
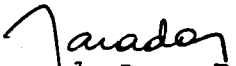


| | | | |
|--|--------------------------|---|--|
| 1. Publicação nº <i>INPE-3010-RPE/454</i> | 2. Versão | 3. Data <i>Fev., 1984</i> | 5. Distribuição <input type="checkbox"/> Interna <input checked="" type="checkbox"/> Externa <input type="checkbox"/> Restrita |
| 4. Origem <i>DMC/DDO</i> | Programa <i>ORBAT</i> | | |
| 6. Palavras chaves - selecionadas pelo(s) autor(es) <i>OTIMIZAÇÃO SATÉLITE</i> <i>SOLSÍNCRONO PAINÉIS SOLARES</i> | | | |
| 7. C.D.U.: <i>521.3:629.7.076.6:629.7.064.56</i> | | | |
| 8. Título <i>POSICIONAMENTO ÓTIMO DE PAINÉIS SOLARES EM SATÉLITES SOLSÍNCRONOS</i> | | 10. Páginas: <i>58</i> | |
| | | 11. Última página: <i>51</i> | |
| | | 12. Revisada por | |
| 9. Autoria <i>Valdemir Carrara</i> <i>Válder Matos de Medeiros</i> | | <i>Roberto Vieira Martins</i> | |
| Assinatura responsável  | | 13. Autorizada por  <i>Nelson de Jesus Parada</i> Diretor Geral | |
| 14. Resumo/Notas <i>Estuda-se, neste trabalho, o posicionamento ótimo de painéis solares fixos e giratórios em satélites solsíncronos, visando o melhor aproveitamento possível da energia solar disponível. Para tanto, considera-se a influência da excentricidade da órbita terrestre, bem como o movimento em declinação do Sol. O critério de otimização proposto foi o de maximizar a energia numa órbita, numa época do ano em que ocorre a mínima energia disponível, garantindo, assim, que em qualquer outra época o rendimento seja maior. Foi construído um programa que obtém a posição ótima dos painéis (fixo ou giratório) ^{fixos}, em função dos parâmetros orbitais e do horário de cruzamento com o equador. O programa utiliza métodos iterativos e fornece, também, a data onde a energia é mínima. É feita uma comparação entre os resultados dos painéis fixos e painéis rotativos, fornecendo, desta forma, recursos para uma decisão quanto ao tipo de painel a ser empregado numa dada missão.</i> | | | |
| 15. Observações | | | |

ABSTRACT

The optimal positioning of fixed and rotating solar arrays in sun-synchronous satellites is analyzed in this work, aiming at the better use of available solar energy. For this, is considered the influence of the Earth orbit eccentricity and the declination motion of the sun. The optimization criterion proposed was to maximize the energy in an orbit, during a period of the year where the available energy is minimum. In this way, the power in any other epoch is guaranteed to be greater. A computer program that gives the optimal positioning of the solar arrays (fixed or rotating), by means of orbital parameters and equator crossing hour, was developed. The program uses iterative methods and gives, also, the date when the energy is minimum. A comparison between the fixed arrays and the rotating ones is made, giving, in this way, resources to decide which type of the panel should be used in a given mission.

SUMÁRIO

| | <u>Pág.</u> |
|--|-------------|
| LISTA DE FIGURAS | v |
| <u>CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO</u> | 1 |
| <u>CAPÍTULO 2 - RELAÇÕES BÁSICAS</u> | 5 |
| 2.1 - Parâmetros orbitais | 5 |
| 2.2 - Órbitas solsíncronas | 8 |
| 2.3 - Variação no horário de cruzamento com o equador | 11 |
| 2.4 - A sombra da Terra | 14 |
| 2.5 - Relação de ξ com os elementos orbitais | 16 |
| 2.6 - Insolação em painéis | 17 |
| <u>CAPÍTULO 3 - POSICIONAMENTO ÓTIMO DE PAINÉIS FIXOS</u> | 21 |
| 3.1 - Introdução | 21 |
| 3.2 - Configuração dos painéis | 21 |
| 3.3 - Energia numa órbita | 23 |
| <u>CAPÍTULO 4 - PAINÉIS SOLARES GIRATÓRIOS</u> | 35 |
| 4.1 - Introdução | 35 |
| 4.2 - Posicionamento dos painéis | 35 |
| <u>CAPÍTULO 5 - COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS E CONCLUSÕES</u> | 45 |
| REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 51 |

LISTA DE FIGURAS

| | <u>Pág.</u> |
|--|-------------|
| 2.1 - Elementos orbitais angulares | 6 |
| 2.2 - Elipse orbital | 7 |
| 2.3 - Ascensão reta, α_0 , e declinação, δ_0 , do Sol | 9 |
| 2.4 - Precessão do nodo, $\dot{\Omega}$, em função da inclinação da órbita | 10 |
| 2.5 - Inclinação de órbitas solsíncronas circulares em função da altitude | 10 |
| 2.6 - Variação no horário de cruzamento com equador em um ano | 14 |
| 2.7 - Sombra da Terra no plano orbital | 15 |
| 2.8 - Variação na potência por unidade de área incidente num painel perpendicular aos raios solares, em função da época do ano | 18 |
| 3.1 - Sistema de eixos orbital $X^0Y^0Z^0$ | 22 |
| 3.2 - Sistemas $X^0Y^0Z^0$ e $X^uY^uZ^u$ | 23 |
| 3.3 - Data onde ocorre a mínima energia disponível numa órbita, t^* , para painéis fixos, em função do cruzamento com o equador, \bar{h} | 29 |
| 3.4 - Ângulo de posicionamento ótimo de um painel fixo, α^* , em função do horário de cruzamento com o equador, \bar{h} | 30 |
| 3.5 - Potência média disponível num painel fixo, na data crítica, para 4 posições de um painel fixo: $\alpha = \alpha^*$; $\alpha = -90^\circ$; $\alpha = 0^\circ$ e $\alpha = 90^\circ$ | 30 |
| 3.6 - Comportamento dos ângulos ϕ_0 e θ_0 em função do horário de cruzamento com o equador | 31 |
| 3.7 - Potência média numa órbita disponível num painel fixo ao longo de um ano, para cruzamento com o equador iguais a 9:00 h, 11:00 h e 13:00 h | 32 |
| 3.8 - Variação da energia disponível na data crítica devida a uma mudança de α , para 3 horários: 9:00 h, 11:00 h e 13:00 h .. | 32 |
| 4.1 - Satélite com painéis giratórios | 36 |
| 4.2 - Data crítica t^* , onde a energia disponível numa órbita é mínima, em função do horário de cruzamento com o equador, para painel giratório | 39 |
| 4.3 - Ângulo ϕ_0 em função do horário de cruzamento, \bar{h} | 40 |
| 4.4 - Ângulo β^* , do posicionamento de um painel girante, em função do horário de cruzamento com o equador | 40 |
| 4.5 - Potência média numa órbita, na data crítica, disponível num painel, em função do horário de cruzamento | 41 |

| | |
|---|----|
| 4.6 - Potência média numa órbita, disponível nos painéis ao longo de um ano, para 3 horários de cruzamento distintos: $\bar{h} = 15:00$ h, 16:30 h e 18:00 h | 42 |
| 4.7 - Potência média em função do ângulo de posição do painel giratório, β , para $\bar{h} = 15:00$ h, 16:30 h e 18:00 h | 42 |
| 5.1 - Potência média numa órbita, na data crítica, em painéis fixos e giratórios, em função do horário de cruzamento com o equador | 46 |
| 5.2 - Relação entre as potências fornecidas por um painel giratório e um painel fixo, na data crítica de cada um, em função do horário de cruzamento | 47 |
| 5.3 - Potência disponível ao longo de uma órbita para cruzamento $\bar{h} = 6:00$ h. Energia na órbita igual para ambos os painéis .. | 48 |
| 5.4 - Potência disponível ao longo de uma órbita para horário de cruzamento $\bar{h} = 9:00$ h. Energia disponível na órbita igual para ambos os painéis (áreas diferentes) | 49 |
| 5.5 - Potência disponível ao longo de uma órbita para $\bar{h} = 12:00$ h. Energia na órbita igual para ambos os tipos de painéis | 49 |

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

O problema de otimização da posição de painéis nos satélites, embora de formulação simples, é difícil de ser analisado, pelas numerosas variáveis envolvidas. Este estudo é particularmente importante nas primeiras fases da análise de missões, fornecendo resultados pertinentes para primeiros esboços da geometria de um satélite. Numa fase mais adiantada, a otimização define com precisão a melhor posição dos painéis com relação ao satélite, fornecendo dados para o projeto da estrutura e interagindo com o projeto de suprimento de energia.

Dois casos distintos de otimização podem ocorrer se o satélite for estabilizado em dois ou três eixos.

No caso da estabilização ser efetuada em dois eixos (estabilização por rotação ou gradiente de gravidade, por exemplo), praticamente toda a superfície externa do satélite deverá ser coberta por células solares, em virtude da incerteza na posição de dois eixos do satélite. Com este procedimento, evitam-se grandes variações de energia conforme varie a posição do Sol com respeito ao satélite. Um critério para determinar o posicionamento ótimo dos painéis, sob este ponto de vista, consiste em procurar manter o suprimento de energia contante, qualquer que seja a posição do Sol.

Caso o satélite seja estabilizado em 3 eixos, irá existir uma bem definida relação entre sua orientação e o Sol, de forma a se ter, em certos casos, critérios de otimização que, posicionando convenientemente os painéis com relação ao satélite, minimizam a área efetiva necessária para o abastecimento de energia. Um resultado prático é a grande diferença entre a energia por unidade de área captada pelos painéis nos dois sistemas de estabilização (chega a reduzir de 3 vezes ou mais a área necessária de células).

O principal fator que influencia a energia captada numa órbita é o ângulo entre a direção do Sol e o plano orbital. Este ângulo, por sua vez, depende da inclinação da órbita (normalmente fixa), da declinação do Sol e da diferença entre a ascensão reta do nó ascendente da órbita e a ascensão reta do Sol. Devido, porém, ao movimento do nó ascendente causado pelo achatamento da Terra, o ângulo que a direção do Sol faz com relação ao plano orbital muda com o tempo, oscilando entre um valor mínimo e um máximo, ao longo do período de precessão do nó.

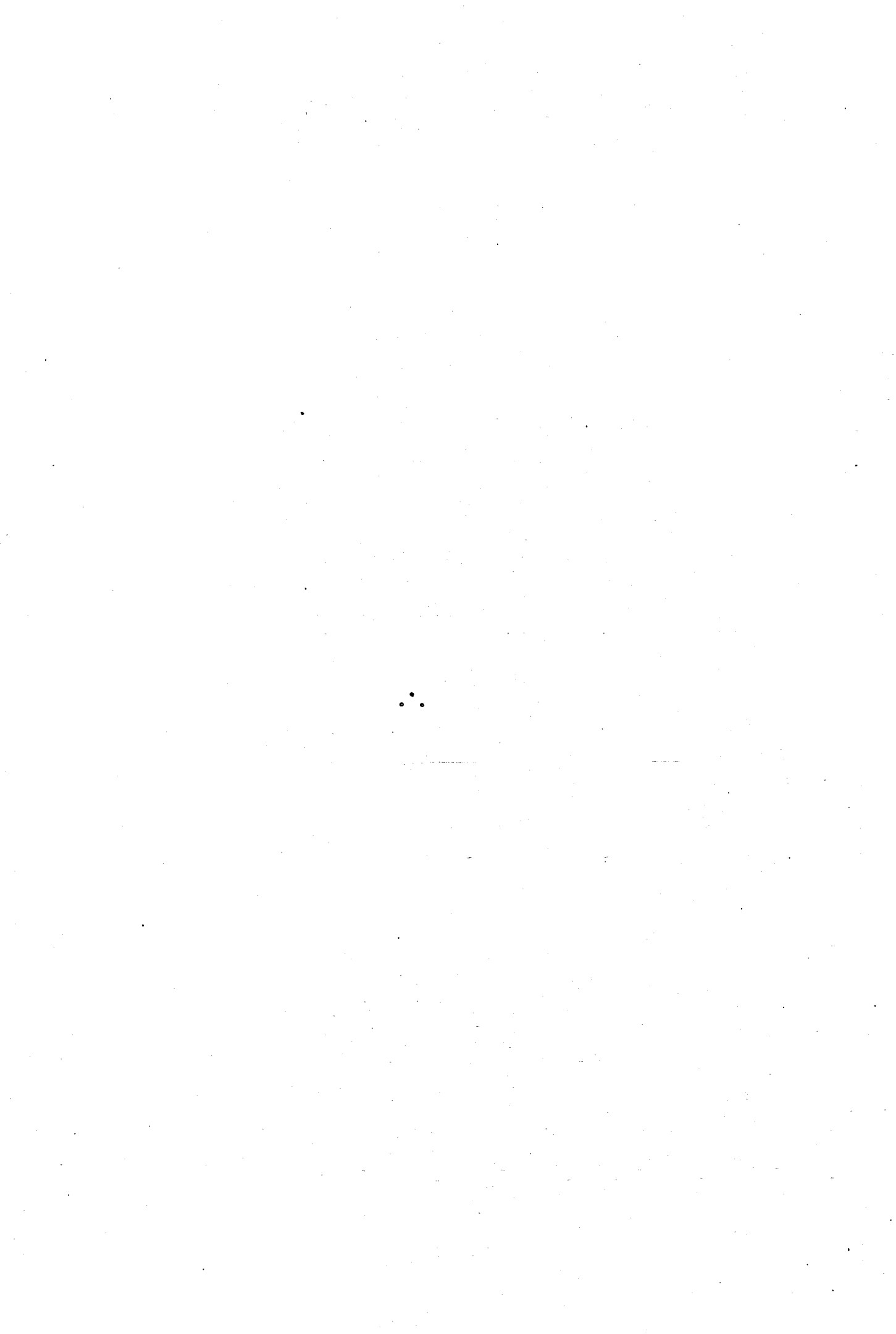
Dois casos particulares se destacam: em órbitas equatoriais onde não ocorre precessão, e em órbita sol-síncronas, quando se impõe a condição de que a precessão do nó seja igual ao movimento médio em ascensão reta do Sol. Nestes dois casos, a posição do vetor solar com relação ao plano orbital tem uma variação reduzida, sendo quase que exclusivamente devida à variação da declinação do Sol ao longo de um ano.

Em ambos os casos, portanto, um estudo do posicionamento dos painéis que melhor atenda às necessidades da missão se faz necessário, já que nelas existe um vínculo (a pequena variação do vetor Terra-Sol relativo ao plano orbital) que justifica e facilita a análise.

No presente trabalho aplicou-se um critério de otimização para o posicionamento de painéis com relação ao corpo do satélite, onde foram considerados os efeitos que provocam a variação do vetor acima descrito. O procedimento foi traduzido em termos computacionais, visto ser impraticável uma solução analítica. Os resultados (com quatro dígitos significativos) validaram totalmente o critério adotado.

No capítulo subsequente são fornecidas as relações básicas para a formulação do problema, enquanto no Capítulo 3 é adotado um critério de otimização da posição de painéis fixos e analisados os resultados obtidos neste caso. O mesmo é feito no Capítulo 4, agora para painéis giratórios (que acompanham a direção do Sol). Finalmente, no

Capítulo 5 são comparados os dois modos de fixação dos painéis e discutidas suas características.



CAPÍTULO 2

RELAÇÕES BÁSICAS

2.1 - PARÂMETROS ORBITAIS

Uma órbita é definida por 6 parâmetros que traduzem os 6 graus de liberdade do satélite (3 de posição e 3 de velocidade). Estes parâmetros são denominados elementos orbitais e, dentre os possíveis conjuntos destes, destacam-se os elementos keplerianos formados por:

- a: semi-eixo maior da órbita,
- e: excentricidade,
- i: inclinação,
- Ω : ascensão reta do nó ascendente,
- ω : argumento do perigeu,
- M: anomalia média.

Os elementos angulares i , Ω e ω são mostrados na esfera celeste da Figura 2.1, e os demais na Figura 2.2. A anomalia média, M, varia linearmente com o tempo:

$$M = n(t - t_0) , \quad (2.1)$$

onde t_0 é o instante de passagem do corpo pelo periapse e n o seu movimento médio, em radianos por segundo, que vale:

$$n = \frac{2\pi}{T} , \quad (2.2)$$

sendo que T é o período orbital. Por sua vez, o período depende do semi-eixo maior, através da relação:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{a^3}{\mu}} \quad n = \frac{2\pi}{T} = \sqrt{\frac{\mu}{a^3}} \quad (2.3)$$

e da constante gravitacional μ , função apenas da massa do corpo central. No caso da órbita terrestre ao redor do Sol, o período é bem conhecido e vale 365,2422 dias. Já o período de satélites artificiais terrestres é obtido pela Expressão 2.3 onde μ passa a ser chamado de constante geogravitacional e assume o valor:

$$\mu = 3,986013 \times 10^{14} \text{ m}^3/\text{s}^2 . \quad (2.4)$$

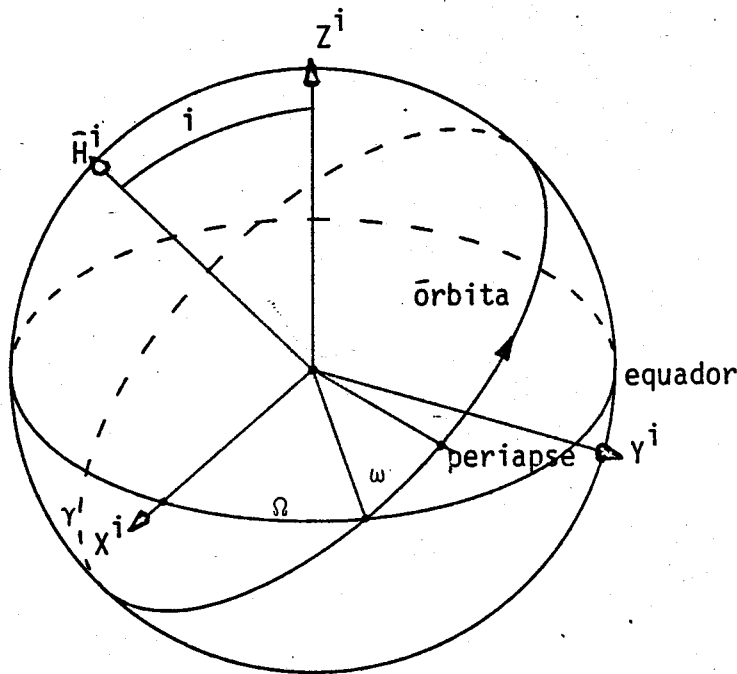


Fig. 2.1 - Elementos orbitais angulares.

A anomalia média relaciona-se com a anomalia excêntrica E (Figura 2.2) através da equação de Kepler:

$$M = E - e \text{ sen} E . \quad (2.5)$$

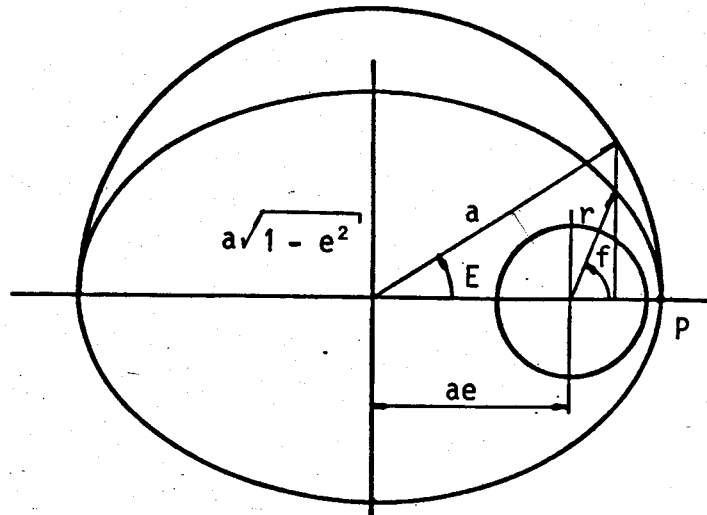


Fig. 2.2 - Elipse orbital.

Por geometria; coloca-se a anomalia verdadeira, f , em termos da anomalia excêntrica, resultando as relações:

$$\operatorname{sen} f = \frac{\sqrt{1 - e^2}}{1 - e \cos E} \operatorname{sen} E, \quad (2.6)$$

$$\operatorname{cos} f = \frac{\cos E - e}{1 - e \cos E}. \quad (2.7)$$

Finalmente, a distância de um ponto da órbita ao corpo central (foco da elipse) é obtida através da equação:

$$r = a(1 - e \cos E). \quad (2.8)$$

Essas expressões fornecem a posição de um corpo em órbita não-perturbada em função do tempo, relativo a um sistema de referência fixo no plano orbital. Este corpo tanto pode ser a Terra ao redor do Sol quanto um satélite ao redor da Terra. Para diferenciar, será utilizado o índice o , quando se fizer referência ao sistema Terra-Sol.

2.2 - ÓRBITAS SOLSÍNCRONAS

Devido às perturbações em órbitas baixas, provocadas pelo arrasto atmosférico, a pressão da radiação solar entre outras e ainda as perturbações causadas pela distribuição não-uniforme da massa na Terra, os elementos keplerianos se modificam com o tempo. Enquanto o arrasto atmosférico altera essencialmente o semi-eixo da órbita e a excentricidade, a pressão de radiação pode mudar ligeiramente a inclinação e mesmo a excentricidade. Já o achatamento terrestre (que provém da não-uniformidade da massa) tem sua maior influência na ascensão reta do nó ascendente Ω , cuja variação temporal é dada por (Brooks, 1977):

$$\dot{\Omega} = -\frac{3}{2} J_2 \frac{R_e^2}{a^2(1-e^2)^2} \cdot \cos i \cdot \dot{M}, \quad (2.9)$$

sendo que:

$$\dot{M} = n \left[1 + \frac{3}{2} J_2 \frac{R_e^2}{a^2(1-e^2)^2} \cdot \sqrt{1-e^2} \left(1 - \frac{3}{2} \sin^2 i \right) \right], \quad (2.10)$$

onde R_e é o raio equatorial da Terra ($R_e = 6378150$ m) e J_2 o coeficiente harmônico zonal 2, que caracteriza o achatamento dos pólos e é igual a $1,083 \times 10^{-3}$.

Note-se que a variação de Ω , também chamada de precessão do nó, é função apenas da altitude, da excentricidade e da inclinação orbital. Nas órbitas solssíncronas impõe-se a condição de o período de Ω ser exatamente igual a um ano (365,2422 dias). Isto quer dizer que, neste tipo de órbita, a diferença entre a ascensão reta Ω e a ascensão reta do Sol, α_0 (ângulo entre o eixo X da Figura 2.3 e a projeção do vetor Terra-Sol no plano do equador) tende a se manter aproximadamente constante em qualquer instante. Este ângulo, denominado horário de cruzamento com o equador, tem sido preferencialmente fornecido como parâmetro orbital, nas órbitas solssíncronas, em detrimento da ascensão reta Ω , pois a última varia com o tempo.

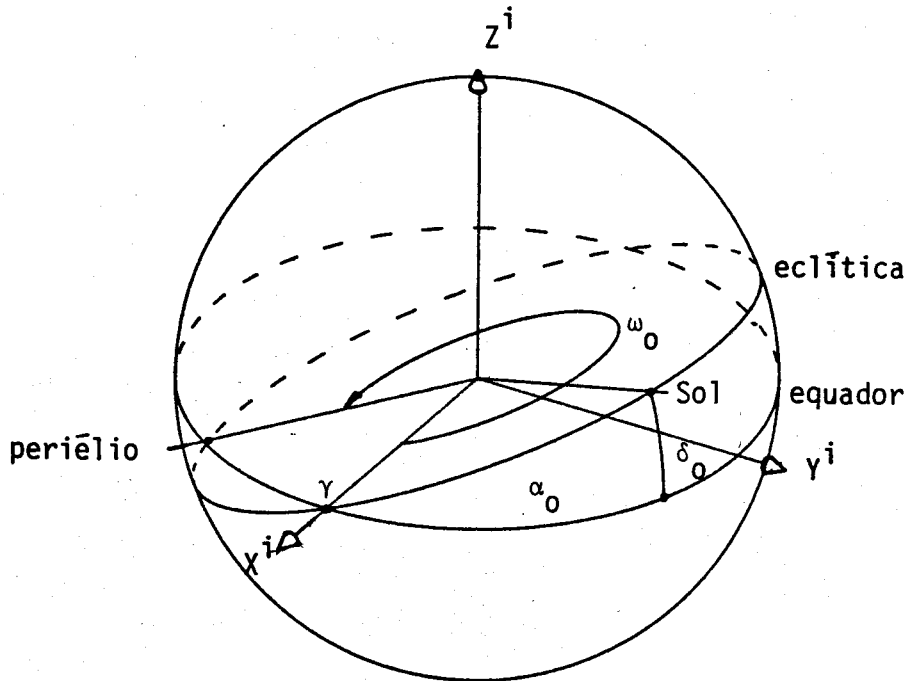


Fig. 2.3 - Ascensão reta, α_0 , e declinação, δ_0 , do Sol.

Em resumo, nas órbitas selsincronas impõe-se a condição:

$$\dot{\Omega} = n_0 = \frac{2\pi}{365,2422} \text{ rd/dia} , \quad (2.11)$$

onde n_0 é o movimento médio do Sol e com isso obtém-se uma relação biunívoca entre a inclinação e o semi-eixo a . Na Figura 2.4 é mostrada a taxa de precessão do nó, $\dot{\Omega}$, em função da inclinação i , para várias altitudes. A reta horizontal fornece o valor de $\dot{\Omega}$ correspondentes às órbitas selsincronas. Note-se que, na Expressão 2.9, para se ter $\dot{\Omega}$ positivo é necessário que a inclinação seja maior que 90° (órbita retrógrada). A variação da inclinação de órbitas selsincronas em função da altitude pode ser vista na Figura 2.5. Para uma altura de 700 km, por exemplo ($a = 7078$ km), a inclinação que fornece a sincronicidade com o Sol é de 98° aproximadamente.

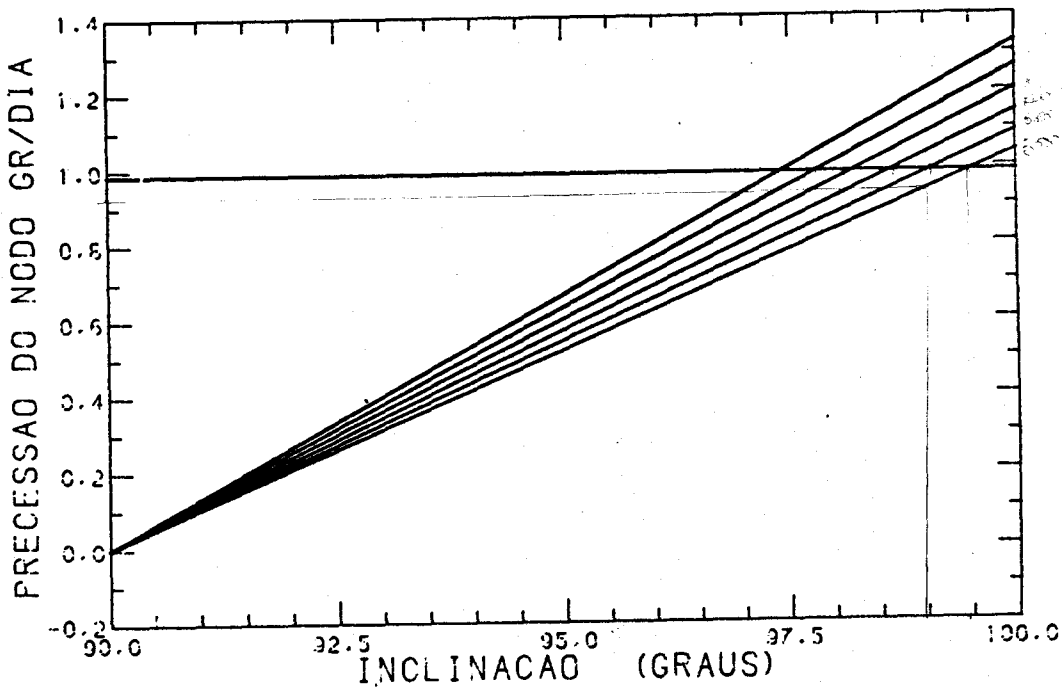


Fig. 2.4 - Precessão do nodo, $\dot{\Omega}$, em função da inclinação da órbita.

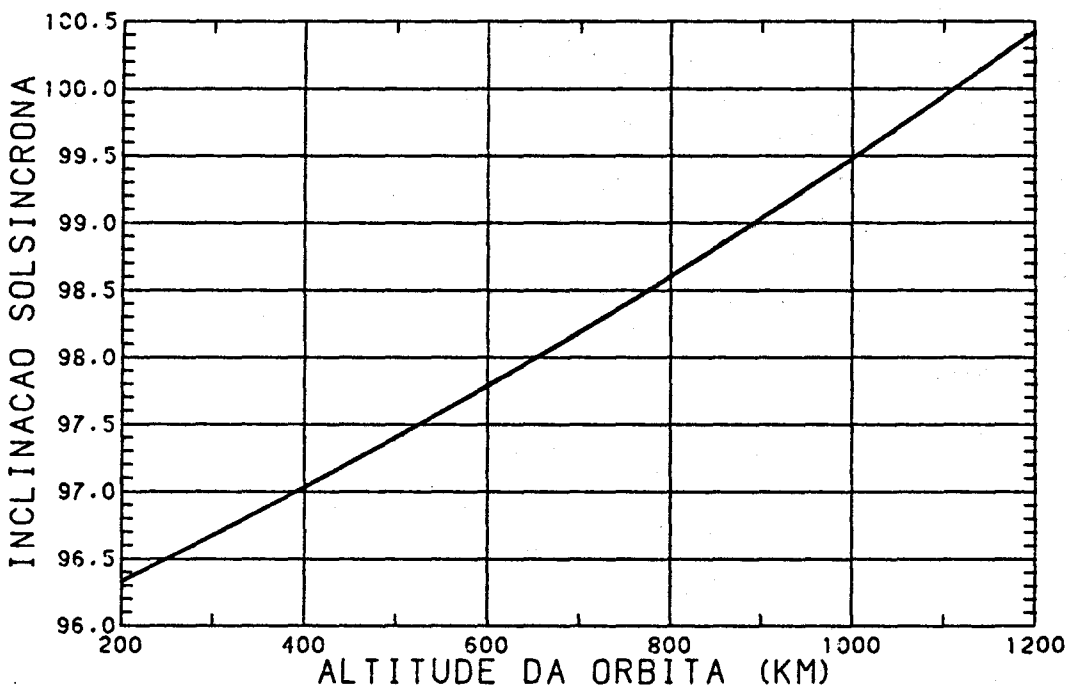


Fig. 2.5 - Inclinação de órbitas solsíncronas circulares em função da altitude.

É importante notar, entretanto, que as perturbações mencionadas anteriormente modificam os elementos orbitais ao longo do tempo, e estes, por sua vez, alteram a taxa de precessão do $\bar{\omega}$, fazendo com que o satélite perca a sincronicidade de $\dot{\Omega}$ com o movimento aparente do Sol na esfera celeste. Para minimizar este efeito indesejável, procura-se efetuar correções periódicas na órbita, mantendo os elementos sempre próximos a um valor nominal. A excentricidade é normalmente mantida em valores mínimos, próximos a zero, pois variações na altitude ao longo de uma órbita provocada pela excentricidade causariam mudanças nas imagens obtidas por um satélite de sensoriamento terrestre, por exemplo.

2.3 - VARIAÇÃO NO HORÁRIO DE CRUZAMENTO COM O EQUADOR

Como foi visto, $\dot{\Omega}$ é constante numa órbita sol-síncrona, e, portanto, vale a relação:

$$\Omega = \Omega_s + \dot{\Omega}t, \quad (2.12)$$

onde Ω_s é a ascensão reta na origem da contagem do tempo.

No entanto, embora Ω seja linear no tempo, a ascensão reta do Sol (Figura 2.3) α_0 , não o é. Dois são os motivos desta não-linearidade: a obliquidade da eclíptica e a excentricidade da órbita terrestre. Desta forma, o horário de cruzamento com o equador, definido como a diferença entre Ω e α_0 , não se mantém constante com o tempo, mas varia de forma periódica, podendo influir no posicionamento ótimo dos painéis.

Deseja-se então conhecer a variação de $\Omega - \alpha_0$ com o tempo, ao longo de um ano. Para isto, recorre-se à fórmula da redução ao equador (Brower, 1961), que fornece uma aproximação da ascensão reta do Sol, na esfera celeste, em função da anomalia média, M_0 , e da excentricidade, e_0 , da órbita terrestre:

$$\alpha_0 = \omega_0 + M_0 + 2e_0 \sin M_0 - \text{tg}^2 \frac{\epsilon}{2} \sin 2(\omega_0 + M_0 + 2e_0 \sin M_0) , \quad (2.13)$$

onde ω_0 é o argumento do perigeu da órbita terrestre e ϵ a obliquidade da eclíptica, constantes e iguais a (The Astronomical Almanac, 1982):

$$\omega_0 = 282,63^\circ , \quad (2.14)$$

$$e_0 = 0,0167 , \quad (2.15)$$

$$\epsilon = 23,44^\circ . \quad (2.16)$$

M_0 é dado por:

$$M_0 = n_0(t' - t_0) , \quad (2.17)$$

sendo n_0 dado pela Equação 2.11 e t_0 o instante de passagem da Terra pelo periélio, que ocorre aproximadamente a 4 de Janeiro, às 11 horas de Greenwich.

A fim de coincidir as origens das contagens do tempo faz-se:

$$t' = t + t_1 , \quad (2.18)$$

sendo t_1 a data onde se tem início a contagem de t , que pode ser, por exemplo, o instante de injeção do satélite em órbita.

Substituindo as Relações 2.18 e 2.17 em 2.13, e ainda lembrando que, por definição, o horário de cruzamento com o equador h é igual à diferença entre Ω e α_0 , resulta:

O sinal de $\frac{\epsilon}{2}$ está trocado (deve ser positivo)

todos os resultados - 13 -

Os cálculos seguintes foram gerados com o sinal negativo

$$L - d_0 = h = \Omega_s - \omega_0 - n_0(t_1 - t_0) - 2e_0 \sin n_0(t + t_1 - t_0) +$$

$$\oplus - \operatorname{tg}^2 \frac{\epsilon}{2} \sin 2[\omega_0 + n_0(t + t_1 - t_0) + 2e^2 \sin n_0(t + t_1 - t_0)]. \quad (2.19)$$

Note-se, portanto, que h varia com o tempo, oscilando com uma pequena amplitude em um ano. Será preciso definir, então, um horário médio de cruzamento com o equador, ou nominal, dado por:

$$\bar{h} = \Omega_s - \omega_0 - n_0(t_1 - t_0). \quad (2.20)$$

E com isso finalmente pode-se obter a variação no horário de cruzamento com o equador, Δh , como a diferença entre o horário real, h , e o médio, \bar{h} :

$$\Delta h = - 2e_0 \sin n_0(t + t_1 - t_0) - \operatorname{tg}^2 \frac{\epsilon}{2} \sin 2[\omega_0 + n_0(t + t_1 - t_0) + 2e_0 \sin n_0(t + t_1 - t_0)]. \quad (2.21)$$

Veja que Δh só depende de t_1 em termos de um ângulo de fase, ou seja, o perfil de Δh é constante com o tempo e t_1 só fornece o momento onde a origem é fixada. O comportamento de Δh com o tempo pode ser visto na Figura 2.6, onde t_1 foi escolhido arbitrariamente como nulo. A abscissa, neste gráfico, é o tempo a partir do instante de injeção em órbita.

Note-se, na Figura 2.6, que a variação máxima no horário de cruzamento com o equador, que pode ocorrer em um ano, é da ordem de $7,5^\circ$ (correspondendo a aproximadamente uma variação de 30 minutos). Esta diferença é suficiente para que sua influência no posicionamento ótimo dos painéis deva ser considerada.

$$h = \bar{h} + \Delta h$$

10.30

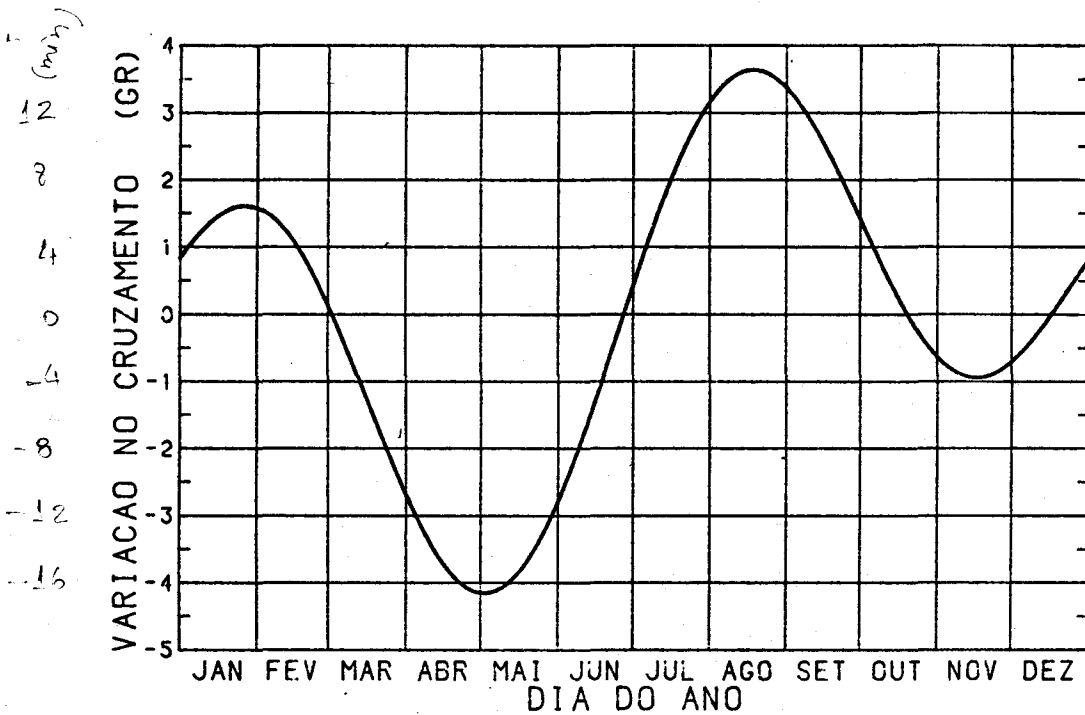


Fig. 2.6 - Variação no horário de cruzamento com equador em um ano.

Uma última e importante observação é que é comum encontrar o horário de cruzamento com o equador dado em horas, minutos e segundos, onde foram adicionadas 12 horas. Desta forma, quando se diz que o horário de cruzamento é 12 horas, quer-se dizer que h , conforme a Equação 2.20, é nulo.

2.4 - A SOMBRA DA TERRA

A maioria dos satélites em órbita são supridos com energia elétrica obtida através de células solares, que transformam a energia de radiação solar diretamente em energia elétrica. Quando o satélite ingressa na sombra da Terra (noite), as células deixam de fornecer corrente e as funções do satélite são conduzidas mediante energia das baterias. O tempo que o satélite irá permanecer na sombra terrestre é, portanto, fundamental no dimensionamento e no posicionamento ótimo dos painéis.

Considera-se, agora, o sistema de eixos indicado na Figura 2.7, tal que o eixo Z^u é perpendicular ao plano orbital, no sentido da velocidade angular do satélite, e o eixo X^u dividindo a sombra da Terra no plano orbital em regiões simétricas, ou seja, a direção Terra-Sol está contida no plano X^uZ^u .

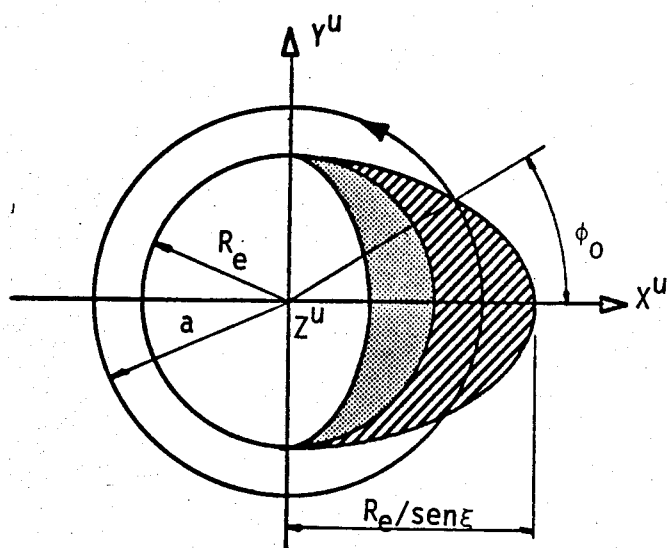


Fig. 2.7 - Sombra da Terra no plano orbital.

A projeção da sombra da Terra no plano orbital resulta, como pode ser facilmente verificado, uma elipse, cuja equação no plano X^uY^u é:

$$\left(\frac{x}{R_e/\text{sen}\xi}\right)^2 + \left(\frac{y}{R_e}\right)^2 = 1, \quad (2.22)$$

onde ξ é o ângulo formado pelos raios solares e o plano orbital.

A determinação do ângulo ϕ_0 , que define a transição entre a sombra e a região iluminada, depende, é claro, da excentricidade e do argumento do perigeu, ω .

No entanto, já foi mencionado que se procura manter a excentricidade a valores pequenos nas órbitas sol-síncronas e, dessa forma, pode-se considerar a órbita como circular. Outro fato que justifica esta simplificação é que, como o argumento do perigeu muda como tempo e como se está interessado em valores médios, a distância média em qualquer ponto da órbita será igual ao semi-eixo maior a . No sistema da Figura 2.7, a equação da órbita fica então:

$$x^2 + y^2 = a^2 . \quad (2.23)$$

Das Equações 2.22 e 2.23 tira-se então que o ângulo ϕ_0 , que fornece a posição de entrada e saída na sombra, resulta:

$$\phi_0 = \arccos \left[\frac{\sqrt{1 - R_e^2/a^2}}{\cos \xi} \right] . \quad (2.24)$$

Finalmente, e visto que será usado posteriormente, é fornecido o vetor unitário que dá a direção do Sol no sistema $X^U Y^U Z^U$:

$$\hat{S}^U = - \cos \xi \hat{i}^U + \sin \xi \hat{k}^U . \quad (2.25)$$

2.5 - RELAÇÃO DE ξ COM OS ELEMENTOS ORBITAIS

Com relação à Figura 2.1, a normal \hat{H}^i à órbita é dada por:

$$\hat{H}^i = \sin i \sin \Omega \hat{i}^i - \sin i \cos \Omega \hat{j}^i + \cos i \hat{k}^i , \quad (2.26)$$

e a direção do Sol neste sistema vale (Figura 2.5):

$$\hat{S}^i = \cos \delta_0 \cos \alpha_0 \hat{i}^i + \cos \delta_0 \sin \alpha_0 \hat{j}^i + \sin \delta_0 \hat{k}^i , \quad (2.27)$$

onde α_0 e δ_0 são, respectivamente, a ascensão reta e a declinação do Sol na data. Com isto, pode-se obter o ângulo ξ formado pela direção Terra-Sol e o plano orbital:

$$\text{sen } \xi = \hat{H}^i \cdot \hat{S}^i = \cos \delta_0 \text{ sen } i \text{ sen}(\Omega - \alpha_0) + \text{sen} \delta_0 \cos i . \quad (2.28)$$

Note-se que apenas com esta relação ξ fica perfeitamente definido, pois $-\pi/2 \leq \xi \leq \pi/2$ por definição.

Importante também é verificar que $\Omega - \alpha_0$ é o horário de cruzamento com o equador, dado pela Equação 2.19.

2.6 - INSOLAÇÃO EM PAINÉIS

Um anteparo plano, situado nas regiões do espaço próximas da Terra (como é o caso dos satélites artificiais), e perpendicular aos raios solares, estará sujeito a um fluxo de energia incidente por unidade de área e por unidade de tempo dado por:

$$S = S_0 \left(\frac{a_0}{r_0} \right)^2 , \quad (2.29)$$

onde S_0 é chamado constante solar e tem o valor:

$$S_0 = 1353 \text{ W/m}^2 , \quad (2.30)$$

ã distância $r_0 = a_0 = 149,6 \times 10^9$ m do Sol.

A relação r_0/a_0 , onde r_0 é a distância Terra-Sol e a_0 o semi-eixo maior da órbita terrestre, pode ser colocada em função do tempo, expandindo-a em série de potência em torno de e_0 , excentricidade orbital da Terra (Brower, 1961). Como essa excentricidade é pequena, conservando apenas os termos até 2ª potência obtêm-se:

$$\frac{r_0}{a_0} = 1 - e_0 \cos M_0 + \frac{1}{2} e_0^2 (1 - \cos 2M_0) . \quad (2.31)$$

Substituindo os valores de e_0 e M_0 dados pelas Expressões 2.13 e 2.15, traçou-se o gráfico, mostrado na Figura 2.8, da potência por unidade de tempo dada pela Equação 2.29 em função da época do ano. Note-se que a variação máxima na potência é da ordem de $\pm 3,4\%$ com relação ao valor médio. Esta variação do fluxo influi na energia captada pelas células solares, e, embora este efeito não altere significativamente a posição ótima dos painéis, é importante no dimensionamento da área recoberta pelas células.

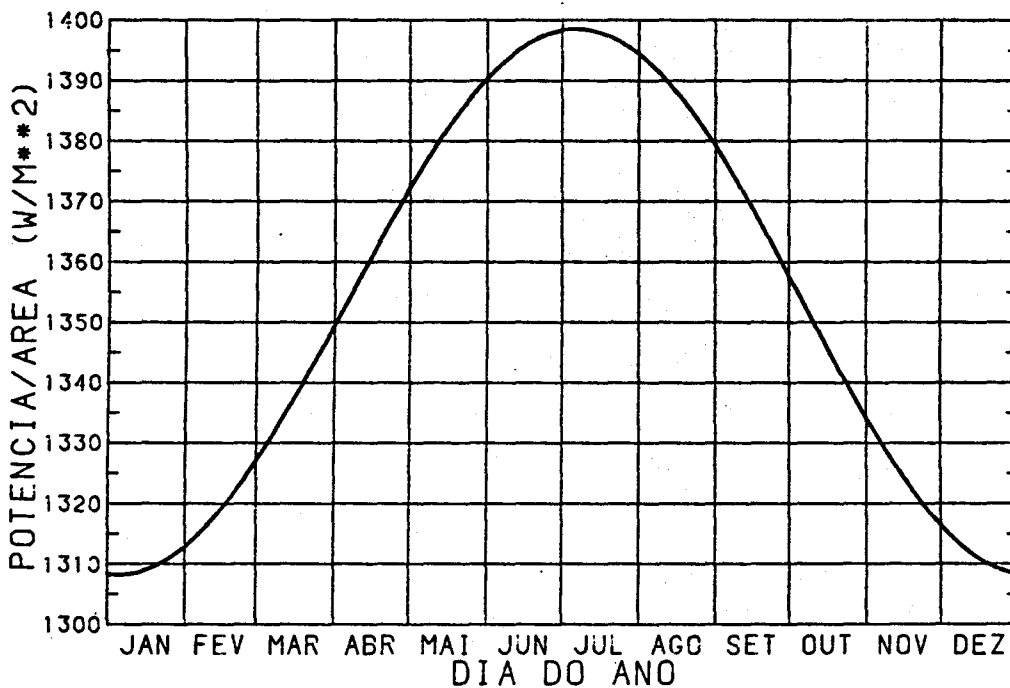


Fig. 2.8 - Variação na potência por unidade de área incidente num painel perpendicular aos raios solares, em função da época do ano.

Se entretanto o painel não for perpendicular aos raios solares, mas tiver sua normal formando um ângulo η com estes raios, então o fluxo de energia será reduzido por um fator proporcional ao cosseno deste ângulo, na forma:

$$W = S \cos n ,$$

(2.32)

onde W é a potência por unidade de área incidente neste painel.



CAPÍTULO 3

POSICIONAMENTO ÓTIMO DE PAINÉIS FIXOS

3.1 - INTRODUÇÃO

Na fase de análise preliminar do projeto de um satélite sol-síncrono, duas configurações para os painéis são possíveis, devendo ser cada uma delas analisada separadamente: painéis fixos e painéis giratórios. Os painéis fixos são presos à estrutura do satélite e uma vez abertos não podem mudar sua posição. Já os painéis giratórios acompanham por meio de um servo-mecanismo a posição do Sol, mantendo quase sempre perpendicular aos raios solares. Neste capítulo será obtida a posição ótima para painéis fixos e no capítulo subsequente serão analisados os painéis giratórios.

3.2 - CONFIGURAÇÃO DOS PAINÉIS

Considere-se inicialmente o sistema de eixos indicado na Figura 3.1, onde o eixo Z^0 coincide com a normal à órbita, no sentido da velocidade angular orbital do satélite. O eixo X^0 é radial, ou seja, tem a direção centro da Terra-satélite. O eixo Y^0 forma o triedo, apontando no sentido da velocidade.

Será admitido que a estabilização do satélite é geocêntrica, isto é, existe um eixo fixo no satélite que coincide sempre com a vertical local. Com esta hipótese, comum nos satélites sol-síncronos, serão subtraídas da otimização a relação entre o sistema fixo no corpo do satélite e o sistema orbital, que traduz os erros de atitude e, dessa forma, os dois sistemas se tornam coincidentes.

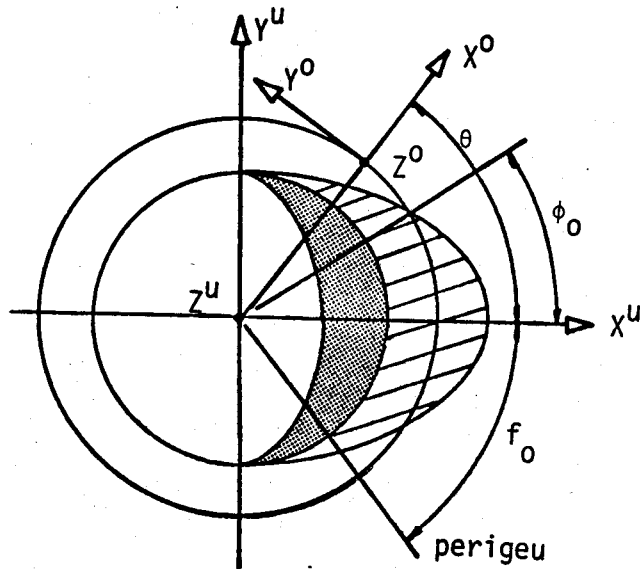


Fig. 3.1 - Sistema de eixos orbital $X^0Y^0Z^0$.

A normal aos painéis em relação ao sistema $X^0Y^0Z^0$ pode ser fornecida em termos de dois ângulos:

$$\hat{n}^0 = \cos\alpha \cos\nu \hat{i}^0 + \cos\alpha \operatorname{sen}\nu \hat{j}^0 + \operatorname{sen}\alpha \hat{k}^0, \quad (3.1)$$

onde \hat{n}^0 é a normal aos painéis no triedro $X^0Y^0Z^0$ de direções unitárias \hat{i}^0 , \hat{j}^0 e \hat{k}^0 ; α e ν são os ângulos que definem a posição do painel neste sistema e que deverão ser otimizados. Note-se, porém, que qualquer direção onde a normal tenha componente na direção Y^0 seria indesejável, visto que a configuração final do satélite resultaria não-simétrica, e torques perturbadores tendenciosos poderiam advir desta geometria, principalmente torques aerodinâmicos. No entanto, será visto que, como critério de otimização que será adotado, a normal estará sempre contida no plano X^0Z^0 e, desta forma, os efeitos do arrasto aerodinâmico estarão também minimizados.

Os sistemas $X^0Y^0Z^0$ e $X^uY^uZ^u$ (visto na Figura 2.6) se relacionam através do ângulo θ , indicado na Figura 3.2. No sistema $X^uY^uZ^u$ a normal aos painéis será dada por:

$$\hat{n}^u = \cos\alpha \cos\nu \cos\theta \hat{i}^u + \cos\alpha \operatorname{sen}\nu \operatorname{sen}\theta \hat{j}^u + \operatorname{sen}\alpha \hat{k}^u . \quad (3.2)$$

O ângulo η , entre a normal aos painéis e a direção de incidência dos raios solares, é obtido através de seu co-seno:

$$\cos\eta = \hat{n}^u \cdot \hat{S}^u = -\cos\xi \cos\alpha \cos\nu \cos\theta + \operatorname{sen}\xi \operatorname{sen}\alpha . \quad (3.3)$$

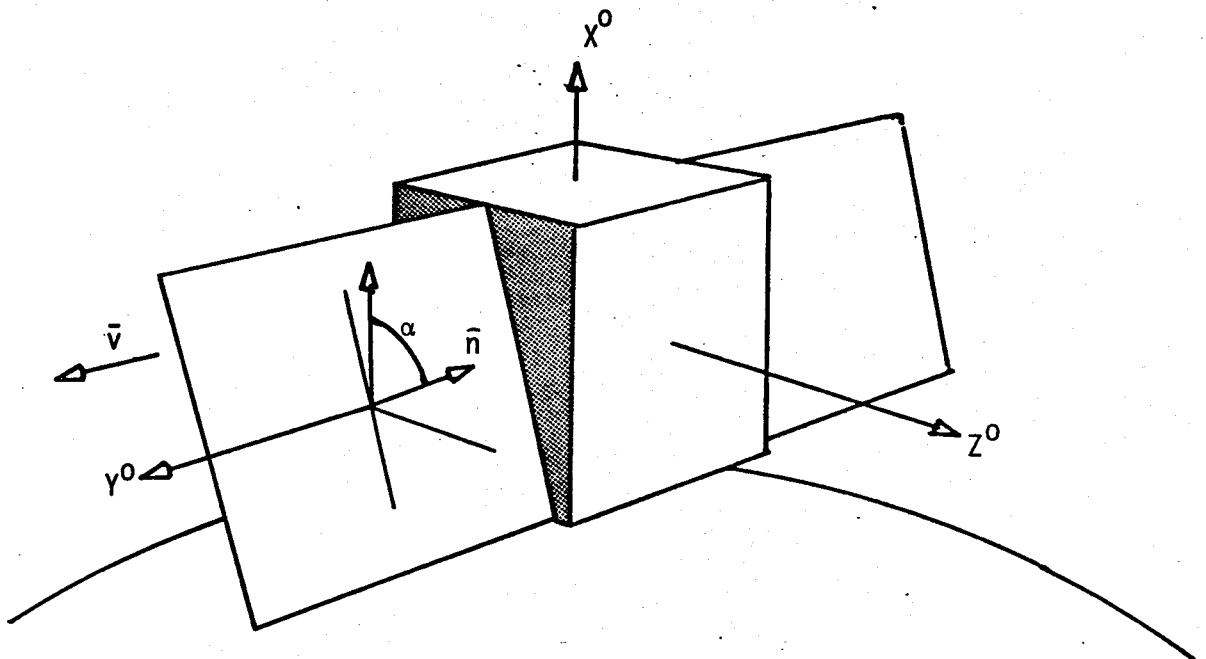


Fig. 3.2 - Sistemas $X^0Y^0Z^0$ e $X^uY^uZ^u$.

3.3 - ENERGIA NUMA ÓRBITA

Como visto no Capítulo 2, a energia por unidade de tempo incidente num anteparo é dada pela Relação 2.32 onde S , a constante solar, é fornecida pela Equação 2.29. Se entretanto um anteparo de área A (no caso um painel solar) formar com a direção de incidência um ângulo η , a potência incidente resulta:

$$W = SA \cos \eta . \quad (3.4)$$

A energia por unidade de área e por unidade de tempo captada pelas células será:

$$E_u = RS \cos \eta , \quad (3.5)$$

onde R é o rendimento do painel, função das características das células, de sua temperatura, do tempo e também do ângulo de incidência η , estando normalmente compreendido entre 0,10 a 0,15. No entanto, este rendimento pode ser considerado constante, visto que sua variação com o tempo é bastante lenta e quase não depende de η quando este está próximo de 0° (Rauschenback, 1980). Deixar-se-á, assim, de considerar o rendimento efetivo do arranjo de células, visto ser constante, para proceder a análise da energia por unidade de área e por unidade de tempo disponível para ser utilizada pelos painéis.

A energia por unidade de área incidente no painel em uma órbita será então dada por:

$$E_i = \int_0^T S \cos \eta \, dt . \quad (3.6)$$

Para se obter a variação dt em função do incremento $d\theta$, ao longo da órbita, substitui-se as Equações 2.5 e 2.6 em 2.1, e após derivar-se resulta:

$$dt = \frac{(1 - e \cos E)^2}{n \sqrt{1 - e^2}} df , \quad (3.7)$$

mas lembrando que:

$$\theta = f - f_0 , \quad (3.8)$$

onde f_0 é o ângulo constante que vai do perigeu da órbita ao eixo X^u (Figura 3.2), resulta que:

$$dt = \frac{(1 - e \cos E)^2}{n \sqrt{1 - e^2}} d\theta . \quad (3.9)$$

Caso a excentricidade seja nula, como foi suposto aqui, a Expressão 3.9 simplifica-se para:

$$dt = \frac{1}{n} d\theta . \quad (3.10)$$

Os limites de integração deverão ser modificados para satisfazer duas situações onde a energia nos painéis é nula: na sombra da Terra e na sombra do próprio painel que se traduz por:

$$\cos \eta \leq 0 . \quad (3.11)$$

Resolvendo esta inequação para θ e chamando de θ_0 o ângulo onde o $\cos \eta$ muda de sinal, tem-se:

$$\theta_0 = \arccos[\operatorname{tg} \alpha \operatorname{tg} \xi / \cos \nu] . \quad (3.12)$$

A energia numa órbita será dada então por:

$$E_i = \frac{2}{n} \int_{\phi_1}^{\phi_2} S \cos \eta d\theta , \quad (3.13)$$

onde:

$$\phi_1 = \max(\phi_0, \theta_0) , \quad (3.14)$$

$$\phi_2 = \pi ,$$

com ϕ_0 dado pela Relação 2.24 e θ_0 pela 3.12, e para $\cos\alpha \geq 0$. Para $\cos\alpha$ negativo, os limites de integração mudam; porém esta configuração é de pouco interesse por estar fora dos resultados obtidos na otimização.

Devido à lenta mudança de S com o tempo, pode-se considerá-la constante numa órbita. Efetuando a seguir a integração de $\cos\eta$, obtêm-se:

$$E_i = \frac{2S}{n} \{ \cos\xi \cos\alpha \cos v (\sin\phi_1 - \sin\phi_2) + (\phi_2 - \phi_1) \sin\xi \sin\alpha \} . \quad (3.15)$$

Neste ponto deverá ser introduzido um critério de otimização, que dependerá normalmente das características e dos requisitos da missão. Podem-se sugerir dois critérios distintos: obter α que maximize a energia incidente nos painéis em um determinado período (um ano, por exemplo; Hough and Elrod, 1969) ou obter o ângulo α que maximize a energia numa órbita. O primeiro critério, embora a primeira vista pareça ser sempre o mais adequado, só é utilizado em missões de curta duração (menores que um ano). Isto se deve ao fato de que normalmente as baterias não conseguem suprir a diferença de energia na época crítica do ano (quando a energia captada pelas células for menor que a necessária). Poder-se-ia pensar em dimensionar os painéis para que fossem capazes de suprir a energia necessária mesmo nas épocas críticas, porém seria preferível que a posição dos painéis fosse otimizada para esta época, que é exatamente o segundo critério.

O critério de otimização adotado aqui será, portanto: maximizar a energia incidente nos painéis, numa órbita, na época mais crítica do ano. Este critério se traduz por:

$$\left. \frac{\partial E_i}{\partial v} \right|_{\substack{\alpha=\alpha^* \\ t=t^*}} = 0 , \quad (3.17)$$

$$\frac{\partial^2 E_i}{\partial v^2} \Big|_{\substack{\alpha=\alpha^* \\ t=t^*}} < 0, \text{ ponto de m\u00e1ximo,} \quad (3.18)$$

$$\frac{\partial E_i}{\partial \alpha} \Big|_{\substack{v=v^* \\ t=t^*}} = 0, \quad (3.19)$$

$$\frac{\partial^2 E_i}{\partial \alpha^2} \Big|_{\substack{v=v^* \\ t=t^*}} < 0, \text{ ponto de m\u00e1ximo,} \quad (3.20)$$

$$\frac{\partial E_i}{\partial t} \Big|_{\substack{v=v^* \\ \alpha=\alpha^*}} = 0, \quad (3.21)$$

$$\frac{\partial^2 E_i}{\partial t^2} \Big|_{\substack{v=v^* \\ \alpha=\alpha^*}} > 0, \text{ ponto de m\u00ednimo.} \quad (3.22)$$

Sendo α^* e v^* os \u00e2ngulos da posi\u00e7\u00e3o \u00f3tima dos pain\u00e9is e t^* a data do ano na qual a energia \u00e9 m\u00ednima.

A Equa\u00e7\u00e3o 3.17 pode ser facilmente resolvida e resulta:

$$v^* = k\pi, \quad k = 0,1,2, \quad (3.23)$$

ou seja, n\u00e3o existe componente da normal ao painel na dire\u00e7\u00e3o de Y^0 , conforme a Figura 3.1. Aplicando a segunda derivada (Equa\u00e7\u00e3o 3.18), conclui-se que $\cos v \geq 0$ e, portanto, v^* ser\u00e1 sempre nulo.

As demais condi\u00e7\u00f5es (Rela\u00e7\u00f5es 3.19 a 3.22) fornecem equa\u00e7\u00f5es transcendentais, praticamente imposs\u00edveis de ser resolvidas analiticamente. No entanto, a aplica\u00e7\u00e3o do m\u00e9todo de Newton-Raphson para a obten\u00e7\u00e3o das ra\u00edzes das primeiras derivadas \u00e9 relativamente simples, quando realizadas atrav\u00e9s de computador. Um crit\u00e9rio iterativo que sucessivamente aproxima α e t de seus valores \u00f3timos α^* e t^* alternadamente foi ent\u00e3o traduzido em termos computacionais. Verificou-se, no

entanto, que, embora para certos valores do horário de cruzamento o método atingisse os valores ótimos de α e t , em outros isto não acontecia. De fato, nestes locais, uma aproximação do valor α^* diminuía em excesso a energia disponível em outra época do ano, e ao tentar-se alterar α de forma a maximizar a energia naquela época, diminuía-se em excesso a energia na época inicial novamente. Foi necessário, portanto, que, sob tais condições, se introduzisse uma nova condição: o ângulo α , neste caso, deveria ser tal que igualasse as energias em duas épocas do ano diferentes. Desta forma chegou-se a:

$$\operatorname{tg}\alpha^* = - \frac{S_1 \cos\xi_1 \operatorname{sen}\phi_{0_1} - S_2 \cos\xi_2 \operatorname{sen}\phi_{0_2}}{S_1(\pi - \phi_{0_1})\operatorname{sen}\xi_1 - S_2(\pi - \phi_{0_2})\operatorname{sen}\xi_2}, \quad (3.24)$$

onde os índices 1 e 2 referem-se aos dois instantes t_1 e t_2 nos quais as energias são iguais e mínimas.

Os resultados são mostrados nas Figuras 3.3, 3.4 e 3.5, t^* , α^* e a potência média numa órbita, $W^* = nE^*/2\pi$, respectivamente, em função do horário de cruzamento com o equador, \bar{h} , para uma altitude de 700 km (o que corresponde a uma inclinação de $98,2^\circ$). A data crítica (Figura 3.3), onde a energia captada numa órbita é mínima, muda rapidamente para horários de cruzamento próximos às 12 e 24 horas. Esta aparente descontinuidade na data crítica ocorre quando o ponto de mínima energia local muda de uma data para outra. Durante esta mudança, α^* é calculado por igualdade de energia e com isso têm-se duas datas, e não apenas uma, onde a energia é mínima. Na Figura 3.4 α^* apresenta um comportamento quase senoidal, como era de se esperar. As pequenas inflexões em α^* se devem ao comportamento não-contínuo de t^* e de ϕ_1 ; este último mostrado na Figura 3.6 (lembrar que $\phi_1 = \max(\phi_0, \theta_0)$). No entanto, apesar deste comportamento, a potência média numa órbita, e mínima na data crítica, resulta contínua, como pode ser visto na Figura 3.5. Também nesta figura é mostrada a potência disponível em painéis tal que $\alpha = -90^\circ, 0^\circ$ e 90° . Nota-se que, exceto para horários de cruzamento com o equador, próximos às 12 e 24 horas (e com $\alpha = 0^\circ$), a otim

zação da posição dos painéis aumenta substancialmente a energia disponível na órbita.

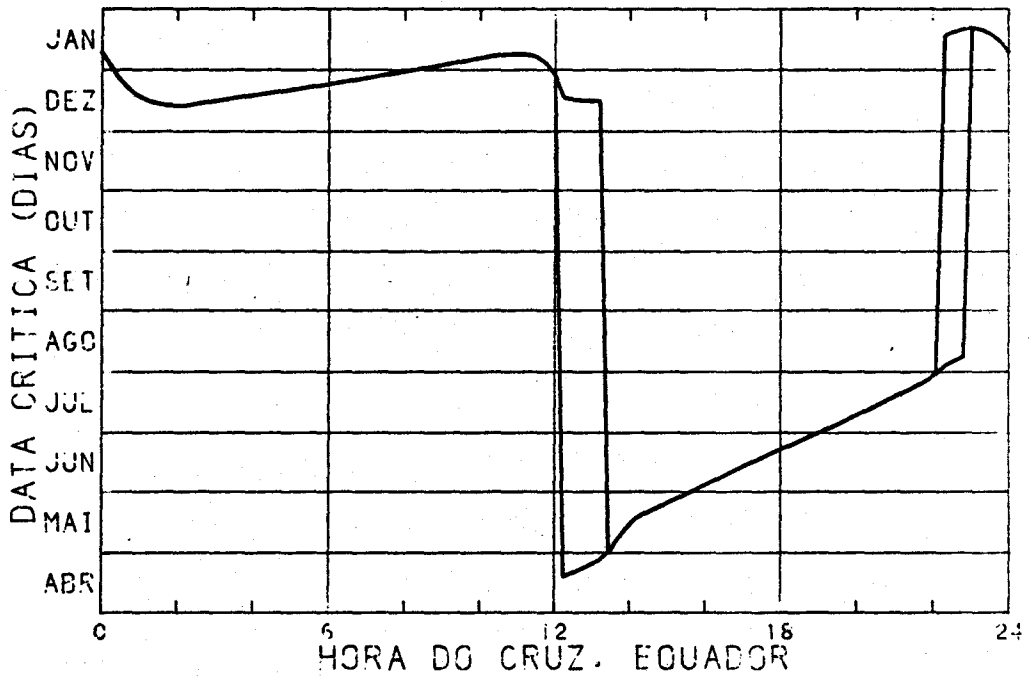


Fig. 3.3 - Data onde ocorre a mínima energia disponível numa órbita, t^* , para painéis fixos, em função do cruzamento com o equador, h .

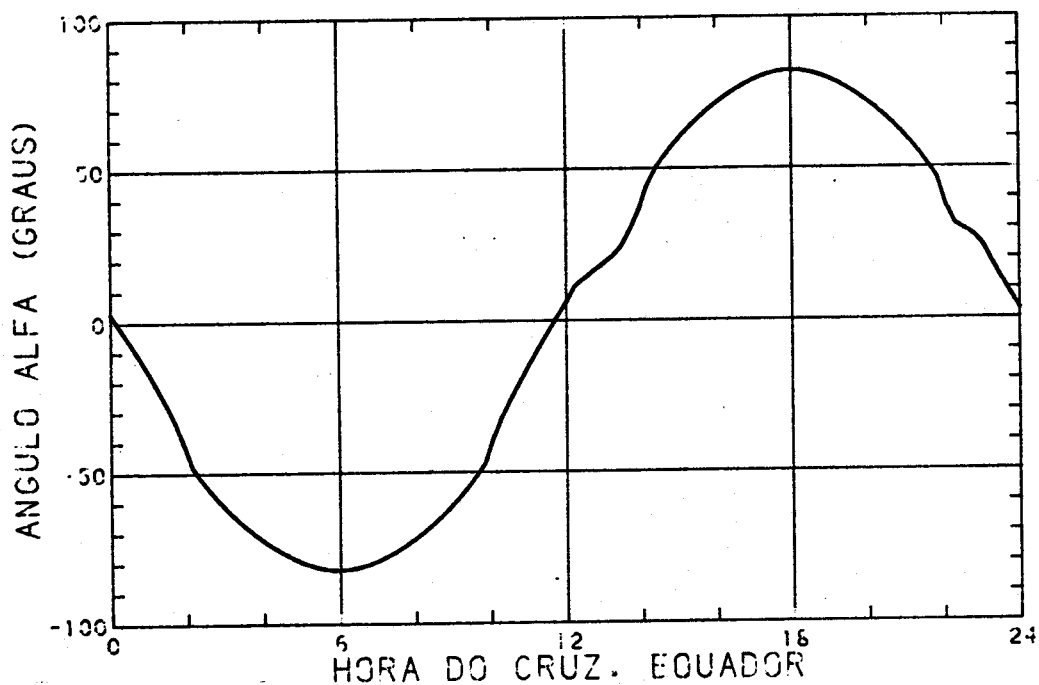


Fig. 3.4 - Ângulo de posicionamento ótimo de um painel fixo, α^* , em função do horário de cruzamento com o equador, h .

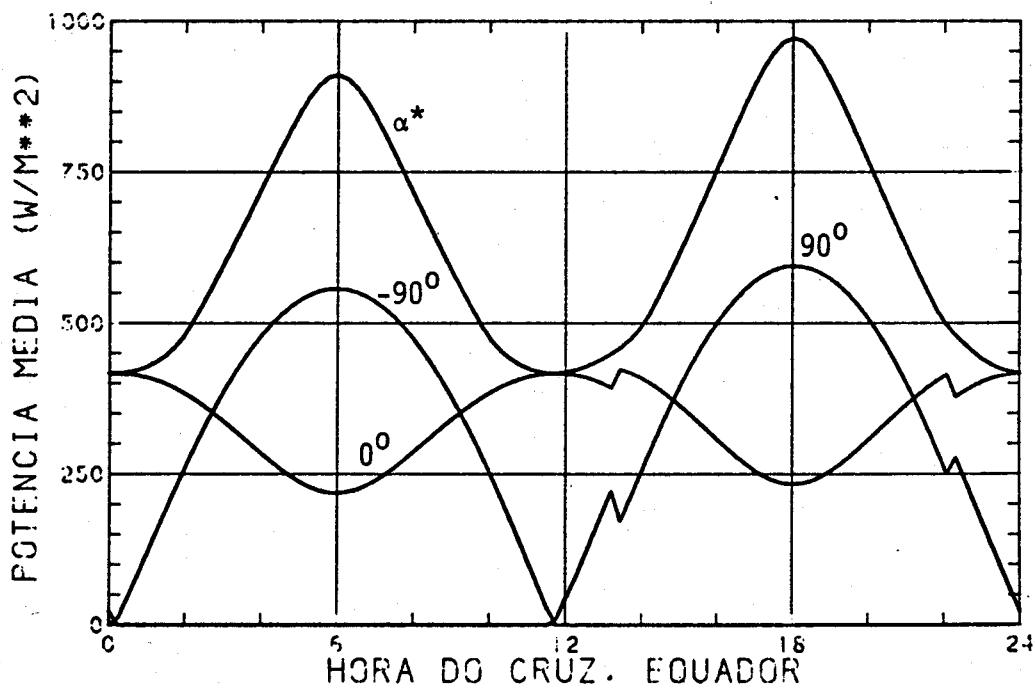


Fig. 3.5 - Potência média disponível num painel fixo, na data crítica, para 4 posições distintas de um painel fixo: $\alpha = \alpha^*$; $\alpha = -90^\circ$; $\alpha = 0^\circ$ e $\alpha = 90^\circ$.

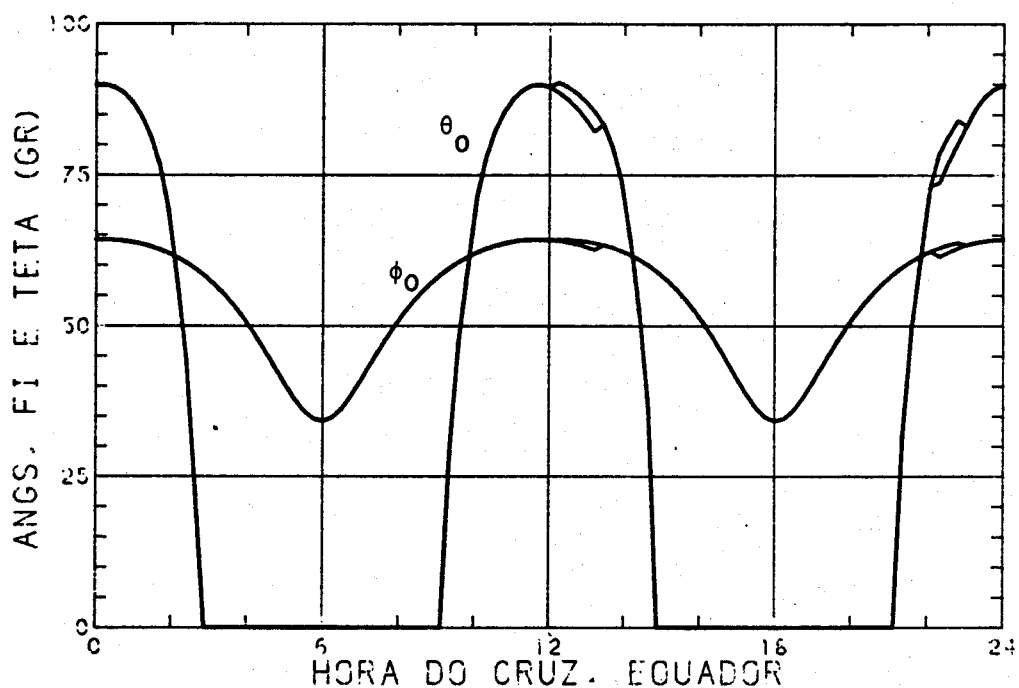


Fig. 3.6 - Comportamento dos ângulos ϕ_0 e θ_0 em função do horário de cruzamento com o equador.

A Figura 3.7 mostra a variação da potência média disponível ao longo do ano, para três horários distintos de cruzamento com o equador: 9:00 h ($\phi_1 = \phi_0$); 11:00 h ($\phi_1 = \theta_0$) e 13:00 h. Note-se que em ambos os casos, 9:00 e 11:00 h, existe apenas um ponto de mínima potência ocorrendo em janeiro. Para 13:00 h, entretanto, existem dois pontos de mínima potência, em abril e dezembro (ver novamente a Figura 3.3). A comprovação de que, em qualquer uma destas três possibilidades, o ângulo α^* realmente torna a potência máxima na data crítica, é feita na Figura 3.8. Nota-se aí que para $\bar{h} = 13:00$ existem duas curvas que se interceptam, mostrando assim a razão de, neste caso, α^* ser obtido por igualdade de energias nestas duas épocas (compare com a Figura 3.4).

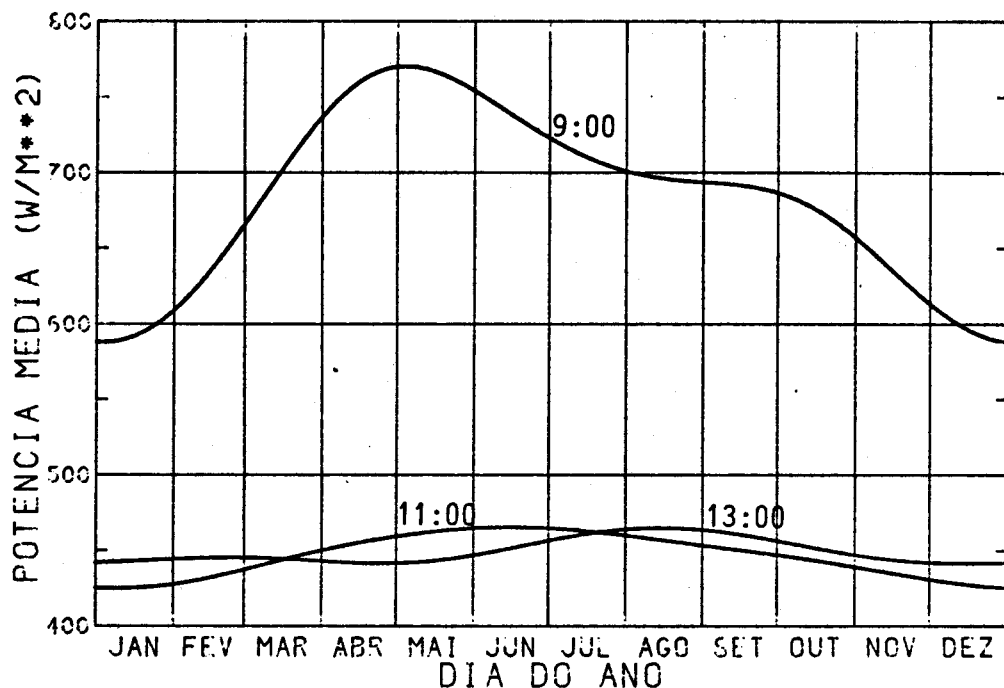


Fig. 3.7 - Potência média numa órbita disponível num painel fixo ao longo de um ano, para cruzamento com o equador iguais a 9:00 h, 11:00 h e 13:00 h.

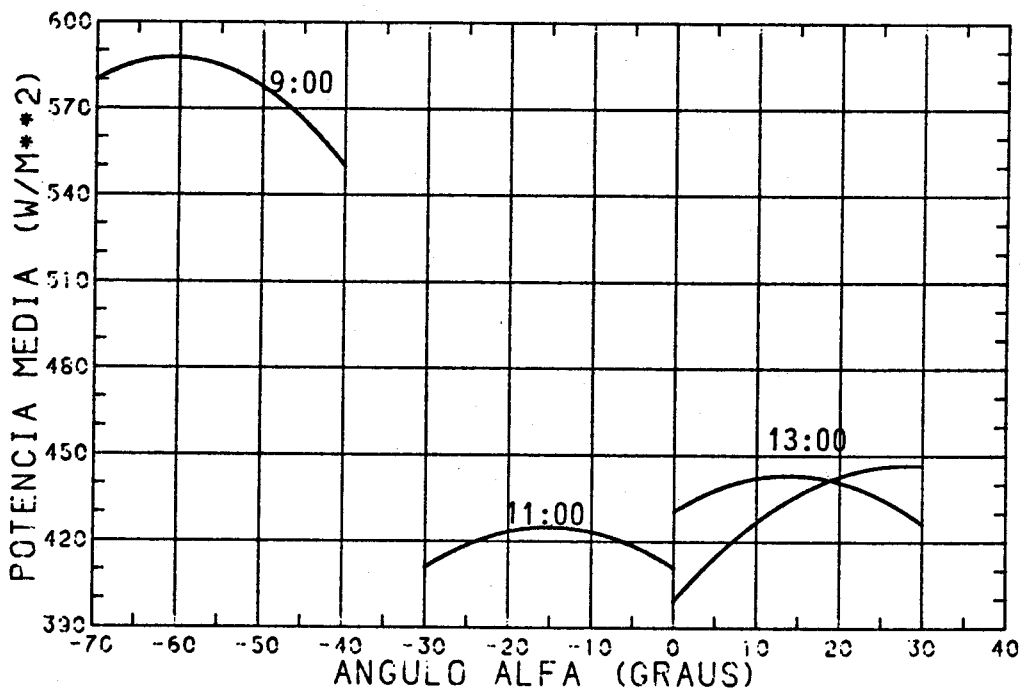


Fig. 3.8 - Variação da energia disponível na data crítica devida a uma mudança de α , para 3 horários: 9:00 h, 11:00 h e 13:00 h.

Embora o algoritmo aqui mostrado forneça resultados qualquer que seja o horário de cruzamento com o equador, nota-se de imediato que painéis fixos não são adequados para horários próximos às 12 e 24 horas por captar pouca energia (Figura 3.5), devido ao tempo demasiadamente longo em que o satélite permanece na sombra da Terra. Para tais horários a adoção de painéis giratórios - analisados no capítulo seguinte - que acompanham a posição do Sol, compensa, em parte, o efeito da sombra.



CAPÍTULO 4

PAINÉIS SOLARES GIRATÓRIOS

4.1 - INTRODUÇÃO

Pode-se verificar, por geometria, que painéis fixos são indicados para cruzamentos com o equador próximos às 6 horas ou 18 horas, quando então o painel estará permanentemente iluminado pelo Sol e os raios solares incidirão quase perpendicularmente nas células durante toda a órbita. O rendimento deste tipo de painel diminui, entretanto, por um fator maior que três, quando o cruzamento com o equador se aproxima das 12 ou 0 horas. Nestas situações, o uso de painéis rotativos que acompanham o movimento do satélite na órbita aumenta significativamente a energia recebida nas células. Este acompanhamento é normalmente feito automaticamente, mediante sensores instalados nos próprios painéis, que, medindo a intensidade ou a posição do Sol, comandam motores elétricos que os posicionam de modo a receber insolação máxima. Ao ingressar na sombra da Terra, os motores em alguns satélites são comandados de forma a continuar seu movimento anterior, a fim de reduzir os efeitos perturbadores na atitude, que ocorreriam se os painéis fossem repentinamente parados ou acionados.

4.2 - POSICIONAMENTO DOS PAINÉIS

Embora em certos casos admita-se um controle da posição em dois eixos (Hough and Elrod, 1969), é frequente a utilização de apenas um eixo que efetua a rotação do painel em satélites sol-síncronos. Além disso, este eixo é sempre mantido perpendicularmente ao plano orbital, caso contrário ocorrerão movimentos de nutação do satélite, prejudicando sua estabilização. A posição do painel relativa a este eixo será dada pelos ângulos β e λ , vistos na Figura 4.1.

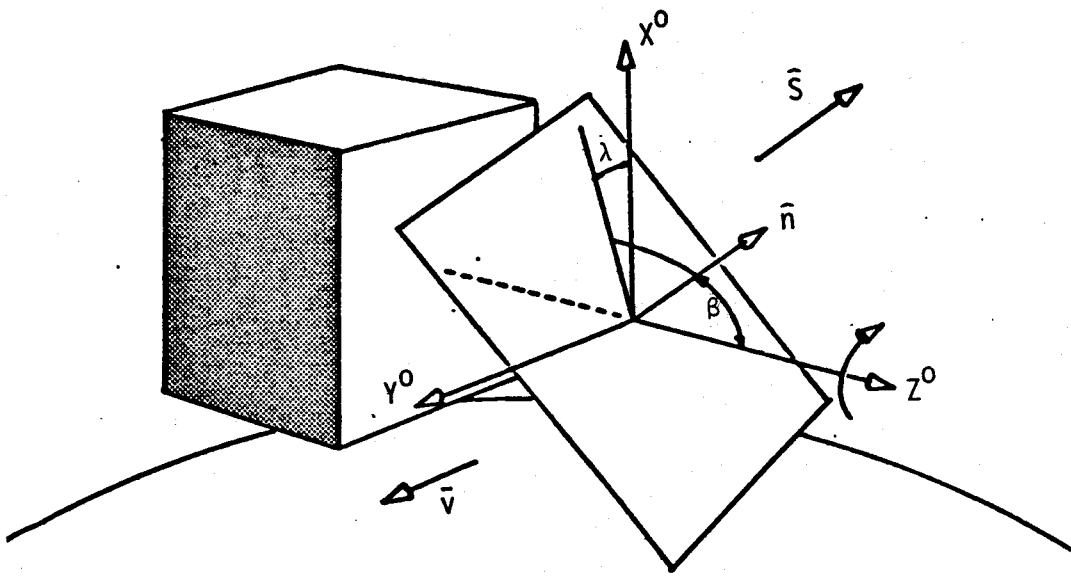


Fig. 4.1 - Satélite com painéis giratórios.

No sistema $X^0 Y^0 Z^0$, o versor normal \hat{n} , é dado por:

$$\hat{n}^0 = \text{sen}\beta \cos\lambda \hat{i}^0 + \text{sen}\beta \text{sen}\lambda \hat{j}^0 + \text{cos}\beta \hat{k}^0 . \quad (4.1)$$

No sistema $X^u Y^u Z^u$, mostrado na Figura 3.2, a normal apresenta a forma:

$$\hat{n}^u = \text{sen}\beta \cos(\theta + \lambda) \hat{i}^u + \text{sen}\beta \text{sen}(\theta + \lambda) \hat{j}^u + \text{cos}\beta \hat{k}^u , \quad (4.2)$$

onde θ é o ângulo entre o vetor Sol-Terra e o vetor Terra-satélite, visto na Figura 3.2.

O ângulo η , formado pela direção de incidência dos raios solares e a normal ao painel, resulta então:

$$\text{cos}\eta = \hat{n}^u \cdot \hat{S}^u = - \text{cos}\xi \text{sen}\beta \cos(\theta + \lambda) + \text{sen}\xi \text{cos}\beta , \quad (4.3)$$

onde \hat{S}^u é dado pela Equação 2.25 e ξ é o ângulo entre o vetor Terra-Sol e o plano orbital.

Para efetuar a integral da energia numa órbita, é preciso antes conhecer a variação de λ com θ , bem como seu valor quando $\theta = 0$. Como em qualquer instante a potência recebida pelo painel deve ser máxima quando se varia λ , então:

$$\frac{\partial(\cos\eta)}{\partial\lambda} = 0 \quad \text{e} \quad \frac{\partial^2(\cos\eta)}{\partial\lambda^2} < 0, \quad (4.4)$$

que resulta $\lambda = \pi - \theta$. Conclui-se, com isso, que se a igualdade é válida para qualquer θ , então a variação em λ também deverá ser igual à variação de θ , ou seja, o painel efetua uma volta em torno do satélite a cada órbita. Além disso, se a órbita for circular, a variação em θ , e portanto em λ , será linear no tempo. Integrando então a Equação 3.13, com os limites de integração $\phi_1 = \phi_0$ e $\phi_2 = \pi$, que define o instante de saída da sombra terrestre, chega-se a:

$$E_i = \frac{2S}{n} \text{sen}(\xi + \beta) \cdot (\pi - \phi_0). \quad (4.5)$$

O critério de otimização para a escolha do ângulo β será idêntico ao critério adotado para painéis fixos, ou seja, maximizar a energia incidente no painel, numa órbita, na época mais crítica do ano. Desta forma:

$$\left. \frac{\partial E_i}{\partial \beta} \right|_{t=t^*} = 0, \quad (4.6)$$

$$\left. \frac{\partial^2 E_i}{\partial \beta^2} \right|_{t=t^*} < 0, \quad (4.7)$$

$$\left. \frac{\partial E_i}{\partial t} \right|_{\beta=\beta^*} = 0 \quad \text{e} \quad (4.8)$$

$$\frac{\partial^2 E_i}{\partial t^2} \Big|_{\beta=\beta^*} > 0 . \quad (4.9)$$

As Equações 4.6 e 4.7 podem facilmente ser resolvidas obtendo:

$$\beta^* = \xi - \frac{\pi}{2} . \quad (4.10)$$

Jã as Equações 4.8 e 4.9 são mais complexas e podem ser resolvidas por processos iterativos como Newton-Raphson, por exemplo. Da mesma forma como ocorre com painéis fixos, também aqui as condições de máxima energia de α^* e mínima em t^* são incompatíveis para certos valores do horário de cruzamento com o equador. Da imposição de serem iguais as energias nas duas épocas do ano onde ocorre esta incompatibilidade, a Condição 4.6 é substituída por:

$$\operatorname{tg} \beta^* = - \frac{(\pi - \phi_{0_1}) S_1 \operatorname{sen} \xi_1 - (\pi - \phi_{0_2}) S_2 \operatorname{sen} \xi_2}{(\pi - \phi_{0_1}) S_1 \operatorname{cos} \xi_1 - (\pi - \phi_{0_2}) S_2 \operatorname{cos} \xi_2} , \quad (4.11)$$

onde os índices 1 e 2 referem-se aos dois instantes nos quais as energias são iguais e mínimas.

Em função do horário de cruzamento com o equador, a data crítica (Figura 4.2) tem comportamento semelhante à calculada para painéis fixos. Os trechos onde β^* é calculado por igualdade de energia, conforme a Equação 4.11, situam-se próximos às 15 h e 20 h, e também num pequeno trecho perto das 18 h. Neste último, uma das datas críticas ocorre quando toda a órbita fica iluminada pelo Sol ($\phi_0 = 0$, na Figura 4.3). No entanto, neste mesmo ponto, β^* é contínuo, como pode ser visto na Figura 4.4. Também como α^* , o ângulo β^* tem um perfil senoidal, com inflexões nos pontos de mudança da data crítica. A potência média numa órbita disponível nos painéis é mostrada na Figura 4.5, com comportamento semelhante àquele dos painéis fixos, mas com magnitude maior. Nota-se que a mínima potência ocorre nas proximidades de 0 h e

12 h do horário de cruzamento, quando uma grande parcela da órbita en contra-se na sombra da Terra (ϕ_0 é máximo na Figura 4.3). Inversamente, às 6 h e às 18 h têm-se pontos de máxima potência, já que ϕ_0 agora é mínimo.

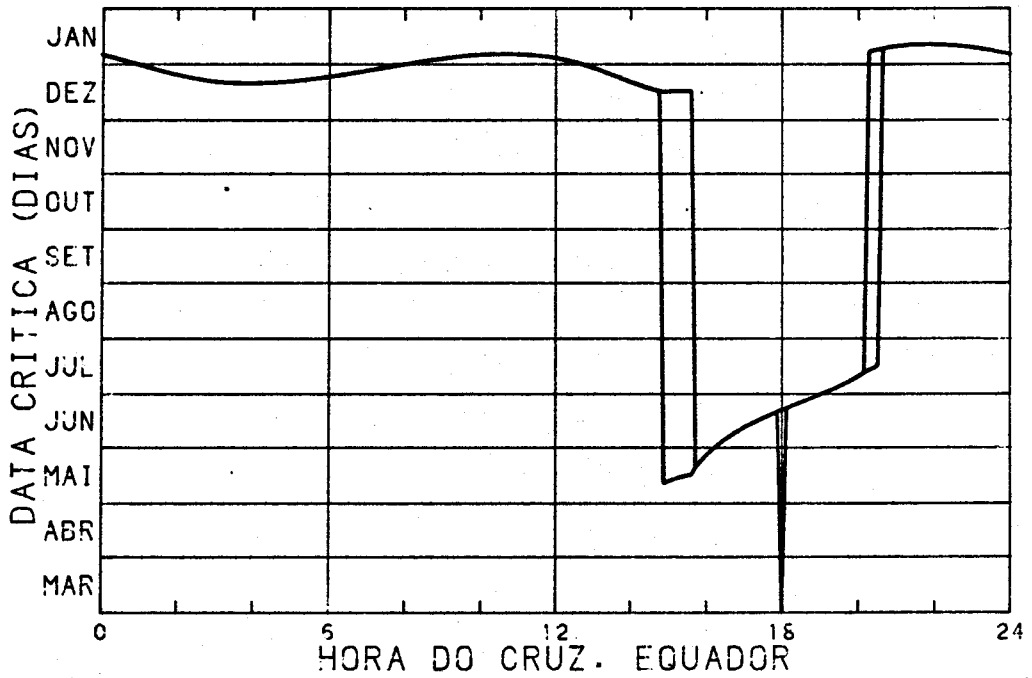


Fig. 4.2 - Data crítica t^* , onde a energia disponível numa órbita é mínima, em função do horário de cruzamento com o equador, para painel giratório.

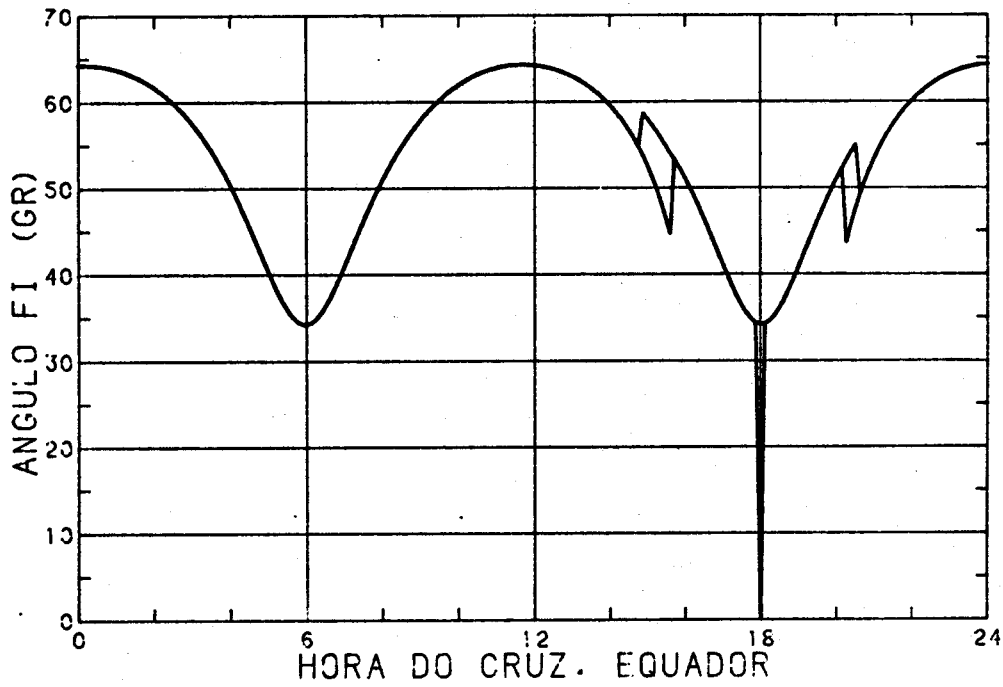


Fig. 4.3 - Ângulo ϕ_0 em função do horário de cruzamento, \bar{h} .

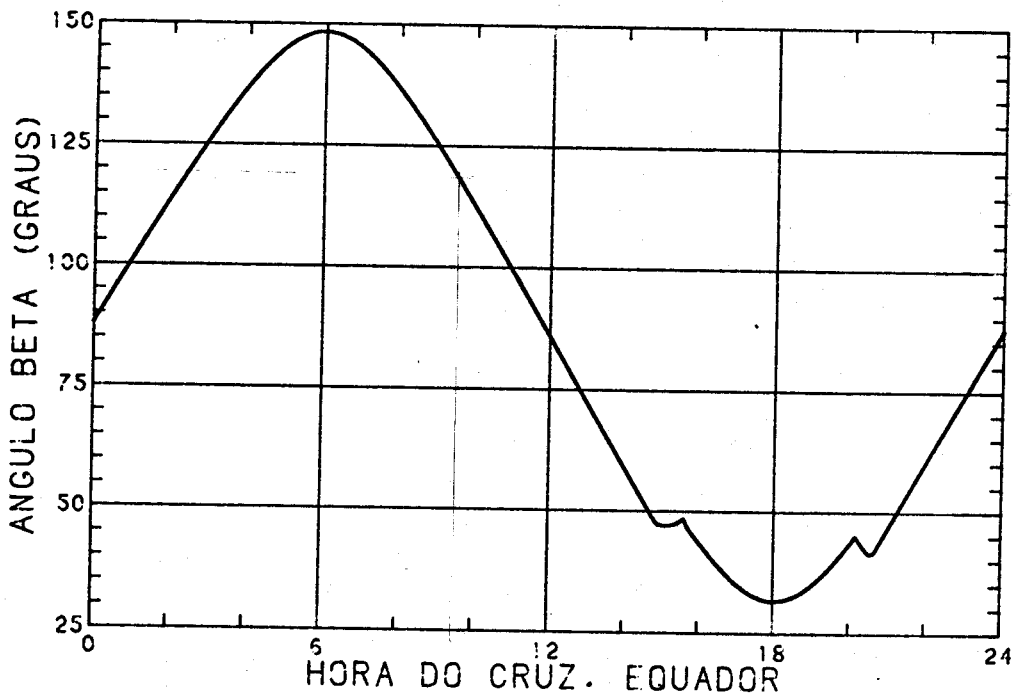


Fig. 4.4 - Ângulo β^* , do posicionamento de um painel girante, em função do horário de cruzamento com o equador.

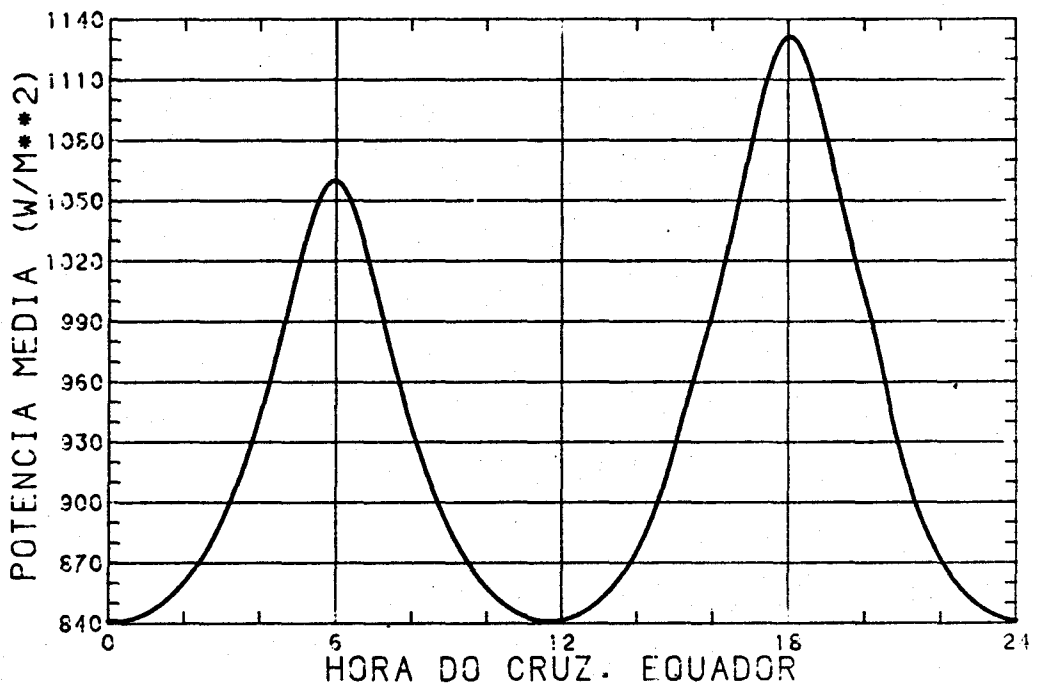


Fig. 4.5 - Potência média numa órbita, na data crítica, disponível num painel, em função do horário de cruzamento.

O comportamento da potência disponível ao longo de um ano, para horários de cruzamento com o equador iguais a 15:00, 16:30 e 18:00 (com seus respectivos β^*), é mostrado na Figura 4.6. Note-se que, para $\bar{h} = 15$ e $\bar{h} = 18$ h, existem duas potências mínimas e iguais entre si, ocorrendo em datas diferentes. A diferença é que, às 18 h, no ponto correspondente aos primeiros dias de março, ϕ_0 é nulo, ou seja, nesta época a órbita se encontra totalmente iluminada pelo Sol.

Na Figura 4.7 é mostrada o comportamento da potência média numa órbita, na ou nas datas críticas, em função do ângulo de posição do painel, β . Note-se que os pontos de máxima potência, para cada um dos três horários de cruzamento, coincide com os valores mostrados na Figura 4.4.

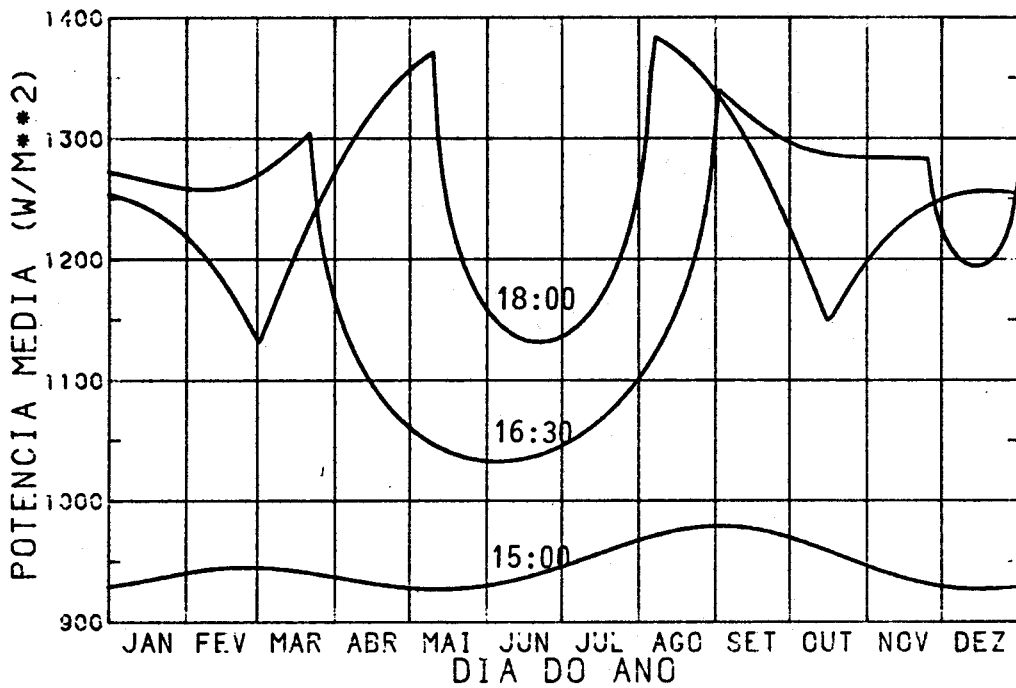


Fig. 4.6 - Potência média numa órbita, disponível nos painéis ao longo de um ano, para 3 horários de cruzamento distintos: $\bar{h} = 15:00$ h, $16:30$ h e $18:00$ h.

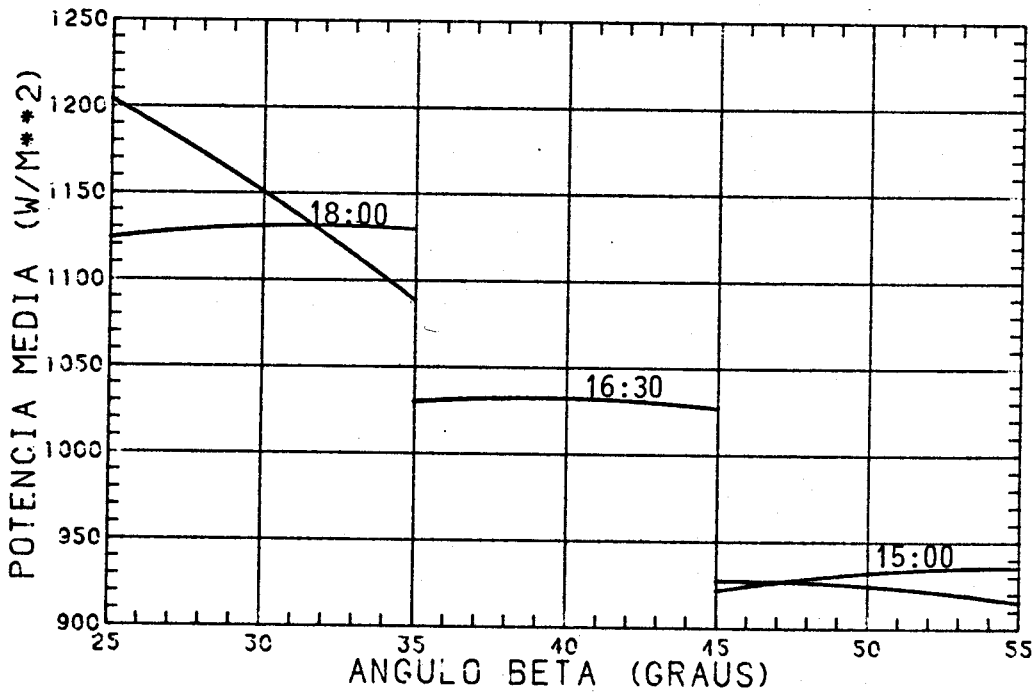
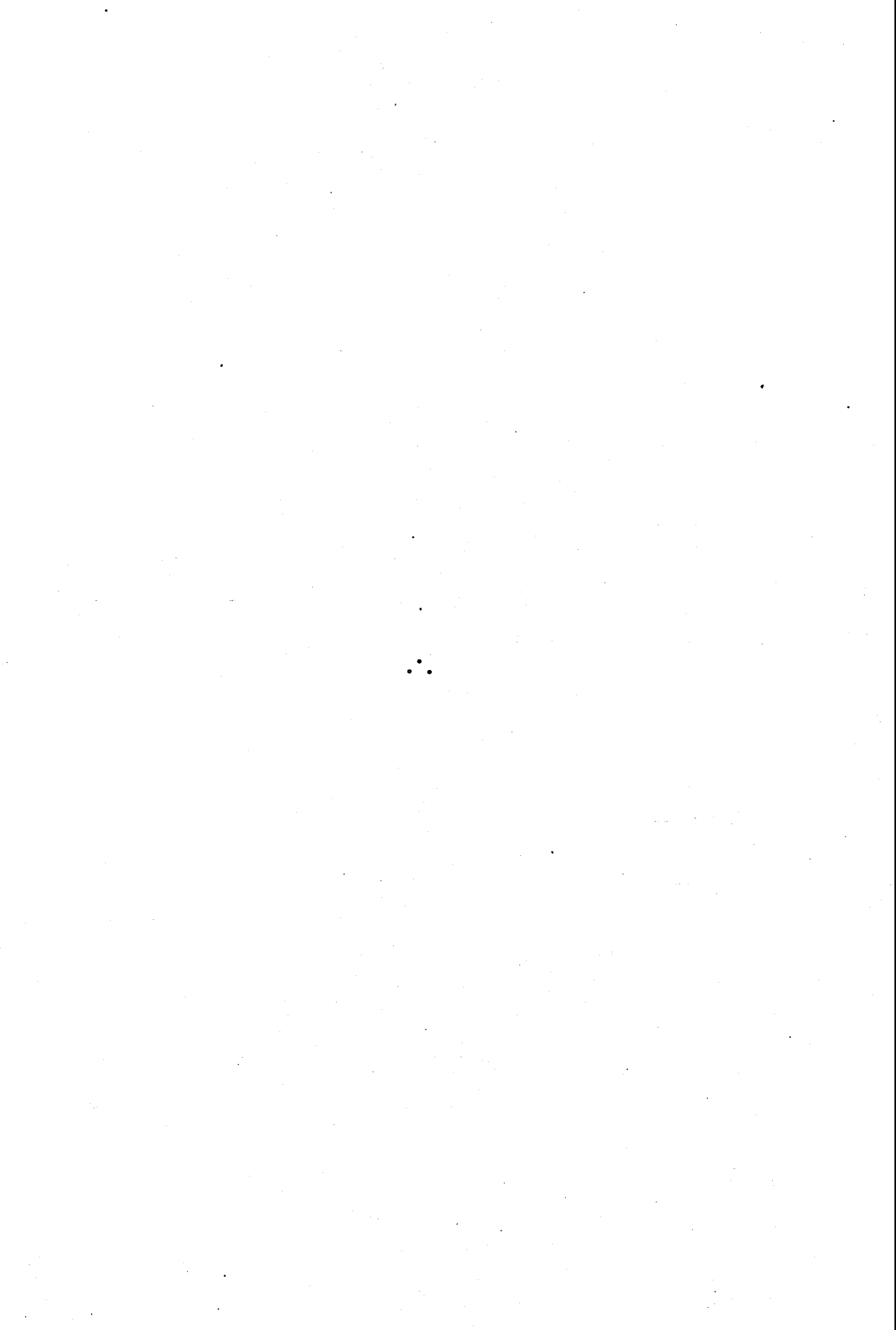


Fig. 4.7 - Potência média em função do ângulo de posição do painel giratório, β , para $\bar{h} = 15:00$ h, $16:30$ h e $18:00$ h.

A energia conseguida através de painéis giratórios é sempre maior que a obtida utilizando-se a mesma área de painéis fixos. No entanto, certos critérios de projeto e análise devem ser levados em conta na escolha do tipo a ser empregado num determinado satélite. Estes critérios serão discutidos com mais detalhes no capítulo seguinte.



CAPÍTULO 5

COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS E CONCLUSÕES

Existem certos fatores que devem ser levados em conta, durante a fase de análise de missão de um satélite sol-síncrono, no que se refere aos painéis solares. Ambos, painéis fixos e giratórios, apresentam vantagens e desvantagens que podem viabilizar um tipo em detrimento ao outro. Tais características são discutidas em seguida de forma qualitativa.

É comum, como critério de escolha, procurar maximizar a quantidade de energia captada pelas células dos painéis, minimizar o peso e aumentar a confiabilidade do sistema (equivalente a reduzir ao máximo a possibilidade de falha). Sob tais aspectos, pode-se afirmar que painéis fixos são, comparados com painéis giratórios, mais pesados por necessitar de maior área para fornecer a mesma quantidade de energia. Por outro lado, o equipamento envolvido na manutenção da rotação de painéis giratórios pode mesmo tornar este último mais pesado. Além disso, este equipamento é mais complexo e, por estar em constante movimento, está mais sujeito a falhas, diminuindo sua confiabilidade (o sistema de abertura de painéis fixos também pode falhar, como ocorreu com o satélite INSAT-1A). Se o custo por unidade de energia também estiver envolvido nos critérios de projeto, normalmente painéis fixos resultam mais baratos.

Em função do horário de cruzamento com o equador, a potência disponível na época crítica, para painéis fixos e giratórios é apresentada na Figura 5.1. Embora forneçam sempre uma potência maior, os painéis giratórios são, no entanto, mais eficientes que painéis fixos para cruzamentos próximos às 12 h e as 24 h. A relação entre a potências fornecida pelo painel móvel e a do painel fixo é mostrada na Figura 5.2. Veja-se que os painéis fixos necessitam de aproximadamente o dobro da área de um painel giratório para fornecer a mesma potência, quando \bar{h} está próximo das 12:00 h ou 24:00 h. Eles se tornam quase

equivalentes, entretanto, para cruzamentos com o equador próximo das 6:00 h e 18:00 h.

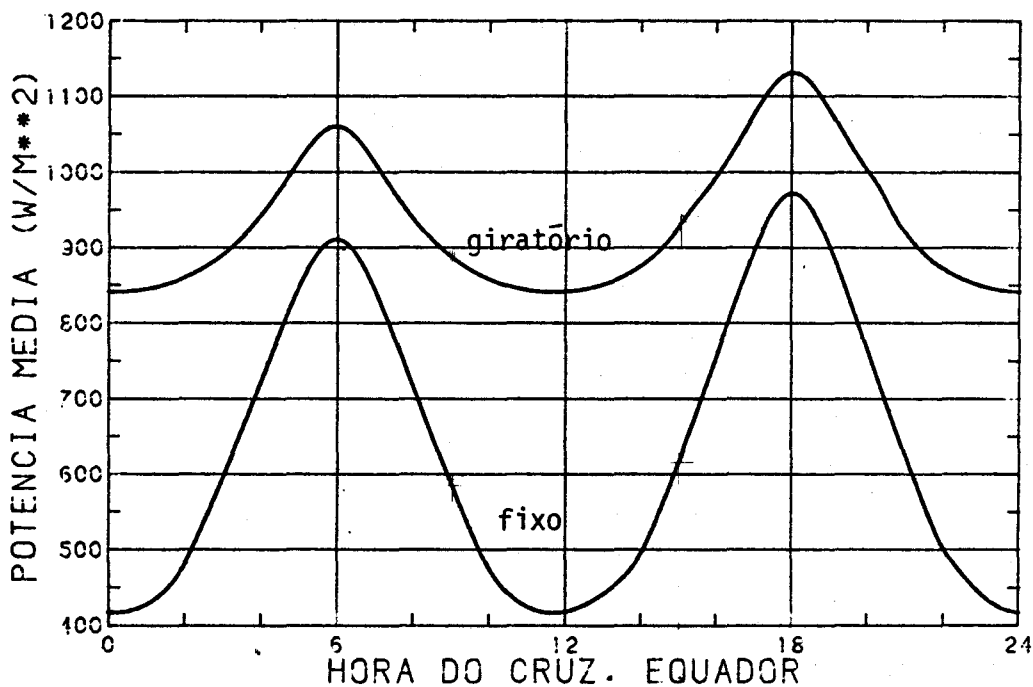


Fig. 5.1 - Potência média numa órbita, na data crítica, em painéis fixos e giratórios, em função do horário de cruzamento com o equador.

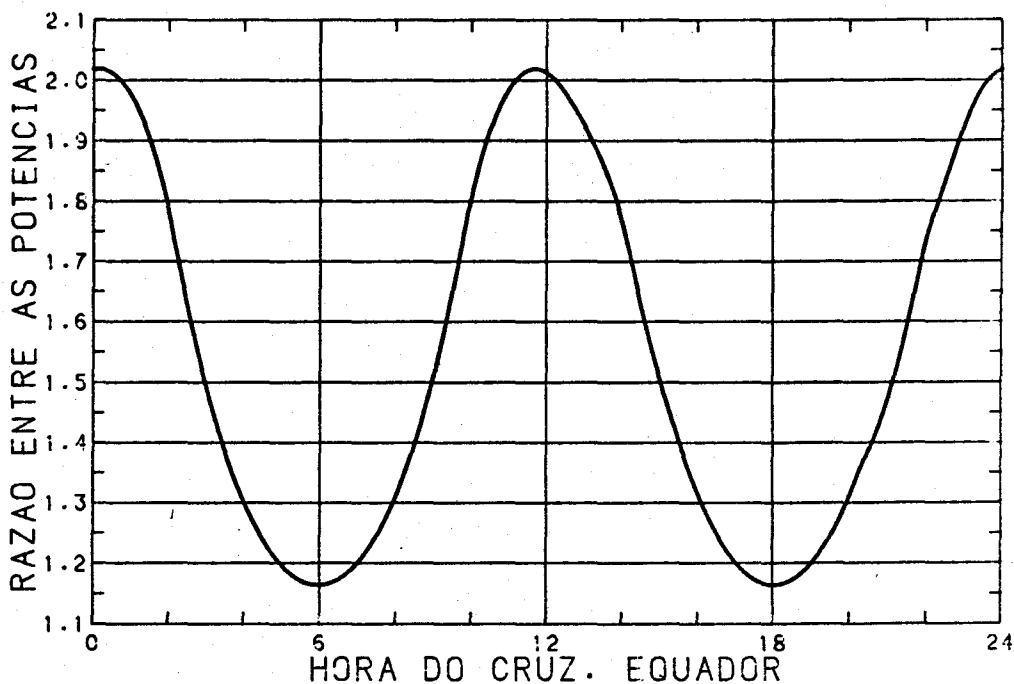


Fig. 5.2 - Relação entre as potências fornecidas por um painel giratório e um painel fixo, na data crítica de cada um, em função do horário de cruzamento.

Há ainda um outro fator que influi na adoção de um ou outro tipo de painel: a variação da potência captada ao longo da órbita. Por seguir a posição do Sol na órbita, os painéis giratórios fornecem energia constante com o tempo, ao longo da órbita, exceto quando o satélite se encontrar na sombra da Terra. Painéis fixos, é claro, não apresentam tal comportamento, principalmente para h perto das 12:00 h, como visto nas Figuras 5.3, 5.4 e 5.5.

Nestes gráficos, estão mostradas as potências disponíveis nos painéis fixos e giratórios em função do ângulo θ (órbita circular, 700 km de altura, época crítica), para três valores diferentes do horário de cruzamento 6:00 h, 9:00 h e 12:00 h, respectivamente. A área do painel giratório é unitária, enquanto a do painel fixo é tal que, numa órbita, a quantidade de energia captada por ambos é a mesma. A grande diferença entre o valor máximo da potência nos dois tipos de painéis (acentuada quando h se aproxima das 12:00 h) pode inviabilizar a ado

ção de painéis fixos. A razão disto é que a vida útil das baterias depende não só do número de ciclos carga-descarga, mas também dos valores de pico da corrente de carga e descarga, ou seja, da variação da potência fornecida pelos painéis numa órbita, durante o ciclo de carga.

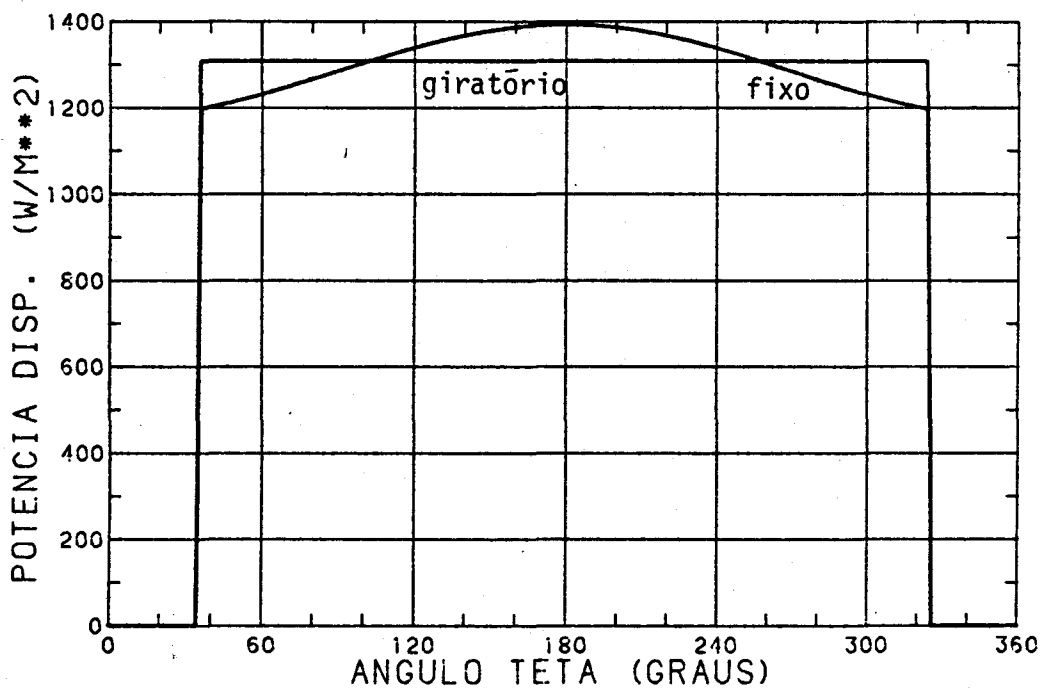


Fig. 5.3 - Potência disponível ao longo de uma órbita para cruzamento $h = 6:00$ h. Energia na órbita igual para ambos os painéis.

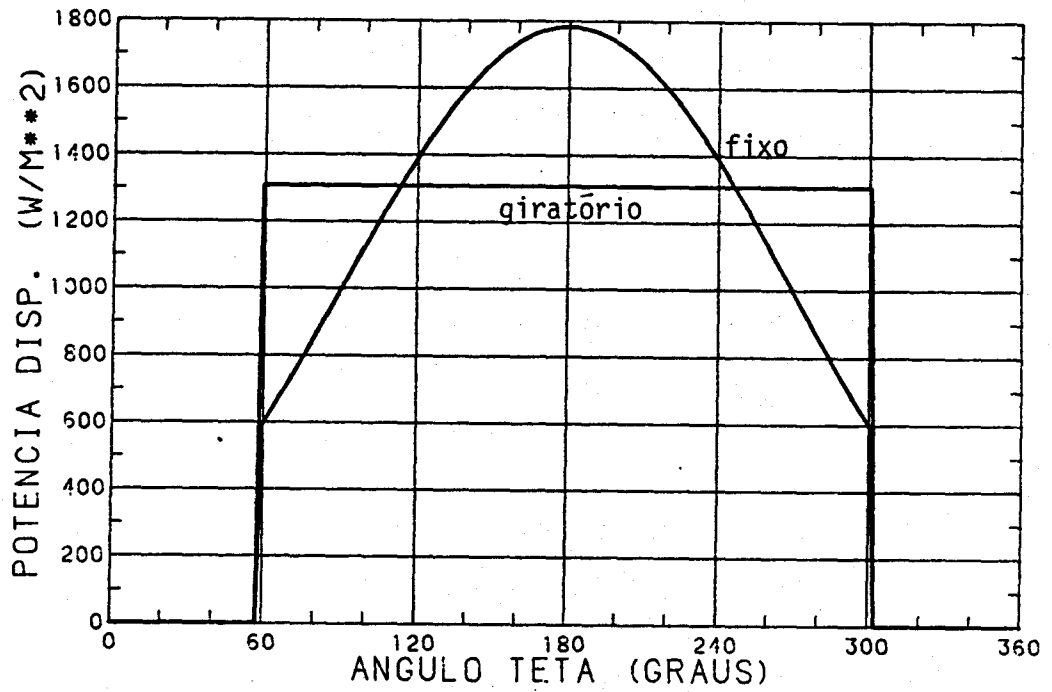


Fig. 5.4 - Potência disponível ao longo de uma órbita para o horário de cruzamento $h = 9:00$ h. Energia disponível na órbita igual para ambos os painéis (áreas diferentes).

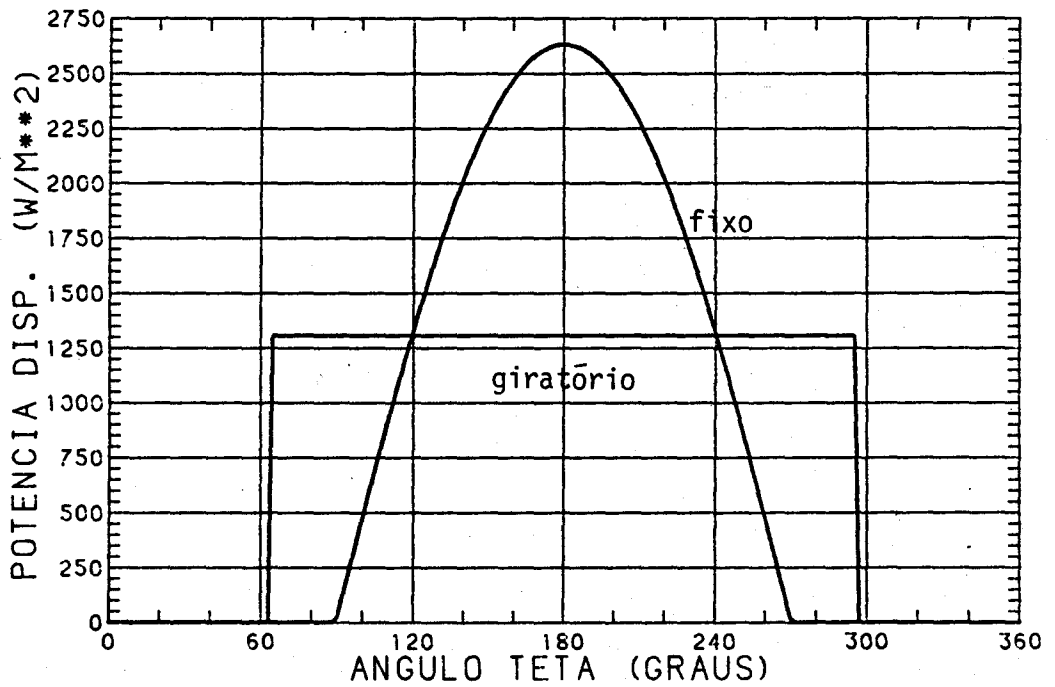


Fig. 5.5 - Potência disponível ao longo de uma órbita para $h = 12:00$ h. Energia na órbita igual para ambos os tipos de painéis.

A decisão da escolha de painéis fixos ou giratórios é, como visto, complexa, e depende também de outros fatores são possíveis de análise durante a fase de definição da carga útil. Neste trabalho procurou-se fornecer o equacionamento básico, bem como um estudo preliminar dos critérios de posicionamento ótimo de painéis solares em satélites, visando atingir um nível suficiente para uma adequada decisão quanto ao tipo de painel numa dada missão. Numa fase posterior, pode-se, a partir do programa computacional gerado, estudar a posição dos painéis, bem como dimensioná-los para atender às necessidades de energia do satélite.

Como último comentário, foi notado que, sob certas situações, pode-se conseguir um aumento na potência fornecida se, ao invés de um, forem fixados dois painéis na estrutura do satélite, orientados segundos diferentes direções. O estudo da otimização da posição de dois ou mais painéis fixos, fica sugerido, então, como continuidade deste trabalho.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BROOKS, D.R. *An introduction to orbit dynamics and its application to satellite based Earth monitoring missions.* Washington, DC, NASA, 1977. (NASA RP-1009).
- BROWER, D.; CLEMENCE, G.M. *Methods of celestial mechanics.* New York, NY, Academic, 1961.
- HOUGH, W.W.; ELROD, B.D. Solar array performance as a function of orbital parameters and spacecraft attitude. *ASME, Transaction, Serie B - Journal of Engineering for Industry*, 91(1):13-20, Feb., 1969.
- RAUCHENBACK, H.S. *Solar cell array design handbook.* New York, NY, Van Nostrand Reinhold, 1980.
- THE ASTRONOMICAL ALMANAC, 1982. Washington. *U.S. Government Printing Office*, 1981. Section C, C1.