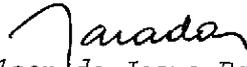


1. Publicação nº <i>INPE-3356-PRE/634</i>	2. Versão	3. Data <i>Dezembro, 1984</i>	5. Distribuição <input type="checkbox"/> Interna <input checked="" type="checkbox"/> Externa <input type="checkbox"/> Restrita
4. Origem <i>DTE</i>	Programa <i>MATER</i>		
6. Palavras chaves - selecionadas pelo(s) autor(es) <i>CÉLULA SOLAR DEGRADAÇÃO POR RADIAÇÃO EFEITO FOTOVOLTAICO</i>			
7. C.D.U.: <i>621.383.5</i>			
8. Título <i>INPE-3356-PRE/634 ESTUDO DA DEGRADAÇÃO DA CORRENTE DE CURTO CIRCUITO E TENSÃO DE CIRCUITO ABERTO DE CÉLULAS SOLARES DE QUALIFICAÇÃO ESPACIAL EM FUNÇÃO DA FLUÊNCIA DE ELÉTRONS DE 1MeV</i>		10. Páginas: <i>32</i>	
		11. Última página: <i>30</i>	
9. Autoria <i>Nelson Veissid</i>		12. Revisada por  <i>Antonio Fernando Beloto</i>	
Assinatura responsável 		13. Autorizada por  <i>Nelson de Jesus Parada Diretor Geral</i>	
14. Resumo/Notas <p><i>A teoria da degradação de células solares por radiação ionizante está baseada no estudo da diminuição do comprimento de difusão dos portadores minoritários do substrato e considera equações básicas para descrever a variação da corrente de curto circuito e tensão de circuito aberto em função da irradiação. Neste trabalho determinam-se os parâmetros que ajustam as curvas de I_{SC} e V_{OC}, em função da fluência de elétrons de 1MeV, a células solares de qualificação espacial do tipo n/p com e sem campo elétrico retrorrefletor (BSF), com e sem contato retrorrefletor (BSR). Foram utilizados dados experimentais publicados pela NASA referentes a células comerciais de uso espacial. Usando o modelo de dupla exponencial e métodos iterativos foram determinadas equações analíticas que permitem determinar os valores da resistência em série, corrente de saturação do mecanismo de difusão e corrente de saturação do processo de recombinação na camada de depleção. Desta forma, foi possível determinar a razão do estranho comportamento dos parâmetros que ajustam a variação de V_{OC} à fluência de elétrons. Neste trabalho é proposta uma equação empírica para a degradação de V_{OC} com a irradiação nas células solares com BSF. Esta equação inclui um fator multiplicativo na corrente de saturação do diodo.</i></p>			
15. Observações <i>Trabalho apresentado no Simpósio Brasileiro de Microeletrônica</i>			

Estudo da Degradação da Corrente de Curto Circuito e Tensão de Circuito Aberto em Células Solares de Qualificação Espacial em Função da Fluência de Elétrons de 1MeV

Nelson Veissid

Instituto de Pesquisas Espaciais - INPE

Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPq

12200 São José dos Campos, SP, Brasil

A teoria da degradação de células solares por radiação ionizante está baseada no estudo da diminuição do comprimento de difusão dos portadores minoritários do substrato e considera equações básicas para descrever a variação da corrente de curto circuito e tensão de circuito aberto em função da irradiação. Neste trabalho determinam-se os parâmetros que ajustam as curvas I_{SC} e V_{OC} , em função da fluência de elétrons de 1MeV, a células solares de qualificação espacial do tipo n/p com e sem campo elétrico retrossuperficial (BSF), com e sem contato retrorrefletor (BSR). Foram utilizados dados experimentais publicados pela NASA referentes a células comerciais de uso espacial. Usando o modelo de dupla exponencial e métodos iterativos foram determinadas equações analíticas que permitem determinar os valores da resistência em série, corrente de saturação do mecanismo de difusão e corrente de saturação do processo de recombinação na camada de depleção. Desta forma, foi possível determinar a razão do estranho comportamento dos parâmetros que ajustam a variação de V_{OC} à fluência de elétrons. Neste trabalho é proposta uma equação empírica para a degradação de V_{OC} com a irradiação nas células solares com BSF. Esta equação inclui um fator multiplicativo na corrente de saturação do diodo.

1 - INTRODUÇÃO

O principal efeito da irradiação por partículas ionizantes (elétrons, prótons e partículas alfa) no silício são os deslocamentos atômicos criados na rede cristalina, que aumentam as taxas de recombinação dos portadores minoritários e, conseqüentemente, diminuem o tempo de vida e comprimento de difusão destes portadores.

A variação do comprimento de difusão em função da fluência de partículas ou fluxo integrado no tempo pode ser dada pela seguinte expressão:

$$\frac{1}{L^2} = \frac{1}{L_0^2} + K_L \phi, \quad (1)$$

onde K_L é o coeficiente de dano para o comprimento de difusão, ϕ é a fluência da irradiação (elétrons) por unidade de área, e L_0 é o comprimento de difusão dos portadores minoritários antes da irradiação ($\phi = 0$).

Empiricamente considera-se que a corrente de curto circuito de uma célula solar é função do comprimento de difusão, na seguinte forma:

$$I_{SC} = a \ln L + b, \quad (2)$$

onde a e b são parâmetros a serem ajustados a cada célula solar e a cada tipo de radiação.

A Equação 2 pode ser dada por:

$$I_{SC}(\phi) = I_{SC}(\phi = 0)[1 - A \ln(1 + B\phi)], \quad (3)$$

onde

$$A = \frac{a}{2I_{SC}(\phi = 0)}$$

e

$$B = K_L L_0^2$$

A tensão de circuito aberto de uma célula solar é

$$V_{OC} = \frac{\eta kT}{q} \ln \left(\frac{I_{SC}}{I_0} + 1 \right) = \frac{\eta kT}{q} \ln \left(\frac{I_{SC}}{I_0} \right), \quad (4)$$

onde η é o fator de qualidade do diodo e

$$I_0 = \frac{qSD_n n_p}{L} = \frac{qSD_n n_p}{L_0} (1 + B\phi)^{1/2} \quad (5)$$

é a corrente de saturação do diodo.

Substituindo a Expressão 5 na Expressão 4 e normalizando esta pela tensão de circuito aberto antes da irradiação, tem-se a seguinte equação para V_{OC} em função da fluência de elétrons:

$$V_{OC}(\phi) = V_{OC}(\phi = 0) \left\{ 1 - \frac{kT}{2qV_{OC}(\phi = 0)} [\ln(1 + B\phi) - 2\ln(1 - A\ln(1 + B\phi))] \right\}, \quad (6)$$

onde A e B são as mesmas constantes definidas na Equação 3.

Esta teoria simples é formalmente apresentada por Tada e Carter Jr. (1982), juntamente com uma coletânea de resultados experimenta

tais da degradação do desempenho elétrico de células solares de qualificação espacial pela irradiação com elétrons de 1MeV.

As células solares analisadas são comerciais e foram projetadas para ser usadas em satélites. Elas são feitas de silício e têm as seguintes características em comum: tipo n/p, substrato de 10 Ohm.cm dopado com Boro, junção feita por difusão de fósforo, metalização com Ti-Pd-Ag, e tamanho de 2 x 2cm². A Tabela 1 fornece as características individuais das células analisadas e a primeira coluna mostra a designação encontrada no "Handbook".

Usando os dados da corrente de curto circuito em função da fluência de elétrons de 1MeV, determinam-se os parâmetros A e B da Equação 3, que fornecem o mínimo desvio quadrático médio (Q). Eles são mostrados na Tabela 2.

Para células solares com substrato de 10 Ohm.cm e irradiadas com elétrons de 1MeV, considera-se experimentalmente que o coeficiente de dano é $K_L = 9 \times 10^{-11} e^{-1}$; portanto, o comprimento de difusão efetivo das células solares antes da irradiação é dado por $L_0 = \sqrt{B/K_L}$ (Tabela 2), juntamente com os valores de A e B para os dispositivos de qualificação espacial indicados na Tabela 1.

Considerando que a Equação 6 governa o comportamento da degradação de V_{OC} com a fluência de elétrons, a variação do fator de qualidade do diodo pode ser dado pela seguinte expressão:

$$\eta(\phi) = \frac{2q[V_{OC}(\phi = 0) - V_{OC}(\phi)]}{kT[\ln(1 + B\phi) - 2\ln(1 - A\ln(1 + B\phi))]} \quad (7)$$

A Figura 1 mostra o comportamento do fator de qualidade do diodo, calculado pela degradação de V_{OC} usando a Equação 7. Pode-se ver que as células solares sem campo retrossuperficial apresentaram valores fisicamente aceitáveis, isto é, η entre 1 e 1,5. Para as células com BSF estes valores foram maiores do que 2 no início da irradiação e decresceram para valores entre 1 e 2 após a irradiação.

Os fatores de qualidade do diodo para células com BSF mostrados na Figura 1 evidentemente não correspondem ao verdadeiro parâmetro n , que seria encontrado se ele fosse calculado pela análise global da característica $I \times V$. Este comportamento anômalo para n pode ser explicado em função de que o modelo simples adotado para a degradação de V_{OC} com a irradiação, por exemplo, não prevê que os dispositivos com BSF apresentam V_{OC} inicial maior do que as células solares sem BSF. Durante a irradiação essa diferença vai se tornando menor, porque a efetividade do BSF diminui com a diminuição do comprimento de difusão.

A Equação 6 precisa ser reformulada com o objetivo de introduzir modificações que considerem o comportamento descrito acima. Para tanto, foi desenvolvido um método para determinar os parâmetros da característica corrente por tensão usando somente os pontos de que se dispõe, isto é, aqueles que estão em Tada e Carter Jr. (1982), que são V_{OC} , I_{SC} , V_{MP} e I_{MP} .

2 - DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS DA CARACTERÍSTICA CORRENTE POR TENSÃO

Estudos teóricos dos mecanismos de transporte em células solares de silício monocristalino indicam que dispositivos com BSF têm correntes de saturação menores do que células sem BSF e, conseqüentemente, maiores tensões de circuito aberto.

O modelo de uma exponencial para a característica $I \times V$ é uma aproximação, onde a corrente de saturação neste modelo é um valor intermediário entre a corrente de saturação do mecanismo de difusão dos portadores minoritários (I_{01}) e a corrente de saturação do processo de recombinação dentro da camada de depleção (I_{02}). O fator de qualidade do diodo é um parâmetro que ajusta uma exponencial média entre os dois processos de transporte de carga (Backus, 1976).

Neste trabalho foi usado o modelo de dupla exponencial na determinação dos parâmetros da curva $I \times V$, porque este modelo permite analisar separadamente o comportamento da corrente de saturação do meca

nismo de difusão dos portadores minoritários em função da fluência de irradiação. Desta forma, para identificar a origem do comportamento anômalo que ocorre com as células com BSF, foram deduzidas equações analíticas que permitem determinar os parâmetros da característica corrente por tensão, usando o modelo de dupla exponencial, partindo da seguinte equação:

$$I = I_L - I_{01} \left[\exp \frac{q(V + IR_S)}{kT} - 1 \right] - I_{02} \left[\exp \frac{q(V + IR_S)}{2kT} - 1 \right]. \quad (8)$$

Sendo o efeito de R_p na característica corrente por tensão desprezível, a corrente fotogerada (I_L) é igual à corrente de curto circuito ($I_L = I_{SC}$).

No ponto de máxima potência a derivada do produto da tensão pela corrente em relação à tensão é nula, isto é:

$$\left. \frac{dI}{dV} \right|_{V = V_{MP}} = - \frac{I_{MP}}{V_{MP}}$$

ou

$$\begin{aligned} \frac{I_{MP}}{V_{MP}} = I_{01} \frac{q}{kT} \left(1 - \frac{I_{MP} R_S}{V_{MP}} \right) \exp \left[\frac{q(V_{MP} + I_{MP} R_S)}{kT} \right] + \\ + I_{02} \frac{q}{2kT} \left(1 - \frac{I_{MP} R_S}{V_{MP}} \right) \exp \left[\frac{q(V_{MP} + I_{MP} R_S)}{2kT} \right]. \end{aligned} \quad (9)$$

Manipulando a Equação 9 e as equações da curva $I \times V$ calculada no ponto de circuito aberto ($V_{OC}, 0$) e no ponto de máxima potência (V_{MP}, I_{MP}), chega-se a uma expressão que tem como única variável o parâmetro resistência em série (R_S):

$$f(R_S) = \left[\frac{V_{MP} \exp(-D/2)}{I_{MP} (\exp D/2 - 1)} \right] \left\{ \frac{q I_{SC}}{kT} \left(1 - \frac{I_{MP} R_S}{V_{MP}} \right) \left[(\exp F) \left(\exp \frac{D}{2} - \exp \frac{F}{2} \right) - \frac{1}{2} \left(\exp \frac{F}{2} \right) (\exp D - \exp F) \right] + \frac{I_{MP}}{V_{MP}} [(\exp F/2) (\exp D - 1) - (\exp F)(\exp D/2 - 1)] + \frac{I_{MP} q}{kT} \left(1 - \frac{I_{MP} R_S}{V_{MP}} \right) \left[\frac{1}{2} (\exp F/2) (\exp D - 1) - (\exp F)(\exp D/2 - 1) \right] \right\},$$

onde

$$D = \frac{qV_{OC}}{kT},$$

$$F = \frac{q(V_{MP} + I_{MP} R_S)}{kT}$$

e

$$f(R_S) = 1$$

correspondem à igualdade que permite calcular R_S usando método iterativo.

A corrente de saturação da exponencial correspondente ao processo de difusão dos portadores minoritários pode ser obtida pela expressão

$$I_{01} = \frac{I_{SC} (\exp F/2 - 1) - (I_{SC} - I_{MP}) (\exp D/2 - 1)}{(\exp D - 1) (\exp F/2 - 1) - (\exp D/2 - 1) (\exp F - 1)}.$$

A corrente de saturação da exponencial correspondente ao processo de recombinação na região de depleção pode ser obtida por:

$$I_{02} = \frac{I_{SC} - I_{01}(\exp D - 1)}{\exp D/2 - 1} .$$

A validade deste método pode ser examinada considerando as seguintes hipóteses:

- A corrente de saturação (I_{01}) deve aumentar com a incidência de elétrons na célula solar, porque I_{01} é inversamente proporcional ao comprimento de difusão dos portadores minoritários, comprimento este que diminui com a fluência de irradiação (Hovel, 1975).
- A corrente de saturação (I_{02}) é consequência da quantidade e dos tipos de defeitos existentes na junção p-n do dispositivo. A irradiação cria defeitos em todo o dispositivo; desta forma espera-se que I_{02} também aumente com a fluência de irradiação.
- A irradiação gera defeitos em todas as partes que compõem a célula solar, fazendo com que a resistividade do substrato, a resistividade da folha e a resistividade da metalização dos contatos elétricos aumentem com a fluência de elétrons. Estes incrementos nas resistividades contribuem de modo positivo para aumentar a resistência em série do dispositivo.

As Figuras 2 a 15 mostram as variações de R_S , I_{01} e I_{02} com a fluência de elétrons para as células 1 a 14. Observa-se que o comportamento destes parâmetros aconteceu como previsto pelas hipóteses acima e todas elas tiveram comportamentos idênticos. Tal fato é suficiente para justificar a validade deste método de determinação dos parâmetros das características I x V. No entanto, na conclusão deste trabalho serão dados outros argumentos que estabelecem a validade deste método.

3 - COMENTÁRIOS E CONCLUSÃO

A excelente publicação da NASA apresenta uma coletânea de dados da degradação dos parâmetros elétricos de vários tipos de células solares de qualificação espacial, em função da fluência de elétrons de 1MeV; ela indica uma teoria simples para a variação da corrente de curto-circuito e tensão de circuito aberto.

Foi proposto ao autor deste trabalho aplicar a teoria encontrada no trabalho de Tada e Carter Jr. (1982) na interpretação dos dados experimentais encontrados nesta publicação.

No início dos cálculos verificou-se que a teoria previa, razoavelmente bem, o comportamento da corrente de curto-circuito para todas as células solares analisadas. A tensão de circuito aberto comportou-se conforme a teoria somente nas células solares sem campo elétrico retrossuperficial (BSF), e o ajuste para os dispositivos com BSF apresentou resultados não-aceitáveis fisicamente.

Visando entender a causa deste estranho comportamento, tomaram-se os dados da variação da tensão e corrente no ponto de máxima potência em função da fluência de elétrons. Tendo estes três pontos da característica corrente por tensão (V_{OC} , I_{SC} , V_{MP} e I_{MP}) e usando método de dupla exponencial, determinam-se analiticamente as variações das correntes de saturação e as resistências em série.

Baseado nos valores da corrente de saturação do diodo determinado pelo método de dupla exponencial, encontra-se a explicação para o estranho comportamento dos parâmetros que ajustam a variação da tensão de circuito aberto em função da fluência de elétrons de 1MeV para células solares com BSF.

As densidades de correntes de saturação do mecanismo de difusão (J_{01}) para todas as células solares analisadas foram colocadas no mesmo gráfico; foi então possível observar que elas podem ser separa

das em duas faixas, uma para células sem e a outra para células com campo retrossuperficial (BSF) (Figura 16).

Os dispositivos com BSF apresentaram antes da irradiação I_{01} uma ordem de grandeza menor em relação àqueles que não têm BSF. Esta diferença foi diminuindo com a fluência de elétrons; para fluências maiores do que 5×10^{14} elétrons/cm², observa-se que as densidades de corrente de saturação para as células com BSF atingem as mesmas densidades das células sem BSF. De acordo com o que consta na literatura, isto mostra que a efetividade do campo retrossuperficial diminui com o aumento da fluência de partículas incidentes na célula solar e desaparece para altos níveis de radiação, isto é, acima de 5×10^{14} elétrons/cm² de 1MeV. Em função disto é que os satélites projetados para ter grande durabilidade ou aqueles em cujas órbitas incidem altos fluxos de partículas não são alimentados por células solares que têm campo elétrico retrossuperficial.

A teoria indica que células solares com BSF têm a seguinte corrente de saturação (Fahrenbuch e Bube, 1983):

$$J_0 = \frac{qDn_1^2}{LN_A} \left[\frac{(SL/D)\cosh(W/L) + \sinh(W/L)}{\cosh(W/L) + (SL/D)\sinh(W/L)} \right],$$

onde

$$S = \frac{N_A D^+}{N_A^+ L^+} \left[\frac{(S_n L^+ / D^+) \cosh(W^+ / L^+) + \sinh(W^+ / L^+)}{\cosh(W^+ / L^+) + (S_n L^+ / D^+) \sinh(W^+ / L^+)} \right].$$

A aplicação desta equação para estudar a degradação de V_{OC} com a irradiação é impraticável. Devido a isto, desenvolveu-se uma equação empírica para a corrente de saturação do diodo e encontra-se um termo multiplicativo mais adequado:

$$J = \frac{C}{L} \left(\frac{\sinh \frac{W}{2L}}{\cosh \frac{W}{2L}} \right)^2 ,$$

onde W é a espessura da célula solar e C é uma constante de proporcionalidade.

Usando esta nova equação para a corrente de saturação nas células solares com BSF, o fator de qualidade do diodo calculado pela degradação da tensão de circuito aberto, que antes era dado pela Equação 7, pode ser calculado usando a seguinte expressão:

$$n(\phi) = \frac{2q[V_{OC}(\phi = 0) - V_{OC}(\phi)]}{kT \left[\frac{\ln(1+B\phi) - 2\ln(1 - A\ln(1+B\phi)) + 4\ln \frac{\sinh\left(\frac{W}{2L}\right) \cosh\left(\frac{W}{2L_0}\right)}{\cosh\left(\frac{W}{2L}\right) \sinh\left(\frac{W}{2L_0}\right)} \right]} ,$$

onde

$$L = L_0 / (1 + B\phi)^{1/2}$$

é o comprimento de difusão.

Usando a expressão acima calcula-se $n(\phi)$ cujo comportamento pode ser observado na Figura 17. Esta nova variação do fator de qualidade do diodo é fisicamente mais aceitável do que aquelas mostradas na Figura 1.

Outro fator convincente da validade do método iterativo para a determinação dos parâmetros da característica $I \times V$, além das hipóteses mencionadas no início desta seção, é que as células solares de tipos convencionais apresentaram grandes resistências em série antes da

irradiação (0,2 Ohm) e aumentaram até 0,35 Ohm para uma fluência de 10^{16} e/cm². As células solares convencionais não têm boa resposta espectral para curtos comprimentos de onda porque a junção não é rasa (0,3 - 0,5µm) e a camada anti-refletora de SiO absorve no azul e ultravioleta. Em função disto é que a grade coletora da metalização não tem geometria fina e, conseqüentemente, as células solares convencionais possuem R_S maior do que os dispositivos com junção rasa e apropriada camada anti-refletora.

As células solares não convencionais tiveram uma variação na resistência em série de 20mOhm, para antes da irradiação até 200mOhm para uma fluência de 10^{16} elétrons/cm².

Este trabalho apresenta resultados que são importantes para a previsão do desempenho elétrico das células solares de qualificação espacial e apresenta um método prático para a determinação dos parâmetros da característica corrente por tensão em células solares.

4 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BACKUS, C.E. *Solar cells*. New York, IEEE Press, 1976.
- FAHRENBACH, A.L.F.; BUBE, R.H. *Fundamentals of solar cells*. New York, Academic, 1983.
- HOVEL, H.J. *Solar cells*. New York, Academic, 1975.
- TADA, H.Y.; CARTER Jr., J.R. *Solar cells radiation handbook*. Pasadena, CA, 1982. (JPL Publication 82-69).

TABELA 1

DESCRIÇÃO DAS CÉLULAS SOLARES ANALISADAS

Designação	Célula	Espessura (µm)	Camada Anti-refletora	BSF	BSF	Junção (µm)
K6	1	300	Ta ₂ O ₅	sem	Al evaporado	rasa
K4	2	300	Ta ₂ O ₅	sem	sem	rasa
Convencional	3	300	SiO	sem	sem	0,3-0,5
K7 texturizado	4	200	TiO _x /Al ₂ O ₃	com	pasta de boro	rasa
K6 $\frac{1}{2}$	5	200	Ta ₂ O ₅	com	pasta de boro	rasa
K6 $\frac{3}{4}$	6	200	TiO _x /Al ₂ O ₃	com	pasta de boro	rasa
K4 $\frac{1}{2}$	7	200	Ta ₂ O ₅	com	sem	rasa
K4 $\frac{3}{4}$	8	200	TiO _x /Al ₂ O ₃	com	sem	rasa
K7 texturizado	9	200	Ta ₂ O ₅	sem	Al evaporado	rasa
K6	10	200	Ta ₂ O ₅	sem	Al evaporado	rasa
K4	11	200	Ta ₂ O ₅	sem	sem	rasa
Convencional	12	200	SiO	sem	sem	0,3-0,5
K6 $\frac{3}{4}$	13	100	TiO _x /Al ₂ O ₃	com	pasta de boro	rasa
K4 $\frac{3}{4}$	14	100	TiO _x /Al ₂ O ₃	com	sem	rasa

TABELA 2

PARÂMETROS DE AJUSTE DAS CURVAS DE DEGRADAÇÃO DE I_{SC} COM A FLUÊNCIA DE
ELÉTRONS PARA ϕ ENTRE 0 E $10^6 e/cm^2$

Célula	A	B $\left(10^{15} \frac{cm^2}{e}\right)$	Q(%)	$L_0 (\mu m)$
1	0,0491	24,8	0,33	166
2	0,0552	11,2	0,34	111
3	0,0629	9,5	0,24	103
4	0,0575	24,9	0,26	167
5	0,0607	33,9	0,30	194
6	0,0648	29,6	0,29	182
7	0,0629	9,6	0,19	104
8	0,0687	6,8	0,08	87
9	0,0492	26,2	0,28	171
10	0,0543	23,1	0,12	160
11	0,0587	4,9	0,15	74
12	0,0615	5,8	0,15	81
13	0,0747	10,4	0,36	108
14	0,0633	3,2	0,37	60

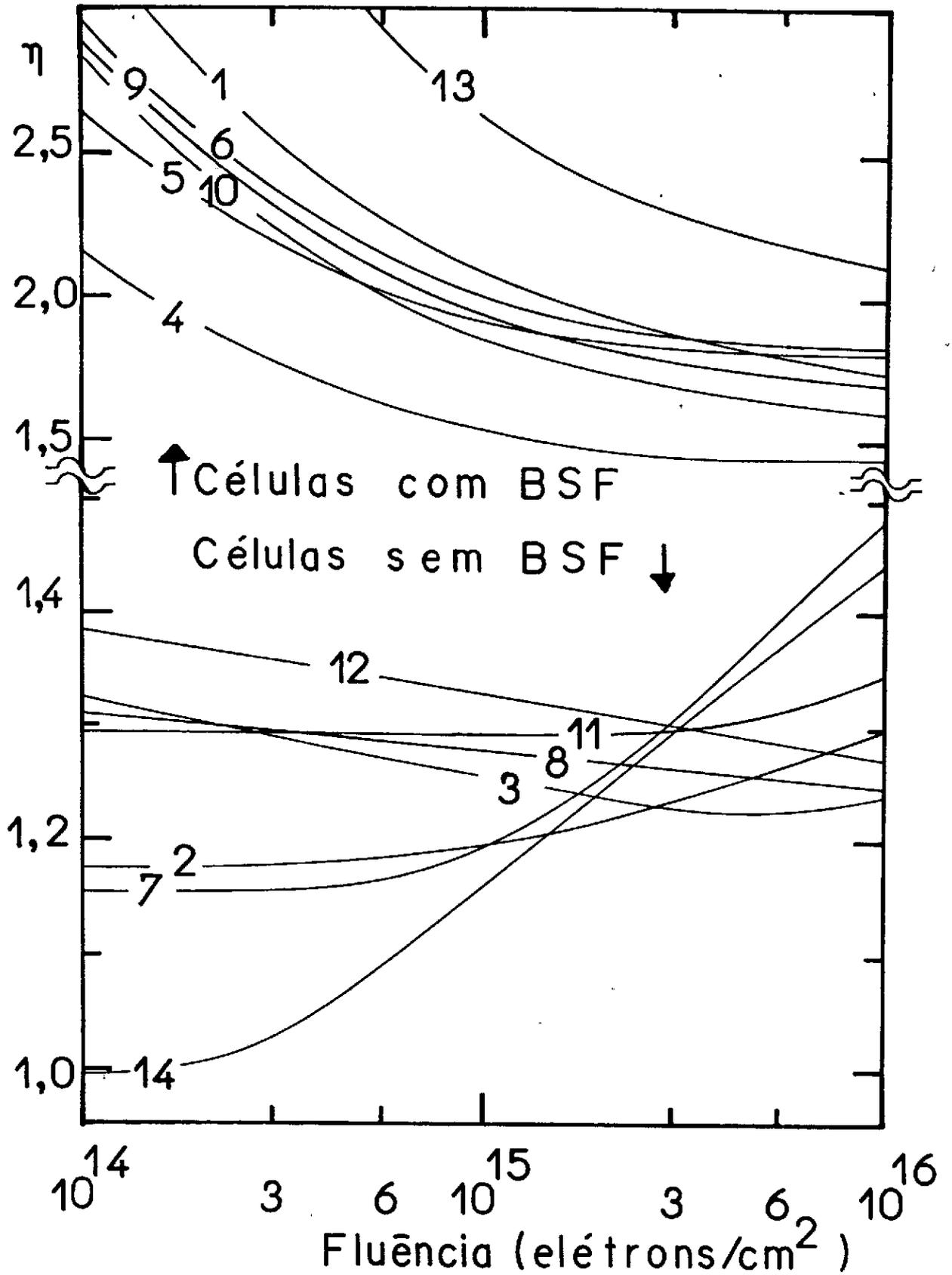


Fig. 1 - Fator de qualidade do diodo em função da irradiação, calculado pela degradação de V_{oc} .

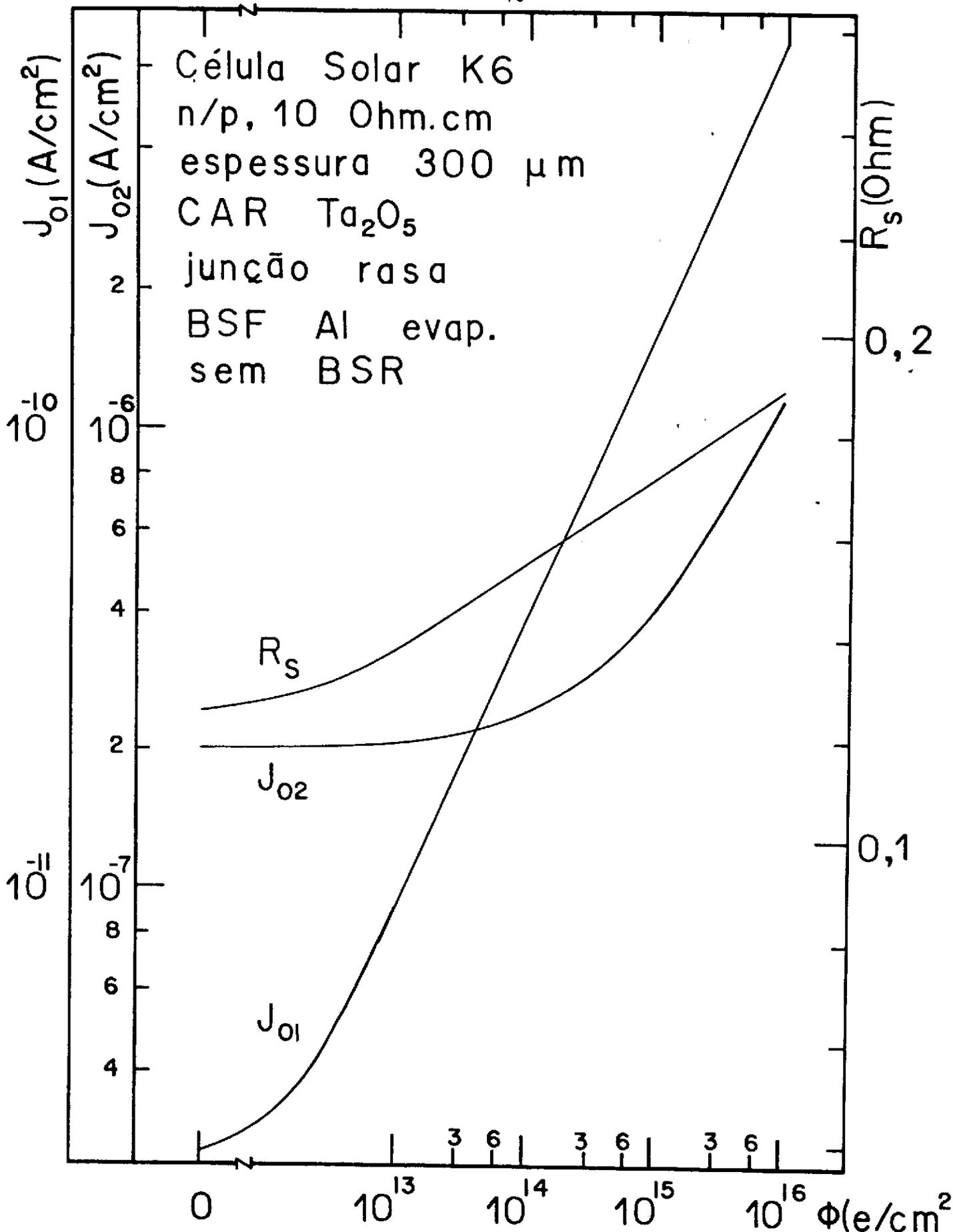


Fig. 2 - Variação dos parâmetros das curvas IxV da célula solar 1, calculados por iteração.

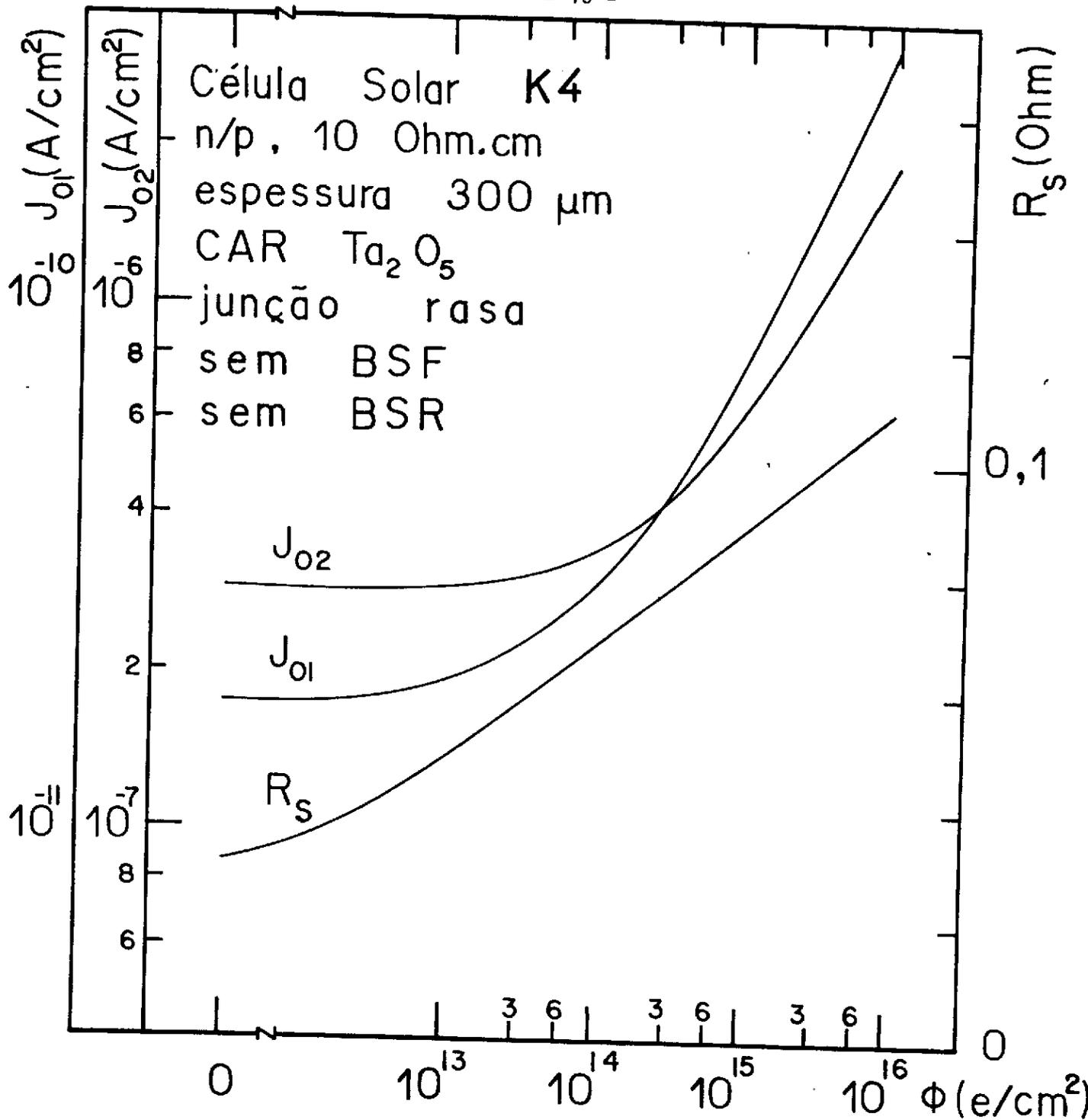


Fig. 3 - Variação dos parâmetros das curvas IxV da célula solar 2, calculados por iteração.

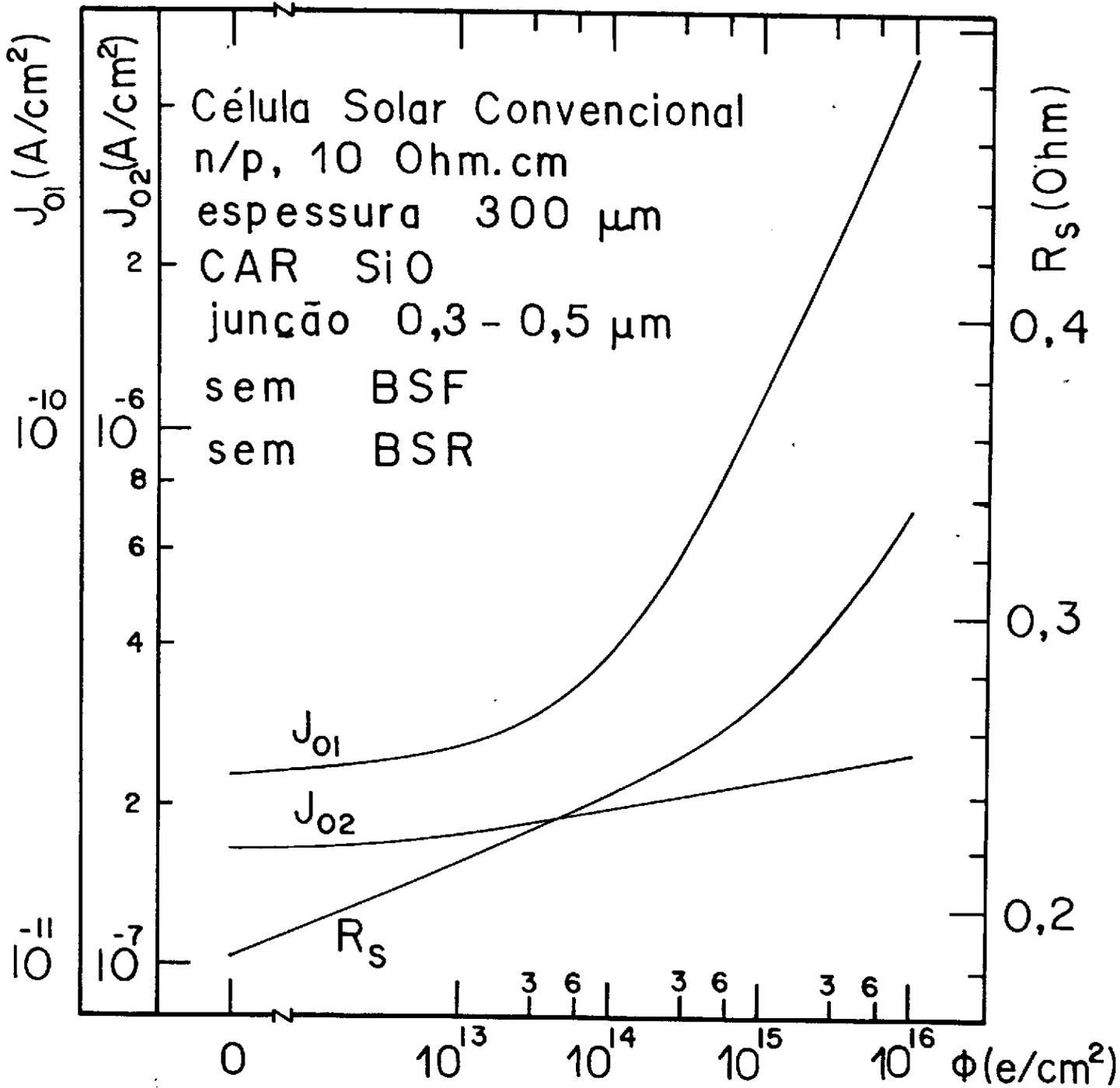


Fig. 4 - Variação dos parâmetros das curvas IxV da célula solar 3, calculados por iteração.

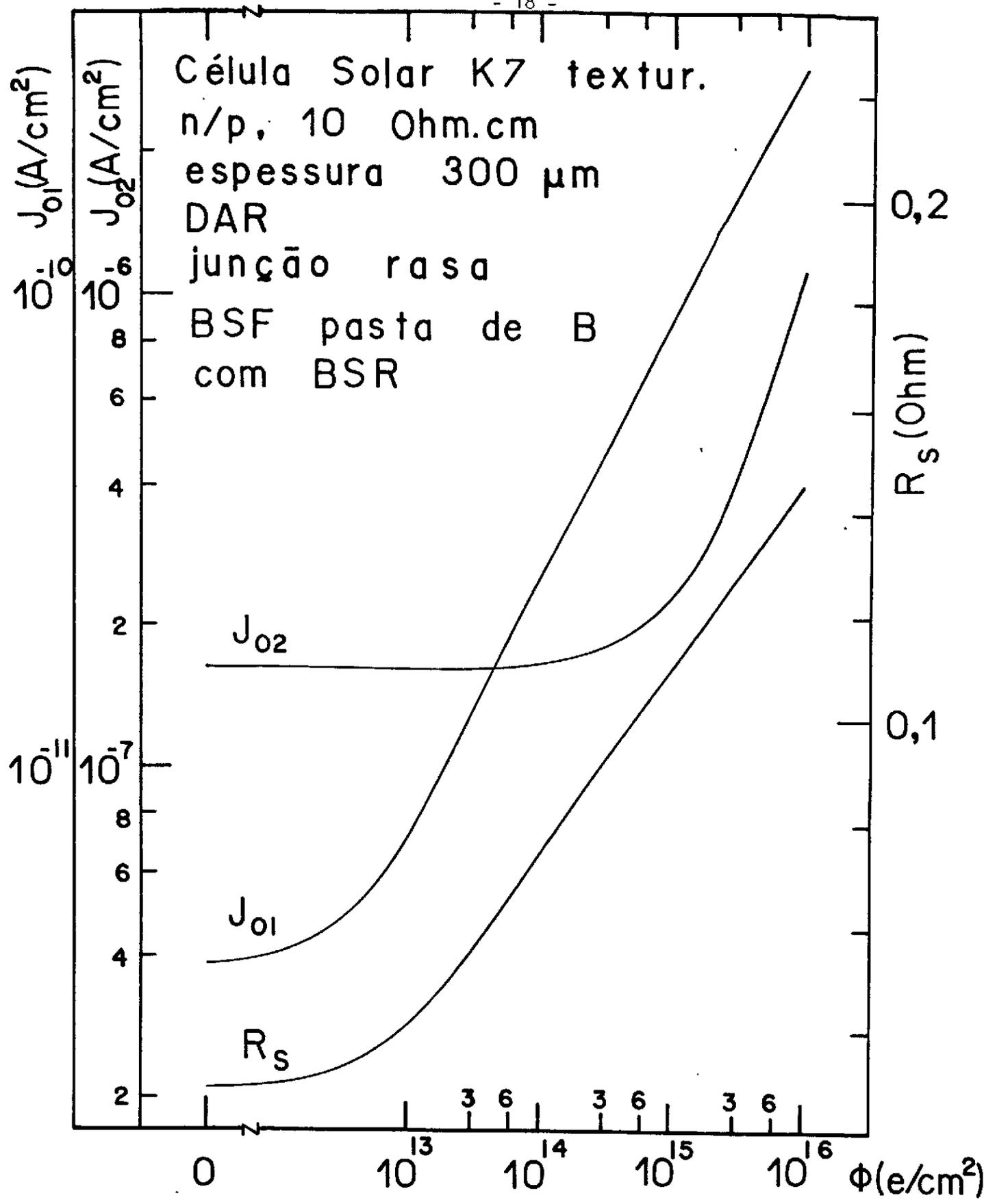


Fig. 5 - Variação dos parâmetros das curvas IxV da célula solar 4, calculados por iteração.

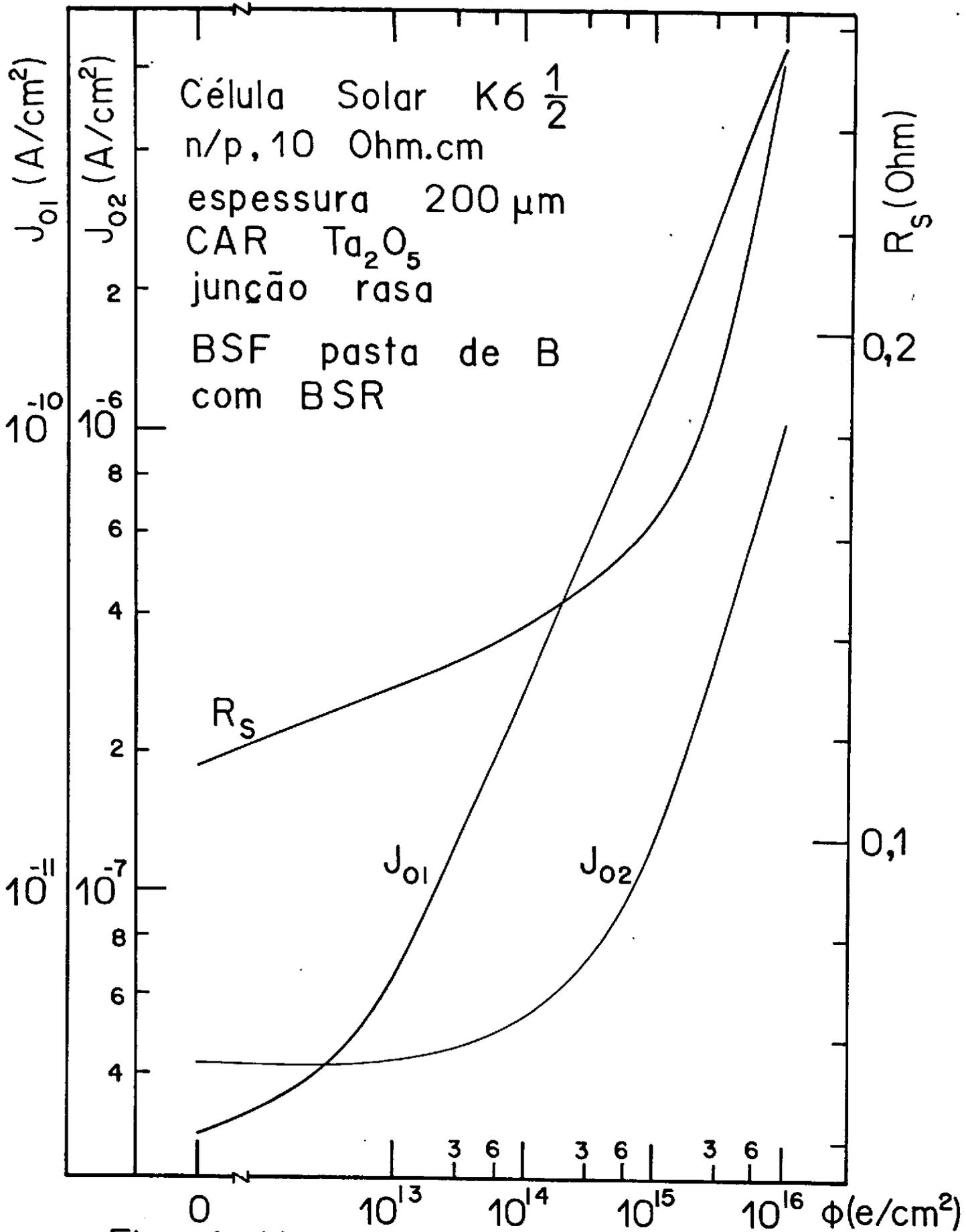


Fig. 6 - Variação dos parâmetros das curvas IxV da célula solar 5, calculados por iteração.

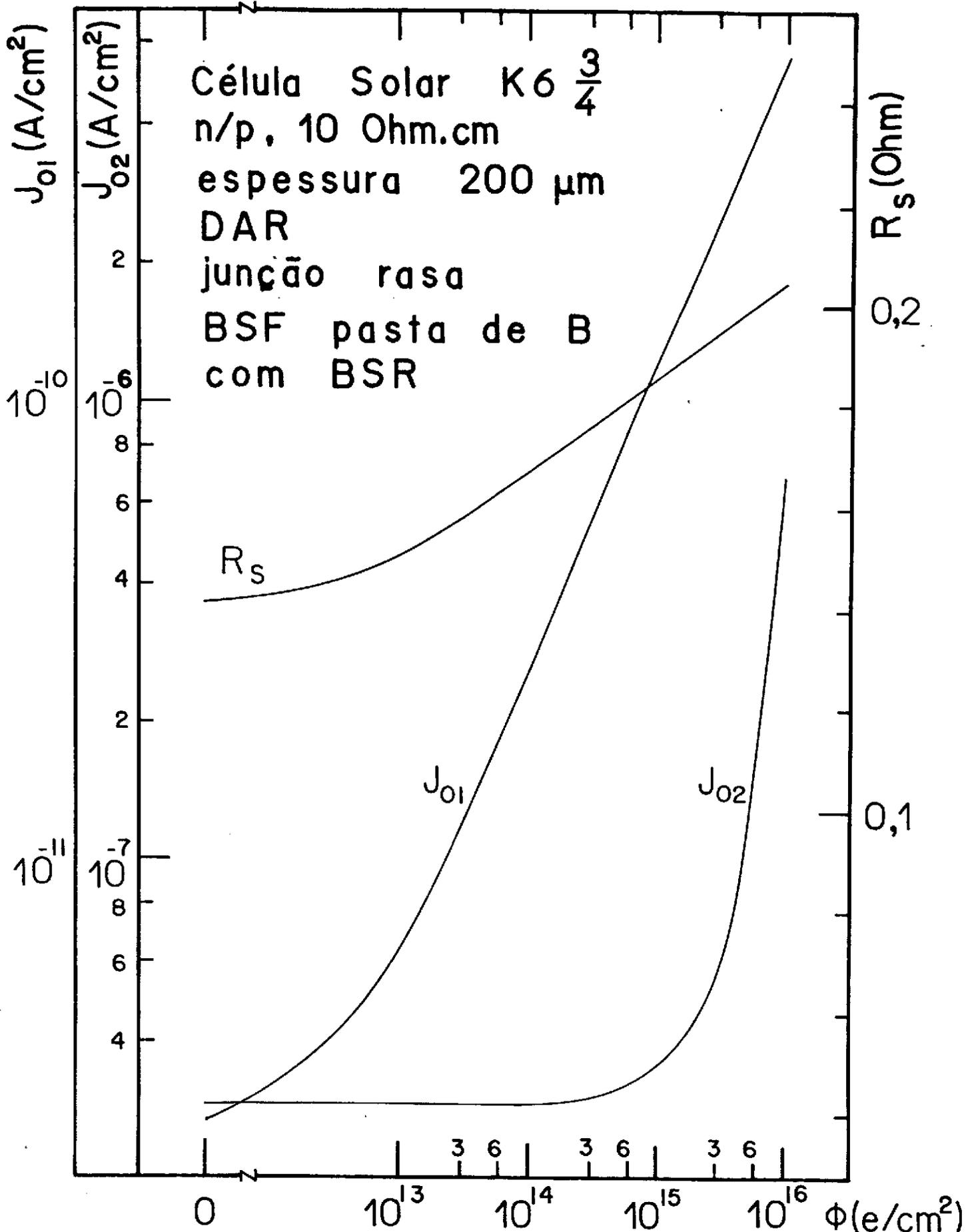


Fig. 7 - Variação dos parâmetros das curvas IxV da célula solar 6, calculados por iteração.

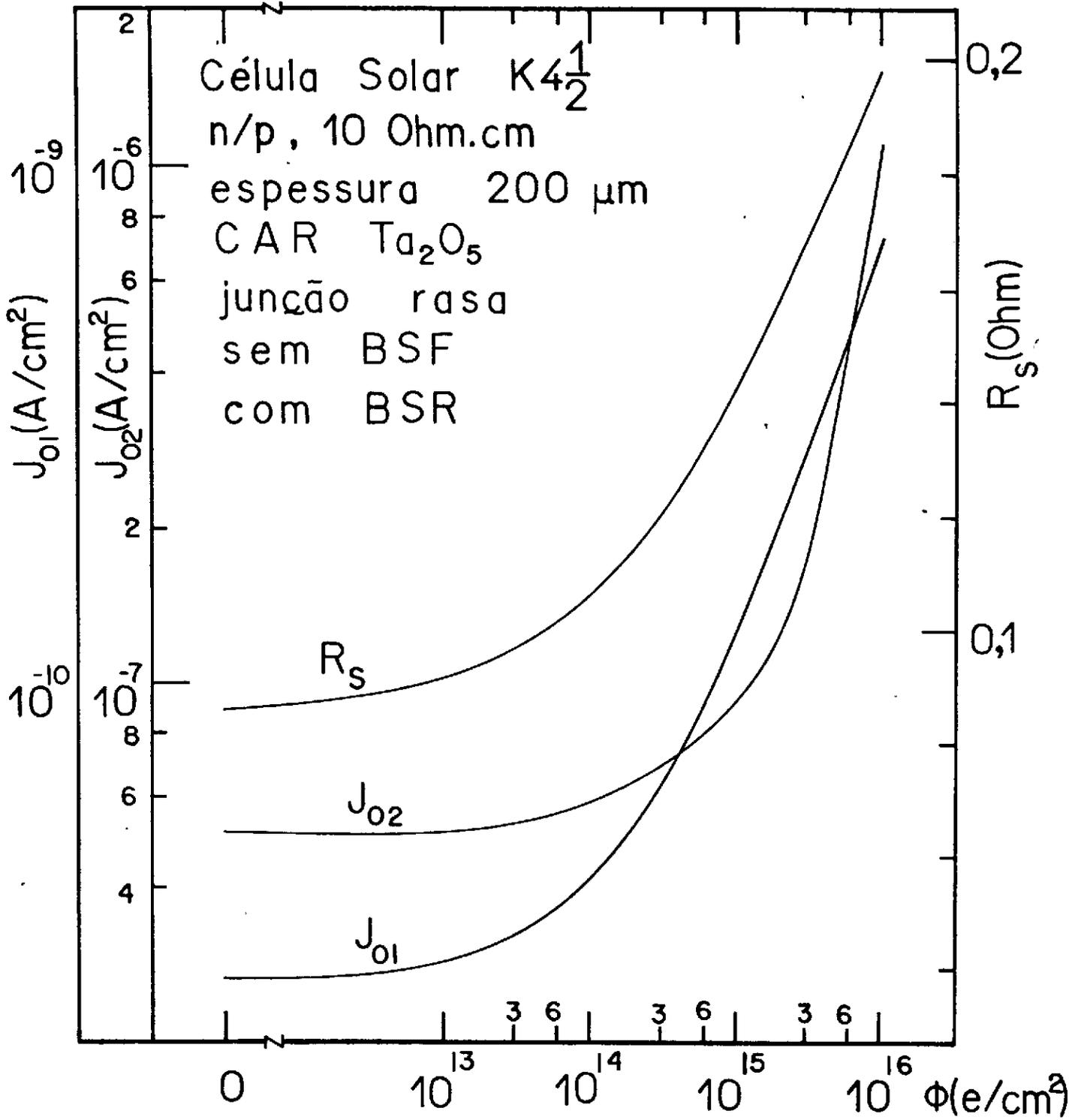


Fig. 8 - Variação dos parâmetros das curvas IxV da célula solar 7, calculados por iteração.

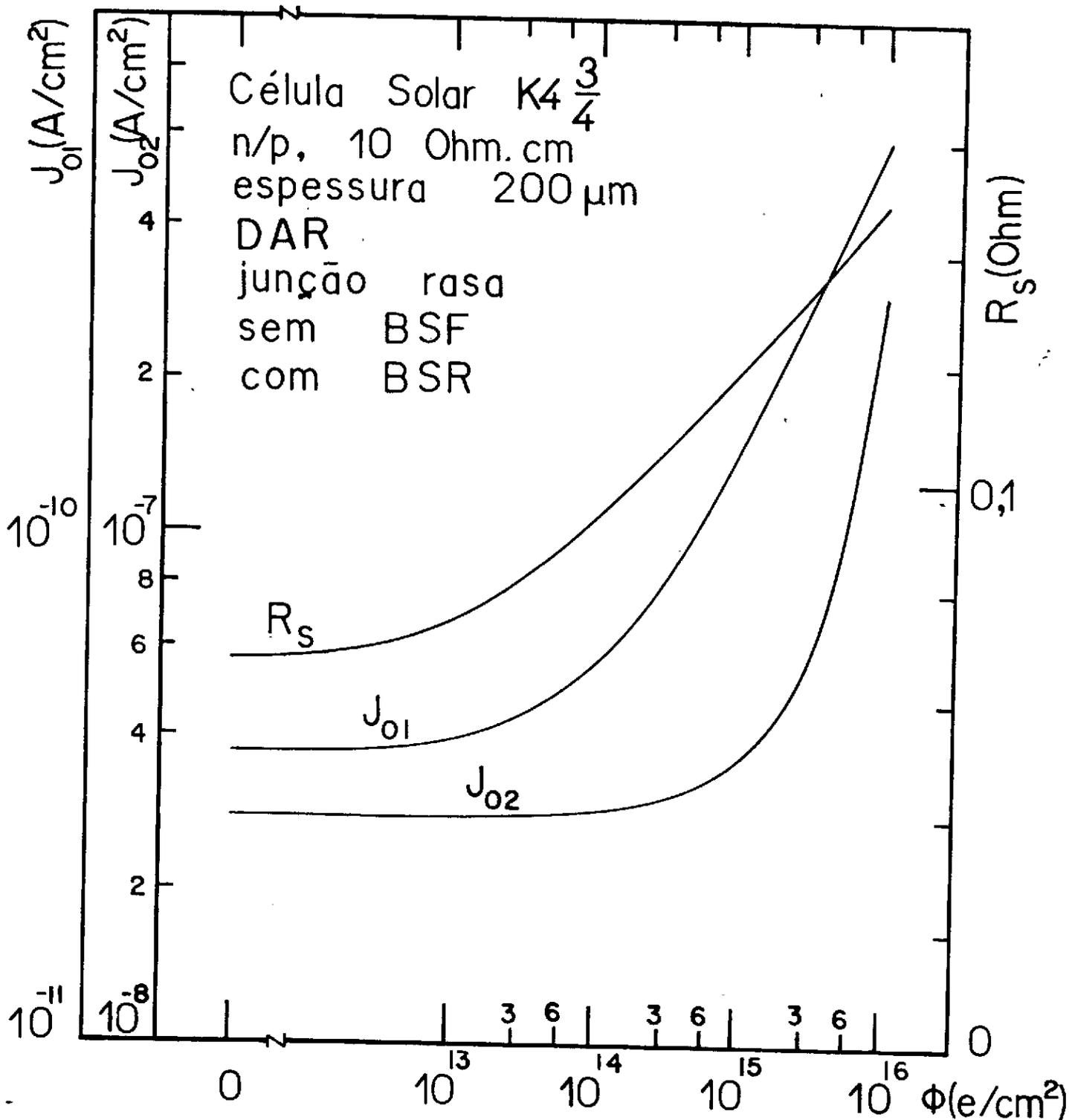


Fig. 9 - Variação dos parâmetros das curvas IxV da célula solar 8, calculados por iteração.

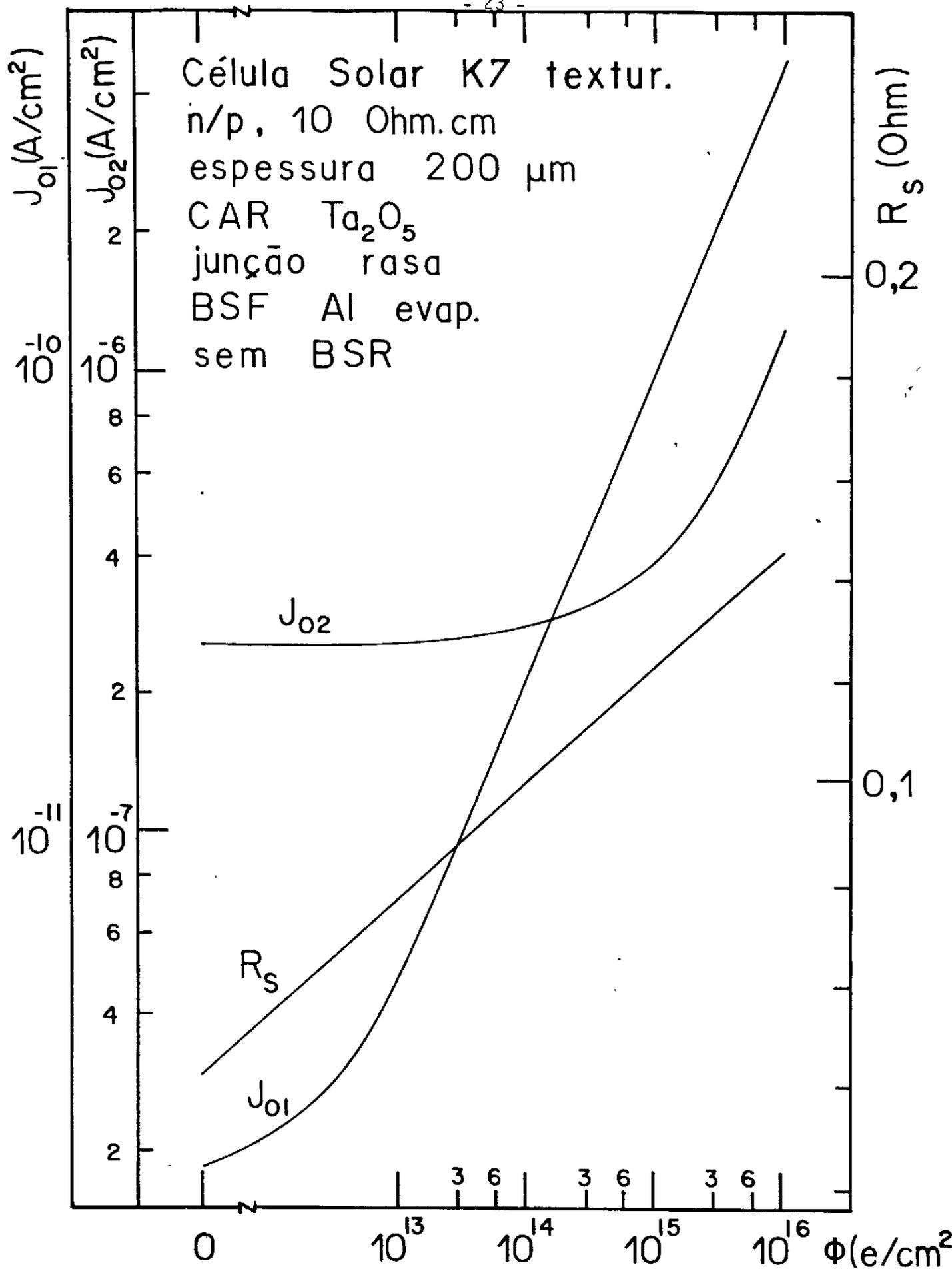


Fig. 10 - Variação dos parâmetros das curvas IxV da célula solar 9, calculados por iteração.

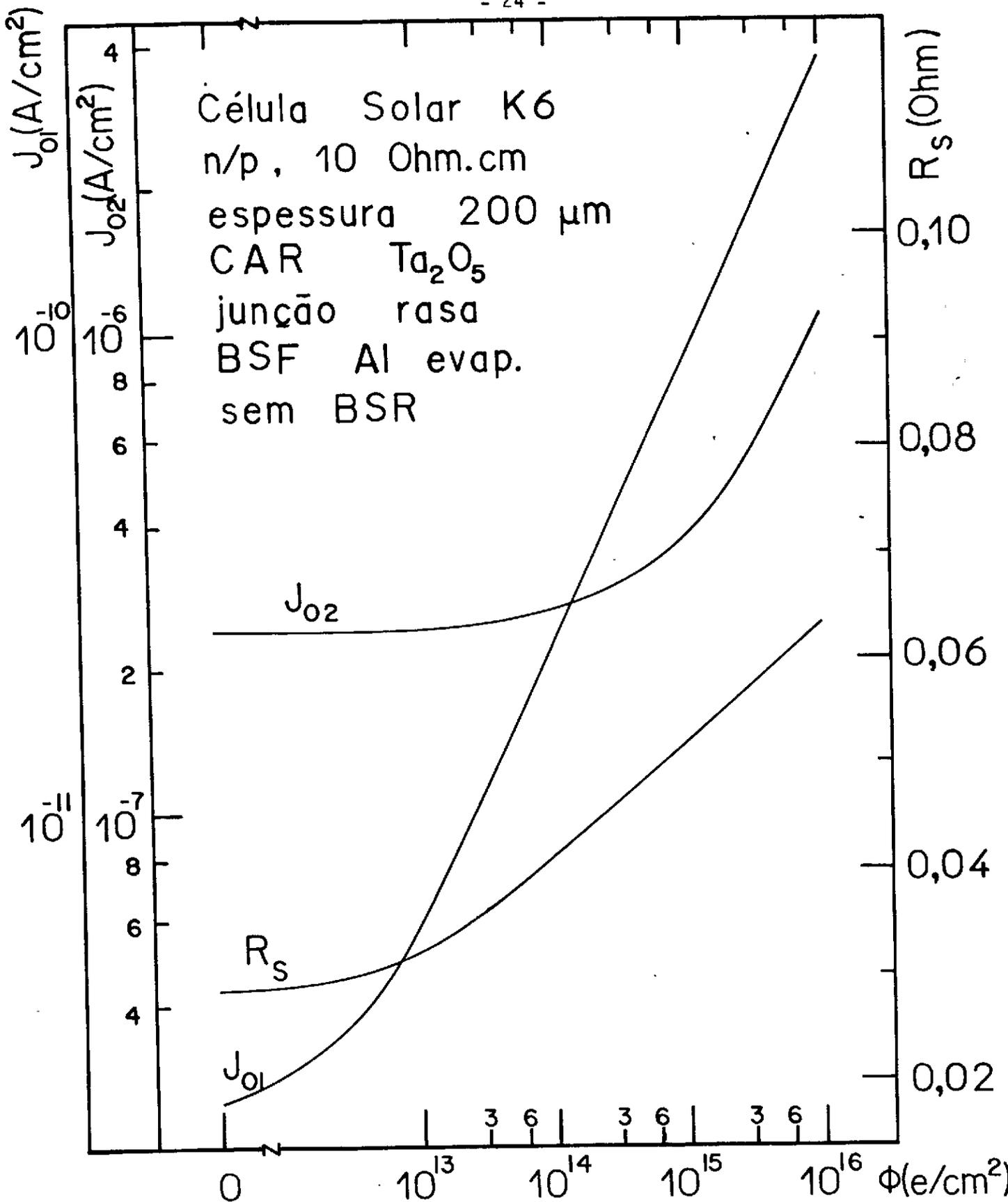


Fig. 11 - Variação dos parâmetros das curvas IxV da célula solar 10, calculados por iteração.

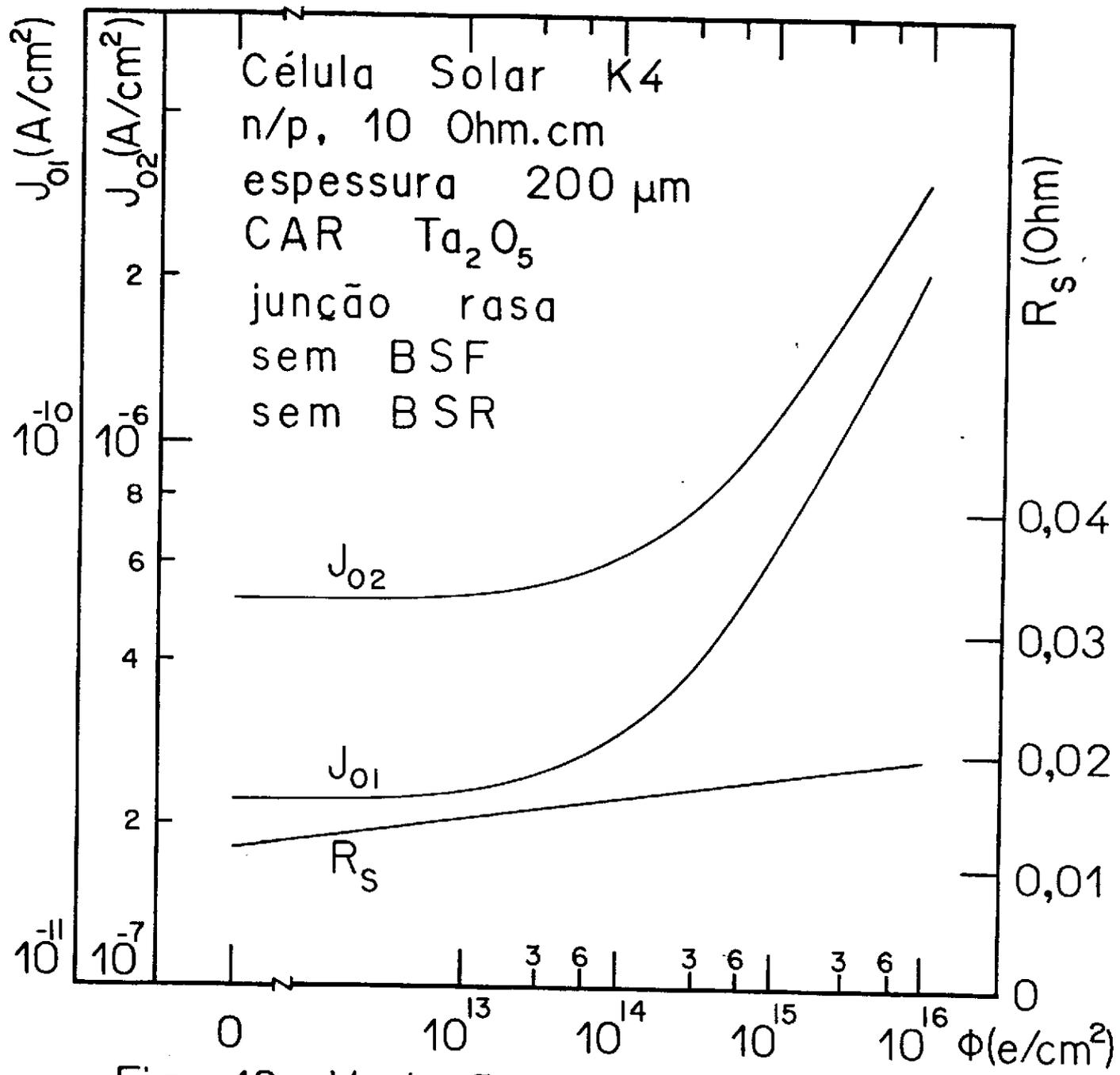


Fig. 12 - Variação dos parâmetros das curvas IxV da célula solar 11, calculados por iteração.

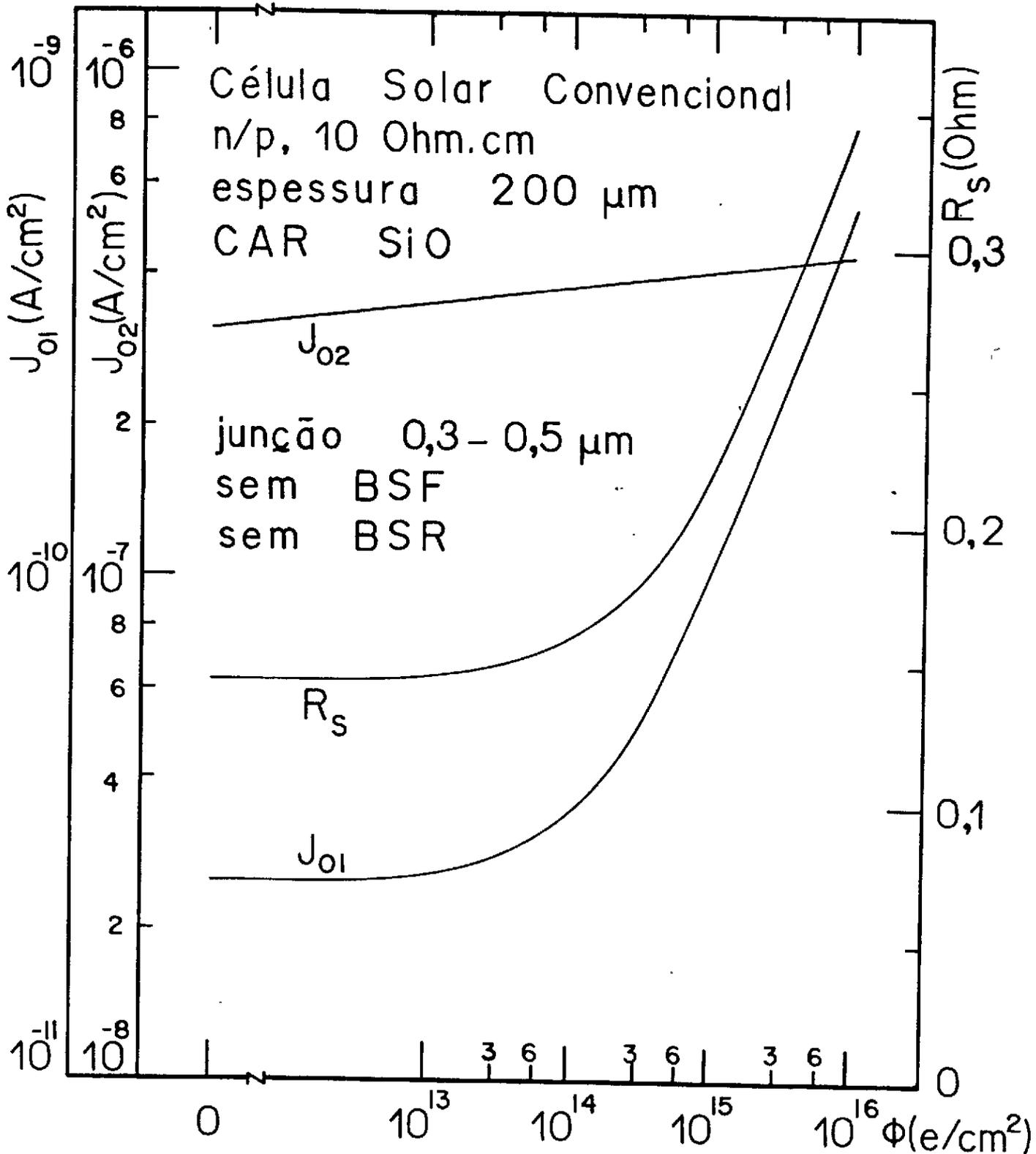


Fig. 13 - Variação dos parâmetros das curvas IxV da célula solar 12, calculados por iteração.

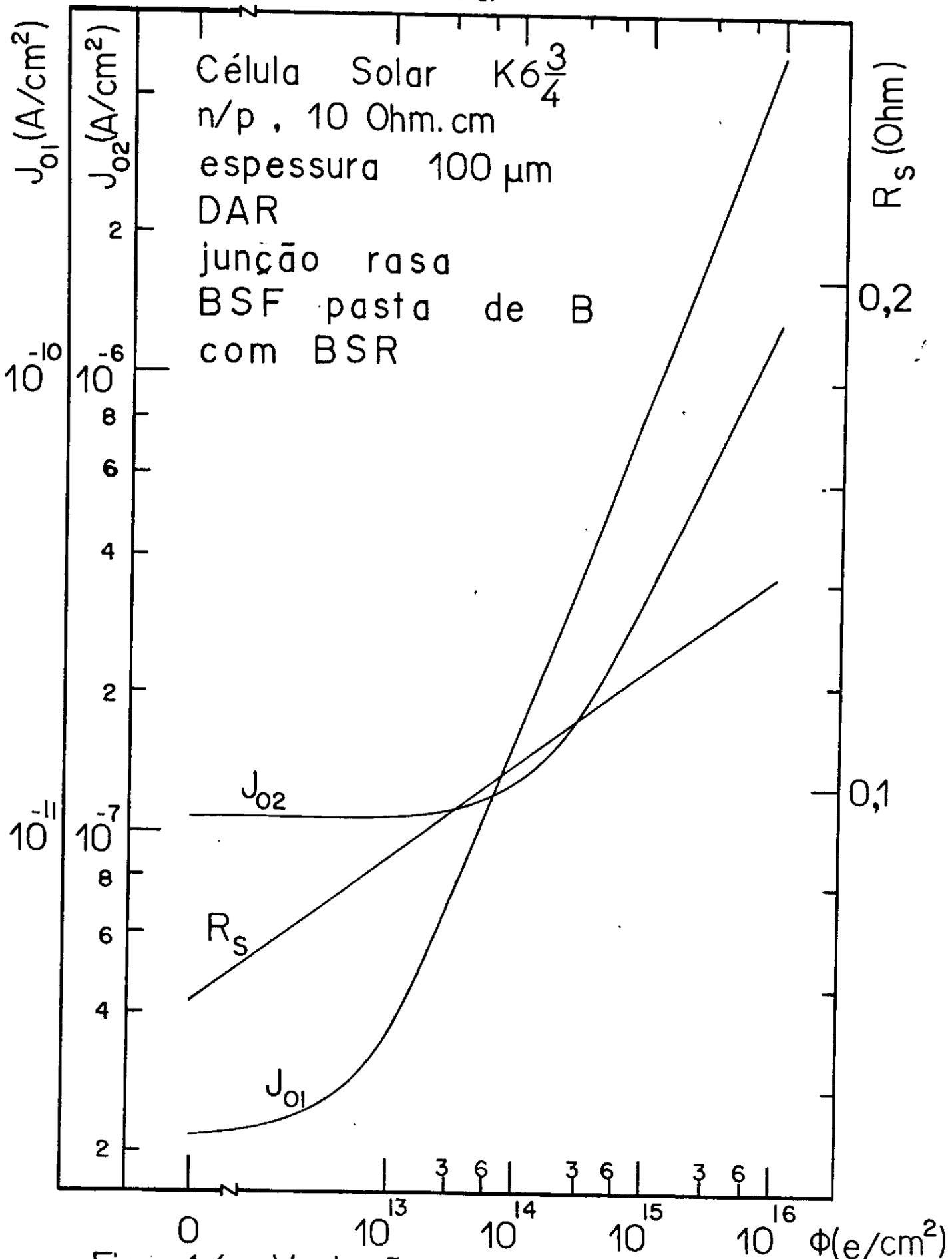


Fig. 14 - Variação dos parâmetros das curvas IxV da célula solar 13, calculados por iteração.

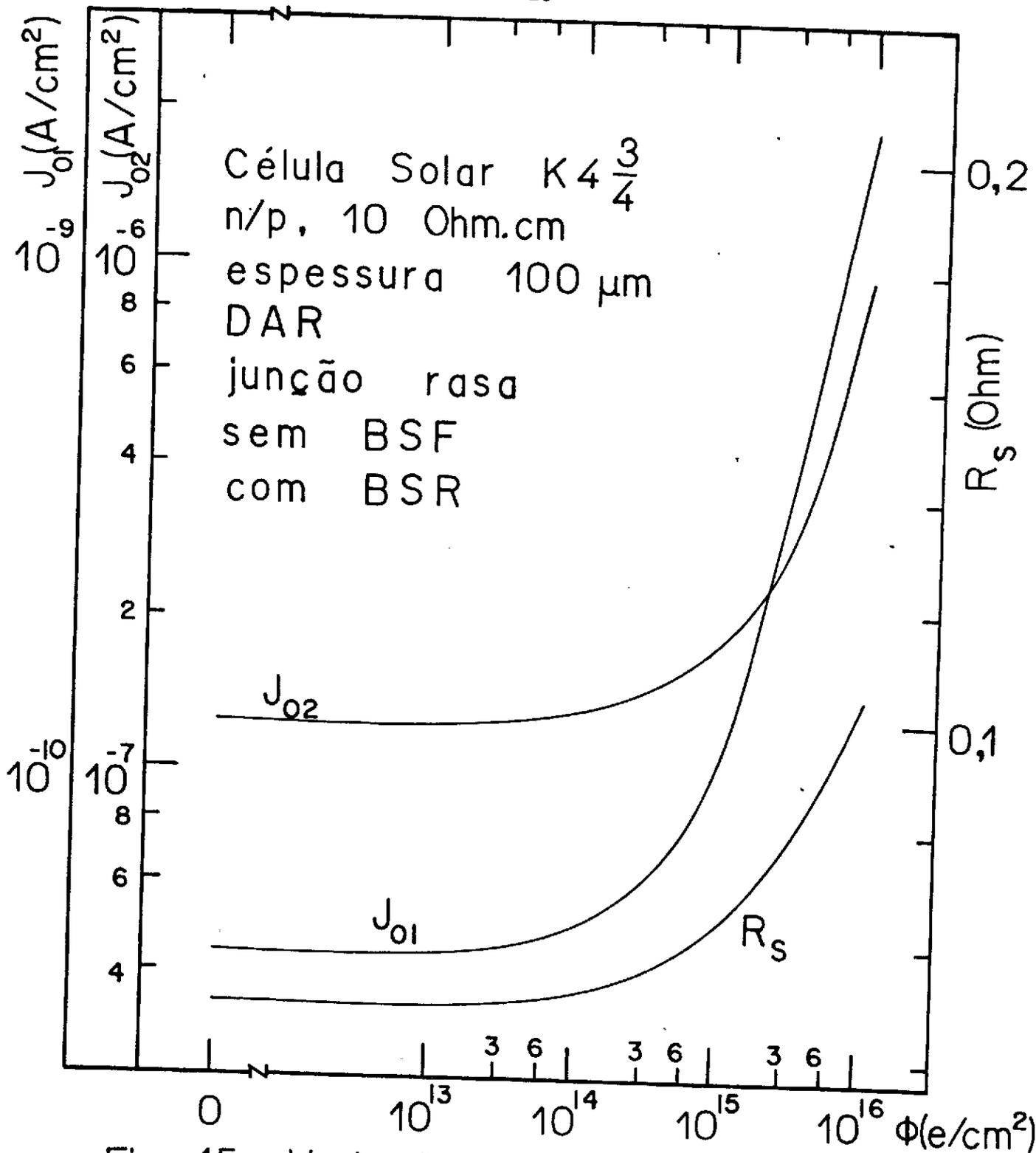


Fig. 15 - Variação dos parâmetros das curvas IxV da célula solar 14, calculados por iteração.

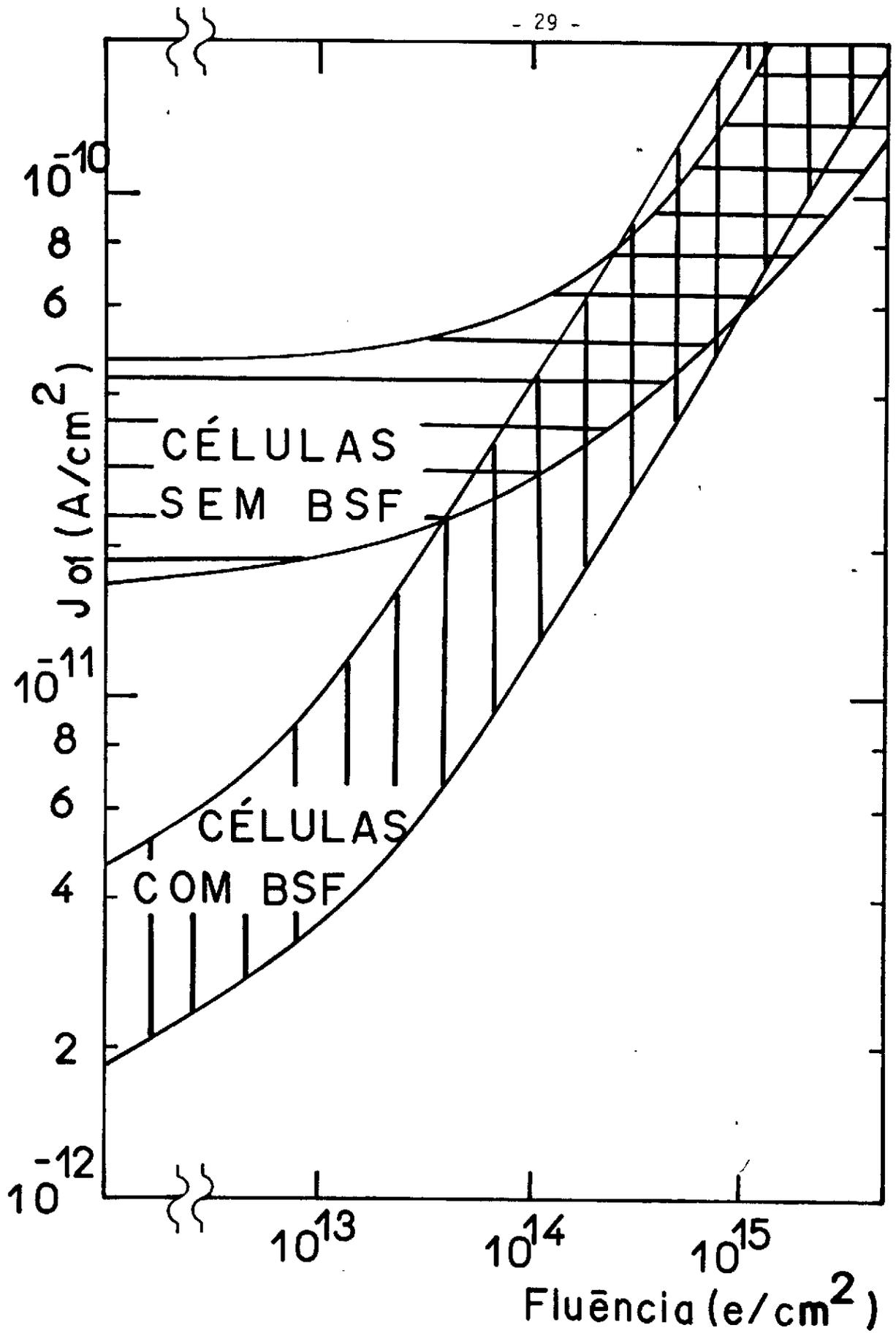


Fig. 16- Corrente de saturação para os dispositivos analisados.

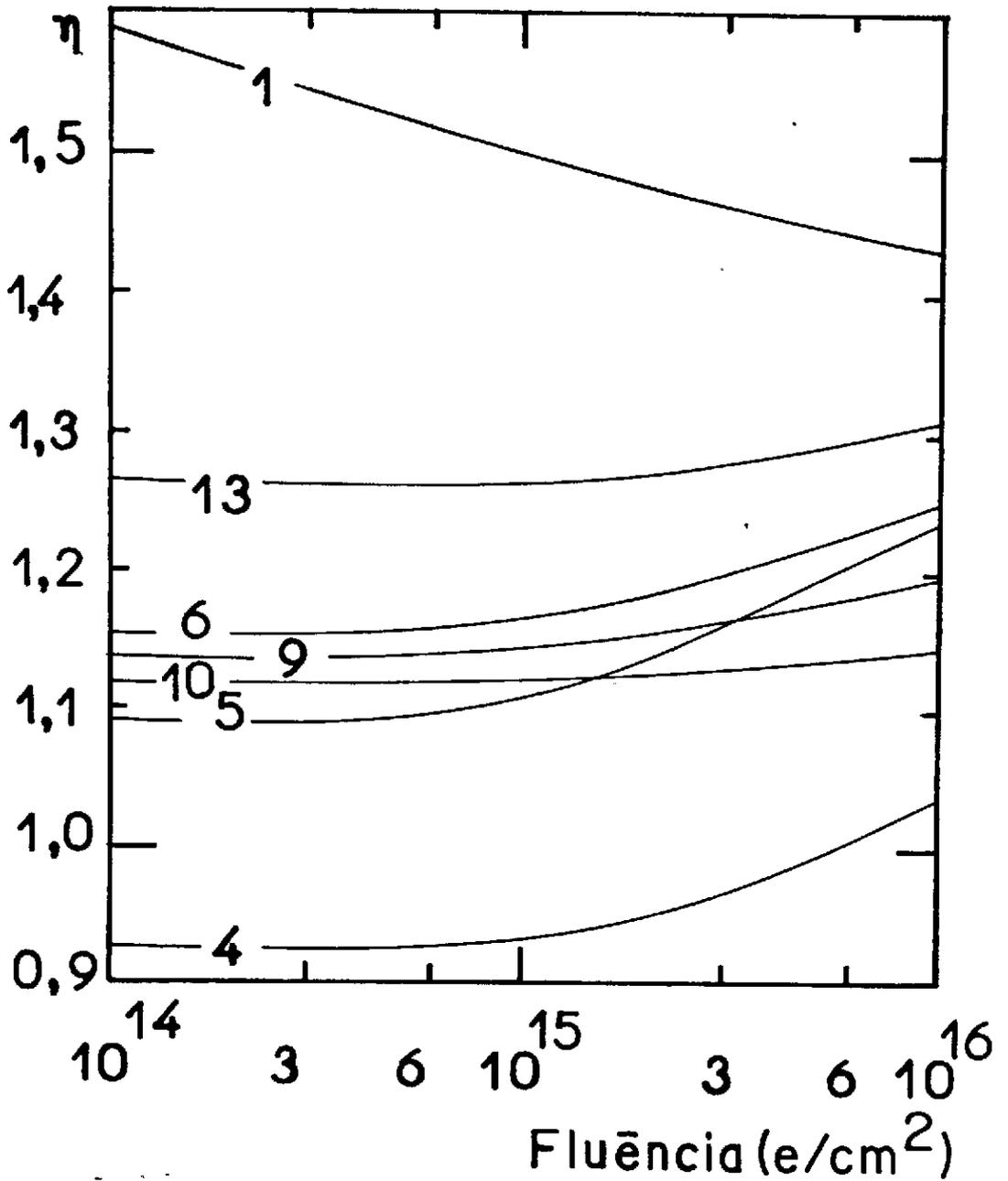


Fig. 17- Variação teórica do fator de qualidade em células solares com BSF.