA,
    PMAXNMI,
    PMAXT,
    PMAXTT,
      PD,
    IVSM,
    VSMI,
    VSMF,
    V1,
    V2,
    I1,
    I2,
    VCASM,
    ICCSM,
    VMPSM,
    IMPSM,
    PMSM,
    PDSM,
    SAM,
    MEDIA,
    DIFO,
    SIG,
  VARI,
  VARF,
  IVAR,
  IVARE,
  DIAR,
X,
  R1,
  R2,
  E1,
  E2,
  S,
  RN1,
  RN2,
  X1,
  X2,
  MIL,
  MRS,
  MLID,
  MLAMBDA,
  MG,
```

- B.5 -

```

      *GL,
      DPIL,
      DPRS,
      DPLIO,
      DPLAMBD,
      DPG,
      DPGL;
      DDUBLE PRODIO,IOC,PRODIL,LOC,ILC,PRODIL,IC;
      INTEGER ARRAY FE[1:400],
                     K2[1:200],
                     DS[1:100],
                     NCEL[1:20],
                     DE[1:400];
      ALPHA ARRAY CC[1:200];
      REAL ARRAY IL[1:400],
                 AM[1:200],
                 RS[1:400],
                 LAMBD,
                 DELTA[1:400],
                 IO[1:400],
                 LIO[1:400],
                 G[1:400],
                 GL[1:400],
                 ICC[1:400],
                 VVC[1:900],
                 VIC[1:900],
                 VPC[1:900],
                 ETA[1:400],
                 VDI[1:100],
                 IDI[1:100],
                 VSUB[1:2000,1:100],
                 ISUB[1:2000,1:100],
                 PSUB[1:2000,1:100],
                 IMOD[1:2000],
                 VMOD[1:2000],
                 PMOD[1:2000],
                 K1[1:200],
                 VCAN[1:400],
                 PMAXN[1:400],
                 VSM[1:1200],
                 ISM[1:1200],
                 PSM[1:1200],
                 VCAD[1:900,1:50],
                 ICAD[1:900,1:50],
                 PCAD[1:900,1:50],
                 VAS[1:400,1:10],
                 IAS[1:400,1:10],
                 PAS[1:400,1:10],
                 VMPN[1:400],
                 IMPN[1:400],

                 PARAM[1:400];
      LABEL A,B,C,D,E,F,H,K,L,Q,T,U,GG,R,SS,Z,REC,VOLTA,PROC,LA,DIS,RD;
      LABEL RR,RA,RE,RI,LB,PRUC,RU,YR,YA,YE,YI,ESC,NPG,NPGM,SAFU,PAT,CA;
      LABEL NPGAR,COSQ,AR,ER,IR,SAFOB;
      ?
      ?
      INTEGER NSEC,
              NSET,
              COMSOM,
```

```
      CALCSOM,
      SEC,
      UCP,
      SOMACEL,
      CELSOM,
REAL RM,
      INTSEC,
      ANGI,
      ANGFI,
      IANG,
      ALFA,
      CM,
      CDM,
      CEM,
      CFV,
      LS,
      LSALF,
      BETA,
      TR1,
      TR2,
      Y,
      BETAE,
      BETAL,
REAL ARRAY LSEC[1:10],
           CXE[1:100],
           CXD[1:100],
           CYI[1:100],
           CYS[1:100],
           ESPC[1:10],
           ILEE[1:100],
           ILDE[1:100],
           IBID[1:100],
           IBSE[1:100],
           ILED[1:100],
           ILDD[1:100],
           IBIE[1:100],
           IBSD[1:100],
           KS[1:100],
           ARR[1:3,1:68],
           KSL[1:100],
INTEGER ARRAY WCS[1:10],
           POSEC[1:100],
           SECCEL[1:100],
           SOMBR[1:30],
           TIPOD[1:10],
           TIPOE[1:100],
           TIPOS[1:100],
           POSECL[1:100],
*
*
*      ESTE PROCEDIMENTO GERA PARAMETROS PARA AS
*      CELULAS DA CADEIA NUMA DISTRIBUICAO NORMAL
*
*
PROCEDURE GERAPARAMETROS,
BEGIN
  LABEL H,
  INTEGER JJ,
    FOR JJ=1 STEP 2 UNTIL 41 DO
```

```

BEGIN
  H := RANDOM(X);
  V1 := -1 + (2 * R1);
  R2 := RANDOM(X);
  V2 := -1 + (2 * R2);
  S := (V1 ** 2) + (V2 ** 2);
  IF S GEQ 1 THEN GO TO H;
  RN1 := V1 * SQRT((-2 * LN(S)) / S);
  RN2 := V2 * SQRT((-2 * LN(S)) / S);
  PARAM[J] := RN1;
  PARAM[J+1] := RN2;
END;
END;

*
*
*   PROCEDIMENTO PARA SEPARAR AS CELULAS NUM GRUPO QUE FORNECE
*   ENERGIA E UM OUTRO GRUPO QUE DISSIPA ENERGIA
*
*
PROCEDURE SEPARA;
BEGIN
  LABEL A;

  N1 := 1;
  N1 := 0;
  N2 := 0;
  A: IF ICC[N] GTR IC
    THEN BEGIN
      N1 := N1 + 1;
      FE[N1] := N;
    END
    ELSE BEGIN
      N2 := N2 + 1;
      DE[N2] := N;
    END;
  IF N EQL NCEL[SUB]
    THEN N := N ELSE
      BEGIN
        N := N + 1;
        IF CC[N] EQL "S" THEN N := N + 1;
      END;
  IF N LEQ NCEL[SUB] THEN GO TO A;
END;

*
*
*   PROCEDIMENTO PARA CALCULAR A RESISTENCIA SERIE E LAMBDA
*   DA CADEIA
*
*
PROCEDURE CALCRESERELAMB;
BEGIN
  LABEL B;

  RSC := 0;
  M1 := 1;
  LAMBDAINV := 0;
  B: RSC := RSC + RS[FE[M1]];
  LAMBDAINV := LAMBDAINV + (1 / LAMBDA[FE[M1]]);

```

```

IF M1 EQL N1
  THEN LAMBDA C1=1/LAMBDA INV
  ELSE BEGIN
    M1:=M1+1;
    GO TO B;
  END;
END;

*
*
*   PROCEDIMENTO PARA CALCULAR ETA DE CADA CELULA
*
*
PROCEDURE CALCULETA;
BEGIN
  LABEL C;

  M1:=1;
  C:ETA[FE[M1]]:=LAMBDA[FE[M1]]/(N1*LAMBDA C);
  IF M1 EQL N1
    THEN ELSE
      BEGIN
        M1:=M1+1;
        GO TO C;
      END;
END;

*
*
*   PROCEDIMENTO PARA CALCULAR IL, ILO E IO
*
*
PROCEDURE CALCULAIS;
BEGIN
  LABEL D;

  PRODILO:=1;
  PRODIO:=1;
  PRODIL:=1;
  M1:=1;
  D:PRODILO:=PRODILO*((IL[FE[M1]])**(1/ETA[FE[M1]]));
  PRODIO:=PRODIO*(IO[FE[M1]]**((1/ETA[FE[M1]])));
  PRODIL:=PRODIL*(1-(IC[FE[M1]]))**((1/ETA[FE[M1]]));
  IF M1 EQL N1
    THEN BEGIN
      ILOC:=PRODILO**((1/N1));
      IOC:=PRODIO**((1/N1));
      IF IC NEQ 0 THEN
        ILC:=IC/(1-(PRODIL**((1/N1))))
        ELSE ILC:=1;
      END
    ELSE BEGIN
      M1:=M1+1;
      GO TO D;
    END;
END;

*
*
*   PROCEDIMENTO PARA CALCULAR A TENSÃO DA CADEIA REFERENTE AS

```

```

* CELULAS QUE FORNECEM ENERGIA
*
*
PROCEDURE CALCVCFE;
BEGIN
  VCAC:=(LN(ILOC/IOC))/LAMBDA C;
  VCFE:=VCAC-(IC+RSC)+((LN(1-(IC/ILOC)))/LAMBDA C);
END;
*
*
* PROCEDIMENTO PARA CALCULAR A TENSÃO DA CADEIA REFERENTE AS
* CELULAS QUE DISSIPAM ENERGIA
*
*
PROCEDURE CALCVUDE;
BEGIN
  LABEL E;

  M2:=1;
  VCDE:=0;
  E: IF RETA EQL 1 THEN VCDE:=VCDE+((IC-ICC[DE[M2]])/G[DE[M2]]
    ELSE BEGIN
      DELTA[DE[M2]]:=(GL[DE[M2]]**2)-(4*G[DE[M2]])*(IL[DE[M2]]-IC);
      VCDE:=VCDE+((-GL[DE[M2]]+(SQRT(DELTA[DE[M2]])))/(2*G[DE[M2]]);
    END;

  IF M2 EQL N2
    THEN M2:=M2+1 ELSE BEGIN
      M2:=M2+1;
      GO TO E;
    END;
END;

*
*
* PROCEDIMENTO PARA GERAR UMA CADEIA E DETERMINAR
* SUA CARACTERISTICA IV
*
*
PROCEDURE GERACADEIA;
BEGIN
  LABEL K,L,Q,T,REC,VOLTA,V,F,GG,R,SS,Z,U,DIS,ESC,PAT,CAT;

  JL:=1;
  IF PACE EQL 1 THEN
    WRITE(SAIDA[SPACE 4],<15(" ")>,"PARAMETROS DAS CELULAS">);
  IF PACE EQL 1 THEN WRITE(SAIDA[SPACE 2],
    <" N IL RS LAMBDA IO G GL",
    " VCA VMP IMP PMAX">);

  PMAX:=0;
  FOR I:=1 STEP 1 UNTIL NCEL[SUB] DO BEGIN
    VOLTA:GERAPARAMETROS;
    IN:=1;
    K:IL[I]:=MIL+PARAM[IN]*DPIL;
    IF IL[I] LSS (MIL-(3*DPIL)) OR IL[I] GTR (MIL+(3*DPIL))
    THEN BEGIN
      IN:=IN+1;
      GO TO K;
    END
    ELSE IN:=IN+1;
  END

```

```

L: LAMBDA[I] := MLAMBDA + PARAM[IN] * DPLAMBDA;
IF LAMBDA[I] GTR (MLAMBDA + (3 * DPLAMBDA)) OR
  LAMBDA[I] LSS (MLAMBDA - (3 * DPLAMBDA))
THEN BEGIN
  IN := IN + 1;
  GO TO L;
END
ELSE IN := IN + 1;
Q: RS[I] := MRS + PARAM[IN] * DPRS;
IF RS[I] GTR (MRS + (3 * DPRS)) OR RS[I] LSS (MRS - (3 * DPRS))
THEN BEGIN
  IN := IN + 1;
  GO TO Q;
END
ELSE IN := IN + 1;
T: LIO[I] := MLIO + PARAM[IN] * DPLIO;
IF LIO[I] LSS (MLIO + (3 * DPLIO)) OR LIO[I] GTR (MLIO - (3 * DPLIO))
THEN BEGIN
  IN := IN + 1;
  GO TO T;
END
ELSE IN := IN + 1;
IO[I] := IO * LIO[I];
G[I] := MG + PARAM[IN] * DPG;
IF RETA EQL 1 THEN G[I] := TAN(MG) * PARAM[IN] * TAN(DPG);
IN := IN + 1;
GL[I] := MGL + PARAM[IN] * DPGL;
*
*   DETERMINACAO DOS PARAMETROS GEOMETRICOS DA CELULA
*
IF IL[I] LSS ICCNMI OR IL[I] GTR ICCNMA THEN GO TO VOLTA;
LIN := 0;
PAT: LIN := LIN + 1;
IF IL[I] LEQ 0 THEN ICC[I] := 0 ELSE ICC[I] := IL[I];
VCAN[I] := (1 / LAMBDA[I]) * LN((IL[I] / IO[I]) + 1);
IF IL[I] LEQ 0 THEN IL[I] := 0.000001123;
PN1 := 1;
IDN := INI;
IF LIN EQL 2 THEN IDN := INI * CTC;
IF COMSOM EQL 1 AND LIN EQL 3 THEN IDN := IDN * ARR[MOD, JL] * CTC;
REC: VN := -IDN * RS[I] + VCAN[I] + (1 / LAMBDA[I]) * LN(1 - (IDN / IL[I]));
PN := IDN * VN;
IF PN GTR PN1
THEN BEGIN
  PN1 := PN;
  VMPN1 := VN;
  IMPN1 := IDN;
  IDN := IDN + IIN;
  IF IDN LSS IL[I] THEN GO TO REC
  ELSE BEGIN
    VMPN[I] := 0;
    IMPN[I] := 0;
    PMAXN[I] := 0;
  END;
END;
END
ELSE BEGIN
  VMPN[I] := VMPN1;
  IMPN[I] := IMPN1;
  PMAXN[I] := VMPN1 * IMPN1;
END;

```



```

*
*
*   SELECAO DE CELULAS
*
*
  IF IL[I] LEQ ICCNMA AND IL[I] GEQ ICCNMI
    AND VCAN[I] LEQ VCANMA AND VCAN[I] GEQ VCANMI
    AND IMPN[I] LEQ IMPNMA AND IMPN[I] GEQ IMPNMI
    AND VMPN[I] LEQ VMPNMA AND VMPN[I] GEQ VMPNMI
    AND PMAXN[I] LEQ PMAXNMA AND PMAXN[I] GEQ PMAXNMI
    THEN ELSE IF LIN EQL 1 THEN GO TO VOLTA;
  IF LIN EQL 2 THEN PMAXT:=PMAXT+PMAXN[I];
*
*   FATOR DE CORRECAO DO ANGULO DE INCIDENCIA
*
  IF LIN EQL 1 THEN
    BEGIN
      IL[I]:=IL[I]*CTC;
      GO TO PAT;
    END;
*
*   CORRECAO PARA SOMBRA
*
  IF LIN EQL 3 THEN GO TO CAT;
  IF COMSOM EQL 1 AND ARR[MOD,JL] LSS 0.25 THEN BEGIN IL[I]:=0;
                                                    ARR[MOD,JL]:=0;
                                                    END;

  IF COMSOM EQL 1 THEN IL[I]:=IL[I]*ARR[MOD,JL];
  IF ARR[MOD,JL] GEQ 0.25 THEN
    IF COMSOM EQL 1 AND ARR[MOD,JL] LEQ 0.7 THEN
      IO[I]:=IO[I]*(10**((2.687-(3.031*ARR[MOD,JL]))));
*
  IF LIN EQL 3 THEN GO TO CAT ELSE GO TO PAT;
  CAT: IF PACE EQL 1 THEN WRITE(SAIDA, <I3,2(F7.4),F8.4,3(E10.2),4(F7.3
    I,IL[I],RS[I],LAMBDA[I],IO[I],G[I],GL[I],VCAN[I],VMPN[I],IMPN[I],
    PMAXN[I]);
  NCM:=NCM+1;
  JL:=JL+1;
END;
*
*
*   DETERMINACAO DA CARACTERISTICA IV
*
*
  U:PI:=1;
  IICPI:=IIC;
  IC:=ICI;
  F:SEPARA;
  IF N1 NEQ 0 THEN BEGIN
    CALCRESERELAMB;
    CALCULETA;
    CALCULAIS;
  END;
  IF N1 NEQ 0 THEN CALCVCFE ELSE VCFE:=0;
  IF N2 NEQ 0 THEN CALCVCDE ELSE VCDE:=0;
  VC:=VCFE-VCDE;
  VVC[P]:=VC;
  VIC[P]:=IC;
  VPC[P]:=VC*IC;
  IF P GTR 1 AND IICP EQL IIC THEN BEGIN IF (VVC[P-1]-VVC[P]) LSS DV

```

```

THEN ELSE BEGIN
IC:=IC-IICP+IICL;
IICP:=IICL;
GO TO F;
END
END;
IF IC GEQ ICF OR VVC[P] LEQ -900
THEN BEGIN
IF CARAIV EQL 1 THEN ELSE GO TO GG;
WRITE(SAIDA[SPACE 5],<" ">);
WRITE(SAIDA[SPACE 3],<20(" ")>,"CARACTERISTICA IV DA CADEIA">);
WRITE(SAIDA[SPACE 2],<16(" ")>,"IC">15(" ")>,"VC">15(" ")>,"PC">);
WRITE(CURVACADEIA,<I4>P);
FOR I:=1 STEP 1 UNTIL P DO BEGIN
WRITE(SAIDA,<14(" ")>F6.4,<9(" ")>F8.3,<9(" ")>F9.4,<
VIC[I],VVC[I],VPC[I]>);
WRITE(CURVACADEIA,<F6.4>" ">F8.3>VIC[I],VVC[I]>);
END;
9
8 DETERMINACAO DOS PARAMETROS GEOMETRICOS DA CADEIA
9
GG:WRITE(SAIDA[SPACE 5],<" ">);
IF PGCAD EQL 1 THEN ELSE GO TO ESC;
WRITE(SAIDA[SPACE 3],<"PARAMETROS GEOMETRICOS DA CADEIA">);
WRITE(SAIDA[SPACE 2],<"PMAXT=">F6.3>PMAXT);
I:=1;
R:IF VIC[I] GEQ (-IICP) AND VIC[I] LSS IICP
THEN VCACI:=VVC[I]
ELSE BEGIN
I:=I+1;
GO TO R;
END;
WRITE(SAIDA[SPACE 2],<"VCACI=">F8.3>VCACI);
I:=1;
SS:IF VVC[I] EQL 0 OR (VVC[I] GTR 0 AND VVC[I+1] LSS 0)
THEN ICCCI:=VIC[I]
ELSE BEGIN
I:=I+1;
GO TO SS;
END;
WRITE(SAIDA[SPACE 2],<"ICCC=">F6.4>ICCC);
I:=1;
PMAXCI:=0;
Z:IF VPC[I] LSS PMAXC THEN ELSE
BEGIN
PMAXCI:=VPC[I];
VMPC:=VVC[I];
IMPC:=VIC[I];
END;
IF I EQL P
THEN BEGIN
WRITE(SAIDA[SPACE 2],<"PMAXC=">F9.4>PMAXC);
WRITE(SAIDA[SPACE 2],<"VMPC=">F8.3>VMPC);
WRITE(SAIDA[SPACE 2],<"IMPC=">F6.4>IMPC);
PD:=100-((PMAXC/PMAXT)*100);
WRITE(SAIDA[SPACE 5],<"PD=">F7.3>" %">PD);
END
ELSE BEGIN
I:=I+1;
GO TO Z;

```

```

                                END;
%
%
END
ELSE BEGIN
  P:=P+1;
  IC:=IC+1ICP;
  GO TO F;
END;
ESC:LOCK(CURVACADEIA);
END;

%
%
%   PROCEDIMENTO PARA CALCULAR A CARACTERISTICA IV
%   DE UM SUBMODULO
%
%
PROCEDURE GERASUB;
BEGIN
  LABEL LA,PROC,RO,RA,RE,RI,PR,NPG,CDSQ;

  PMAXTT:=0;
  IF CALCSOM EQL 1 THEN
    BEGIN
      NCAD:=3;
      GO TO CDSQ;
    END;
  IF COMSOM EQL 1 THEN NCAD:=1;
  FOR CAD:=1 STEP 1 UNTIL NCAD DO
    BEGIN
      GERACADEIA;
      PMAXTT:=PMAXTT+PMAXT;
      FOR I:=1 STEP 1 UNTIL P DO
        BEGIN
          VCAD[I,CAD]:=VVC[I];
          ICAD[I,CAD]:=VIC[I];
          PCAD[I,CAD]:=VPC[I];
        END;
      END;
    CDSQ:PS:=1;
    IVSMI:=IVSM;
    VSM[PS]:=VSMI;
    ISM[PS]:=0;
    LA:FOR CAD:=1 STEP 1 UNTIL NCAD DO
      BEGIN
        I:=2;
        PROC:IF VCAD[I,CAD] EQL VSM[PS]
          THEN BEGIN
            ISM[PS]:=ISM[PS]+ICAD[I,CAD];
            PSM[PS]:=ISM[PS]*VSM[PS];
          END
        ELSE IF VCAD[I,CAD] LSS VSM[PS]
          THEN BEGIN
            E1:=VCAD[I,CAD];
            E2:=VCAD[I-1,CAD];
            I1:=ICAD[I,CAD];
            I2:=ICAD[I-1,CAD];
            ISM[PS]:=ISM[PS]+I1-(((VSM[PS]-E1)/(E2-E1))*(I1-I2));
            PSM[PS]:=ISM[PS]*VSM[PS];
          END
        END
      END
    END
  END
```

```

        END
        ELSEF BEGIN
            I:=I+1;
            GO TO PROC;
        END;

    END;

IF PS GTR 1 AND IVSMI NEQ IVSMF
THEN BEGIN IF ABS(ISM[PS]-ISM[PS-1]) LEQ DI THEN
    ELSE IF PS GTR 1 THEN
        BEGIN
            IVSMI:=IVSMF;
            ISM[PS]:=0;
            GO TO RO;
        END;
    END;

IF VSM[PS] LEQ VSMF THEN
    BEGIN
        PS:=PS+1;
        ISM[PS]:=0;
        RO:VSM[PS]:=VSM[PS-1]+IVSMI;
        GO TO LA;
    END
    ELSE IF CIVSM EQL 0 THEN ELSE
        BEGIN
            IF CALCSOM EQL 1 THEN GO TO NPG;
            WRITE(SAIDA[SPACE 5],<" ">);
            WRITE(SAIDA[SPACE 3],<20(" ")>,"CARACTERISTICA IV DO SUBM">);
            WRITE(SAIDA[SPACE 2],<16(" ")>,"ISM",15(" ")>,"VSM",15(" ")>,"PSM">);
            FOR I:=1 STEP 1 UNTIL PS DO BEGIN
                WRITE(SAIDA,<14(" ")>F7.3,F9(" ")>F6.3,F9(" ")>F9.4>,"ISM[I],VSM[I],PSM[I]");
            END;
        END;
    END;

?
? DETERMINACAO DOS PARAMETROS GEOMETRICOS DO SUBMODULO
?
RR:WRITE(SAIDA[SPACE 5],<" ">);
IF PGSUB EQL 1 AND PMAXT NEQ 0 THEN ELSE GO TO NPG;
WRITE(SAIDA[SPACE 3],<" ">,"PARAMETROS GEOMETRICOS DO SUBMODULO">);
WRITE(SAIDA[SPACE 2],<" ">,"PMAXT=">F7.3>PMAXT);
I:=1;
RA:IF ISM[I] EQL 0 OR (ISM[I] GEQ 0 AND ISM[I+1] LSS 0)
    THEN VCASM:=VSM[I]
    ELSE BEGIN
        I:=I+1;
        GO TO RA;
    END;
WRITE(SAIDA[SPACE 2],<" ">,"VCASM=">F8.3>VCASM);
I:=1;
RE:IF VSM[I] EQL 0 OR (VSM[I] LSS 0 AND VSM[I+1] GTR 0)
    THEN ICCSM:=ISM[I]
    ELSE BEGIN
        I:=I+1;
        GO TO RE;
    END;
WRITE(SAIDA[SPACE 2],<" ">,"ICCSM=">F7.4>ICCSM);
I:=1;
PMSM:=0;
RI:IF PSM[I] LSS PMSM THEN

```

```

ELSE BEGIN
  PMSM:=PSM[I];
  VMPSM:=VSM[I];
  IMPSM:=ISM[I];
END;
IF I EQL PS
THEN BEGIN
  WRITE(SAIDA[SPACE 2],<"PMSM= ",F9.4>,PMSM);
  WRITE(SAIDA[SPACE 2],<"VMPSM= ",F8.3>,VMPSM);
  WRITE(SAIDA[SPACE 2],<"IMPSM= ",F7.4>,IMPSM);
  PDSM:=100-((PMSM/PMAXTT)*100);
  WRITE(SAIDA[SPACE 5],<"PDSM= ",F7.3>," %">,PDSM);
END
ELSE BEGIN
  I:=I+1;
  GO TO RI;
END;
NPG:END;

```

7
7
7
7
7
7

PROCEDIMENTO PARA CALCULAR O K DE CADA CELULA

```

PROCEDURE CALCULAR;
BEGIN
  FOR II:=1 STEP 1 UNTIL SOMACEL DO KS[II]:=1;
  IF BETA GIR 90 THEN
  BEGIN
    BETAL:=180-BETA;
  END
  ELSE BETAL:=BETA;
  IF BETA NEQ 90 THEN
  BEGIN
    CELSOM:=0;
    FOR CFV:=1 STEP 1 UNTIL SOMACEL DO
      IF CXD[CFV] LEQ ((CYI[CFV]/TAN(BETAL*3.1415/180))+CEM)
      OR CXE[CFV] GEQ ((CYS[CFV]/TAN(BETAL*3.1415/180))+CEM)
      THEN ELSE BEGIN
        CELSOM:=CELSOM+1;
        SOMBR[CELSOM]:=CFV;
      END;
    FOR II:=1 STEP 1 UNTIL CELSOM DO
      BEGIN
        Y:=TAN(BETAL*3.1415/180)*((CXE[SOMBR[II]]-CEM);
        IF Y LSS CYS[SOMBR[II]] AND Y GTR CYI[SOMBR[II]]
        THEN ILCE[SOMBR[II]]:=Y
        ELSE ILCE[SOMBR[II]]:=0;
        Y:=TAN(BETAL*3.1415/180)*((CXD[SOMBR[II]]-CEM);
        IF Y LSS CYS[SOMBR[II]] AND Y GTR CYI[SOMBR[II]]
        THEN ILDE[SOMBR[II]]:=Y
        ELSE ILDE[SOMBR[II]]:=0;
        XT:=((CYI[SOMBR[II]]/TAN(BETAL*3.1415/180))+CEM;
        IF X LSS CXD[SOMBR[II]] AND X GTR CXE[SOMBR[II]]
        THEN IBIE[SOMBR[II]]:=X
        ELSE IBIE[SOMBR[II]]:=0;
        XT:=((CYS[SOMBR[II]]/TAN(BETAL*3.1415/180))+CEM;
        IF X LSS CXD[SOMBR[II]] AND X GTR CXE[SOMBR[II]]
        THEN IBSE[SOMBR[II]]:=X;
      END;
    END;
  END;

```

```

ELSE IBSE[SOMBR[I]]:=0)
Y:=TAN(BETAL*3.1415/180)*(CXE[SOMBR[I]]-CDM);
IF Y LSS CYS[SOMBR[I]] AND Y GTR CYI[SOMBR[I]]
THEN ILED[SOMBR[I]]:=Y
ELSE ILED[SOMBR[I]]:=0;
Y:=TAN(BETAL*3.1415/180)*(CXD[SOMBR[I]]-CDM);
IF Y LSS CYS[SOMBR[I]] AND Y GTR CYI[SOMBR[I]]
THEN ILDD[SOMBR[I]]:=Y
ELSE ILDD[SOMBR[I]]:=0;
X:=(CYI[SOMBR[I]]/TAN(BETAL*3.1415/180))+CDM;
IF X LSS CXD[SOMBR[I]] AND X GTR CXE[SOMBR[I]]
THEN IBID[SOMBR[I]]:=X
ELSE IBID[SOMBR[I]]:=0;
X:=(CYS[SOMBR[I]]/TAN(BETAL*3.1415/180))+CDM;
IF X LSS CXD[SOMBR[I]] AND X GTR CXE[SOMBR[I]]
THEN IBSD[SOMBR[I]]:=X
ELSE IBSD[SOMBR[I]]:=0;
END;
FOR I:=1 STEP 1 UNTIL CELSOM DO
BEGIN
IF ILEE[SOMBR[I]] NEQ 0
THEN IF IBSE[SOMBR[I]] NEQ 0
THEN TIPOE[SOMBR[I]]:=1
ELSE TIPOE[SOMBR[I]]:=2;
IF IBIE[SOMBR[I]] NEQ 0
THEN IF IBSE[SOMBR[I]] NEQ 0
THEN TIPOE[SOMBR[I]]:=3
ELSE TIPOE[SOMBR[I]]:=4;
IF ILED[SOMBR[I]] NEQ 0
THEN IF IBSD[SOMBR[I]] NEQ 0
THEN TIPOD[SOMBR[I]]:=1
ELSE TIPOD[SOMBR[I]]:=2;
IF IBID[SOMBR[I]] NEQ 0
THEN IF IBSD[SOMBR[I]] NEQ 0
THEN TIPOD[SOMBR[I]]:=3
ELSE TIPOD[SOMBR[I]]:=4;
IF ILEE[SOMBR[I]] EQL 0 AND IBIE[SOMBR[I]] EQL 0
THEN TIPOE[SOMBR[I]]:=0;
IF ILED[SOMBR[I]] EQL 0 AND IBID[SOMBR[I]] EQL 0
THEN TIPOD[SOMBR[I]]:=0;
END;
FOR I:=1 STEP 1 UNTIL CELSOM DO
BEGIN
IF TIPOE[SOMBR[I]] EQL 1 AND TIPOD[SOMBR[I]] EQL 1
THEN TIPOS[SOMBR[I]]:=1;
IF TIPOE[SOMBR[I]] EQL 1 AND TIPOD[SOMBR[I]] EQL 2
THEN TIPOS[SOMBR[I]]:=2;
IF TIPOE[SOMBR[I]] EQL 1 AND TIPOD[SOMBR[I]] EQL 3
THEN TIPOS[SOMBR[I]]:=3;
IF TIPOE[SOMBR[I]] EQL 1 AND TIPOD[SOMBR[I]] EQL 4
THEN TIPOS[SOMBR[I]]:=4;
IF TIPOE[SOMBR[I]] EQL 2 AND TIPOD[SOMBR[I]] EQL 2
THEN TIPOS[SOMBR[I]]:=5;
IF TIPOE[SOMBR[I]] EQL 2 AND TIPOD[SOMBR[I]] EQL 4
THEN TIPOS[SOMBR[I]]:=6;
IF TIPOE[SOMBR[I]] EQL 3 AND TIPOD[SOMBR[I]] EQL 3
THEN TIPOS[SOMBR[I]]:=7;
IF TIPOE[SOMBR[I]] EQL 3 AND TIPOD[SOMBR[I]] EQL 4
THEN TIPOS[SOMBR[I]]:=8;
IF TIPOE[SOMBR[I]] EQL 4 AND TIPOD[SOMBR[I]] EQL 4

```

```

    THEN TIPOS[SOMBR(I)]:=9;
  IF TIPOE[SOMBR(I)] EQL 0 AND TIPOD[SOMBR(I)] EQL 1
    THEN TIPOS[SOMBR(I)]:=10;
  IF TIPOE[SOMBR(I)] EQL 0 AND TIPOD[SOMBR(I)] EQL 2
    THEN TIPOS[SOMBR(I)]:=11;
  IF TIPOE[SOMBR(I)] EQL 0 AND TIPOD[SOMBR(I)] EQL 3
    THEN TIPOS[SOMBR(I)]:=12;
  IF TIPOE[SOMBR(I)] EQL 0 AND TIPOD[SOMBR(I)] EQL 4
    THEN TIPOS[SOMBR(I)]:=13;
  IF TIPOD[SOMBR(I)] EQL 0 AND TIPOE[SOMBR(I)] EQL 1
    THEN TIPOS[SOMBR(I)]:=14;
  IF TIPOD[SOMBR(I)] EQL 0 AND TIPOE[SOMBR(I)] EQL 2
    THEN TIPOS[SOMBR(I)]:=15;
  IF TIPOD[SOMBR(I)] EQL 0 AND TIPOE[SOMBR(I)] EQL 3
    THEN TIPOS[SOMBR(I)]:=16;
  IF TIPOD[SOMBR(I)] EQL 0 AND TIPOE[SOMBR(I)] EQL 4
    THEN TIPOS[SOMBR(I)]:=17;
  END;
FOR I:=1 STEP 1 UNTIL CELSOM DO
  BEGIN
    CASE TIPOS[SOMBR(I)] OF
      BEGIN
        1:TR1:=((CYS[SOMBR(I)]-ILED[SOMBR(I)])*
          (IBSD[SOMBR(I)]-CXE[SOMBR(I)]))/2;
          TR2:=((CYS[SOMBR(I)]-ILEF[SOMBR(I)])*
          (IBSE[SOMBR(I)]-CXE[SOMBR(I)]))/2;
          KS[SOMBR(I)]:=1-(TR1/8)+(TR2/6);
        2:TR1:=((2*CYS[SOMBR(I)]-ILDD[SOMBR(I)]-ILED[SOMBR(I)])*
          (CXD[SOMBR(I)]-CXE[SOMBR(I)]))/2;
          TR2:=((IBSE[SOMBR(I)]-CXF[SOMBR(I)])*
          (CYS[SOMBR(I)]-ILEE[SOMBR(I)]))/2;
          KS[SOMBR(I)]:=1-(TR1/8)+(TR2/6);
        3:TR1:=((IBSD[SOMBR(I)]-(CXE[SOMBR(I)]+2)*
          IBID[SOMBR(I)]*(CYS[SOMBR(I)]-CYI[SOMBR(I)]))/2;
          TR2:=((IBSE[SOMBR(I)]-CXF[SOMBR(I)])*
          (CYS[SOMBR(I)]-ILEE[SOMBR(I)]))/2;
          KS[SOMBR(I)]:=1-(TR1/8)+(TR2/6);
        4:TR1:=((IBSE[SOMBR(I)]-CXF[SOMBR(I)])*
          (CYS[SOMBR(I)]-ILEE[SOMBR(I)]))/2;
          TR2:=((CXD[SOMBR(I)]-IBID[SOMBR(I)])*
          (ILDD[SOMBR(I)]-CYI[SOMBR(I)]))/2;
          KS[SOMBR(I)]:=(TR1/8)+(TR2/8);
        5:KS[SOMBR(I)]:=1-((2*(ILDF[SOMBR(I)]-ILDD[SOMBR(I)])*
          (CXD[SOMBR(I)]-CXE[SOMBR(I)]))/16);
        6:TR1:=((CYS[SOMBR(I)]+2)*ILEE[SOMBR(I)]-ILDD[SOMBR(I)])*
          (CXD[SOMBR(I)]-CXE[SOMBR(I)]))/2;
          TR2:=((CXD[SOMBR(I)]-IBID[SOMBR(I)])*
          (ILDD[SOMBR(I)]-CYI[SOMBR(I)]))/2;
          KS[SOMBR(I)]:=(TR1+TR2)/8;
        7:KS[SOMBR(I)]:=1-((IBSD[SOMBR(I)]-IBSE[SOMBR(I)]*2*
          (CYS[SOMBR(I)]-CYI[SOMBR(I)]))/16);
        8:TR1:=((IBIE[SOMBR(I)]-(2*CXE[SOMBR(I)]+IBSE[SOMBR(I)])*
          (CYS[SOMBR(I)]-CYI[SOMBR(I)]))/2;
          TR2:=((ILDD[SOMBR(I)]-CYI[SOMBR(I)])*
          (CXD[SOMBR(I)]-IBID[SOMBR(I)]))/2;
          KS[SOMBR(I)]:=TR1/8+TR2/8;
        9:TR1:=((ILDE[SOMBR(I)]-CYI[SOMBR(I)])*
          (CXD[SOMBR(I)]-IBIE[SOMBR(I)]))/2;
          TR2:=((ILDD[SOMBR(I)]-CYI[SOMBR(I)])*
          (CXD[SOMBR(I)]-IBID[SOMBR(I)]))/2;

```

```

      KS[SOMBR[I]]:=1-TR1/8+TR2/8)
10:KS[SOMBR[I]]:=1-((IBSD[SOMBR[I]]-CXE[SOMBR[I]])*
      (CYS[SOMBR[I]]-ILED[SOMBR[I]])/16)
11:KS[SOMBR[I]]:=(ILED[SOMBR[I]]-(CYI[SOMBR[I]]+2)*
      ILDD[SOMBR[I]])*(CXD[SOMBR[I]]-
      CXE[SOMBR[I]])/16)
12:KS[SOMBR[I]]:=(2*CXD[SOMBR[I]]-IBSD[SOMBR[I]]-
      IBID[SOMBR[I]])*(CYS[SOMBR[I]]-
      CYI[SOMBR[I]])/16)
13:KS[SOMBR[I]]:=(CXD[SOMBR[I]]-IBID[SOMBR[I]])*
      (ILDD[SOMBR[I]]-CYI[SOMBR[I]])/16)
14:KS[SOMBR[I]]:=(IRSE[SOMBR[I]]-CXE[SOMBR[I]])*
      (CYS[SOMBR[I]]-ILEE[SOMBR[I]])/16)
15:KS[SOMBR[I]]:=(2*CYS[SOMBR[I]]-ILEE[SOMBR[I]]-
      ILDE[SOMBR[I]])*(CXD[SOMBR[I]]-
      CXE[SOMBR[I]])/16)
16:KS[SOMBR[I]]:=(IRSE[SOMBR[I]]+IBIE[SOMBR[I]]-
      (2*CXE[SOMBR[I]]))*(CYS[SOMBR[I]]-
      CYI[SOMBR[I]])/16)
17:KS[SOMBR[I]]:=1-(CXD[SOMBR[I]]-IBIE[SOMBR[I]])*
      (ILDE[SOMBR[I]]-CYI[SOMBR[I]])/16)

      END;
    END;
  END;
  IF BETA EQL 90
    THEN BEGIN
      CELSOM:=0;
      FOR CFV:=1 STEP 1 UNTIL SOMACEL DO
        IF CXD[CFV] LEQ CEM OR CXE[CFV] GEQ CDM
          THEN ELSE BEGIN
            CELSOM:=CELSOM+1;
            SOMBR[CELSOM]:=CFV;
          END;
      FOR I:=1 STEP 1 UNTIL CELSOM DO
        BEGIN
          IF CEM LSS CXE[SOMBR[I]]
            THEN IBIE[SOMBR[I]]:=0
            ELSE IBIE[SOMBR[I]]:=CEM;
          IF CDM GTR CXD[SOMBR[I]]
            THEN IBID[SOMBR[I]]:=0
            ELSE IBID[SOMBR[I]]:=CDM;
        END;
      FOR I:=1 STEP 1 UNTIL CELSOM DO
        BEGIN
          S:=SOMBR[I];
          IF IBIE[S] EQL 0
            THEN KS[S]:=(CXD[S]-CDM)*
              (CYS[S]-CYI[S])/8)
          IF IBID[S] EQL 0
            THEN KS[S]:=(CEM-CXE[S])*(CYS[S]-
              CYI[S])/8)
          IF IBID[S] NEQ 0 AND IBIE[S] NEQ 0 THEN
            KS[S]:=1-((IBID[S]-IBIE[S])*
              (CYS[S]-CYI[S])/8)
        END;
      END;
    IF BETA GTR 90
      THEN BEGIN
        FOR I:=1 STEP 1 UNTIL SOMACEL DO
          KSL[I]:=KS[I-2*POSEC[I]]+1+NCS[SECCELL[I]]);

```



```

    FOR I:=1 STEP 1 UNTIL SOMACFL DO KS[I]:=KSL[I]]
  END]
END]
?
? PROCEDIMIENTO PARA CALCULAR A SOMBRA NO MODULO
?
PROCEDURE SOMBRA;
BEGIN
  CXE[1]:=CM*2;
  CXD[1]:=CM*2;
  CYI[1]:=6.6;
  CYS[1]:=8.6;
  CDM:=CM+RM;
  CEM:=CM-RM;
  POSEC[1]:=1;
  SECCEL[1]:=1;
  UCP:=1;
  FOR SEC:=2 STEP 1 UNTIL 10 DO
    BEGIN
      ESPC[SEC]:=(LSEC[SEC]-(2*NCS[SEC]))/(NCS[SEC]-1);
      FOR CFV:=(UCP+1) STEP 1 UNTIL (UCP+NCS[SEC]) DO
        BEGIN
          SECCEL[CFV]:=SEC;
          POSEC[CFV]:=CFV-UCP;
          CYI[CFV]:=CYS[UCP]+INTSEC;
          CYS[CFV]:=CYI[CFV]+4;
          CXE[CFV]:=CM-(LSEC[SEC]/2)+((POSEC[CFV]-1)*(2+EPC[SEC]));
          CXD[CFV]:=CXE[CFV]+2;
        END;
      UCP:=UCP+NCS[SEC];
    END;
  SOMACEL:=0;
  FOR SEC:=1 STEP 1 UNTIL 10 DO
    SOMACEL:=NCS[SEC]+SOMACEL;
  LS:=RM/0.00436335;
  LSALF:=LS*SIN(ALFA*3.1415/180);
  FOR BETA:=ANG1 STEP 1ANG UNTIL ANG2 DO
    BEGIN
      CALCULAK;
      FOR I:=1 STEP 1 UNTIL 68 DO
        ARR[1,I]:=KS[I];
      FOR I:=1 STEP 1 UNTIL 68 DO
        ARR[3,I]:=1;
      FOR I:=69 STEP 1 UNTIL 86 DO
        ARR[3,87-I]:=KS[I];
      BETAE:=BETA;
      BETA:=BETA+45;
      CALCULAK;
      BETA:=BETAE;
      FOR I:=1 STEP 1 UNTIL 68 DO
        ARR[2,I]:=KS[I];
      FOR I:=69 STEP 1 UNTIL 86 DO
        ARR[3,105-I]:=KS[I];
      WRITE(SAIDA[SPACE 3],<"BETA=" F6.1>>BETA);
      WRITE(SAIDA[SPACE 3],<8(" ")>,"COEFICIENTE DE ILUMINACAO");
      WRITE(SAIDA[SPACE 2],<10(" ")>,"N",10(" ")>,"K1",10(" ")>,"K2",
        10(" ")>,"K3">);
      FOR I:=1 STEP 1 UNTIL 68 DO
        WRITE(SAIDA,<9(" ")>I3,9(" ")>F5.3,9(" ")>F5.3,9(" ")>F5.3,
          I,ARR[1,I],ARR[2,I],ARR[3,I]);
    END;
  END;

```

```

WRITE(SAIDA|SPACE 5|,<" ">))
END;
END;
*
*
*      PROCEDIMENTO PARA CALCULAR A CARACTERISTICA IV
*      DE UM MODULO
*
*
PROCEDURE GERAMOD;
BEGIN
  LABEL LB=PRUC,RUC,YR,YA,YE,YI,NPGM,SAFO,SAFUB;

  PMAXTTT:=0;
  NCM:=0;
  JLI:=1;
  FOR I:=1 STEP 1 UNTIL NSUB DO NCM:=NCM+NCEL[I];
  FOR SUB:=1 STEP 1 UNTIL NSUB DO
    BEGIN
      GERASUB;
      PMAXTTT:=PMAXTTT+PMAXTT;
      FOR I:=1 STEP 1 UNTIL PS DO
        BEGIN
          VSUB[I,SUB]:=VSM[I];
          IF VSUB[I,SUB] GTO 0 THEN ISUB[I,SUB]:=ISM[I];
          IF VSUB[I,SUB] LSS 0 THEN BEGIN
            IF DS[SUB] EQL 1 THEN
              BEGIN
                FOR J:=1 STEP 1 UNTIL 100 DO
                  BEGIN
                    IF VDI[J] EQL ABS(VSUB[I,SUB])
                      THEN BEGIN
                        ISUB[I,SUB]:=ISM[I]+IDI[J];
                        GO TO SAFO;
                      END;
                    IF VDI[J] LSS ABS(VSUB[I,SUB]) AND
                      ABS(VSUB[I,SUB]) LSS VDI[J+1]
                      THEN BEGIN
                        ISUB[I,SUB]:=ISM[I]+(IDI[J+1]+
                          ((VDI[J]-ABS(VSUB[I,SUB]))/(VDI[J+1]-
                          VDI[J]))*(IDI[J+1]-IDI[J]));
                        GO TO SAFO;
                      END;
                  END;
                END;
              END;
            ELSE ISUB[I,SUB]:=ISM[I];
          END;
          SAF0:PSUB[I,SUB]:=VSUB[I,SUB]*ISUB[I,SUB];
        END;
      END;
    END;
  PMD:=1;
  IMODII:=IMODI;
  IMOD[PMO]:=IMI;
  VMOD[PMO]:=0;
  LB:FOR SUB:=1 STEP 1 UNTIL NSUB DO
    BEGIN
      I:=2;
      PRUC: IF ISUB[I,SUB] EQL IMOD[PMO]
        THEN BEGIN
          VMOD[PMO]:=VMOD[PMO]+VSUB[I,SUB];

```

```

        PMOD[PMO]:=IMOD[PMO]*VMOD[PMO];
    END
    ELSE IF ISUB[I,SUB] LSS IMOD[PMO]
    THEN BEGIN
        I2:=ISUB[I,SUB];
        I1:=ISUB[I-1,SUB];
        E2:=VSUB[I,SUB];
        E1:=VSUB[I-1,SUB];
        VMOD[PMO]:=VMOD[PMO]+E1-((E2-E1)/
        (I1-I2)*(IMOD[PMO]-1));
        PMOD[PMO]:=VMOD[PMO]*IMOD[PMO];
    END
    ELSE BEGIN
        I:=I+1;
        GO TO PROC;
    END;
END;

IF PMO GTR 1 AND IMODI NEO IMODE
THEN BEGIN IF ABS(VMOD[PMO]-VMOD[PMO-1]) LEQ DVM THEN
    ELSE IF PMO GTR 1 THEN
        BEGIN
            IMODI:=IMODE;
            VMOD[PMO]:=0;
            GO TO PU;
        END;
END;

IF IMOD[PMO] LEQ IMF THEN
BEGIN
    PMO:=PMO+1;
    VMOD[PMO]:=0;
    RU:IMOD[PMO]:=IMOD[PMO-1]+IMODI;
    GO TO LB;
END
ELSE IF CARACH EQL 0 THEN ELSE
    BEGIN
        FOR I:=1 STEP 1 UNTIL PMO DO
            IF IMOD[I] LSS 0 THEN
                BEGIN
                    IMOD[I]:=0;
                    PMOD[I]:=0;
                END
            ELSE BEGIN
                FOR J:=1 STEP 1 UNTIL 100 DO
                    BEGIN
                        IF IMOD[I] EQL IDI[J]
                        THEN BEGIN
                            VMOD[I]:=VMOD[I]-VDI[J];
                            GO TO SAFOB;
                        END;
                        IF IDI[J] LSS IMOD[I] AND
                            IDI[J+1] GTR IMOD[I]
                        THEN BEGIN
                            VMOD[I]:=VMOD[I]-((VDI[J]-
                                ((IDI[J]-IMOD[I])/
                                (IDI[J+1]-IDI[J]))*
                                (VDI[J+1]-VDI[J])));
                            GO TO SAFOB;
                        END;
                    END;
                END;
            END;
        SAFOB:PMOD[I]:=VMOD[I]*IMOD[I];
    END;

```

```

      END;
      WRITE(SAIDA[SPACE 5], "<" ">");
      WRITE(SAIDA[SPACE 3], "<20(" ")",
            "CARACTERISTICA IV DO MODULO">);
      WRITE(SAIDA[SPACE 2], "<16(" ")", "IMOD", 14(" ")", "VMOD",
            14(" ")", "PMOD">);
      FOR I:=1 STEP 1 UNTIL PMD DO
        WRITE(SAIDA, "<14(" ")", F7.3, 9(" ")", F8.3, 9(" ")", F9.4,
            IMOD[I], VMOD[I], PMOD[I]);

```

END;

7

7 DETERMINACAO DOS PARAMETROS GEOMETRICOS DO MODULO

7

```

      IF PGMOD EQL 1 THEN ELSE GO TO NPGM;
      YR:WRITE(SAIDA[SPACE 5], "<" ">");
      WRITE(SAIDA[SPACE 3], "<"PARAMETROS GEOMETRICOS DO MODULO">);
      WRITE(SAIDA[SPACE 2], "<"PMAXTTT= ", F7.3, PMAXTTT);
      I:=1;
      YA:IF IMOD[I] EQL 0 OR (IMOD[I] LSS 0 AND IMOD[I+1] GTR 0)
        THEN VCAMOD:=VMOD[I]
        ELSE BEGIN
          I:=I+1;
          GO TO YA;
        END;
      WRITE(SAIDA[SPACE 2], "<"VCAMOD= ", F8.3, VCAMOD);
      I:=2;
      YE:IF VMOD[I] EQL 0 OR (VMOD[I] LSS 0 AND VMOD[I-1] GTR 0)
        THEN ICCMOD:=IMOD[I]
        ELSE BEGIN
          I:=I+1;
          GO TO YE;
        END;
      WRITE(SAIDA[SPACE 2], "<"ICCMOD= ", F7.4, ICCMOD);
      I:=1;
      PMAMOD:=0;
      YI:IF PMOD[I] LSS PMAMOD THEN
        ELSE BEGIN
          PMAMOD:=PMOD[I];
          VMPMOD:=VMOD[I];
          IMPMOD:=IMOD[I];
        END;
      IF I EQL PMD
        THEN BEGIN
          WRITE(SAIDA[SPACE 2], "<"PMAMOD= ", F9.4, PMAMOD);
          WRITE(SAIDA[SPACE 2], "<"VMPMOD= ", F8.3, VMPMOD);
          WRITE(SAIDA[SPACE 2], "<"IMPMOD= ", F7.4, IMPMOD);
          PDMOD:=100-((PMAMOD/PMAXTTT)*100);
          WRITE(SAIDA[SPACE 5], "<"PDMOD= ", F7.3, " %">PDMOD);
        END
        ELSE BEGIN
          I:=I+1;
          GO TO YI;
        NPGM:END
      END;

```

7

7 PROCEDIMENTO PARA CALCULAR A CARACT. IV DE UM ARRANJO SOMBREADO

7

```

      PROCEDURE ARRANJO;
      BEGIN

```

```

LABEL NPGAR,AR,ER,IR;

PMAXTTTT:=0;
PARS:=0;
IF COMSUM EQL 1 THEN SOMBRA;
FOR MOD:=1 STEP 1 UNTIL 3 DO
  BEGIN
    CALCSOM:=0;
    GERAMOD;
    CALCSOM:=1;
    PMAXTTTT:=PMAXTTTT+PMAXTTT;
    IF PMD GEQ PARS THEN PARS:=PMD;
    FOR I:=1 STEP 1 UNTIL PARS DO
      BEGIN
        VAS[I,MOD]:=VMOD[I];
        IAS[I,MOD]:=IMOD[I];
        PAS[I,MOD]:=PMOD[I];
      END;
    END;
    FOR MOD:=1 STEP 1 UNTIL 3 DO
      FOR I:=1 STEP 1 UNTIL PARS DO
        BEGIN
          VCAD[I,MOD]:=VAS[I,MOD];
          ICAD[I,MOD]:=IAS[I,MOD];
          PCAD[I,MOD]:=PAS[I,MOD];
        END;
      VSMI:=VAR1;
      VSMF:=VARF;
      IVSM:=IVAR;
      IVSME:=IVARE;
      DI:=DIAR;
      GERASUB;
      IF CIVAR EQL 0 THEN ELSE
        BEGIN
          WRITE(SAIDA[SPACE 5],<" ">);
          WRITE(SAIDA[SPACE 3],<F0(" ")>,"CARACI. IV DO ARRANJO SOMBR.">);
          WRITE(SAIDA[SPACE 2],<F16(" ")>,"IAR">F15(" ")>,"VAR">F15(" ")>,"PAR">);
          FOR I:=1 STEP 1 UNTIL PS DO BEGIN
            WRITE(SAIDA,<F14(" ")>F7.3,<F14(" ")>F0.3,<F14(" ")>F9.4,<F14(" ")>ISM[I],VSM[I],PSM[I]);
          END;
        END;
      END;
    END;
  *
  * DETERMINACAO DOS PARAMETROS GEOMETRICOS DO ARRANJO SOMBREADO
  *
  WRITE(SAIDA[SPACE 5],<" ">);
  IF PGAR EQL 1 THEN ELSE GO TO NPGAR;
  WRITE(SAIDA[SPACE 3],<"PARAM. GEOM. DO ARRANJO SOMBREADO">);

  WRITE(SAIDA[SPACE 2],<"PMAXTTTT=">F7.3,<F14(" ")>PMAXTTTT);
  I:=1;
  AR:IF ISM[I] EQL 0 OR (ISM[I] GEQ 0 AND ISM[I+1] LSS 0)
    THEN VCAAR:=VSM[I]
    ELSE BEGIN
      I:=I+1;
      GO TO AR;
    END;
  WRITE(SAIDA[SPACE 2],<"VCAAR=">F8.3,<F14(" ")>VCAAR);
  I:=1;
  ER:IF VSM[I] EQL 0 OR (VSM[I] LSS 0 AND VSM[I+1] GTR 0)

```

```

        THEN ICCAR:=ISM[I]
        ELSE BEGIN
            I:=I+1;
            GO TO ER;
        END;
WRITE(SAIDA[SPACE 2],<"ICCAR= ",F7.4>,ICCAR);
I:=1;
PMAR:=0;
IR:IF PSM[I] LSS PMAR THEN
    ELSE BEGIN
        PMAR:=PSM[I];
        VMPAR:=VSM[I];
        IMPAR:=ISM[I];
    END;
IF I EQL PS
    THEN BEGIN
        WRITE(SAIDA[SPACE 2],<"PMAR= ",F9.4>,PMAR);
        WRITE(SAIDA[SPACE 2],<"VMPAR= ",F8.3>,VMPAR);
        WRITE(SAIDA[SPACE 2],<"IMPAR= ",F7.4>,IMPAR);
        PSAR:=100*((PMAR/PMAXTTTT)*100);
        WRITE(SAIDA[SPACE 5],<"PSAR= ",F6.3," %">,PSAR);
        PSAR:=PSAR*0.3;
        WRITE(SAIDA[SPACE 5],<"PERDA POR SOMBRA NO P. ANTIG.= ",F6.3," %">,P
    END
    ELSE BEGIN
        I:=I+1;
        GO TO IR;
    END;
NPGAR:END;

%
%
%   ENTRADA DE DADOS
%
%
WRITE(SAIDA[SPACE 30],<" ">);
WRITE(SAIDA[SKIP 1],<35(" ")>,"* * * *   A R R A N J O   * * * *")
%
WRITE(SAIDA,<"NUMERO DE SUBMÓDULOS">);
READ(TESTE3,<I4>,NSUB);
WRITE(SAIDA[SPACE 2],<"NSUR= ",I2>,NSUB);
%
WRITE(SAIDA,<"NUMERO DE CÉLULAS DAS CADEIAS">);
FOR I:=1 STEP 1 UNTIL NSUB DO
    READ(TESTE7,<I4>,NCEL[I]);
    WRITE(SAIDA,<"SUB"&(" ")&"NCEL">);
    FOR I:=1 STEP 1 UNTIL NSUB DO
        WRITE(SAIDA,<I3&(" ")&I3>,NCEL[I]);
    WRITE(SAIDA[SPACE 2],<" ">);
%
WRITE(SAIDA,<"CORRENTE MÍNIMA DA CADEIA">);
READ(TESTE3,<F6.4>,ICI);
WRITE(SAIDA[SPACE 2],<"ICI= ",F6.4>,ICI);
%
WRITE(SAIDA,<"CORRENTE MÁXIMA DA CADEIA">);
READ(TESTE3,<F6.4>,ICF);
WRITE(SAIDA[SPACE 2],<"ICF= ",F6.4>,ICF);
%
WRITE(SAIDA,<"INCREMENTO DE IC">);
READ(TESTE3,<F6.4>,IIC);

```

```

WRITE(SAIDA[SPACE 2],<"IIC= ",F6.4>,IIC);
%
WRITE(SAIDA,<"INCREMENTO DE IC ESPECIAL">);
READ(TESTE3,<F6.4>,IICL);
WRITE(SAIDA[SPACE 2],<"IICL= ",F6.4>,IICL);
%
WRITE(SAIDA,<"NUMERO DE TESTES">);
READ(TESTE3,<I4>,NTEST);
WRITE(SAIDA[SPACE 2],<"NTEST= ",I4>,NTEST);
%
WRITE(SAIDA,<"DELTA V DE REFERENCIA">);
READ(TESTE3,<F4.1>,DV);
WRITE(SAIDA[SPACE 3],<"DV",F4.1>,DV);
%
WRITE(SAIDA,<"ESCREVA 1 SE A CARACT. REVERSA E LINEAR">);

READ(TESTE3,<I3>,RETA);
WRITE(SAIDA[SPACE 3],<"RETA= ",I3>,RETA);
%
WRITE(SAIDA,<"NUMERO ALEATORIO ENTRE 2 E 18">);
READ(TESTE3,<I4>,X);
WRITE(SAIDA[SPACE 3],<"CHUTE INICIAL= ",I4>,X);
%
WRITE(SAIDA,<"ESCREVA 1 SE QUISER A CARACT. IV DE CADEIA">);
READ(TESTE3,<I2>,CARAIV);
WRITE(SAIDA[SPACE 3],<I2>,CARAIV);
%
WRITE(SAIDA,<"CORRENTE INICIAL DA CELULA">);
READ(TESTE3,<F5.3>,INI);
WRITE(SAIDA[SPACE 3],<"INI= ",F5.3>,INI);
%
WRITE(SAIDA,<"INCREMENTO DE CORRENTE DA CELULA">);
READ(TESTE3,<F6.4>,IIN);
WRITE(SAIDA[SPACE 3],<"IIN= ",F6.4>,IIN);
%
WRITE(SAIDA,<"FAIXA ADMISSIVEL PARA CORRENTE DE CURTO CIRCUITO"
" DAS CELULAS">);
READ(TESTE3,<2F6.3>,ICCNMA,ICCNMI);
WRITE(SAIDA[SPACE 2],<"ICCNMAX= ",F6.3>," " "ICCNMIN= ",F6.3>,
ICCNMA,ICCNMI);
%
WRITE(SAIDA,<"FAIXA ADMISSIVEL PARA TENSAO DE CIRCUITO ABERTO"
" DAS CELULAS">);
READ(TESTE3,<2F6.3>,VCANMA,VCANMI);
WRITE(SAIDA[SPACE 2],<"VCA"AX= ",F6.3>," " "VCAMIN= ",F6.3>,
VCANMA,VCANMI);
%
WRITE(SAIDA,<"FAIXA ADMISSIVEL PARA CORRENTE DE MAXIMA POTENCIA">);
READ(TESTE3,<2F6.3>,IMPNMA,IMPNMI);
WRITE(SAIDA[SPACE 2],<"IMPNMAX= ",F6.3>," " "IMPNMIN= ",F6.3>,
IMPNMA,IMPNMI);
%
WRITE(SAIDA,<"FAIXA ADMISSIVEL PARA TENSAO DE MAXIMA POTENCIA">);
READ(TESTE3,<2F6.3>,VMPNMA,VMPNMI);
WRITE(SAIDA[SPACE 2],<"VMPMAX= ",F6.3>," " "VMPMIN= ",F6.3>,
VMPNMA,VMPNMI);
%
WRITE(SAIDA,<"FAIXA ADMISSIVEL PARA POTENCIA MAXIMA">);
READ(TESTE3,<2F6.3>,PMAXNMA,PMAXNMI);
WRITE(SAIDA[SPACE 3],<"PMAXMA= ",F6.3>," " "PMAXMI= ",F6.3>,

```

```

                                PMAXNMA,PMAXNMI));
%
READ(TESTE3,<3(F7.4),F9.2,2(E9.2)>);
  MIL,MRS,MLAMBDA,MLIO,MG,MGL);
  NI=MYSELF.TASKVALUE;
READ(TESTE3,<3(F7.4),F9.2,2(E9.2)>);
  DPIL,DPRS,DPLAMBDA,DPLIO,DPG,DPGL);
WRITE(SAIDA[SPACE 2],<10(" ")>,"MEDIA E DESVIO PADRAO">);

WRITE(SAIDA[SPACE 2],
  <"  IL      RS      LAMBDA      LIO      u      GL">);
WRITE(SAIDA,<" M "2(F7.4),F8.4,F9.2,2(E9.2)>);
  MIL,MRS,MLAMBDA,MLIO,MG,MGL);
WRITE(SAIDA[SPACE 5],<" DP"2(F7.4),F8.4,F9.2,2(E9.2)>);
  DPIL,DPRS,DPLAMBDA,DPLIO,DPG,DPGL);
%
WRITE(SAIDA,<"ESCREVA 1 SE QUISE OS PARAMETROS DAS CELULAS">);
READ(TESTE3,<I3>,PACE);
WRITE(SAIDA[SPACE 2],<"PACF= "I3>,PACE);
%
WRITE(SAIDA,<"NUMERO DE CADEIAS POR SUBMODULO">);
READ(TESTE3,<I4>,NCAD);
WRITE(SAIDA[SPACE 2],<"NCAD= "I4>,NCAD);
%
WRITE(SAIDA,<"TENSAD INICIAL DO SUBMODULO">);
READ(TESTE3,<F6.2>,VSMI);
WRITE(SAIDA[SPACE 2],<"VSMI= "F6.2>,VSMI);
%
WRITE(SAIDA,<"TENSAD FINAL DO SUBMODULO">);
READ(TESTE3,<F6.2>,VSMF);
WRITE(SAIDA[SPACE 2],<"VSMF= "F6.2>,VSMF);
%
WRITE(SAIDA,<"INCREMENTO DA TENSAD DO SUBMODULO">);
READ(TESTE3,<F6.3>,IVSM);
WRITE(SAIDA[SPACE 2],<"IVSM= "F6.3>,IVSM);
%
WRITE(SAIDA,<"INCREMENTO DE TENSAD ESPECIAL">);
READ(TESTE3,<F6.3>,IVSME);
WRITE(SAIDA[SPACE 2],<"IVSME= "F6.3>,IVSME);
%
WRITE(SAIDA,<"DELTA I DE REFERENCIA">);
READ(TESTE3,<F6.3>,DI);
WRITE(SAIDA[SPACE 2],<"DI= "F6.3>,DI);
%
WRITE(SAIDA,<"ESCREVA 1 SE QUISE A CARACT. IV DE SUBMOD.">);
READ(TESTE3,<I2>,CIVSM);
WRITE(SAIDA[SPACE 2],<I2>,CIVSM);
%
WRITE(SAIDA,<"CORRENTE INICIAL DO MODULO">);
READ(TESTE3,<F6.3>,IMI);
WRITE(SAIDA[SPACE 2],<"IMI= "F6.3>,IMI);
%
WRITE(SAIDA,<"CORRENTE FINAL DO MODULO">);
READ(TESTE3,<F6.3>,IMF);
WRITE(SAIDA[SPACE 2],<"IMF= "F6.3>,IMF);
%
WRITE(SAIDA,<"INCREMENTO DE CORRENTE DO MODULO">);
READ(TESTE3,<F6.3>,IMODI);
WRITE(SAIDA[SPACE 2],<"IMODI= "F6.3>,IMODI);
%

```



```

WRITE(SAIDA, <"INCREMENTO DE CORRENTE ESPECIAL DO MODULO">);

READ(TESTE3, <F6.3>, IMODE);
WRITE(SAIDA[SPACE 2], <"IMODE= " & F6.3 &, IMODE);
%
WRITE(SAIDA, <"DELTA VM DE REFERENCIA">);
READ(TESTE3, <F6.3>, DVM);
WRITE(SAIDA[SPACE 2], <"DVM= " & F6.3 &, DVM);
%
WRITE(SAIDA, <"ESCREVA 1 SE QUISER A CARACTERISTICA IV DO MODULO">);
READ(TESTE3, <I3>, CARACM);
WRITE(SAIDA[SPACE 5], <"CARACM= " & I3 &, CARACM);
%
WRITE(SAIDA, <"TENSÃO INICIAL DO ARRANJO">);
READ(TESTE3, <F6.2>, VARI);
WRITE(SAIDA[SPACE 2], <"VARI= " & F6.2 &, VARI);
%
WRITE(SAIDA, <"TENSÃO FINAL DO ARRANJO">);
READ(TESTE3, <F6.2>, VARF);
WRITE(SAIDA[SPACE 2], <"VARF= " & F6.2 &, VARF);
%
WRITE(SAIDA, <"INCREMENTO DA TENSÃO DO ARRANJO">);
READ(TESTE3, <F6.3>, IVAR);
WRITE(SAIDA[SPACE 2], <"IVAR= " & F6.3 &, IVAR);
%
WRITE(SAIDA, <"INCREM. DE TENSÃO ESPECIAL DO ARRANJO">);
READ(TESTE3, <F6.3>, IVARE);
WRITE(SAIDA[SPACE 2], <"IVARE= " & F6.3 &, IVARE);
%
WRITE(SAIDA, <"DELTA I DE REFERENCIA DO ARRANJO">);
READ(TESTE3, <F6.3>, DIAR);
WRITE(SAIDA[SPACE 2], <"DIAR= " & F6.3 &, DIAR);
%
FOR I1=1 STEP 1 UNTIL NSUB DO
  READ(TESTE5, <I2>, DS[I]);
  WRITE(SAIDA[SPACE 2], <"DIODOS SHUNT NOS SUBMODULOS">);
  WRITE(SAIDA[SPACE 2], <" SUB DIODO">);
  FOR I1=1 STEP 1 UNTIL NSUB DO
    WRITE(SAIDA, <" " & I2 & " " & I2 &, I, DS[I]);
  WRITE(SAIDA[SPACE 5], <" ">);
%
WRITE(SAIDA, <"ESCREVA 1 SE QUISER OS PARAMETROS GEOM. DA CADEIA">);
READ(TESTE3, <I3>, PGCAD);
WRITE(SAIDA[SPACE 3], <"PGCAD= " & I3 &, PGCAD);
%
WRITE(SAIDA, <"ESCREVA 1 SE QUISER OS PARAM. GEOM. DO SUBMODULO">);
READ(TESTE3, <I3>, PGSUB);
WRITE(SAIDA[SPACE 3], <"PGSUB= " & I3 &, PGSUB);
%
WRITE(SAIDA, <"ESCREVA 1 SE QUISER OS PARAM. GEOM. DO MODULO">);
READ(TESTE3, <I3>, PGMOD);
WRITE(SAIDA[SPACE 3], <"PGMOD= " & I3 &, PGMOD);
%
WRITE(SAIDA, <"ESCREVA 1 SE QUISER OS PAR. GEOM. DO ARRANJO SOMBR.">);
READ(TESTE3, <I3>, PGAR);
WRITE(SAIDA[SPACE 3], <"PGAR= " & I3 &, PGAR);
%
WRITE(SAIDA, <"ESCREVA 1 SE EXISTIR SOMBRA">);
READ(TESTE3, <I2>, COMSOM);

```

```
WRITE(SAIDA[SPACE 3],<"CONSOM= ",I2,>,CONSUM);
9
WRITE(SAIDA,<"ESCREVA 1 SE QUISER A CARACT. IV DO ARRANJO SOMER.">);
READ(TESTE3,<I2>,>,CIVAR);
WRITE(SAIDA[SPACE 3],<"CIVAR= ",I3,>,CIVAR);
9
WRITE(SAIDA,<"NUMERO DE SECOES">);
READ(TESTE4,<I3>,>,NSEC);
WRITE(SAIDA[SPACE 3],<"NSEC= ",I3,>,NSEC);
9
WRITE(SAIDA[SPACE 2],<"NUMERO DE CELULAS DAS SECOES">);
FOR I:=1 STEP 1 UNTIL NSEC DO
  READ(TESTE4,<I3>,>,NCS[I]);
FOR I:=1 STEP 1 UNTIL NSEC DO
  READ(TESTE4,<F6.2>,>,LSEC[I]);
FOR I:=1 STEP 1 UNTIL NSEC DO
  WRITE(SAIDA,<I3,4(" "),I3,>,I,NCS[I]);
WRITE(SAIDA[SPACE 3],<" ">);
WRITE(SAIDA[SPACE 2],<"COMPRIMENTO DAS SECOES">);
FOR I:=1 STEP 1 UNTIL NSEC DO
  WRITE(SAIDA,<I3,4(" "),F6.2,>,I,LSEC[I]);
WRITE(SAIDA[SPACE 3],<" ">);
9
WRITE(SAIDA[SPACE 2],<"RAIO DO MASTRO">);
READ(TESTE4,<F5.2>,>,RM);
WRITE(SAIDA[SPACE 3],<"RM= ",F5.2,>,RM);
9
WRITE(SAIDA[SPACE 2],<"INTERVALO ENTRE SECOES">);
READ(TESTE4,<F5.2>,>,INTSEC);
WRITE(SAIDA[SPACE 3],<"INTSEC= ",F5.2,>,INTSEC);
9
WRITE(SAIDA[SPACE 2],<"ANGULO INICIAL">);
READ(TESTE4,<F6.1>,>,ANGI);
WRITE(SAIDA[SPACE 3],<"ANGI= ",F6.1,>,ANGI);
9
WRITE(SAIDA[SPACE 2],<"ANGULO FINAL">,>,ANGF);
READ(TESTE4,<F6.1>,>,ANGF);
WRITE(SAIDA[SPACE 3],<"ANGF= ",F6.1,>,ANGF);
9
WRITE(SAIDA[SPACE 2],<"INCREMENTO DO ANGULO">);
READ(TESTE4,<F6.1>,>,IANG);
WRITE(SAIDA[SPACE 3],<"IANG= ",F6.1,>,IANG);
9
WRITE(SAIDA[SPACE 2],<"NUMERO DE SETORES">);
READ(TESTE4,<I3>,>,NSET);
WRITE(SAIDA[SPACE 3],<"NSET= ",I3,>,NSET);
9
WRITE(SAIDA[SPACE 2],<"ALFA">);
READ(TESTE4,<I4>,>,ALFA);
WRITE(SAIDA[SPACE 3],<"ALFA= ",I4,>,ALFA);
9
WRITE(SAIDA[SPACE 2],<"FATOR DE CORRECAO DE IL DEVIDO ALFA">);
READ(TESTE4,<F6.4>,>,CTC);
WRITE(SAIDA[SPACE 3],<"CTC= ",F6.4,>,CTC);
9
WRITE(SAIDA[SPACE 2],<"CENTRO DO MASTRO">);
READ(TESTE4,<F6.1>,>,CM);
WRITE(SAIDA[SPACE 3],<"CM= ",F6.1,>,CM);
9
```

```
FOR I:=1 STEP 1 UNTIL 12 DO
  READ(TESTE6,<2F6.3>,>VDI(I),IDI(I));
?
IF COMSOM NEO 1 THEN BEGIN
  NT:=1;
  FOR NT:=1 STEP 1 UNTIL NTEST DO BEGIN
    GERAMOD;
    AM(NT):=PDMOD;
    WRITE(SAIDA[SKIP 1],<" ">);
  END;
END
ELSE BEGIN
  NT:=1;
  FOR NT:=1 STEP 1 UNTIL NTEST DO BEGIN
    ARRANJO;
    AM(NT):=PSAR;
    WRITE(SAIDA[SKIP 1],<" ">);
    ANGI:=ANGI+1.5;
    ANGF:=ANGF+1.5;
  END;
END;
?
* DETERMINACAO DA MEDIA E DESVIO PADRAO DA AMOSTRA
?
WRITE(SAIDA[SKIP 1],<" ">);
SAM:=0;
FOR I:=1 STEP 1 UNTIL NTEST DO
  SAM:=SAM+AM(I);
MEDIA:=SAM/NTEST;
DIFQ:=0;
FOR I:=1 STEP 1 UNTIL NTEST DO
  BEGIN
    DIFQ:=DIFQ+((MEDIA-AM(I))*2);
    IF NTEST NEO 1 THEN SIG:=(DIFQ/(NTEST-1))*0.5 ELSE SIG:=0;
  END;
WRITE(SAIDA[SPACE 10],<" ">);
WRITE(SAIDA[SPACE 5],<"MEDIA E DESVIO PADRAO DA AMOSTRA">);
WRITE(SAIDA[SPACE 2],<"MEDIA= ">F6.3>MEDIA);
WRITE(SAIDA[SPACE 5],<"SIGMA= ">F6.3>SIG);
END.
```