

ESTUDO DA DISTRIBUIÇÃO DE RADIAÇÃO
EM ABSORVEDOR CILÍNDRICO USADO EM
REFLETOR SOLAR CILÍNDRICO PARABÓLICO

007/84

ESTUDO DA DISTRIBUIÇÃO DE RADIAÇÃO
EM ABSORVEDOR CILÍNDRICO USADO EM
REFLETOR SOLAR CILÍNDRICO PARABÓLICO

EUGÊNIO SPANÓ ROSA

Orientador: Prof.Dr. CARLOS ALBERTO C. ALTEMANI

Este exemplar corresponde à redação
final da tese defendida por Eugênio
Spanó Rosa e aprovada pela Comissão
Julgadora em 21/12/1983.

Carlos Altemani

Tese apresentada à Faculdade de
Engenharia da Universidade Esta-
dual de Campinas - UNICAMP - co-
mo parte dos requisitos exigi-
dos para obtenção do título de
MESTRE EM CIÊNCIAS.

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA DE CAMPINAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Comissão Julgadora:

Prof. Carlos A. C. Altemani (presidente.)

Prof. Isaías C. Macedo

Prof. Carlos V. L. L.

UNICAMP

BIBLIOTECA CENTRAL

AGRADECIMENTOS...

- ... ao Prof. Dr. Carlos Aberto C. Altemani, pela segura orientação dada ao trabalho;
 - ... ao Laboratório de Estatística da UNICAMP, pelo apoio dado ao trabalho;
 - ... à preciosa colaboração do desenhista Wilton Furquin e da datilógrafa Maria Júlia.
-

RESUMO

É desenvolvida uma relação integral para determinar a distribuição de radiação em absorvedores cilíndricos usados em refletores solares cilíndrico-parabólicos. Através dessa relação, o perfil de concentrações e a fração da energia interceptada pelo absorvedor são determinados para refletores perfeitos com vários ângulos de abertura e para absorvedores com vários valores da razão entre o seu raio e a distância focal do refletor. São também investigados os efeitos de: imperfeições no refletor, de sombra do absorvedor no refletor, da operação do refletor com erro de apontamento ao sol e do deslocamento entre o centro do absorvedor e a linha focal do refletor.

ÍNDICE

I - INTRODUÇÃO	1
II - DETERMINAÇÃO ANALÍTICA DO FLUXO DE ENERGIA INTERCEPTA DO NO PLANO FOCAL - FORMULAÇÃO INTEGRAL	5
II.1 - Concentração Local	12
II.2 - Fator de Interceptação	12
III - ANÁLISE DA DISTRIBUIÇÃO DE RADIAÇÃO NUM ABSORVEDOR PLA NO PARALELO AO PLANO FOCAL	15
III.1 - Convenção de Sinais	16
III.2 - Caso Ideal	20
III.3 - Caso com Deslocamento do Plano Focal	24
III.4 - Caso com Deslocamento do Plano Focal e com Er ro de Apontamento	28
III.5 - Sumário das Relações	30
IV - EXTENSÃO DA ANÁLISE PARA O CASO DE ABSORVEDORES CILÍN DRICOS	36
IV.1 - Definição da Superfície Absorvedora Cilíndrica .	37
IV.2 - Definição dos Planos Absorvedores Auxiliares e da Distribuição de Radiação em Absorvedores Ci líndricos	38
IV.3 - Regiões do Absorvedor Irrradiados pelo Refletor .	41
IV.4 - Resultado da Distribuição de Radiação em Absorve dores Cilíndricos para o Caso Ideal	47
V - SIMULAÇÃO DE CONDIÇÕES NÃO IDEAIS DE OPERAÇÃO EM ABSORVE DORES CILÍNDRICOS	58
V.1 - Posicionamento do Absorvedor fora da Linha Focal .	59
V.2 - Desvio de Apontamento	67

V.3 - Refletor com Desvio de Curvatura em relação à <u>Su</u> perfície Parabólica	73
V.4 - Refletor com Desvio de Curvatura normalmente <u>dis</u> trubuído	82
V.5 - Comentários a cerca das Aplicações dos Modelos ...	91
VI - COMENTÁRIOS E CONCLUSÕES FINAIS	92
REFERÊNCIAS	95
APÊNDICE I - IMAGEM DO DISCO SOLAR	96
APÊNDICE II - CÁLCULO DAS PROJEÇÕES y_1 e y_2	98
APÊNDICE III - CÁLCULO DO SEMI-EIXO MENOR	108
APÊNDICE IV - LISTAGEM DOS PROGRAMAS DE COMPUTADOR	112

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

O conhecimento da distribuição de radiação em absorvedores de coletores concentradores é importante tanto para um melhor entendimento do seu funcionamento quanto para um projeto aprimorado desses coletores.

No caso de coletores concentradores cilíndrico-parabólicos com absorvedores na forma de tubos cilíndricos, o conhecimento da distribuição de radiação no tubo absorvedor permite uma análise dos efeitos de vários parâmetros construtivos, de montagem e de operação desses coletores. Além disso, permite a determinação do fator de interceptação, definido como a fração da energia solar que após ser refletida pelo coletor é interceptada pelo tubo absorvedor. Esse parâmetro é essencial na análise térmica desses coletores.

Na literatura, há vários trabalhos que se referem à distribuição de radiação nesses coletores concentradores. Em [1] foi utilizada uma sonda de radiação que percorria a região do plano focal em várias seções de um coletor com um tubo absorvedor cilíndrico. Os resultados médios dessas medidas da distribuição de radiação sugeriram um modelamento matemático na forma de uma curva normal e permitiram uma avaliação do fator de interceptação para o coletor utilizado naquele trabalho. Em [2] o modelo baseado numa distribuição normal de radiação no plano focal foi generalizado para outras geometrias do refletor e do absorvedor, considerado agora como plano, com a finalidade de obtenção do fator de interceptação. Neste trabalho o fator de interceptação aparece como uma função explícita da razão entre a largura do absorvedor e a abertura do refletor e depende implicitamente também do ângulo de abertura do refletor, através de um parâmetro que caracteriza o desvio padrão da distribuição normal de radiação no absorvedor. Não foram consideradas as influências de imperfeições da superfície refletora, do erro de apontamento ao sol, ou do posicionamento do absorvedor fora do plano focal. Em [3] é desenvolvido um método integral para avaliar a distribuição de radiação em absorvedores planos de coletores cilíndricos parabólicos. São apresentados resultados da concentração local do fluxo de radiação solar em função da posição no absorvedor e do ângulo de abertura. O sol é modelado nos resultados, como um disco de intensidade uniforme ou não-uniforme. São consideradas as três influências mencionadas anteriormente na concentração local

de radiação no absorvedor plano. Não é considerado neste trabalho o fator de interceptação. Há também outros trabalhos [4,5] que desenvolvem um método de distribuição de radiação que pode em princípio ser aplicado a vários tipos de coletores solares concentradores, mas devido a sua generalidade ficam restritos a uma apresentação muito limitada de resultados para um tipo de coletor como o cilíndrico-parabólico.

O fator de interceptação pode também ser avaliado sem o conhecimento da distribuição local de fluxo de radiação no absorvedor. Em [6] foi desenvolvido um método associado ao caso de absorvedores cilíndricos de coletores cilíndrico-parabólicos. O método utilizado pressupõe entretanto um modelo de sol e outro de distribuição de radiação solar refletida pelo coletor, que são etapas também utilizadas na avaliação da distribuição de radiação em um absorvedor.

No presente trabalho, foi desenvolvido um método integral para a avaliação da distribuição de radiação e do fator de interceptação em absorvedores cilíndricos de coletores cilíndrico-parabólicos, utilizando-se como modelo de sol um disco de intensidade uniforme. O método é apresentado inicialmente na sua concepção geral e em seguida aplicado sucessivamente a absorvedores planos e a absorvedores cilíndricos. Várias relações obtidas para o caso de absorvedores planos serão utilizadas na geometria cilíndrica e por esse motivo são apresentadas. O método desenvolvido em [3] para absorvedores planos apresenta várias hipóteses simplificadas que não permitiram a sua utilização diretamente neste trabalho. As relações que foram aqui desenvolvidas para o caso de absorvedores planos podem ser consideradas como um refinamento do trabalho de [3]. O objetivo deste trabalho entretanto refere-se aos absorvedores cilíndricos e a apresentação dos resultados está restrita a essa geometria.

Os resultados estão apresentados na forma da concentração do fluxo de radiação solar distribuída na circunferência do tubo absorvedor e do fator de interceptação para os casos estudados da distribuição de radiação. As simulações foram efetuadas para alguns valores discretos das variáveis envolvidas, embora o método possa ser aplicado para qualquer valor fisicamente realístico dessas variáveis. Assim, por exemplo, os valores mais utilizados do

ângulo de abertura do refletor foram 75° , 90° e 115° .

Considera-se que os raios solares incidam sobre o refletor numa direção normal à sua linha focal. Inicialmente são apresentados resultados para um coletor idealizado com superfície refletora perfeitamente parabólica e reflexão totalmente especular com o tubo absorvedor centrado exatamente na linha focal do refletor. Em seguida, são considerados distintamente alguns desvios dessa situação ideal. Esses desvios englobam os casos de um tubo absorvedor posicionado com centro fora da linha focal do refletor, um erro angular de apontamento do refletor ao centro do disco solar e dois modelos de superfície refletora não-ideal. O primeiro modelo considera um desvio macroscópico determinado da forma idealmente parabólica. O segundo modelo considera que o perfil do refletor ainda é suficientemente parabólico, mas as direções das normais à sua superfície em cada ponto estão normalmente desviadas da direção ideal com uma distribuição de média nula.

Neste estudo da distribuição de radiação não foi considerada a influência de um tubo de vidro que quase sempre envolve o tubo absorvedor nestes coletores. Este procedimento é análogo à consideração de um tubo de vidro idealizado com transmitância unitária para a radiação solar refletida ou mesmo à ausência desse tubo. Numa situação real um tubo de vidro possui uma absorptância menor do que a unidade e uma absorptância e refletância não-nulas na faixa de comprimentos de onda da radiação solar refletida. A consideração detalhada desses efeitos adicionais pode ser sensivelmente complicada mas não alteraria de sobremaneira os resultados obtidos neste trabalho. É conveniente lembrar ainda que o principal propósito da utilização de um tubo de vidro é reduzir as perdas térmicas do tubo absorvedor por convecção ao ambiente.

CAPÍTULO II

DETERMINAÇÃO ANALÍTICA DO FLUXO DE ENERGIA
INTERCEPTADO NO PLANO FOCAL - FORMULAÇÃO INTEGRAL

É desenvolvido um método integral para determinar a distribuição de radiação no plano focal de concentradores parabólicos.

São empregados dois sistemas de coordenadas, polar e cartesiano, com a origem na linha focal, indicados na Fig. II.1. Da geometria parabólica, é válida a relação:

$$r_f = \frac{2f}{1 + \cos\theta} \quad (\text{II.1})$$

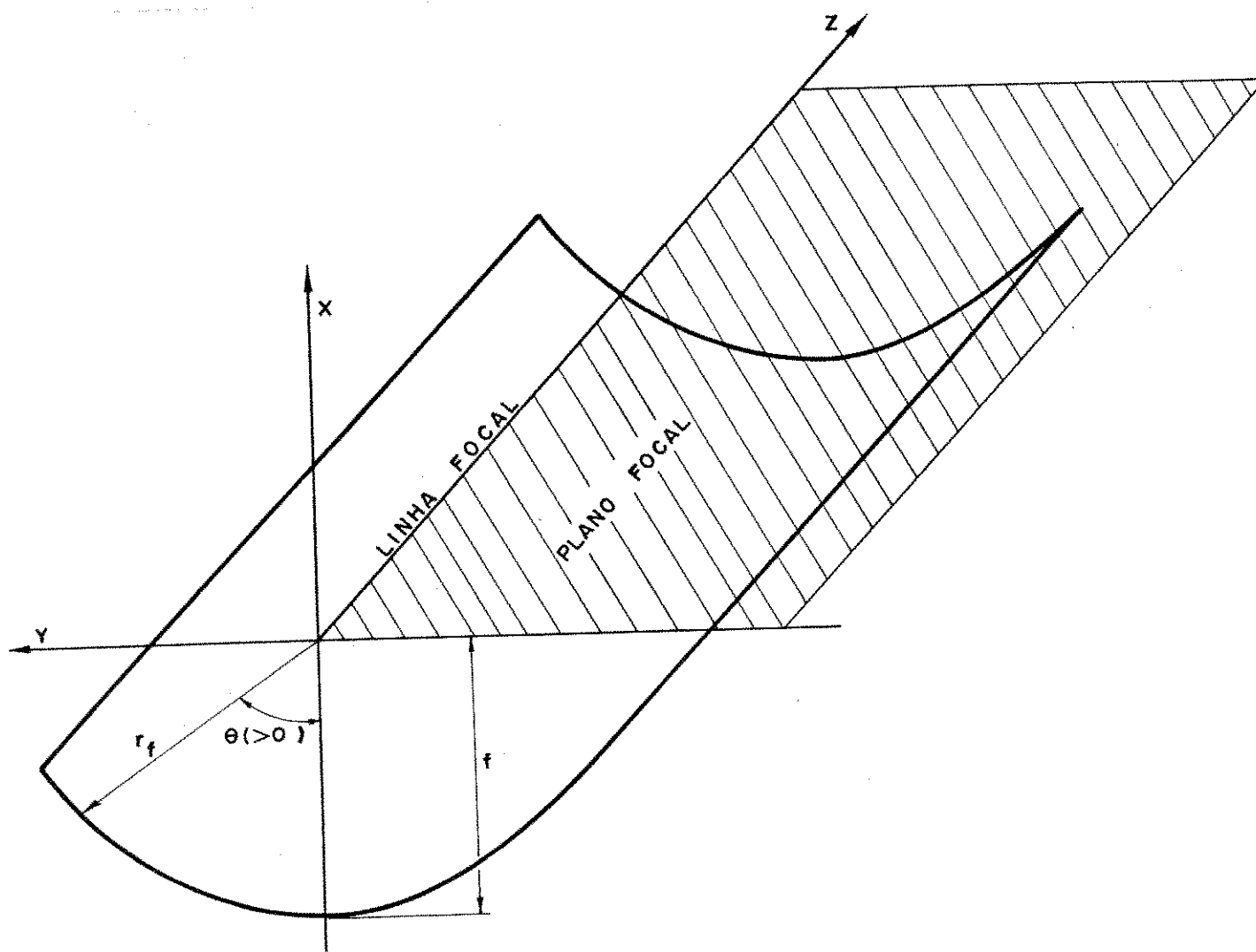


Fig. II.1 - Sistemas de coordenadas empregados no concentrador parabólico

O sol, como fonte de radiação, é suposto um disco de intensidade uniforme, cuja componente direta de radiação incide normalmente à área de abertura do refletor.

O arco ϕ_s , subtendido pelo pincel de raios solares, é de 16 minutos. Este pincel é interceptado numa posição angular θ do refletor e refletido em direção ao foco, como indicado na Fig. II.2.

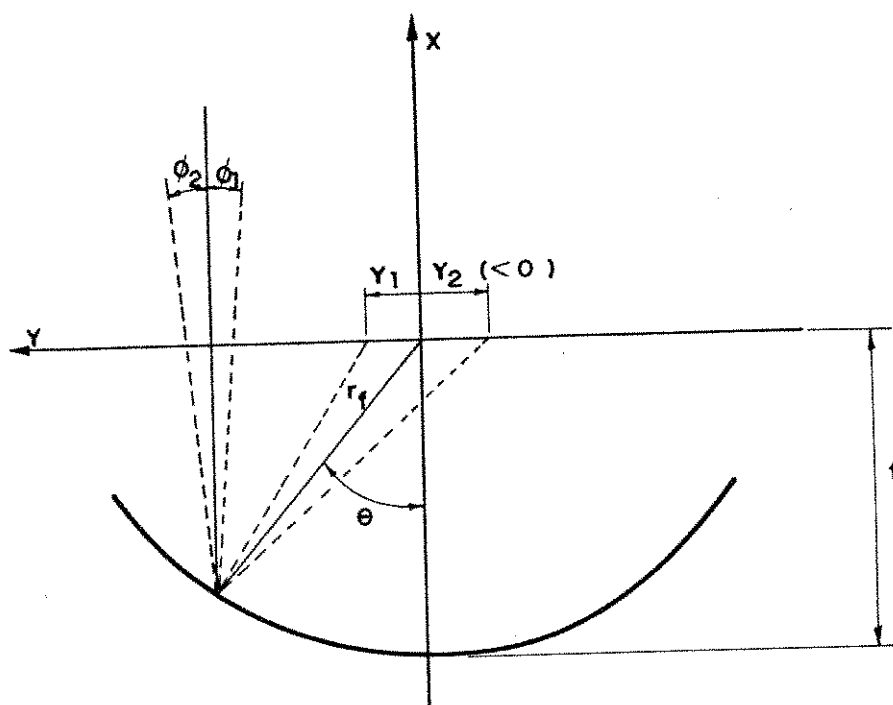


Fig. II.2 - Trajetória de um pincel de raios solares, de arco ϕ_s , no refletor parabólico

O plano absorvedor, coincidente com o plano focal, intercepta o cone de raios refletidos. A imagem formada por esta intersecção é uma elipse, no plano (y,z) , possuindo um semi-eixo maior $(y_1 - y_2)/2$ e um semi-eixo menor $r_f^* \cdot \text{tg} \phi_s$, onde r_f^* é indicado na Fig. II.3.

Esta elipse pode ser descrita por:

$$\frac{z^2}{(r_f^* \text{tg} \phi_s)^2} + \frac{\left[y - \left(\frac{y_1 + y_2}{2} \right) \right]^2}{\left(\frac{y_1 - y_2}{2} \right)^2} = 1 \quad (\text{II.2})$$

Uma dada posição y_0 no plano absorvedor só pode receber a radiação

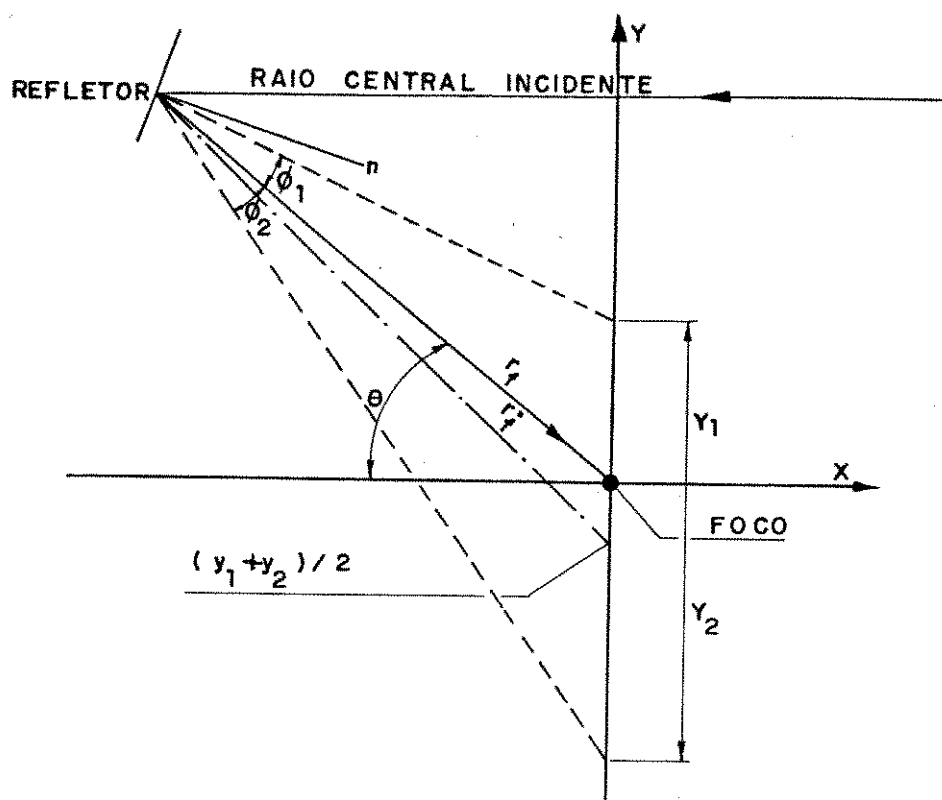


Fig. II.3 - O semi-eixo maior da elipse $(y_1 - y_2)/2$

de um ponto qualquer do refletor, definido pelo ângulo θ , se este ponto ficar no interior da elipse, como mostra a Fig. II.4, ou seja, é necessário que:

$$y_2(\theta) \leq y_0 \leq y_1(\theta)$$

O fluxo de energia em um ponto do plano absorvedor é obtido da superposição da energia solar refletida por todos os pontos da superfície parabólica.

Partindo-se do fluxo de energia que um elemento infinitesimal do plano absorvedor (dA_2), pode receber de uma porção infinitesimal (dA_1) do refletor, conforme indica a Fig. Fig. II.5, chega-se à relação integral desejada.

Refletido do elemento de área dA_1 (Fig. II.5), o fluxo de radiação térmica em dA_2 pode ser expresso por:

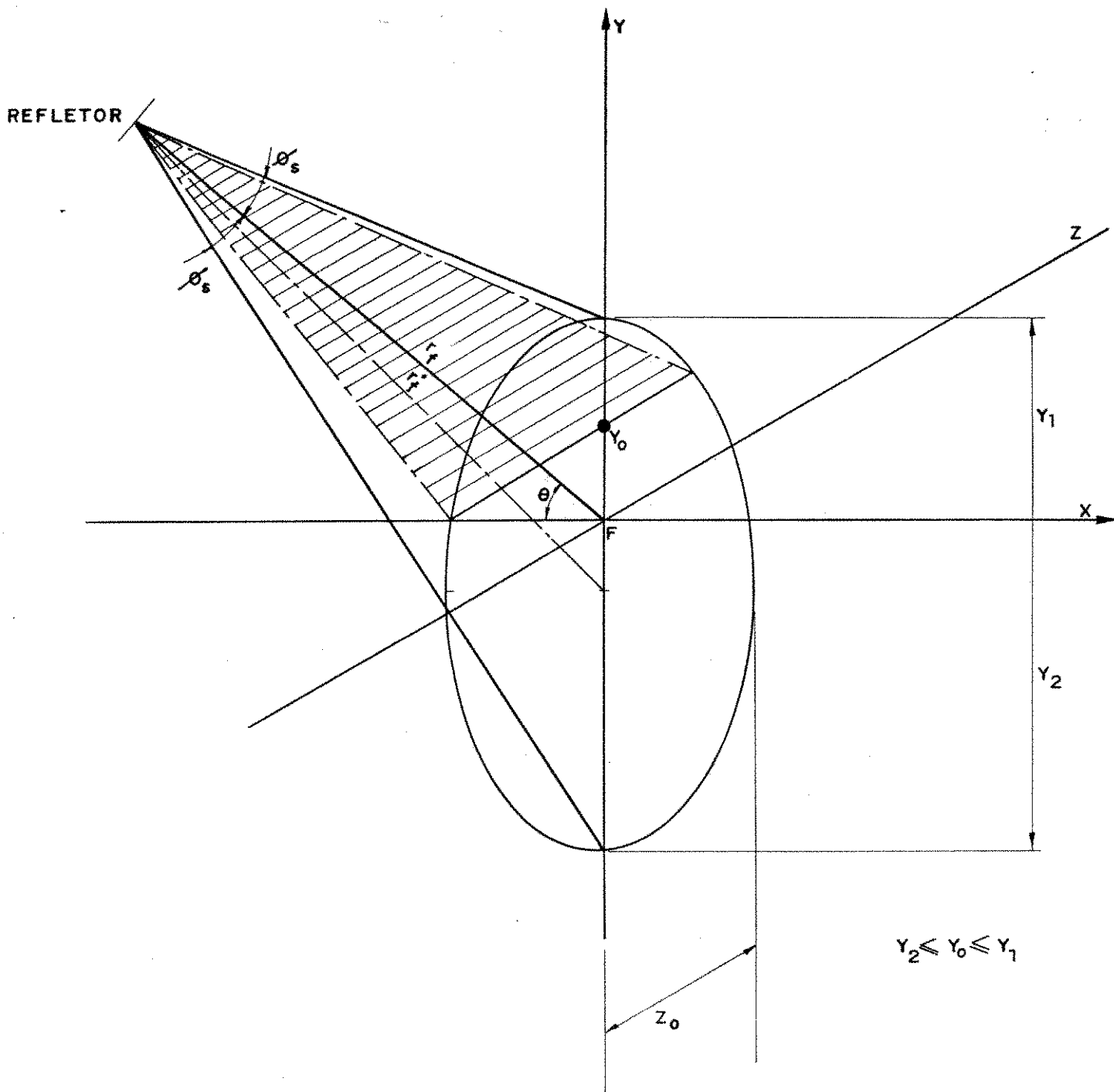


Fig. II.4 - Elipse de projeção no plano focal

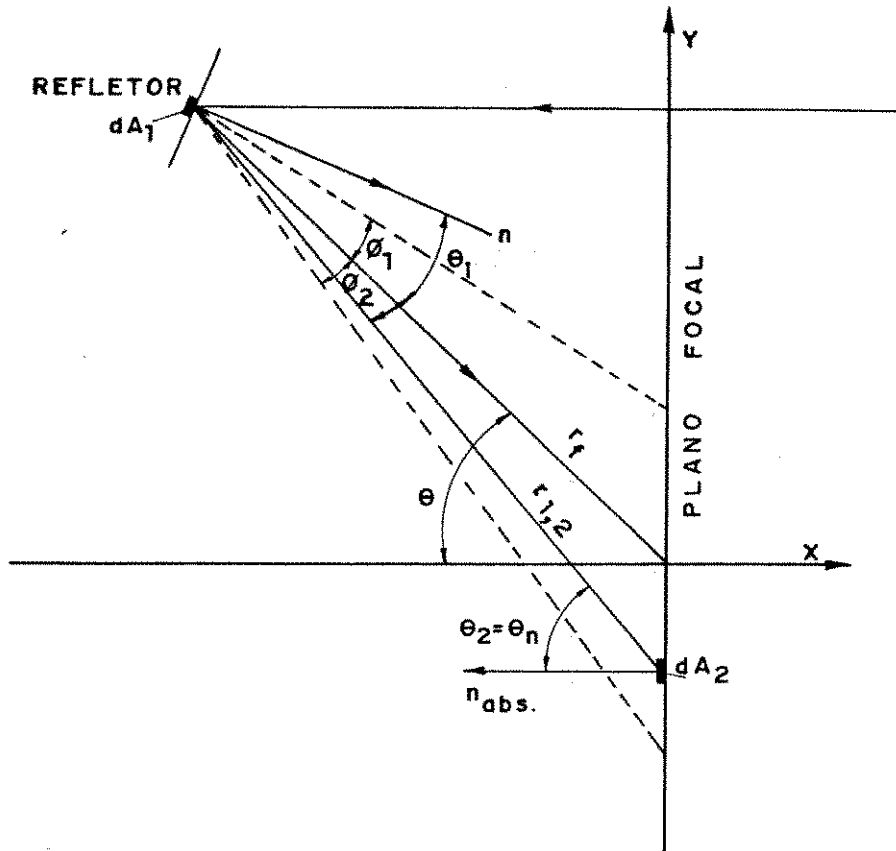


Fig. II.5 - Notação para cálculo do fluxo de energia $\Phi_{1,2}$

$$d\left(\frac{q_{1,2}}{A_2}\right) =$$

$$d\Phi_{1,2}(y_0) = \frac{dq_{1,2}}{dA_2} = \rho \alpha i_s \frac{\cos \theta_1 \cos \theta_2}{r_{1,2}^2} dA_1 \quad (\text{II.3})$$

O ângulo θ_2 entre a normal de dA_2 e o segmento $r_{1,2}$ será indicado por θ_n . Da geometria parabólica, é válida a relação:

$$dA_1 = \frac{r_f d\theta dz}{\cos(\theta/2)} \quad (\text{II.4})$$

Substituindo-se a expressão (II.4) na (II.3):

$$d\Phi_{1,2}(y_0) = \rho \alpha i_s \frac{\cos \theta_1 \cos \theta_n}{\cos \theta/2} \cdot \frac{r_f}{r_{1,2}^2} \cdot d\theta dz \quad (\text{II.5})$$

Considerando-se toda a área do refletor, obtém-se o fluxo de energia com um dado ponto y_0 no plano focal:

$$\Phi(y_0) = \int_{-\theta_r}^{+\theta_r} \rho \alpha \left(\frac{\cos \theta_1 \cos \theta_n}{\cos \theta/2} \right) \cdot \frac{r_f}{r_{12}^2} \cdot \left[2 \cdot \int_0^{Z_0} i_s dz \right] d\theta \quad (II.7)$$

O ângulo θ_r exprime o ângulo de abertura do refletor e Z_0 , a metade da largura da elipse projetada no plano focal, conforme mostra a Fig. II.4.

Por hipótese, considera-se que a intensidade de radiação solar i_s é uniforme, assim como a refletividade ρ e a absortividade de α .

A variável z pode então ser expressa em função da variável θ , a partir da equação (II.2):

$$\frac{z^2}{(r_f^* \tan \phi_s)^2} = \left[1 - \frac{\left[y_0 - \left(\frac{y_1 + y_2}{2} \right) \right]^2}{\left[\frac{y_1 - y_2}{2} \right]^2} \right] \quad (II.8)$$

Denominando-se $\underline{Y}$ o termo à direita, a integral de z torna-se:

$$\int_0^{Z_0} dz = r_f^* \tan \phi_s \underline{Y}^{1/2} \quad (II.9)$$

Substituindo-se a relação (II.9) na expressão (II.7), chega-se assim à relação integral:

$$\Phi(y_0) = 2(\rho\alpha)i_s \tan \phi_s \int_{-\theta_r}^{+\theta_r} \left(\frac{\cos \theta_1 \cos \theta_n}{\cos \theta/2} \right) \cdot \left(\frac{r_f^* r_f}{r_{12}^2} \right) \cdot F(\theta, y_0) d\theta \quad (II.10)$$

onde:

$$F(\theta, y_0) = \begin{cases} \underline{Y}^{1/2} & \text{para } \underline{Y} \geq 0 \\ 0 & \text{para } \underline{Y} < 0 \text{ (pontos fora da elipse)} \end{cases} \quad (II.11)$$

Esta relação fornece o fluxo de energia para qualquer ponto no plano absorvedor do refletor. Devido à simetria cilíndrica

ca, o fluxo de energia varia somente ao longo do eixo y, sendo o mesmo para qualquer posição ao longo da linha focal.

II.1. CONCENTRAÇÃO LOCAL

A superfície refletora parabólica permite que a energia solar incidente na área de abertura do coletor seja concentrada na área relativamente pequena da superfície absorvedora.

A razão entre o fluxo de energia num ponto y_0 do absorvedor e o fluxo de energia solar incidente na área de abertura do refletor é definida como sendo a concentração local.

$$C(y_0) = \frac{\Phi(y_0)}{\Phi_{ab}} \quad (II.12)$$

O fluxo na área de abertura, Φ_{ab} , pode ser expresso (para o modelo de sol empregado) como (Apêndice I):

$$\Phi_{ab} = i_s \frac{\pi}{2} (1 - \cos 2\phi_s) \quad (II.13)$$

Desta forma, utilizando-se as relações (II.13) e (II.10), a concentração num ponto do absorvedor pode ser expressa por:

$$C(y_0) = \frac{2 \rho \alpha i_s \tan \phi_s \int_{-\theta_r}^{+\theta_r} \frac{\cos \theta_1 \cos \theta_n}{\cos \theta/2} \cdot \left(\frac{r_f^* r_f}{r_{12}^2} \right) \cdot F(\theta, y_0) d\theta}{i_s \frac{\pi}{2} (1 - \cos 2\phi_s)} \quad (II.14)$$

II.2. FATOR DE INTERCEPTAÇÃO

Para ser feita uma análise da distribuição da radiação em absorvedores planos é necessário também que se alie à de terminação do perfil de concentração do absorvedor um parâmetro que dê a indicação da porcentagem de radiação interceptada pelo

absorvedor em relação a radiação incidente no refletor.

Este novo parâmetro é chamado de fração de interceptação F_i , sendo que:

$$F_i = \frac{[\text{Energia Total Interceptada no Absorvedor}]}{[\text{Energia Total Incidente no Refletor}]}$$

A energia total incidente no refletor é obtida através do produto entre o fluxo de energia na área de abertura do refletor, equação (II.13), e a área de abertura.

A área de abertura por unidade de comprimento do refletor é determinada com auxílio da Fig. II.6:

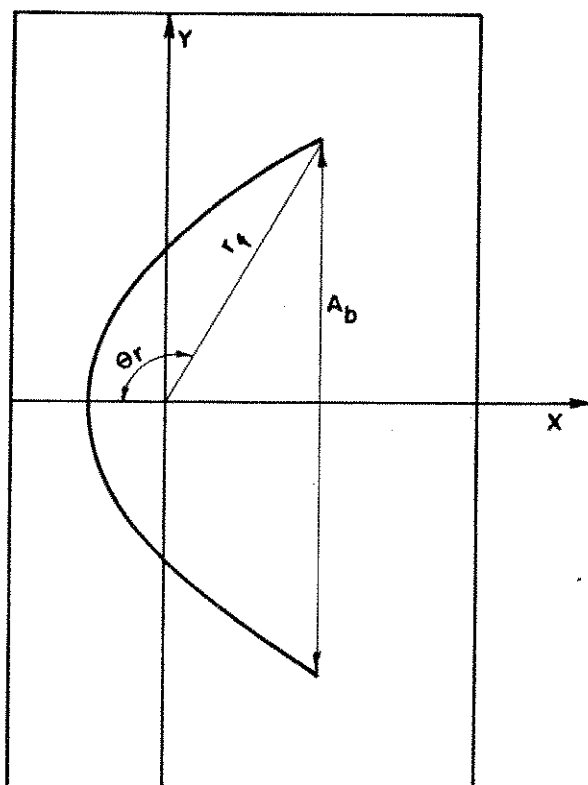


Fig. II.6 - Área de Abertura (A_b) do concentrador parabólico

$$A_b = \frac{4f \sin \theta_r}{(1 + \cos \theta_r)} \quad (\text{II.15})$$

A energia total interceptada é obtida integrando-se em

toda área do absorvedor o fluxo de energia incidente e assim o fa tor de interceptação fica sendo:

$$F_i = \frac{\int_{-y_0}^{+y_0} \phi_{ab} C(y) dy}{i_s \left(\frac{2f \sin \theta_r}{1 + \cos \theta_r} \right) \cdot \pi (1 - \cos 2\phi_s)} \quad (II.16)$$

CAPÍTULO III

ANÁLISE DA DISTRIBUIÇÃO DE RADIAÇÃO NUM
ABORVEDOR PLANO PARALELO AO PLANO FOCAL

A determinação da concentração em cada ponto do plano absorvedor depende das relações estabelecidas no capítulo anterior. Para avaliar a concentração num dado ponto é feita a integração numérica da equação (II.14), utilizando-se o método de Simpson.

Três casos distintos serão abordados neste capítulo:

- a) Caso Ideal, refere-se a um plano absorvedor coincidente com o plano focal do refletor e com a radiação solar incidente normal à área de abertura.
- b) Caso com Deslocamento do Plano Focal, refere-se a um plano absorvedor deslocado paralelamente ao plano focal e com a radiação solar também incidindo normalmente.
- c) Caso com Deslocamento e Erro de Apontamento, refere-se a um plano absorvedor deslocado paralelamente ao plano focal, com a radiação solar incidindo obliquamente à área de abertura do refletor.

III.1. CONVENÇÃO DE SINAIS

Antes de abordar cada um dos três casos, apresenta-se a seguir a convenção de sinais utilizada.

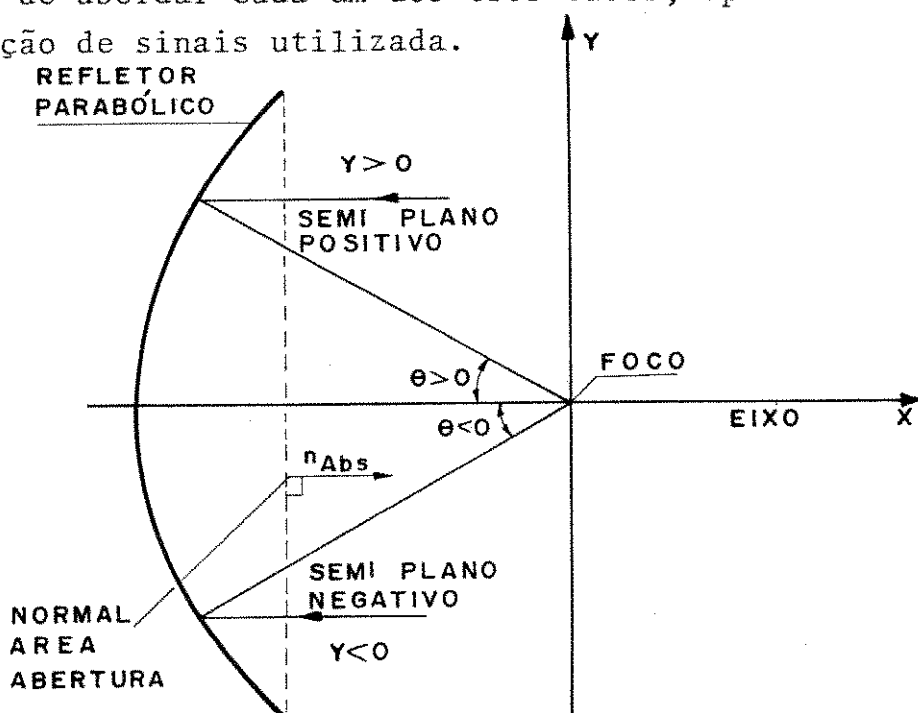


Fig. III.1 - Definição dos semi-planos positivos e negativos, da posição angular θ , e da normal à área de abertura

- Posição angular de um ponto do refletor $\tilde{e}$ indicado pela variável θ , sendo positiva no semi-plano positivo, e negativa em caso contrário, como mostrado na Fig. III.1.
- Posicionamento dos raios da borda do disco solar - os raios da borda do disco solar são definidos pelos ângulos ϕ_1 e ϕ_2 que se referem, respectivamente, aos raios interno e externo, indicados na Fig. III.2, sendo que para a configuração apresentada

$$\phi_1 = \phi_2 = \phi_s = 16'$$

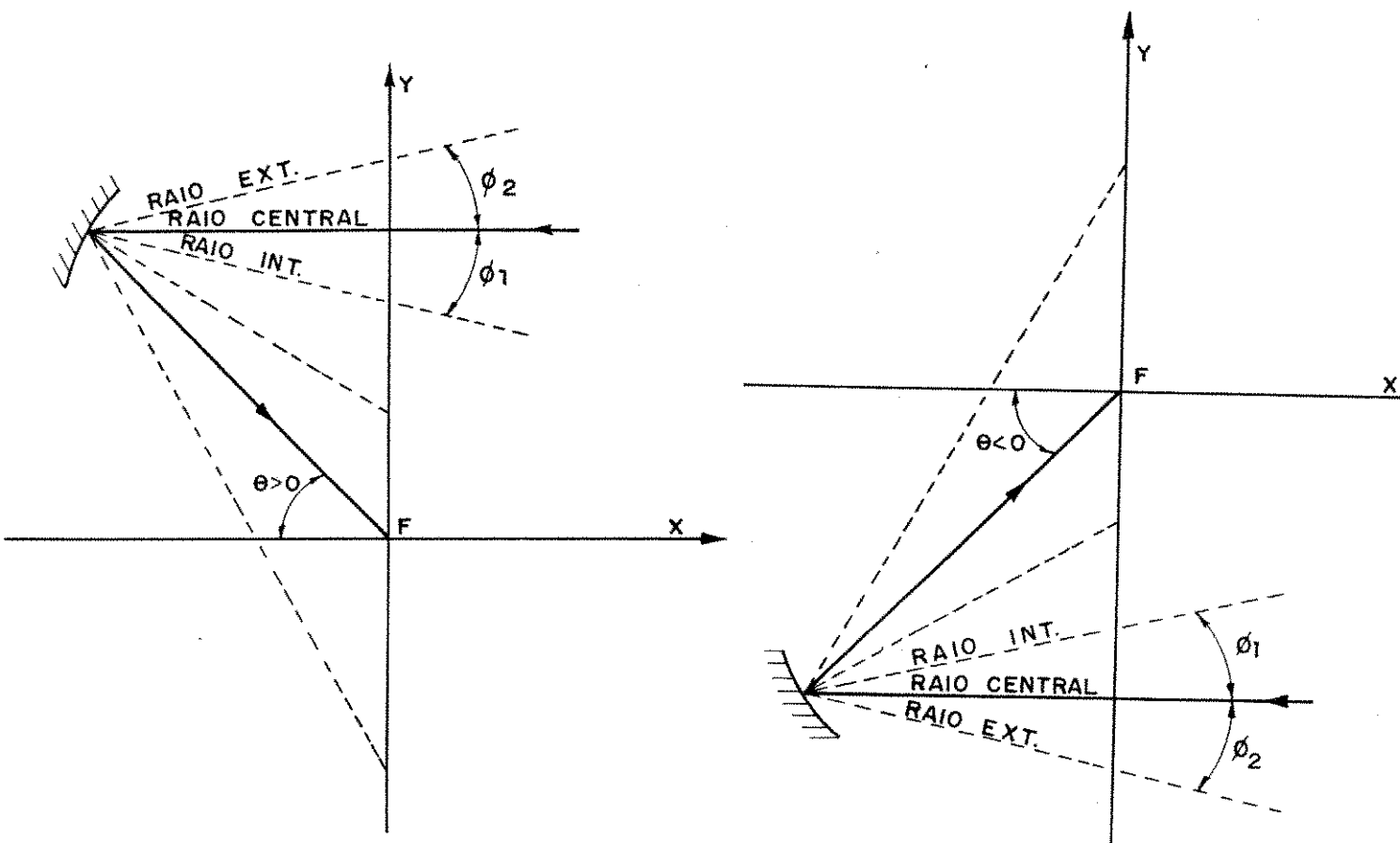


Fig. III.2 - Ilustração dos raios interno, central e externo do disco solar para os semi-planos positivo e negativo

- Deslocamento do Plano Absorvedor $\tilde{e}$ definido pela variável d , indicada na Fig. III.3, sendo positivo quando o plano absorvedor for afastado do refletor e negativo caso contrário.

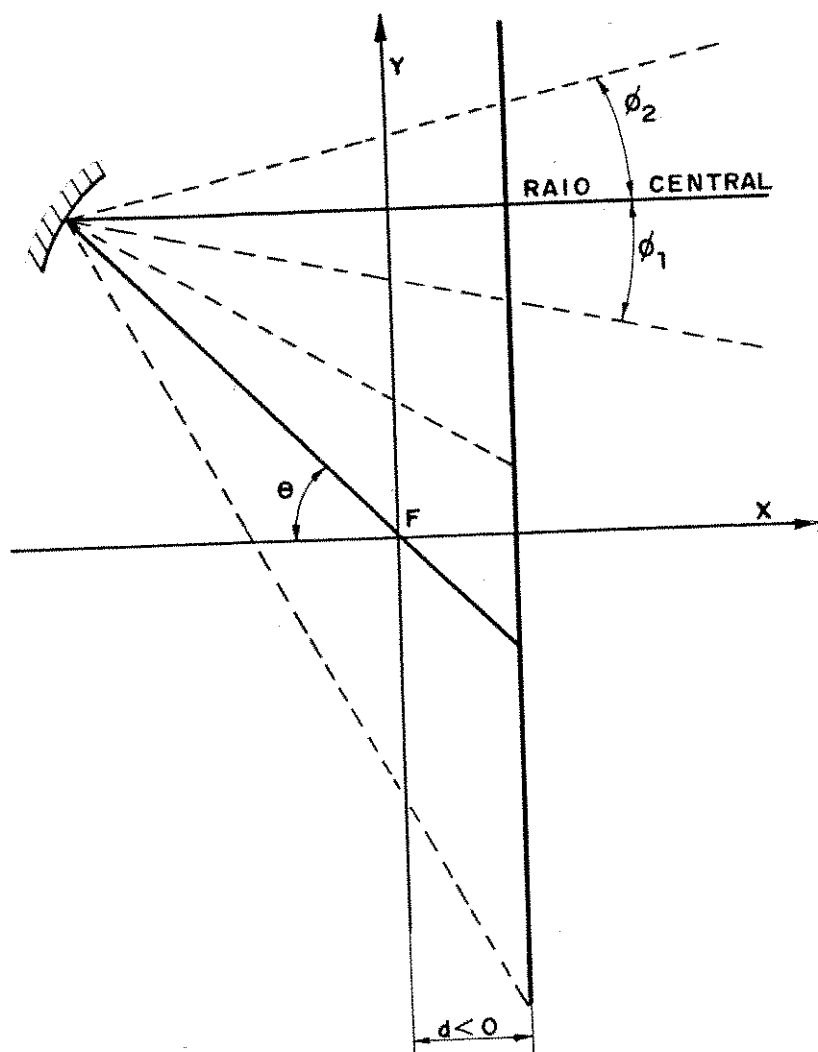


Fig. III.3 - Interceptação do pincel de raios refletidos por um absorvedor plano deslocado do plano focal

- Desvio Angular do Feixe de Raios Incidentes com a normal da área de abertura do refletor é definido pela variável δ , indicada na Fig. III.4, sendo positiva quando o raio central refletido intercepta o semi-plano focal positivo ($y > 0$) e negativa em caso contrário. Neste caso, os raios interno e externo das bordas do disco solar tornam-se:

$$\phi_1 = (\delta + \phi_s) \quad \text{e} \quad \phi_2 = (\delta - \phi_s) \quad , \quad \text{quando } \theta > 0$$

e

$$\phi_1 = (\delta - \phi_s) \quad \text{e} \quad \phi_2 = (\delta + \phi_s) \quad , \quad \text{quando } \theta < 0$$

onde ϕ_s é o semi-ângulo do disco solar ($\phi_s = 16'$).

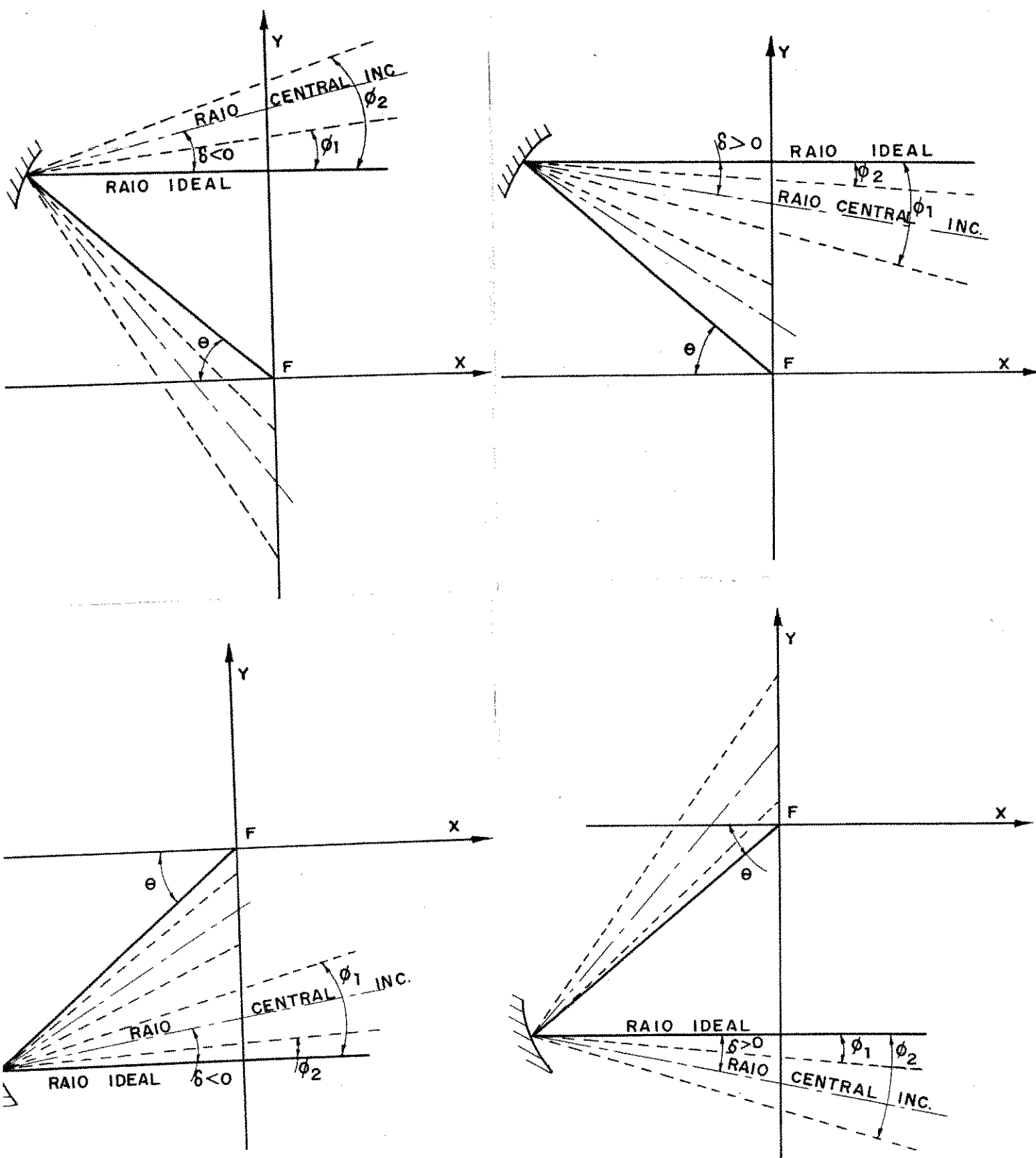


Fig. III.4 - Desvio Angular do Feixe de Raios Incidentes

III.2. CASO IDEAL

Serão desenvolvidas agora as relações particulares ao caso ideal definido previamente.

III.2.1. Funções $r_{1,2}$ e $\cos \theta_n$ e θ_1

Através da Fig. III.5 obtêm-se diretamente as relações:

$$r_{1,2}^2 = r_f^2 + y_0^2 - 2 r_f y_0 \sin \theta \quad (\text{III.1})$$

$$\cos \theta_n = \cos \theta \left(\frac{r_f}{r_{1,2}} \right) \quad (\text{III.2})$$

$$\theta_1 = \theta_n - \theta/2 \quad (\text{III.3})$$

As relações (III.1), (III.2) e (III.3) são válidas apenas para $0^\circ \leq \theta < 90^\circ$.

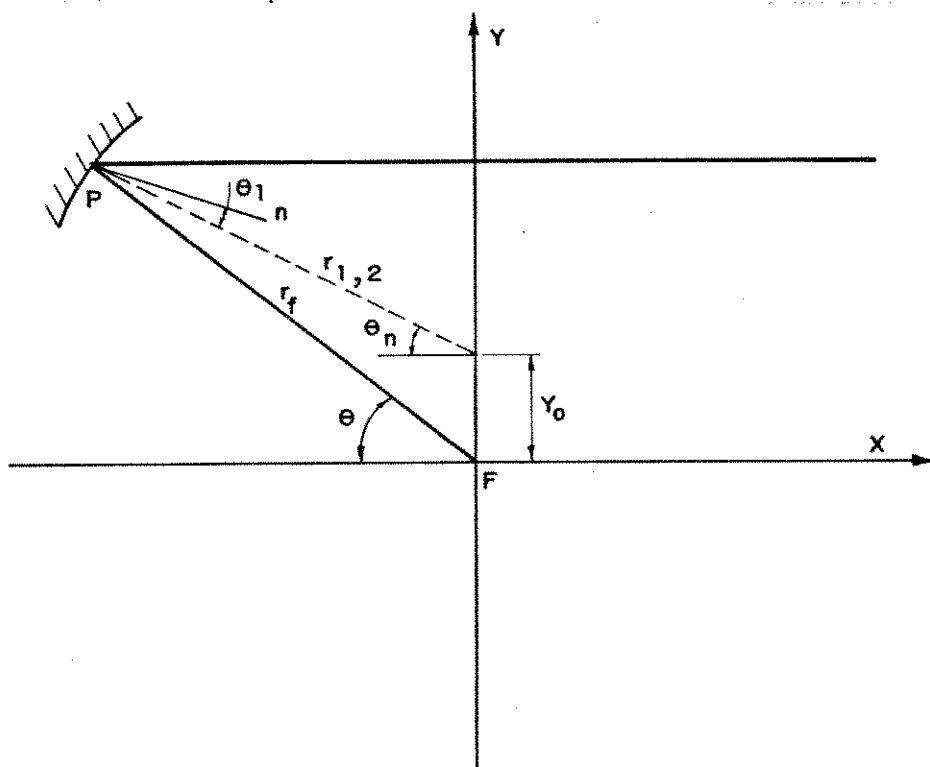


Fig. III.5 - Relações $r_{1,2}$, θ_n e θ_1 para o refletor parabólico

III.2.2. Projeções y_1 e y_2

Estes segmentos determinam o semi-eixo maior da imagem elíptica do sol no plano do absorvedor. É através deles que se define a função $F(\theta, y_0)$ (eq. (II.11)). Através da Fig. III.6 obtém-se:

$$y_1 = + \frac{r_f \operatorname{tg} \phi_1 \sec \theta}{1 + \operatorname{tg} \phi_1 \operatorname{tg} |\theta|} \quad (\text{III.4})$$

$$y_2 = - \frac{r_f \operatorname{tg} \phi_2 \sec \theta}{1 - \operatorname{tg} \phi_2 \operatorname{tg} |\theta|} \quad (\text{III.5})$$

As relações (III.4) e (III.5) são válidas para $0^\circ \leq \theta < 90^\circ$.

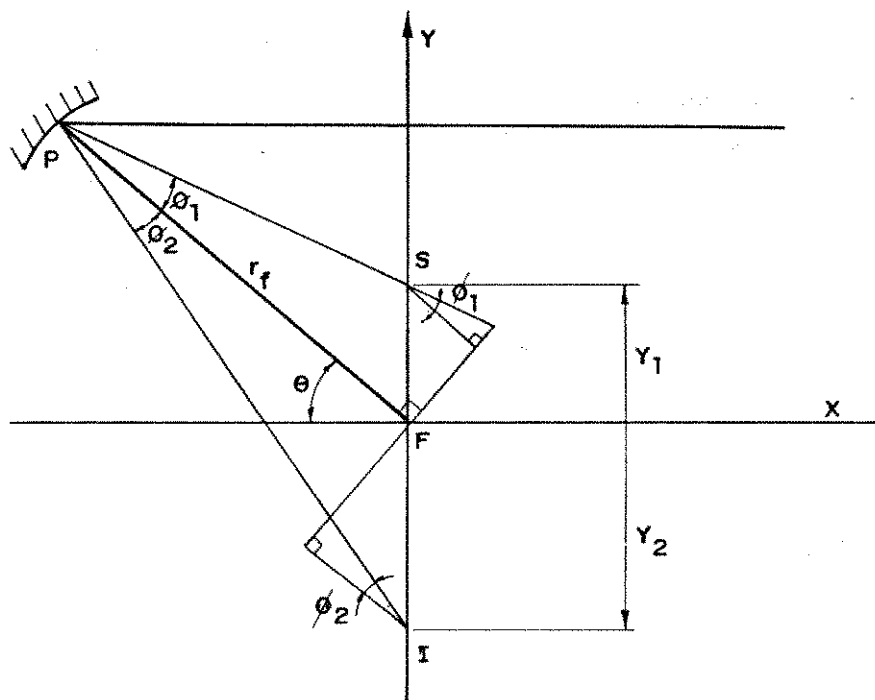


Fig. III.6 - Projeções y_1 e y_2 para o semi-plano positivo

III.2.3. Relação para o Semi-Eixo Menor

Com vértice no ponto P do refletor, o cone de luz refletido é interceptado pelo plano absorvedor, definindo uma elipse

cujo semi-eixo menor é igual a $(r_f^* \tan \phi_s)$, como utilizado na eq. (II.2)

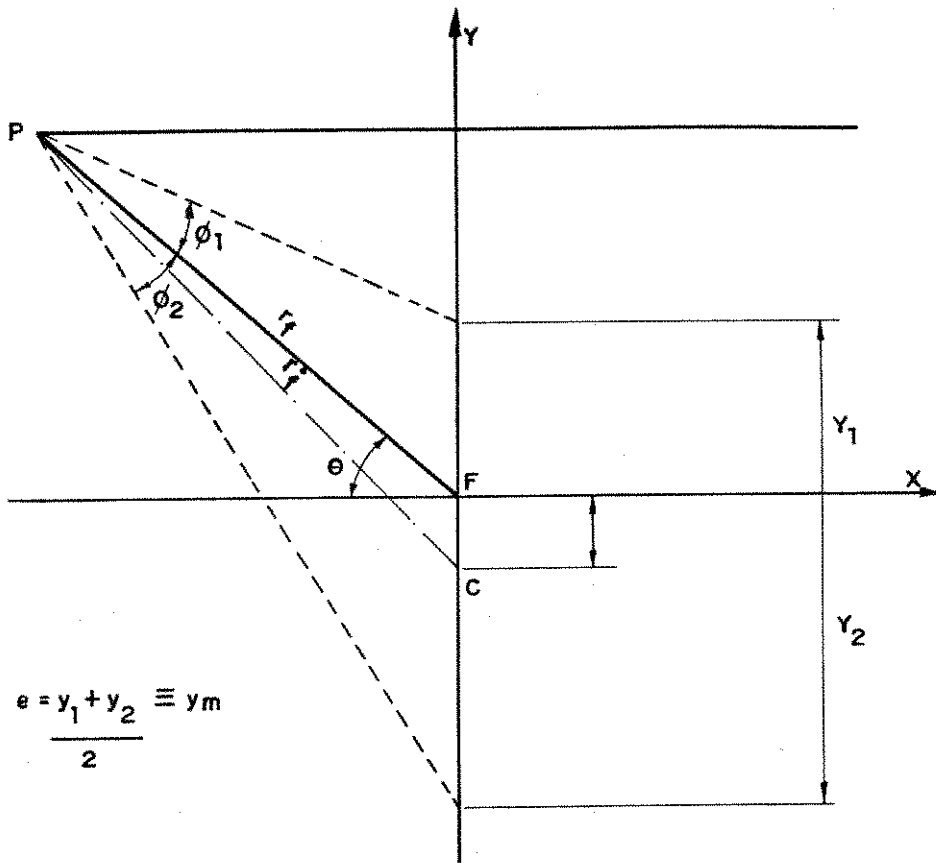


Fig. III.7 - Excentricidade e da elipse interceptada pelo plano absorvedor

Esta elipse possui seu centro C deslocado (e) em relação à origem F do sistema de coordenadas, como mostra a Fig. III. 7, dada por:

$$e = \frac{y_1 + y_2}{2} \quad (\text{III.6})$$

Esta distância indica o ponto médio do semi-eixo maior, denominado y_m .

$$y_m = \frac{y_1 + y_1}{2} = e \quad (\text{III.7})$$

O ponto C pertence também ao círculo de centro R como indicado nas

Figs. III.8 a e b. O segmento CT, Fig. III.8b corresponde ao semi-eixo menor da elipse, sendo comum aos planos da elipse e do círculo.

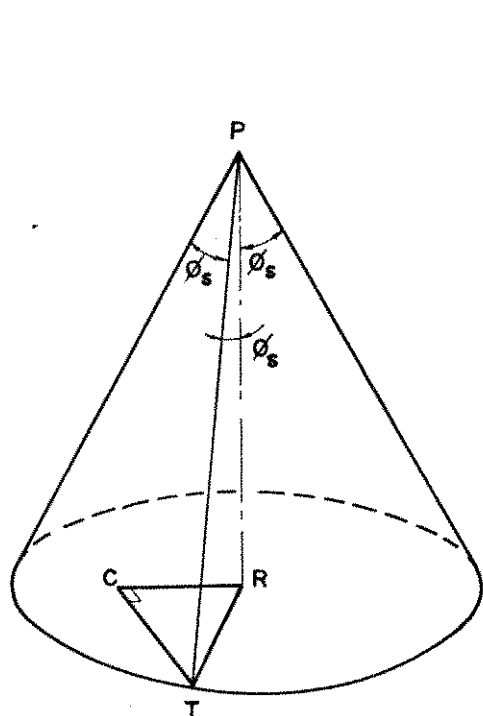


FIG. (A)

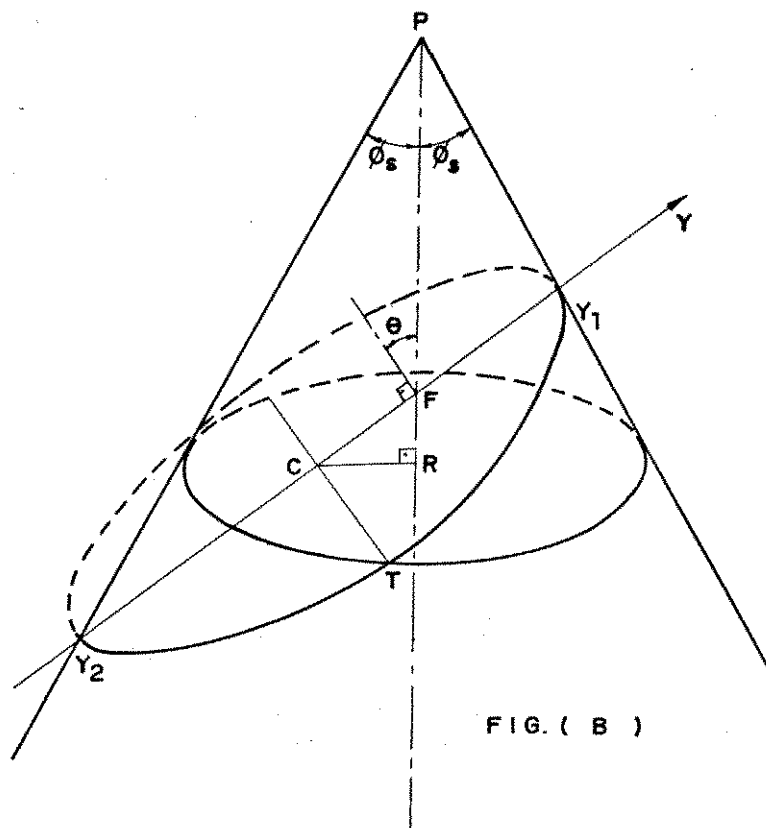


FIG. (B)

Fig. III.8a e III.8b - Intercepção do cone de raios de luz no plano absorvedor definindo uma imagem elíptica do sol

Da Fig. III.8a tem-se que o semi-eixo menor da elipse pode ser expresso por:

$$\overline{CT} = \sqrt{\overline{RT}^2 - \overline{CR}^2} \quad (\text{III.8})$$

Da mesma figura tem-se também que

$$\overline{CR} = \overline{FC} \cos \theta$$

e como

$$\overline{FC} = |y_m| = \left| \frac{y_1 + y_2}{2} \right|,$$

da Fig. III.7, então:

$$\overline{CR} = |y_m| \cos \theta \quad (\text{III.9})$$

Pelas Figs. III.8, tem-se ainda que:

$$\overline{RT} = \overline{PR} \tan \phi_s$$

mas $\overline{PR} = \overline{PF} + \overline{FR}$

sendo que

$$\overline{FR} = \overline{FC} \sin \theta$$

e

$$\overline{PF} = r_f = \frac{2f}{1 + \cos \theta}$$

Dessa forma.

$$\overline{RT} = (r_f + |y_m| \sin \theta) \tan \phi_s \quad (\text{III.10})$$

Substituindo as eqs. (III.9) e (III.10) em (III.8), tem-se:

$$\overline{CT}^2 = (r_f + |y_m| \sin \theta)^2 \tan^2 \phi_s - |y_m|^2 \cos^2 \theta$$

Esta relação obtida é válida apenas para $0^\circ \leq \theta < 90^\circ$. Em termos de r_f , θ e ϕ_s a expressão acima pode ser obtida substituindo-se (II.1), (III.4), (III.5) e (III.7) em (III.11); assim obtêm-se:

$$r_f^* \tan \phi_s = (r_f \tan \phi_s) \left\{ 1 + \tan^2 \phi_s \left[2 \sin \theta \left| \frac{\sec \theta \tan \theta}{1 - \tan^2 \phi_s \tan^2 \theta} \right| + \left(\frac{\sec \theta \tan \theta}{1 - \tan^2 \phi_s \tan^2 \theta} \right)^2 (\sin^2 \theta \tan^2 \phi_s - \cos^2 \theta) \right] \right\}^{1/2}$$

III.3. CASO COM DESLOCAMENTO DO PLANO FOCAL

Serão obtidas agora as funções que vão definir a distribuição de radiação num plano absorvedor deslocado paralelamente ao plano focal. A apresentação das funções segue a mesma ordem do caso anterior.

III.1. Funções $r_{1,2}$, $\cos\theta_n$ e θ_1

O deslocamento (d) do plano absorvedor modifica as relações anteriores que expressam $r_{1,2}$ e $\cos\theta_n$. Através da Fig.(III.9) obtêm-se as novas relações:

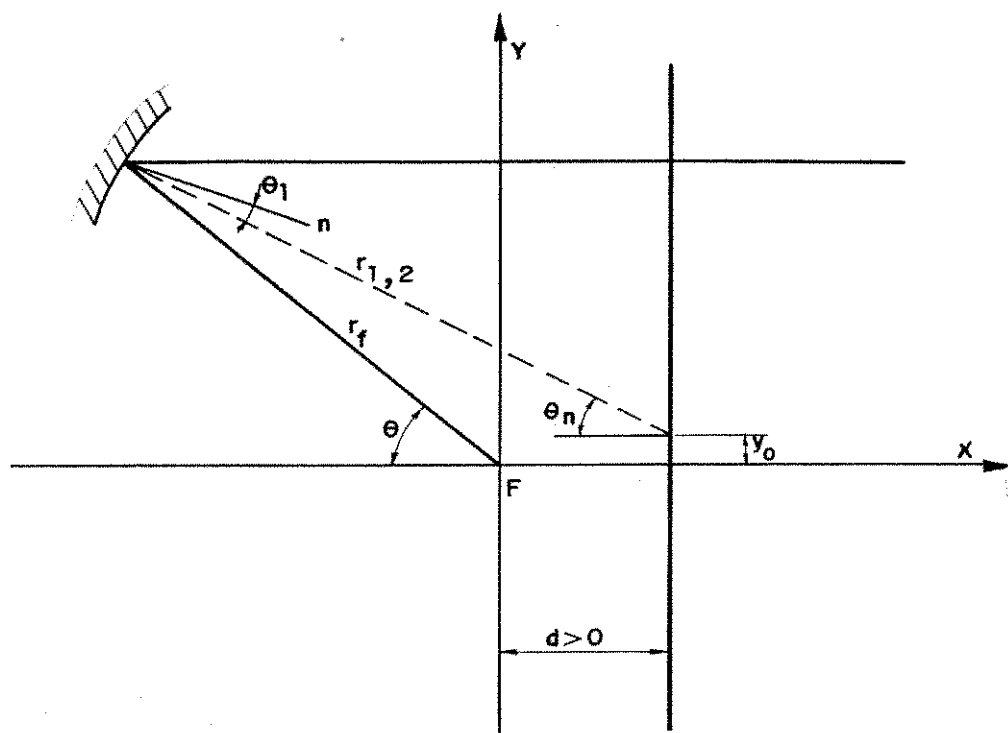


Fig. III.9 - Funções $r_{1,2}$, θ_n e θ_1 para o absorvedor deslocado do plano focal

$$r_{1,2} = [r_f^2 + (y_0 + d \tan \theta_n)^2 - 2r_f(y_0 + d \tan \theta_n) \sin \theta]^{1/2} + \frac{d}{\cos \theta_n} \quad (\text{III.11})$$

$$\cos \theta_n = \frac{r_f \cos \theta}{r_{1,2} - d / \cos \theta_n} \quad (\text{III.12})$$

As relações (III.11) e (III.12) são válidas apenas para $0^\circ \leq \theta < 90^\circ$. O ângulo θ_1 continua sendo expresso por (III.3).

III.2. Projeções y_1 e y_2

As projeções y_1 e y_2 para um plano absorvedor deslocado do plano focal são extraídos da Fig. III.10:

$$y_1 = + \frac{r_f \tan \phi_1 \sec \theta}{1 + \tan \phi_1 \tan \theta} - d \tan(|\theta - \phi_1|) \quad (\text{III.13})$$

$$y_2 = - \frac{r_f \tan \phi_2 \sec \theta}{1 - \tan \phi_2 \tan \theta} - d \tan(|\theta + \phi_2|) \quad (\text{III.14})$$

As relações (III.13) e (III.14) são válidas para $0 \leq \theta < 90^\circ$. O no vo valor do semi-eixo maior é também dado por

$$y_m = \frac{y_1 + y_2}{2}$$

utilizando-se agora as equações (III.13) e (III.14).

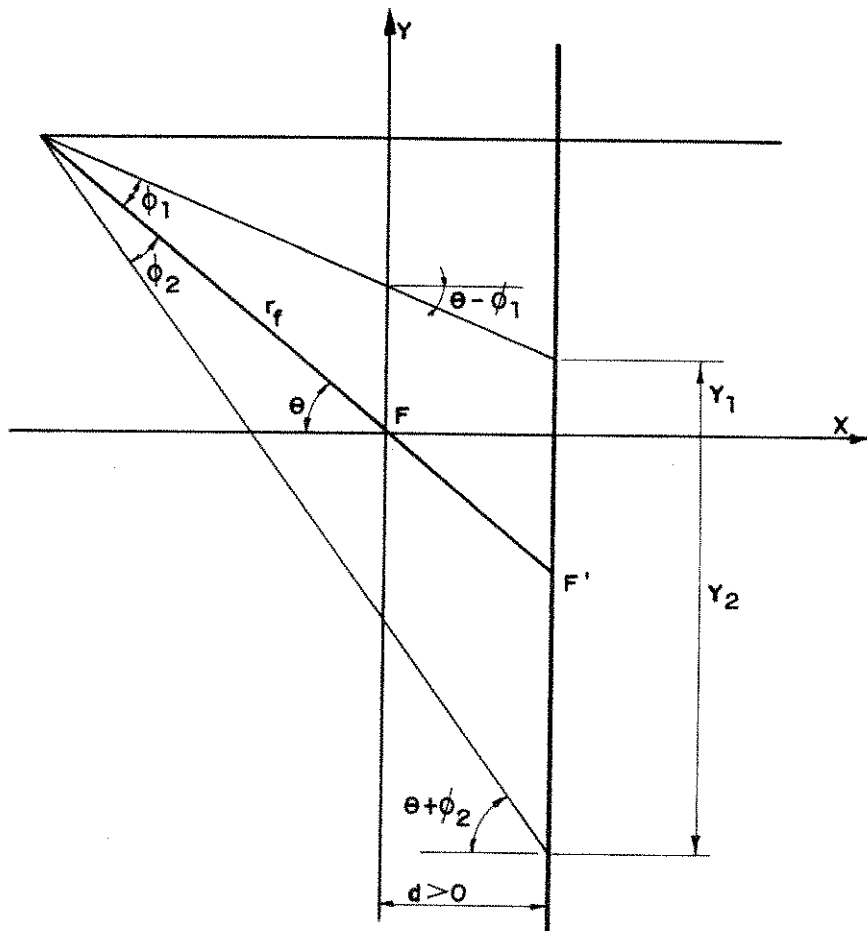


Fig. III.10 - Projeções y_1 e y_2 para o semi-plano positivo num absorvedor deslocado

III.3. Relação para o Semi-Eixo Menor

A relação funcional para o semi-eixo menor da elipse, $(r_f^* \tan \phi_s)$, é obtida das relações geométricas indicadas na Fig. III.11. O semi-eixo menor é definido como na equação (III.8), porém as relações para $\overline{RT}$ e $\overline{CR}$ são modificadas.

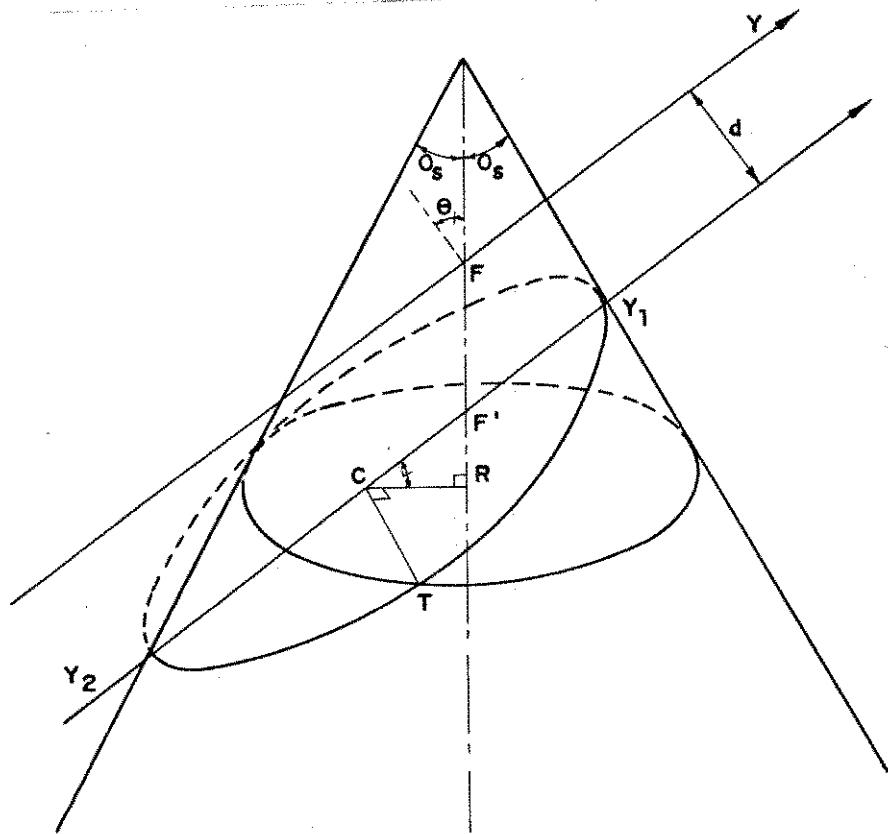


Fig. III.11 - Construção do cone de raios e da elipse formada pela interceptação no plano absorvedor

Com base nas Figs. (III.10) e (III.11), as seguintes relações são obtidas:

$$\overline{CR} = \overline{F'C} \cdot \cos \theta$$

$$\overline{F'C} = \left| |y_m| - |d| \tan \theta \right|$$

e dessa forma,

$$\overline{CR} = \left| |y_m| - |d| \tan \theta \right| \cos \theta \quad (\text{III.15})$$

Considerando ainda

$$\overline{RT} = \overline{PR} \tan \phi_s$$

e como $\overline{PR} = \overline{PF} + \overline{FF'} + \overline{F'R}$

a decomposição pode ser expressa por

$$\overline{PF} = r_f$$

$$\overline{FF'} = d/\cos\theta$$

$$\overline{F'R} = \overline{F'C} \sin\theta$$

de modo que

$$\overline{RT} = \left[r_f + \frac{d}{\cos\theta} + \left| |y_m| - |d| \tan\theta \right| \sin\theta \right] \tan\phi_s \quad (\text{III.16})$$

Substituindo-se as expressões (III.15) e (III.16) na equação (III.8), encontra-se a relação para o semi-eixo da elipse no caso do plano absorvedor deslocado do plano focal:

$$\begin{aligned} \overline{CT} = & \left[\left(r_f + \frac{d}{\cos\theta} + \left| |y_m| - |d| \tan\theta \right| \sin\theta \right)^2 \tan^2 \phi_s \right. \\ & \left. - \left(\left| |y_m| - |d| \tan\theta \right| \right)^2 \cos^2 \theta \right]^{1/2} \end{aligned} \quad (\text{III.17})$$

a relação (III.17) é válida apenas para $0 \leq \theta < 90^\circ$.

III.4. CASO COM DESLOCAMENTO DO PLANO FOCAL E COM ERRO DE APONTAMENTO

Neste item é considerada a distribuição de radiação num plano absorvedor deslocado paralelamente ao plano focal, com a radiação incidente atingindo obliquamente a área de abertura do refletor.

Este caso, por tratar das relações com deslocamento do plano focal e com erro de apontamento, possui uma formulação que satisfaz os dois primeiros casos apresentados.

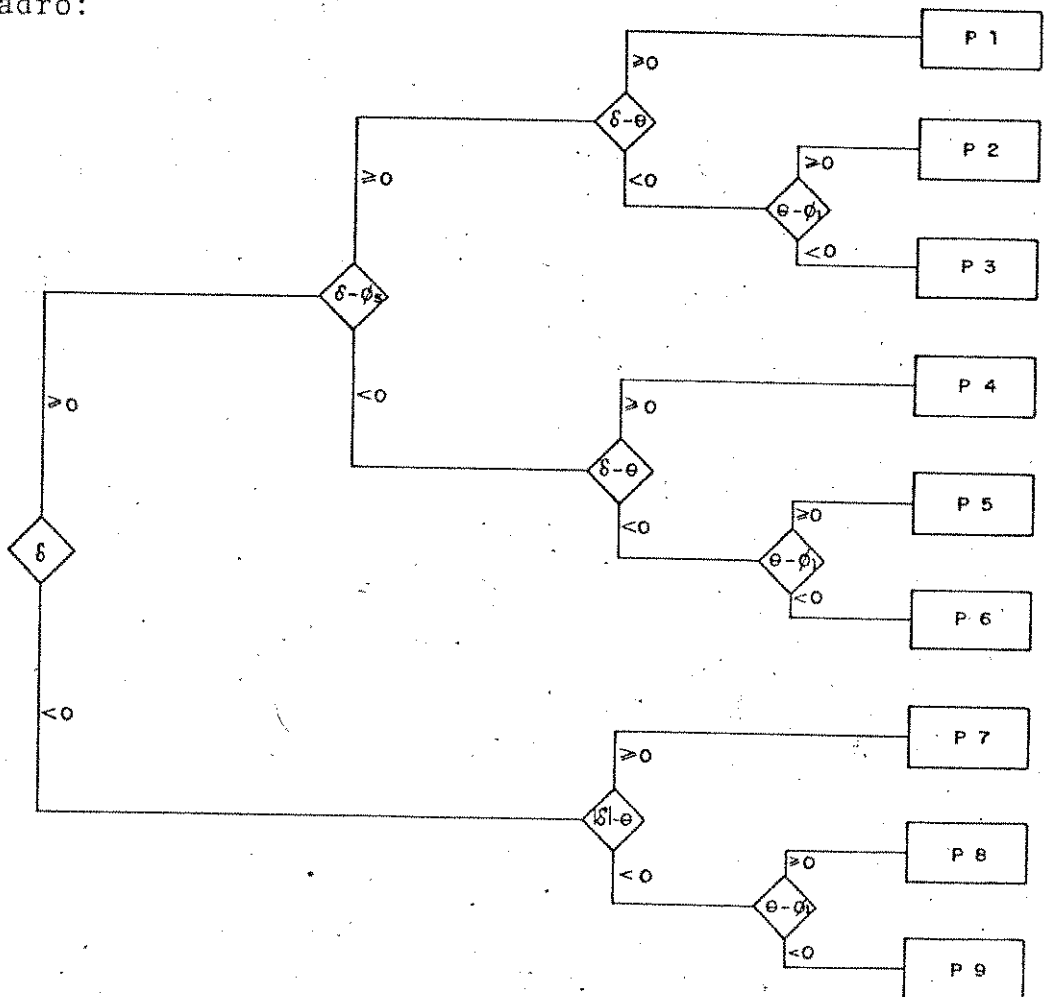
A apresentação da formulação segue a mesma ordem dos casos anteriores.

III.4.1. Funções $r_{1,2}$, $\cos \theta_n$ e θ_1

A posição relativa entre um ponto no refletor e outro ponto no absorvedor não muda quando os raios solares incidem obliquamente a área de abertura. Dessa forma, a distância dada por $r_{1,2}$, o cosseno da normal e o ângulo θ_1 também não mudam, permanecendo válidas as relações expressas por (III.11), (III.12) e (III.3).

III.4.2. Projeções y_1 e y_2

A introdução de um erro de apontamento δ no feixe de raios incidentes faz com que surjam nove possíveis combinações que geram distintas projeções y_1 e y_2 . Estas combinações devem-se ao fato que o erro de apontamento pode ter magnitude maior ou menor que o ângulo compreendido pelo disco solar. As várias possibilidades foram equacionadas distintamente e estão resumidas no seguinte quadro:

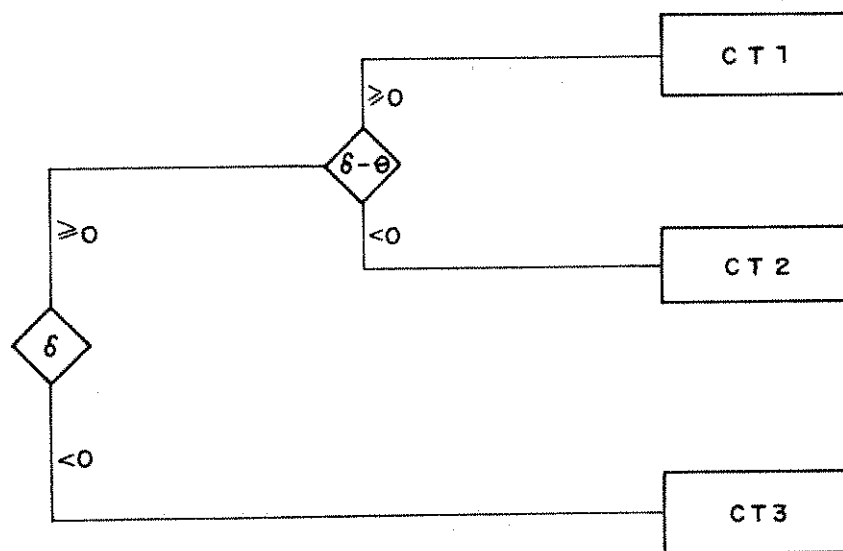


Quadro 1 - Casos possíveis das projeções y_1 e y_2 com erro de apontamento δ

O equacionamento de cada um dos casos (P1) a (P9) está incluído no Apêndice II, para $0^{\circ} \leq \theta < 90^{\circ}$.

III.4.3. Relações para o semi-eixo menor da elipse

São possíveis três combinações entre a posição angular θ e o erro de apontamento δ , que vão gerar relações distintas para o semi-eixo menor da elipse. As combinações possíveis estão sumarizadas no quadro seguinte:



Quadro 2 - As três possibilidades para equacionar o semi-eixo menor da elipse com erro de apontamento

O equacionamento distinto de cada possibilidade (CT1) a (CT3) para ângulos de abertura limitados em 90° está incluído no Apêndice III.

III.5. SUMÁRIO DAS RELAÇÕES

Neste item são apresentadas as funções que são utilizadas na relação integral, equação (II.14).

Estas relações são aplicáveis para o caso ideal, para o

caso com deslocamento do plano focal e também para o caso com deslocamento do plano focal e erro de apotamento.

Apesar de se ter demonstrado nos itens III.2, III.3 e III.4 relações funcionais válidas somente para ângulos de posicionamento θ compreendidos entre zero e noventa graus, as relações agora apresentadas são genéricas para qualquer valor de θ .

A demonstração destas relações foi omitida, uma vez que elas são geradas a partir das relações demonstradas.

O Quadro 3, exposto a seguir, apresenta de forma sumariada as funções envolvidas na relação integral, equação (II.14).

$$C(y_0) = \frac{2(\rho\alpha) i_s \tan \phi_s \int_{-\theta_r}^{+\theta_r} \left(\frac{\cos \theta_1 \cos \theta_n}{\cos \theta/2} \right) \cdot \left(\frac{r_f^* r_f}{r_{1,2}^2} \right) \cdot F(\theta, y_0) d\theta}{i_s \frac{\pi}{2} (1 - \cos 2\phi_s)}$$

$$r_f = 2f/(1 + \cos \theta)$$

$$r_{12} = [r_f^2 + (y_0 + d \tan \theta_n)^2 - 2r_f(y_0 + d \tan \theta_n) \sin(|\theta|)]^{1/2} + \frac{d}{\cos \theta_n}$$

$$\cos \theta_n = |(r_f/r_{12}) \cos \theta|$$

$$\theta_1 = |\theta_n - \theta/2|$$

$$F(\theta, y_0) - (\text{ver Quadro 4})$$

$$(r_f^* \tan \phi_s) - (\text{ver Quadro 5})$$

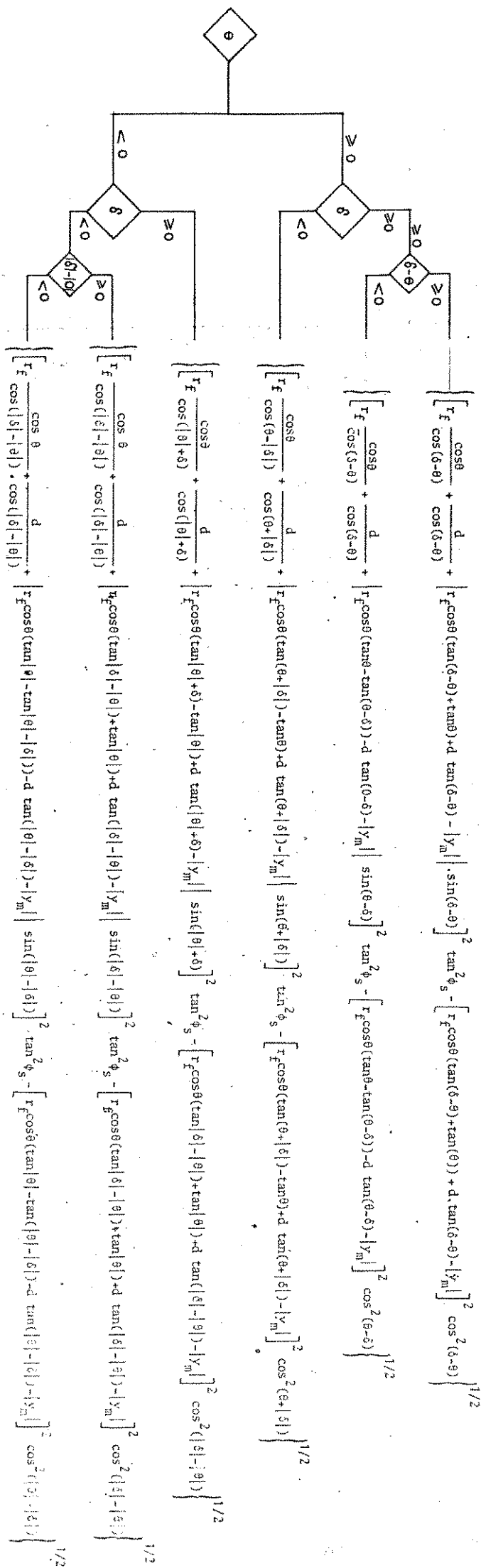
Quadro 3

A função $F(\theta, y_0)$ é determinada através do quadro das projeções de y_1 e y_2 . De acordo com a equação (II.11):

$$\begin{aligned} F(\theta, y_0) &= \underline{Y}^{1/2} \quad \text{para} \quad \underline{Y} \geq 0 \\ &= 0 \quad \text{para} \quad \underline{Y} < 0 \end{aligned}$$

onde $\underline{Y}$ vem da equação (II.9):

$$\underline{Y} = 1 - \frac{\left[y_0 - \left(\frac{y_1 + y_2}{2} \right) \right]^2}{\left[\frac{y_1 - y_2}{2} \right]}$$



Quadro 5

CAPÍTULO IV

EXTENSÃO DA ANÁLISE PARA O CASO DE ABSORVEDORES CILÍNDRICOS

O estudo da distribuição de radiação em absorvedores cilíndricos parte do estudo da distribuição de radiação em absorvedores planos, através de um artifício.

O tema deste capítulo é a apresentação das equações que vão adaptar a formulação ao cálculo da distribuição de radiação em absorvedores cilíndricos e também a apresentação dos resultados obtidos para um absorvedor cilíndrico, com eixo coincidente com o eixo Z de uma superfície refletora exatamente parabólica com reflexão especular ideal.

IV.1. DEFINIÇÃO DA SUPERFÍCIE ABSORVEDORA CILÍNDRICA

A posição de um ponto da superfície cilíndrica do absorvedor é definida através do seu raio, R_{abs} e do ângulo φ , como indicado na Fig. IV.1.

A posição angular φ tem a sua origem oposta ao refletor e está definida no intervalo $0^\circ \leq \varphi \leq 180^\circ$. Vale ressaltar que este intervalo é suficiente para determinar a distribuição de radiação no absorvedor cilíndrico devido à simetria que o refletor parabólico impõe à configuração.

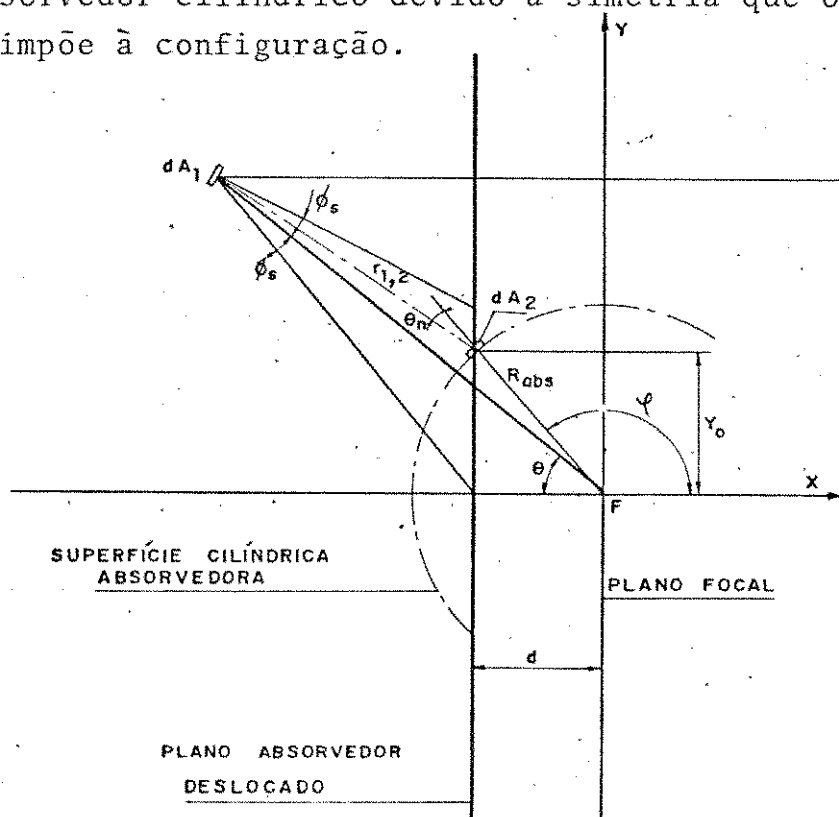


Fig. IV.1 - Definição das variáveis para um absorvedor cilíndrico

IV.2. DEFINIÇÃO DOS PLANOS ABSORVEDORES AUXILIARES E DA DISTRIBUIÇÃO DE RADIAÇÃO EM ABSORVEDORES CILÍNDRICOS

Inicialmente associa-se a cada ponto da superfície cilíndrica um plano deslocado paralelamente ao plano focal.

O deslocamento (d) desse plano, assim como a posição (y_0) em que se deve determinar a concentração, são obtidos das relações seguintes, com base na Fig. IV.1:

$$y_0 = R_{abs} \cdot \sin \varphi \quad (IV.1)$$

$$d = R_{abs} \cdot \cos \varphi \quad (IV.2)$$

Serão feitas a seguir algumas considerações que, com base na Fig. II.4 e na eq. (II.14), permitirão estender a aplicabilidade do método desenvolvido para absorvedores cilíndricos.

Uma posição θ do refletor define, com a energia solar incidente, uma imagem solar na forma de uma elipse no plano absorvedor. Esse elipse possui, numa direção paralela ao eixo Z, uma largura que varia para cada ponto y_0 considerado no absorvedor. Nota-se que para qualquer plano que contenha o ponto y_0 e seja paralelo ao eixo Z, essa largura é a mesma, independentemente de este plano ser ou não paralelo ao plano focal. Dessa forma, com base na Fig. IV.1, a um ponto y_0 de um absorvedor cilíndrico, são associados dois planos. Um deles é o plano auxiliar caracterizado pela distância d (eq. (IV.1)) do plano focal e o outro é o plano tangente à superfície cilíndrica nesse mesmo ponto.

Com auxílio do primeiro plano obtém-se a largura mencionada da elipse do ponto y_0 , utilizando-se as mesmas relações já obtidas anteriormente. Essa largura então calculada é a mesma para o segundo plano, que contém y_0 e é paralelo ao eixo Z.

Com o auxílio do segundo plano, define-se o ângulo θ_n entre a normal à superfície cilíndrica no ponto y_0 , o segmento de reta $r_{1,2}$ do ponto y_0 ao ponto considerado do refletor e o ângulo θ_1 compreendido entre a normal ao refletor e o segmento $r_{1,2}$. As relações que definem o ângulo θ_n , o segmento $r_{1,2}$ e o ângulo θ_1 são expressas, com base na Fig. IV.2, por:

$$\Omega = 180^\circ - (\theta + \varphi)$$

(IV.3)

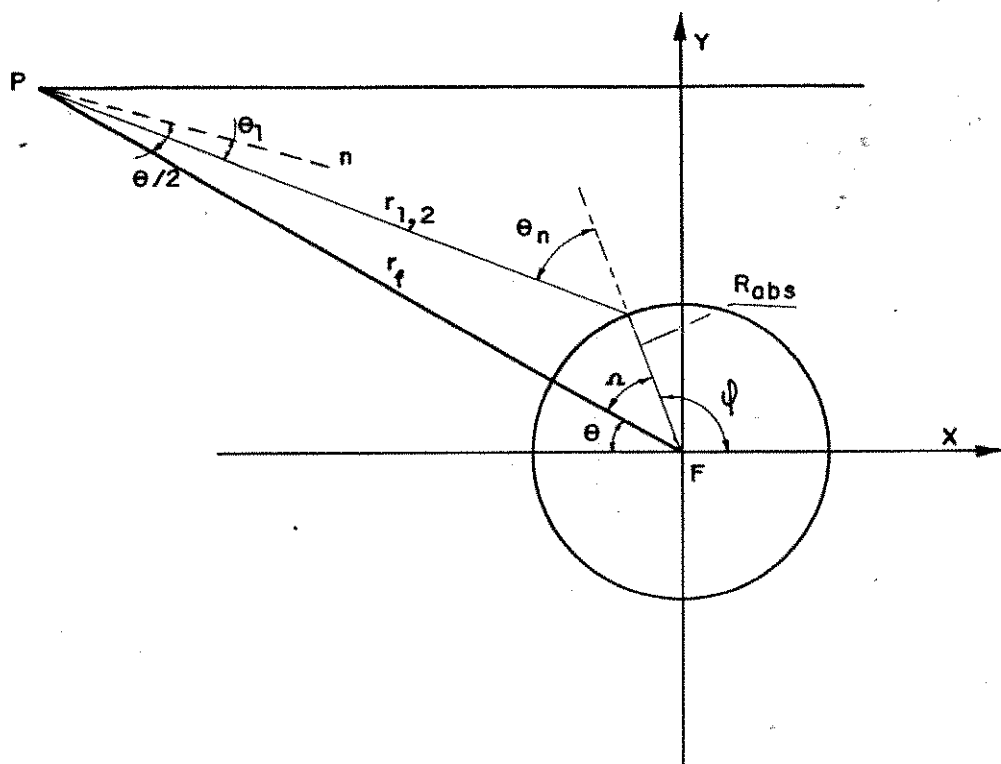


Fig. IV.2 - Definição das funções θ_n , $r_{1,2}$, Ω e θ_1

$$r_{1,2}^2 = r_f^2 + R_{abs}^2 - 2R_{abs} \cdot r_f \cdot \cos \Omega \quad (IV.4)$$

$$\sin \theta_n = \left(\frac{r_f}{r_{12}} \right) \cdot \sin \Omega \quad (IV.5)$$

$$\theta_1 = \frac{\theta}{2} - (\theta_n - \Omega) \quad (IV.6)$$

Embora as relações (IV.4) e (IV.5) estejam definidas para o intervalo $0^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$, de acordo com a Fig. IV.2, elas podem ser utilizadas para qualquer valor de θ . Já as expressões generalizadas para os ângulos Ω e θ_1 ficam sendo:

$$\Omega = |(180^\circ - \theta - \varphi)| \quad \text{válida para } 90^\circ \leq \theta < 180^\circ \quad (IV.7)$$

e $\Omega = (180 - |\theta| + \varphi) \quad \text{válida para } -180^\circ < \theta \leq -90^\circ$

(IV.8)

$$\theta_1 = \left(\frac{\theta}{2} \right) \pm (\theta_n - \Omega) \quad (\text{IV.9})$$

Nesta última expressão, a adição dos dois termos à direita ocorre quando é satisfeita a desigualdade

$$180 - \varphi - \theta < 0$$

e a subtração em caso contrário.

Nota-se agora que na eq. (II.14), o denominador depende apenas do modelo de sol utilizado. No numerador, os termos ρ e i_s também não se alteram com a geometria do absorvedor, pois representam propriedades do refletor e da intensidade de radiação solar. O produto $(2 r_f^* \tan \phi_s F(\theta, y_0))$, que define a largura anteriormente considerada da elipse, que é a mesma para qualquer plano que contenha y_0 e seja paralelo ao eixo Z, é então determinado através das relações (IV.1) e (IV.2), juntamente com os quadros 4 e 5 (Cap.III), que definem as projeções y_1 e y_2 e o semi-eixo menor da elipse para um plano auxiliar paralelo ao plano focal. Os segmentos de reta r_f e $r_{1,2}$ também não são alterados pela forma do absorvedor - para uma dada geometria parabólica do refletor, dependem das posições y_0 e de um ponto do refletor, caracterizado por um ângulo θ de abertura, elas estão definidos pelas relações (II.1) e (IV.4). Os ângulos $\theta/2$ e θ_1 dependem também desse mesmo par de pontos e da geometria cilíndrica do absorvedor, sendo o último definido pela expressão (IV.9). O último termo da equação (II.14) a ser considerado é o ângulo θ_n ($\cos \theta_n$), que indica o ângulo entre o segmento $r_{1,2}$ e a direção normal à superfície absorvedora num ponto y_0 . Este ângulo, no caso de absorvedores cilíndricos, é definido pela equação (IV.6).

Dessa maneira, a mesma equação (II.14) pode ser associada a absorvedores cilíndricos, desde que se empreguem as relações adequadas a este caso, definidas pelas equações (III.17), (IV.1), (IV.4), (IV.5), (IV.9) e os quadros 4 e 5. A relação integral para absorvedores cilíndricos passa então a ser:

$$C(\varphi) = \frac{2(\rho\alpha)i_s \tan \phi_s \int_{-\theta_r}^{+\theta_r} \left(\frac{r_f^* r_f}{r_{1,2}^2} \right) \cdot \left(\frac{\cos \theta_1 \cos \theta_n}{\cos(\theta/2)} \right) \cdot F(\theta, y_0) d\theta}{i_s \frac{\pi}{2} [1 - \cos 2\phi_s]} \quad (\text{IV.10})$$

IV.3. REGIÕES DO ABSORVEDOR IRRADIADAS PELO REFLETOR

Como primeiro passo no processo da distribuição de radiação em um absorvedor cilíndrico, é necessário verificar quais regiões do absorvedor cilíndrico podem ser irradiadas pela energia solar que incide em cada ponto do refletor. Esta etapa de verificação diminui o tempo de computação posteriormente necessário, pois se um dado ponto do absorvedor não puder ser irradiado por um determinado ponto do refletor, então o processo é interrompido imediatamente. Nos demais casos, são efetuadas as operações necessárias ao método integral desenvolvido.

A Fig. IV.3 ilustra um caso particular do ponto P no refletor, posicionado no eixo de simetria. Neste caso o ângulo ψ indica a região que pode ser iluminada, embora a região realmente iluminada seja somente a região do absorvedor interceptada pelo pincel de raios solares refletidos.

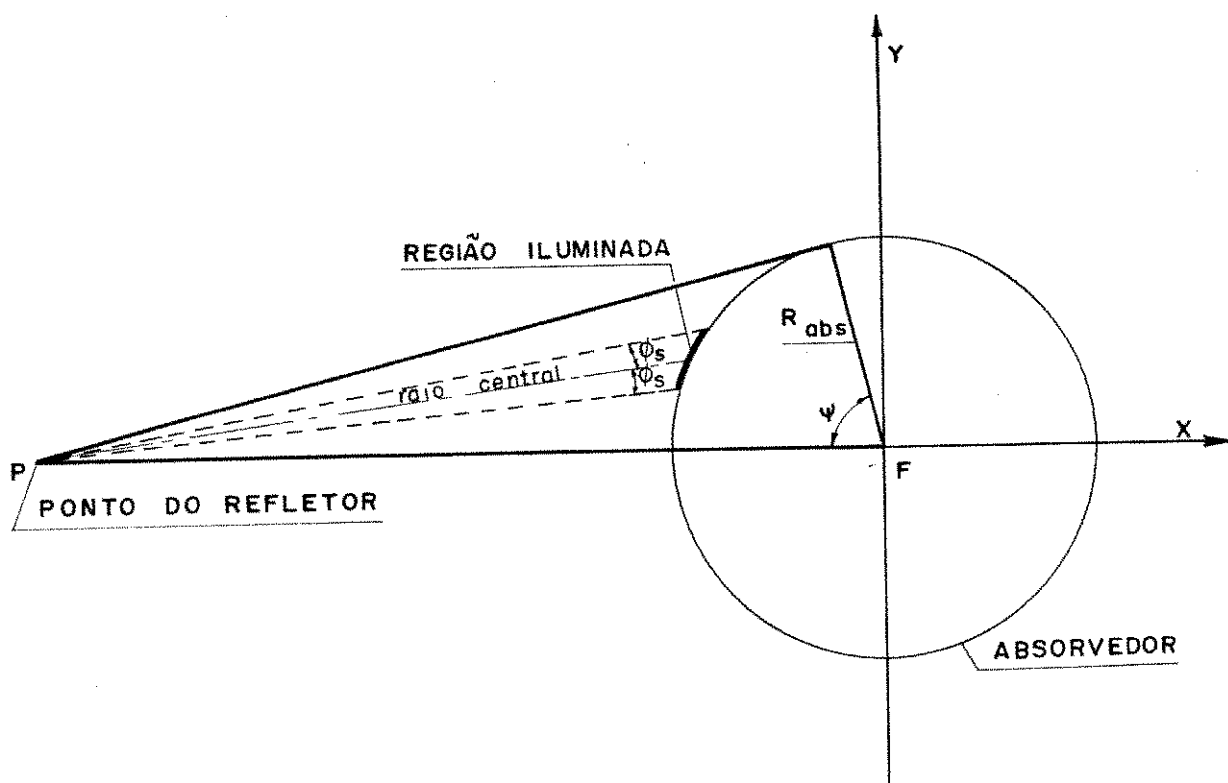


Fig. IV.3 - Região iluminada, definida pelo ângulo ψ , associada ao ponto P

Deve-se observar que como a posição angular de um ponto no absorvedor (φ) está definida somente para o semi-cilindro superior, ou seja, $0^\circ \leq \varphi \leq 180^\circ$, a região que pode ser iluminada também deverá estar contida dentro deste intervalo.

Serão agora obtidas as relações funcionais que vão definir a região no absorvedor que pode ser iluminada.

IV.3.1 - Pontos no Refletor compreendidos entre $(180^\circ - (\Omega_C)_{M2}) \leq \theta < 180^\circ$

Na Fig. IV.3, e da mesma forma nas figuras seguintes, é válida a relação

$$\cos \Omega_C = \frac{R_{abs}}{r_f} \quad (IV.11)$$

em que r_f e dessa forma Ω_C dependem do ângulo de abertura de cada ponto do refletor.

Define-se também, com base na Fig. IV.4a, o ângulo $(\Omega_C)_{M2}$ através da relação (IV.11), que corresponde ao menor ângulo de abertura do refletor que ilumina a posição $\varphi = 0^\circ$.

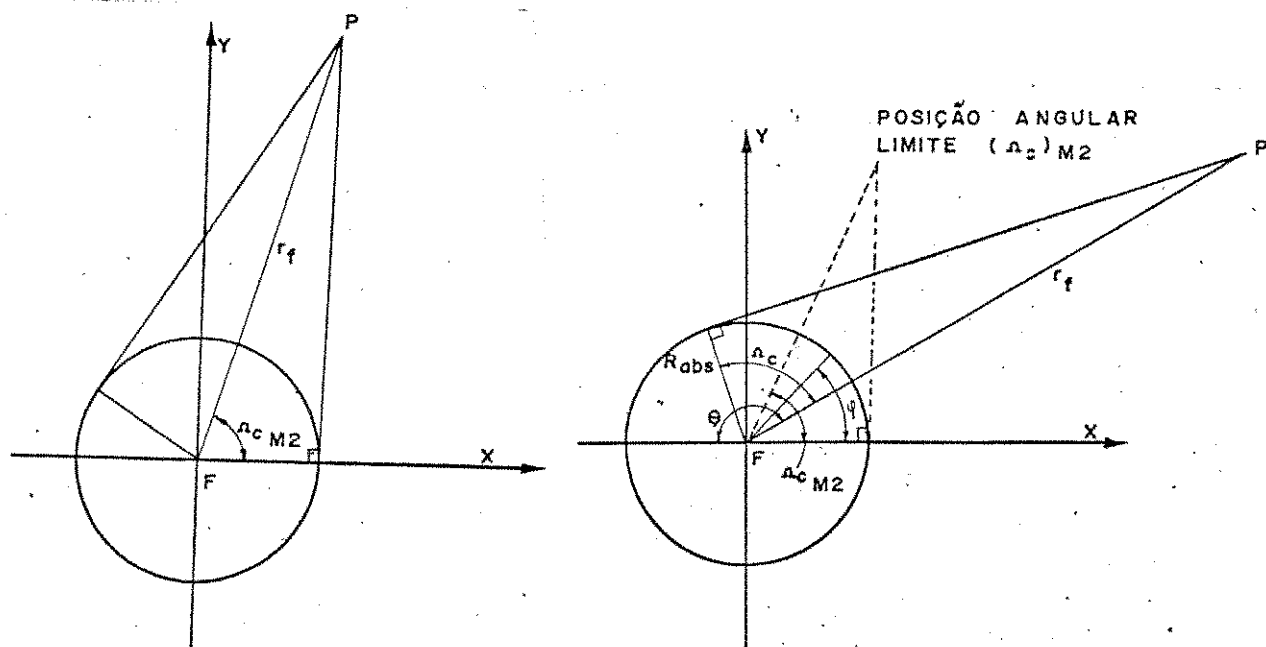


Fig. IV.4 - a) definição da posição limite angular $(\Omega_C)_{M2}$

b) definição da região do absorvedor que pode ser iluminada pelos pontos do refletor compreendidos entre $[180^\circ - (\Omega_C)_{M2}] \leq \theta < 180^\circ$

Neste caso, a região do absorvedor que pode ser iluminada por um ponto do refletor compreendido entre $[180^\circ - (\Omega_C)_{M2}] \leq \theta < 180^\circ$, é determinada por:

$$0^\circ \leq \varphi \leq [\Omega_C + (180^\circ - \theta)]$$

Cabe notar que nas geometrias comumente adotadas, o ângulo $(\Omega_C)_{M2}$ é superior a 90° e inferior a 93° .

IV.3.2 - Pontos no refletor compreendidos entre $(\Omega_C)_{M1} \leq \theta < [180^\circ - (\Omega_C)_{M2}]$

O ângulo $(\Omega_C)_{M1}$ é definido com base na Fig. IV.4, correspondendo ao maior ângulo de abertura do refletor que ainda ilumina a posição $\varphi = 180^\circ$.

Assim, a região do absorvedor que pode ser parcialmente iluminada por um ponto do refletor que fica compreendido entre

$$(\Omega_C)_{M1} \leq \theta < [180^\circ + (\Omega_C)_{M2}]$$

é fornecida pela relação

$$(180^\circ - \theta - \Omega_C) \leq \varphi \leq (180^\circ - \theta + \Omega_C)$$

IV.3.3 - Pontos no refletor compreendidos entre $0^\circ \leq \theta < (\Omega_C)_{M1}$

Neste caso, de acordo com a Fig. IV.5, a região do absorvedor que pode ser iluminada por um ponto do refletor que fica compreendido entre

$$0^\circ \leq \theta < (\Omega_C)_{M1}$$

é definida pelo intervalo angular

$$[180^{\circ} - (\Omega_C + \theta)] \leq \varphi \leq 180^{\circ}$$

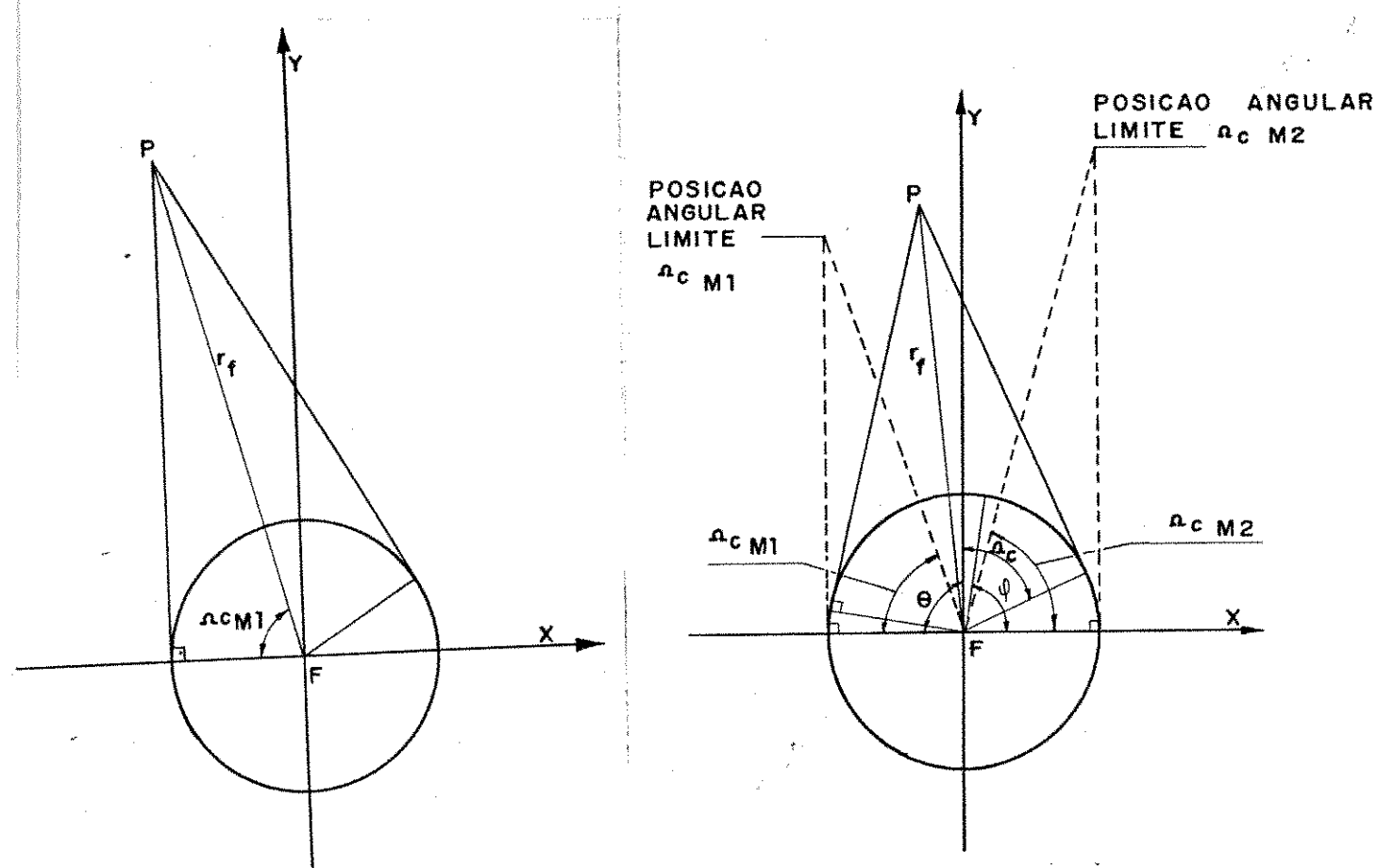


Fig. IV.5 - a) definição da posição angular limite $(\Omega_C)_{M1}$.
b) definição da região do absorvedor que pode ser iluminada pelos pontos do refletor compreendidos entre $(\Omega_C)_{M1} \leq \theta \leq [180^{\circ} - (\Omega_C)_{M2}]$

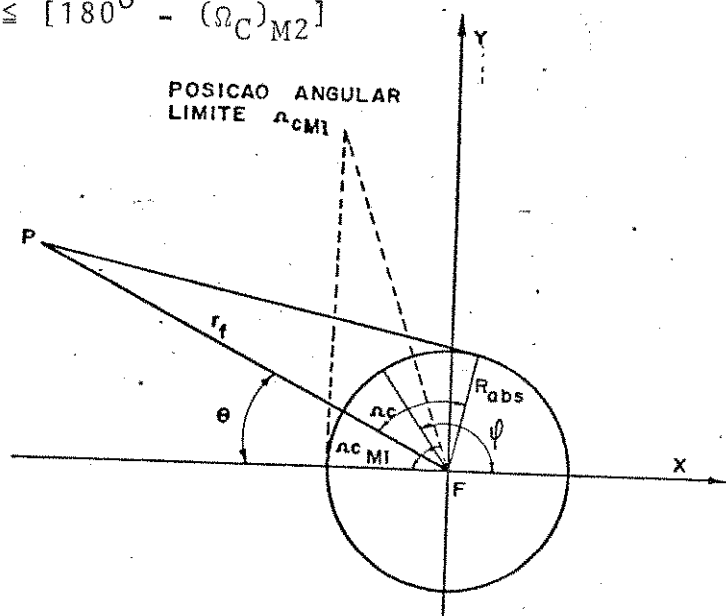


Fig. IV.6 - Definição da região do absorvedor que pode ser iluminada pelos pontos do refletor compreendidos entre $0^{\circ} \leq \theta < (\Omega_C)_{M1}$

IV.3.4 - Pontos no refletor compreendidos entre $-(\Omega_C)_{M1} \leq \theta < 0^\circ$

A região que pode ser iluminada por um ponto do refletor que fica compreendido entre

$$-(\Omega_C)_{M1} \leq \theta < 0^\circ$$

é definida pelo intervalo angular:

$$[180^\circ - (\Omega_C) - |\theta|] \leq \varphi \leq 180^\circ$$

como mostra a Fig. IV.7.

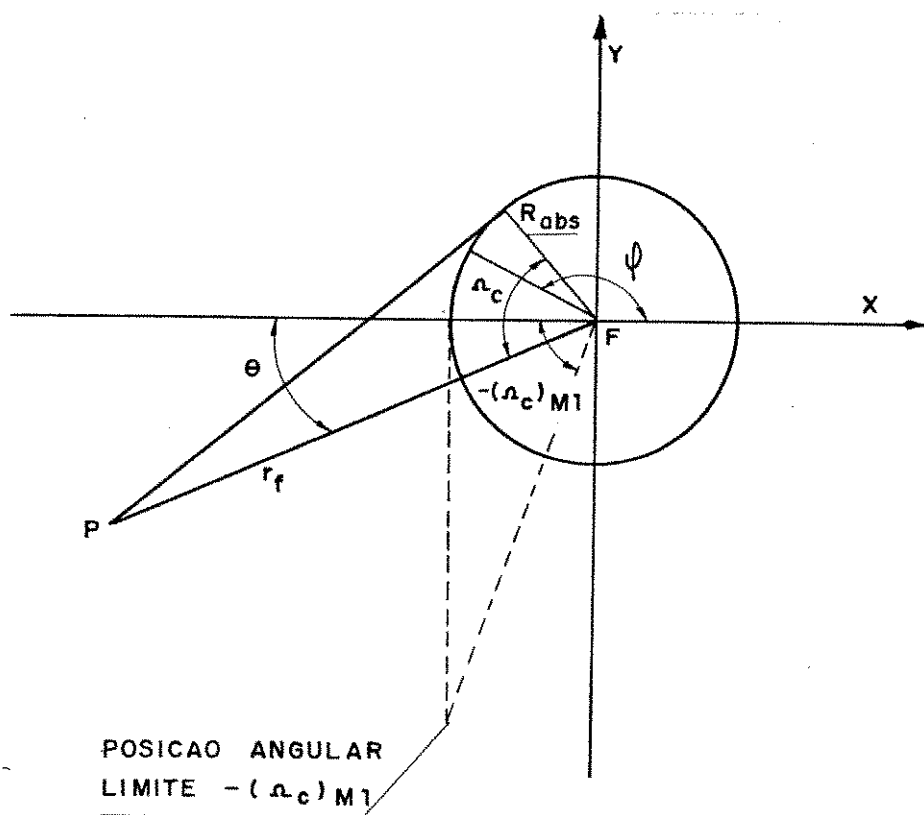


Fig. IV.7 - Definição da região do absorvedor que pode ser iluminada pelos pontos do refletor compreendidos entre $-(\Omega_C)_{M1} \leq \theta < 0^\circ$

IV.3.5- Pontos no refletor compreendidos entre $-[180^\circ - (\Omega_C)_{M2}] \leq \theta < -(\Omega_C)_{M1}$

De acordo com a Fig. IV.8 pode-se afirmar que os pontos

do refletor neste região não iluminam o semi-cilindro do absorvedor na faixa $0^{\circ} \leq \varphi \leq 180^{\circ}$.

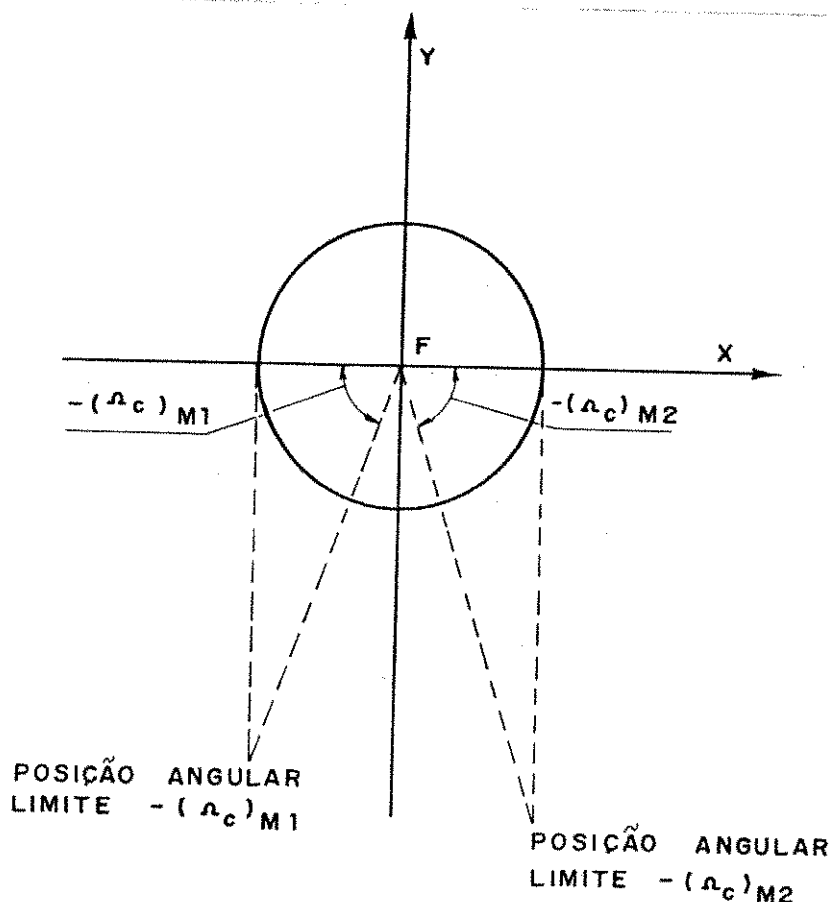


Fig. IV.8 - Definição da região do absorvedor que pode ser iluminado pelos pontos do refletor compreendidos entre $-(180^{\circ} - (\Omega_c)_{M2}) \leq \theta < -(\Omega_c)_{M1}$

IV.3.6 - Pontos no refletor compreendidos entre $-[180^{\circ} - (\Omega_c)_{M2}] \leq \theta < -180^{\circ}$

Baseado na Fig. IV.9, pode-se definir que a região iluminada por um ponto do refletor que fica compreendido entre

$$-[180^{\circ} - (\Omega_c)_{M2}] \leq \theta < -180^{\circ}$$

é expressa por

$$0^{\circ} \leq \varphi \leq (\Omega_c + |\theta| - 180^{\circ})$$

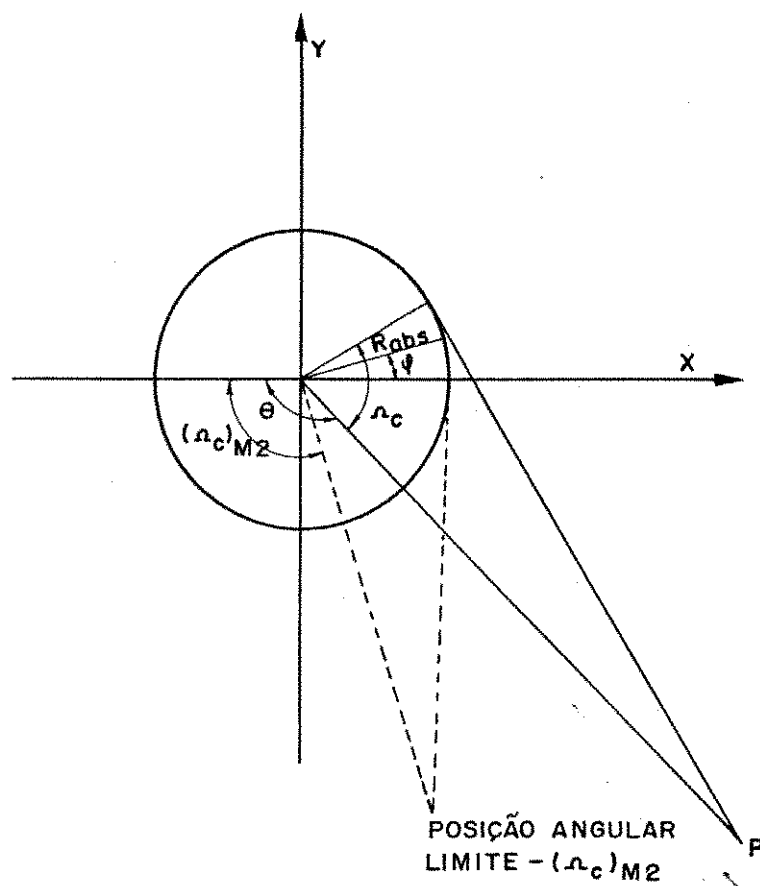


Fig. IV.9 - Definição da região do absorvedor que pode ser iluminada pelos pontos do refletor compreendidos entre $-[180^\circ - (\Omega_C)'_{M2}] \leq \theta < -180^\circ$

IV.4. RESULTADO DA DISTRIBUIÇÃO DE RADIAÇÃO EM ABSORVEDORES CILÍNDRICOS PARA O CASO IDEAL

Com base na análise anterior será considerada inicialmente a distribuição de radiação num refletor especular ideal, de forma exatamente parabólica, com um absorvedor cilíndrico cujo centro coincide com a linha focal, e com radiação solar incidente normal à área de abertura do refletor.

Nestas condições, são apresentados a seguir resultados para refletores com ângulos de abertura de 75° , 90° e 115° , utilizando-se absorvedores com três valores da razão (raio do absorvedor/distância focal): 0,005; 0,025 e 0,125. Os resultados estão nas Figs. IV.10 a IV.16 e foram gerados pelo algoritmo que está no Apêndice IV.

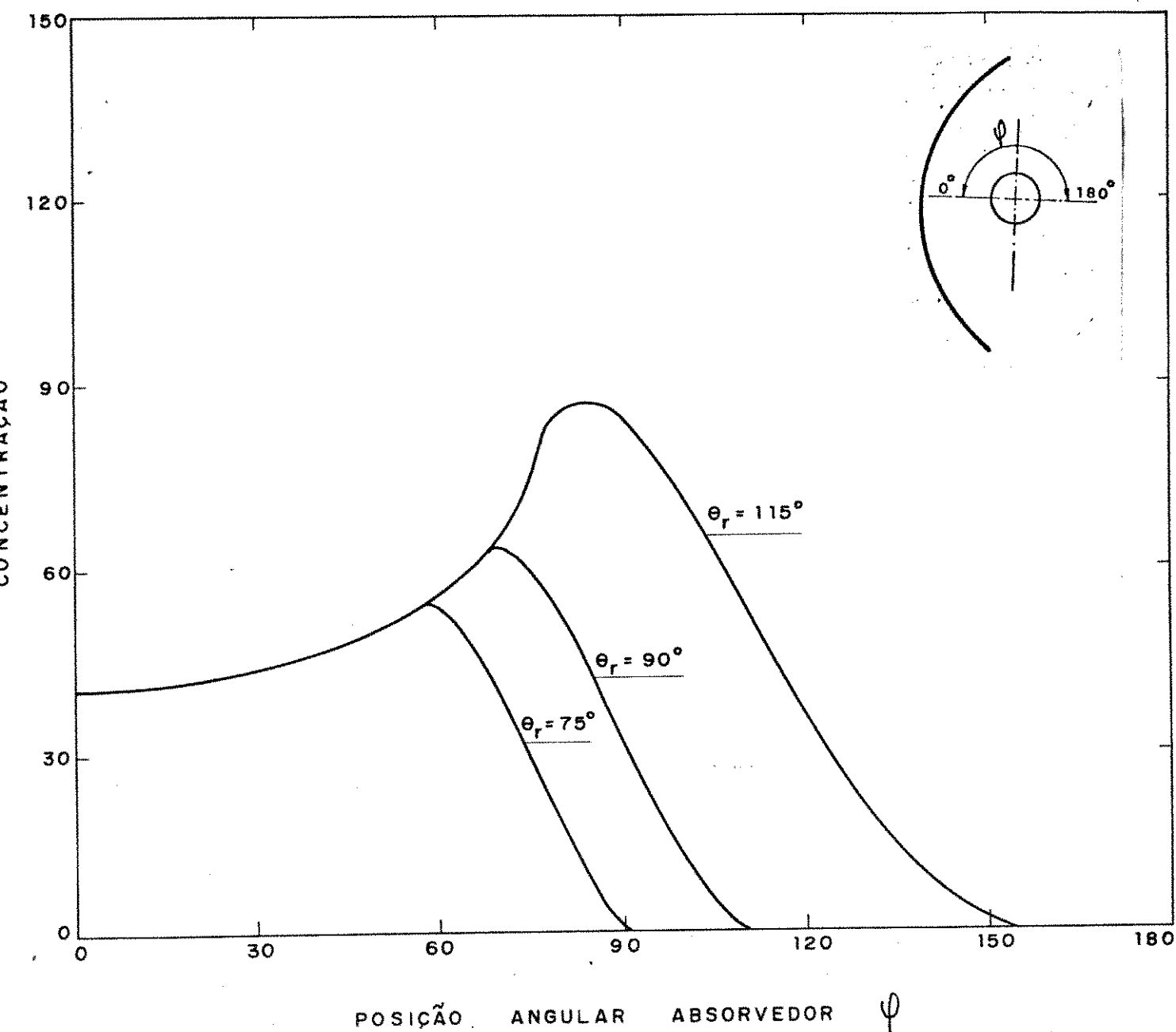


Fig. IV.10 - Distribuição de radiação num absorvedor com $R_{abs}/f = 0,025$ em função do ângulo de abertura do refletor

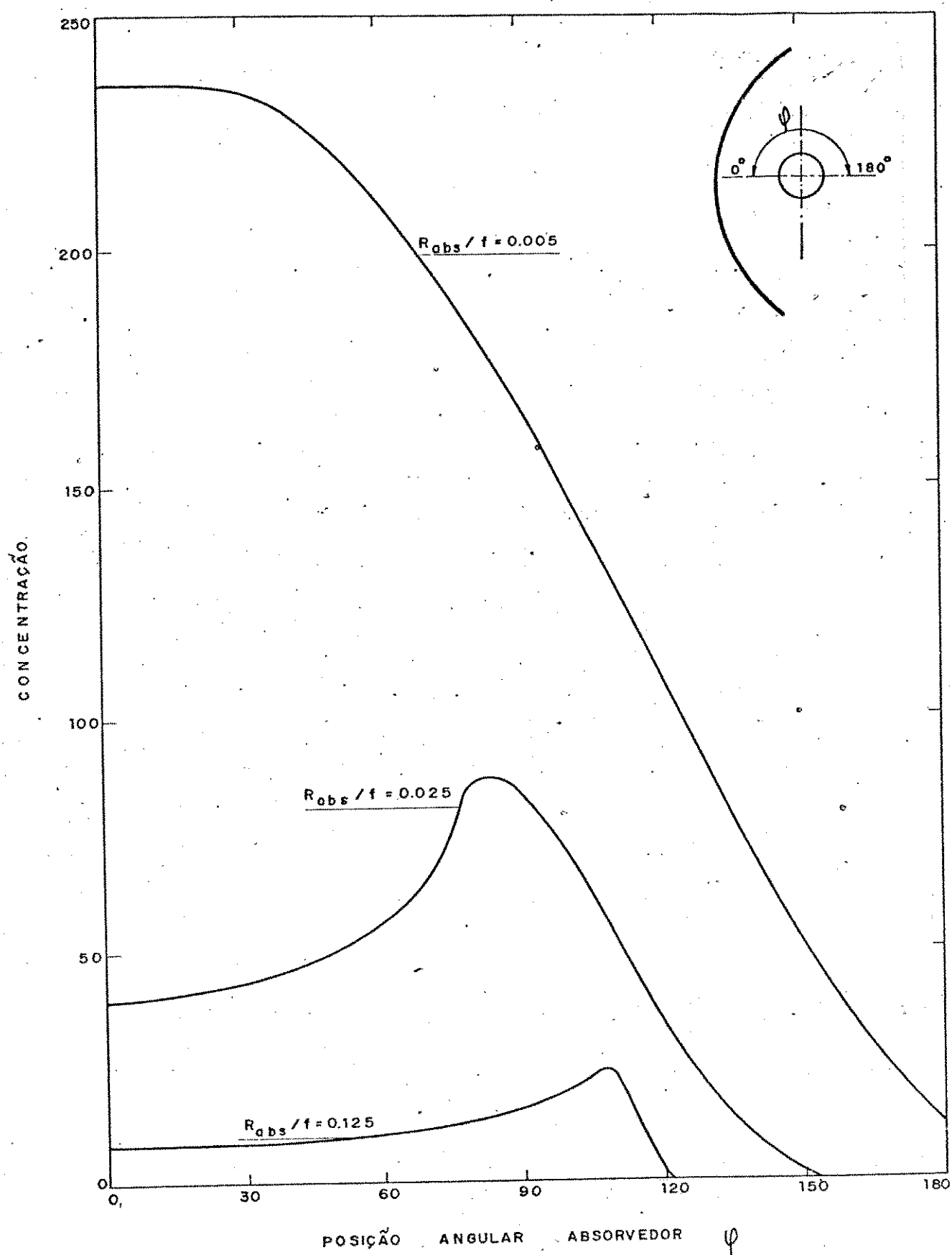


Fig. IV.11 - Distribuição de radiação em absorvedores com $R_{obs}/f = 0,125; 0,025$ e $0,005$ em refletores com $\theta_r = 115^\circ$

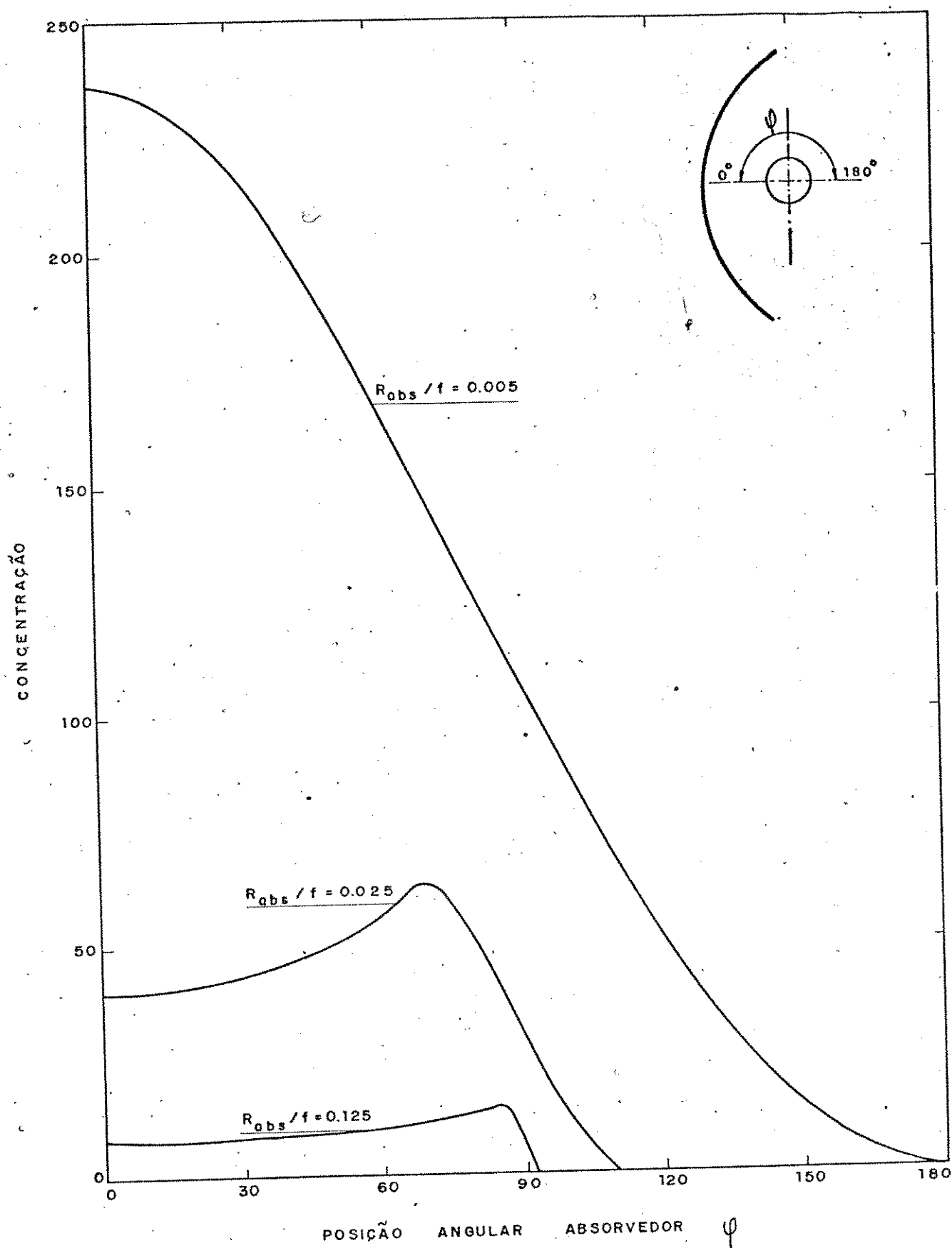


Fig. IV.12 - Distribuição de radiação em absorvedores com $R_{obs}/f = 0,125; 0,025$ e $0,005$ em refletores com $\theta_r = 90^\circ$

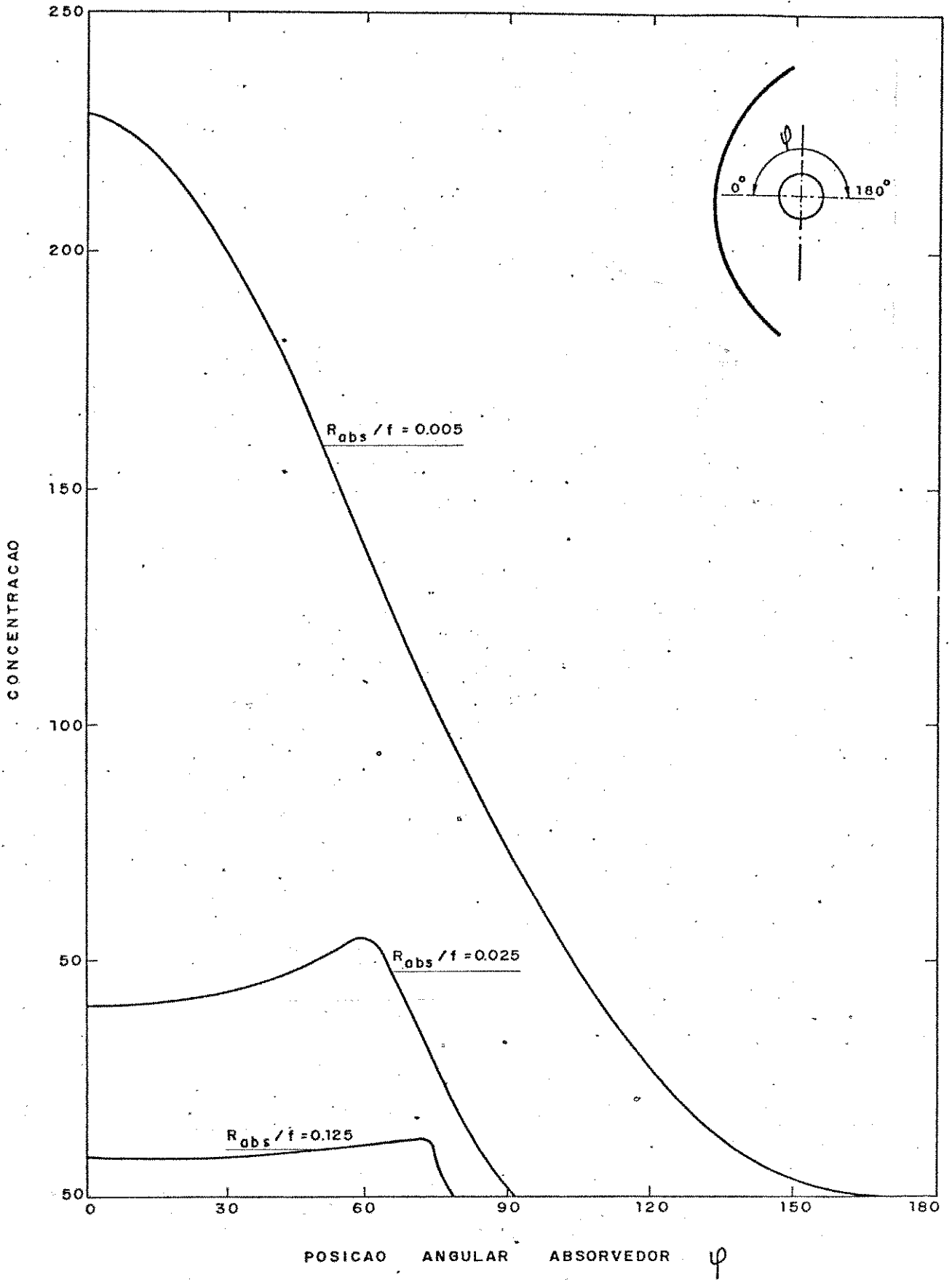


Fig. IV.13 - Distribuição de radiação em absorvedores com $R_{abs}/f = 0,125; 0,25$ e $0,005$ em refletores com $\theta_r = 75^\circ$.

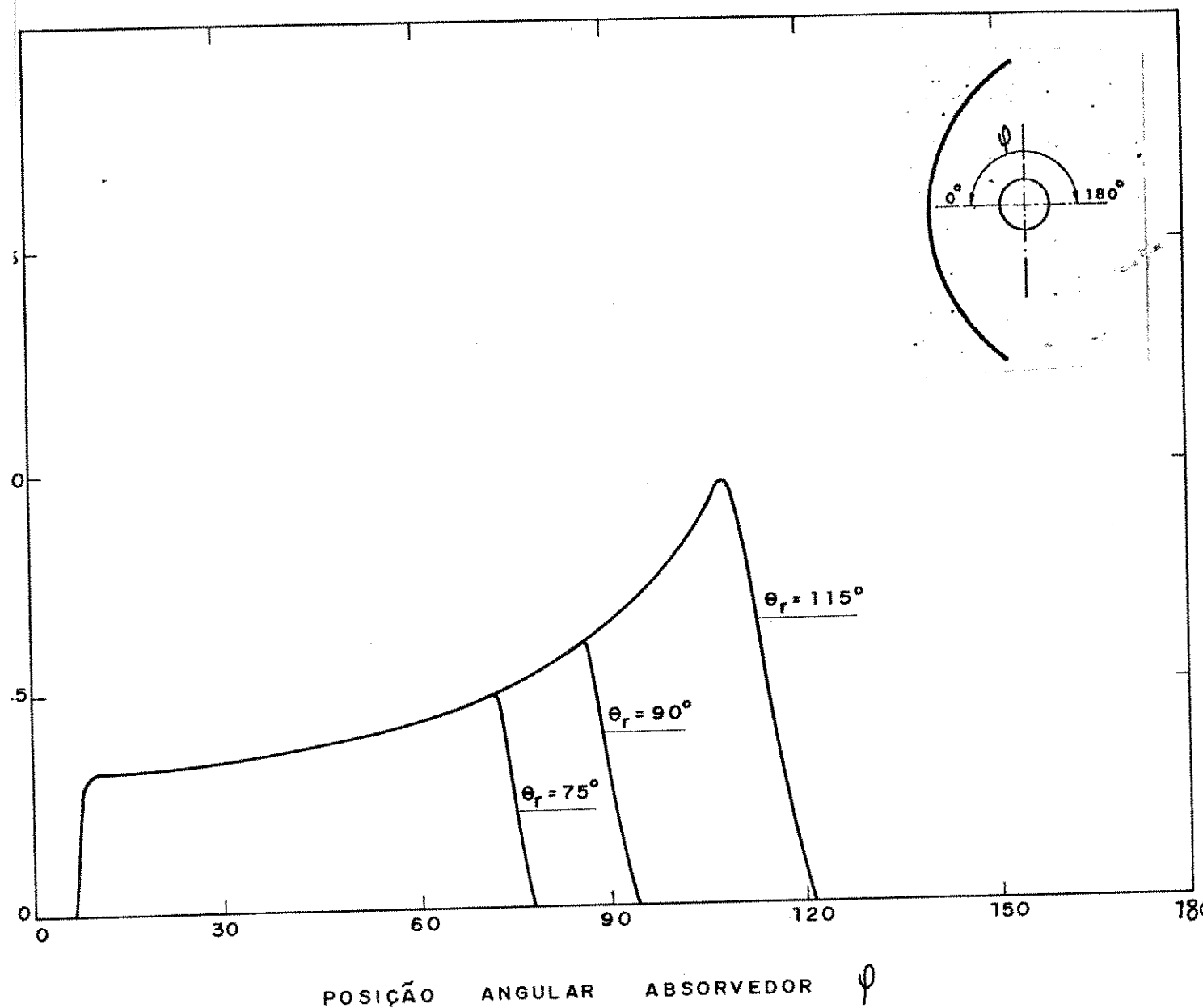


Fig. IV.14 - Distribuição de radiação num absorvedor $R_{abs}/f = 0,125$ em refletores com abertura de: 75° , 90° e 115° considerando-se o efeito de sombra do absorvedor no refletor

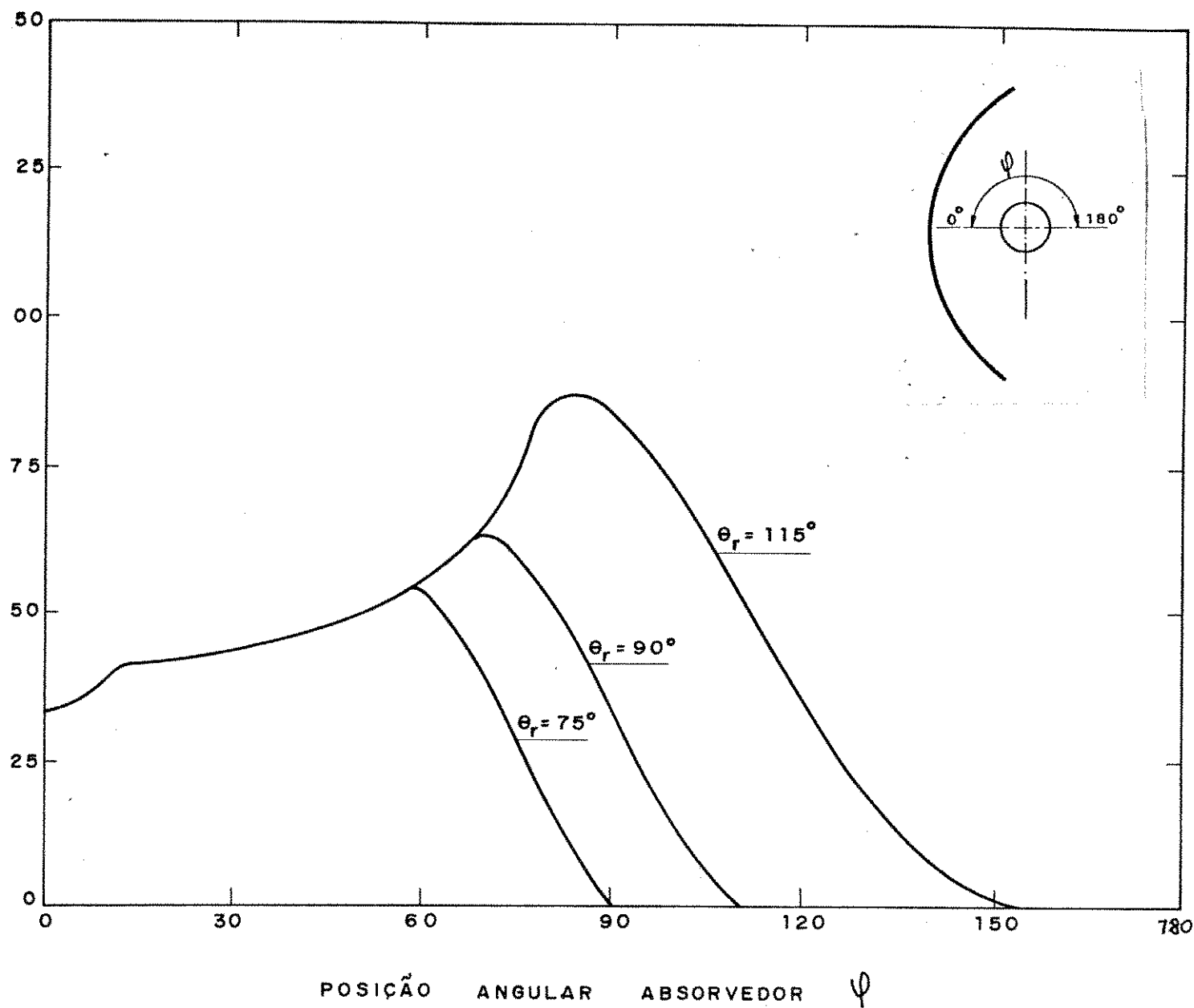


Fig. IV.15 - Distribuição de radiação num absorvedor $R_{abs}/f = 0,025$ em refletores com abertura de: 75° , 90° e 115° considerando-se o efeito de sombra do absorvedor no refletor

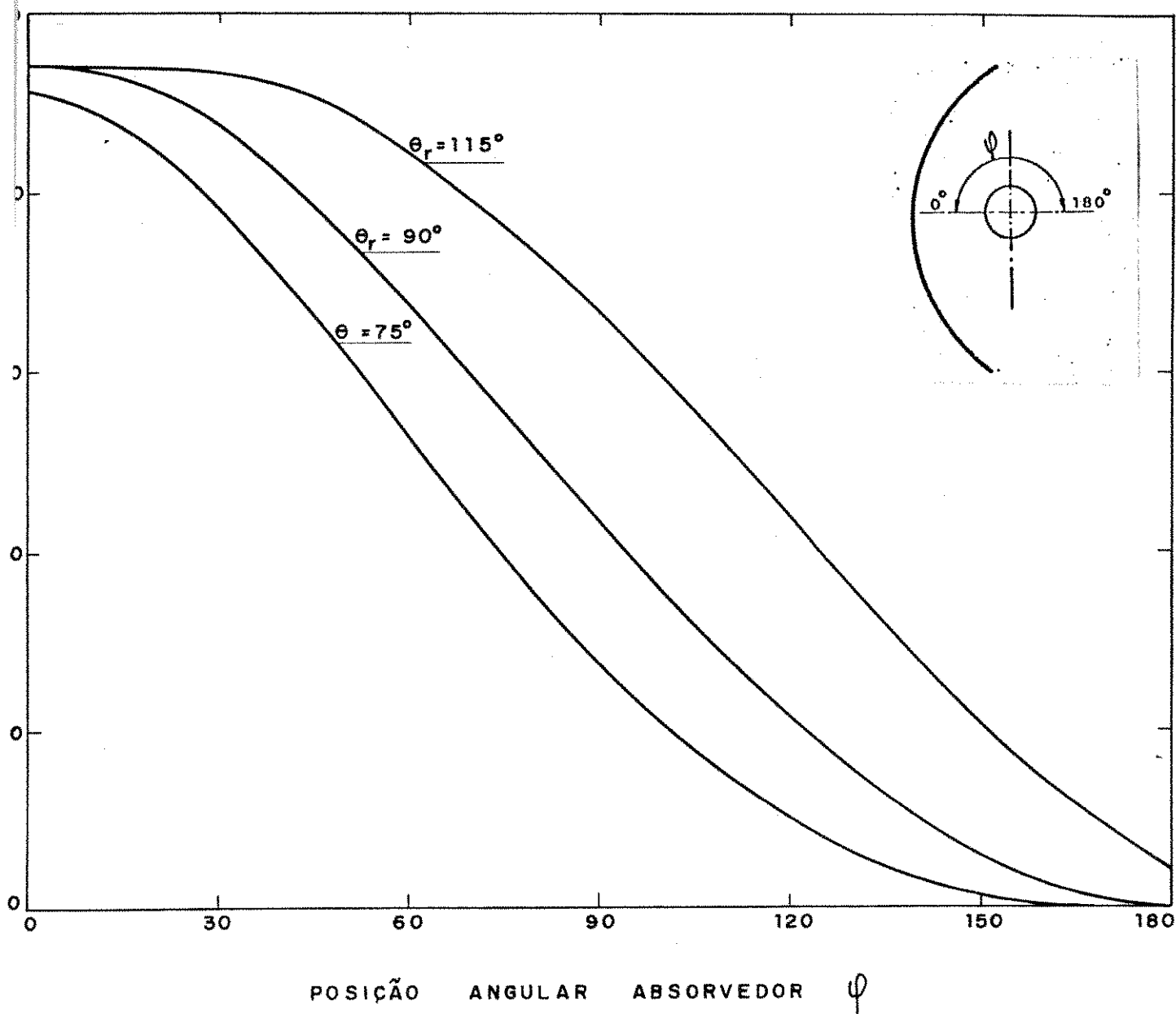


Fig. IV.16 - Distribuição de radiação num absorvedor $R_{abs}/f = 0,005$ em refletores com abertura de 75° , 90° e 115° considerando-se o efeito de sombra do absorvedor no refletor

É mostrada na Fig. IV.10 a distribuição de radiação em função do ângulo de abertura do refletor, onde se observa que para um dado valor da razão (R_{abs}/f) o aumento do ângulo de abertura do refletor causa um aumento dos picos de concentração e assim como era de se esperar, um aumento da região iluminada no absorvedor. Isto vem porque à medida em que o ângulo de abertura aumenta, dois fatos ocorrem: em primeiro lugar aumenta a área de abertura do refletor enquanto a área do absorvedor permanece a mesma. Em segundo lugar, a superposição de imagens solares no absorvedor cilíndrico é mais intensa para posições do refletor com maior ângulo de abertura. O primeiro fato contribui para um aumento do valor máximo da concentração e o segundo para o seu deslocamento à direita, nas curvas da Fig. IV.10.

As Figs. IV.11 a IV.13 ilustram o efeito da variação da razão (R_{abs}/f) para refletores com abertura de 75° , 90° e 115° . Nota-se que para um dado ângulo de abertura do refletor, à medida em que o raio do tubo absorvedor aumenta, uma menor porção angular do tubo é iluminada pelos raios solares refletidos. Além disso, a área do absorvedor aumenta enquanto que a área de abertura do refletor é a mesma. Absorvedores de raio muito pequeno ($R_{abs}/f = 0,005$ nas figuras) são iluminados em todo o seu perímetro por regiões maiores do refletor, ocorrendo então uma concentração máxima na região mais próxima do refletor.

As Figs. IV.14 a IV.16 mostram a distribuição de radiação em função do ângulo de abertura do refletor para absorvedores (R_{abs}/f): 0,125; 0,025 e 0,005, levando-se em consideração o efeito de sombra do absorvedor no refletor.

Considerando-se que os raios solares incidam normalmente à área de abertura do refletor, apenas a região com pequenos valores do ângulo de abertura será sombreada pelo tubo absorvedor. Dessa forma, apenas a região do absorvedor próxima ao refletor sofre uma diminuição da concentração proporcional ao tamanho do absorvedor. Absorvedores muito pequenos praticamente não sofrem o efeito de sombreamento que eles causam no refletor.

A análise da distribuição de radiação em absorvedores cilíndricos é auxiliada através do parâmetro Fator de Interceptação, que fornece razão entre a energia interceptada pelo absorve

dor e a energia incidente na área de abertura do refletor. O Fator de Interceptação, introduzido no Capítulo II, em função da configuração cilíndrica do absorvedor é expresso por:

$$Fi = \frac{2\pi(R_{abs}/f)}{\left(\frac{4 \sin \theta_r}{1 + \cos \theta_r} \right)} \cdot \int_0^{2\pi} C(\varphi) d\varphi \quad (IV.12)$$

A Fig. IV.17 mostra o Fator de Interceptação em função da razão (R_{abs}/f) para concentradores com 75° , 90° e 115° de abertura.

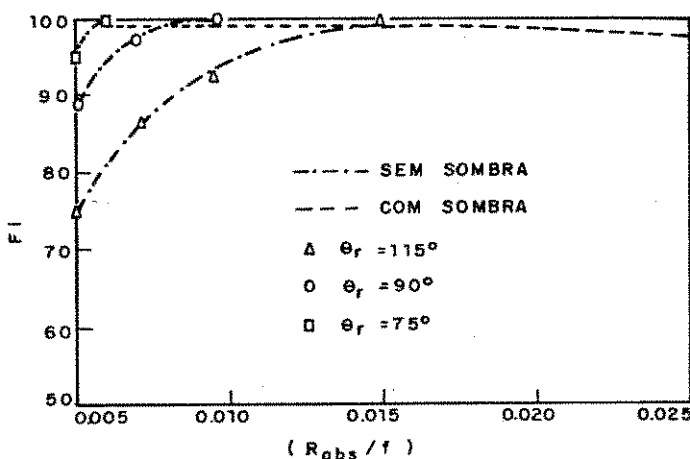


Fig. IV.17 - Fator de Interceptação em função da razão (R_{abs}/f)

A cada ângulo de abertura do refletor está associado um valor crítico da razão (R_{abs}/f) de modo que absorvedores menores não interceptam a totalidade da radiação incidente na abertura. De acordo com a Fig. IV.17 nota-se que este valor crítico da razão (R_{abs}/f) aumenta à medida que aumenta o ângulo de abertura do refletor. Isto decorre do aumento da imagem solar das extremidades do refletor.

Superpostas na mesma Fig. IV.17 estão as curvas para o Fator de Interceptação com efeito de sombra. O comportamento destas curvas é semelhante às curvas sem o efeito de sombra e confirmam as conclusões obtidas das Figs. IV.14 a IV.16.

CAPÍTULO V

SIMULAÇÃO DE CONDIÇÕES NÃO IDEAIS DE
OPERAÇÃO EM ABSORVEDORES CILÍNDRICOS

Foi visto que a análise da distribuição de radiação, referente ao Caso Ideal, feita no Capítulo IV, está restrita a concentradores parabólicos com superfície refletora contínua e perfeitamente parabólica, sendo que a linha de centro do absorvedor está coincidente com a linha focal, e também, a radiação incidente atinge normalmente a área de abertura.

No entanto, tal condição de operação para um concentrador real é idealizada, isto porque os sistemas concentradores estão susceptíveis a defeitos primários decorrentes do seu processo de fabricação, montagem e de sua estrutura de suporte.

Os defeitos primários influenciam de sobre maneira o perfil de distribuição de radiação, e por se propagarem longitudinalmente na estrutura do refletor, também distorcem a imagem formada no absorvedor, comprometendo a eficiência ótica do sistema.

Para estudar o efeito de alguns defeitos primários, numa secção genérica do absorvedor, desenvolveu-se quatro modelos, utilizando-se a relação integral. Passa-se a apresentar os modelos desenvolvidos, suas aplicações e os resultados da simulação.

V.1. POSICIONAMENTO DO ABSORVEDOR FORA DA LINHA FOCAL

Ocasionalmente, a posição da linha de centro do absorvedor pode estar deslocada em relação à linha focal do refletor, devido a problemas de montagem e da estrutura do suporte do concentrador.

A influência deste defeito primário é estudada para casos com deslocamento do absorvedor no eixo x, como ilustra a Fig. V.1.

Devido à nova configuração imposta ao problema, as variáveis $r_{1,2}$, θ_n e θ_1 , envolvidas na relação integral, aplicáveis ao Caso Ideal, não são mais adequadas, tornando-se necessário redefiní-las.

Para determinar estas novas relações funcionais, é necessário definir mais duas variáveis, r_{fd} e α . A variável r_{fd} refere-se

De acordo com a Fig. V.2, as variáveis r_{fd} e α podem ser escritas como:

$$r_{fd}^2 = r_f^2 + Dx^2 + 2r_f Dx \cos \theta \quad (V.1)$$

e

$$\sin \alpha = \left(\frac{Dx}{r_{fd}} \right) \cdot \sin \theta \quad (V.2)$$

Assim, a partir de (V.1) e (V.2), as variáveis $r_{1,2}$, θ_n e θ_1 , são definidas como:

$$r_{1,2}^2 = Rabs^2 + r_{fd}^2 - 2r_{fd} Rabs \cos \Omega \quad (V.3)$$

onde

$$\Omega = [180^\circ - (\theta + \varphi - \alpha)] \quad (V.4)$$

assim como

$$\sin \theta_n = \left(\frac{r_{fd}}{r_{1,2}} \right) \cdot \sin \Omega \quad (V.5)$$

e

$$\theta_1 = \left[\frac{\theta}{2} \pm (\theta_n - \Omega) \right] - \alpha \quad (V.6)$$

onde a adição vale quando for satisfeita a desigualdade:

$$(180^\circ - \varphi - \theta + \alpha) < 0 \quad (V.7)$$

e a subtração em caso contrário, analogamente à relação desenvolvida na equação V.5.

As projeções y_1 e y_2 , que definem a função $F(\theta, y_0)$, e semi-eixo menor da elipse ($r_f^* \tan \phi_s$), permanecem definidas através dos quadros 4 e 5; porém, os pontos em planos auxiliares, deslocados paralelamente ao plano focal, passam a ser definidos por:

$$y_0 = Dx + Rabs \cos \varphi \quad (V.8)$$

$$y_d = Rabs \sin \varphi \quad (V.9)$$

Aplicando-se as relações (V.3), (V.5) e (V.6), juntam

te com as funções que vão determinar $F(\theta, y_0)$ e $(r_f^* \tan \phi_s)$ na relação integral, o perfil de concentração no absorvedor cilíndrico deslocado fica determinado.

V.1.1 - Regiões do Absorvedor Iluminadas pelo Refletor

Neste caso também foi adotado um procedimento análogo à aquele descrito na seção IV.3, Cap. IV. A finalidade deste procedimento também é a de economizar o tempo de computação do programa de cálculo utilizado. As relações que definem as regiões do absorvedor que podem ser iluminadas pelo refletor são bastante análogas às já desenvolvidas anteriormente e não serão repetidas aqui.

V.1.2 - Resultados da Simulação

Para esta configuração, obtiveram-se as distribuições de radiação para absorvedores com $R_{abs}/f = 0,005; 0,025$ e $0,125$ em refletores com ângulos de abertura de $75^\circ, 90^\circ$ e 115° ; os resultados são mostrados nas Figs. V.3 a V.5.

Dessas figuras pode-se notar que o efeito do deslocamento do absorvedor na direção do eixo x inicialmente tende a diminuir a região iluminada no absorvedor e tornar a distribuição de radiação mais uniforme no trecho iluminado.

Este efeito é observado para pequenos deslocamentos, como mostram os perfis para $Dx/f = 0,005$ e $0,010$ das figuras citadas; no entanto, quando estes desvios tornam-se da grandeza do raio absorvedor, o absorvedor passa a ficar numa região que não pode mais interceptar toda a radiação refletida em direção ao foco, fazendo reduzir ainda mais a região iluminada e causando uma distribuição completamente não uniforme, com uma redução dos picos de concentração, como mostram os perfis para $Dx/f = 0,050$ das figuras citadas.

As causas destes desvios podem ser melhor analisadas completando-se ao estudo da distribuição de radiação a variação do parâmetro Fração de Interceptação em função do deslocamento do absorvedor, que estão mostrados nas Figs. V.6 e V.7.

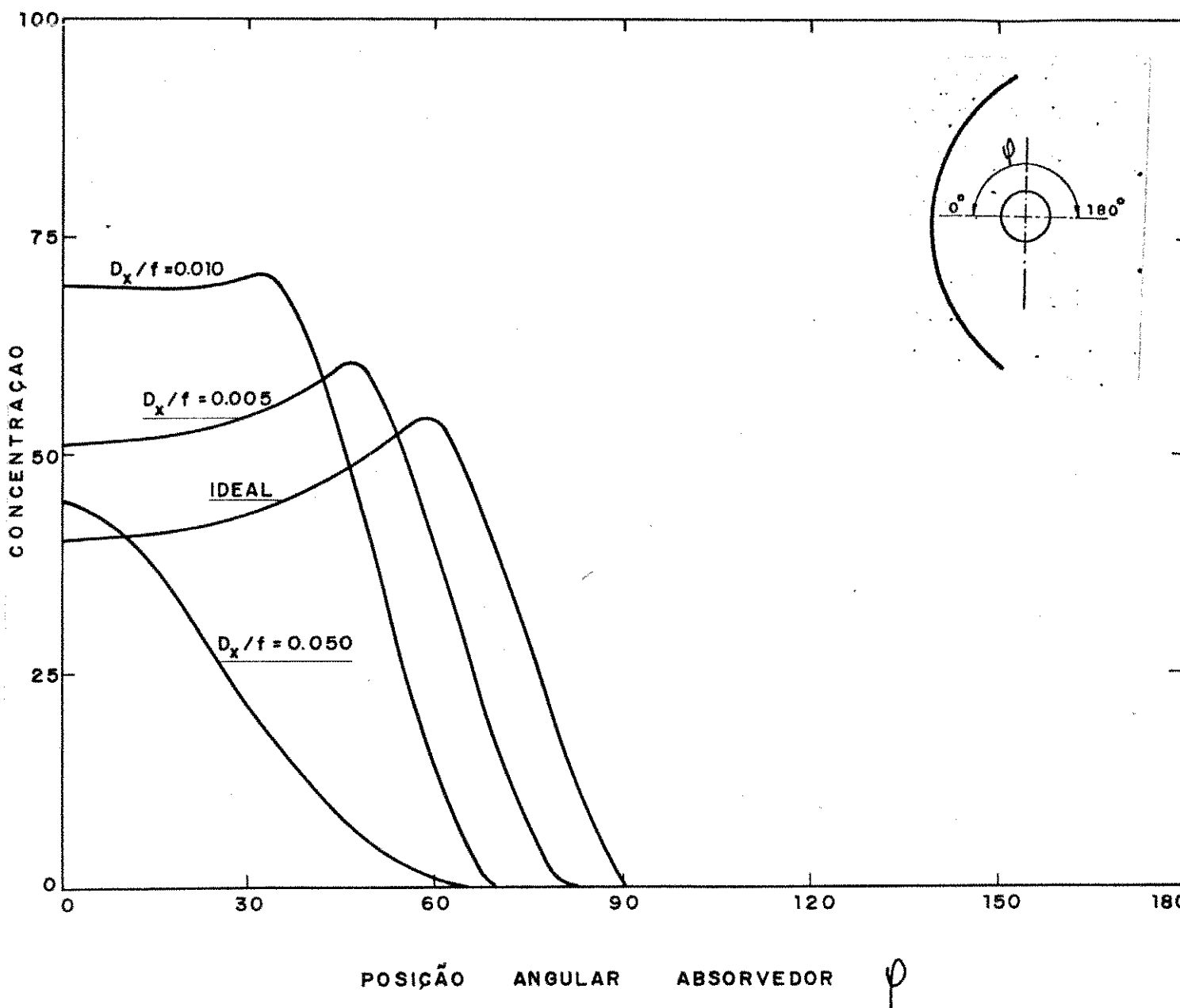


Fig. V.3 - Distribuição de radiação num absorvedor $R_{abs}/f = 0,025$ de um refletor com 75° de abertura, com deslocamento da linha focal (D_x/f)

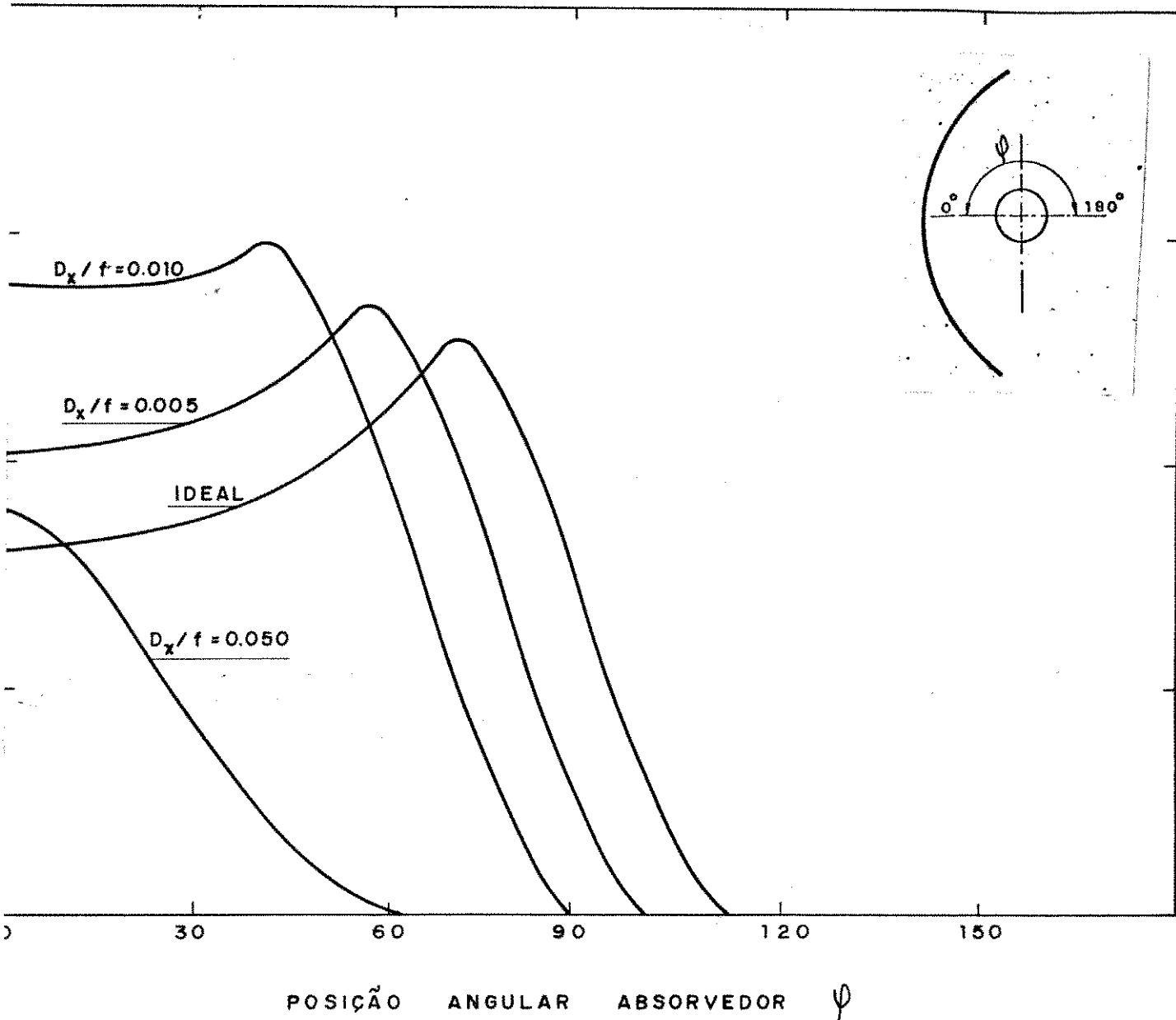


Fig. V.4 - Distribuição de radiação num absorvedor $R_{abs}/f = 0,025$ de um refletor com 90° de abertura, com deslocamento da linha focal D_x/f

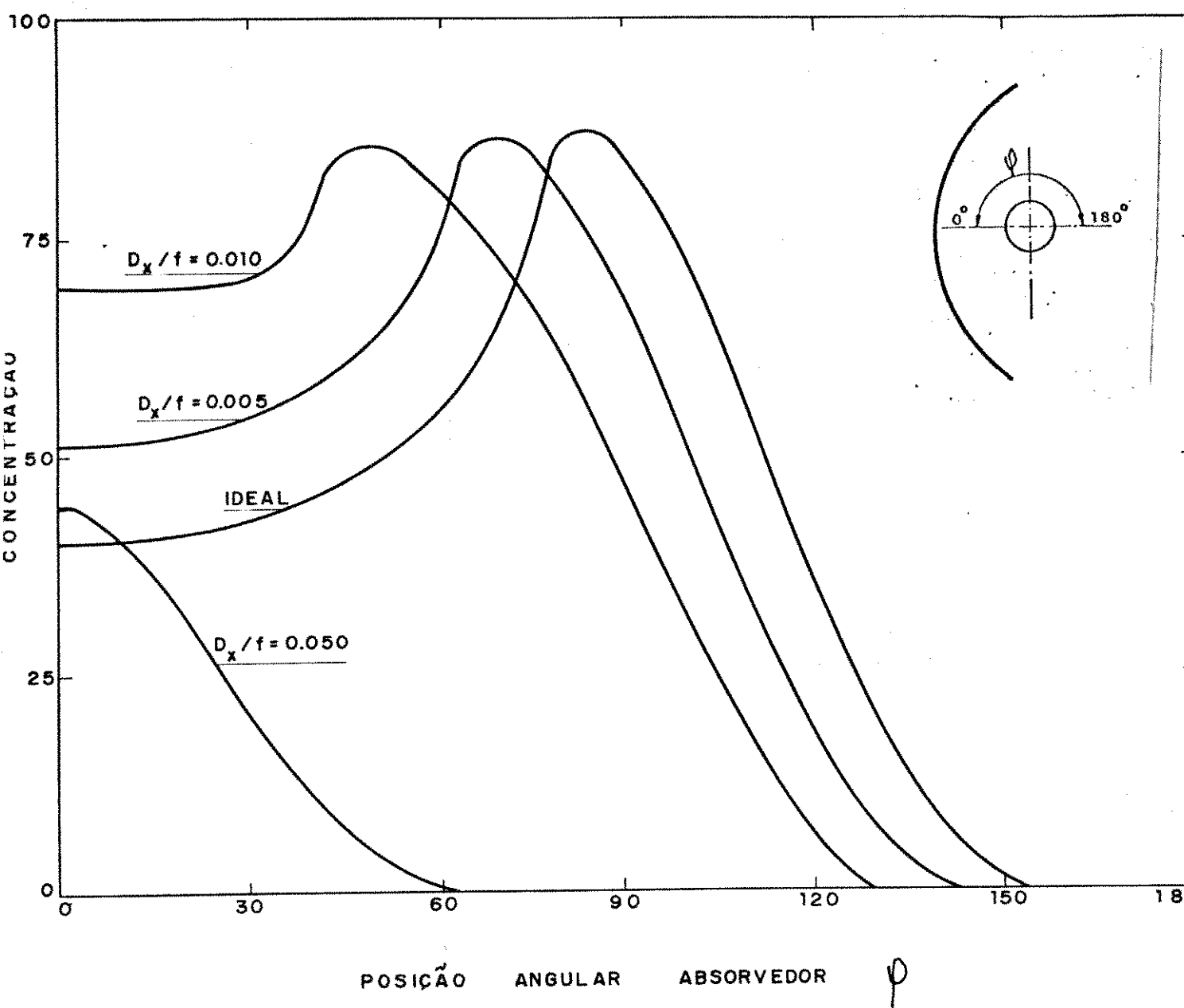


Fig. V.5 - Distribuição de radiação num absorvedor $R_{abs}/f = 0,025$ de um refletor com 115° de abertura, com deslocamento da linha focal D_x/f

Analisando-se a Fig.V.6, nota-se que se o raio do absorvedor for sensivelmente maior que o deslocamento, a fração de interceptação aproxima-se da fração interceptada para um absorvedor posicionado na linha focal. Para valores dimensionais do raio do absorvedor próximos do valor de deslocamento começa haver significativa redução que se acentua rapidamente na medida em que o deslocamento torna-se maior que o raio do absorvedor.

Através da Fig. V.7, pode-se concluir também que os efeitos do deslocamento do absorvedor são mais significativos no que tange a Fração Interceptada à medida em que se aumenta o ângulo de abertura do refletor.

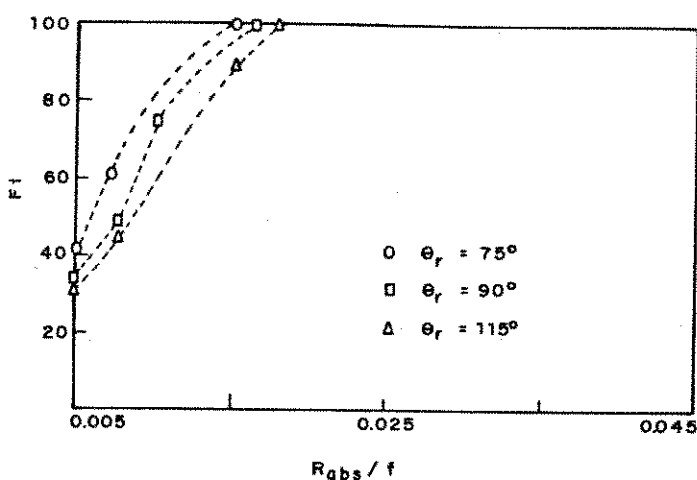


Fig. V.6 - Fração de Interceptação em função do raio do absorvedor deslocado $0,010f$

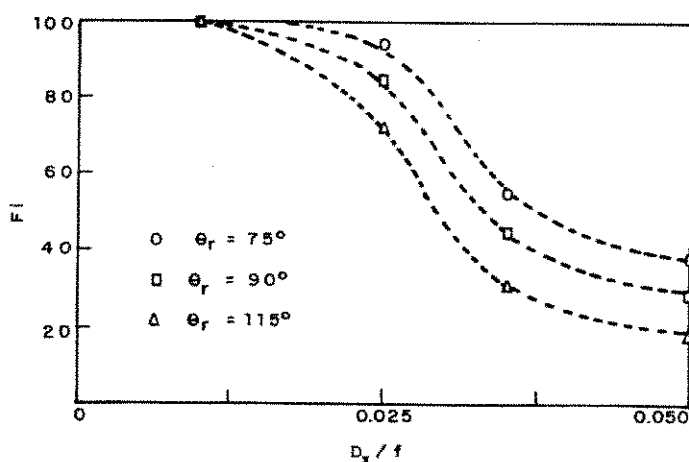


Fig. V.7 - Fração de Interceptação em função do deslocamento focal para absorvedores com $R_{abs}/f = 0,025$ em refletores com 75° , 90° e 115° de abertura

V.2. DESVIO DE APONTAMENTO

Os sistemas concentradores, por apertar somente com a componente direta da radiação solar, devem funcionar continuamente com a radiação incidente normal à área de abertura.

Para tanto, estes sistemas devem operar conjuntamente com um mecanismo que faz o acompanhamento do sol. Esse acompanhamento em geral não é perfeito nem uniforme, ocorrendo periodicamente um desvio máximo. A Fig. V.8 indica uma situação em que ocorre um desvio angular δ de apontamento ao centro do sol.

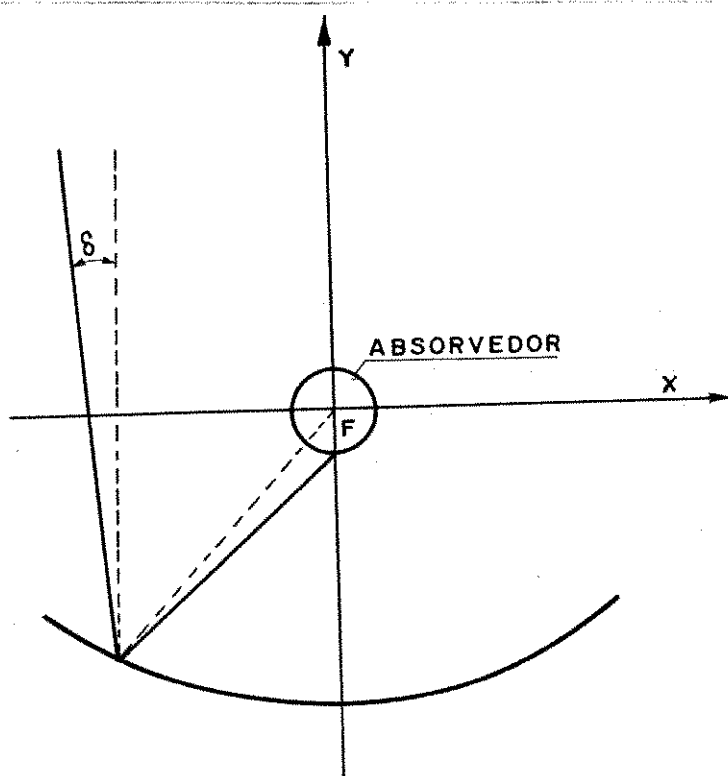


Fig. V.8 - Trajetória de um raio incidente com desvio δ

A influência desse desvio de apontamento solar na distribuição de radiação pode ser simulada através da relação integral.

A configuração esquematizada na Fig. V.8 não difere do caso ideal e assim as funções $r_{1,2}$; θ_n e θ_1 , aplicáveis na relação integral, se mantêm válidas e estão definidas pelas expressões (IV. 4), (IV. 5) e (IV. 6). Pela maneira como estão definidos nos quadros 4 e 5, o semi-eixo menor ($r_f^* \tan \phi_s$) e as projeções y_1 e y_2 são calculados de forma análoga mesmo quando a radiação incidente atingir a área de abertura com um desvio angular δ .

Nestas condições, o perfil de concentração foi determinado para absorvedores com $R_{abs}/f = 0,005$; $0,025$ e $0,125$ em refletores com ângulos de abertura de $\theta_r = 75^\circ$, 90° e 115° .

As Figs. V.9 a V.11 mostram o perfil de concentração para um absorvedor com $R_{abs}/f = 0,025$ operando em refletores com abertura de: 75° , 90° e 115° .

Nota-se primeiramente que a distribuição de radiação, que era simétrica em relação ao ângulo φ do absorvedor, passa a ser assimétrica com a introdução de um desvio δ de apontamento. Essa assimetria cresce com o ângulo de abertura do refletor.

O erro de apontamento causa também um maior espalhamento da radiação e um desvio pequeno acentua os picos de concentração, como mostram os perfis gerados para um desvio $\delta = 0,5^\circ$ nas figuras citadas.

Quando o desvio aumenta, o absorvedor passa a interceptar apenas uma parcela da luz refletida e isto evidentemente faz reduzir os picos de concentração, como mostram os perfis gerados para um desvio de $\delta = 1^\circ$ nas figuras citadas. Essa redução do fator de interceptação está indicada nas Figs. V.12 e V.13.

A Fig. V.12 mostra a variação do fator de interceptação com o erro de apontamento para um absorvedor com $R_{abs}/f = 0,025$ em refletores com ângulos de abertura de 75° , 90° e 115° . Através desta figura pode-se destacar que a fração de interceptação, para um dado refletor, decai com o aumento do erro de apontamento (δ). Os refletores com menores ângulos de abertura são menos susceptíveis a este efeito.

A Fig. V.13 mostra a variação do fator de interceptação em função do raio do absorvedor para refletores operando com $\delta = 0,5^\circ$ para três valores do ângulo de abertura. Pode-se notar que a fração de interceptação, para um dado refletor, aumenta com o aumento do raio do absorvedor, aproximando-se da condição de interceptação total. Confirmando a tendência das outras figuras, o valor necessário de (R_{abs}/f) para um fator de interceptação unitário cresce com o ângulo de abertura.

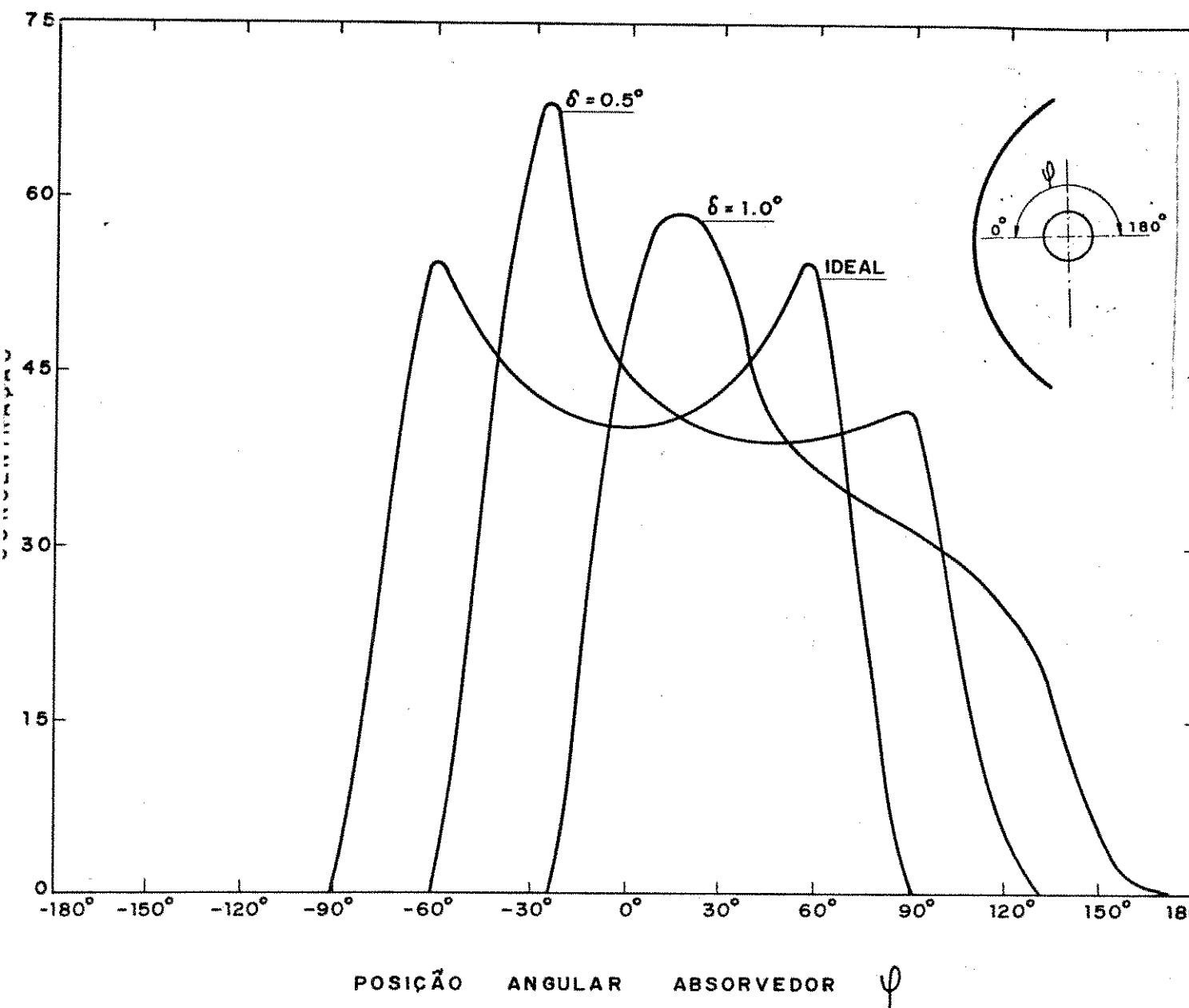


Fig. V.9 - Distribuição de radiação num absorvedor $R_{abs}/f = 0,025$ de um refletor com 75° de abertura, com desvio de a pontamento δ

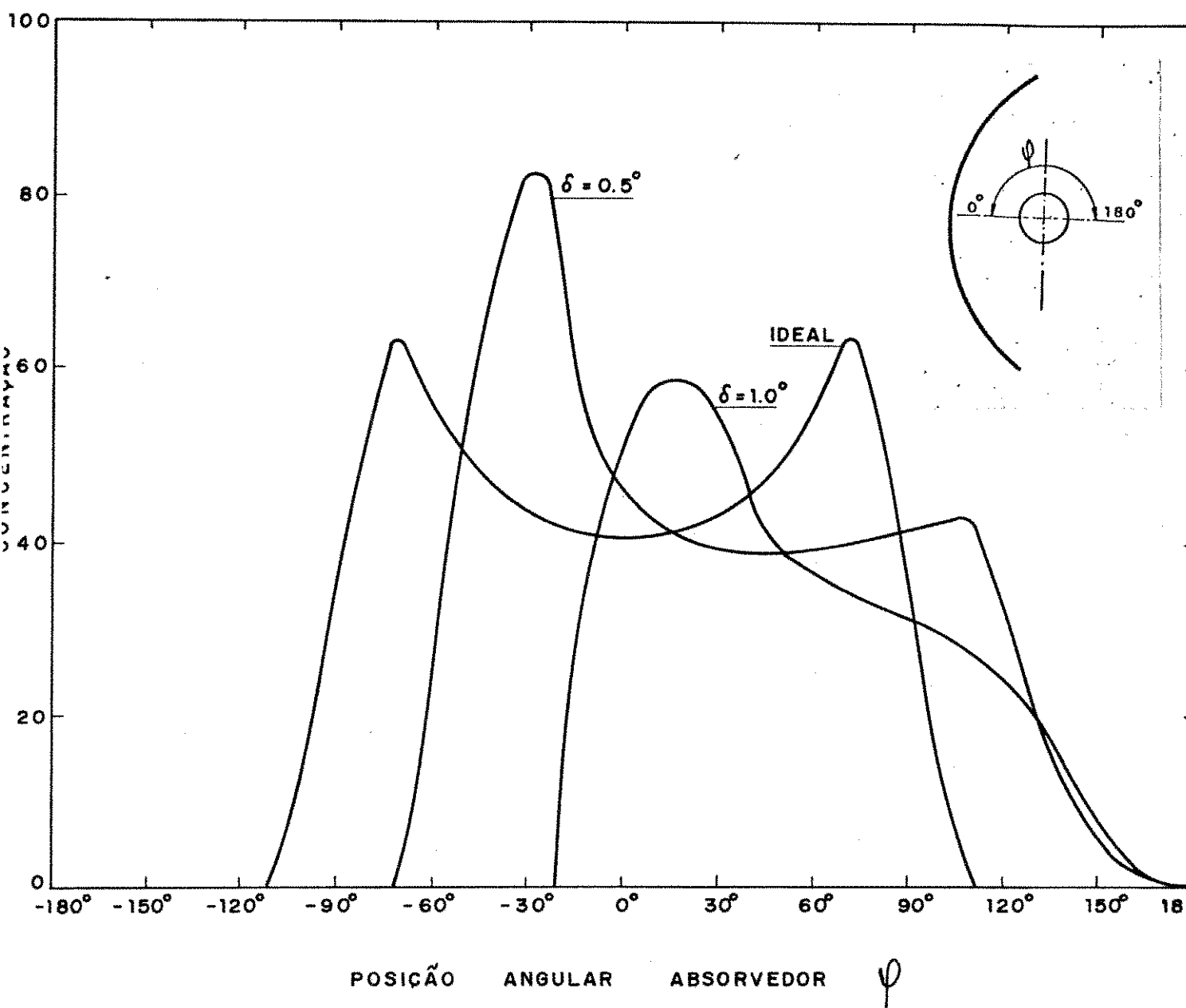


Fig. V.10 - Distribuição de radiação num absorvedor $R_{abs}/f = 0,025$ de um refletor de 90° de abertura, com desvio de apontamento δ

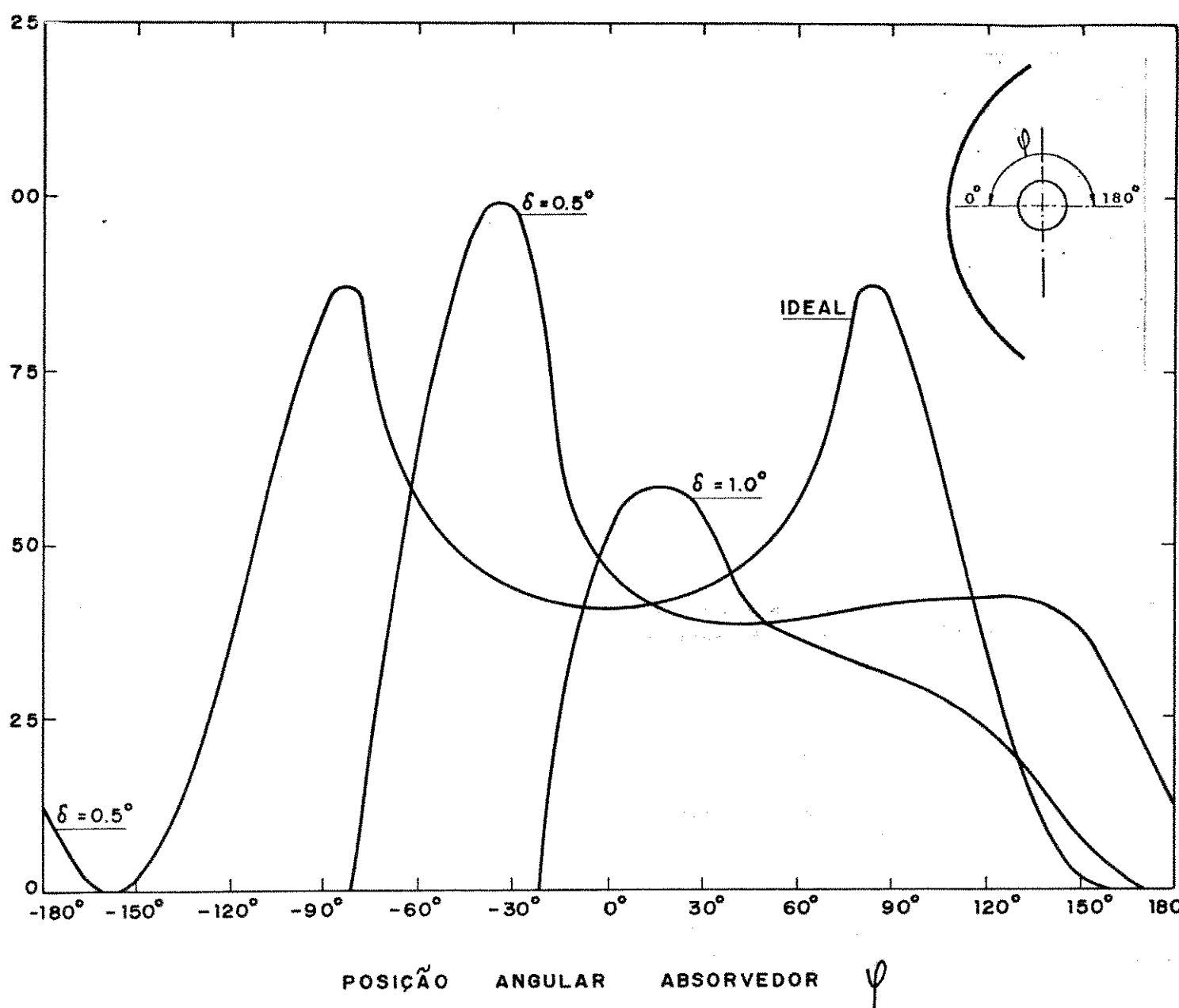


Fig. V.11 - Distribuição de radiação num absorvedor $R_{abs}/f = 0,025$ de um refletor com 115° de abertura, com desvio de a pontamento δ

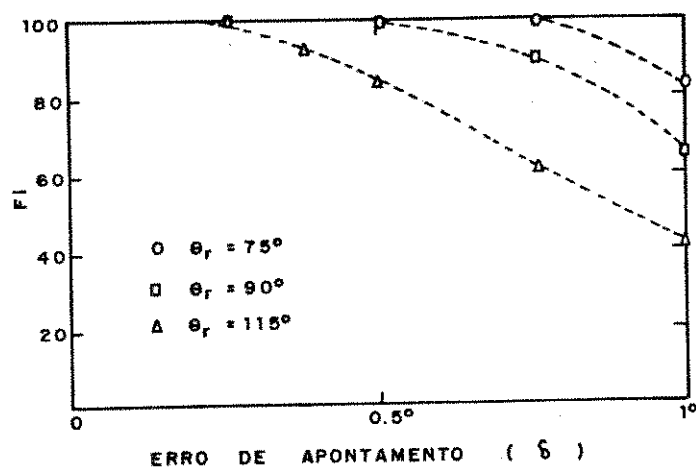


Fig. V.12 - Variação da fração de interceptação com o erro de apontamento para um absorvedor $R_{abs}/f = 0,025$ num refletor com 75° , 90° e 115° de abertura

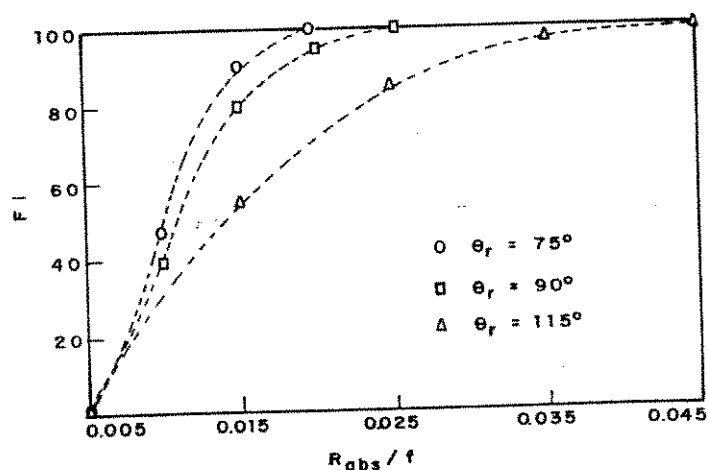


Fig. V.13 - Variação da fração de interceptação em função do raio do absorvedor para um refletor operando com $0,5^\circ$ de desvio de apontamento

V.3. REFLETOR COM DESVIO DE CURVATURA EM RELAÇÃO À SUPERFÍCIE PARABÓLICA

Os desvios de curvatura são pequenos desvios que o refletor pode apresentar da forma idealmente parabólica. Estes desvios dependem do processo de fabricação, de montagem e da estrutura de suporte do refletor.

A superfície refletora com desvio de curvatura passará a ser chamada de superfície degenerada.

No modelamento desenvolvido as superfícies degeneradas são caracterizadas por um fator ζ que quantifica a degeneração da superfície refletora, produzindo superfícies com curvaturas maiores ou menores que a superfície parabólica conforme mostra a Fig. V.14.

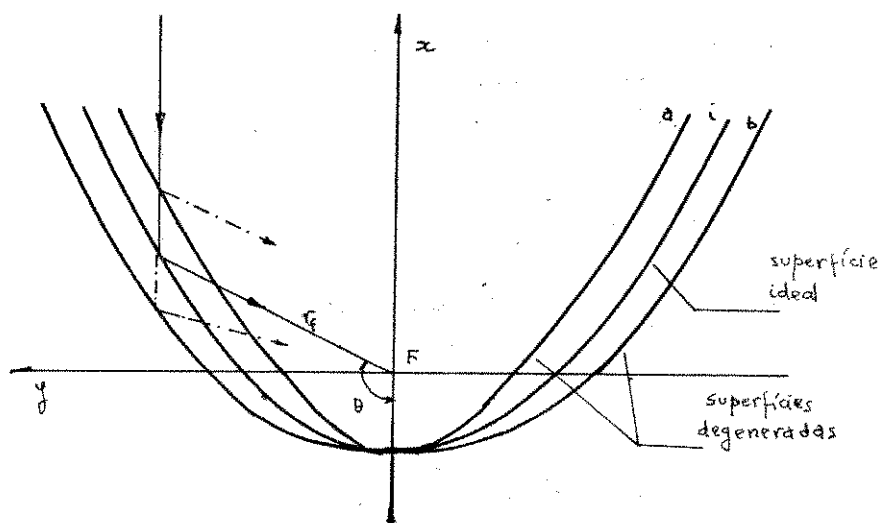


Fig. V.14 - Representação de superfície degenerada, curvas a e b e de superfície parabólica, curva i

As curvas das superfícies degeneradas serão indicadas neste trabalho por:

$$r_{fd} = \left(\frac{2f}{1 + \cos \theta} \right) + \theta^2 \zeta f \quad (V.10)$$

assumindo que os desvios aumentam com o aumento do ângulo de abertura. Neste modelo o fator ζ pode assumir valores positivos ou negativos gerando respectivamente superfícies com curvaturas menores ou maiores que a superfície com curvatura parabólica. Para valores de θ próximos de zero, as dimensões das superfícies degeneradas e ideal, assim como a curvatura destas, aproximam-se, sendo coincidentes na origem ($\theta = 0$).

No modelamento empregado, as funções $r_{1,2}$, θ_n e θ_1 utilizadas na relação integral, continuam a ser definidas pelas expressões (IV.4), (IV.5) e (IV.6), somente que r_f não é mais dado por (II.1), mas por (V.10), de acordo com o modelo de superfície degenerada adotado. Quanto ao semi-eixo menor ($r_f^* \tan \phi_s$) e as projeções y_1 e y_2 , eles podem permanecer definidos como estão nos quadros 4 e 5 se for utilizado o segmento r_{fd} e um novo artifício descrito a seguir.

Na posição θ do ângulo de abertura, a superfície degenerada caracteriza um ponto P , enquanto que uma superfície perfeitamente parabólica caracterizaria um ponto Q , como indicado na Fig. V.15. Nessa mesma posição angular, as superfícies refletoras degenerada e ideal possuem normais $\hat{n}_d$ e $\hat{n}_i$, que formam com a direção do eixo y ângulos α_d e α_i respectivamente, como mostrado na Fig. V.15.

Considera-se agora que se no ponto P o refletor fosse ideal, um feixe de luz solar que incidisse normalmente à área de abertura, teria seu raio central refletido na direção $\overline{PF}$, definindo o segmento r_{fd} . Devido à degeneração da superfície refletora o raio central refletido sofre entretanto um desvio angular δ_d , indicado na Fig. V.15, definindo assim o segmento $\overline{PR}$. O artifício utilizado consiste em considerar que o mesmo efeito de desvio angular (do segmento $\overline{PR}$) pode ser associado a uma causa distinta, ou seja, ao erro de apontamento do refletor ao disco solar, já estudado anteriormente. Neste caso, é necessário apenas correlacionar o ângulo de desvio δ_d a cada posição do ângulo θ de abertura e ao modelo adotado de degeneração da superfície refletora.

Inicialmente, o ângulo de desvio δ_d é expresso em função dos ângulos α_d e α_i anteriormente definidos:

$$\delta_d = 2(\alpha_d - \alpha_i) \quad (V.11)$$

ou seja, o raio refletido sofre um desvio angular duas vezes maior que o desvio das direções normais $\hat{n}_d$ e $\hat{n}_i$, representado pela diferença entre os ângulos α_d e α_i . O ângulo α_i , referente à direção normal da curva parabólica ideal é dado pela seguinte relação:

$$\tan \alpha_i = \left| \frac{1 + \cos \theta}{\sin \theta} \right| \quad (V.12)$$

O ângulo α_d , da superfície degenerada descrita pela equação (V.10) é obtida analogamente na forma

$$\tan \alpha_d = \frac{M \cdot \tan |\theta| + 1}{\tan |\theta| - M} \quad (V.13)$$

onde

$$M = \left| \frac{\frac{2 \sin \theta}{(1 + \cos \theta)^2} + 2\theta\zeta}{\frac{2}{1 + \cos \theta} + \theta^2\zeta} \right| \quad (V.14)$$

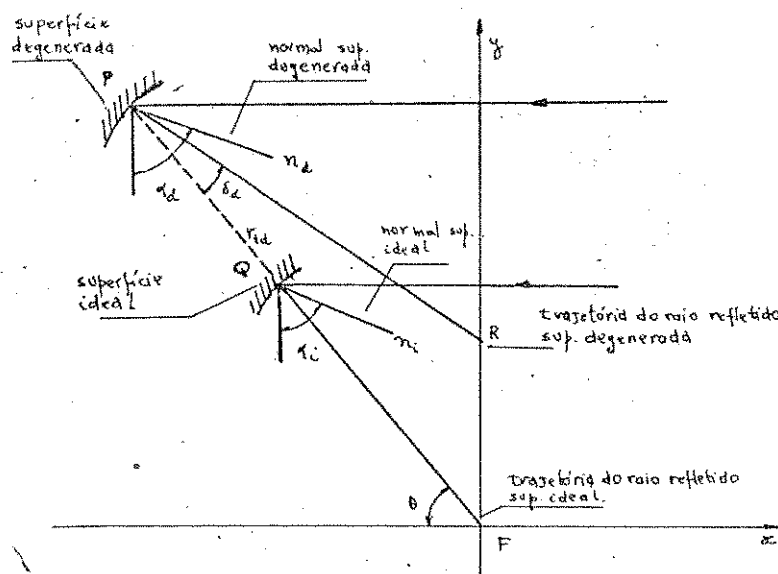


Fig. V.15 - Trajetória do raio refletido pela superfície ideal e degenerada ($\zeta > 0$)

Substituindo-se (V.12) e (V.13) em (V.11), obtêm-se o desvio δ_d associado às diferenças entre a curvatura da superfície ideal e degenerada.

Nota-se que para o modelo empregado, o fator ζ assumindo valores positivos gera superfícies refletoras com raio focal maior que o raio focal da superfície parabólica e consequentemente superfícies com curvaturas menores que a curvatura parabólica. Isto faz com que o desvio δ_d assumia valores maiores que zero. Este comportamento vale para posições angulares crescentes até próximas de 90° , onde nessa região a curvatura das superfícies se igualam produzindo desvios δ_d aproximadamente nulos. Para valores angulares de θ acima desta região, há uma inversão deste comportamento, passando a curvatura da superfície degenerada a ser maior que a parabólica e produzindo desvios δ_d menores que zero. Para as superfícies cujo fator ζ é menor que zero, o comportamento é análogo, porém de maneira inversa.

Os resultados da simulação foram obtidos para refletores com ângulos de abertura de 75° , 90° e 115° em absorvedores com razão $R_{abs}/f = 0,005$; $0,025$ e $0,125$.

As Figs. V.16 a V.18 mostram a distribuição de radiação para um absorvedor $R_{abs}/f = 0,025$ operando em refletores com a forma degenerada estudada, cujos ângulos de abertura são 75° , 90° e 115° respectivamente.

Nota-se que para superfícies onde o raio focal é maior que o raio da superfície parabólica, isto é, para valores de ζ positivo, há um maior espalhamento da radiação no absorvedor, havendo também um deslocamento para a direita do caso ideal do pico de concentração.

Já para as superfícies onde o raio focal é menor que o raio da superfície parabólica, isto é, quando ζ assume valores negativos, há um deslocamento do pico de concentração para a esquerda do caso ideal, próximo da origem. Neste caso, o espalhamento da radiação refletida no absorvedor cresce acentuadamente com o ângulo de abertura do refletor, embora o pico de concentração permaneça sempre próximo à origem do ângulo ϕ . Observa-se também neste caso que para ângulos de abertura maiores que 90° , pode ocorrer um segundo pico atenuado de concentração, mostrado na Fig. V.18.

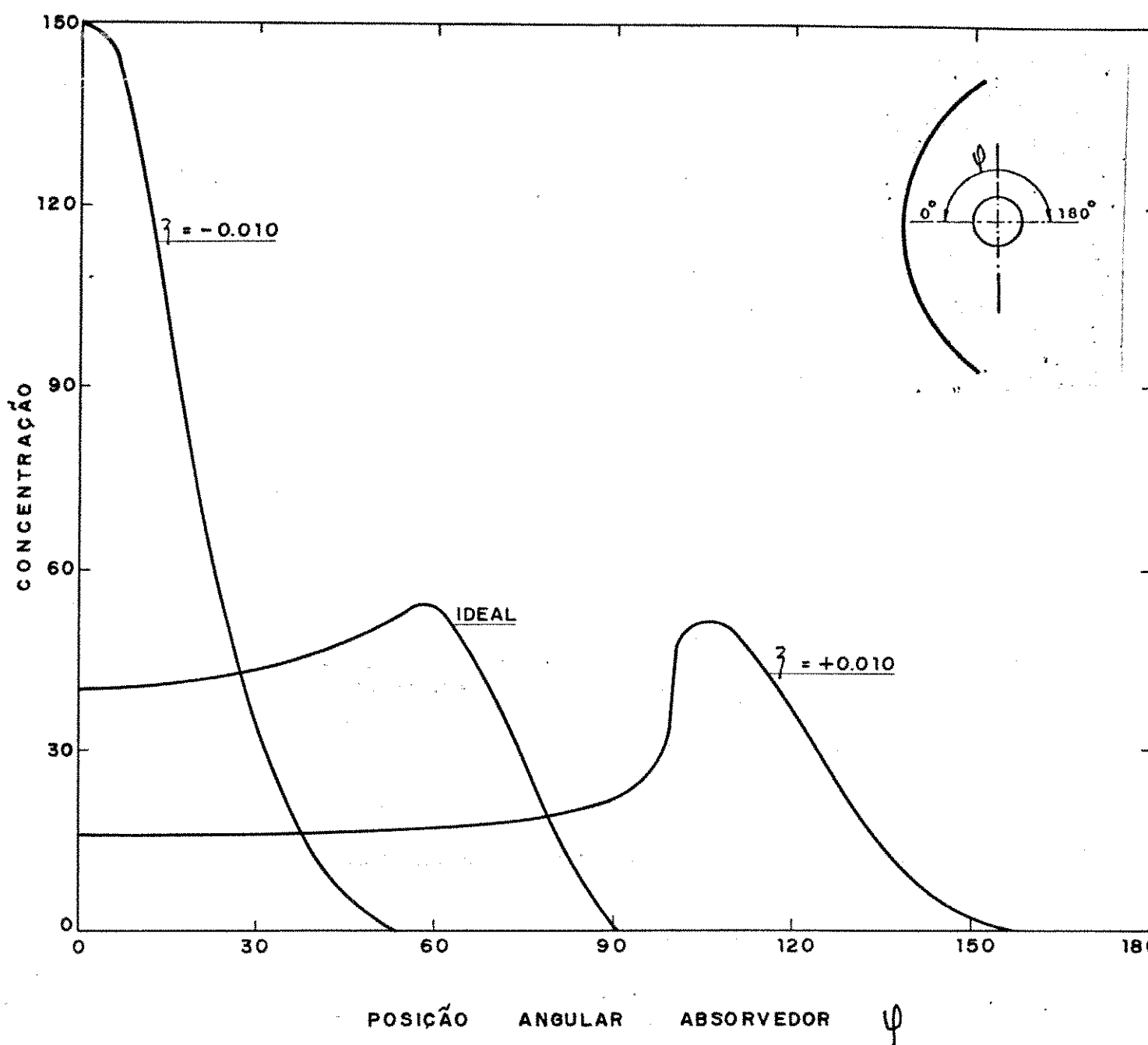


Fig. V.16 - Distribuição de radiação num absorvedor $R_{abs}/f = 0,025$ de um refletor com degeneração ζ cuja abertura é 75°

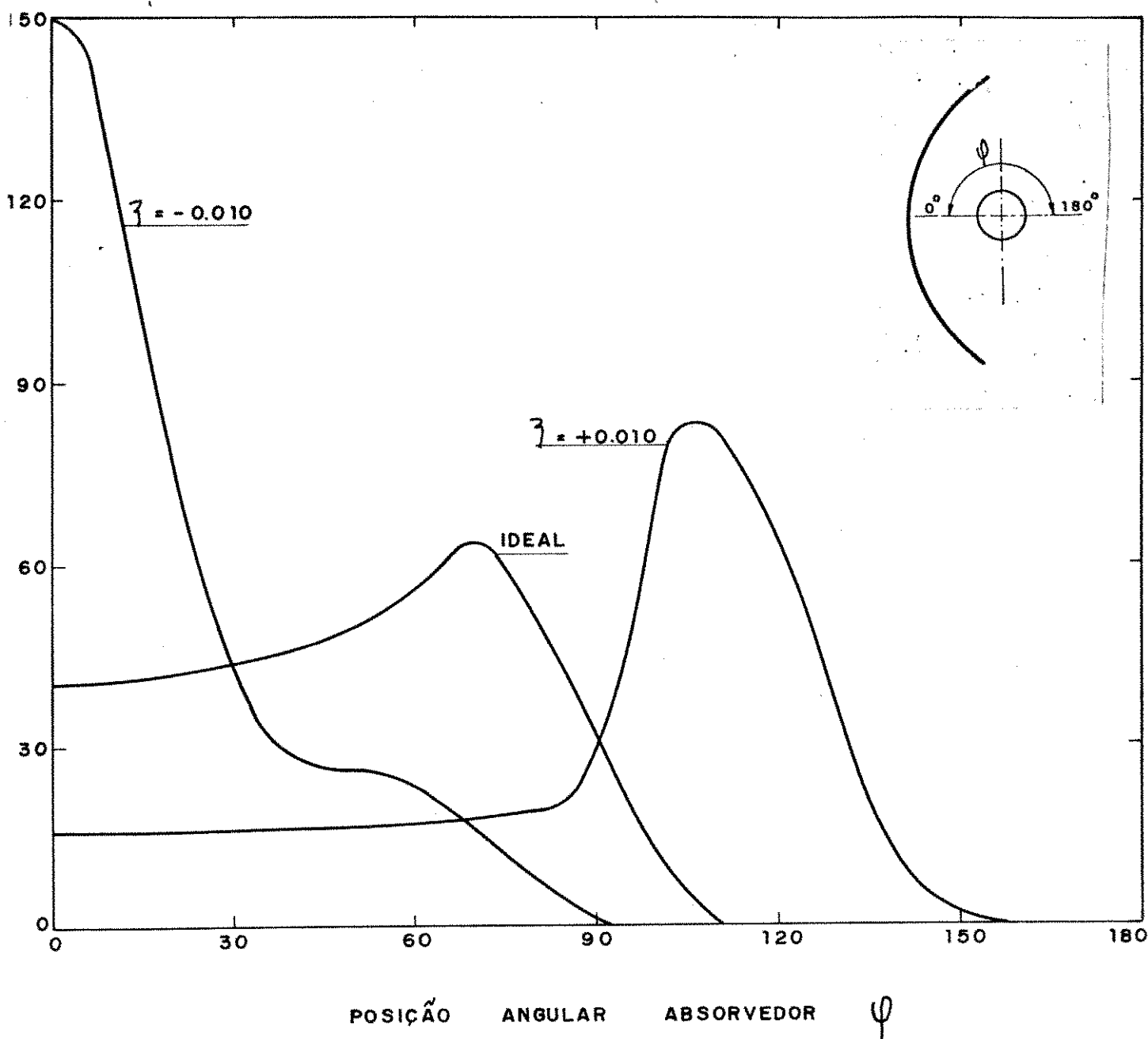


Fig. V.17 - Distribuição de radiação num absorvedor $R_{abs}/f = 0,025$ de um refletor com degeneração ζ cuja abertura é 90°

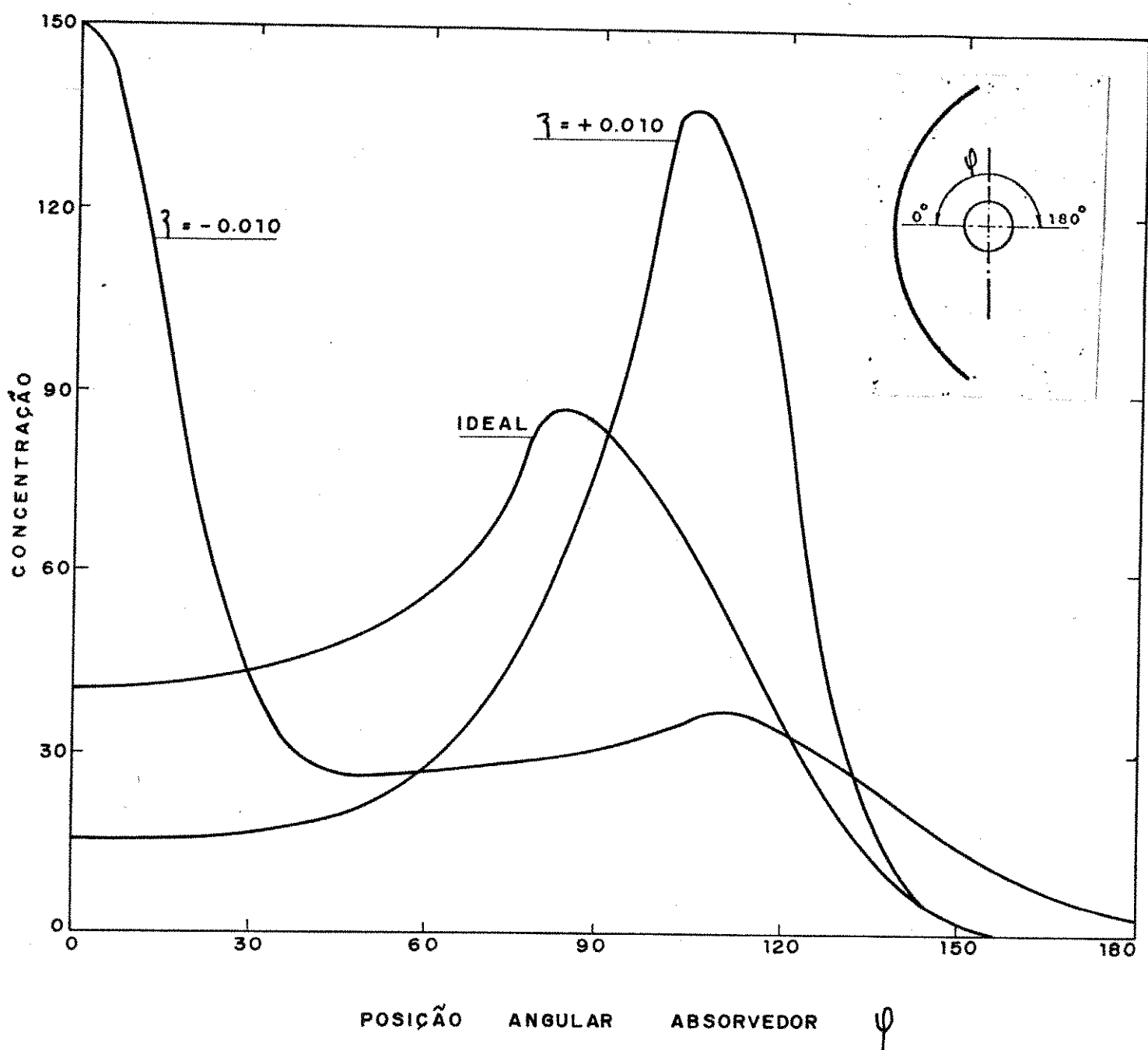


Fig. V.18 - Distribuição de radiação num absorvedor $R_{abs}/f = 0,025$ de um refletor com degeneração ζ cuja abertura 115°

Isto é consequência da mudança do sinal da variável δ_d , que ocorre por volta de 90° .

As Figs. V.19 e V.20 mostram a variação da Fração de Interceptação com o fator de degeneração ζ para três refletores com abertura de 75° , 90° e 115° . Nota-se que a Fração de Interceptação para um dado refletor, decai à medida em que ζ cresce em valor absoluto. Os refletores com maiores ângulos de abertura são menos influenciados por este defeito.

A Fig. V.21 mostra a variação da Fração de Interceptação em função do raio do absorvedor para três refletores com abertura de 75° , 90° e 115° , que apresentam um fator de degeneração de módulo $\zeta = 0,010$. Pelo fato das curvas do Fator de Interceptação da razão R_{abs}/f , praticamente se superporem para ζ positivo ou negativo, apresentou-se apenas três curvas na figura, devendo-se entender que para um dado ângulo de abertura do refletor, as curvas para $\zeta = 0,010$ e $\zeta = -0,010$ estão superpostas. Pode-se notar que o Fator de Interceptação para um dado refletor aumenta com o aumento da razão (R_{abs}/f) e também que para qualquer valor de (R_{abs}/f) o Fator de Interceptação aumenta com o ângulo de abertura.

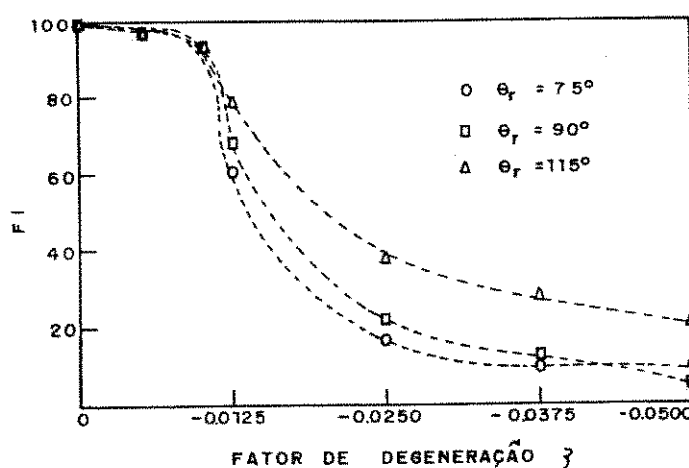


Fig. V.19 - Variação da Fração de Interceptação com o fator de degeneração ζ para um absorvedor $R_{abs}/f = 0,025$

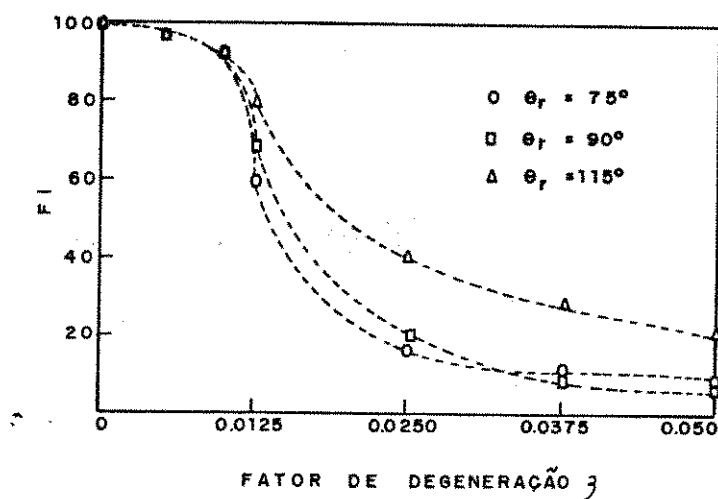


Fig. V.20 - Variação da Fração de Interceptação com o fator de degeneração ζ para um absorvedor $R_{abs}/f = 0,025$

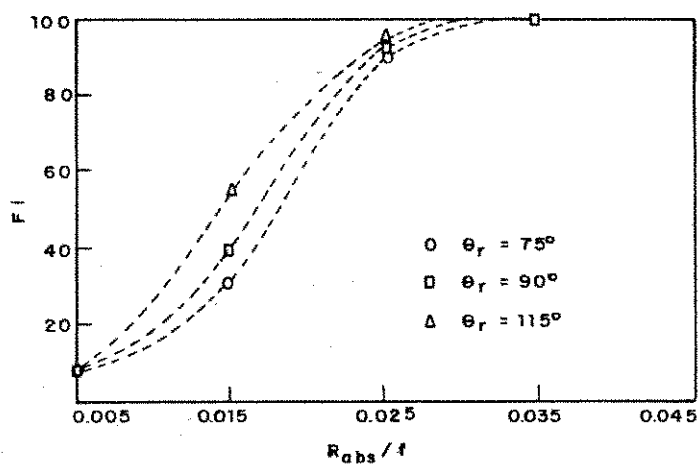


Fig. V.21 - Variação da Fração de Interceptação em função do raio do absorvedor para um refletor com degeneração de $\zeta = \pm 0,010$

V.4. REFLETOR COM DESVIO DE CURVATURA NORMALMENTE DISTRIBUÍDO

Uma alternativa do modelo de degeneração da superfície refletora adotado na secção anterior, descrito pela equação (V.10), é adotar uma superfície refletora imperfeita (com erros angulares distribuídos na superfície), como mostra a Fig. V.22. A natureza destas imperfeições é inerente a qualquer processo de fabricação do refletor.

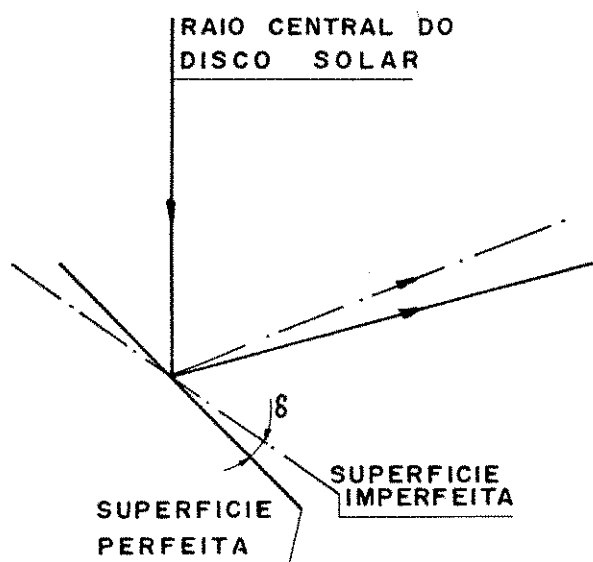


Fig. V.22 - Trajeto da reflexão dos raios na superfície perfeitamente parabólica e na superfície com erros angulares de superfície aleatoriamente distribuídos

Estas perturbações da forma geométrica do espelho, por estarem contidos numa estreita faixa de tolerância do refletor, não alteram o raio focal do refletor, dado pela expressão (II.1). Os desvios causados por estas imperfeições entretanto, são devidos a diferença angular existente entre a normal da superfície parabólica perfeita e a normal da superfície com imperfeições.

Por estas perturbações estarem acompanhando estreitamente a forma parabólica do refletor, assume-se que o desvio médio entre as normais seja nulo.

Na medida em que estes desvios estão densamente distri

buídos pelo refletor, assume-se que o seu conjunto tenda estatisticamente a uma distribuição normal. Neste caso, a cada posição do refletor é associado um desvio na direção normal da superfície ideal parabólica, no plano x-y, que independe dos desvios de pontos vizinhos na superfície do refletor. A associação de um desvio angular a cada ponto do refletor é feita então através de uma lei de distribuição normal.

O processo é realizado da seguinte forma: inicialmente, gera-se, associado a um ponto do refletor, um número aleatório no intervalo entre zero e um. Esse número é então associado a uma função de distribuição normal cumulativa com um valor pré-estabelecido do desvio padrão e com um valor médio nulo. Essa função associa a cada ponto do refletor um valor de desvio angular da normal à superfície.

Naturalmente, o processo fornece resultados aleatórios cada vez que é utilizado, devido à sua própria natureza, mas a distribuição dos desvios angulares tende estatisticamente a uma distribuição normal.

Após esse passo, com os desvios angulares associados a cada ponto do refletor, utiliza-se um procedimento análogo ao adotado na seção anterior, ou seja, de associação com um efeito de erro de apontamento ao sol. Neste caso, as relações para $r_{1,2}$, θ_n e θ_1 , $F(\theta, y_0)$ e $(r_f^* \tan \phi_s)$ são definidas pelas equações (IV.4), (IV.5) e (IV.6) e pelos quadros 4 e 5 do Capítulo III.

Das Figs. V.23 a V.25 nota-se um forte comprometimento entre o desvio padrão adotado e a distribuição de radiação. Esta distorção substancial da forma do perfil e redução dos picos de concentração é atribuída à distribuição normal dos desvios da superfície refletora. Nota-se que à medida em que as perturbações da superfície refletora crescem, ou seja, o desvio padrão da distribuição aumenta, as formas dos perfis de radiação também se alteram, chegando a assumir formas completamente distorcidas onde os picos estão atenuados e a radiação está mais espalhada, como mostra o perfil para $\sigma = 0,5^\circ$ nas figuras citadas.

Devido ao caráter aleatório da distribuição, ela caracteriza apenas uma seção transversal do absorvedor, mas não representa a distribuição média no absorvedor. A fim de se tentar obter uma

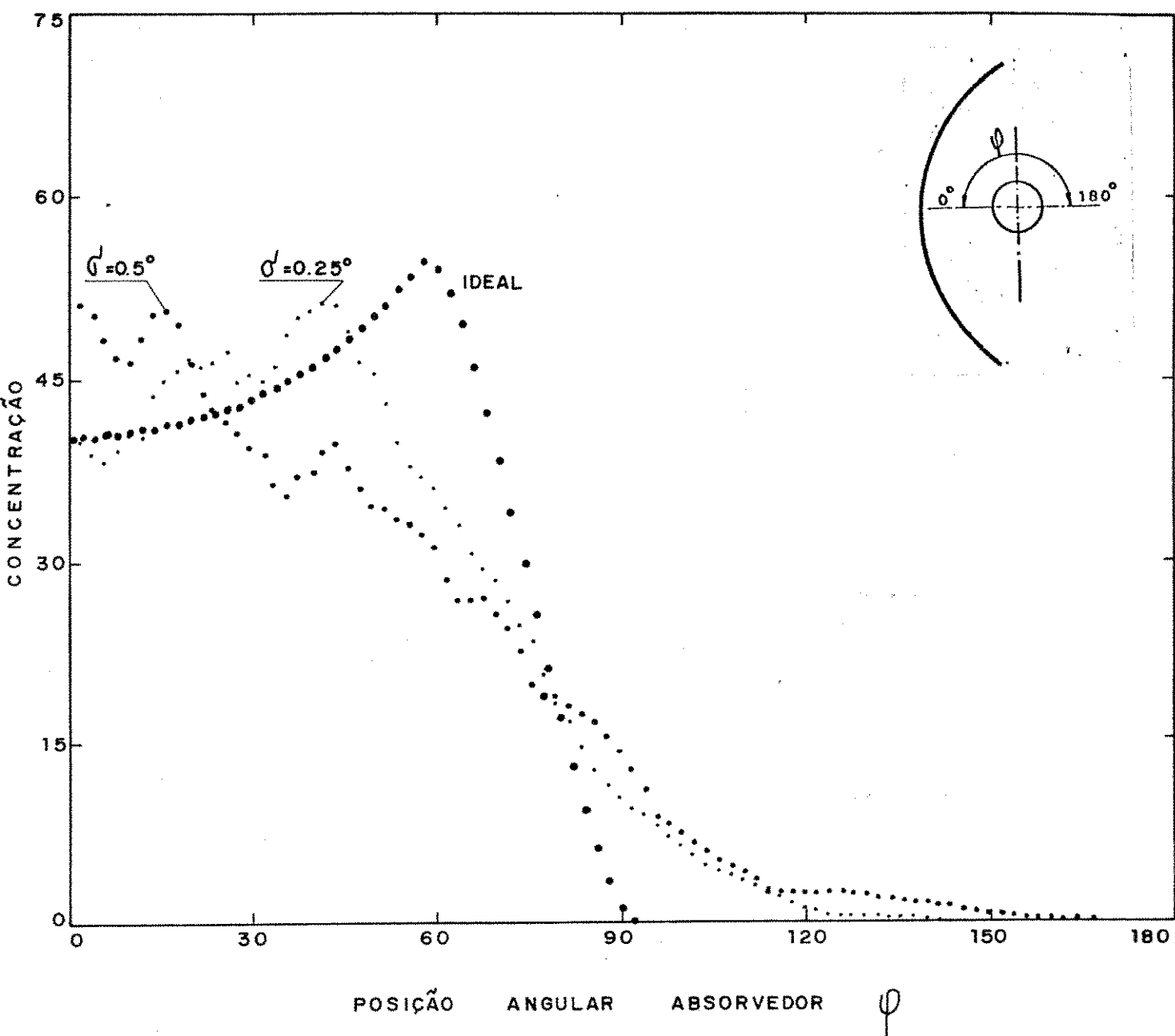


Fig. V.23 - Distribuição de radiação numa secção do absorvedor de $R_{abs}/f = 0,025$ onde o refletor, com $\theta_r = 75^\circ$, possui desvios normalmente distribuídos com um desvio padrão σ

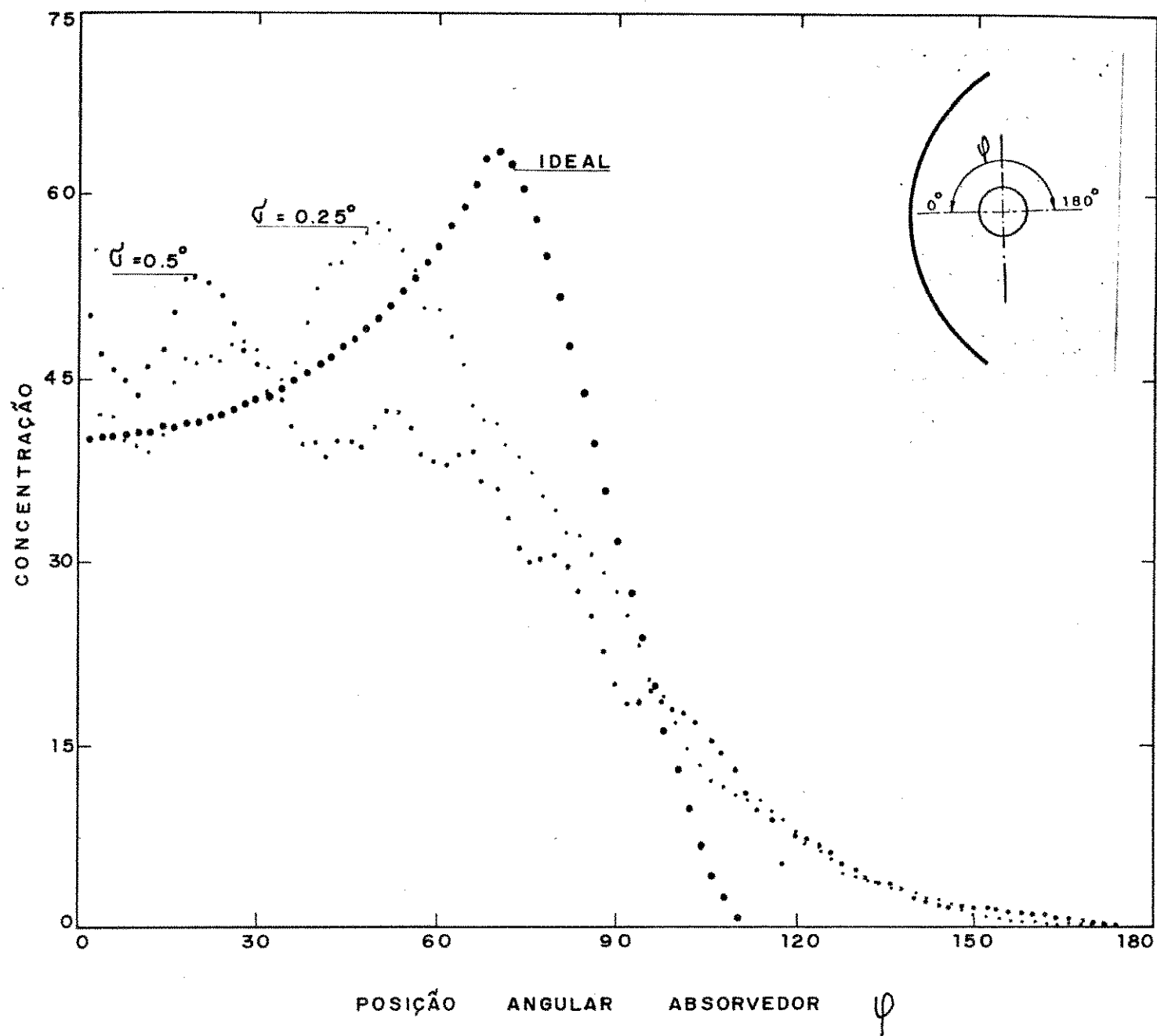


Fig. V.24 - Distribuição de radiação numa secção do absorvedor de $R_{abs}/f = 0,025$ onde o refletor, com $\theta_r = 90^\circ$, possui desvios normalmente distribuídos com um desvio padrão σ

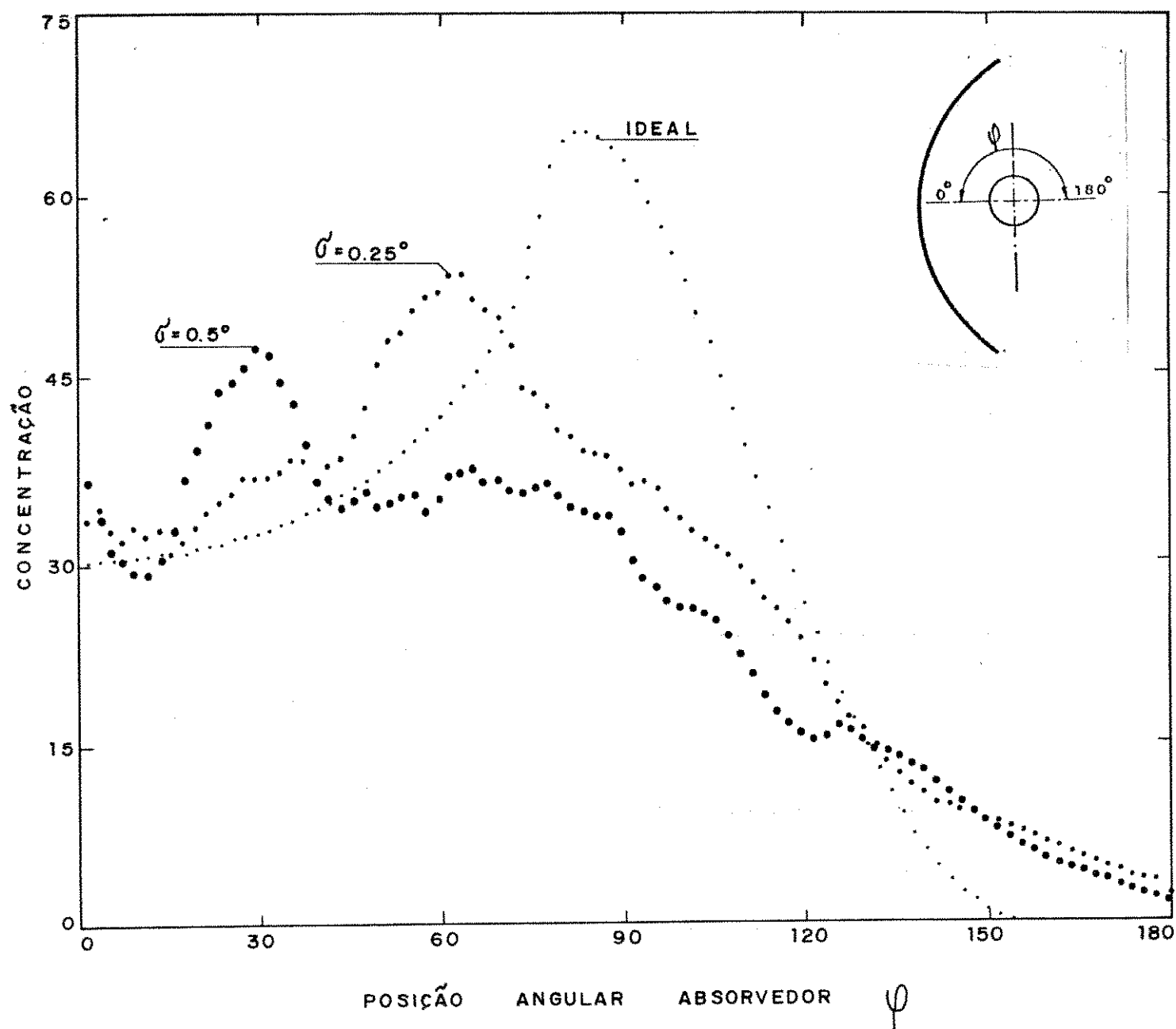


Fig. V.25 - Distribuição de radiação numa secção do absorvedor de $R_{abs}/f = 0,025$ onde o refletor, com $\theta_r = 115^\circ$, possui desvios normalmente distribuídos com um desvio padrão σ

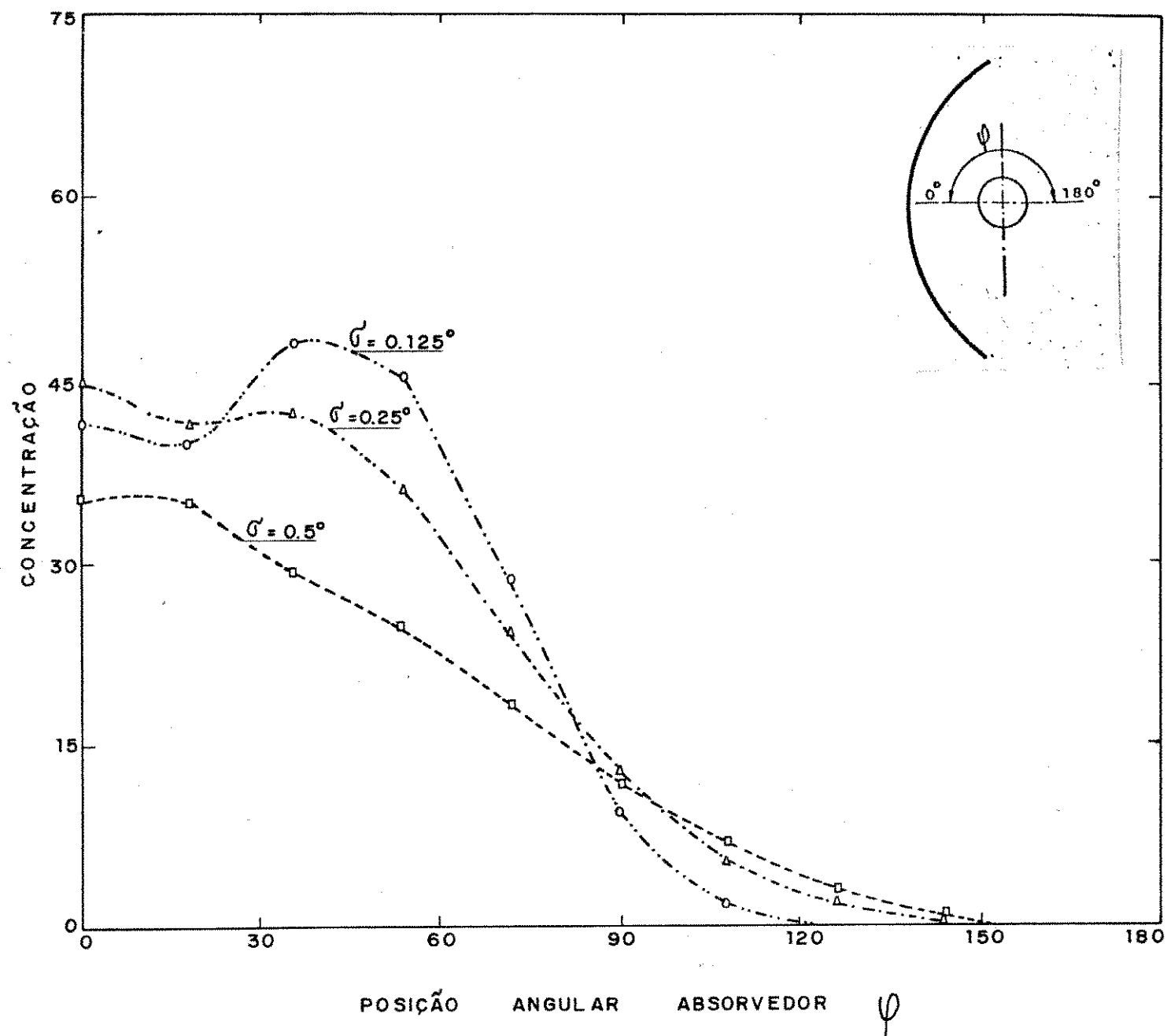


Fig. V.26 - Distribuição de radiação média ao longo do absorvedor de $R_{abs}/f = 0,025$ onde o refletor, com $\theta_r = 75^\circ$, possui desvios normalmente distribuídos com um desvio padrão σ

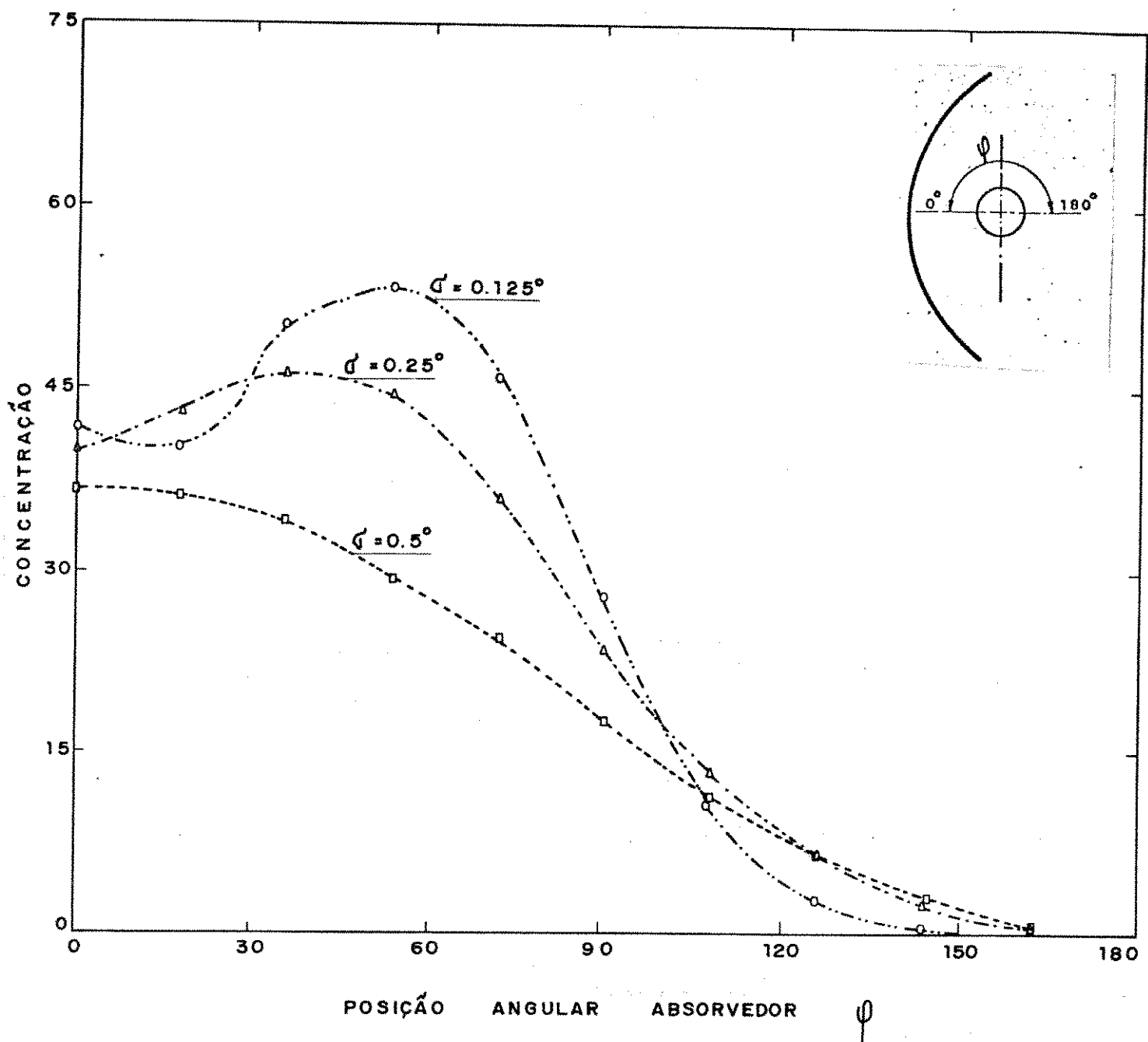


Fig. V.27 - Distribuição de radiação média ao longo do absorvedor de $R_{abs}/f = 0,025$ onde o refletor, com $\theta_r = 90^\circ$, possui desvios normalmente distribuídos com um desvio padrão σ

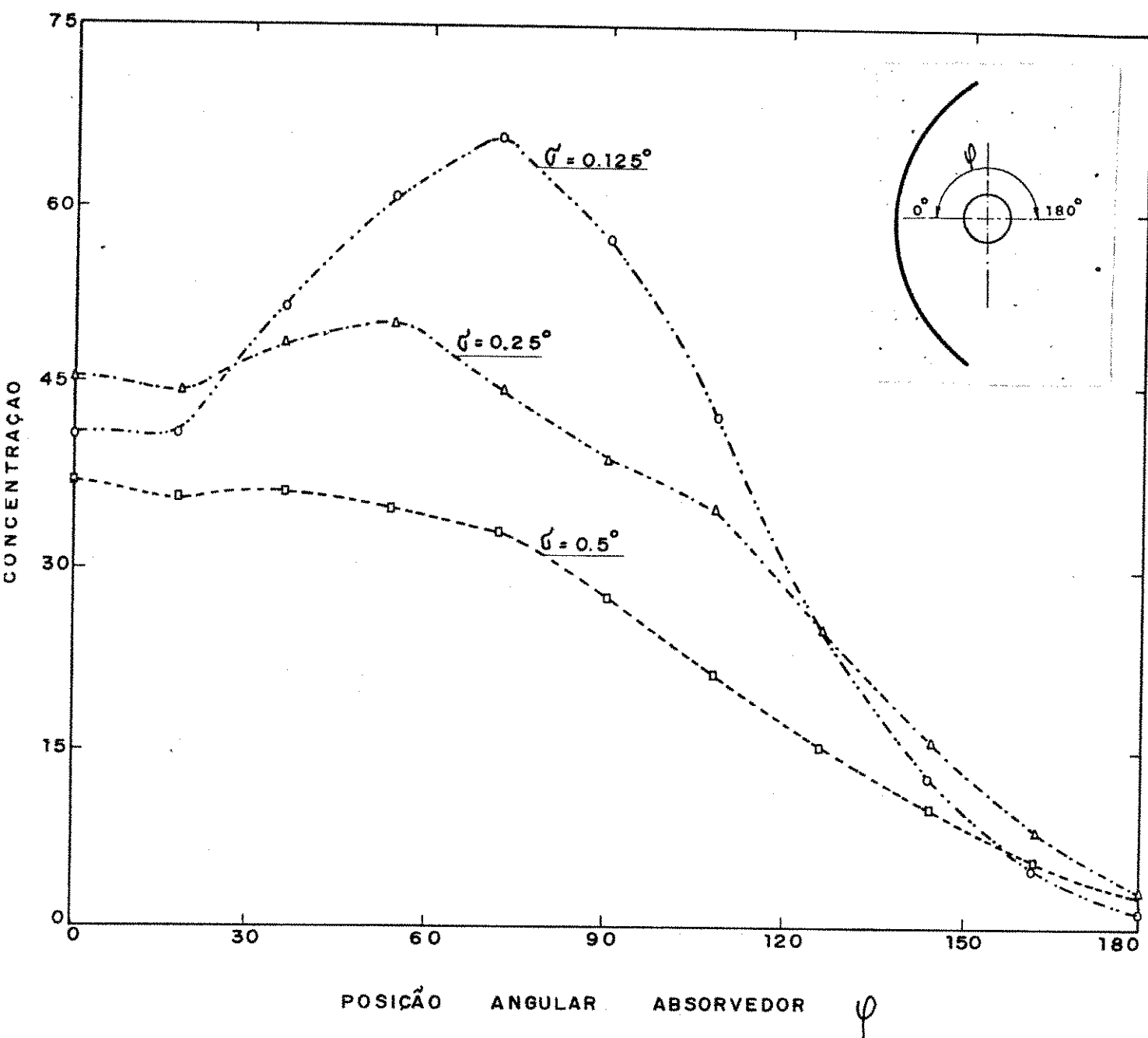


Fig. V.28 - Distribuição de radiação média ao longo do absorvedor de $R_{abs}/f = 0,025$ onde o refletor, com $\theta_r = 115^\circ$, possui desvios normalmente distribuídos com um desvio padrão σ

distribuição média, repetiu-se esta operação vinte vezes, distintamente, extraíndo-se a concentração média local.

Os resultados da distribuição média para um absorvedor com $R_{abs}/f = 0,025$ em três refletores com abertura de 75° , 90° e 115° estão mostrados nas Figs. V.26 a V.28. Os valores médios obtidos nestas três figuras indicam um decaimento ainda maior da concentração do que no caso de uma única simulação, embora as curvas obtidas apresentem, devido à sua natureza de efeito médio, variações mais suaves.

V.5. COMENTÁRIOS A CERCA DAS APLICAÇÕES DOS MODELOS

Os quatro casos estudados da distribuição de radiação no absorvedor foram desenvolvidos especificamente para três defeitos primários, a saber: centro do absorvedor fora da linha focal, erro de apontamento solar e imperfeições do refletor, além disso, efeitos de sombreamento do refletor pelo tubo absorvedor também foram considerados.

É possível simular outros defeitos através dos modelos já desenvolvidos, quando eles implicarem num efeito análogo na imagem produzida no absorvedor.

Como foi visto, os modelos apresentados determinam o perfil de concentração em uma secção genérica do absorvedor. Este perfil entretanto pode não ser representativo da distribuição de radiação em todo o comprimento do tubo absorvedor. Por exemplo, se a linha de centro do tubo absorvedor e a linha focal do refletor de finirem um ângulo entre si, então a distribuição de radiação no absorvedor variará em cada secção, sendo função da distância local entre essas duas linhas.

CAPÍTULO VI

COMENTÁRIOS E CONCLUSÕES FINAIS

O método integral desenvolvido permite simular a distribuição de radiação em absorvedores cilíndricos e com diversos defeitos primários.

Admitiu-se, na apresentação dos resultados, que a refletância e a absortância solares respectivamente do refletor e do absorvedor do coletor fossem unitários e independentes da direção de incidência dos raios solares. Não foi considerado o efeito da superfície refletora estar coberta por uma camada protetora de vidro ou plástico.

Os resultados obtidos das simulações realizados permitem algumas conclusões gerais que serão tratadas a seguir.

Pode-se ter como regra geral que o aumento da razão (R_{abs}/f) traz uma atenuação dos picos de concentração devido ao aumento relativo da área do absorvedor.

Viu-se que a distribuição de radiação é fortemente dependente dos defeitos primários simulados. À medida que os parâmetros que simulam tais defeitos aumentam, os perfis de radiação obtidos vão se afastando do perfil gerado em condições ideais trazendo também uma diminuição do Fator de Interceptação. No entanto, certos defeitos, em condições controladas, podem ser desejáveis. Como exemplo, nota-se através das Figs. V.3 a V.5, que pequenos deslocamentos do absorvedor produzem uma distribuição de radiação mais uniforme numa menor porção angular do absorvedor sem diminuir o Fator de Interceptação. Efeito similar pode ser obtido em refletores com curvaturas menores que a curvatura parabólica, como mostrado nas Figs. V.16 a V.18 de ζ negativo, onde a radiação fica concentrada de maneira não uniforme, numa porção angular menor que a região iluminada no caso ideal, sem necessariamente diminuir o Fator de Interceptação.

Pode-se concluir também a respeito das superfícies degeneradas que é preferível obter-se curvaturas menores que as parabólicas do que curvaturas maiores.

Quanto aos efeitos de desvios de acompanhamento do movimento solar é sempre desejável que sejam mínimos pelo fato de que destroem a simetria da distribuição de radiação numa maior porção deixando-a mais espalhada no absorvedor, como indicado nas Figs.

V.9 a V.11 , ao mesmo tempo os erros de apontamento constituem um fator operacional que geralmente causa uma diminuição do Fator de Interceptação.

Finalmente, os desvios de curvatura assumidos normalmente distribuídos no refletor fazem com que a concentração média de radiação no absorvedor seja reduzida, de maneira mais pronunciada à medida em que o desvio padrão da distribuição aumenta.

O desempenho real de um coletor do tipo analisado vai depender em princípio da distribuição de radiação solar que o absorvedor recebe do refletor. Assim, apesar de todas as hipóteses utilizadas neste trabalho, os efeitos dos parâmetros analisados são suficientemente claros e pronunciados para permitir conclusões úteis tanto ao desempenho quanto ao projeto desses coletores.

REFERÊNCIAS

1. LÖF, G.O.G.; FESTER, D.A. e DUFFIE, J.A., "Energy Balances on a Parabolic Cylinder Solar Collector", J. of Engineering for Power, Trans. ASME, Series A, Vol. 84, Jan, 1962, pp. 24-32.
2. LÖF, G.A.G. e DUFFIE, J.A., "Optimization of Focusing Solar-Collector Design", J. of Engineering for Power, Trans. ASME, Series A, Vol. 85, July 1963, pp. 221-228.
3. EVANS, D.L., "On the Performance of Cylindrical Parabolic Solar Concentrators with Flat Absorbers", Solar Energy, Vol. 19, nº 4, 1977, pp. 379-385.
4. MAZUR, P., "Determination of Focusing Properties of Solar Collectors by an Integral Formula", Solar Energy, Vol. 6, nº 1, 1962, pp. 23-26.
5. HARRIS, J.A. e DUFF, W.S., "Focal Plane Flux Distributions Produced by Solar Concentrating Reflectors", Solar Energy, Vol. 27, nº 5, 1981, pp. 403-411.
6. GANZAROLI, M.M., "Análise Térmica de um Coletor Cilíndrico-Parabólico", Tese de Mestrado, DEM, UNICAMP, 1982.

APÊNDICE I

IMAGEM DO DISCO SOLAR

A determinação do fluxo de energia na abertura do refletor, Φ_{ab} , é feita aplicando-se a equação (II.3) do Capítulo II. Assim, baseando-se na Fig. A.1, pode-se escrever:

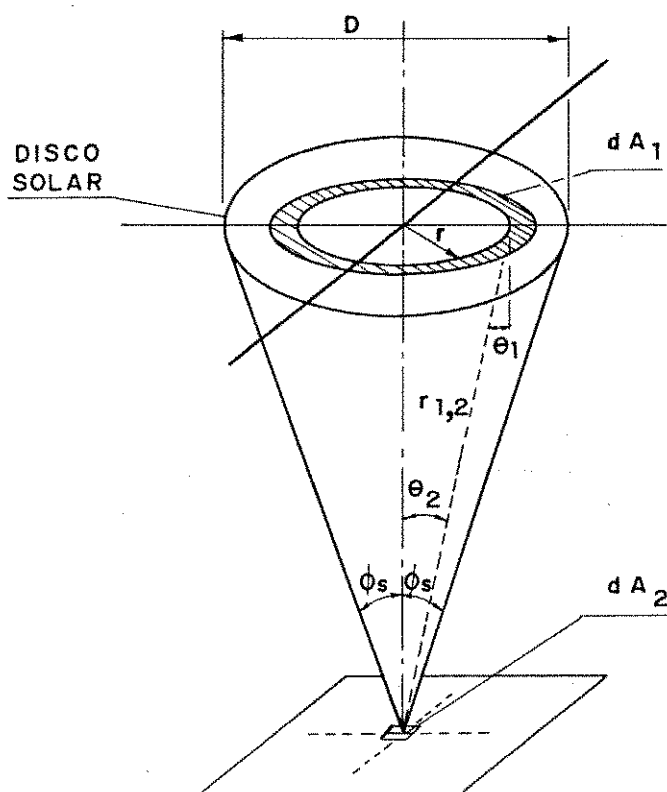


Fig. A.1 - Imagem do Disco Solar

$$d\Phi_{ab} = i_s \frac{\cos\theta_2 \cos\theta_1}{r_{1,2}^2} dA_1 \quad (A.1)$$

note que $\theta_1 = \theta_2 = \theta$, assim a distância $r_{1,2}$ e o elemento de área dA_1 podem ser postos na forma:

$$r_{1,2} = (D/\cos\theta) \quad (A.2)$$

$$dA_1 = \frac{2\pi D^2 \tan\theta \, d\theta}{\cos^2\theta} \quad (A.3)$$

Substituindo-se (A.2) e (A.3) em (A.1) e integrando-se a expres
são em todo disco solar:

$$\Phi_{ab} = i_s \pi \int_0^{\phi_s} \sin 2\theta \, d\theta \quad (A.4)$$

tem-se o fluxo de energia na área de abertura do refletor:

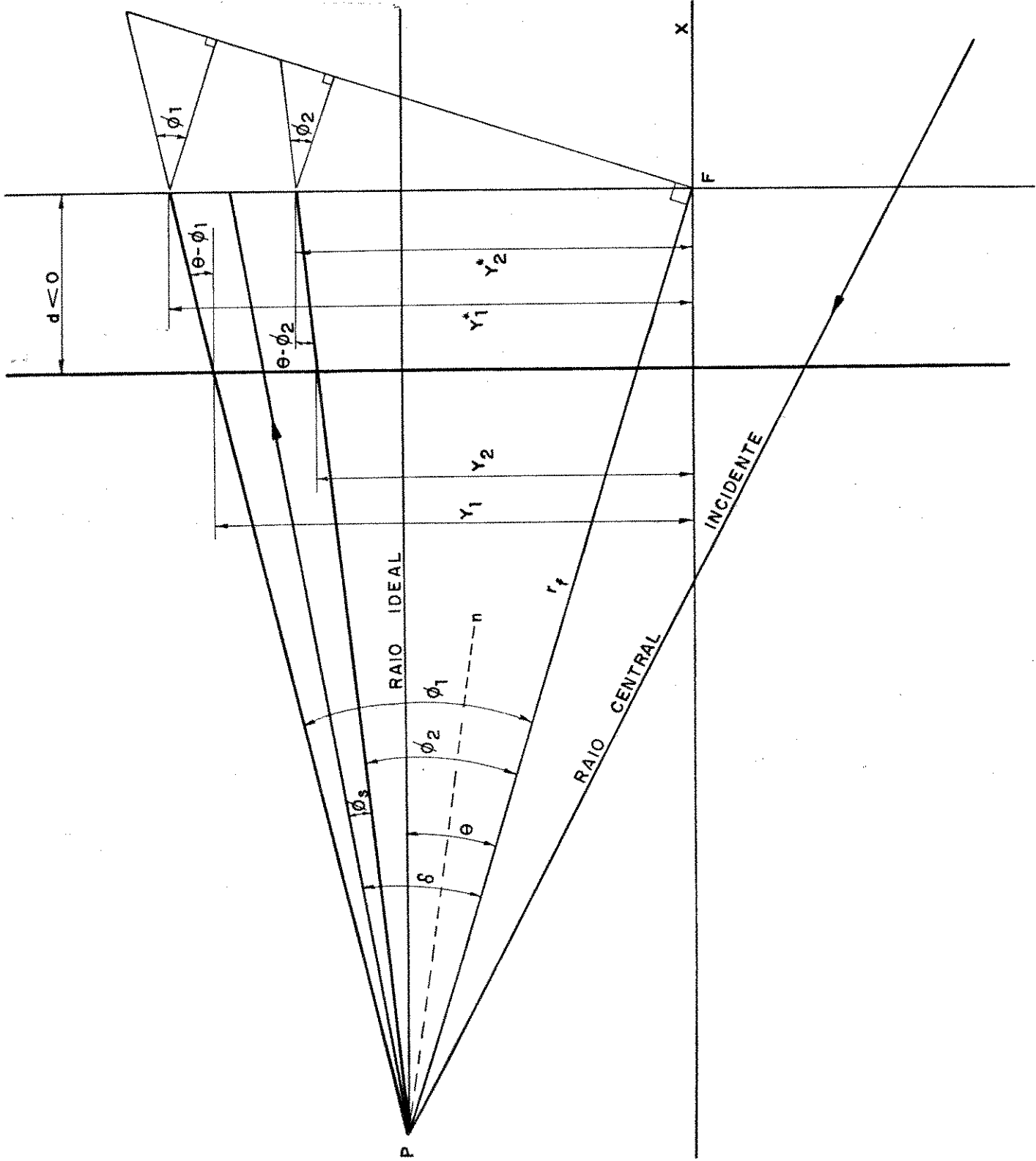
$$\Phi_{ab} = i_s \frac{\pi}{2} [1 - \cos 2\phi_s] \quad (A.5)$$

APÊNDICE II

CÁLCULO DAS PROJEÇÕES y_1 e y_2

As projeções y_1 e y_2 , que definem o semi-eixo maior da imagem da elipse formada no absorvedor, são determinadas a partir do traçado de raios definido pelas trajetórias descritas no Quadro 1 exposto no Capítulo III.

São apresentados nove casos, que se referem às possibilidades da trajetória de um raio refletido quando $0^\circ \leq \theta < 90^\circ$.



$$\phi_1 = (\delta + \phi_s)$$

$$\phi_2 = (\delta - \phi_s)$$

$$r_f \tan \phi_1 = y_1^* \cos \theta + y_1^* \sin \theta \tan \phi_1$$

$$\therefore y_1 = \frac{+ r_f \tan \phi_1 \sec \theta}{1 + \tan \theta \tan \phi_1} + d \tan \theta \tan \phi_1$$

$$r_f \tan \phi_2 = y_2^* \cos \theta + y_2^* \sin \theta \tan \phi_2$$

$$\therefore y_2 = \frac{+ r_f \tan \phi_2 \sec \theta}{1 + \tan \theta \tan \phi_2} + d \tan \theta \tan \phi_2$$



$\oplus$ $\oplus$
 $\oplus$
 $\oplus$
 $\oplus$
 $\oplus$

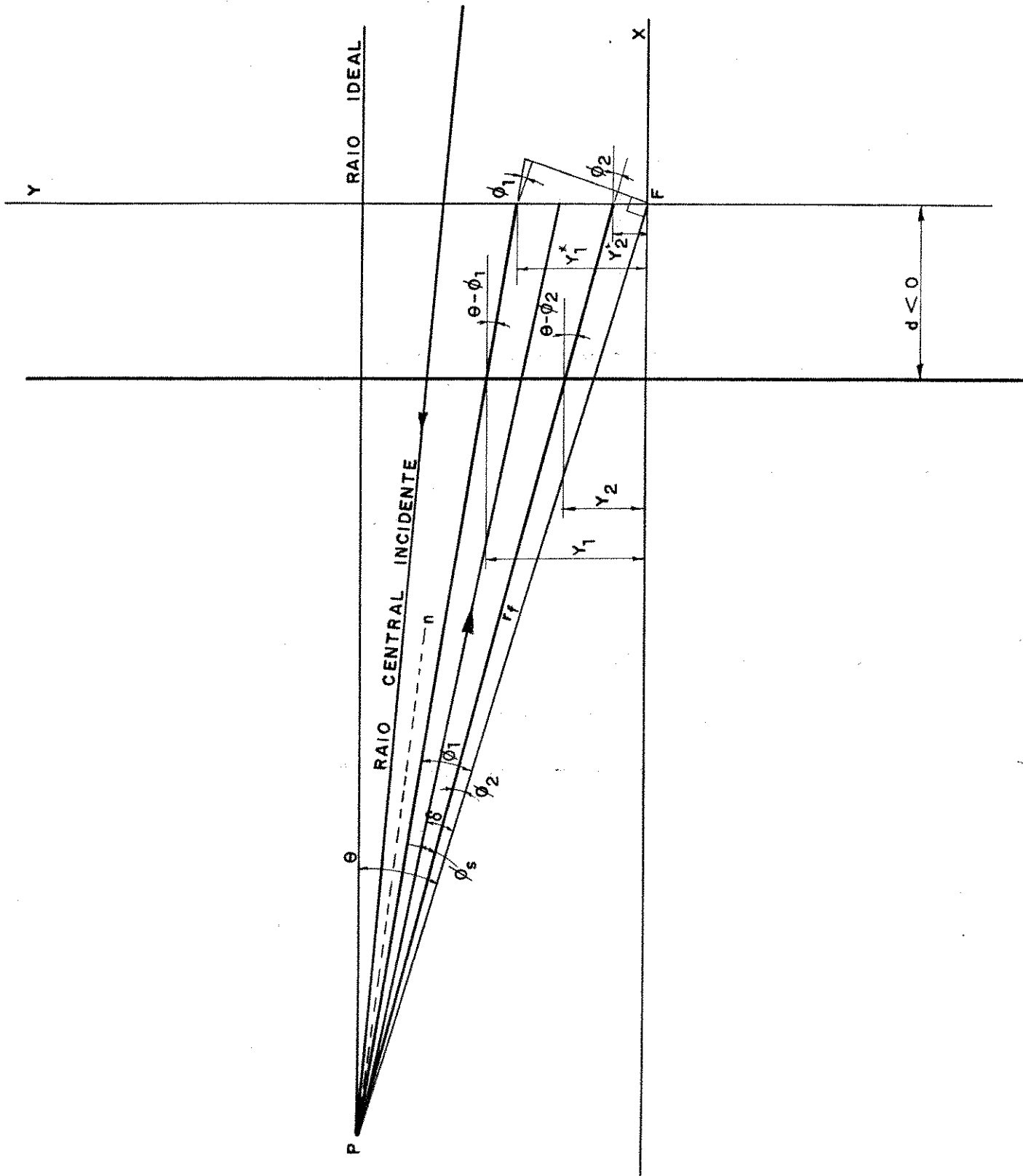
5
4
3
2
1

$$\tan \phi_1 = \gamma_1^* \cos \theta + \gamma_1^{*'} \sin \theta \tan \phi_1$$

$$\therefore Y_1 = \frac{r_f \tan \phi_1 \sec \theta}{1 + \tan \phi_1 \tan \theta}$$

$$r_f \tan \phi_2 = \gamma_2^* \cos \theta + \gamma_2^* \sin \theta \tan \phi_2$$

$$\therefore y_2 = \frac{r_f \tan \phi_2 \sec \theta}{1 + \tan \phi_2 \tan \theta} - d \tan[\theta - \theta_2]$$



$$\phi_1 = \delta + \phi_s$$

$$\phi_2 = \delta - \phi_s$$

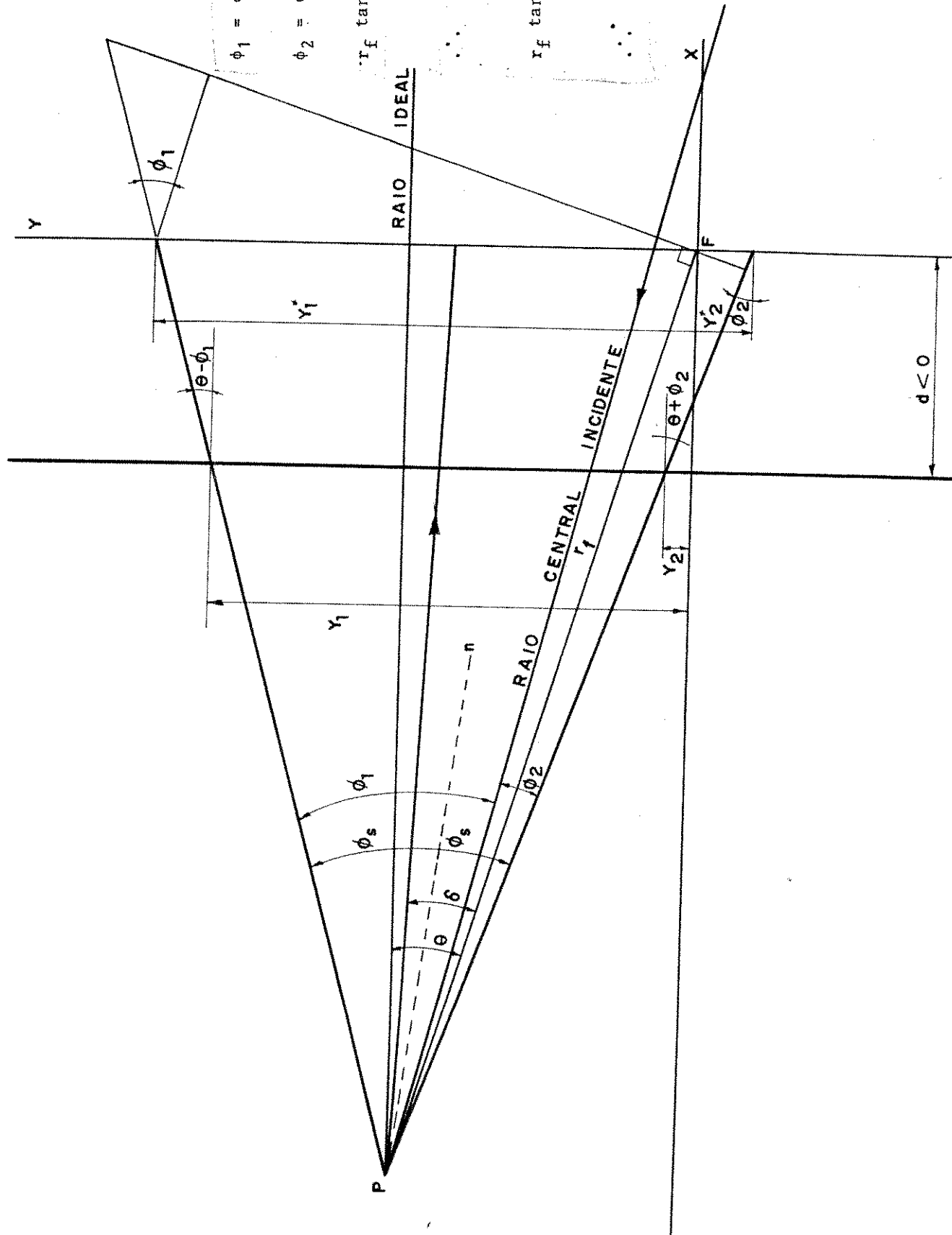
$$r_f \tan \phi_1 = \gamma_1^* \cos \theta + \gamma_1^* \sin \theta \tan \phi_1$$

$$\gamma_1 = \frac{+ r_f \tan \phi_1 \sec \theta}{1 + \tan \phi_1 \tan |\theta|} - d \tan |\theta - \phi_1|$$

$$r_f \tan \phi_2 = \gamma_2^* \cos \theta + \gamma_2^* \sin \theta \tan \phi_2$$

$$\gamma_2 = \frac{+ r_f \tan \phi_2 \sec \theta}{1 + \tan \phi_2 \tan |\theta|} - d \tan |\theta - \phi_2|$$

$$d < 0$$



$$\phi_1 = \delta + \phi_s$$

$$\phi_2 = \delta - \phi_s$$

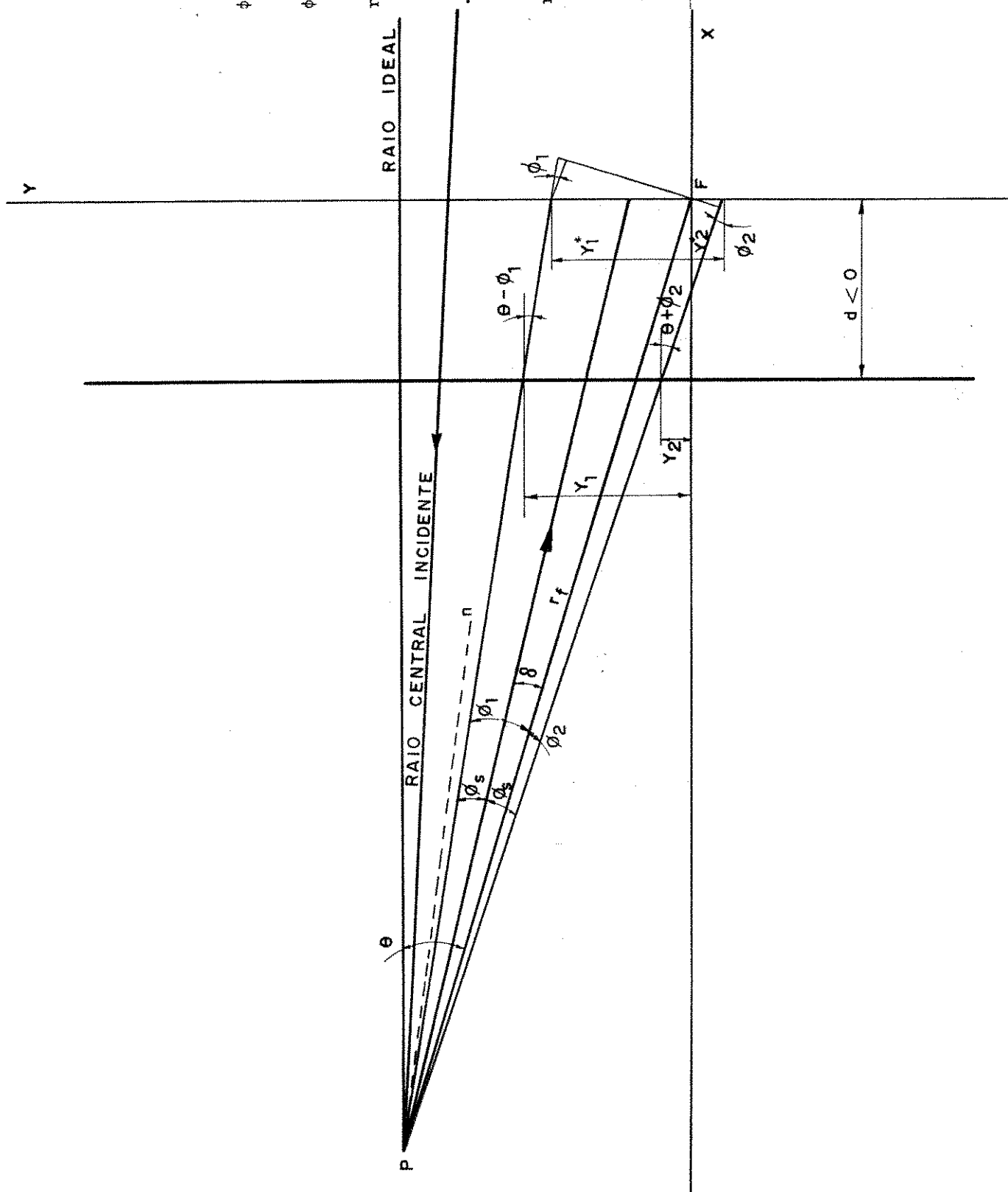
$$r_f \tan \phi_1 = y_1^* \cos \theta + y_1^* \sin \theta \tan \phi_1$$

$$\therefore y_1 = \frac{r_f \tan \phi_1 \sec \theta}{1 - \tan \phi_1 \tan \theta} + d \tan \theta$$

$$r_f \tan \phi_2 = y_2^* \cos \theta - y_2^* \sin \theta \tan \phi_2$$

$$\therefore y_2 = \frac{-r_f \tan \phi_2 \sec \theta}{1 - \tan \phi_2 \tan \theta} - d \tan \theta$$

PS



$$\phi_1 = \delta + \phi_2$$

$$\phi_2 = \delta - \phi_s$$

$$r_f \tan \phi_1 = y_1^* \cos \theta + y_1^* \sin \theta \tan \phi_1$$

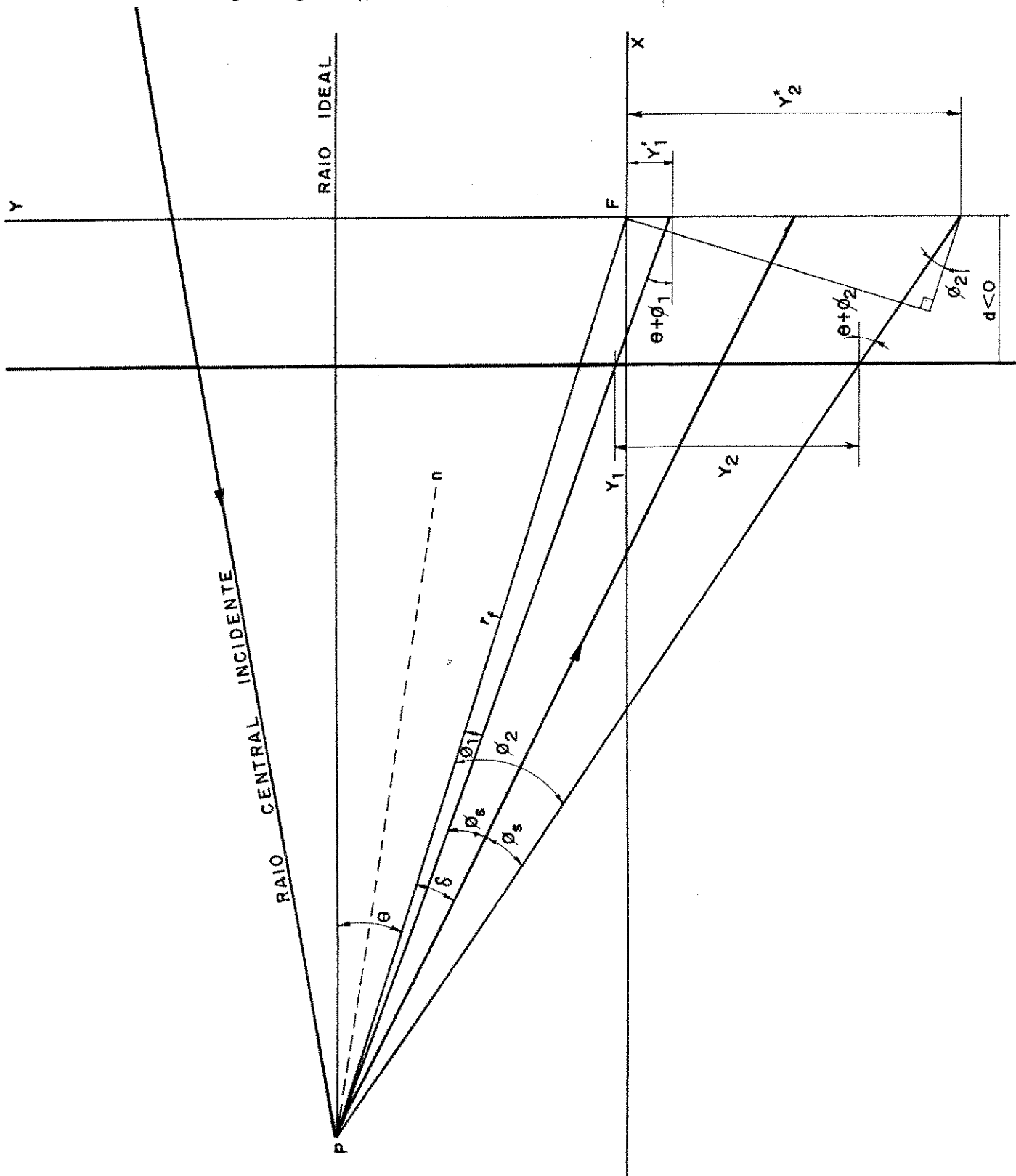
$$y_1 = \frac{+ r_f \tan \phi_1 \sec \theta}{1 + \tan \phi_1 \tan |\theta|} - d \tan |\theta - \phi_1|$$

$$r_f \tan \phi_2 + y_2^* \sin \theta \tan \phi_2 = y_2^* \cos \theta$$

$$y_2 = \frac{- r_f \tan \phi_2 \sec \theta}{1 - \tan \phi_2 \tan |\theta|} - d \tan |\theta + \phi_2|$$

x

$d < 0$



$$\phi_1 = \delta + \phi_s$$

$$\phi_2 = \delta - \phi_s$$

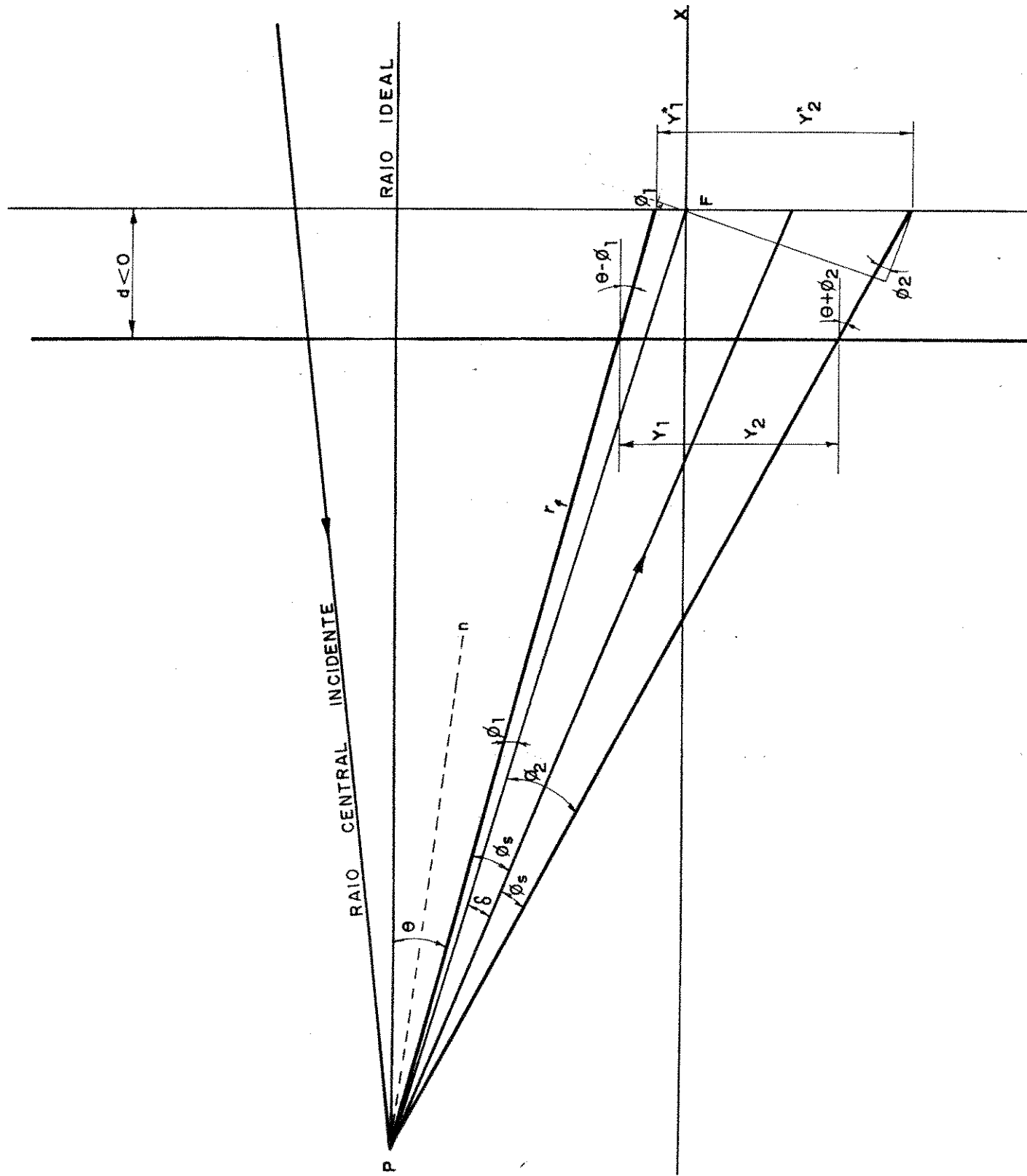
$$r_f \tan \phi_1 + y_1^* \sin \theta \tan \phi_1 = y_1^* \cos \theta$$

$$\therefore y_1 = \frac{-r_f \tan \phi_1 \sec \theta}{1 - \tan \phi_1 \tan \theta} - d \tan \theta$$

$$r_f \tan \phi_2 + y_2^* \sin \theta \tan \phi_2 = y_2^* \cos \theta$$

$$\therefore y_2 = \frac{-r_f \tan \phi_2 \sec \theta}{1 - \tan \phi_2 \tan \theta} - d \tan \theta$$

p7



$$\phi_1 = \delta + \phi_s$$

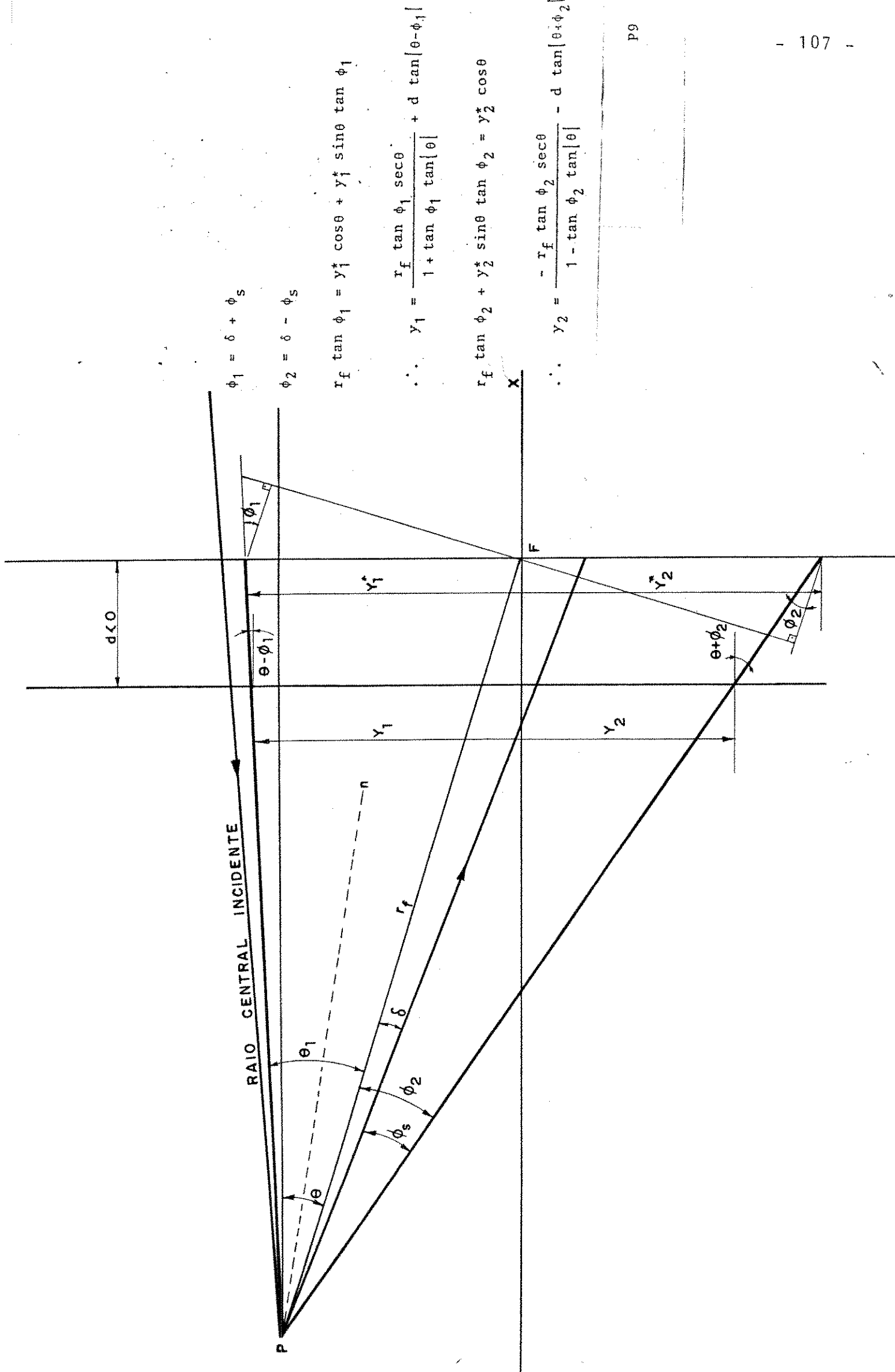
$$\phi_2 = \delta - \phi_s$$

$$r_f \tan \phi_1 = y_1^* \cos \theta + y_1^* \sin \theta \tan \phi_1$$

$$\therefore y_1 = \frac{+ r_f \tan \phi_1 \sec \theta}{1 + \tan \phi_1 \tan |\theta|} - d \tan |\theta - \phi_1|$$

$$r_f \tan \phi_2 + y_2^* \sin \theta \tan \phi_2 = y_2^* \cos \theta$$

$$\therefore y_2 = \frac{- r_f \tan \phi_2 \sec \theta}{1 - \tan \phi_2 \tan |\theta|} - d \tan |\theta + \phi_2|$$



APÊNDICE III

CÁLCULO DO SEMI-EIXO MENOR

O semi-eixo menor da imagem da elipse formada no absorvedor é determinado a partir do traçado de raios definido pelas trajetórias descritas no Quadro 2, exposto no Capítulo III.

São apresentados três casos, que se referem às possibilidades da trajetória de um raio refletido quando $0^{\circ} \leq \theta < 90^{\circ}$.

O semi-eixo menor é definido através da relação:

$$\overline{CT} = \sqrt{\overline{RT}^2 - \overline{CR}^2}$$

- Determinação do segmento RT:

Da Fig. B define-se:

$$\overline{PR} = \overline{PF} + \overline{F'E'} + \overline{E'R} \quad (1)$$

$$\overline{FF''} = d/\cos(\theta - \delta) \quad (2)$$

$$\overline{F''R} = \overline{F''C} \sin(\theta - \delta) \quad (3)$$

$$\frac{\overline{F^{II}C}}{\overline{F^{III}C}} = \left[\frac{\overline{F^{II}F^{III}}}{\overline{F^{III}F^{III}}} \right] y_m \quad (4)$$

Através da Fig. A, define-se:

$$\frac{F_{\text{up}}^{\text{up}}}{F_{\text{up}}^{\text{up}}} = \overline{PF} \cos \theta [\tan \theta - \tan(\theta - \delta)] - d \tan(\theta - \delta) \quad (5)$$

pelo Δ PPM da Fig. A, define-se também:

$$\overline{\text{PF}} = \overline{\text{PF}}(\cos \theta / \cos(\theta - \delta)). \quad (6)$$

O segmento $\overline{PR}$ vem da substituição das relações (2), (3) e (6) na relação (1)

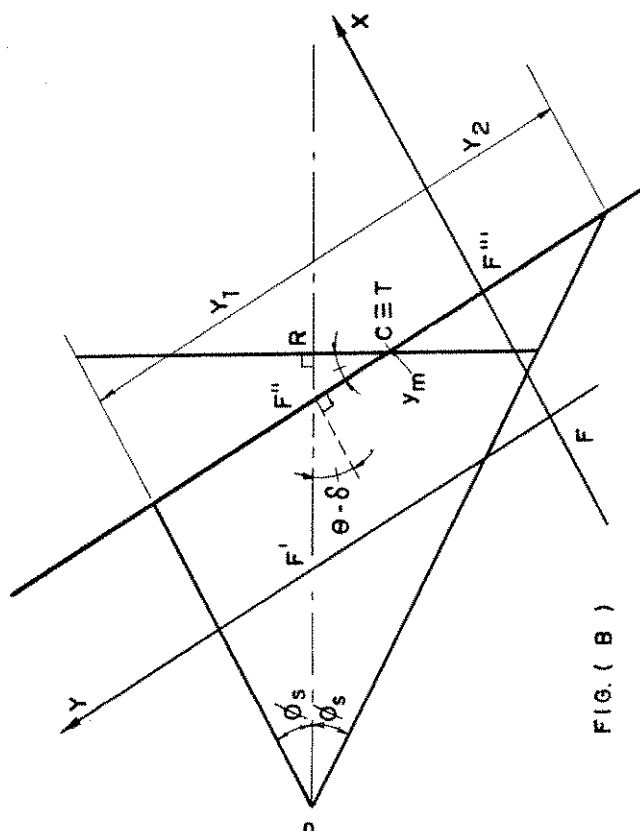
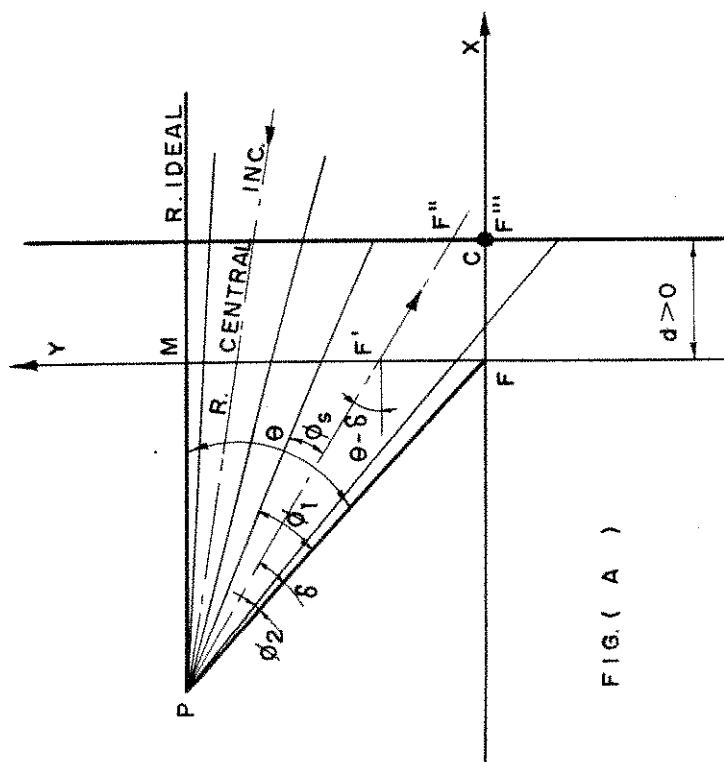
$$\overline{RT} = \overline{PR} \tan \phi_s \quad (7)$$

- Determinação do segmento $\overline{CR}$:

Da Fig. B:

$$\overline{\text{CR}} = \overline{\text{F}''\text{C}} \cos(\theta - \phi) \quad (8)$$

O segmento CR vem da substituição da relação (4) na relação (8).



APÊNDICE IV

LISTAGEM DOS PROGRAMAS DE COMPUTADOR

É listado a seguir, para efeito de registro de memória, o programa utilizado nos cálculos relativos às simulações de operação do absorvedor cilíndrico usado em concentrador parabólico.

ADDROUT1 = AB(R, S, DETA, FL, FI1, FI2, THETA, Y1, Y2)

IF (THETA) 1, 2, 3

```

1  AAA=FI1
   FI1=FI2
   FI2=AAA
2  Y1=-1.0*(R*(SIN(FI1)/COS(FI1))*(1.0/COS(THETA)))/(ABS(1.0+(SIN(
*  1)/COS(FI1))*(SIN(ABS(THETA))/COS(ABS(THETA)))))
   Y2=(R*(SIN(FI2)/COS(FI2))*(1.0/COS(THETA)))/(1.0-(
*  SIN(FI2)/COS(FI2))*(SIN(ABS(THETA))/COS(ABS(THETA)))))
   AT108R
   END
   SUBROUTINE ADDROUT2 (R, S, DETA, FL, FI1, FI2, THETA, Y1, Y2)

```

IF (THETA) 1, 2, 3

```

1  AAA=FI1
   FI1=FI2
   FI2=AAA
2  Y1=(R*(SIN(FI1)/COS(FI1))*(1.0/COS(THETA)))/(ABS(1.0+(SIN(FI
*  1)/COS(FI1))*(SIN(ABS(THETA))/COS(ABS(THETA)))))
   Y2=(R*(SIN(FI2)/COS(FI2))*(1.0/COS(THETA)))/(ABS(1.0+(SIN(FI2
*  1)/COS(FI2))*(SIN(ABS(THETA))/COS(ABS(THETA)))))
   AT108R
   END
   SUBROUTINE ADDROUT3 (R, S, DETA, FL, FI1, FI2, THETA, Y1, Y2)

```

IF (THETA) 1, 2, 3

```

1  AAA=FI1
   FI1=FI2
   FI2=AAA
2  Y1=1.0*(R*(SIN(FI1)/COS(FI1))*(1.0/COS(THETA)))/(1.0-(
*  SIN(FI1)/COS(FI1))*(SIN(ABS(THETA))/COS(ABS(THETA)))))
   Y2=1.0*(R*(SIN(FI2)/COS(FI2))*(1.0/COS(THETA)))/(1.0-(
*  SIN(FI2)/COS(FI2))*(SIN(ABS(THETA))/COS(ABS(THETA)))))
   AT108R
   END
   SUBROUTINE ADDROUT4 (R, S, DETA, FL, FI1, FI2, THETA, Y1, Y2)

```

IF (THETA) 1, 2, 3

```

1  AAA=FI1
   FI1=FI2
   FI2=AAA
2  Y1=-1.0*(R*(SIN(FI1)/COS(FI1))*(1.0/COS(THETA)))/(1.0-(
*  SIN(FI1)/COS(FI1))*(SIN(ABS(THETA))/COS(ABS(THETA)))))
   Y2=-1.0*(R*(SIN(FI2)/COS(FI2))*(1.0/COS(THETA)))/(1.0-(
*  SIN(FI2)/COS(FI2))*(SIN(ABS(THETA))/COS(ABS(THETA)))))
   AT108R
   END
   SUBROUTINE ADDROUT5 (R, S, DETA, FL, FI1, FI2, THETA, Y1, Y2)
   IF (THETA) 1, 2, 3
   FI1=ABS(THETA)-1.5707963
   IF (THETA) 1, 2, 3
   FI1=-1.5707963
   FI2=-1.5707963
   Y1=-1.0*(R*(SIN(FI1)/COS(FI1))*(1.0/COS(THETA)))/(1.0-(
*  SIN(FI1)/COS(FI1))*(SIN(ABS(THETA))/COS(ABS(THETA)))))
   Y2=-1.0*(R*(SIN(FI2)/COS(FI2))*(1.0/COS(THETA)))/(1.0-(
*  SIN(FI2)/COS(FI2))*(SIN(ABS(THETA))/COS(ABS(THETA)))))
   AT108R
   END
   SUBROUTINE ADDROUT6 (R, S, DETA, FL, FI1, FI2, THETA, Y1, Y2)

```

IF (THETA) 1, 2, 3

```

1  AAA=FI1
   FI1=FI2
   FI2=AAA
2  Y1=-1.0*(R*(SIN(FI1)/COS(FI1))*(1.0/COS(THETA)))/(1.0-(
*  SIN(FI1)/COS(FI1))*(SIN(ABS(THETA))/COS(ABS(THETA)))))
   Y2=-1.0*(R*(SIN(FI2)/COS(FI2))*(1.0/COS(THETA)))/(1.0-(
*  SIN(FI2)/COS(FI2))*(SIN(ABS(THETA))/COS(ABS(THETA)))))
   AT108R
   END
   SUBROUTINE ADDROUT7 (R, S, DETA, FL, FI1, FI2, THETA, Y1, Y2)

```

```

3      IF(NEETH)4,4,5
5      RL=-1.0*RL
4      YY1=A*(RL*(ABS(SIN(ABS(THETA+FI1)))/COS(ABS(THETA+FI1))))
      YY2=A*(RL*(ABS(SIN(ABS(THETA+FI2)))/COS(ABS(THETA+FI2))))
7      IF(NEETH)6,6,7
      RL=-1.0*RL
6      RETURN
      END
      SUBROUTINE ABBB(RL,THETA,FI1,FI2,YY1,YY2)
      THETAM=THETA
      BFIH=ABS(THETA)-1.5707963
      IF(THETA)1,2,2
1      FI1=-1.0*FI1
      FI2=-1.0*FI2
      A=-1.0
      GO TO 3
2      A=1.0
3      IF(NEETH)4,4,5
5      RL=-1.0*RL
4      YY1=A*(RL*(SIN(ABS(THETA-FI1))/COS(ABS(THETA-FI1))))
      YY2=-1.0*A*(RL*(SIN(ABS(THETA+FI2))/COS(ABS(THETA+FI2))))
7      IF(NEETH)6,6,7
      THETA=THETAM
      RL=-1.0*RL
6      RETURN
      END
      SUBROUTINE CC(RL,THETA,FI1,FI2,YY1,YY2)
      THETAM=THETA
      BFIH=ABS(THETA)-1.5707963
      IF(THETA)1,2,2
1      FI1=-1.0*FI1
      FI2=-1.0*FI2
      A=1.0
      GO TO 3
2      A=-1.0
3      IF(NEETH)4,4,5
5      RL=-1.0*RL
4      YY1=A*(RL*(SIN(ABS(THETA-FI1))/COS(ABS(THETA-FI1))))
      YY2=A*(RL*(SIN(ABS(THETA+FI2))/COS(ABS(THETA+FI2))))
7      IF(NEETH)6,6,7
      RL=-1.0*RL
6      RETURN
      END
C SUBROUTINE DEL CALCULO DIST. SEA KPR* APONTAMENTO
      SUBROUTINE DELPP(C,DELTA,CC,FI1,FI2,THETA,Y1,Y2,YY1,YY2)
      CALL CC(C,DELTA,RL,FI1,FI2,THETA,Y1,Y2)
      IF(THETA)1,2,2
2      Y1=-1.0*Y1
      Y2=-1.0*Y2
1      CALL CC(RL,THETA,FI1,FI2,YY1,YY2)
      Y1=Y1+YY1
      Y2=Y2+YY2
      RETURN
      END
C SUBROUTINE CALCULO EVOLUCAO DO KPR* DE APONTAMENTO A
C DELCULO DO DO PLANO LOCAL
      SUBROUTINE APSP(C,FI1,DELTA,RL,FI2,THETA,Y1,Y2,YY1,YY2)
      THETAM=THETA
      BFIH=ABS(THETA)-1.5707963
      IF(NEETH)6,6,7

```

```

9      THETA=BETA
6      IF (THETA) 1, 2, 2
2      IF (SDELTA) 21, 22, 22
22     IF (SDELTA-FIS) 221, 222, 222
222    CALL A(R, SDELTA, RL, FI1, FI2, THETA, Y1, Y2)
      IF (SDELTA-THETA) 2221, 2222, 2222
2222   CALL AA(RL, THETA, FI1, FI2, YY1, YY2)
      YY1=-1.0*YY1
      YY2=-1.0*YY2
      GO TO 300
2221   CALL AB(RL, THETA, FI1, FI2, YY1, YY2)
      GO TO 300
221    CALL AB(R, SDELTA, RL, FI1, FI2, THETA, Y1, Y2)
      Y1=-1.0*Y1
      Y2=-1.0*Y2
      IF (SDELTA-THETA) 2211, 2212, 2212
2212   CALL AAB(RL, THETA, FI1, FI2, YY1, YY2)
      GO TO 300
2211   CALL CC(RL, THETA, FI1, FI2, YY1, YY2)
      GO TO 300
21     IF (ABS(SDELTA)-FIS) 211, 212, 212
212    CALL B(R, SDELTA, RL, FI1, FI2, THETA, Y1, Y2)
      Y1=-1.0*Y1
      Y2=-1.0*Y2
      CALL BB(RL, THETA, FI1, FI2, YY1, YY2)
      GO TO 300
211    CALL AB(R, SDELTA, RL, FI1, FI2, THETA, Y1, Y2)
      Y1=-1.0*Y1
      Y2=-1.0*Y2
      IF (ABS(THETA)-FI1) 213, 214, 214
213    CALL CC(RL, THETA, FI1, FI2, YY1, YY2)
      YY1=-1.0*YY1
      GO TO 300
214    CALL CC(RL, THETA, FI1, FI2, YY1, YY2)
      GO TO 300
      CALL CC(RL, THETA, FI1, FI2, YY1, YY2)
      GO TO 300
1      IF (SDELTA) 11, 12, 12
12     IF (SDELTA-FIS) 121, 122, 122
122    CALL B(R, SDELTA, RL, FI1, FI2, THETA, Y1, Y2)
      CALL BB(RL, THETA, FI1, FI2, YY1, YY2)
      GO TO 300
121    CALL AB(R, SDELTA, RL, FI1, FI2, THETA, Y1, Y2)
      IF (ABS(THETA)-FI1) 123, 124, 124
123    CALL CC(RL, THETA, FI1, FI2, YY1, YY2)
      YY1=-1.0*YY1
      GO TO 300
124    CALL CC(RL, THETA, FI1, FI2, YY1, YY2)
      GO TO 300
11     IF (ABS(SDELTA)-FIS) 111, 112, 112
112    CALL A(R, SDELTA, RL, FI1, FI2, THETA, Y1, Y2)
      Y1=-1.0*Y1
      Y2=-1.0*Y2
      IF (SDELTA-SDELTA) 1121, 1121, 1122
1122   CALL AA(RL, THETA, FI1, FI2, YY1, YY2)
      YY1=-1.0*YY1
      YY2=-1.0*YY2
      GO TO 300
1121   CALL AA(RL, THETA, FI1, FI2, YY1, YY2)
      GO TO 300

```

```

111 CALL AB(R, SDELTA, RL, FI1, FI2, THETA, Y1, Y2)
IF (THETA-SDELTA) 1111, 1112, 1112
1111 CALL CC(RL, THETA, FI1, FI2, YY1, YY2)
GO TO 300
1112 CALL AAB(RL, THETA, FI1, FI2, YY1, YY2)
GO TO 300
300 Y1=Y1+YY1
Y2=Y2+YY2
RETURN
END

C SUBROUTINA CALCULA TANGENTE
FUNCTION TANG(ARG)
TANG= SIN(ARG)/COS(ARG)
RETURN
END

C
C SUBROUTINA QUE CALCULA RFD
SUBROUTINE PREF(THETA, R, SDELTA, FIS, D, RL, RFD)
ARG=ABS(SDELTA-THETA)
THETA=THETA
DELTA=ABS(THETA)-1.5707963
IF (DELTA) 4, 4, 5
5 THETA=DELTA
RL=-1.*RL
4 IF (THETA) 1, 2, 2
2 IF (SDELTA) 21, 22, 22
22 IF (SDELTA-THETA) 221, 222, 222
222 ARG1=ABS(THETA)
FC=ABS(ABS(R*ABS(COS(THETA)))*TANG(ARG)+TANG(ARG1))+
RL*TANG(ARG))-ABS(D)
GO TO 7
221 ARG1=ABS(THETA)
FC=ABS(ABS(R*ABS(COS(THETA)))*TANG(ARG1)-TANG(ARG))-
RL*TANG(ARG))-ABS(D)
GO TO 7
21 ARG1=ABS(THETA)
FC=ABS(ABS(R*ABS(COS(THETA)))*TANG(ARG)-TANG(ARG1))+
RL*TANG(ARG))-ABS(D)
GO TO 7
1 IF (SDELTA) 11, 21, 21
11 IF (THETA-SDELTA) 221, 222, 222
7 RT=(R*ABS(COS(THETA))/COS(ARG))+PL/ABS(COS(ARG))+
FC*SIN(ARG)*TANG(FIS)
CR=ABS(FC*COS(ARG))
CIR=RT*(RT*FC-CR)
RFD=CR/TANG(FIS)
IF (DELTA) 0, 0, 0
6 RL=-1.*RL
6 RETURN
END

C SUBROUTINA PARA CALCULO PARABOLICO
SUBROUTINE PARAB(R, FIS, THETA, R, D, LARG)
IF (LARG) 37, 37, 37
37 R=(1+R00)/(1+COS(DELTA))+((THETA**2)*R05)
R11=1+R00*(1+R05)/(DELTA)/(1+COS(DELTA))+((2.*
THETA**2)*R05)/(DELTA)
R12=R11*((-R11/4)*SIN(THETA)+COS(THETA))/(SIN
(1+ABS(THETA))-ABS(R11/R)*COS(THETA))
R13=R11*ATTN(ABS((COS(THETA)+1)/SIN(THETA)))
R=1.

```

```

      IF(THETA)1,1,2
1      A=-1.
2      DELTAD=A*2.*(ALFAD-ALFA1)
      GO TO 39
33     R=(2.*FOCD)/(1.+(COS(THETA)))
      DELTAD=0.0
39     RETURN
      END
C SUBROTINA CALCULA PROJ SOMBRA ABSORVEDOR
  SUBROUTINE SOMBPA(SUB,RABS,SD-LTA,THPOS,THNEG,XLIN,TH)
      GO TO 2
1      THPOS=ACOS((1.-(RABS**2)/4)/(1.+(RABS**2)/4))
      THNEG=-1.*THPOS
      GO TO 9
2      IF(SDELTA)3,1,4
4      YLIN=RABS
      CALL XTH(YLIN,SDELTA,XLIN,TH)
      THPOS=TH
      YLIN=-1.*RABS
      CALL XTH(YLIN,SDELTA,XLIN,TH)
      R=2/(1+COS(THETA))
      CACST=(YLIN**2)+(R**2)-(ALIN**2)
      IF(CACST)5,5,6
5      THNEG=TH
      GO TO 9
6      THNEG=-1.*TH
      GO TO 9
3      YLIN=-1.*RABS
      CALL XTH(YLIN,SDELTA,XLIN,TH)
      THNEG=-1.*TH
      YLIN=RABS
      CALL XTH(YLIN,SDELTA,XLIN,TH)
      R=2/(1+COS(THETA))
      CACST=(YLIN**2)+(R**2)-(ALIN**2)
      IF(CACST)7,7,8
7      THPOS=-1.*TH
      GO TO 9
8      THPOS=TH
9      RETURN
      END
      SOMBPAUTIGL X1=(YLIN,SDELTA,XLIN,TH)
      ALIN=(2*SQRT(1+(YLIN*SIN(2*SD-LTA)/2.)))/(SIN(SDELTA)
1+2))-(((2./TRIG(SDELTA))+YLIN)/SIN(SDELTA))
      R=2/COS((XLIN-COS(SDELTA))/SQRT(1+(YLIN**2)+(XLIN**2
1)+2.*YLIN*XLIN*SIN(SDELTA)))
      RETURN
      END
C
      SUBROUTINE CXIUV(THETA,FI1,FI2,ALFA,COMP,SDELTA)
      IF(THETA)141,142,143
141     IF(ALFA-1.5757)11,10,2
142     IF(SDELTA)12,2,2
2     IF(ALFA-FI1)21,21,21
14     IF(SDELTA)1,22,22
1     IF(SDELTA-FI2)21,21,21
141     IF(SDELTA)21,11,11
11     IF(ALFA-FI2)21,21,22
21     COMP=-1
      GO TO 3

```

```

22      CORP=1
3      RETURN
      END

C
SUBROUTINE XNOV(RABS,R,OMEGA,YY,RL,THETA,FIS,SDELTA,
1F11,FI2,ALFA,FTOT,X1,X2)
X=RL
RL=YY
CALL XAPSPF(THETA,FIS,R,SDELTA,RL,FI1,FI2,ALFA,X1,X2)
B=ABS((X1-X2)/2)
U=((X1+X2)/2.)
A0=1.-((X-U)/B)**2.
IF(X0)1,1,2
1      FTOT=0.0
      GO TO 3
2      F=1.0
      CALL FCID(X,F,FCID)
      R120=((RABS**2)+(R**2)-(2*R*R*BS)*COS(OMEGA))
      FC=(F**2)/R120
      ST0=(F/SQRT(R120))*SIN(OMEGA)
      FTOT=FCID*ST0*FC
3      RETURN
      END

C
SUBROUTINE XAPSPF(THETA,FIS,R,SDELTA,RL,FI1,FI2,ALFA,X1
1,X2)
IF(THETA)1,2,2
1      RL=-1.*RL
      IF(SDELTA-FIS)11,12,12
11     CALL XAB(R,SDELTA,RL,FI1,FI2,ALFA,X1,X2)
      GO TO 3
12     CALL X0(R,SDELTA,RL,FI1,FI2,ALFA,X1,X2)
      GO TO 3
2      IF(THETA-1.5707963)21,22,22
21     IF(ABS(SDELTA-FIS)211,212,212
211    CALL XAB(R,SDELTA,RL,FI1,FI2,ALFA,X1,X2)
      GO TO 3
212    CALL X0(R,SDELTA,RL,FI1,FI2,ALFA,X1,X2)
      GO TO 3
22     IF(SDELTA-FIS)221,222,222
221    CALL X0(R,SDELTA,RL,FI1,FI2,ALFA,X1,X2)
      GO TO 3
222    CALL X0(P,SDELTA,RL,FI1,FI2,ALFA,X1,X2)
3      RETURN
      END

C
SUBROUTINE X0(R,SDELTA,RL,FI1,FI2,ALFA,X1,X2)
ARG=ALFA-FI1
A1=-1.*(1+TANG(FI1))/(COS(ALFA)*(1+(TANG(ALFA)*
1TANG(FI1))))-RL*TANG(ARG)
ARG=ALFA-FI2
A2=-1.*(1+TANG(FI2))/(COS(ALFA)*(1+(TANG(ALFA)*
1TANG(FI2))))-RL*TANG(ARG)
RETURN
END

C
SUBROUTINE X0(R,SDELTA,RL,FI1,FI2,ALFA,X1,X2)
ARG=(ALFA+FI1)
A1=(R*TANG(FI1))/(COS(ALFA)*(1-(TANG(ALFA)*
1TANG(FI1))))-RL*TANG(ARG)

```

```

ARG=(ALFA-FI2)
A2=-1.*(R*TANG(FI2))/(COS(ALFA)*(1+(TANG(ALFA)*
1TANG(FI2))))-RL*TANG(ARG)
RETURN
END
SUBROUTINE XA(R,SDELTA,RL,FI1,FI2,ALFA,X1,X2)
ARG=ALFA-FI1
A1=R*TANG(FI1)/(COS(ALFA)*(1+(TANG(FI1)*TANG
1(ALFA))))+RL*TANG(ARG)
ARG=ALFA-FI2
A2=R*TANG(FI2)/(COS(ALFA)*(1+(TANG(FI2)*
1TANG(ALFA))))+RL*TANG(ARG)
RETURN
END

```

C

```

SUBROUTINE XSN(R,SDELTA,RL,FI1,FI2,ALFA,X1,X2)
ARG=ALFA-FI1
X1=R*TANG(FI1)/(COS(ALFA)*(1+(TANG(FI1)*
1TANG(ALFA))))+RL*TANG(ARG)
ARG=ALFA+FI2
A2=-1.*(R*TANG(FI2))/(COS(ALFA)*(1-(TANG(FI2)*
1TANG(ALFA))))+RL*TANG(ARG)
RETURN
END

```

C

```

SUBROUTINE OMEG(F,DX,THETA,PAWS,FI,OMEGA,FIE,OMEGCR,RPDX,ALF
RPD=SQRT((P**2)+(PA**2)+(2*DX*P*COS(THETA)))
RPDX=RPD
ALFA=ASIN((DX/RPD)*SIN(THETA))
ALFT1=ALFA
OMEGCR=ACOS(PABS/RPD)
FIE=ABS(3.1415926-THETA-OMEGCR-ALFA)
5 IF(THETA)1,1,2
2 IF(THETA-1.5867963)21,22,22
2X FIE=(3.1415926-(THETA-OMEGCR))
1 IF(FIE-FI)3,4,4
21 IF(FI-FIE)3,4,4
1 IF(OMEG(THETA)-1.5867963)11,11,12
11 IF(FIE-3.1415926)15,15,5
15 IF(FI-FIE)3,4,4
12 FIE=(-3.1415926-THETA+OMEGCR+ALFA)
IF(FIE)3,32,32
32 IF(FI-FIE)41,41,3
41 OMEGA=(3.1415926-ABS(THETA)+FIE)
GO TO 6
3 OMEGA=1.58
GO TO 6
4 OMEGA=ABS(3.1415926-THETA-FI+ALFA)
6 RETURN
END

```

C

```

C SUBROUTINE GETA READS CIRCULAR PI FOR SIGN CONSTANT
DOO=PI-1-PC100(Y),0,PC100
PC100=(5.287(Y))**2
GO TO 1
END

```

C

```

C SUBPROGRAM CALCULOS COM FNA MODELO - CIO
FUNCTION CCI0(F,L)
CCI0=F*1/9.8651636-5

```

```

RETURN
END

C
C
C PROGRAMA PRINCIPAL FUG5.F4
C
  DIMENSION C(800),Y(800),ETHET(2100),FEN(800),
    LANGAB(500),DYI(2100),SCOR(2100)
C FOCO DA PARABOLA
  FOCO=1.0
  FPAU=1.745329E-2
C DADOS INICIAIS DO PROGRAMA
  SUB=1.
  TYPE 272
272  FORMAT(2X,'RAIO DO ABSORVEDOR RABS=')
  ACCEPT 273,RABS
273  FORMAT(1G)
  TYPE 274
274  FORMAT(2X,'ANGULO DE ABERTURA THETA(GRAUS) =')
  ACCEPT 275,THETA
275  FORMAT(1G)
  TYPE 276
276  FORMAT(2X,'VALOR ERRO APONTAMENTO SDELTA(GRAUS) =')
  ACCEPT 277,SDELTA
277  FORMAT(1G)
  TYPE 278
278  FORMAT(2X,'DESLOCAMENTO DO ABS. NA DIR X  DX=')
  ACCEPT 279,DX
279  FORMAT(1G)
  TYPE 280
280  FORMAT(2X,'DESVIO PADRAO DO E-PELHO DY=','/,
    11X,' CERNE (INTERO + < 9 DIGITOS) IX =','/,
    11X,'COEF CORRELACAO CORL=')
  ACCEPT 281,DY,IX,CORL
281  FORMAT(3G)
  TYPE 282
282  FORMAT(2X,'FATOR DEGENERACAO SUP  FDS =')
  ACCEPT 283,FDS
283  FORMAT(1G)
  TYPE 284
284  FORMAT(1X,'FATOR SOMBRA =(0 OU 1)')
  ACCEPT 285,SBR
285  FORMAT(1G)
  11X=1X
  DY=DY*1E-3
  SDELTA=SDELTA*1E-3
  DTU=SDELTA
C ANGULO SOLAR
  FIS=(10.0/5.0)*FPAU
C FATOR CORRELACAO DESVIO PADRAO REFLETOR
  F=(SINH(32.0/5.0)*+2)/COSH(5.0*(16.0/5.0)*+2)
C REFLETIVIDADE DO LSP.100
  R=1.0
C PERDA ANGULO DE A-ABSORVEDOR
  BDTA=(10.0/5.0)*FPAU
  A=-1.0
  IF (DY) 30, 10, 30
DO 30 L=1,400
30  CALL MAODH(1X,1Y,YFL)
  1X=1Y

```



```

1000 CALL DESPF(R,SDELTA,RL,FI1,FI2,THETA,Y1,Y2,YY1,YY2)
      GO TO 102
101  CALL APSPF(R,FIS,SDELTA,RL,FI1,FI2,THETA,Y1,Y2,YY1,YY2)
102  B=ABS((Y1-Y2)/2.0)
      D=((Y1+Y2)/2.0)
      Y0=1.0-(((Y1)-D)/B)**2.0
      IF(Y0)1,1,2
1    FTHETA(L)=0.0
      SDELTA=STO
      GO TO 27
2    CALL FC100(Y0,F,FC10)
C CALCULO DO FATOR DE CORRECAO
      R120=((RABS**2)+(RFDX**2)-(2*RFDX*RABS)*COS(OMEGA))
      CALL PRFD(THETA,R,SDELTA,FIS,D,RL,RFD)
2779  FC=(RFD*R)/R120
      THETAH=ASIN((RFDX/SQRT(R120))*SIN(OMEGA))
      OMEK=(3.1415926-THETA-FI+ALFT1)
      IF(OMEK)400,401,401
400  THETA1=((THETA/2.)+ABS(THETAH-OMEGA)+(DELTA0/2.-ALFT1))
      GO TO 2775
401  THETA1=((THETA/2.)-ABS(THETAH-OMEGA)+(DELTA0/2.-ALFT1))
2777  CTN=SQRT(1-((SIN(OMEGA)*K)**2)/P120)
      FTHETA(L)=FC10*CTN*FC*(COS(THETA1)/COS((THETA/2.)))
3000  SDELTA=STO
27  CONTINUE
C CALCULO DA INTEGRAL DO FLUXO DE SUC-GIA -FRA-
      S00A=0.0
      DO 30 N=1,200
        M10=2*N-1
        M20=2*N
        M30=2*N+1
        PARC=ABS((DTHETA/3.0))*(FTHETA(M10)+4.0*FTHETA(M20)+
          * FTHETA(M30))
        S00A=S00A+PARC
30  CONTINUE
      FRA(I)=S00A
      FRAH=RO*9.306496E-3*FRA(I)
C SUBROTINA CALCULA CONCENTRACAO ACQUO MODELO SOLAR -C(I)-
      C(I)=CC10*(FRAH)
1  CONTINUE
C CALCULO FLUXO ENERGIA INTERCEPTADO OBSERVADOR -FERIA
      AX=RABS*SDELTA
      S00A=0.0
      DO 73 NJ=1,45
        NJ10=2*NJ-1
        NJ20=2*NJ
        NJ30=2*NJ+1
        PPAPC=(AX/3.0)*(C(NJ10)+4.*C(NJ20)+C(NJ30))
        S00A=S00A+PPAPC
73  CONTINUE
      FER(I)=S00A
C CALCULO FLUXO DE ENERGIA INTERCEPTADO OBSERVADOR -FERL(TOT)
      FERL=FER*(FTHETA)
C CALCULO FLUXO DE ENERGIA INTERCEPTADA ABSORVEDOR -GAMA
      GAMMA=(FERL/3.0)
C
C IMPRESSAO DE DADOS
      DY=DY/FRAD
      THETA=THETA/FRAD
      WRITE(23,41)THETA

```

```

41  FORMAT(1X,'ANGULO DE ABERTURA DA PARABOLA =',F5.1)
    WRITE(23,41)RAUS
42  FORMAT(1X,'RAZAO RAO ABSORVEDOR/DIST. FOCAL =',F8.4)
    WRITE(23,42)SDLT,DX,DY
43  FORMAT(1X,'ERRO APORTAMENTO (GRAUS) =',F7.4,/,1X,'RAZAO'
*   ' DESLOCAMENTO ABS/DIST. FOCAL =',F7.4,/,1X,'DESVI',
*   ' DO PADRAO ESPELHO (GRAUS) =',F7.4)
    GAMA=GAMA*100.
    WRITE(23,43)FENTA,GAMA
45  FORMAT(1X,'INTEGRAL DA CONCENTRACAO =',F8.4,/,1X,'FRA
*   ' CAO ENERGIA INTERCEPTADA ABSORVEDOR =',F8.1)
    FXX=IXA*1.0000
    WRITE(23,45)FXX,CORL
46  FORMAT(1X,'GERME SEQ NORMAL =',F10.1,/,1X,'COEF'
    1, ' CORRELACAO =',F8.2)
    WRITE(23,47)FDS
47  FORMAT(1X,'FATOR DEGENERACAO SUP PARABOLICA =',F10.4)
    IF(SER)39,39,48
48  THP0SD=THP0S/FRAD
    THP0GO=THP0G/FRAD
    WRITE(23,47)THP0SD,THP0GO
49  FORMAT(1X,'REGIÃO SUBLEA ENTRE ANG',F8.2,4X,'E',F8.2)
39  WRITE(23,43)
43  FORMAT(1X,/,/,1X,' C      ANG'
*   '      C      ANG      C      ANG      C '
*   '      ANG',/)
    DO 50 J=1,23
    Y(J)=ANGAS(J)/FRAD
    J1=22+J
    J2=45+J
    J3=68+J
    Y(J1)=ANGAS(J1)/FRAD
    Y(J2)=ANGAS(J2)/FRAD
    Y(J3)=ANGAS(J3)/FRAD
    WRITE(23,42)C(J),Y(J),C(J1),Y(J1),C(J2),Y(J2),C(J3),
*   Y(J3)
42  FORMAT(1X,F5.1,2X,F5.2,5X,F6.4,2X,F5.2,5X,F6.1,2X,
*   F6.2,5X,F6.1,2X,F6.1)
50  CONTINUE
    STOP
    END

```