

1. Publicação nº <i>INPE-3510-NTE/233</i>	2. Versão	3. Data <i>Maio, 1985</i>	5. Distribuição <input type="checkbox"/> Interna <input checked="" type="checkbox"/> Externa <input type="checkbox"/> Restrita
4. Origem <i>DEN/DSU</i>	Programa <i>SUPRI</i>		
6. Palavras chaves - selecionadas pelo(s) autor(es) <i>GERADOR SOLAR CÉLULA SOLAR</i> <i>PAINEL SOLAR</i>			
7. C.D.U.: <i>621.383.5</i>			
8. Título <i>CÁLCULO PARA ESPECIFICAÇÃO PRELIMINAR DO GERADOR SOLAR DO SATÉLITE DE COLETA DE DADOS DA MECB</i>		10. Páginas: <i>32</i> 11. Última página: <i>21</i> 12. Revisada por <i>Renato Duarte Costa</i> <i>Renato Duarte Costa</i>	
9. Autoria <i>Cláudio José de Camargo Barros</i> <i>Geraldo José Adabo</i>		13. Autorizada por <i>Marco Antonio Raupp</i> <i>Marco Antonio Raupp</i> <i>Diretor Geral</i>	
Assinatura responsável <i>Cláudio José de Camargo Barros</i>			
14. Resumo/Notas <i>Apresentam-se a descrição técnica do arranjo solar do satélite de coleta de dados da MECB, uma discussão das características de células solares atuais para uso espacial, o cálculo estimado da potência média disponível gerada pelo arranjo solar em órbita e o fator de utilização da energia efetivamente transferida para o sistema de suprimento de energia. Levam-se em consideração nestes cálculos o ângulo de incidência de luz, a temperatura de operação dos painéis, a degradação por radiação, perdas por sombra e diodos de bloqueio, e perdas na fiação.</i>			
15. Observações			

ABSTRACT

This work presents the technical description of the solar array of the data collection satellite (Brazilian Complete Space Mission), a discussion about present solar cells characteristics for space missions, a simple calculation of the average power available from solar array in orbit and the utilization factor of the energy effectively transferred to energy supply system. It takes in consideration in this calculation the incidence angle of the light, the operating temperature of the panels, the radiation induced degradation, blocking diodes and shadow losses, and wiring loss.

SUMÁRIO

	<u>Pág.</u>
LISTA DE FIGURAS	v
LISTA DE TABLEAS	vii
GLOSSÁRIO	ix
1. <u>INTRODUÇÃO</u>	1
2. <u>DESCRIÇÃO DO ARRANJO</u>	1
3. <u>CÉLULA SOLAR</u>	7
4. <u>CÁLCULO DA POTÊNCIA MÉDIA</u>	13
4.1 - Potência disponível do conjunto de painéis solares	15
4.2 - Potência média do gerador solar e fator de utilização	16
5. <u>CONCLUSÕES</u>	19
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	21

LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>
1 - Diagrama de blocos funcional do Arranjo Solar	2
2 - Painel solar	3
3 - Esquema elétrico do painel lateral	4
4 - Painel antigeocêntrico	5
5 - Esquema elétrico do painel antigeocêntrico	6
6 - Célula solar com superfície texturizada	9
7 - Fluência em função da altitude da órbita para cálculo da degradação da potência máxima da célula	11
8 - Atitude do satélite adotada para o cálculo da potência máxima disponível dos painéis laterais	16
9 - Evolução da energia suprida pelo Gerador Solar no caso da órbita dimensionante	18

LISTA DE TABELAS

	<u>Pág.</u>
1 - Descrição das mais eficientes células de silício monocristalino	10
2 - Eficiência da célula em função da radiação e da temperatura	13
3 - Perdas de potência e número de células dos painéis lateral e antigeocêntrico	14
4 - Potência disponível do conjunto de painéis laterais	15

GLOSSÁRIO

DEFINIÇÃO DE ALGUNS TERMOS UTILIZADOS NO TRABALHO

A.M.Ø. = Abreviatura de "Air Mass Zero", que significa a luz solar nas proximidades da Terra sem ter atravessado a atmosfera, tendo uma potência média de $135\text{mW}/\text{cm}^2$ em incidência normal.

CÉLULA SOLAR = Dispositivo semicondutor que gera eletricidade por efeito fotovoltaico quando exposto à luz solar.

PAINEL SOLAR = Sistema físico que compreende as células solares, substrato, cobertura transparente, interconectores e cablagem; todas estas partes funcionam integradas, fazendo com que o painel seja capaz de gerar energia quando exposto à luz solar. Neste trabalho são considerados painéis, cada face lateral do satélite e a sua face antigeocêntrica.

GERADOR SOLAR = Sistema físico que compreende um conjunto de painéis solares ligados a um barramento, incluindo cablagem e proteções.

ARRANJO SOLAR = O mesmo que Gerador Solar.

1 - INTRODUÇÃO

O objetivo deste trabalho é calcular a potência média disponível do Arranjo Solar que tem como base os dados orbitais, as características elétricas do arranjo, a temperatura de operação e a dose de radiação recebida.

As características elétricas do arranjo são determinadas considerando o número de células nos painéis, a ligação série - paralelo e a eficiência da célula utilizada.

Os parâmetros mencionados influenciam a característica I-V do arranjo solar, determinando uma potência média disponível do arranjo.

2 - DESCRIÇÃO DO ARRANJO

- 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 1 apresenta o diagrama de blocos funcional do arranjo solar.

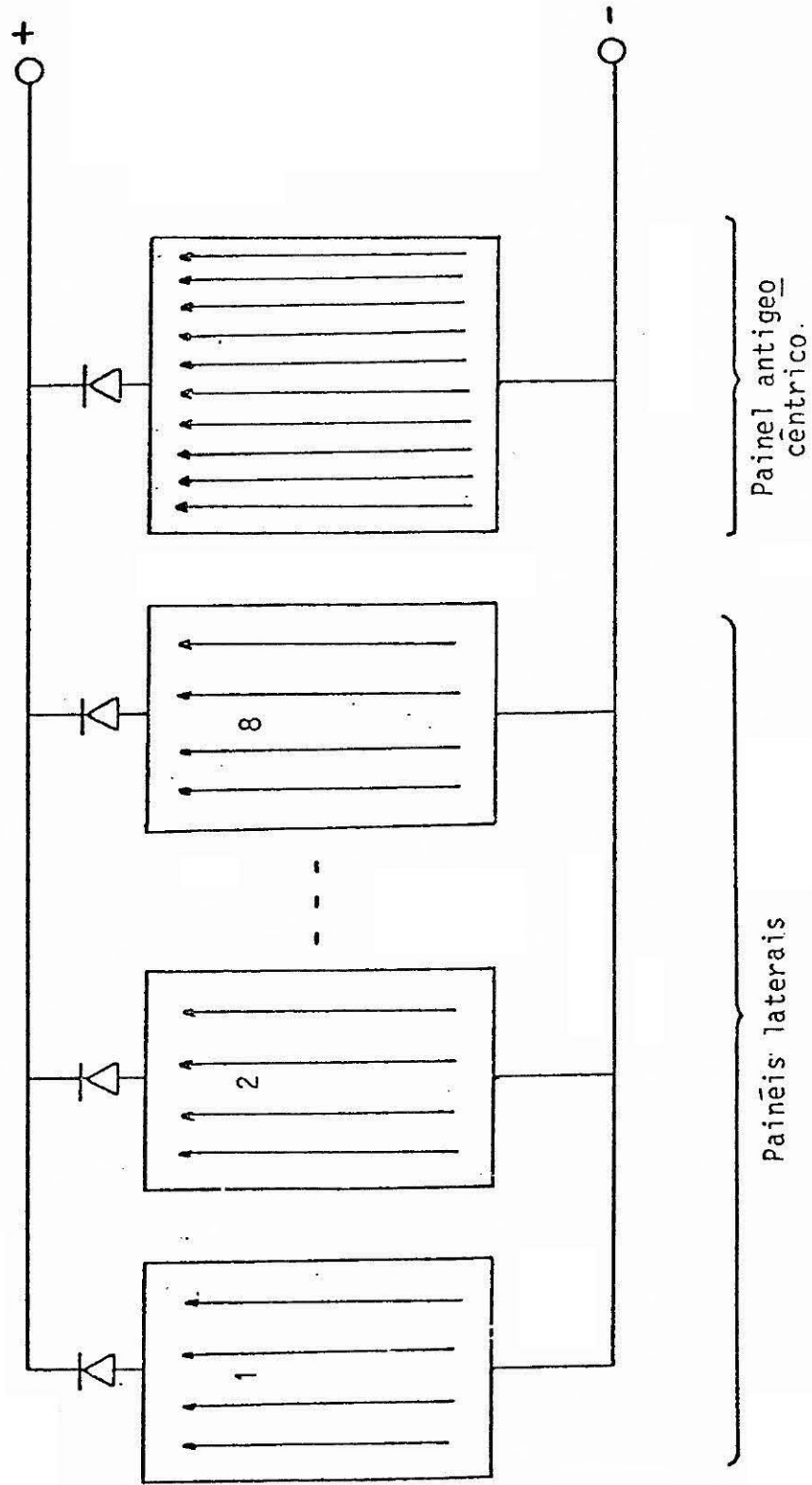


Fig. 1 - Diagrama de blocos funcional do Arranjo Solar.

As Figuras 2 a 5 mostram as distribuições geométricas e os esquemas elétricos dos painéis lateral e antigeocêntrico.

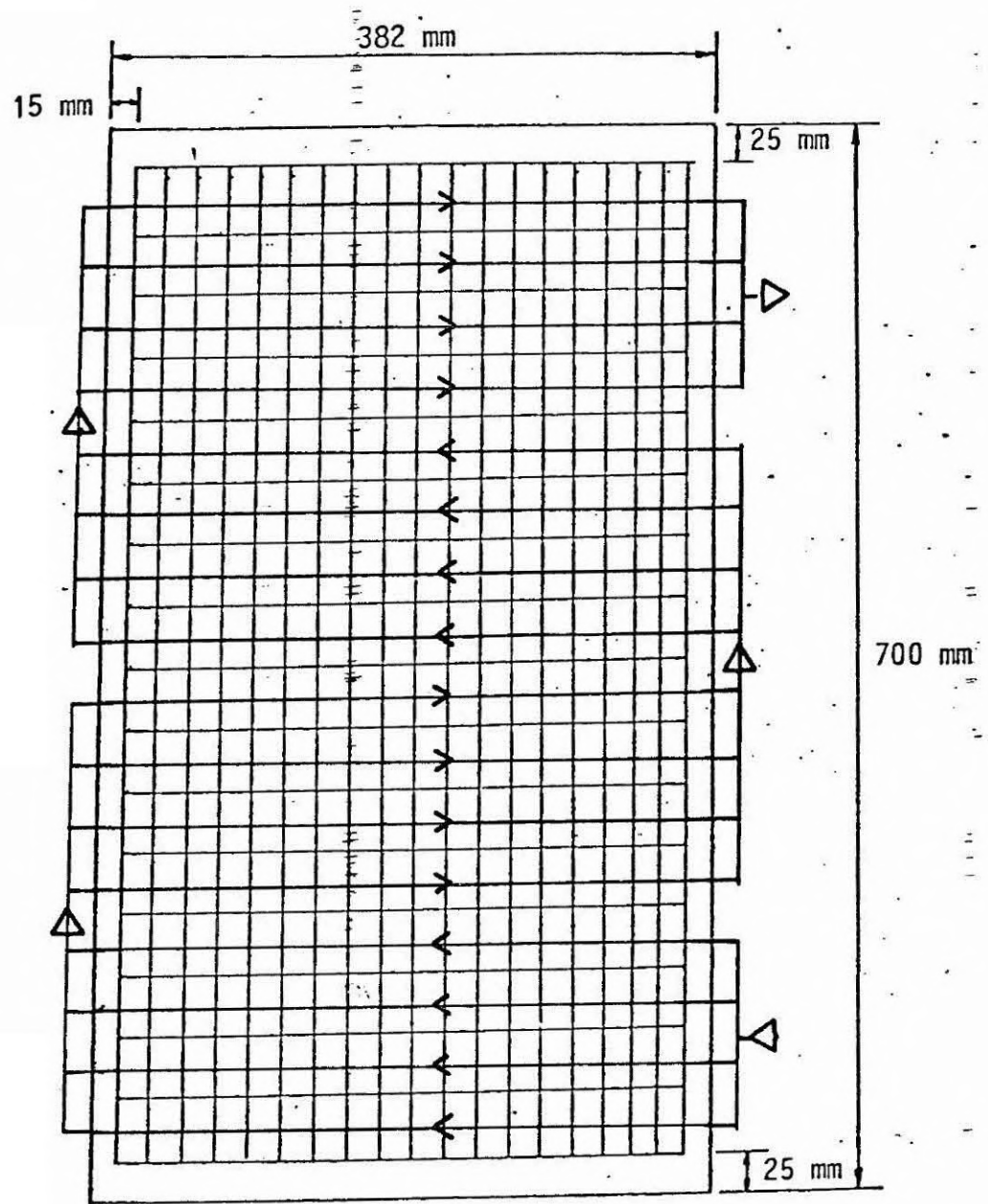


Fig. 2 - Painel lateral.

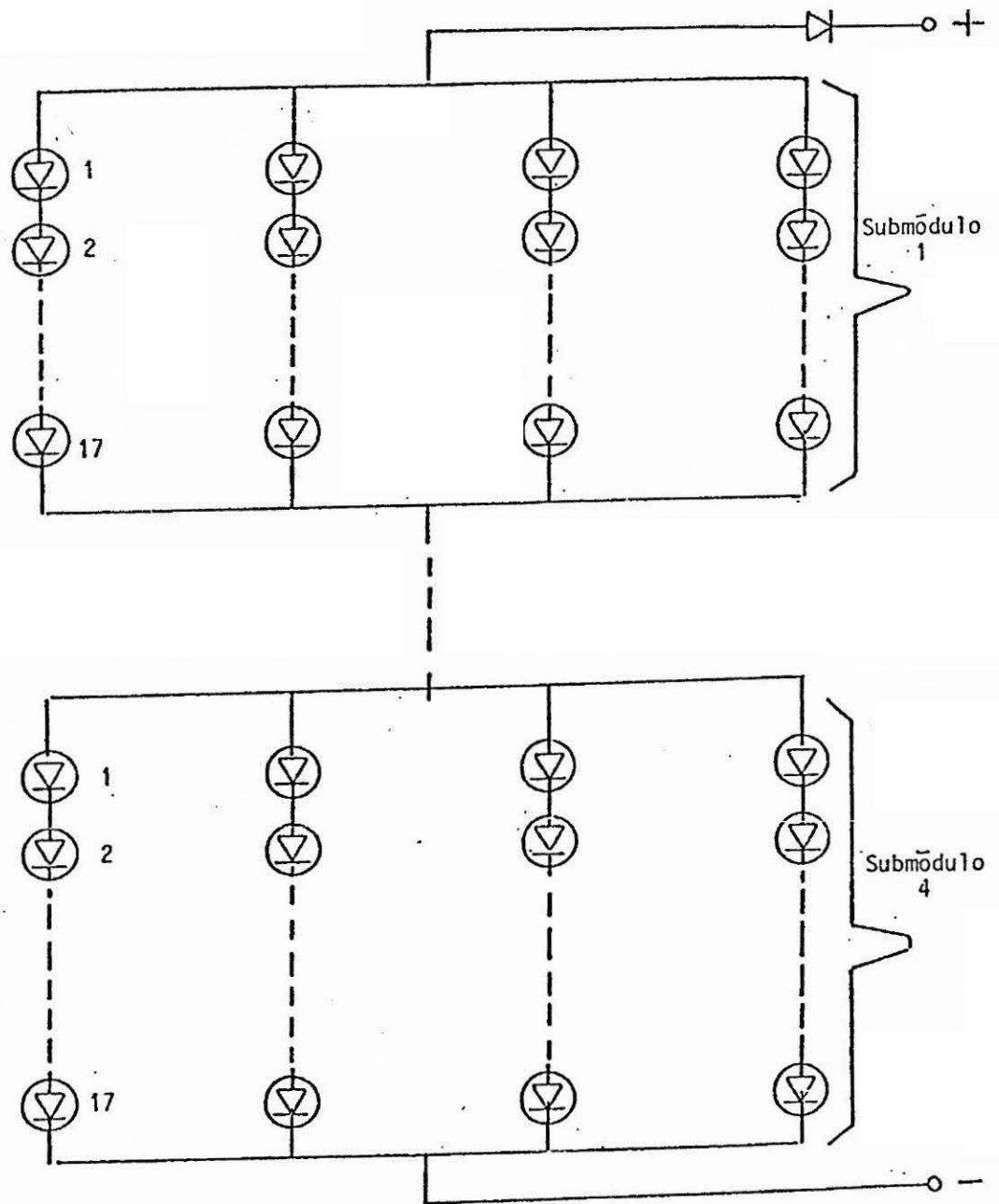


Fig. 3 - Esquema elétrico do painel lateral.

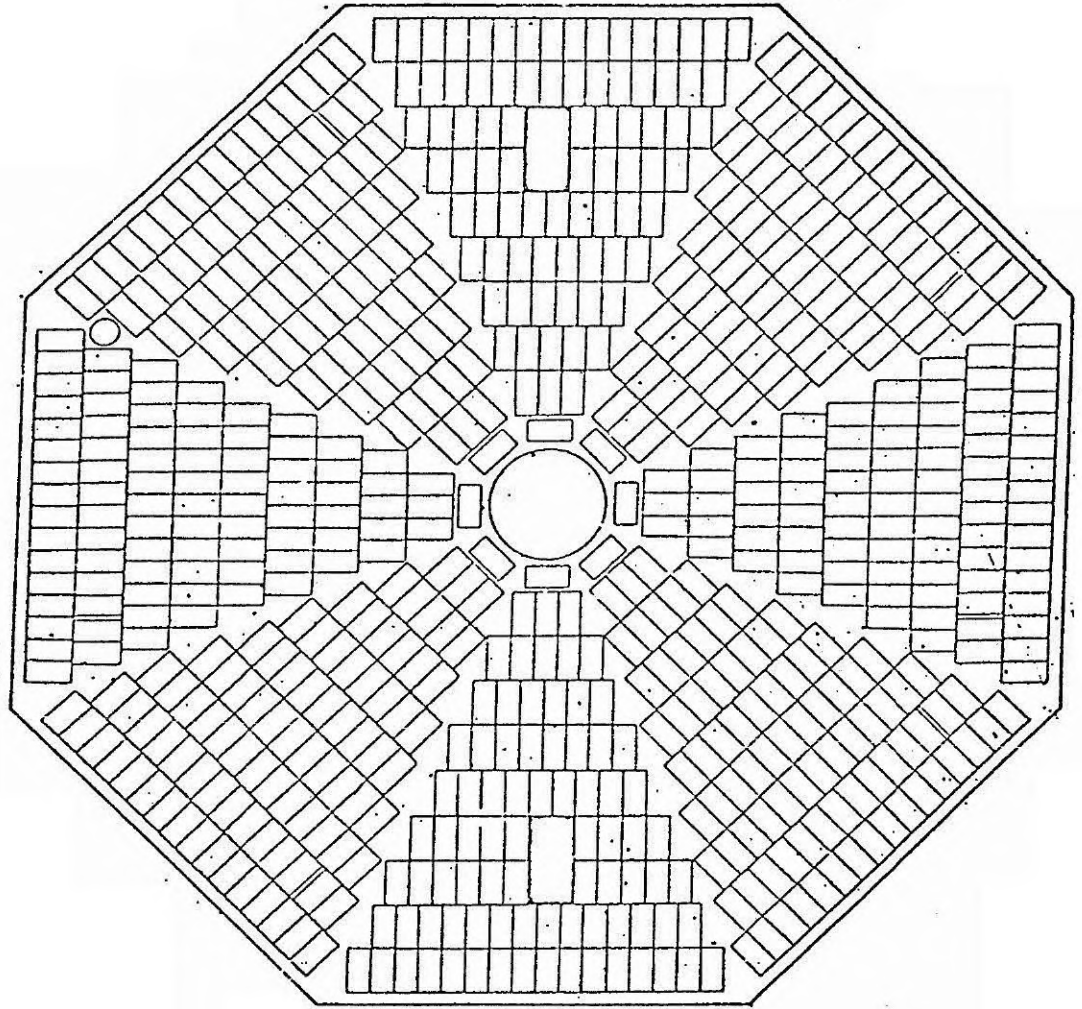


Fig. 4 - Painel antigeocêntrico.

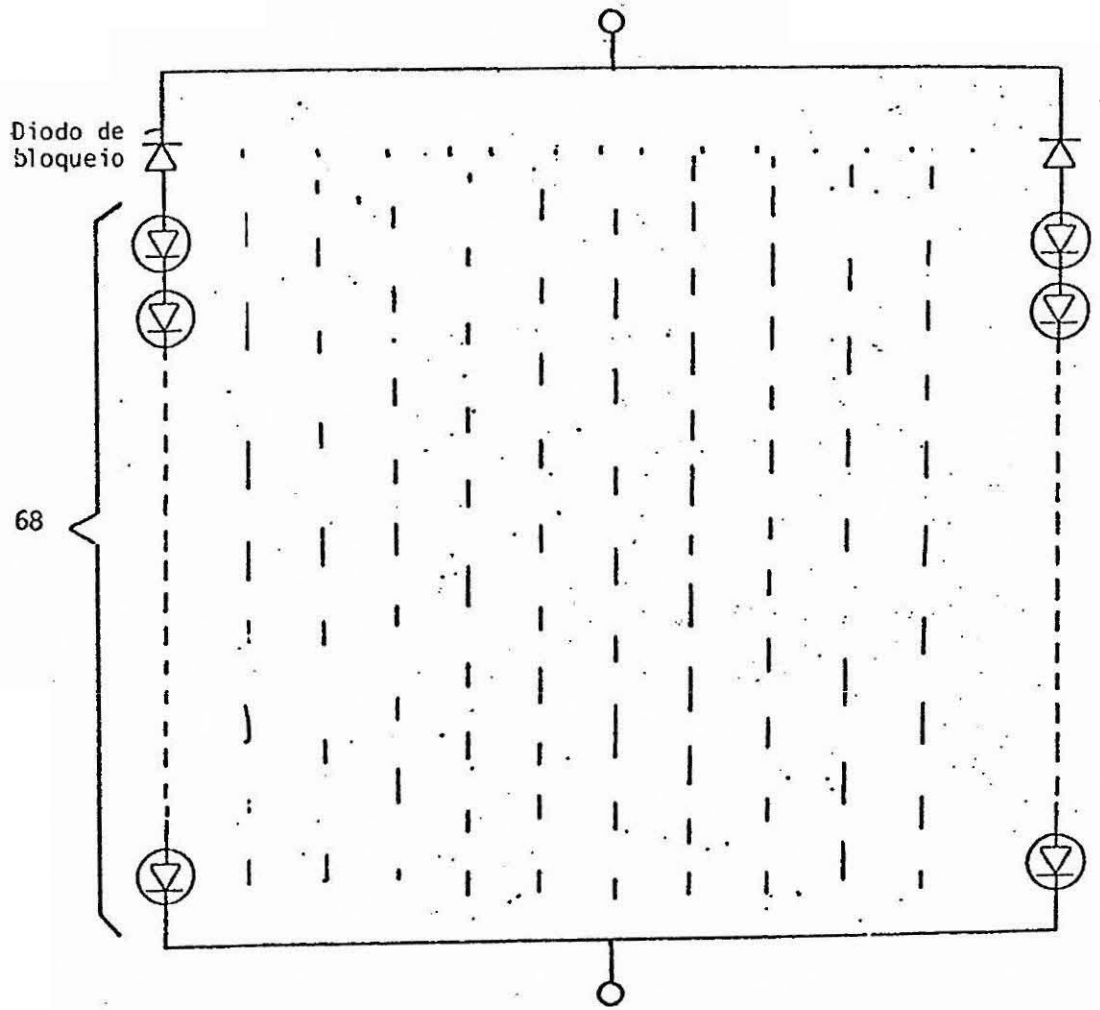


Fig. 5 - Esquema elétrico do painel antigeocêntrico.

3 - CÉLULA SOLAR

A célula solar é um dispositivo semicondutor que gera eletricidade por efeito fotovoltaico quando exposto à luz solar. Em geral, as células para operação no espaço são feitas de silício monocristalino, com camadas n sobre p. O silício do tipo p, chamado substrato da célula, possui resistividade geralmente entre 2 e 10 OHMS x cm.

As células atuais podem apresentar diversos detalhes construtivos que aumentam a sua eficiência de conversão de energia. Os mais usuais são:

a) Células com campo elétrico na superfície posterior

Em células n sobre p, pode ser difundida uma camada adicional p⁺ sobre a região p, adjacente ao contato elétrico posterior. Esta camada cria um campo elétrico que reflete os portadores que se dirigem para a parte posterior da célula, contribuindo para uma maior coleção dos portadores minoritários.

b) Células com refletor na superfície posterior

Este refletor constitui-se de um metal com alta refletividade e está colocado entre o silício e o contato elétrico posterior da célula; tem por objetivo refletir os fótons de grandes comprimentos de onda, que não podem gerar pares elétron-lacuna. Estes fótons são refletidos para fora da célula, evitando-se desta forma que eles aqueçam, assegurando uma temperatura de operação mais baixa e, conseqüentemente, aumentando seu rendimento. Além disto, os fótons de pequenos comprimentos de onda que não geraram pares elétron-lacuna são também refletidos e adquirem uma segunda chance de produzir estes pares.

c) Células de junção rasa ou célula violeta

Como o espectro solar em A.M.Ø. possui potência alta nas regiões azul e ultravioleta, uma junção mais rasa do que as de outras células convencionais (0,2 microns, comparadas com as junções de 0,3 a 0,5 microns de profundidade) é capaz de um melhor aproveitamento da luz solar. A junção mais rasa faz com que a resistência série da célula aumente, pois a corrente deve atravessar uma superfície muito fina para atingir a grade coletora, o que faz a eficiência da célula cair. Para diminuir esta resistência, a grade coletora é feita com "dedos" muito finos e muito próximos uns dos outros, com cerca de 10 a 30 dedos por centímetro, cobrindo uma área de apenas 6 a 7% da área total da superfície da célula. Este tipo de célula tem camada anti-refletora de pentóxido de tântalo (Ta_2O_5), que absorve menos luz azul do que o monóxido de silício (SiO) utilizado em células mais antigas.

d) Camadas anti-refletoras

Estas camadas são aplicadas na superfície superior da célula para reduzir as perdas por reflexão. Nas células mais antigas era comum o uso de monóxido de silício, porém nas células atuais são utilizados outros materiais como a técnica de dupla camada anti-refletora, correspondente à deposição de TiO_2 sobre o silício, e sobre esta camada uma deposição de Al_2O_3 . Estas camadas, em conjunto com o adesivo que fixa a lâmina de quartzo, o próprio quartzo utilizado para atenuar a degradação da célula por radiação de prótons e elétrons e a camada anti-refletora depositada sobre esta lâmina, em geral o MgF_2 , constituem um sistema ótico eficiente que reduz significativamente as perdas por reflexão.

e) Células com superfície texturizada

A superfície superior destas células é exposta a um agente químico corrosivo, geralmente hidróxido de sódio ou potássio, que ataca preferencialmente em determinadas direções no cristal, causando o aparecimento de pirâmides microscópicas nesta superfície.

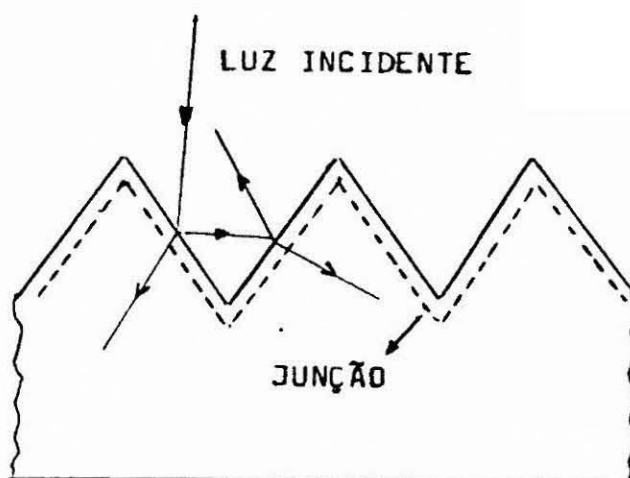


Fig. 6 - Célula solar com superfície texturizada.

A figura acima mostra a seção reta de uma célula com sua superfície texturizada. Pode-se notar que a absorção de luz desta célula é maior do que a da célula com superfície plana, pois a luz incidente é refletida duas vezes, o que reduz as perdas por reflexão. A eficiência da célula é também aumentada pela incidência oblíqua da luz solar, que faz com que os fótons de maior comprimento de onda gerem pares elétron-lacuna mais próximos da junção.

Tada et alii (1982) apresentam várias células espaciais atuais, dando suas eficiências em função da degradação por radiação. A Tabela 1 dá uma breve descrição das mais eficientes células de silício monocristalino encontradas na referência acima citada.

TABELA 1

DESCRIÇÃO DAS MAIS EFICIENTES CÉLULAS DE SILÍCIO MONOCRISTALINO

CÉLULA	RESISTIVIDADE DO SILÍCIO (EM OHMS X CM)	ESPESSURA CÉLULA (EM MILÍMETRO)	CAMPO ELÉTRICO NA SUP. POSTERIOR (DOPANTE UTILIZADO)	CAMADA ANTI-REFLETORA	REFLETOR NA SUP. POSTERIOR	ANO DE FABRICAÇÃO
1-K6 3/4	2	0,1	ALUMÍNIO	DUPLA CAMADA	SIM	1981
2-K6 3/4	10	0,05	BORO	DUPLA CAMADA	SIM	1980
3-K6 3/4	10	0,05	ALUMÍNIO	DUPLA CAMADA	SIM	1981
4-K6 3/4	10	0,1	BORO	DUPLA CAMADA	SIM	1980
5-K6 3/4	10	0,1	ALUMÍNIO	DUPLA CAMADA	SIM	1981
6-K6 3/4	10	0,2	ALUMÍNIO	DUPLA CAMADA	SIM	1980
7-K6 3/4	10	0,2	ALUMÍNIO	DUPLA CAMADA	SIM	1981
8-K6 3/4	10	0,2	ALUMÍNIO	DUPLA CAMADA	SIM	1982

[Extraída de Tada et alii (1982)]

A eficiência da célula é função da temperatura e da quantidade de radiação recebida. Esta, por sua vez, é dada geralmente em uma fluência equivalente em elétrons de 1MEV por centímetro quadrado e é calculada em função dos parâmetros orbitais do satélite e da espessura da lâmina de quartzo que protege a célula.

A figura abaixo mostra a fluência equivalente devida aos prótons e elétrons, montada a partir dos dados publicados por Tada et alii (1982).

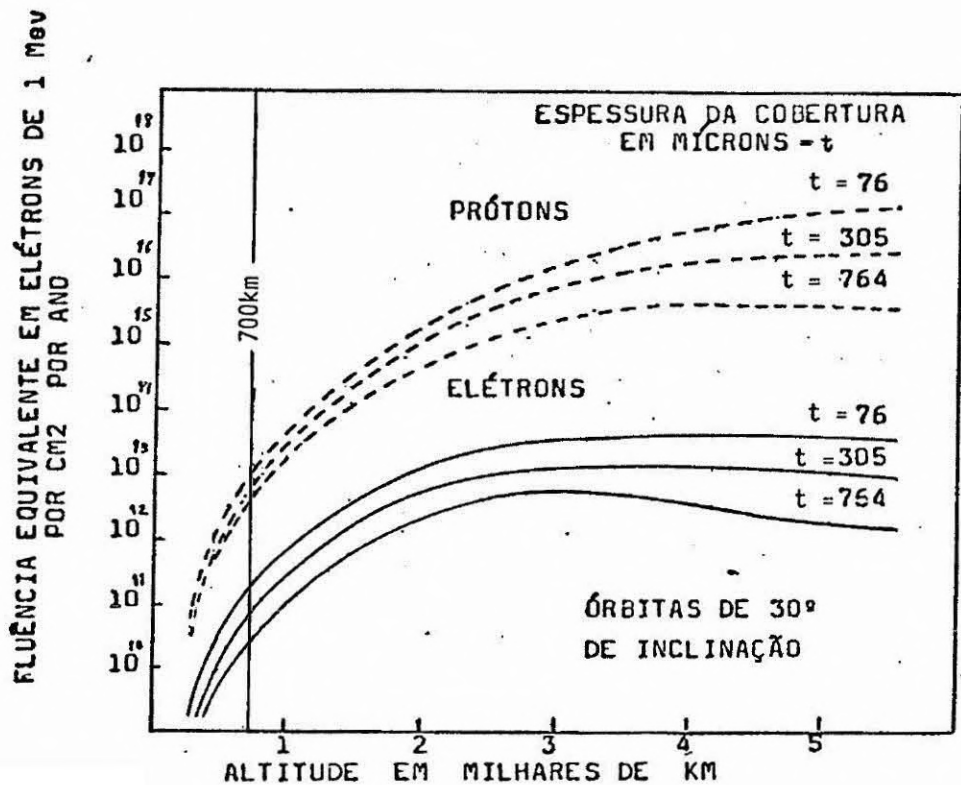


Fig. 7 - Fluência em função da altitude da órbita para cálculo da degradação da potência máxima da célula.

A fluência total recebida é a soma das fluências devidas aos prótons e elétrons.

Para o satélite de coleta de dados da MECB esperam-se as fluências:

- a) com proteção de 152 microns: $2,2 \times 10^{13}$ elétrons por cm^2 ;
- b) com proteção de 76 microns: $2,4 \times 10^{13}$ elétrons por cm^2 ;
- c) com proteção de 25 microns: $2,8 \times 10^{13}$ elétrons por cm^2 .

Estas fluências foram calculadas para uma órbita de 700km, 26 graus de inclinação, ao final de 2 anos de missão, considerando que as células não sofrem radiação pela sua superfície traseira, condição encontrada para painéis fixados no corpo do satélite.

A Tabela 2 mostra a eficiência de conversão de energia das células descritas na Tabela 1, em função da temperatura e da fluência recebida.

Nota-se pela Tabela 2 que as melhores células, número 1 e 8, a $+70^{\circ}\text{C}$, que é a temperatura de operação esperada para os painéis solares do 1º satélite da MECB, possuem eficiência ligeiramente superior aos $12\% \times 0,85 = 10,2\%$ no fim de vida, mencionados como rendimento das células por Ranvaud e Scarabucci (1979).

A degradação das células 1 e 8 para a fluência de $2,8 \times 10^{13}$ elétrons/ cm^2 foi de apenas 8%, porém é preciso computar ainda a degradação da transparência da cobertura das células devido à radiação e a degradação da célula por ciclos térmicos. De acordo com informações obtidas de fabricantes de painéis solares para satélites, a degradação total do painel do 1º satélite estaria por volta de 15%, que é o valor previsto no ante-projeto. Considerando esta degradação nas células 1 e 8 chega-se a uma eficiência de aproximadamente 12% a 28°C , correspondente a uma eficiência entre 10 e 11% a $+70^{\circ}\text{C}$.

TABELA 2

EFICIÊNCIA DA CÉLULA EM FUNÇÃO DA RADIAÇÃO E DA TEMPERATURA

CÉLULA	EFICIÊNCIA A 28°C, AMØ (%)			PERDA DE EFICIÊNCIA e.p.r.=25µm (%)	EFICIÊNCIA A 70°C, AMØ F.D.V. e.p.r.=25µm
	INÍCIO DE VIDA	FIM DE VIDA			
		e.p.r.*=76µm	e.p.r.=25µm		
1	14,1	13,2	13,0	8%	11,5
2	13,0	12,5	12,4	5%	10,4
3	13,6	13,2	13,1	4%	11,1
4	13,3	12,7	12,7	5%	10,6
5	14,1	13,3	13,2	7%	11,2
6	14,1	13,0	12,9	9%	10,9
7	14,8	13,5	13,3	11%	11,3
8	14,7	13,8	13,6	8%	11,6

*e.p.r = espessura da proteção contra radiação.

4 - CÁLCULO DA POTÊNCIA MÉDIA

Para o cálculo da potência média do gerador, consideram-se neste trabalho 2 casos:

- a) célula com rendimento de 12% a 25°C;
- b) célula com rendimento de 12% a 70°C.

Como a temperatura de operação dos painéis em órbita deverá estar por volta dos 70°C, a eficiência da célula no caso "A" deverá ser de aproximadamente 10% a esta temperatura.

Os parâmetros para o cálculo são:

- área da célula: 2cm x 4cm = 8cm²;
- densidade de potência solar (A.M.Ø.) = 0,135 W/cm²;
- rendimento da célula a +70°C: 10% (caso A) e 12% (caso B);
- potência máxima disponível da célula: 108mW (caso A) e 130mW (caso B);
- fator de degradação em 2 anos: 0,85.

As Tabelas 3 e 4 apresentam as perdas de potência dos painéis lateral e antigeocêntrico e a potência no final da missão.

TABELA 3

PERDAS DE POTÊNCIA E NÚMERO DE CÉLULAS DOS PAINÉIS LATERAL E ANTIGEOCÊNTRICO

	PAINEL LATERAL	PAINEL ANTIGEO
Número de Células	4 x 68 = 272	10 x 68 = 680
Perda por sombra	-	25%
Perda nos diodos de bloqueio	$\frac{0,7}{25} \times 100\% = 2,7\%$	2,7%
Perda ôhmica na fiação	1,5%	1,5%
Degradação ao final de 2 anos	15%	15%

TABELA 4

POTÊNCIA NO FIM DE VIDA

POTÊNCIA NO FIM DE VIDA	CASO A	CASO B
PAINEL LATERAL	23,9W	28,7W
PAINEL ANTIGEOCÊNTRICO	44,8W	53,8W

4.1 - POTÊNCIA DISPONÍVEL DO CONJUNTO DE PAINÉIS LATERAIS

Para o cálculo da potência máxima disponível do conjunto de painéis laterais, considera-se neste trabalho a atitude do satélite em relação ao Sol descrita na Figura 8.

Nesta atitude, a potência dos painéis laterais será:

$$\begin{aligned} \text{Caso A: } P_L &= 23,9 + 2 \times 23,9 \times \cos(45^\circ) \times 0,98; \\ P_L &= 57,0W. \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Caso B: } P_L &= 28,7 + 2 \times 28,7 \times \cos(45^\circ) \times 0,98; \\ P_L &= 68,5W. \end{aligned}$$

Foi considerada uma perda de 2% além do indicado pela lei dos co-senos, porque a reflexão da luz aumenta com o ângulo de incidência, e o valor de 2% foi estimado com base em informações obtidas em Rauschenbach (1980).

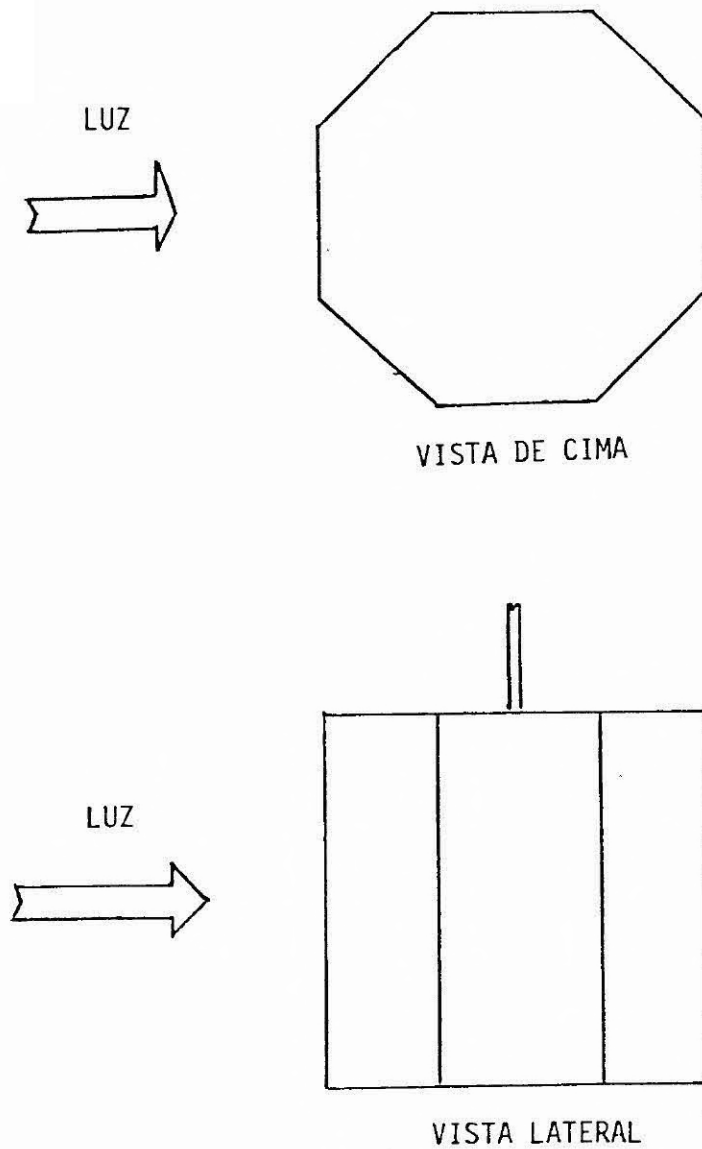


Fig. 8 - Atitude do satélite adotada para o cálculo da potência máxima disponível dos painéis laterais.

4.2 - POTÊNCIA MÉDIA DO GERADOR SOLAR E FATOR DE UTILIZAÇÃO

A potência média é dada pela expressão (COSTA (1983)):

$$\overline{P}_{GS} = P_A \times \frac{1}{\pi - \theta_1} + P_L \times \frac{(1 + \cos(\theta_1))}{\pi - \theta_1},$$

onde:

P_A : potência de pico do painel antigeocêntrico;

P_L : potência de pico dos painéis laterais;

θ_1 : ângulo de início do dia da órbita do satélite, igual a 64° ou 1,13 radianos na maior noite.

A Figura 9 mostra a potência do gerador solar em função da posição do satélite na órbita.

A potência média do Gerador Solar será:

Caso A

$$P_{GS} = 44,8 \times \frac{1}{\pi - 1,13} + 57,0 \times \frac{1 + \cos 1,13}{\pi - 1,13};$$

$$P_{GS} = 62,7W.$$

Caso B

$$P_{GS} = 53,8 \times \frac{1}{\pi - 1,13} + 68,5 \times \frac{1 + \cos(1,13)}{\pi - 1,13};$$

$$P_{GS} = 75,3W.$$

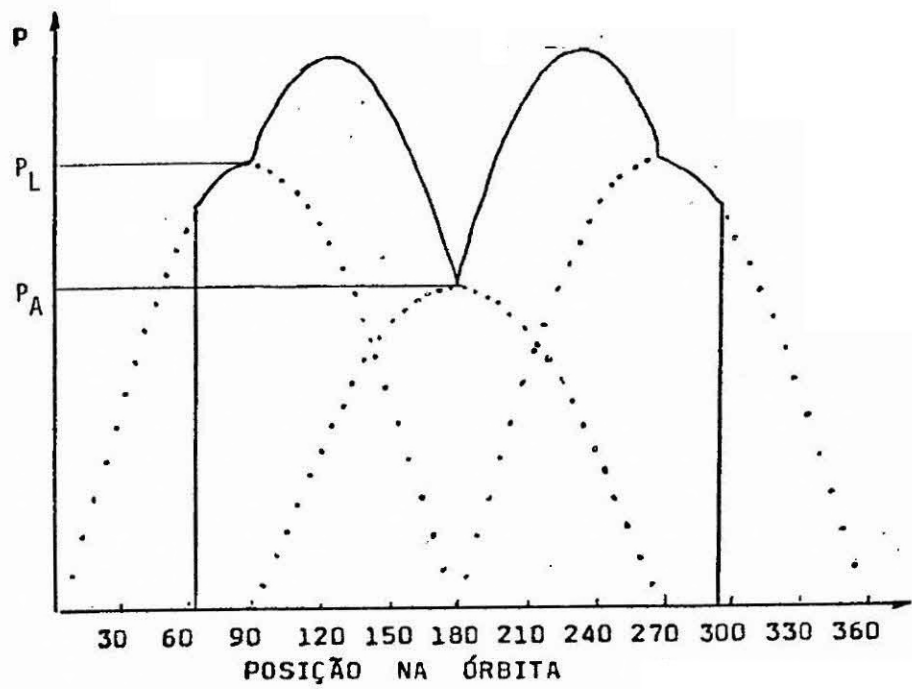
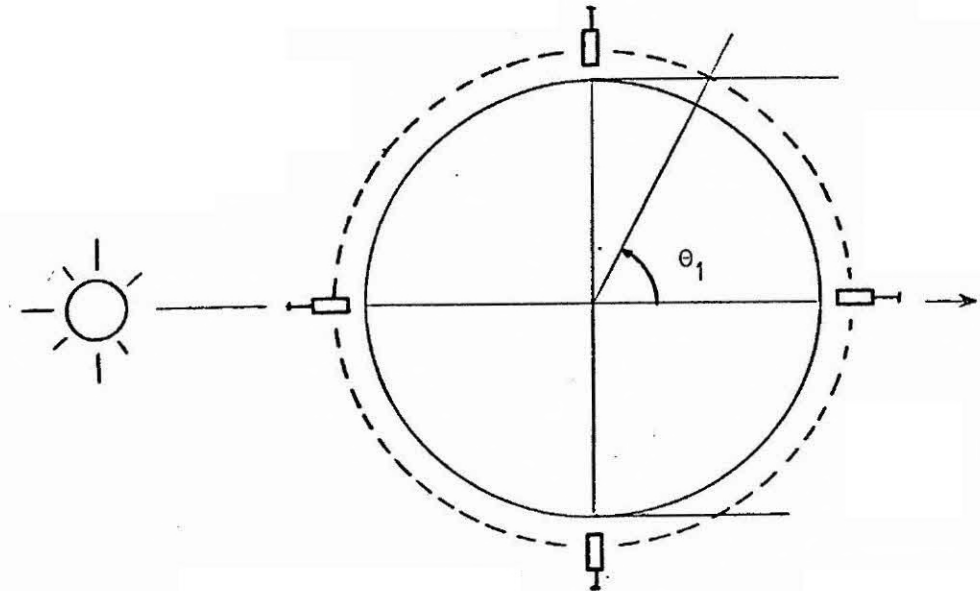


Fig. 9 - Evolução da energia suprida pelo Gerador Solar no caso da órbita dimensionante.

O sistema de suprimento de energia não fará o Gerador Solar trabalhar sempre no seu ponto de máxima potência, portanto é definido um fator, chamado fator de utilização do gerador, que indica a relação entre a energia aproveitada pelo sistema de suprimento de energia e a energia total máxima que o gerador poderia fornecer. Como se espera aproveitar uma potência média de 48W, definida por Costa (1983), este fator deve ser:

Caso A

$$F.U. = \frac{48}{62,7} = 0,76.$$

Caso B

$$F.U. = \frac{48}{75,3} = 0,64.$$

O fator de utilização deverá ser maior que 76% se as células tiverem uma eficiência média de 10% (a 70°C), ou maior que 64% para as células de 12% de eficiência (a 70°C).

5 - CONCLUSÕES E COMENTÁRIOS

O valor de 25% estimado para a perda por sombra no painel antigeocêntrico foi considerado devido à sombra do mastro e da antena, sem levar em conta o caso da sombra da massa na extremidade do mastro cair sobre este painel. Este efeito acontece em apenas 6° na órbita, correspondente a um tempo de 1 minuto e 40 segundos, e deve-se lembrar que não haverá sombra propriamente dita, mas sim penumbra, devido à dimensão da massa e à distância que a separa do referido painel.

Nos cálculos de potência dos painéis, não foi levado em consideração o efeito de perda de potência devido ao descasamento entre as células; no entanto acredita-se que esta perda seja bastante pequena, pois os fabricantes de painéis para satélites montam estes painéis realizando um casamento entre as células, e Rauschenbach (1980) e Oman et alii (1977) consideram esta perda pequena em face das perdas por diodos de bloqueio e fiação.

Neste trabalho levou-se em conta que a potência máxima do gerador é a soma das potências máximas de cada painel, pois considerou-se que todos os painéis estavam a $+70^{\circ}\text{C}$, condição menos favorável em termos de geração de energia. Nesta situação as tensões de máxima potência de cada painel estão muito próximas, conforme verificação em simulação destes painéis, sendo portanto admissível supor que a potência máxima do gerador é a soma das potências máximas de cada painel.

Neste trabalho considerou-se que não existem falhas acidentais no gerador, como o rompimento de uma célula ou interconector, ou curto-circuito.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- COSTA, R.D. Subsistema suprimento de energia. In: Instituto de Pesquisas Espaciais, Análise de problemas de interface e descrição atualizada do segmento espacial da MECB/coleta de dados. São José dos Campos, 1979, cap. 3 p. 14-32.
- OMAN, H.; GELZER, J.W. Solar cells and arrays. In *Considine*, D.M. Energy technology handbook. New York, Mc Graw Hill, 1977, cap. 6, p. 56-69.
- RANVAUD, R.D.; SCARABUCCI, R.R. Suprimento de energia. In: Instituto de Pesquisas Espaciais - Missão Espacial Completa - Estudo de viabilidade do satélite brasileiro, São José dos Campos, 1979. Anexo 2, cap. 3, p. 25-40.
- RAUSCHENBACH, H.S. Solar cell array design handbook. New York, Van Nostrand Reinhold, 1980.
- TADA, H.Y.; CARTER, J.R.; ANSPAUGH, B.E.; DOWNING, R.G. Solar cell radiation handbook. Pasadena JPL, 1982.