

CELDAS SOLARES DE UNION N<sup>+</sup>/P

TESIS

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE

MAESTRO EN CIENCIAS

PRESENTA

HUMBERTO ARIZPE CHAYEZ

R-50

CENTRO DE INVESTIGACION EN FISICA DE LA UNIVERSIDAD DE SONORA

HERMOSILLO SONORA

JULIO DE 1990

# Universidad de Sonora

Repositorio Institucional UNISON



**"El saber de mis hijos  
hará mi grandeza"**



Excepto si se señala otra cosa, la licencia del ítem se describe como openAccess

BIBLIOTECA  
**C. I. F.-U. S.**  
UNIVERSIDAD DE SONORA

DEDICO ESTE TRABAJO  
A MI AMADO HIJO

HUMBERTO

---

BIBLIOTECA  
**C. I. F.-U. S.**  
UNIVERSIDAD DE SONORA

CON RECONOCIMIENTO Y RESPETO PARA

ARTURO MORALES ACEVEDO

SIN CUYA DIRECCION ESTE TRABAJO  
NO HUBIERA SIDO POSIBLE.

BIBLIOTECA  
**C. I. F. - U. S.**  
UNIVERSIDAD DE SONORA

CON INFINITO AGRADECIMIENTO  
POR LA AYUDA MORAL Y MATERIAL  
QUE ME BRINDARON

CAROLINA  
ROSSY  
FRANCISCO  
RAFAEL.

BIBLIOTECA  
**C. I. F. - U. S.**  
UNIVERSIDAD DE SONORA

A  
MAVY  
KARINA  
Y  
CARMEN CHAVEZ.

## TEMARIO

<b>CAPITULO I.-INTRODUCCION</b>	1
I.1.-OBJETIVO.	1
I.2.-ANTECEDENTES.	2
<b>CAPITULO II.-ASPECTOS BASICOS DE UNA CELDA SOLAR.</b>	5
II.1.-UNION P/N.	5
II.2.-CORRIENTE DE OSCURIDAD.	7
II.3.-CORRIENTE DE ILUMINACION.	8
II.4.-PARAMETROS DE SALIDA DE UNA CELDA SOLAR.	9
II.5.-EFICIENCIA.	11
II.5.A.-CALCULO DE LA EFICIENCIA.	11
II.5.B.-PERDIDAS DE EFICIENCIA.	12
<b>CAPITULO III.-ECUACIONES DE TRANSPORTE.</b>	14
III.1.-GENERALIDADES.	14
III.2.-PARAMETROS QUE DETERMINAN LA SOLUCION DE LAS ECUACIONES DE TRANSPORTE.	16
III.2.1.-REDUCCION DE BANDA PROHIBIDA.	16
III.2.2.-DEGENERACION DE FERMI.	18
III.2.3.-CAMPO ELECTRICO.	21
III.2.4.-ABSORCION.	22
III.2.5.-RECOMBINACION.	24
III.2.6.-COEFICIENTE DE DIFUSION	26
III.2.7.-MOVILIDAD Y LONGITUD DE DIFUSION.	26
III.2.8.-VELOCIDAD DE RECOMBINACION SUPERFICIAL	27
<b>CAPITULO IV.-SOLUCION DE LAS ECUACIONES DE TRANSPORTE     EN UNA CELDA SOLAR DE UNION N<sup>+</sup>/P.</b>	29
IV.1.-REGION DEL EMISOR N <sup>+</sup> .	29

IV.2.-REGION DE LA BASE.	34
IV.3.-REGION DESIERTA.	35
<b>CAPITULO V.-PROGRAMA DE CALCULO.</b>	37
V.1.-DESCRIPCION DEL PROBLEMA.	37
V.2.-RESULTADOS.	39
V.2.1.-EFECTOS CON VARIACION DE Nb.	45
V.2.2.-EFECTOS CON VARIACION DE Ns.	52
V.2.3.-EFECTOS CON VARIACION DEL ESPESOR DE LA CELDA.	57
<b>CAPITULO VI.-CONCLUSIONES.</b>	58
VI.1.-EFECTOS DE RESISTENCIA.	58
VI.2.-PARAMETROS DEL EMISOR.	59
VI.3.-CORRIENTE DE ILUMINACION.	59
VI.4.-CORRIENTE DE SATURACION.	60
VI.5.-VOLTAJE DE CIRCUITO ABIERTO.	61
VI.6.-EFICIENCIA.	62
VI.7.-ESPESOR DE LA CELDA.	65
VI.8.-PERSPECTIVAS.	66
VI.9.-RECOMENDACIONES.	67
<b>REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS .</b>	68



## I.-INTRODUCCION.-

### I.1.- OBJETIVO.-

El presente trabajo muestra el funcionamiento de una Celda Solar de unión N<sup>+</sup>/P de Silicio cristalino . Las expresiones tanto para la distribución de portadores minoritarios como para la corriente del dispositivo, incluyen efectos de dependencia con la posición en los parámetros que caracterizan la región del emisor.

El objetivo final de la tesis es verificar la existencia de una región de eficiencia máxima, y calcular los valores de las variables que intervienen en dicha eficiencia. Asimismo, diseñar un modelo numérico que permita a un usuario determinar la calidad de la celda solar que puede construir.

Se han considerado en el modelo los siguientes efectos:

- 1.-RECOMBINACION AUGER.
- 2.-REDUCCION DE BANDA DE ENERGIA PROHIBIDA.
- 3.-DEGENERACION DE FERMI.

El modelo tiene presenta las siguientes limitantes:

Es unidimensional, de caras planas y paralelas entre el emisor y la base. Supone que la incidencia luminosa es normal sobre la cara del emisor.

Tiene como ventajas, la rapidez de cálculo, y la versatilidad para calcular diversas relaciones funcionales que se presentan en el capítulo de resultados , y que representan con una gran exactitud resultados experimentales obtenidos en los últimos diez años de

trabajo en esta área.

Las conclusiones de este trabajo permiten el diseño de una Celda Solar de Silicio Cristalino, en las mejores condiciones posibles.

## I.2-ANTECEDENTES.

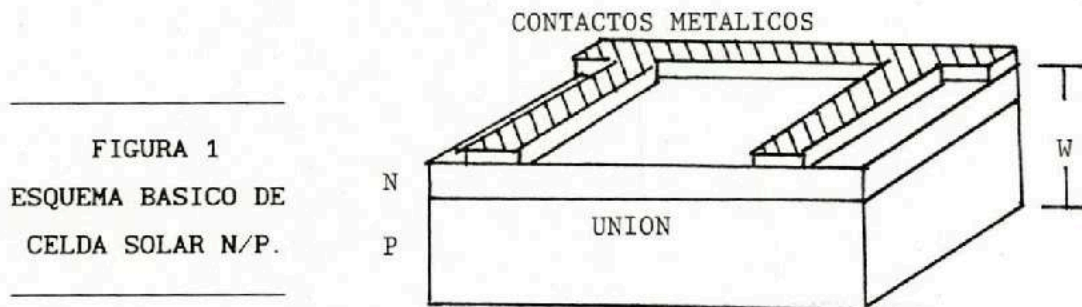
La importancia que tiene la Energía para el desarrollo eficiente de todos los aspectos tecnológicos de nuestra Sociedad, es un tema que no se pone en discusión. Hoy en día, el mundo está de acuerdo en que uno de los problemas al que nos enfrentamos es el agotamiento de las fuentes convencionales de este recurso físico, y por tanto, el proveernos a futuro de nuevas fuentes energéticas ocupa el pensamiento de un gran número de científicos. Entre las varias alternativas de solución, la Energía Solar tiene la gran ventaja de incidir sobre el planeta prácticamente en forma ilimitada, y no sólo eso : no conlleva los problemas subsecuentes de contaminación ni daño físico.

En este contexto, las Celdas Solares son objetos que convierten directamente la energía solar en electricidad sin mediación de movimientos mecánicos ni residuos contaminantes. Su aplicación más importante durante su etapa de investigación lo fueron los viajes espaciales, y hoy en día, su uso se ha extendido a los artefactos caseros.

La celda solar fue desarrollada inicialmente por Chapin, Fuller y Pearson <sup>[1]</sup>, hacia 1954, usando una unión difundida de Silicio tipo P-N. Posteriormente la celda solar de Sulfuro de Cadmio fue desarrollada por Reynolds. A la fecha, se han diseñado y construido Celdas Solares de diversos materiales semiconductores cristalinos,

policristalinos y amorfos.

Una celda solar de Silicio cristalino es una estructura relativamente simple. Su forma básica se muestra en la figura 1:



En la figura se aprecian las dos zonas que conforman una celda solar, la zona N, correspondiente a un semiconductor con impurezas donadoras en la parte superior, y la zona P, correspondiente a un semiconductor con impurezas aceptoras en la parte inferior de la celda. Estas dos zonas se denominan "EMISOR" y "BASE" respectivamente.

Se muestran también un par de contactos metálicos en el emisor, denominados comúnmente "dedos".

Aunque su forma es simple, el entendimiento detallado de su funcionamiento y la optimización del mismo, ha sido un problema más difícil de lo que inicialmente se pensó<sup>[2]</sup>. Es posible, en base a los conceptos básicos, calcular la eficiencia de una celda solar en términos del ancho de la región prohibida<sup>[3]</sup>. Algunos de estos

cálculos iniciales han establecido límites superiores para la eficiencia, del orden de 20 a 30 por ciento.

Sin embargo, los valores experimentales de las eficiencias, sólo en los años recientes han llegado a sobrepasar el 16 %.<sup>[5,6]</sup> Aún existe una diferencia considerable entre entre las predicciones de los varios modelos analíticos propuestos para la operación solar, y los resultados experimentales obtenidos.

## CAPITULO II.

### ASPECTOS BASICOS DE UNA CELDA SOLAR. -

El efecto Fotovoltaico puede definirse como [4]: "La generación de un potencial cuando una radiación ioniza la región cercana a la barrera de potencial de un semiconductor".

Esta presentación requiere de la revisión previa de los conceptos relacionados con la unión P-N, como antecedente de la teoría de la Celda Solar. La obtención de expresiones que nos permitan calcular la distribución de los portadores de carga, así como del flujo de corriente eléctrica dentro del semiconductor, en función de los parámetros físicos del material, permite la selección de materiales con las características más adecuadas para el logro de una eficiencia máxima.

#### II.1. -UNION P/N.

Cuando en un mismo material semiconductor se establece un cambio abrupto de impurezas del tipo aceptor, al tipo donador, se forma una unión P/N (llamada homounión). Si la región del emisor se construye con material tipo N mientras que la base se construye con material tipo P, la unión simplemente se denomina N/P. Por otro lado, si la densidad de impurezas entre los dos materiales no es la misma, al material más impurificado se le designa con un signo + en la parte superior ( $N^+$  o bien  $P^+$ ).

Uno de los logros más importantes en la tecnología de semiconductores, es el poder controlar el tipo y la concentración de impurezas en regiones específicas de tales cristales. La manera más práctica de llevar a cabo tal proceso es a través de una Difusión de Estado Sólido. Este mecanismo ha sido estudiado extensamente [29] y a partir de ello, es posible determinar concentraciones con una

aproximación de 10 partes por billón.

El control de la difusión se lleva a cabo mediante calentamiento de la muestra en presencia de un gas inerte a una presión adecuada. La distribución resultante está dada por la solución de la ecuación de difusión [29]:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial Y^2} \quad (D = \text{const}) \quad (1)$$

en la cual, C es la concentración y D es el coeficiente de difusión. Las condiciones del problema, requieren de:

$$\left. \frac{\partial C}{\partial Y} \right|_{(0,t)} = 0$$

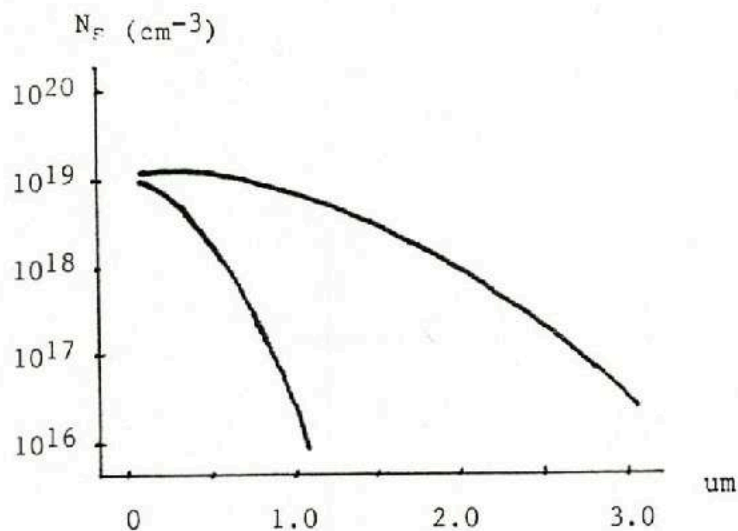
$$C(\alpha, t) = 0.$$

que resulta en una distribución de tipo gaussiano [8,29]:

$$C(X, t) = N_s(0, t) e^{-x^2/4Dt} \quad (2)$$

que es la distribución de impurezas que utilizaremos en nuestro trabajo (ver figura 2) (M. BALBUENA, CUEVAS, REFERENCIA 32)

FIGURA 2  
CONCENTRACION  
VERSUS  
PROFUNDIDAD



La unión deseada , en el caso que nos atañe, se obtiene difundiendo una capa tipo N sobre un cristal semiconductor tipo P, hasta una profundidad que puede ser de varias micras (profundidad de unión).

Dentro de este dispositivo se forman tres regiones:

- a) Una región de alta densidad de impurezas difundidas, con campos eléctricos originados por las distintas densidades de carga. (Emisor tipo  $N^+$ )
- b) Una región con densidad constante de impurezas con campo eléctrico despreciable ( Base tipo P).
- c) Una región intermedia, formada a los lados de la unión, con un intenso campo eléctrico en su interior, que, en equilibrio, no permite el paso de huecos de la región P ni de electrones de la región N, sin mediación de una fuerza externa.

Si por otro lado, portadores minoritarios logran difundirse hasta esa región del dispositivo, es decir, si huecos de la zona N o bien, electrones de la zona P, logran penetrar la barrera de potencial con ayuda de una fuerza externa, son acelerados hacia la región opuesta, donde se convertirán en portadores mayoritarios. Tal región se llama "REGION DESIERTA", o bien "REGION DE DEPRESION"

## II.2.- CORRIENTE DE OSCURIDAD.

Cuando se aplica un voltaje directo en las terminales de una unión, es decir, se aplica un potencial positivo a la región P, con respecto a la región N se altera el equilibrio existente. El ancho de la región desierta, la altura de la barrera de potencial y el campo eléctrico del interior disminuyen. El decrecimiento de la barrera de potencial permite a los huecos de la región P fluir hacia la región N, y del mismo modo, los electrones de la región N fluyen hacia la región P, aumentando con ello la densidad de portadores

minoritarios a los lados de la unión. En tanto se continúe alimentando este potencial externo, se llevará a cabo un proceso de recombinación en la zona desierta, que mantiene la reducción de su ancho.

Los portadores minoritarios inyectados, fluyen por difusión alejándose de la unión y recombinándose con los portadores mayoritarios. Esto da por resultado una corriente neta en el interior del dispositivo cuyo sentido es de la región P hacia la región N.

Estos conceptos pueden modificarse fácilmente para el tratamiento de la polarización inversa. Aquí aumenta la altura de la barrera de potencial, así como el campo eléctrico y la anchura de la región desierta. Las concentraciones de portadores minoritarios a los lados de la unión decaen y tiene lugar una "extracción" de tales portadores, generando una corriente que alcanza un valor de saturación a valores bajos de voltaje, debido al límite físico para la extracción de portadores minoritarios.

La expresión que describe esta corriente, está dada por :

$$J_{obs} = J_{sat} (e^{qV_a/KT} - 1) \quad (3)$$

en donde  $V_a$  es el voltaje aplicado y  $J_{sat}$  es la corriente de saturación ( $A/cm^2$ ) cuya expresión analítica depende de parámetros físicos del material, como son Longitud de Difusión, Coeficiente de Difusión, Velocidad de recombinación Superficial, densidad de impurezas, tiempo de vida de portadores minoritarios, etc.

### II.3.- CORRIENTE DE ILUMINACION.

Cuando en una Unión P/N incide un flujo de fotones con energías más grandes que el ancho de banda de energía prohibida del semiconductor, éstos pueden ser absorbidos por el cristal, y su energía aprovechada para crear pares electrón-hueco. Tales pares



contribuyen a aumentar la densidad de portadores minoritarios en las zonas N y P. Si este "exceso" de portadores puede difundirse hacia la región desierta antes de recombinarse, es "barrido" por el campo eléctrico hacia la región opuesta, donde formará parte del volumen de portadores mayoritarios, y en su caso, fluirá hasta los contactos eléctricos, generando una "corriente de iluminación", que dentro del dispositivo se dirige de la zona N hacia la zona P, y que por tanto, tiene una dirección opuesta a la que se produce en obscuridad mediante la polarización directa, aunque el fotovoltaje externo generado es equivalente a esta misma polarización.

Entonces, podemos escribir la expresión para la corriente total generada en una celda Solar, mediante la suma de las contribuciones de Corriente de Obscuridad y Corriente de Iluminación:

$$J = J_{il} - J_{sat} (e^{qV_a/KT} - 1) \quad (4)$$

En la figura 3 se muestra el esquema correspondiente, así como la relación corriente-voltaje típica de una celda solar.

#### II.4.-PARAMETROS DE SALIDA DE UNA CELDA SOLAR.

Del circuito equivalente de la figura 3, se deducen dos parámetros muy importantes: la CORRIENTE EN CORTO CIRCUITO y el VOLTAJE EN CIRCUITO ABIERTO,  $J_{cc}$  y  $V_{oc}$ , respectivamente.

La Corriente de Corto circuito se obtiene al hacer cortocircuito la carga ( $R = 0$ ), con lo cual  $V = 0$ , y el diodo no toma corriente, ( $J_D = 0$ ), de tal manera que se obtendría la máxima corriente en el circuito externo ideal:

$$J_{cc} = J_{il} \quad (5)$$

El Voltaje de Circuito Abierto es aquél que se obtiene al tener en circuito abierto la carga ( $R = \infty$ ), tal que  $J = 0$ , y de (4) se obtiene:

$$V_{oc} = \frac{KT}{q} \ln\left(\frac{J_{il}}{J_{sat}} + 1\right) \quad (6)$$

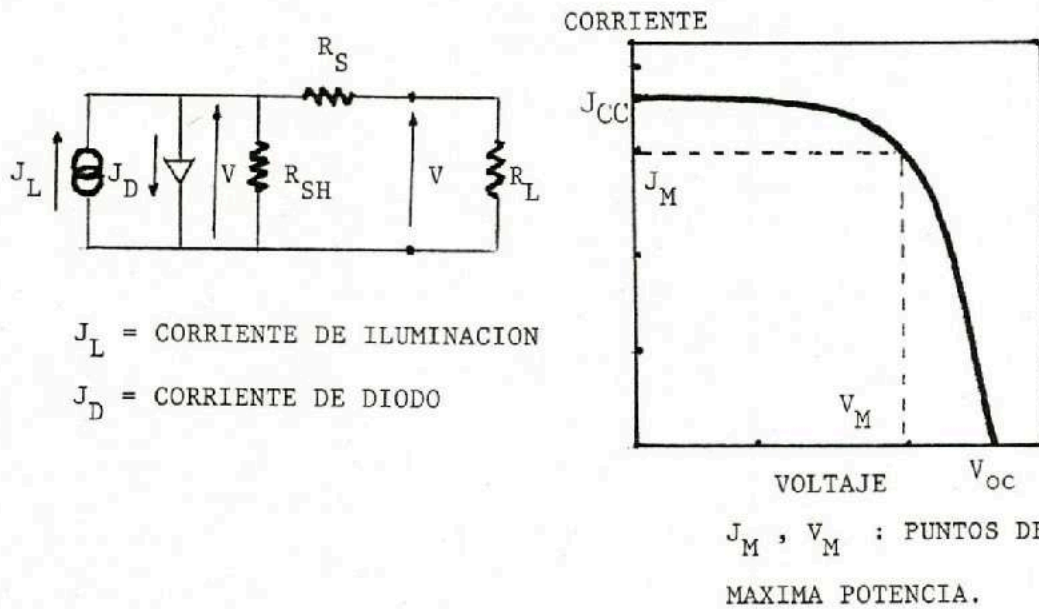


FIGURA 3  
 CIRCUITO EQUIVALENTE DE UNA CELDA SOLAR  
 Y RELACION CORRIENTE VOLTAJE

Estos parámetros son de fácil medición, y dan una idea de la calidad del dispositivo.

## II.5.- EFICIENCIA

La eficiencia de una celda solar para convertir la luz del sol en energía eléctrica útil, es el número más importante que define la calidad de la celda. Desafortunadamente, no ha habido una estandarización de las mediciones de la eficiencia a través de los últimos años, a pesar de los esfuerzos dedicados a esta clarificación.

En ocasiones se han reportado valores distintos de eficiencia para el mismo tipo de celdas, sin precisar con certeza<sup>[5]</sup> las condiciones espectrales durante la medición. El problema radica en que dichas condiciones espectrales difieren en el lugar y la hora en que se llevan a cabo las mediciones, en virtud de factores tales como humedad, absorción, etc. Por otro lado, una celda no tiene una respuesta espectral uniforme, ya que puede absorber con más eficiencia unas longitudes de onda que otras.

II.5.A.-CALCULO DE LA EFICIENCIA. De la curva Corriente Voltaje de la figura 3, se puede deducir también que existe una potencia de salida por unidad de área dada por:

$$P = V \times J$$

También puede observarse que existe un par de coordenadas  $V_m, J_m$  que maximizan la potencia de salida. Es útil definir entonces un parámetro llamado FACTOR DE LLENADO, dado por:

$$FF = \frac{P_m}{V_{oc} \times J_{cc}} \quad (7)$$

Entonces, la EFICIENCIA DE CONVERSION, de una Celda Solar está dada por :

$$\eta = \frac{P_m}{\text{POTENCIA SOLAR INCIDENTE}} = \frac{FF \times V_{oc} \times J_{cc}}{P_i} \quad (8)$$

Es evidente que una alta eficiencia de conversión se puede lograr con un alto factor de llenado, un alto Voltaje de Circuito Abierto y una alta corriente de corto circuito ; además, de (6) se observa que para aumentar el Voltaje de Circuito Abierto, es necesario reducir la Corriente de Saturación..

II.5.B. PERDIDAS DE EFICIENCIA. En la figura 3, se representan también efectos de resistencia al paso de la corriente, cuyo valor se mide a través de una Resistencia en serie ( $R_s$ ), y una resistencia en paralelo con el diodo ( $R_{sh}$ ).

El valor real de (8) se reduce en virtud de:

- a).-La reflexión de la luz incidente por la cara superior del dispositivo.
- b).-La porción de la superficie cubierta por la rejilla metálica, que no permite el paso de la luz.
- c).-La pérdida de potencia por el efecto de resistencia en serie y en paralelo.

Las contribuciones más importantes a la resistencia en serie son debidas a la resistencia propia del material semiconductor, a la resistencia de los contactos metálicos, y a la resistencia de contacto entre el material y las terminales metálicas. La resistencia en paralelo es producida sobre todo por imperfecciones o defectos del cristal, o bien por impurezas extrañas de la región de unión.

El efecto más importante de estas resistencias se observa en la disminución del Factor de llenado (FF). Considerando este efecto, la expresión final para la corriente (4) queda así [9]:

$$J = J_{il} - J_{sat} \left( e^{q(V_a + R_s \cdot J)/KT} - 1 \right) + \frac{V_a}{R_{sh}} \quad (9)$$

Como puede observarse, (9) es una expresión trascendente para la corriente total  $J$ , y además, la corriente de corto circuito ahora es distinta de la corriente de iluminación cuando  $V_a = 0$ . En este trabajo se incluye este efecto.

La dificultad para obtener una alta eficiencia experimental, reside en el hecho de que todos los parámetros mencionados, están conectados entre sí a través de relaciones complejas, que involucran las características físicas del material utilizado, y no es posible obtener una maximización directa de la eficiencia. Los cambios en el material, que puedan incrementar  $V_{oc}$ , por ejemplo, pueden simultáneamente reducir  $J_{cc}$  de modo que no se obtiene un aumento neto en la eficiencia. [6]

### CAPITULO III. ECUACIONES DE TRANSPORTE.

#### III.1.-GENERALIDADES.

Para relacionar las propiedades de una Celda Solar con el material así como con la geometría del dispositivo, se deben resolver las ecuaciones básicas de transporte de carga, que describen la conducta dinámica de los portadores en presencia de efectos perturbativos que causan desviaciones del equilibrio.

Estas ecuaciones básicas pueden clasificarse en tres grupos:

- a.-Ecuación de Poisson.
- b.-Ecuaciones de Densidad de Corriente.
- c.-Ecuaciones de Continuidad.

En una dimensión, dichas ecuaciones son :

$$\frac{\partial E}{\partial Y} = \frac{q}{\epsilon} (N_D - N_A + p - n) \quad (\text{Ec. de Poisson}) \quad (10)$$

$$J_n = q \mu_n n E + q D_n \frac{d n}{d Y} \quad (\text{Ec. de Densidad}) \quad (11)$$

$$J_p = q \mu_p p E - q D_p \frac{d p}{d Y}$$

$$(1/q) \frac{d J_n}{d Y} = U - g \quad (\text{Continuidad}) \quad (12)$$

$$(1/q) \frac{d J_p}{d Y} = -(U-g)$$

En estas expresiones, E es el campo eléctrico, J<sub>p</sub> y J<sub>n</sub> son las densidades de corriente en las zonas N y P respectivamente. Las movilidades de los portadores se representan por μ, en tanto que U es la tasa neta de recombinación establecida en la teoría de

Shockley-Read-Hall<sup>[10]</sup>, que en condiciones de bajo nivel de inyección, (cuando la densidad de portadores inyectados es mucho menor que la densidad de portadores mayoritarios en el equilibrio), se puede aproximar por :

$$U_n = \frac{n_p - n_{p0}}{\tau_n} \quad (13)$$

$$U_p = \frac{p_n - p_{n0}}{\tau_p}$$

en donde a su vez, el subíndice 0 se refiere a la concentración del equilibrio, mientras que  $\tau$  es el tiempo de vida de los portadores minoritarios.

En (11) y (12),  $D_n$  y  $D_p$  representan los coeficientes de Difusión de electrones y huecos respectivamente, y que están relacionados con las movilidades a través de las relaciones de Einstein :

$$D_n = (KT/q) \mu_n, \quad D_p = (KT/q) \mu_p \quad (14)$$

El parámetro  $KT/q$  tiene unidades de voltaje y su valor es del orden de 0.0257 V a temperatura ambiente.

Por otro lado, en (12),  $g$  es una función de la longitud de onda incidente, y es una expresión que representa la incidencia externa del flujo de fotones que penetran en el material.

La solución del conjunto no lineal de ecuaciones (10),(11),(12), con condiciones de frontera apropiadas, nos da las densidades de electrones y huecos a través de la Celda Solar, así como la relación Corriente Voltaje final. Algunas consideraciones simplificadoras pueden efectuarse, para resolver analíticamente ese conjunto de ecuaciones<sup>[11]</sup>. Sin embargo un análisis detallado y realista, requiere del uso de métodos numéricos de solución. Esto es especialmente válido en el caso en que se tienen gradientes de concentración, y tanto el campo eléctrico, como las movilidades, y el tiempo de vida, son funciones de la posición.

### III.2.- PARAMETROS QUE DETERMINAN

#### LA SOLUCION DE LAS ECUACIONES DE TRANSPORTE.

Durante los últimos años se hizo evidente que existen grandes desviaciones en las características J-V de una unión P/N con respecto de la teoría de Shockley<sup>[12]</sup> para el caso de celdas solares con alta densidad de impurezas en la región del emisor.<sup>[13]</sup>

Discrepancias del orden de 100 mV entre el Voltaje de Circuito Abierto observado, y el predicho por la teoría, se han explicado a través de dos mecanismos fundamentales : Reducción del Ancho de Banda de la Energía prohibida y degeneración de Fermi.<sup>[13], [14]</sup>

Los otros parámetros que determinan la solución de las ecuaciones de transporte son el Campo eléctrico de los portadores mayoritarios en el emisor, los fenómenos de absorción y recombinación , el coeficiente de difusión, la movilidad y la longitud de difusión, todos ellos variables en la región del emisor.

#### III.2.1 REDUCCION DE BANDA DE ENERGIA PROHIBIDA.-

Existe evidencia experimental suficiente para aceptar que con alta densidad de impurezas, se reduce la anchura de la banda de energía prohibida  $E_g$ . Además se acepta actualmente que dicha reducción se efectúa mediante un corrimiento de "banda rígida"<sup>[7]</sup>, es decir, la forma de la banda de conducción no cambia , pero tanto el nivel de Fermi, como el nivel de energía de las impurezas  $E_d$ , se recorren hacia el interior de dicha banda, afectando  $E_g$ .

(Ver la figura (4)).

De los resultados del trabajo de Arturo Morales Acevedo<sup>[14]</sup> se deduce que con densidades bajas de impurezas, el efecto debido a la degeneración de Fermi es pequeño, y sólo persiste el corrimiento en las bandas. Sin embargo, para altas densidades de impurezas, los



efectos de reducción de banda y degeneración de Fermi, tienden a compensarse. De aquí se presume la siguiente expresión para la reducción de  $E_g$  :

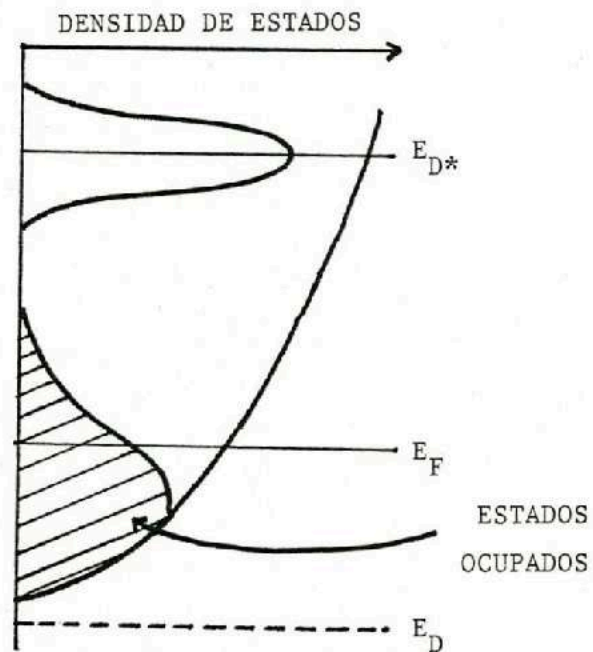
$$\Delta E_g = \Delta G - \Delta E_g^f \quad (15.a)$$

donde  $\Delta G$  representa el corrimiento de banda rígida, y está dado por

$$\Delta G = 0.024 \text{ Log}(N_d/7 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}) \quad (15.b)$$

mientras que el efecto de degeneración de Fermi, se representa por  $\Delta E_g^f$ . Se deduce que el efecto de reducción de banda es significativo arriba de  $7 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ . La degeneración de Fermi se calcula en el párrafo siguiente.

**FIGURA 4**  
**MODELO DE BANDA RIGIDA**  
 El nivel  $E_D$  se mueve a la posición  $E_{D^*}$



$E_{D^*}$  : ENERGIA ACTUAL DEL NIVEL DONADOR.

## III.2.2. -DEGENERACION DE FERMI.-

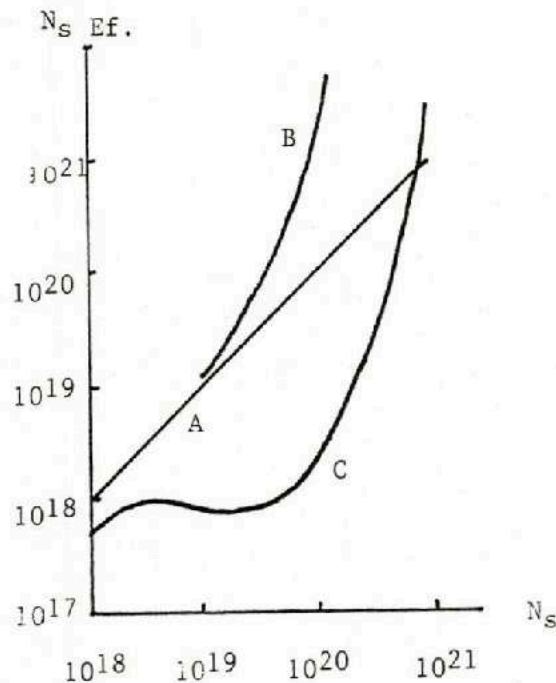
La densidad de portadores minoritarios en equilibrio térmico es inversamente proporcional a la densidad de impurezas en una región dada del material. Sin embargo, para densidades de impurezas arriba de  $10^{18} \text{ cm}^{-3}$ , el nivel de portadores minoritarios excede substancialmente esta ley. Esto tiene un impacto significativo en la magnitud del voltaje de circuito abierto, y en el transporte de los portadores fotoexcitados en la región altamente impurificada. La figura 5 muestra los efectos combinados de reducción de banda y degeneración de Fermi. (H.P.LANYON, referencia 7)

En esta figura, A corresponde a un semiconductor sin efectos de alta densidad  $N_D$ . La curva B representa el efecto de Degeneración de Fermi, y la curva C muestra el efecto de reducción de banda prohibida para electrones.

---

FIGURA 5  
CONCENTRACION DE  
IMPUREZAS  
CON EFECTOS DE  
REDUCCION DE  $E_g$   
Y DEGENERACION  
DE FERMI.

---



La posición del nivel de Fermi, para una temperatura dada se determina por la relación:

$$n = \int_{E_c}^{\infty} f(E) \cdot g(E) \cdot dE \quad (16.a)$$

$$= N_c \cdot f_{1/2}(\eta) \quad (16.b)$$

donde

$$\eta = (E_f - E_c)/KT,$$

$$N_c = 2 \cdot (2\pi m_e KT/h^2)^{3/2}$$

(densidad de estados efectivos en la banda de conducción) .

$f(E)$  es la función de distribución de Fermi.

$g(E)$  es la función de densidad de estados , que es una relación de tipo parabólico en la parte baja de la banda de conducción. [30]

mientras que:

$$f_{1/2}(\eta) = 2\pi^{-1/2} \int_0^{\infty} \frac{E^{1/2} dE}{1 + \exp(E-\eta)}$$

El cálculo de la integral de Fermi  $f_{1/2}(\eta)$ , requiere del uso de tablas o de expresiones analíticas aproximadas. Si  $n$  no es muy grande, la diferencia  $E - E_f$  es positiva y para las regiones bajas de la banda de conducción,  $E_c - E_f \gg KT$ , con lo que la distribución de Fermi puede simplificarse con la aproximación de Boltzmann.

Sin embargo, en nuestro caso,  $n = N_b$ , es muy grande, por lo que la expresión (14) sólo se satisface para  $E_f > E_c$ . Por otra parte,  $N_b$  no es muy grande, por lo que se puede suponer:

$$p = N_b = N_v \exp\left(\frac{E_v - E_f}{KT}\right) \quad (16.c)$$

por tanto, el producto  $p \cdot n$  , usando (17.a) y (17.b) es:

$$p \cdot n = n_i^2 \exp\left(\frac{\Delta G}{KT}\right) \frac{f_{1/2}(\eta)}{\exp(\eta)} \quad (16.e)$$

en donde estamos suponiendo que el ancho de banda prohibida  $E_g$  se ve

reducido por el efecto de corrimiento en las bandas  $\Delta G$  (expresión 15.a).

Si el factor de  $n_{i0}^2$  en la expresión (16.e), corresponde a la reducción de la banda prohibida, se debe tener:

$$pn = n_{i0}^2 \cdot \exp\left(\frac{\Delta E_g}{KT}\right) \quad (17.a)$$

y asimismo:

$$\Delta E_g = \Delta G - KT \cdot \ln\left(\frac{\exp(\eta)}{f_{1/2}(\eta)}\right) \quad (17.b)$$

Si comparamos (17.b) con (15.a), concluimos:

$$\Delta E_g^f = KT \cdot \ln\left(\frac{\exp(\eta)}{f_{1/2}(\eta)}\right) \quad (17.c)$$

usando la aproximación de Nilsson<sup>[28]</sup> :

$$\eta = \ln \frac{N_D}{N_C} + \frac{(N_D/N_C)}{[64 + 0.05524(N_D/N_C)(64 + (N_D/N_C)^{1/2})]^{1/4}}$$

tomando exponencial de  $\eta$  :

$$\exp(\eta) = (N_D/N_C) \cdot \exp\left(\frac{(N_D/N_C)}{[64 + 0.05524(N_D/N_C)(64 + (N_D/N_C)^{1/2})]^{1/4}}\right)$$

introduciendo este valor en (17.c) , con  $f_{1/2}(\eta) = N_D/N_C$ , se obtiene:

$$\Delta E_g^f = KT \frac{(N_D/N_C)}{[64 + 0.05524(N_D/N_C)(64 + (N_D/N_C)^{1/2})]^{1/4}} \quad (17.d)$$

que es el efecto de degeneración de Fermi.

En estas expresiones, se tiene:

$$N_C = 2.88 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3} \text{ a } 300 \text{ K.} \quad [14]$$

$N_D$  = densidad de impurezas del Emisor.

### III.2.3.-CAMPO ELECTRICO.-

Si consideramos un estado de equilibrio, la corriente eléctrica generada en el emisor, debido a los gradientes de concentración, es despreciable. De la expresión (11),  $J_n = 0$ , y se tiene, (para un emisor tipo  $N^+$ ) :

$$E = - \frac{D_n}{\mu_n n} \frac{d n}{d Y} = - \frac{KT}{q} \frac{1}{N_D} \frac{d N_D}{d Y} \quad (18)$$

en donde se han usado las relaciones de Einstein, y el hecho de que todas las impurezas donadoras están ionizadas. La expresión (18) representa el campo eléctrico generado por los portadores mayoritarios en el emisor.

Uno de los primeros efectos de discrepancia observados durante la década pasada, fue el hecho de que el campo eléctrico experimentado por los portadores minoritarios es substancialmente más pequeño que el predicho por la expresión (18). El resultado es que el emisor prácticamente se vuelve transparente al transporte de los portadores minoritarios. [7]

Un modo conveniente de representar los efectos combinados de reducción de banda prohibida y degeneración de Fermi, consiste en suponer una densidad de impurezas "efectiva", que puede definirse como el nivel de impurezas que podría producir la misma cantidad de portadores minoritarios que se encuentran presentes, sin considerar el efecto de alta densidad. Necesariamente, esta "densidad efectiva" es menor que la densidad real.

La expresión para esta densidad es [14] :

$$N_{DE}(Y) = N_D(Y) e^{-(KT/q) \cdot \Delta E_g(Y)} \quad (19)$$

en donde  $\Delta E_g(Y)$  está dado por (15.a).

Utilizando (19) en (18) obtenemos el campo eléctrico experimentado por los portadores minoritarios en la región del emisor. El valor de  $\Delta E_g$  siempre reduce NDE, y por tanto, este campo eléctrico se reduce en un factor de 8 a 10 veces el que predice (18)

#### III.2.4. - ABSORCIÓN. -

La absorción se refiere a la capacidad del cristal para aprovechar los fotones que penetran en su interior, aniquilándolos y generando pares electrón-hueco en el proceso.

Mientras que para los semiconductores de banda directa, la energía disponible del fotón es igual a la diferencia de energías final e inicial del electrón desplazado<sup>[16]</sup>, valores que corresponden al mínimo de la banda de conducción y al máximo de la banda de valencia respectivamente, en semiconductores de banda indirecta la conservación del momento del cristal se obtiene a través de la emisión o absorción de fonones. Este último proceso puede representarse como una transición diagonal en un esquema de zona reducida. La energía umbral para las transiciones indirectas puede corresponder a la mínima energía de separación entre las bandas de conducción y de valencia, menos la energía de un fonón de momento adecuado. Si los dos umbrales de transición se separan, se podría esperar que el espectro de absorción contenga dos regiones bien definidas, una de las cuales es dominada por transiciones de banda directa, mientras la otra corresponde a la banda indirecta.

En el par de ecuaciones de transporte (12)  $g$  representa la incidencia luminosa que penetra el cristal. Esta expresión contiene una parte que mide el efecto de una posible absorción de los fotones reflejados en la cara posterior del dispositivo<sup>[23]</sup>:

$$g(Y, \lambda) = G \cdot [e^{-\beta(\lambda) \cdot Y} - \rho \cdot e^{-\beta(\lambda) \cdot (H - Y)}] \quad (20)$$

En esta expresión,  $Y$  es la profundidad en el cristal,  $\rho$  es el factor de reflexión en la cara posterior,  $H$  es el espesor total de la celda y  $G$  es el flujo de fotones incidente, mientras que  $\beta$  es el coeficiente de absorción del material, en función de  $\lambda$ .

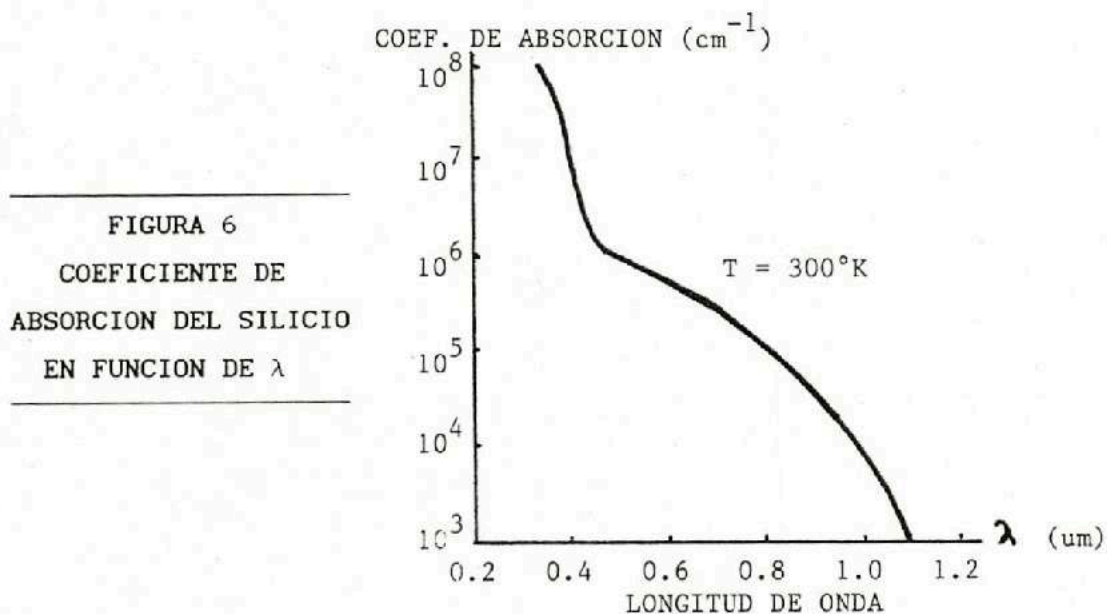
El flujo  $G$ , se calcula considerando el contenido de energía de un solo fotón de longitud de onda  $\lambda_i$ :

$$E_i = h \cdot c / \lambda_i \quad (21)$$

Los datos de irradiación terrestre, con AM1.5<sup>[17]</sup>, nos proporcionan la potencia  $P_i$ , por unidad de área, por longitud de onda. Por tanto :

$$G = P_i / E_i \text{ (num. de fotones/vol} \cdot \text{seg).} \quad (22)$$

Por otra parte, las mediciones del coeficiente de absorción que aparece en la expresión (20),  $\beta(\lambda)$ , nos permiten confirmar que existen dos regiones de absorción, a las que nos referimos líneas arriba. Ver la figura 6:



### III.2.5. -RECOMBINACION. -

La luz que incide en un semiconductor crea pares electrón-hueco. Las concentraciones de portadores en el material iluminado, serán por tanto mayores que las concentraciones de portadores para el material en la oscuridad. Si la iluminación es interrumpida repentinamente, tales concentraciones en exceso, deben decaer a sus valores en el equilibrio. El proceso mediante el cual ocurre tal decaimiento, se llama RECOMBINACION.

Este fenómeno es precisamente el proceso inverso de la absorción: un electrón puede decaer a un estado de menor energía emitiendo luz (recombinación radiativa) o bien puede ceder su energía a un segundo electrón (recombinación Auger). La tendencia al equilibrio es un factor determinante en las propiedades de los materiales semiconductores. Las cantidades que caracterizan esta tendencia, a través de la recombinación son el TIEMPO DE VIDA, la LONGITUD DE DIFUSION, y la VELOCIDAD DE RECOMBINACION SUPERFICIAL.

Por tanto, el proceso de recombinación requiere de la caracterización del tiempo de vida de los portadores minoritarios.

El promedio de recombinación radiativa  $R_r$  es proporcional al producto de las concentraciones de los estados ocupados en la banda de conducción y de los estados desocupados en la banda de valencia :

$$R_r = B n_p p_n$$

donde la constante B puede calcularse a través de la relación que existe entre la absorción óptica y la recombinación [16],[17]

En equilibrio, la recombinación neutraliza un proceso de GENERACION térmica  $G_{th} = B \cdot n_{p0} \cdot p_{n0}$  y por tanto se debe tener:

$$U = R_r - G_{th} = B \cdot (n_p \cdot p_n - n_{p0} \cdot p_{n0})$$

Pero en bajo nivel de inyección en un material P,  $n_p \approx n_{p0}$ , y se tiene:

$$U = B \cdot n_{p0} \cdot (P_n - P_{n0})$$



y, de acuerdo con (13), se obtiene:

$$\tau_{rp} = \frac{1}{B \cdot n_{p0}} \quad (23)$$

esta expresión mide el tiempo de vida del "exceso" de huecos en la región N, y una expresión similar nos da el tiempo de vida de los electrones en la región P.

Sin embargo, con altas densidades de concentración de impurezas, el mecanismo de recombinación predominante es un proceso Auger, como ha sido demostrado experimentalmente, y tratado teóricamente en varios artículos.<sup>[18],[19]</sup>

En este caso, el electrón, al recombinarse con un hueco, entrega su exceso de energía a un segundo electrón. La expresión para el tiempo de vida de los portadores minoritarios, en el caso de recombinación Auger, es<sup>[16],[17]</sup>:

$$\tau_{Ap} = \frac{1}{C \cdot Nd^2} \quad (24)$$

El tiempo de vida de los portadores minoritarios, es la suma de los tiempos dados por (23), para recombinación con bajo nivel de impurezas (radiativa), con (24), para recombinación Auger

$$\frac{1}{\tau_p} = \frac{1}{\tau_{rp}} + \frac{1}{\tau_{Ap}} \quad (25)$$

Esta expresión es el tiempo de vida de los huecos en la región N. Para la región P, la expresión es idéntica.

Los valores de las constantes B y C están tomados de los trabajos de Del Alamo et al<sup>[20],[21]</sup> que conducen a:

CONSTANTE	TIPO N	TIPO P
B	$1/(7.8 \times 10^{-13})$	$1/(3.45 \times 10^{-12})$
C	$28 \times 10^{-32}$	$9.5 \times 10^{-32}$

### III.2.6. -COEFICIENTE DE DIFUSION.

En el caso en que la concentración de impurezas es uniforme, los portadores minoritarios se mueven bajo la acción de campos eléctricos aplicados. Si la concentración no es uniforme, los portadores minoritarios también se DIFUNDEN bajo la influencia del gradiente de concentración. Este efecto contribuye al flujo de corriente eléctrica, siendo esta contribución proporcional a dicho gradiente. De los trabajos de Del Alamo et al. [20], [21], se concluye que la expresión para el coeficiente de difusión, en términos de la densidad de impurezas, está dada por :

$$D = A + \frac{D_0}{1 + \left( \frac{N_D}{N_0} \right)^{1.25}} \quad (26)$$

en donde las constantes A, D<sub>0</sub>, N<sub>0</sub> se han calculado para el material tipo N y para el material tipo P :

CONSTANTE	TIPO N	TIPO P
A	3.341	5.962
D <sub>0</sub>	9.509	30.326
N <sub>0</sub>	8x10 <sup>17</sup>	8x10 <sup>16</sup>

A su vez, N<sub>0</sub> representa la concentración de impurezas, que en el caso de la unión N<sup>+</sup>/P depende de la posición en el emisor, y es constante en la base. Las variaciones en el emisor son significativas para concentraciones arriba de 8x10<sup>17</sup>, mientras que en la base dichas variaciones ocurren para concentraciones arriba de 8x10<sup>16</sup>.

### III.2.7. -MOVILIDAD Y LONGITUD DE DIFUSION. -

Una vez definidos los parámetros de Difusión y tiempo de vida, la movilidad simplemente se encuentra a través de las relaciones de

Einstein (14).

Por otro lado, se define la Longitud de Difusión como:

$$L = \sqrt{D \tau} \quad (27)$$

y en esta expresión tanto  $D$  como  $\tau$  dependen de la posición a través de la densidad de impurezas.

La longitud de difusión es un parámetro que nos permite conocer cómo cambia la concentración local de portadores minoritarios, en presencia de efectos perturbadores. En el caso de una unión  $N^+/P$ , la anchura de la región de la base es comparable con la longitud de difusión de los electrones, de manera que la concentración de portadores inyectados, es esencialmente una función con decaimiento exponencial desde la frontera de la zona desierta, mientras que el ancho mucho menor de la región del emisor, hace que el decaimiento de portadores minoritarios a partir de la frontera con la zona desierta, no se ajuste totalmente a ese tipo de función, en virtud de la dependencia de  $N_D$  con la posición..

### III.2.8. -VELOCIDAD DE RECOMBINACION SUPERFICIAL.

En las superficies del dispositivo, existen irregularidades abruptas de la red cristalina, que limitan el funcionamiento de las celdas solares: se produce una alta velocidad de recombinación de portadores que reduce considerablemente la corriente eléctrica generada por la iluminación, al mismo tiempo que aumenta la corriente de saturación del diodo, efectos que, combinados se traducen en una menor eficiencia de conversión de la celda. [22]

Un modelo teórico del efecto de recombinación superficial, debe contener los siguientes parámetros:  $E_R$ , que representa el nivel de energía de los centros de recombinación;  $N_R$ , la densidad de dichos centros y  $\sigma$ , la sección eficaz de captura. [24] Es evidente que la recombinación superficial puede considerarse un caso especial de la

recombinación en el volumen del semiconductor, con la condición de que los centros de recombinación se encuentren distribuidos en una región muy delgada cerca de la superficie. Del mismo modo que en el caso de recombinación en el volumen, la recombinación superficial es proporcional al exceso de portadores minoritarios ( $p_n - p_{n0}$ ), y la constante de proporcionalidad es precisamente  $S$ , la velocidad de recombinación superficial.

De este modo, conociendo la velocidad de recombinación superficial, se tiene una condición de frontera, que será necesario considerar en la solución de las ecuaciones de transporte:

$$J_p = q S_o (p_n - p_{n0}) \quad , \quad J_n = q S_w (n_p - n_{p0}) \quad (28)$$

que representan las condiciones en  $Y = 0$  y  $Y = H$ .

Una forma de reducir el efecto no deseado de altas velocidades de recombinación superficial, consiste en "pasivar" las superficies, [25], [26], aumentando con ello la corriente de corto circuito. Dicha pasivación se obtiene oxidando térmicamente las superficies antes de depositar el enrejado de las celdas [22].

CAPITULO IV.  
SOLUCION DE LAS ECUACIONES DE TRANSPORTE  
EN UNA CELDA SOLAR N<sup>+</sup>/P

En el problema que nos atañe, la región del emisor se encuentra altamente impurificada ( $10^{19} \rightarrow 10^{21}$ ), por lo que es necesario considerar la discusión de la sección III.2.

Para la región de la base, la solución es relativamente sencilla, porque suponemos una densidad de impurezas uniforme, no dependiente de la posición, de modo que los parámetros que intervienen en la solución son constantes.

#### IV.1.-REGION DEL EMISOR N<sup>+</sup>.

Combinando las ecuaciones (10), (11) y (12), para la zona N<sup>+</sup>, se tiene:

$$\frac{d^2 \Delta p}{d Y^2} - \frac{\mu_p \cdot E}{D_p} - \frac{\Delta p}{D_p \cdot \tau_p} = \frac{g(\lambda, Y)}{D_p} \quad (29)$$

Todos los parámetros que intervienen en esta ecuación son dependientes de la posición.

El algoritmo de la solución en este caso, ha sido propuesto por J. Michel y A. Mirceau<sup>[23]</sup>. Consiste básicamente en dividir la región del emisor en subcapas de igual espesor, en cada una de las cuales sea razonable suponer que los parámetros son constantes

De este modo, es posible encontrar una solución analítica de (29), en cada subcapa, que depende de un par de constantes arbitrarias. Estas constantes se calculan igualando las soluciones en la interfase de cada par de subcapas consecutivas, de modo iterativo desde la superficie, donde se conoce la velocidad de recombinación superficial, hasta la frontera de la zona desierta donde se tienen las condiciones de Shockley:

$$p(Y_{jn}) = p_{no} e^{qV_a/KT} \quad (30)$$

$$n(Y_{jp}) = n_{po} e^{qV_a/KT}$$

Si  $M$  es el número de capas en que se divide la zona  $N$ , el problema se reduce a la solución de  $(M+1)$  pares de ecuaciones de primer grado donde las incógnitas son  $\Delta p$  y  $J_p$ .

El esquema del problema se muestra en la figura 7:

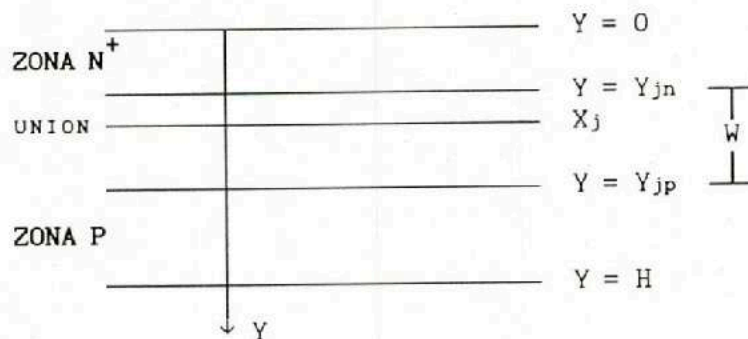


FIGURA 7

REPRESENTACION ESQUEMATICA DE UNA CELDA SOLAR  $N^+/P$

Si consideramos que la densidad de impurezas en la superficie es  $N_s$ , mientras que en la base es  $N_b$ , la expresión (2) independiente del tiempo con estas condiciones, es:

$$N_D(Y) = N_s \exp\left(-\frac{Y^2}{X_j^2} \cdot \ln(N_s/N_b)\right) \quad (31)$$

en donde  $X_j$  es la profundidad de unión (penetración de las impurezas).

La solución de 29, al interior de una capa cualquiera es:

$$\Delta p(Y) = A e^{X_1 Y} + B e^{X_2 Y} + (C_1 e^{-\beta Y} + C_2 e^{-\beta(H-Y)}) \quad (32)$$

y usando el hecho de que  $J_p = q\mu_p \Delta p E - qD_p (d \Delta p/dY)$ , la densidad de corriente es:

$$J_p(Y) = (q\mu E - qD_p X_1) e^{X_1 Y} A + (q\mu E - qD_p X_2) e^{X_2 Y} B \\ + [(q\mu E + qD_p \beta) C_1 e^{-\beta Y} + (q\mu E - qD_p \beta) C_2 e^{-\beta(H-Y)}] \cdot G \quad (33)$$

con:

$$C_1 = \frac{-1/D_p}{(\beta + X_2)(\beta + X_1)} \quad C_2 = \frac{-\rho/D_p}{(\beta - X_1)(\beta - X_2)}$$

$$X_1, X_2 = \gamma \pm \frac{1}{L_p} \cdot \sqrt{(L_p \gamma)^2 + 1} \quad , \quad \gamma = \frac{\mu E}{2D_p}$$

$\rho$  : FACTOR DE REFLEXION.

Ahora es conveniente expresar las soluciones (32), (33) en forma matricial, del mismo modo que las constantes A, B :

$$E = \begin{bmatrix} \Delta p \\ J_p \end{bmatrix} \quad A = \begin{bmatrix} A \\ B \end{bmatrix} \quad (34)$$

Si definimos las matrices  $T(Y)$  y  $F(\beta, Y)$ , de modo que se tenga:

$$T[1,1] = e^{X_1 Y} \\ T[1,2] = e^{X_2 Y} \\ T[2,1] = q(\mu E - D_p X_1) e^{X_1 Y} \\ T[2,2] = q(\mu E - D_p X_2) e^{X_2 Y} \quad (35)$$

$$F[1,2] = C_1 e^{-\beta Y} + C_2 e^{-\beta(H-Y)} \\ F[2,1] = q(\mu E + D_p \beta) C_1 e^{-\beta Y} + q(\mu E - D_p \beta) e^{-\beta(H-Y)} \quad (36)$$

entonces la solución completa (33) y (34) se escribe en forma simplificada como:

$$E(Y) = T(Y) \cdot A + G \cdot F(\beta, Y) \quad (37)$$

Sean  $Y_a$ ,  $Y_b$  las ordenadas de la subcapa considerada. La solución (37) da lugar a:

$$E(Y_a) = T(Y_a) \cdot A + G \cdot F(\beta, Y_a)$$

$$E(Y_b) = T(Y_b) \cdot A + G \cdot F(\beta, Y_b)$$

Eliminando las constantes comunes  $A, B$ , se tiene:

$$E(Y_b) = P(Y_a, Y_b)E(Y_a) + G \cdot W(\beta, Y_a, Y_b) \quad (38)$$

con

$$P(Y_a, Y_b) = T(Y_b) T^{-1}(Y_a)$$

$$\Rightarrow W(\beta, Y_a, Y_b) = F(\beta, Y_b) - P(Y_a, Y_b) \cdot F(\beta, Y_a)$$

Las expresiones detalladas de  $P$  y  $W$  son las siguientes:

$$\begin{aligned} P[1,1] &= q\mu[(VtX_2 - E)e^{X_1\delta} - (VtX_1 - E)e^{X_2\delta}]/\Delta \\ P[1,2] &= -[e^{X_2\delta} - e^{X_1\delta}]/\Delta \\ P[2,1] &= -q^2\mu^2(VtX_1 - E)(VtX_2 - E)[e^{X_1\delta} - e^{X_2\delta}]/\Delta \\ P[2,2] &= q\mu[(VtX_2 - E)e^{X_2\delta} - (VtX_1 - E)e^{X_1\delta}]/\Delta \end{aligned} \quad (39)$$

$$\begin{aligned} W[1,1] &= (X_2 - X_1)^{-1} [C_1 e^{-\beta Y_a} E_1(\beta) + C_2 e^{-\beta(H - Y_a)} E_1(-\beta)] \\ W[2,1] &= -q\mu(X_2 - X_1)^{-1} [C_1 e^{-\beta Y_a} E_2(\beta) + C_2 e^{-\beta(H - Y_a)} E_2(-\beta)] \end{aligned} \quad (40)$$



En estas expresiones,

$$V_t = KI/q, \quad \Delta = q\mu V_t(X_2 - X_1), \quad \delta = Y_b - Y_a$$

$$E_1(\beta) = (X_2 + \beta)e^{X_1\delta} - (X_1 + \beta)e^{X_2\delta} - (X_2 - X_1)e^{-\beta\delta}$$

$$E_2(\beta) = (X_2 + \beta)(V_t X_1 - E)e^{X_1\delta} - (X_1 + \beta)(V_t X_2 - E)e^{X_2\delta} \\ + (X_2 - X_1)(\beta V_t + E)e^{-\beta\delta}$$

Para determinar las matrices incógnitas E, se itera con (38) desde  $Y=0$ , en la superficie hasta el valor  $E(Y_{jn})$  correspondiente a la interfase con la zona desierta, y se aplican las condiciones de frontera (28) y (30).

La relación necesaria entre la solución para cada capa y  $E(Y_{jn})$  se establece por recurrencia :

$$E(Y_{jn}) = \Pi_{0,k} E(Y_k) + G \Sigma_{0,k} \quad (41)$$

con  $k$  un entero entre 1 y  $M$  (número de subcapas).

Por otro lado, conforme a (38) :

$$E(Y_k) = P(Y_{k+1}, Y_k)E(Y_{k+1}) + G W(Y_{k+1}, Y_k) \quad (42)$$

reemplazando (42) en (41) :

$$\Pi_{0,k+1} = \Pi_{0,k} P(Y_{k+1}, Y_k) \quad (43)$$

$$\Sigma_{0,k+1} = \Sigma_{0,k} + \Pi_{0,k} W(Y_{k+1}, Y_k) \quad (44)$$

y de esta manera se llega a la relación deseada entre  $E(Y_{jn})$  y  $E(0)$

$$E(Y_{jn}) = \Pi E(Y_0) + G \Sigma \quad (45)$$

recordando que

$$E(Y_{jn}) = \begin{bmatrix} \Delta p(Y_{jn}) \\ J p(Y_{jn}) \end{bmatrix}$$

y considerando las condiciones de frontera, se obtiene:

$$\Delta p(Y_{jn}) = ( \Pi[1,1] - qS_o\Pi[1,2] ) \Delta p(0) + G\Sigma[1,1] \quad (46)$$

$$J_p(Y_{jn}) = ( \Pi[2,1] - qS_o\Pi[2,2] ) \Delta p(0) + G\Sigma[2,1]$$

Eliminando  $\Delta p(0)$  en ese par de ecuaciones :

$$J_p(Y_{jn}) = K_p \cdot p_{no} (e^{qV_a/KT} - 1) + G(\Sigma[2,1] - K_p\Sigma[1,1]) \quad (47)$$

es la expresión para la densidad de corriente total del emisor  $N^+$ .  
En esta ecuación, se tiene:

$$K_p = \frac{\Pi[2,1] - qS_o\Pi[2,2]}{\Pi[1,1] - qS_o\Pi[1,2]} \quad (48)$$

Si comparamos (47) con (4), se tiene que el primer término de la suma corresponde a la corriente de oscuridad, mientras el segundo corresponde a la corriente de iluminación.

$$J_{sat_p} = K_p \cdot p_{no} \quad (49)$$

$$J_{il_p} = G (\Sigma[2,1] - K_p\Sigma[1,1]) \quad (50)$$

#### IV.2. -REGION DE LA BASE P.

En este caso, suponemos una densidad de impurezas uniforme, de modo que  $E = 0$ . De (10), (11) y (12) tenemos:

$$\frac{d^2 \Delta n}{dY^2} - \frac{\Delta n}{D_n \tau_n} = - \frac{g(\lambda, Y)}{D_n} \quad (51)$$

Aplicando las condiciones de frontera (28) y (30), se obtiene

como solución una expresión similar a (4)<sup>[27]</sup>:

$$J_n(Y_{jp}) = J_{il_n} - K_n \cdot n_{po} (e^{qV_a/KT} - 1) \quad (52)$$

En esta expresión,  $K_n$  está dado por:

$$K_n = qD_n \frac{\frac{SwL_n}{D_n} \cosh W + \sinh W}{\frac{SwL_n}{D_n} \sinh W + \cosh W} \quad (53)$$

en donde:

$$L_n = \sqrt{D_n \tau_n} \quad , \quad W = (H - Y_{jp}) / L_n ;$$

mientras que la corriente de iluminación es:

$$J_{il_n} = \frac{qD_n \tau_n}{(L_n \beta)^2 - 1} \frac{1}{\frac{SwL_n}{D_n} \sinh W + \cosh W} \times$$

$$\left\{ \left( \frac{Sw}{D_n} - \beta \right) L_n e^{-\beta H} + \left( \frac{Sw}{D_n} + \beta \right) L_n \rho \right.$$

$$+ \left[ \left( \frac{SwL_n}{D_n} \beta - 1 \right) \sinh W + \left( \beta - \frac{SwL_n}{D_n} \right) \cosh W \right] \exp(-\beta Y_{jp})$$

$$- \left[ \left( \frac{SwL_n}{D_n} \beta + 1 \right) \sinh W + \left( \frac{SwL_n}{D_n} + \beta \right) \cosh W \right]$$

$$\left. \rho \exp(-\beta(H - Y_{jp})) \right\} \quad (54)$$

#### IV.3.-REGION DESIERTA.

Incluiremos en este modelo, la contribución a la corriente, por parte de los portadores generados en la zona desierta, en virtud de

la absorción luminosa que pueda tener lugar ahí. Si suponemos<sup>[23]</sup> que cada fotón incidente genera un par electrón hueco, y que todos los pares generados son colectados por las regiones N y P, entonces tal contribución está dada por:

$$J_{des} = q \int_{Y_{jn}}^{Y_{jp}} g(\lambda, Y) dY \quad (55)$$

De este modo, la corriente total generada por el dispositivo está dada por:

$$J_t = J_p(Y_{jn}) + J_n(Y_{jp}) + J_{des} \quad (56)$$

Las corrientes de Saturación e Iluminación del dispositivo son:

$$J_{sat} = K_p n_{po} + K_n p_{no} \quad (57)$$

$$J_{il} = J_{il_n} + J_{il_p} + J_{des} \quad (58)$$

Este resultado representa la densidad de corriente de iluminación por intervalo de longitud de onda. La respuesta espectral se obtiene integrando (58) para todo el espectro luminoso.

**CAPITULO V.**  
**PROGRAMA DE CALCULO.-**

V.1.-DESCRIPCION DEL PROGRAMA.-

Este programa ha sido diseñado en lenguaje Pascal. Se permite al usuario modificar :

- Ns (Densidad de Impurezas de la Superficie)
- Nb (Densidad de Impurezas de la Base)
- Xj (Profundidad de la unión)
- So (Velocidad de recombinación Superficial)
- Sw (Velocidad de recombinación en la Cara Posterior)
- H (Espesor total de la Celda)
- Rs (Valor experimental de la resistencia en serie)
- Rsh (Valor experimental de la Resistencia en paralelo)

Los cálculos están hechos para una temperatura de 300 K, aunque es posible reformar algunas expresiones para encontrar las variaciones con T.

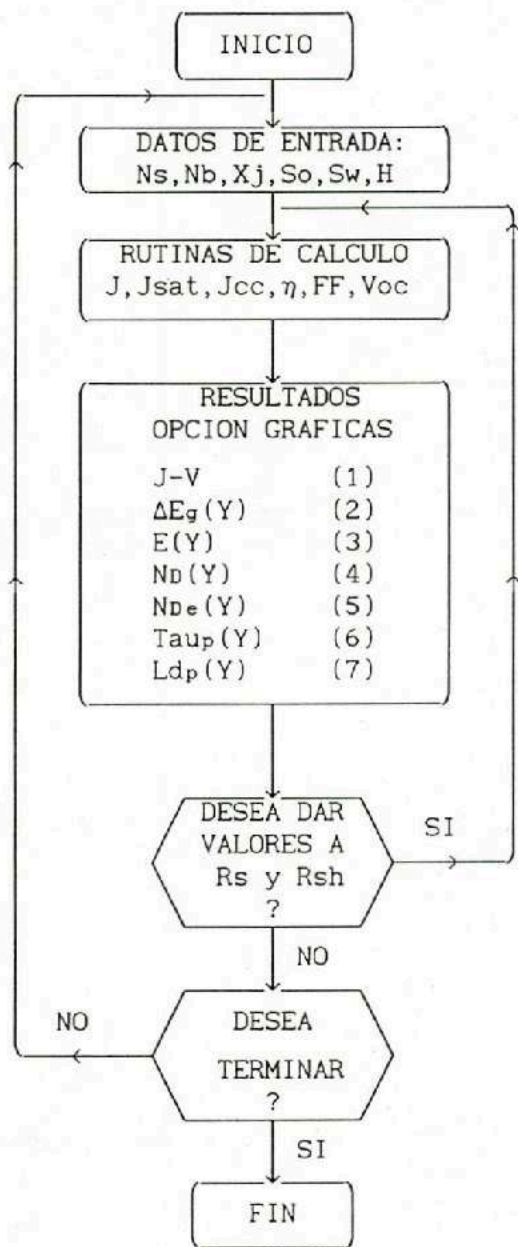
Asimismo, en los cálculos se ha omitido la parte de reflexión en la cara posterior; aunque las expresiones contienen el factor de reflexión, éste dependerá de los datos experimentales, y no hemos considerado necesario incluirlo por ahora.

El cálculo del campo eléctrico E, dado por la expresión (18) lo hemos efectuado mediante una razón de diferencias finitas de segundo orden:

$$E(Y) = \frac{V_t}{2\delta} \left[ \ln(N_{De}(Y_j)) - \ln(N_{De}(Y_{j+2})) \right] \quad (59)$$

en donde j es un entero que representa la j-ésima subcapa del emisor.

A continuación se muestra el diagrama de flujo del programa:



La parte denominada "RUTINAS DE CALCULO" está dividida en ocho subrutinas principales, que corresponden a:

1.- Cálculo de la corriente de Saturación de la Zona  $N^+$ .-

En esta parte se calculan los elementos de matriz de las M capas del emisor, cuyos argumentos no dependen de la iluminación, y se realizan las operaciones correspondientes.

2.- Cálculo de la corriente de Iluminación de la zona  $N^+$ .-

Se calculan las matrices que dependen de Lambda, se realizan las operaciones correspondientes y se calcula la expresión (50)

3.- Cálculo de las corrientes de Saturación e Iluminación en la base.

4.- Cálculo de la corriente de Iluminación en la zona desierta.

5.- Suma de las contribuciones correspondientes para las corrientes totales. (Ecuaciones (57) y (58) ).

6.- Aplicación de Voltaje externo en incrementos de 0.01 V . (70 valores).

7.- Cálculo de efectos de resistencias parásitas ( $R_s$  y  $R_{sh}$ ).

8.- Cálculo de la Eficiencia, Voltaje de Circuito Abierto, Corriente de Corto Circuito y Factor de Llenado.

V.2.- RESULTADOS.-

La figura 8 (siguiente página) muestra la pantalla al inicio del programa:

---

**FIGURA 8**  
**INICIACION DEL PROGRAMA**  
 SE MUESTRAN DATOS TIPICOS QUE PUEDEN SER MODIFICADOS POR EL USUARIO

---

Este programa le permite simular el funcionamiento de Celdas Solares de Silicio Cristalino. Se incluyen efectos debidos a las altas concentraciones de impurezas, tales como Recombinacion Auger, reduccion de la banda prohibida y degeneracion de Fermi.

### DATOS DE ENTRADA

```

I (cm) = 2000
X1 (um) = 200
X2 (um) = 200
X3 (um) = 200
X4 (um) = 200
X5 (um) = 200
X6 (um) = 200
X7 (um) = 200
X8 (um) = 200
X9 (um) = 200
X10 (um) = 200
X11 (um) = 200
X12 (um) = 200
X13 (um) = 200
X14 (um) = 200
X15 (um) = 200
X16 (um) = 200
X17 (um) = 200
X18 (um) = 200
X19 (um) = 200
X20 (um) = 200
X21 (um) = 200
X22 (um) = 200
X23 (um) = 200
X24 (um) = 200
X25 (um) = 200
X26 (um) = 200
X27 (um) = 200
X28 (um) = 200
X29 (um) = 200
X30 (um) = 200
X31 (um) = 200
X32 (um) = 200
X33 (um) = 200
X34 (um) = 200
X35 (um) = 200
X36 (um) = 200
X37 (um) = 200
X38 (um) = 200
X39 (um) = 200
X40 (um) = 200
X41 (um) = 200
X42 (um) = 200
X43 (um) = 200
X44 (um) = 200
X45 (um) = 200
X46 (um) = 200
X47 (um) = 200
X48 (um) = 200
X49 (um) = 200
X50 (um) = 200
X51 (um) = 200
X52 (um) = 200
X53 (um) = 200
X54 (um) = 200
X55 (um) = 200
X56 (um) = 200
X57 (um) = 200
X58 (um) = 200
X59 (um) = 200
X60 (um) = 200
X61 (um) = 200
X62 (um) = 200
X63 (um) = 200
X64 (um) = 200
X65 (um) = 200
X66 (um) = 200
X67 (um) = 200
X68 (um) = 200
X69 (um) = 200
X70 (um) = 200
X71 (um) = 200
X72 (um) = 200
X73 (um) = 200
X74 (um) = 200
X75 (um) = 200
X76 (um) = 200
X77 (um) = 200
X78 (um) = 200
X79 (um) = 200
X80 (um) = 200
X81 (um) = 200
X82 (um) = 200
X83 (um) = 200
X84 (um) = 200
X85 (um) = 200
X86 (um) = 200
X87 (um) = 200
X88 (um) = 200
X89 (um) = 200
X90 (um) = 200
X91 (um) = 200
X92 (um) = 200
X93 (um) = 200
X94 (um) = 200
X95 (um) = 200
X96 (um) = 200
X97 (um) = 200
X98 (um) = 200
X99 (um) = 200
X100 (um) = 200

```

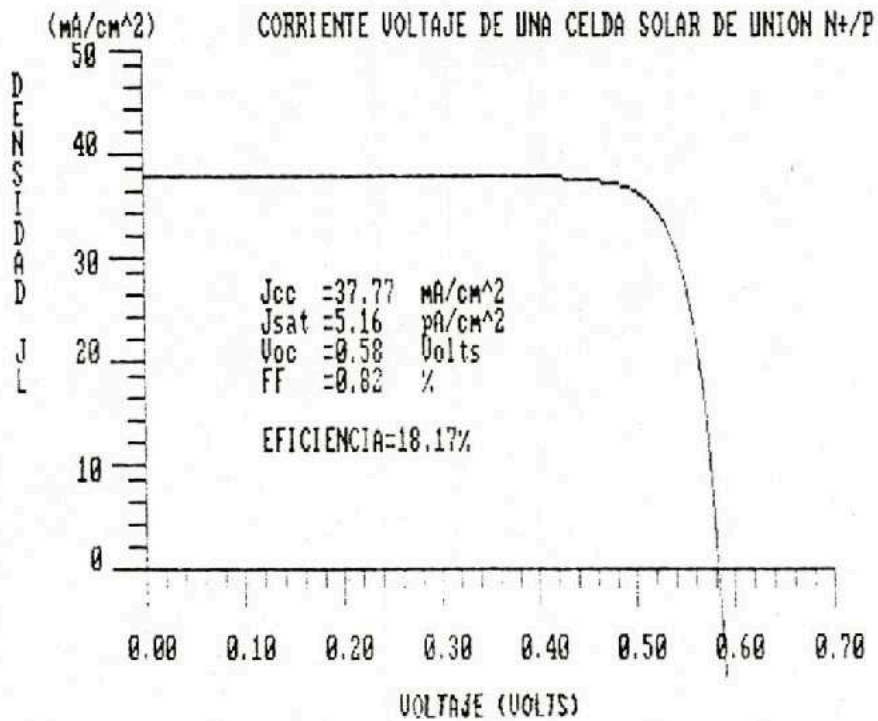
Este programa fue realizado por:

Humberto Arizpe Chavez  
 CIT - UNISON.

Arturo Morales Acevedo  
 CINVESTAV - IPN.



En la gráfica 1 se muestra la relación corriente-voltaje con los datos de entrada de la figura 8.



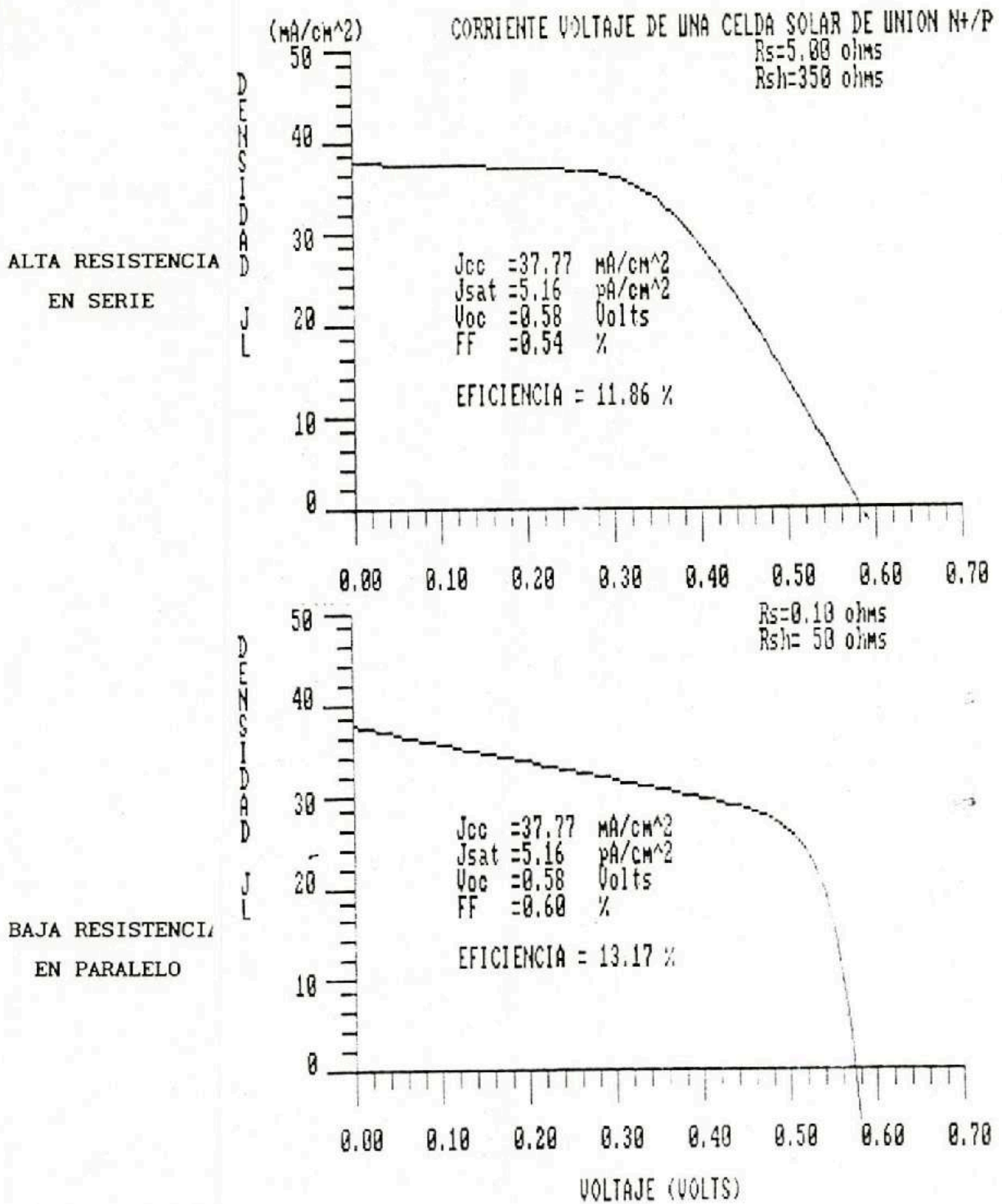

---

GRAFICA 1

RELACION CORRIENTE VOLTAJE

---

En la gráfica 2 se muestra el efecto de resistencia interna de la celda. Una alta resistencia en serie reduce la potencia de salida. El mismo efecto final tiene una baja resistencia en paralelo pues el efecto de recombinación es más efectivo cuando las cargas se desvían lateralmente en el volumen del dispositivo:



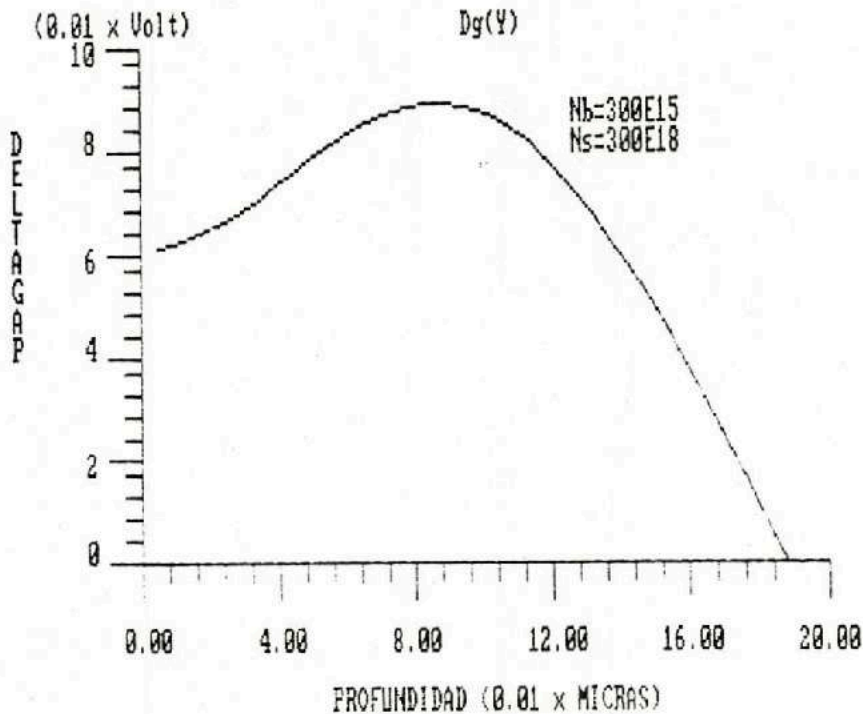
GRAFICA 2

RELACION CORRIENTE-VOLTAGE CON EFECTOS DE RESISTENCIA

En la gráfica (3) se muestra la reducción del ancho de banda prohibida, calculada con la expresión (17).

Para una densidad superficial de  $3 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ , el efecto es máximo a una profundidad de 0.09  $\mu\text{m}$ , que corresponde a una densidad de impurezas en el emisor, de  $5 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ . Para densidades por arriba de este valor, el efecto se atenúa por la degeneración de Fermi.

Para valores de densidad menores, la degeneración de Fermi es pequeña y únicamente el corrimiento de banda rígida produce la disminución de la banda prohibida. [14]




---

GRAFICA 3  
REDUCCION DEL ANCHO DE BANDA PROHIBIDA

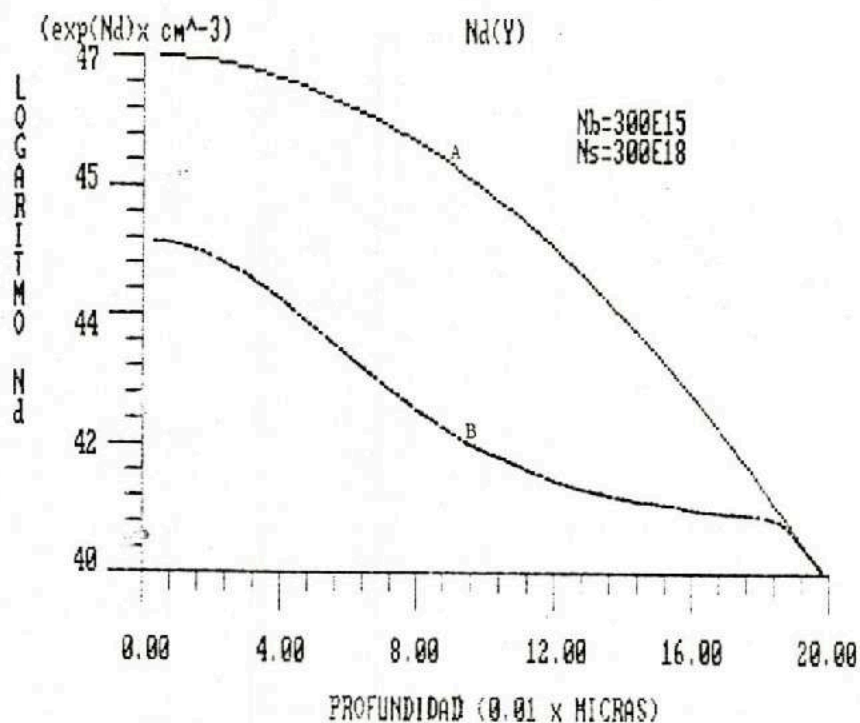
---

En la gráfica 4 se muestra la Densidad de impurezas gaussianas (curva A) correspondiente a la expresión (31) y se contrasta con la Densidad de impurezas "efectiva" (curva B) de la expresión (19), utilizada para medir el campo eléctrico de los portadores minoritarios.

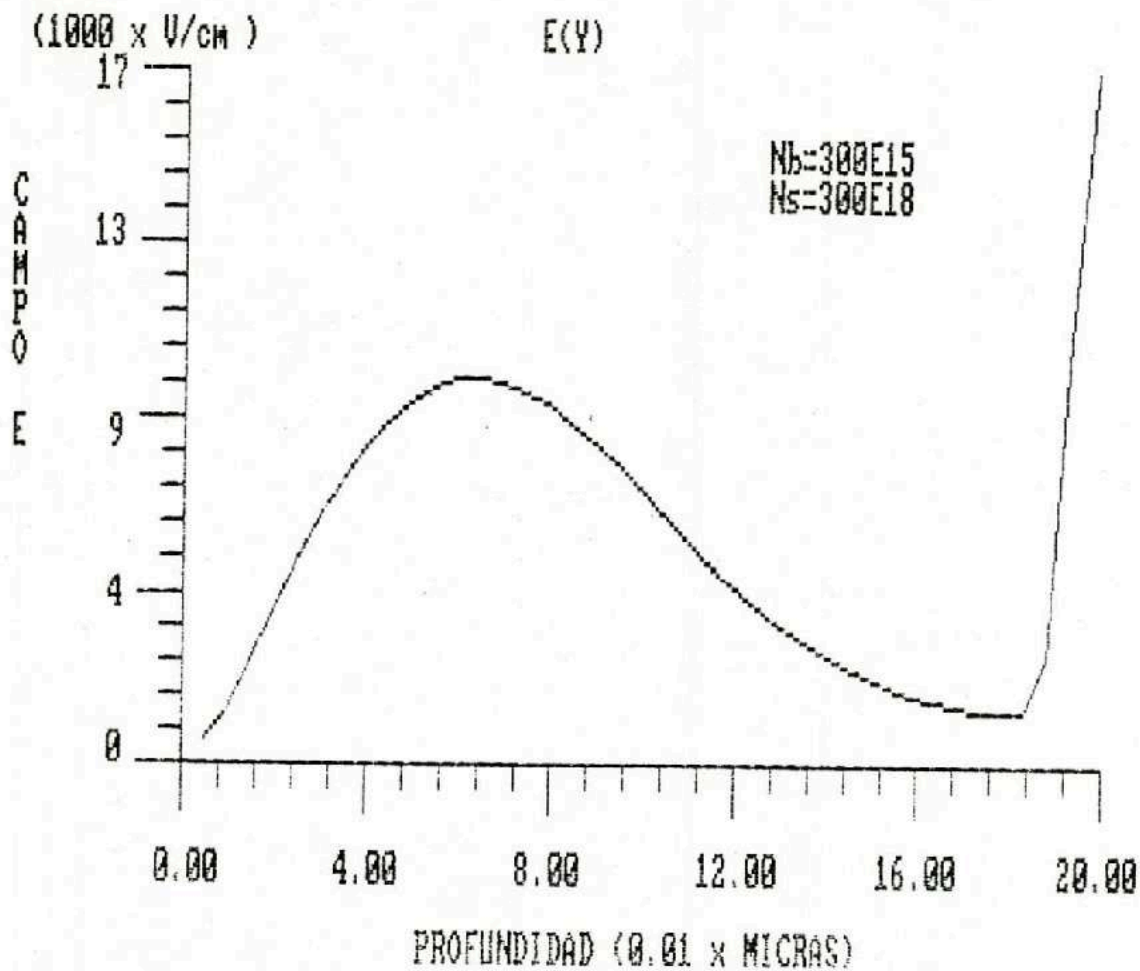
---

GRAFICA 4  
DISTRIBUCION DE  
IMPUREZAS  
(A) GAUSIANA  
(B) EFECTIVA

---



En la gráfica 5 se muestra el campo eléctrico experimentado por los portadores minoritarios en la región del emisor. Se observa que el campo es cero en la superficie y despreciable en frontera con la zona desierta. Pero alcanza un valor del orden de  $10^4$  V/cm a una profundidad de 0.06  $\mu$ m. Esta gráfica se calcula con la expresión (59).



GRAFICA 5  
CAMPO ELECTRICO DEL EMISOR

El programa permite también graficar el tiempo de vida y la longitud de difusión de los huecos en la región del emisor. No hemos incluido estos ejemplos aquí.

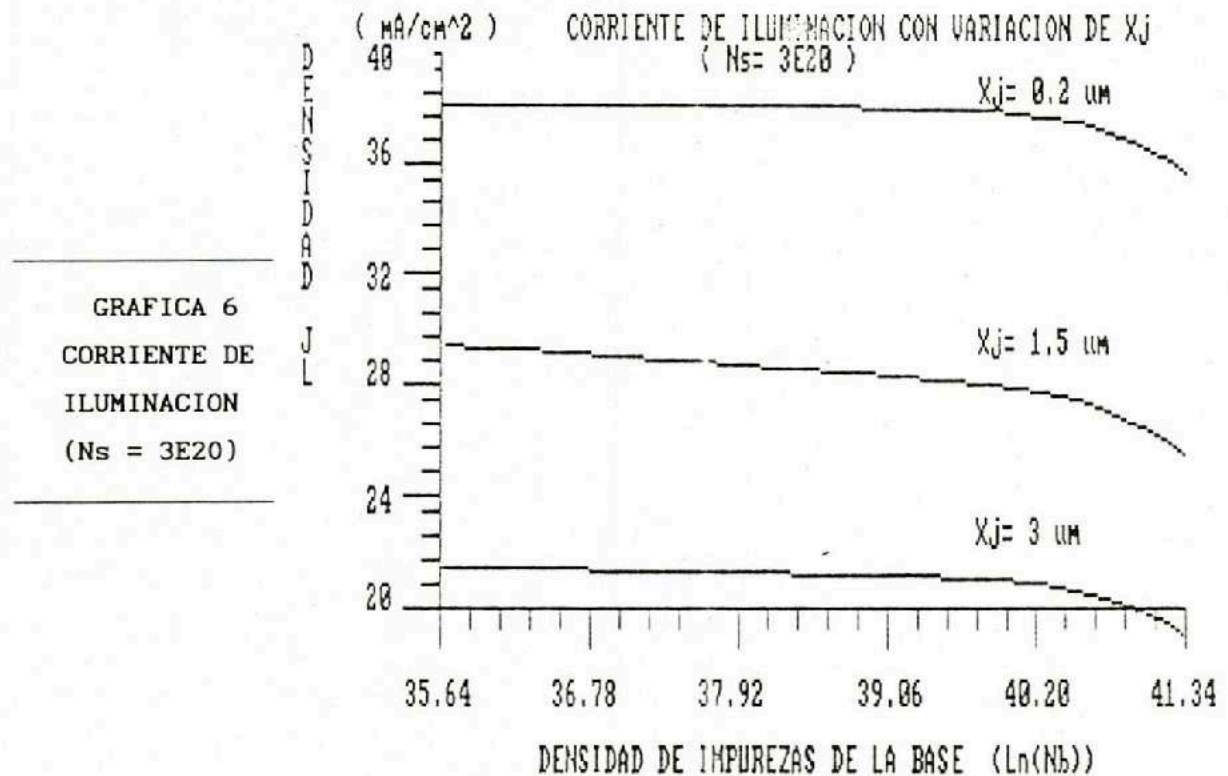
Con el mismo programa hemos calculado regiones de eficiencia cuyos resultados hemos dividido en tres secciones, correspondientes a variaciones de densidad de impurezas en la base, variaciones de la densidad de impurezas de la superficie y variaciones en el espesor de la celda.

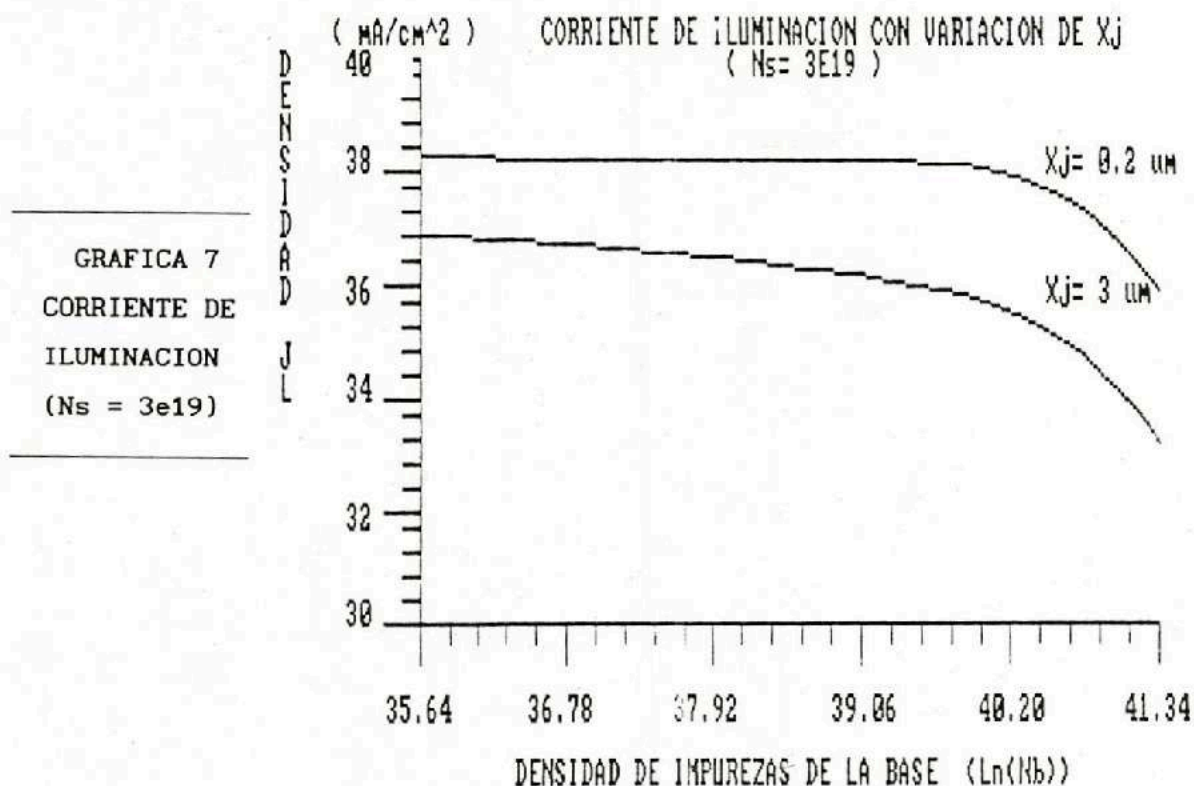
V.2.1. -EFECTOS CON VARIACION DE Nb. -

Se ha hecho variar la densidad de impurezas de la base entre  $3 \times 10^{15}$  y  $9 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ . En la gráfica 6 se ha calculado la corriente total de iluminación, considerando una densidad de impurezas superficiales de  $3 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$  y tres distintas profundidades de unión.

La máxima corriente se obtiene con la menor profundidad de unión, y es del orden de  $38 \text{ mA/cm}^2$ . En todos los casos, esta corriente disminuye con la densidad de impurezas de la base.

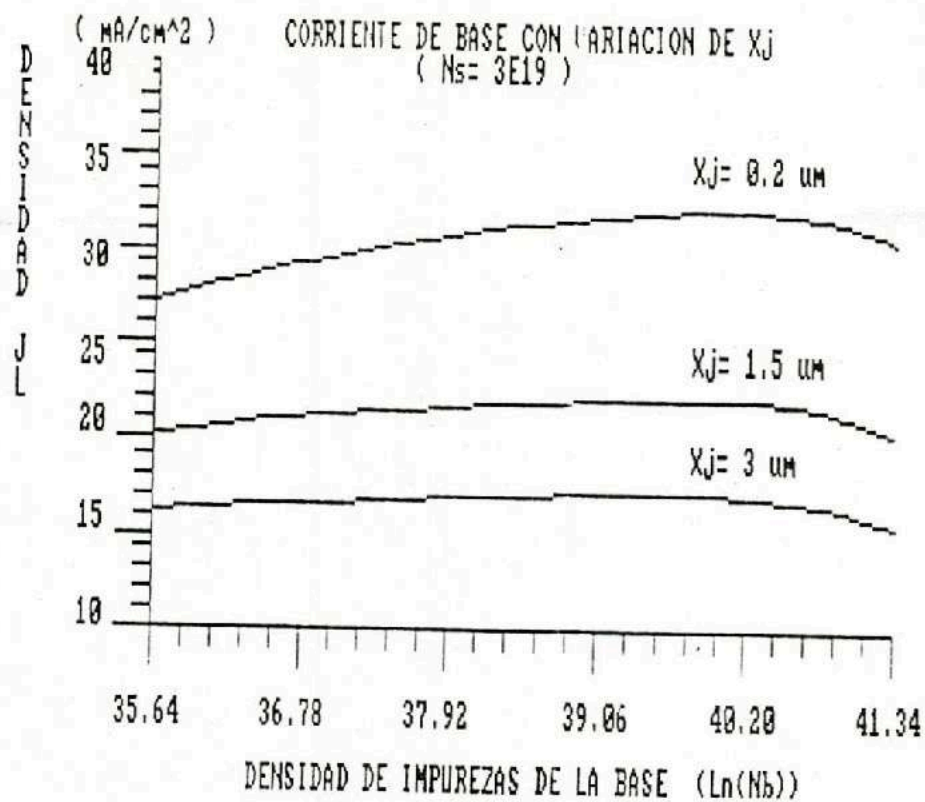
En la gráfica 7 se consideró una densidad de impurezas superficiales de  $3 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ . Los resultados son ligeramente diferentes, ya que la máxima corriente de iluminación es apenas mayor que en el caso anterior, pero las variaciones con la profundidad de unión ya no son tan grandes. Incluso, con una profundidad de  $1.5 \mu\text{m}$ , la curva correspondiente es muy similar a la calculada con una profundidad de  $0.2 \mu\text{m}$ .



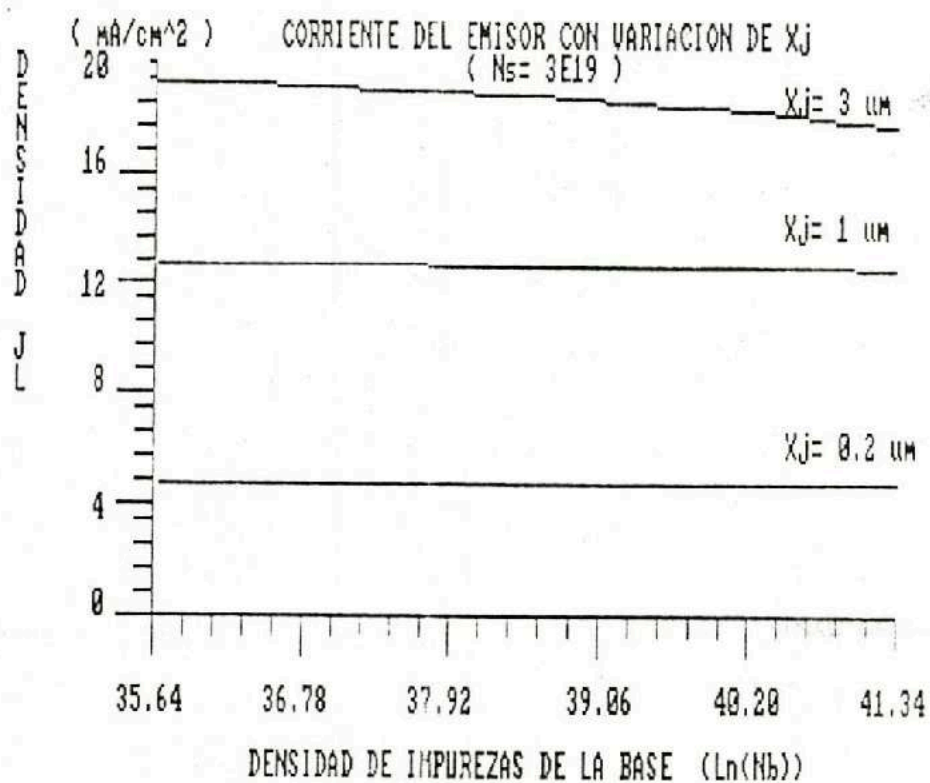


Para el segundo caso ( $N_s = 3E19$ ), hemos calculado las componentes de esta corriente de iluminación. La mayor contribución proviene de la región de la base (gráfica 8), y en este caso, para una profundidad de  $0.2 \mu m$ , y una densidad de impurezas de base entre  $1 \times 10^{17}$  y  $3 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ , se alcanza una corriente del orden de  $33 \text{ mA/cm}^2$ . Esta contribución disminuye al aumentar la profundidad de la unión, pero en todos los casos el máximo se encuentra en la misma región. La región del emisor contribuye con una parte pequeña a la corriente de iluminación. La mayor contribución se obtiene con regiones más anchas, pues el volumen de fotones absorbidos aumenta con el ancho de la región (gráfica 9). Para el caso de una profundidad de unión de  $0.2 \mu m$ , la contribución es constante en el orden de  $5 \text{ mA/cm}^2$ .

GRAFICA 8  
CORRIENTE DE  
ILUMINACION  
DE LA BASE

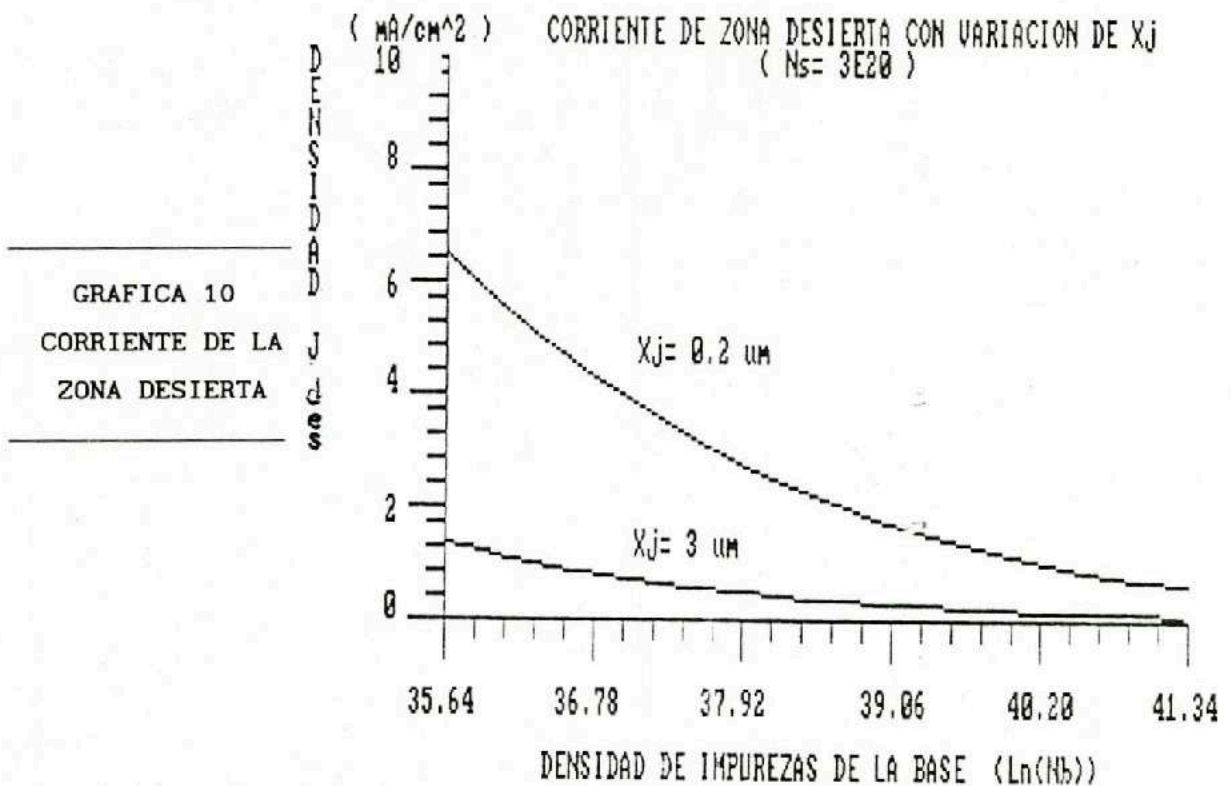


GRAFICA 9  
CORRIENTE DE  
ILUMINACION  
DEL EMISOR





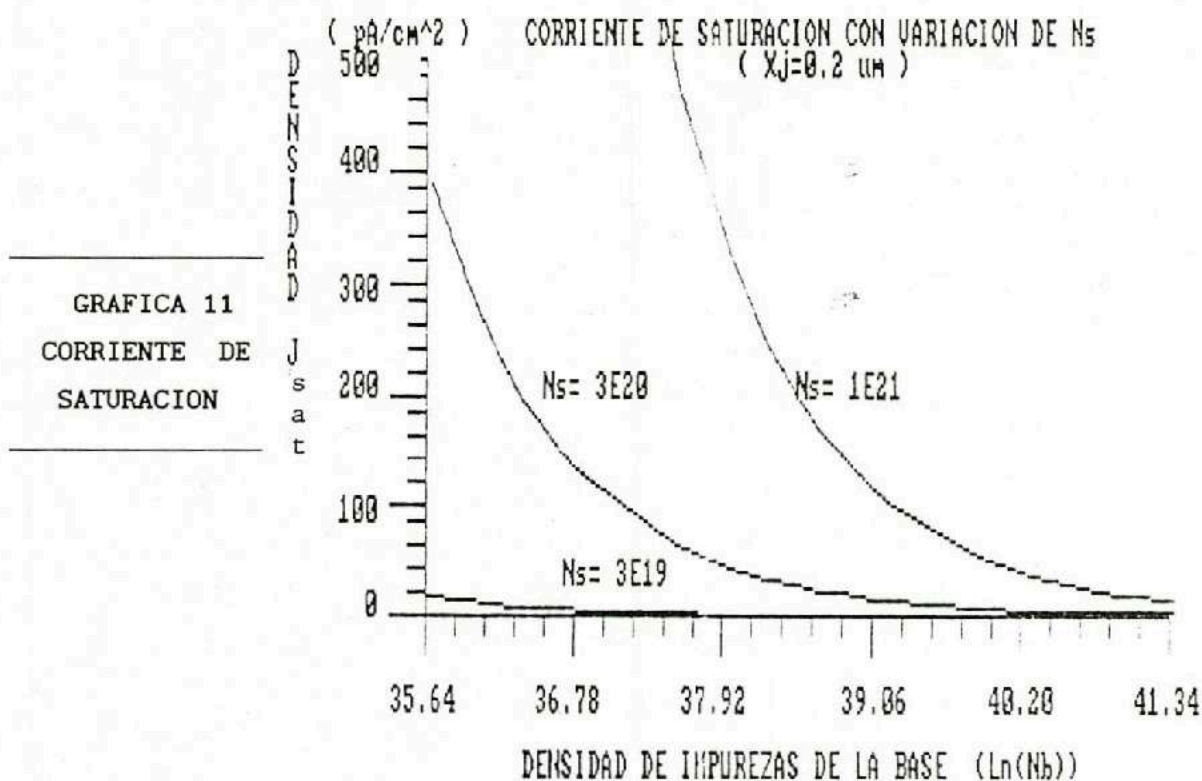
La gráfica 10 muestra la contribución de la zona desierta para una densidad superficial de  $3 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ . El caso con  $N_s = 3 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$  es muy similar y no lo hemos agregado. La corriente de esta zona disminuye con la profundidad de unión, pues disminuye a su vez el ancho de la región desierta. Por otro lado la relación de esta corriente con  $N_b$  es exponencial.



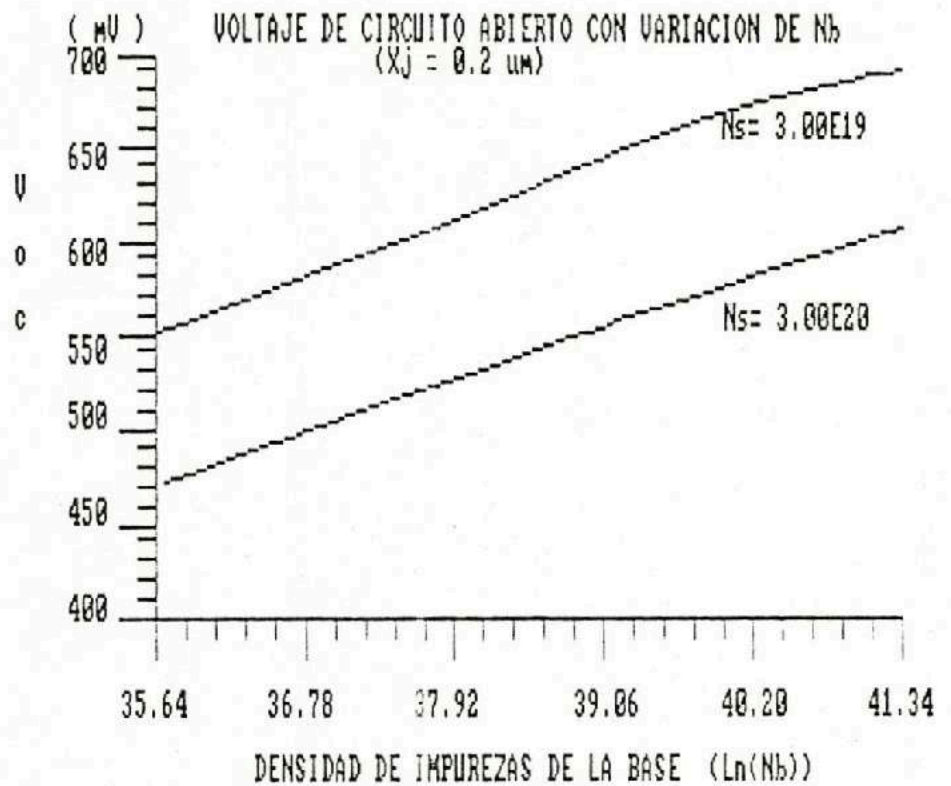
La gráfica 11 muestra la corriente de saturación del dispositivo, para tres distintas densidades de impurezas superficiales, y una profundidad de unión de 0.2  $\mu m$ . Si consideramos la expresión 6, es evidente que una densidad superficial con  $3 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$  produce el mayor Voltaje de Circuito Abierto, y por tanto, una mayor eficiencia. De la expresión (52), la corriente de saturación de la base es proporcional a  $n_{p0} = n_i^2 / N_b$ . De aquí la forma de la curva.

La gráfica 12 muestra el Voltaje de circuito Abierto, para una profundidad de 0.2  $\mu\text{m}$  y dos concentraciones superficiales de impurezas.

Para profundidades de unión mayores, Voc se reduce notablemente, guardando la misma forma lineal de la curva, que aumenta con Nb. La gráfica parece mostrar que con densidades mayores que  $9 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$  la eficiencia podría aumentar, pero esto no es así, ya que en la gráfica 7 se observa que la corriente de iluminación disminuye con estos valores de Nb

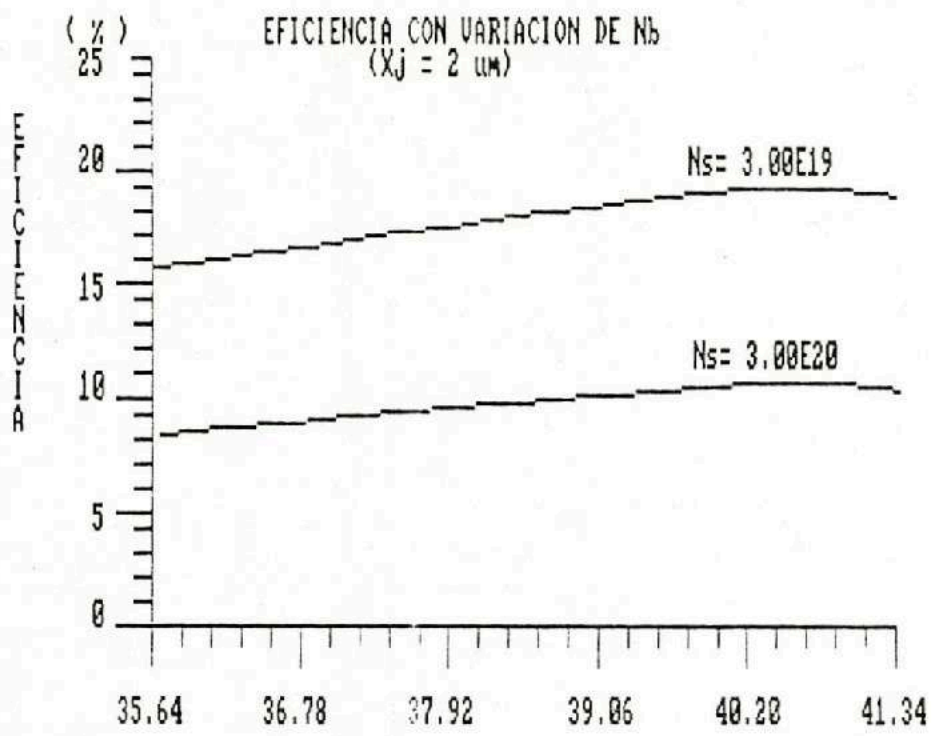


GRAFICA 12  
 VOLTAJE DE CIRCUITO  
 ABIERTO

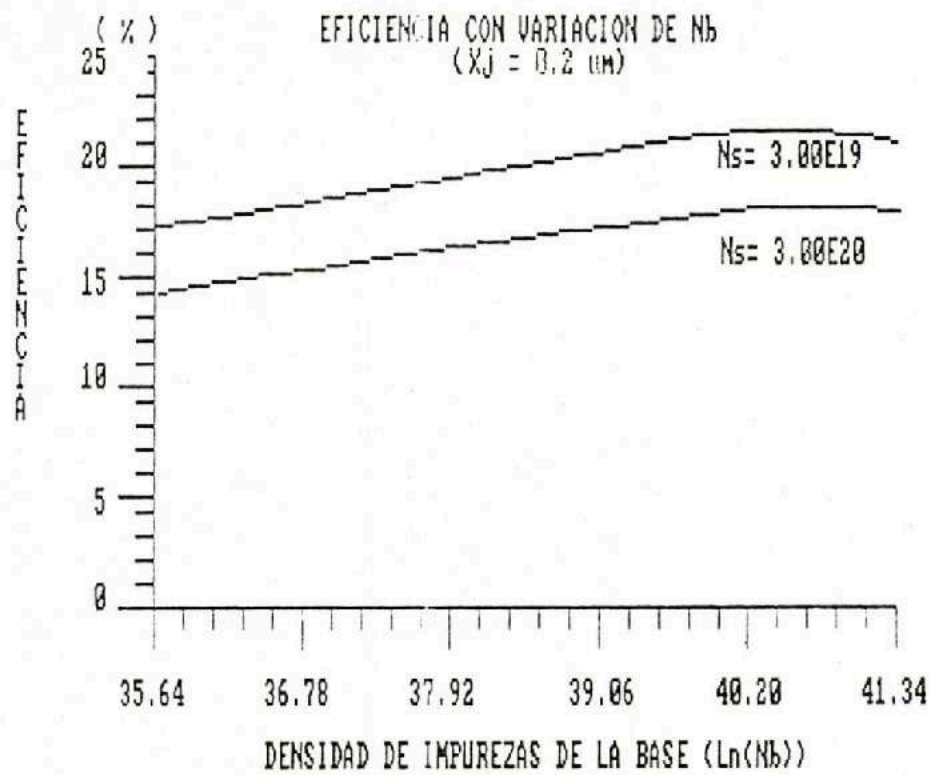


Esta sección se concluye con el cálculo de la eficiencia. En las gráficas 13 y 14 se muestra la eficiencia de la celda para dos profundidades de unión. La región de máxima eficiencia corresponde a una densidad de impurezas de la base entre  $2 \times 10^{17}$  y  $5 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ .

GRAFICA 13  
 EFICIENCIA  
 ( $X_j = 3 \mu\text{m}$ )



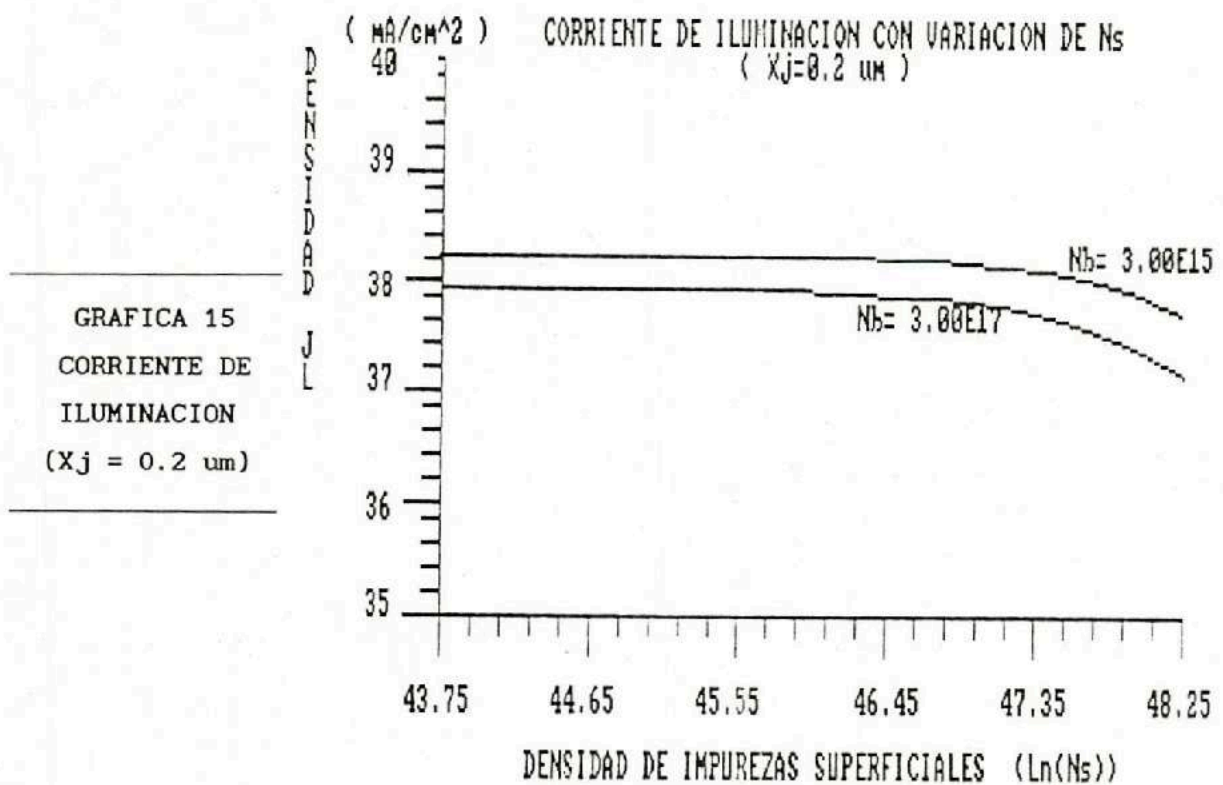
GRAFICA 14  
 EFICIENCIA  
 ( $X_j = 0.2 \mu\text{m}$ )

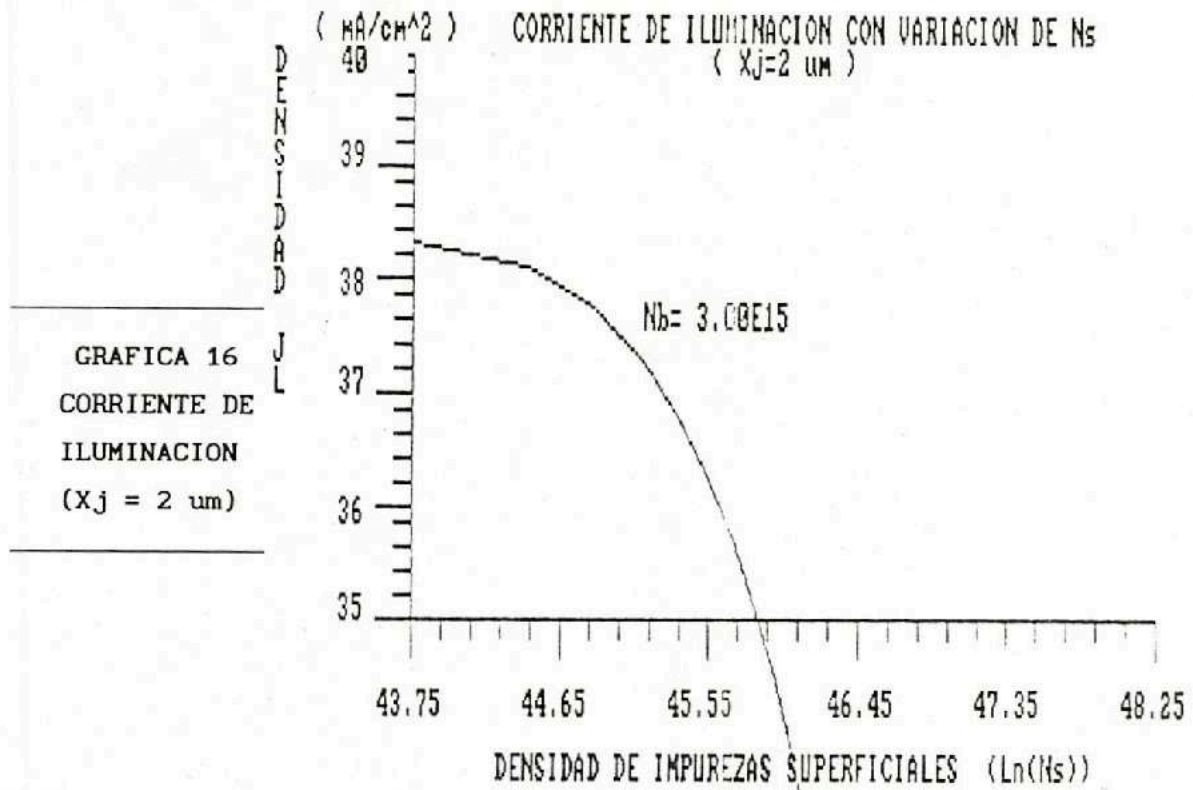


### V.2.2. -EFECTOS CON VARIACION DE $N_s$ .-

Se ha hecho variar la densidad de impurezas de la superficie, entre  $10^{19}$  y  $9 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ , manteniendo constantes otros parámetros,

Las gráficas 15 y 16 muestran la corriente de iluminación de la celda solar, para dos distintas profundidades de unión. La máxima corriente de iluminación se tiene con bajas densidades de  $N_s$ . Sin embargo, como se observa en la gráfica 12, un bajo valor de  $N_b$  produce valores bajos de  $V_{oc}$ . Lo mismo ocurre con profundidades de unión mas grandes, pero en este caso (gráfica 16), la corriente decae muy rápidamente con  $N_s$ . Este efecto se debe al fenómeno de recombinación AUGER, que es muy importante en la región del emisor para altas densidades  $N_s$ .

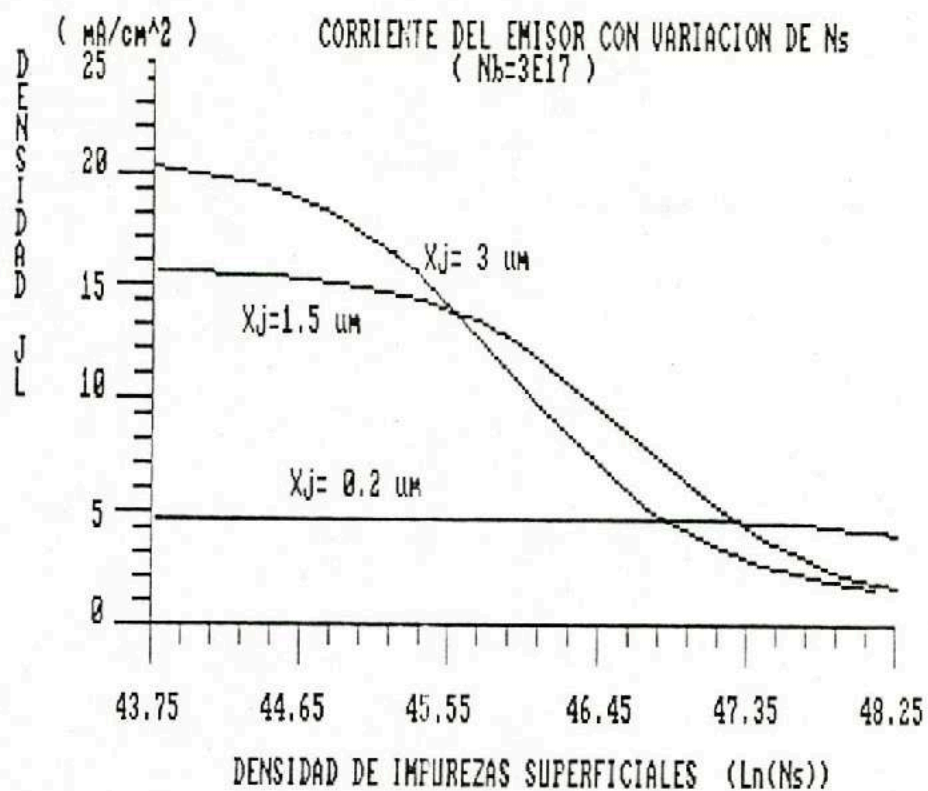




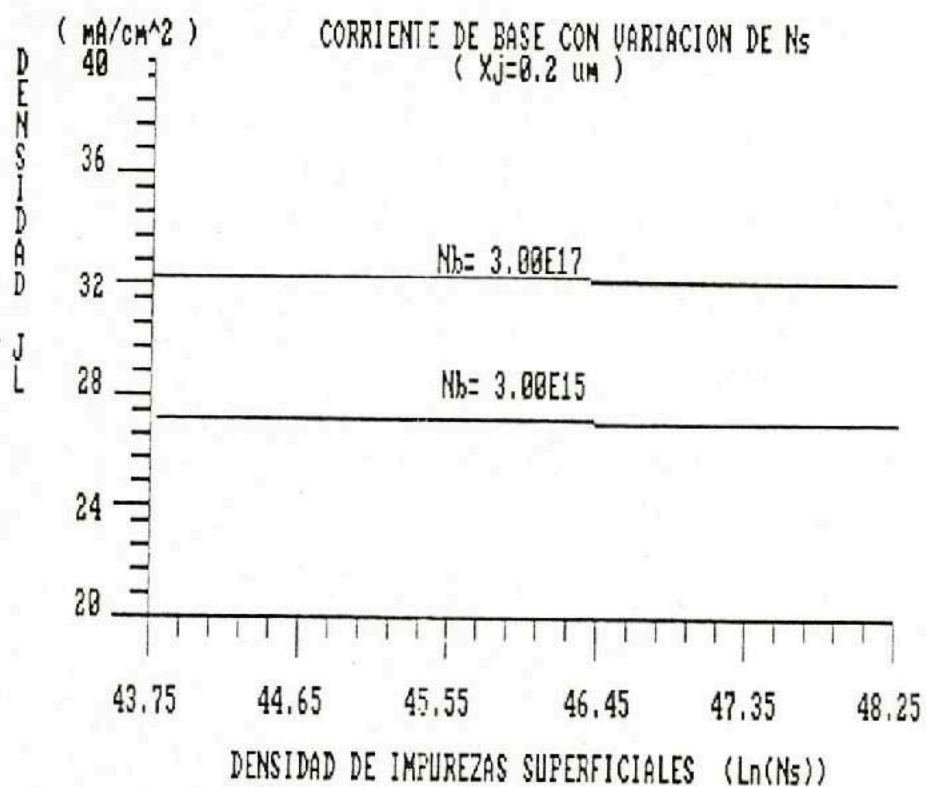
La gráfica 17 muestra la contribución a esta corriente de iluminación en la región del emisor. Es evidente que al aumentar  $N_s$ , la corriente fotogenerada decae debido a la recombinación de los portadores. Para valores grandes de  $X_j$ , el emisor es más ancho, y con valores bajos de  $N_s$ , la corriente de iluminación puede llegar hasta  $20 \text{ mA/cm}^2$ . Para valores arriba de  $6 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ , la recombinación Auger (expresión 25) es muy efectiva.

Con una profundidad de  $0.2 \mu\text{m}$ , casi todos los portadores fotogenerados contribuyen a la corriente. La gráfica muestra una curva constante con un valor del orden de  $5 \text{ mA/cm}^2$ . En la gráfica 18, en cambio la contribución de la región de la base es casi constante para una densidad  $N_b$  dada, y se aprecia que la mayor contribución ocurre con  $N_b = 3 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ . Este efecto se debe a que es mayor el volumen de átomos que pueden separarse en pares electrón-hueco y contribuir a la corriente.

GRAFICA 17  
CORRIENTE DEL EMISOR  
DEI

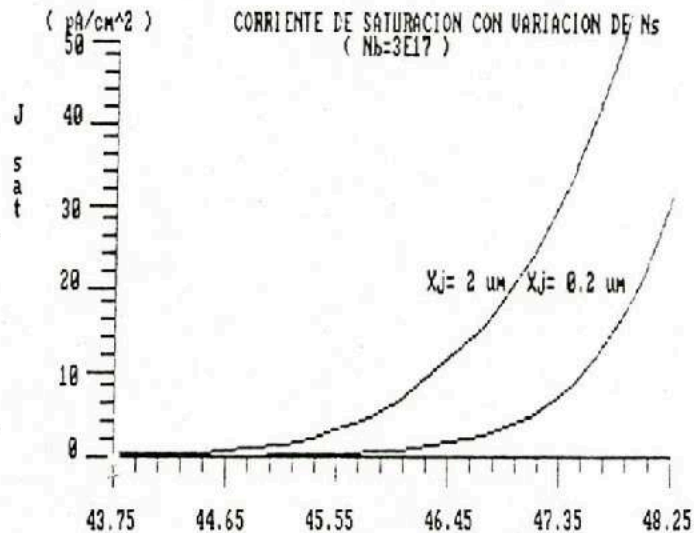


GRAFICA 18  
CORRIENTE DE  
BASE

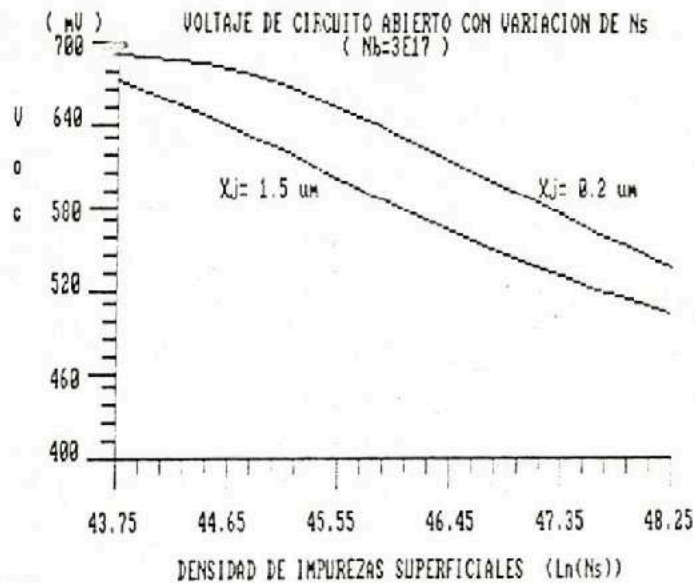


La gráfica 19 muestra la corriente de saturación del dispositivo. Esta corriente es muy pequeña para densidades de superficie entre  $10^{19}$  y  $1.5 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ , pero aumenta con la profundidad de unión y con la densidad  $N_s$ . Sin embargo su valor más alto no llega a los 100 pA, como en el caso de la gráfica 11, por lo que puede considerarse aceptable una alta densidad de impurezas  $N_s$ .

GRAFICA 19  
CORRIENTE DE  
SATURACION



La gráfica 20 muestra el Voltaje de circuito Abierto. Se aprecia una región de eficiencia con valores de  $N_s$  entre  $10^{19} \text{ cm}^{-3}$  y  $2.5 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ . Esto implica que altas densidades de  $N_s$  reducen  $V_{oc}$ .

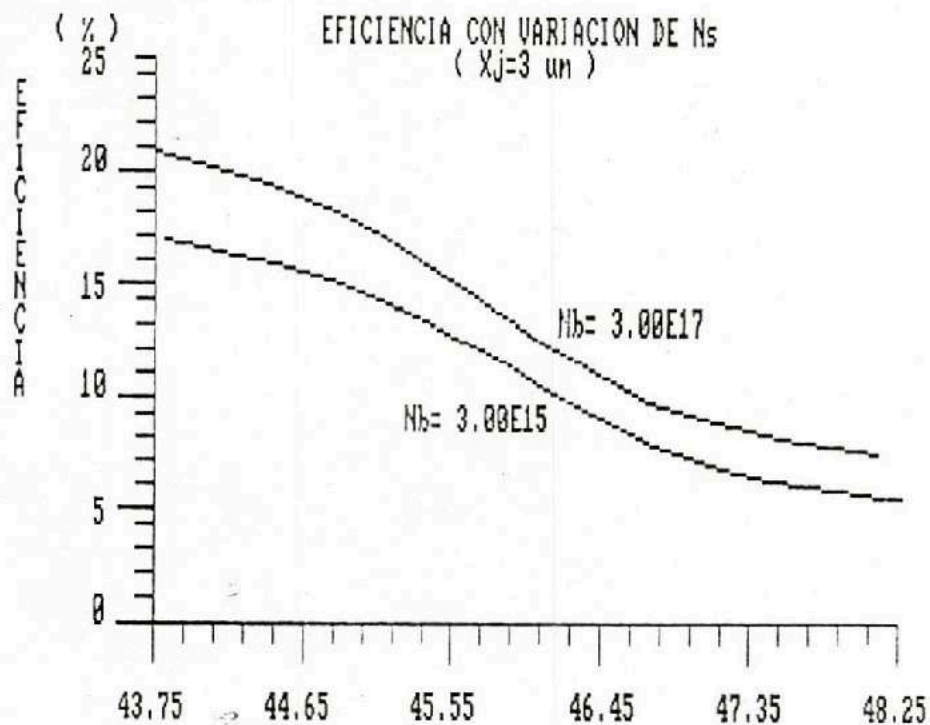


GRAFICA 20  
VOLTAJE DE CIRCUITO ABIERTO

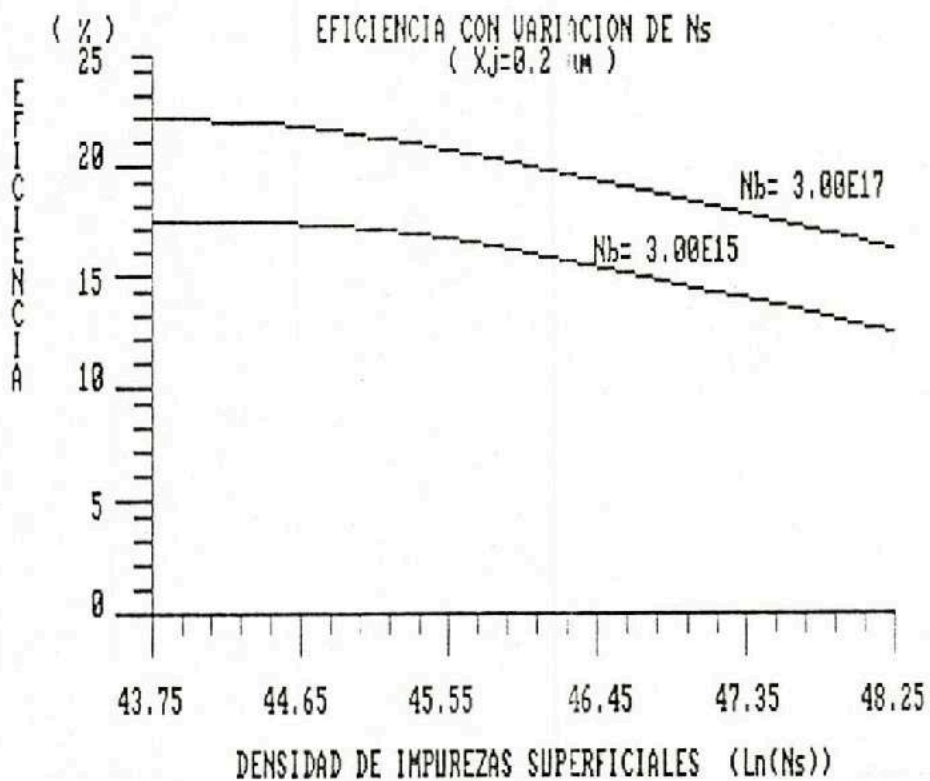


Las gráficas 21 y 22 muestran la eficiencia de la celda en estos casos. Con una profundidad de 3  $\mu\text{m}$ , la máxima eficiencia es de casi 21 %, mientras que para una profundidad de 0.2  $\mu\text{m}$ , la eficiencia llega al 22 %, siempre que  $N_b = 3 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ .

GRAFICA 21  
EFICIENCIA  
( $X_j = 3 \mu\text{m}$ )



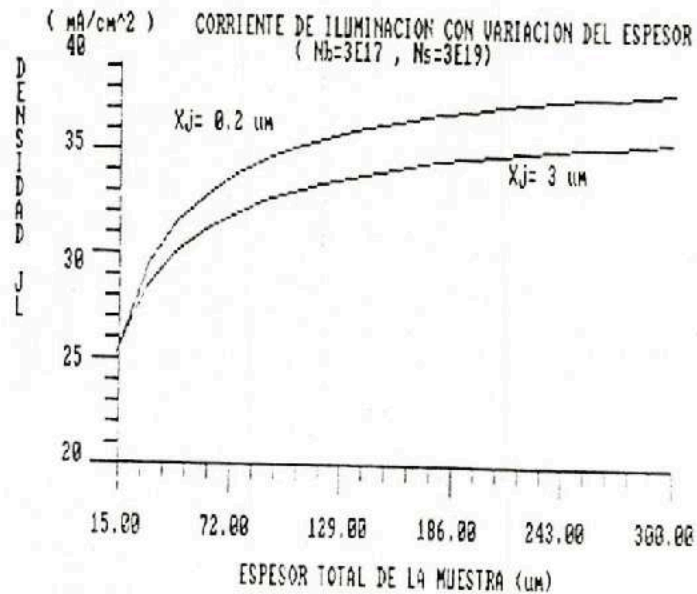
GRAFICA 22  
EFICIENCIA  
( $X_j = 0.2 \mu\text{m}$ )



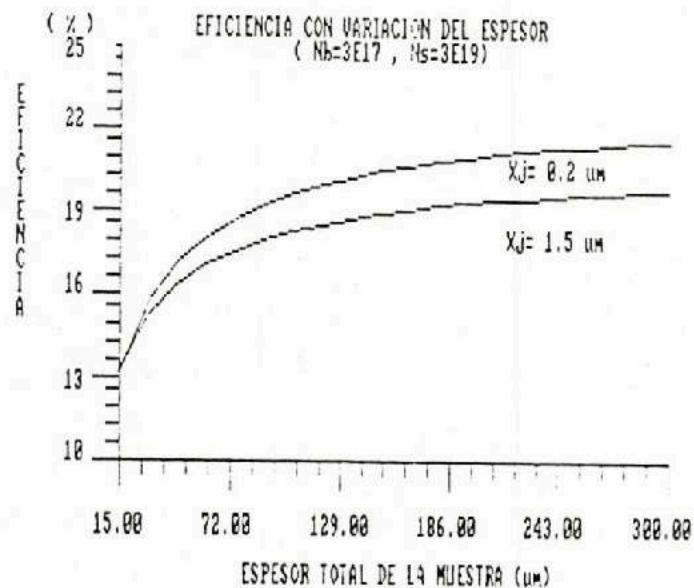
V.2.3.-EFECTOS CON VARIACION DEL ESPESOR  
DE LA CELDA.

Hicimos variar el espesor total de la celda entre 15 y 300  $\mu\text{m}$ , y los resultados se presentan en las gráficas 23 y 24. Sólo hemos calculado la corriente total de iluminación del dispositivo, y su eficiencia para dos profundidades de unión, considerando  $N_b = 3E17$  y  $N_s = 3E19$ .

GRAFICA 23  
CORRIENTE DE  
ILUMINACION



GRAFICA 24  
EFICIENCIA



## CAPITULO VI. CONCLUSIONES

### VI.1.- EFECTOS DE RESISTENCIA.

La gráfica 2, muestra por contraste con la gráfica 1, la reducción de la eficiencia de la celda al incluir en el modelo efectos de resistencia. Tanto  $V_{oc}$ , como  $J_{cc}$  no cambian apreciablemente, pero hay una reducción en el factor de llenado, que implica una reducción en la eficiencia de la celda. En la práctica, la resistencia en paralelo  $R_{sh}$  es muy grande como para tener efectos apreciables con intensidades luminosas iguales o mayores que  $AM_1$ . Sin embargo, para intensidades menores, y bajas temperaturas, su importancia es mayor<sup>[27]</sup>. Por otro lado, la resistencia en serie  $R_s$  tiene efectos mayores cuando aumenta la intensidad luminosa y la temperatura. La necesidad de minimizar estos efectos requiere de altos niveles de impurezas y grandes profundidades de unión. Pero esto se opone a las condiciones de una alta eficiencia. Por tanto, es necesario optimizar el diseño de los contactos óhmicos y el área de la red metálica superior.

Casi todas las celdas solares de Silicio de área grande, presentan efectos de resistencia en paralelo, fenómeno difícil de explicar con la teoría ordinaria. Se ha supuesto que el rompimiento de la red cristalina en las superficies laterales de la celda es una fuente de baja resistencia en paralelo. Otro causante podría ser la contaminación química. El compromiso en este caso es pasivar las superficies de la celda para disminuir la velocidad de recombinación superficial.

## VI.2.-PARAMETROS DEL EMISOR.-

La gráfica 3 confirma que el efecto de reducción de banda es atenuado por la degeneración de Fermi, para altas densidades de impurezas de la superficie. Por otro lado, la gráfica 4 muestra que la densidad de impurezas efectiva es menor que la densidad real  $N_D$ . Sin embargo, la densidad efectiva es equivalente a la densidad real cuando cesa el efecto de Reducción de Banda prohibida. De aquí se deduce que en la frontera de la zona desierta, la población de portadores minoritarios está dada por la condición (30), mientras que en el volumen del emisor, la distribución de portadores minoritarios sigue una relación más compleja, generada por la distribución efectiva referida.

La gráfica 5 muestra el campo eléctrico en el emisor. Esta gráfica corresponde a la derivada del logaritmo de la densidad efectiva, por tanto su máximo corresponde al punto de inflexión de la curva  $\ln(N_{DE})$ . El campo eléctrico está controlado por la forma de  $N_{DE}$ , mientras que a su vez,  $N_{DE}$  depende de la reducción de la banda prohibida. De aquí se deduce que para bajas densidades de impurezas, cuando  $\Delta E_g \approx 0$ , es posible suponer que el campo eléctrico experimentado por los portadores minoritarios es despreciable.

## VI.3.-CORRIENTE DE ILUMINACION.-

Las gráficas 6,7,15 y 16 muestran la corriente de iluminación de la celda solar con diversos parámetros de entrada. Con el modelo matemático que empleamos, la máxima corriente obtenida es del orden de  $38 \text{ mA/cm}^2$ , para una profundidad de unión de  $0.2 \text{ }\mu\text{m}$ , y con los siguientes valores de densidad de impurezas:

$$\begin{aligned} N_s &: 10^{19} \longrightarrow 1.5 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3} \\ N_b &: 3 \times 10^{15} \longrightarrow 1.5 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3} \end{aligned}$$

Al aumentar la densidad de impurezas por encima de estos valores, la corriente de iluminación empieza a disminuir, por efecto

de la recombinación Auger. Esto se verifica con las gráficas 8, 9, 17 y 18. Si variamos la densidad de impurezas de la base, manteniendo  $N_s$  fija, la contribución del emisor puede llegar hasta  $19 \text{ mA/cm}^2$  (gráfica 9), manteniéndose aproximadamente constante, y con una pequeña variación que ocurre al aumentar el espesor del emisor. En cambio si variamos la densidad de impurezas de la superficie, manteniendo  $N_b$  fija, la contribución del emisor decae en forma muy rápida con el aumento en  $N_s$ , y este efecto resulta aún más dramático al crecer la anchura del emisor (gráfica 17).

Sólo con un emisor delgado, se evita la recombinación, pero la contribución a la corriente de iluminación es también pequeña. El mismo efecto se aprecia en la contribución de la base a esta corriente, (gráficas 8 y 18). Al aumentar  $N_b$ , hay un aumento en la corriente, hasta una región en que la recombinación Auger empieza a ser importante ( $6 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ ). El aumento en esta contribución de la corriente, al aumentar  $N_b$  se debe a que la zona de la base penetra en la región desierta, es decir, aumenta su anchura, y una mayor eficiencia de colección tiene lugar en la frontera con la zona desierta. Sin embargo, al mantener fijo  $N_b$ , y variar  $N_s$ , la parte de contribución de la base es casi constante.

La gráfica 10 muestra precisamente que la aportación de esta zona a la corriente de iluminación es mayor cuando disminuye la densidad  $N_b$ , lo que se debe, como decíamos antes, a que el ancho de la zona desierta disminuye con  $N_b$ .

#### VI.4.- CORRIENTE DE SATURACION.-

Las gráficas 11 y 19 muestran la corriente de Saturación. Es evidente que al mantener constante  $N_s$ , esta corriente varía como  $1/N_b$ , y es mínima si  $N_s = 3 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ . Sin embargo, al hacer variar  $N_s$ , manteniendo  $N_b$  constante, la curva es una exponencial creciente con  $N_s$ , lo que significa que este parámetro debe mantenerse bajo. Sin embargo, para profundidades pequeñas de  $X_j$ , la contribución se mantiene por debajo de  $20 \text{ pA/cm}^2$ , por lo que

densidades altas de  $N_s$  pueden ser aceptables.

#### VI.5.-VOLTAJE DE CIRCUITO ABIERTO.

Las gráficas 12 y 20 muestran que el voltaje de circuito abierto es proporcional a  $\ln(N_b)$ , hasta una densidad de  $9 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ .

La gráfica 20 muestra que hay una región óptima entre  $1 \times 10^{19}$  y  $3 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ . Fuera de esta región el voltaje de circuito abierto disminuye linealmente con la densidad  $N_s$ .

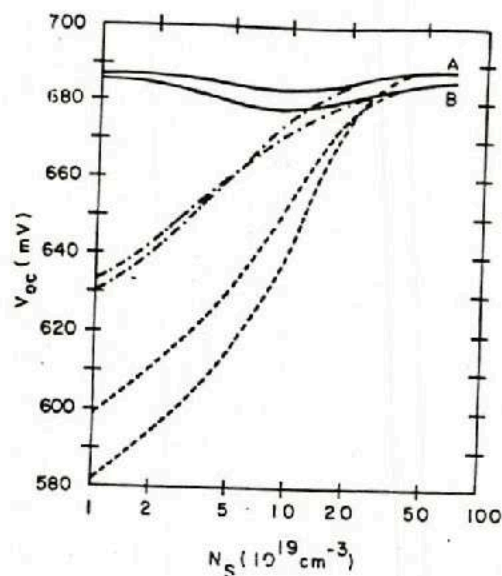
En la gráfica 25 se muestra el voltaje de circuito abierto para variaciones de  $N_s$  en el orden de  $10^{19} \text{ cm}^{-3}$ , con dos profundidades de unión (referencia 14). Se observa que los máximos coinciden con los de la gráfica 20, así como también se aprecia la reducción de  $V_{oc}$  al aumentar  $X_j$ . Por otro lado se observa que en rango de valores considerado en esta gráfica,  $V_{oc}$  varía poco, por lo que podemos concluir que el orden de  $10^{19} \text{ cm}^{-3}$  es aceptable para  $N_s$ .

- $S_0 = 5 \times 10^2 \text{ cm/seg}$
- · - ·  $S_0 = 5 \times 10^4 \text{ cm/seg}$
- - -  $S_0 = 5 \times 10^6 \text{ cm/seg}$

---

**GRAFICA 25**  
 **$V_{oc}$**   
**EN TERMINOS DE  $N_s$**   
 A. -  $X_j = 0.2 \text{ } \mu\text{m}$   
 B. -  $X_j = 0.4 \text{ } \mu\text{m}$

---



## VI.6.-EFICIENCIA.

Si se aumenta la densidad  $N_s$ , disminuye  $V_{oc}$ , y aumenta la corriente de saturación. Por otro lado, al disminuir  $N_b$ , disminuye la corriente de iluminación de la base, pero aumenta la contribución de la zona desierta, de modo que la corriente total de iluminación con  $N_b$  es casi constante hasta valores del orden de  $3 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ . Pero en este caso,  $V_{oc}$  aumenta con  $N_b$ , mientras que  $J_{sat}$  disminuye.

Si aumenta la profundidad de unión, la recombinación interviene reduciendo la corriente de iluminación.

Estas consideraciones evidencian la existencia de una región de eficiencia máxima.

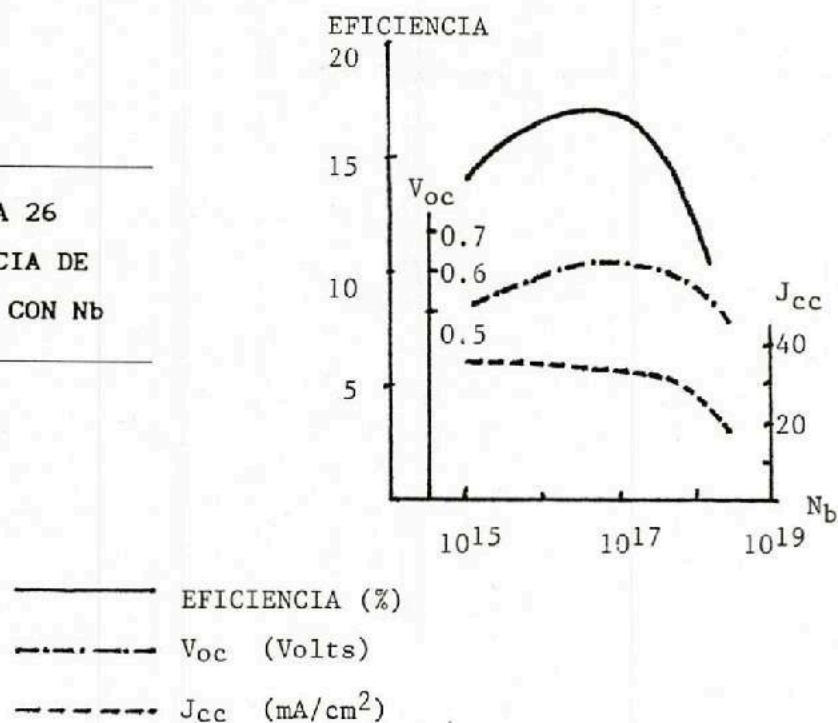
Las gráficas 13, 14, 21 y 22 muestran la eficiencia de la celda con diferentes parámetros de entrada. La máxima eficiencia alcanzada es del 22 % , con los siguientes parámetros:

$$\begin{aligned} N_s &= 10^{19} \longrightarrow 3 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}. \\ N_b &= 2 \times 10^{17} \longrightarrow 5 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}. \\ X_j &= 0.2 \text{ um.} \\ S_o &= 500 \text{ cm/seg.} \\ H &= 300 \text{ um.} \\ T &= 300^\circ \text{ K.} \end{aligned}$$

No se considera el efecto de resistencias parásitas en el cálculo de esta eficiencia.

Mostramos a continuación , resultados obtenidos por Green et al. (referencia 17) para la eficiencia, el voltaje de circuito abierto y la corriente de corto circuito en una celda  $N^+/P$ , en términos de  $N_b$  , con efectos de resistividad incluidos :

GRAFICA 26  
DEPENDENCIA DE  
PARAMETROS CON Nb



Esta gráfica muestra una región de máxima eficiencia con Nb del orden de  $10^{17} \text{ cm}^{-3}$ . Muestra también que  $V_{oc}$  aumenta linealmente con Nb hasta la misma región de impurezas, en donde empieza a descender, alcanzando casi 650 mV. Por otro lado se observa que la corriente de corto circuito es idéntica a la que muestra la gráfica 6.

En las siguientes tablas mostramos resultados experimentales del trabajo de A. Cuevas y M. Balbuena [31], en comparación con nuestro trabajo, para dos velocidades de recombinación de la superficie:



TABLA 1

$$(N_b = 2.5 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}, S_o = 5 \times 10^6 \text{ cm/seg})$$

Ns	Xj	Joe	Job	Jsat	Voc	Jseexp
( $\times 10^{19}$ )	( $\mu\text{m}$ )	—————( $\text{pA/cm}^2$ )—————			mV	( $\text{pA/cm}^2$ )
1	0.77	6.5	0.06	6.55	574	2.2
2	0.95	4.75	0.06	4.81	582	1.7
1.3	1.8	2.92	0.06	2.98	593	0.75
1.3	2.4	2.3	0.061	2.36	599	0.62

TABLA 2

$$(N_b = 2.5 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}, S_o = 5 \times 10^2 \text{ cm/seg})$$

Ns	Xj	Joe	Job	Jsat	Voc	Jseexp
( $\times 10^{19}$ )	( $\mu\text{m}$ )	—————( $\text{pA/cm}^2$ )—————			mV	( $\text{pA/cm}^2$ )
1	0.77	0.07	0.06	0.13	677	0.21
2	0.95	0.26	0.06	0.33	654	0.25
1.3	1.8	0.23	0.06	0.30	657	0.30
1.3	2.4	0.30	0.06	0.37	651	0.25

En estas tablas, Joe y Job son las corrientes de saturación del emisor y de la base, respectivamente. Jsat es la suma de ambos, y es el valor que comparamos con la última columna, en donde se describen resultados experimentales del trabajo de Cuevas y Balbuena.

De nuevo se aprecia que la densidad superficial en el emisor que permite una baja corriente de saturación es del orden de  $10^{19}$ . Del mismo modo, es conveniente un emisor delgado cuando la

superficie está pasivada, mientras que en superficies no pasivadas, es conveniente aumentar el espesor del emisor.

Asimismo puede observarse que en el caso de superficies pasivadas los resultados experimentales son del mismo orden que los valores calculados en esta tesis, con excepción del último valor de  $J_s(\text{exp})$ , que requeriría un análisis de los mecanismos empleados para su medición.

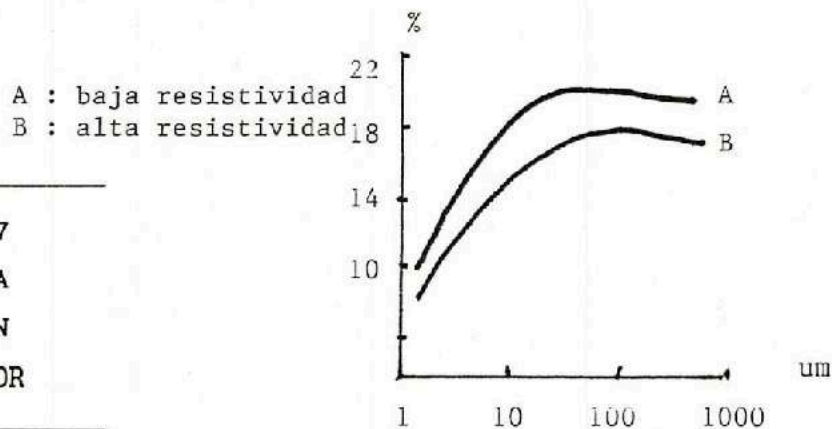
Para superficies sin pasivar, los valores  $J_{\text{sat}}$  y  $J_s(\text{exp})$  siguen la misma tendencia descendente, pero difieren por un factor cuyo valor está entre 3 y 4, que puede deducirse mejorando este modelo.

#### VI.7. - ESPESOR DE LA CELDA.

Las gráficas 23 y 24 se han calculado con una variación del espesor entre 15 y 300  $\mu\text{m}$ . De nuevo se observa que la máxima corriente de iluminación es del orden de  $38 \text{ mA/cm}^2$ , y la máxima eficiencia es del 22 %.

Como comparación mostramos en la gráfica 27 (referencia 27) eficiencias obtenidas en celdas N/P en términos del espesor, con efectos de resistividad en la base. Básicamente se aprecian los mismos resultados que los de la gráfica 14.

GRAFICA 27  
EFICIENCIA  
EN FUNCION  
DEL ESPESOR

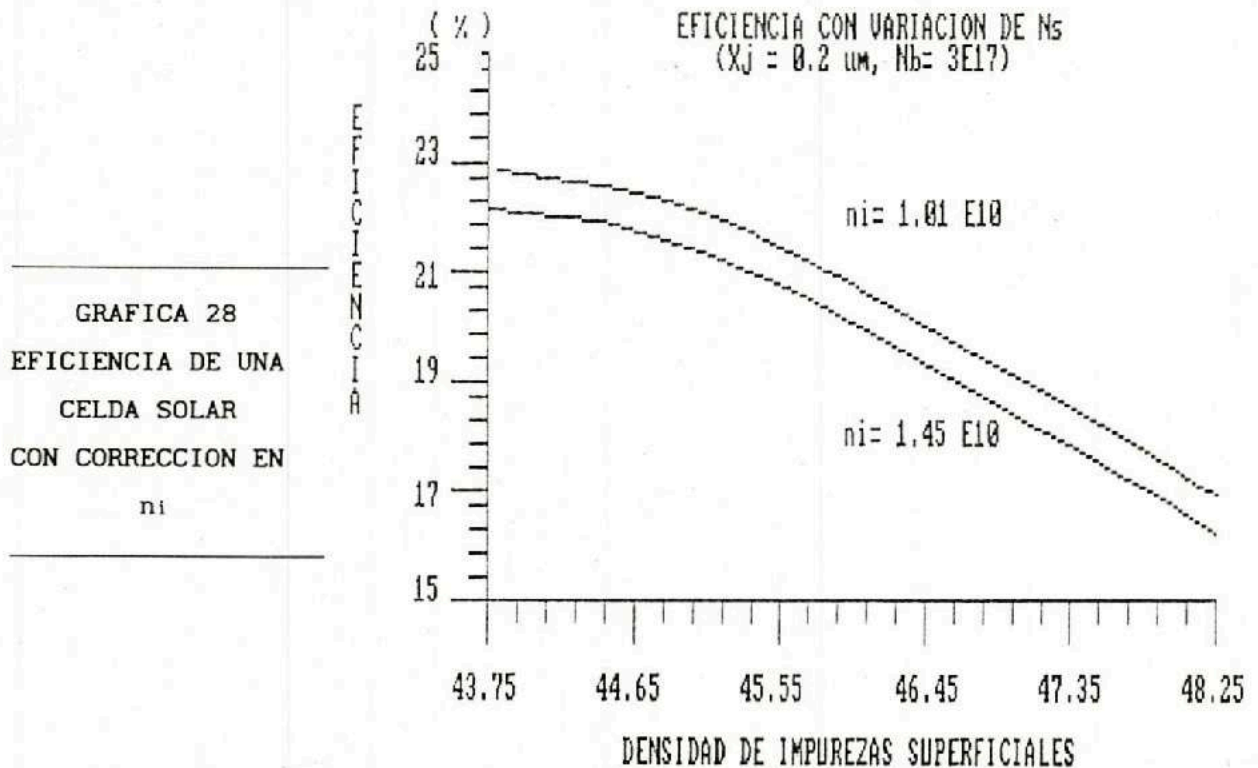


## VI.7.-PERSPECTIVAS.-

Se ha mostrado que con el modelo presentado, se alcanzan eficiencias máximas del 22 %. Sin embargo, conforme se establecen métodos experimentales más sofisticados y cuidadosos en la fabricación de las celdas solares, es posible aumentar la eficiencia de los dispositivos. Del mismo modo, deben buscarse expresiones que expliquen los nuevos efectos, y que modelen mejor los resultados experimentales.

Según un reporte de M.A.Green<sup>[32]</sup>(1990), es posible obtener eficiencias por arriba del 22 % en celdas solares con superficies pasivadas en ambas caras, y con una estructura geométrica que permite evitar al máximo la fuga de corriente hacia los lados de la celda. Para explicar este efecto, Green muestra que  $n_i$ , la densidad de portadores del material intrínseco en la región del emisor, debe contener un factor de corrección.

Hemos incluido en este trabajo los resultados de Green que muestran una eficiencia máxima del 23 %, cuando se corrige  $n_i$ .



Por otro lado, en este trabajo no se ha incluido la variación con la temperatura, aunque es relativamente sencillo incluir este factor en los parámetros del programa, en términos de resultados experimentales para la movilidad, tiempo de vida, longitud de difusión, etc.

Asimismo, no hemos considerado la reflexión en la cara posterior, pero las expresiones algebraicas del programa consideran esta variante, que puede incluirse en función de resultados experimentales confiables.

#### VI.8. -RECOMENDACIONES.

Se ha mostrado que existe una región de máxima eficiencia en una celda solar de unión  $N^+/P$  y se han cuantificado los parámetros que intervienen en dicha región.

Es conveniente aclarar que en la introducción del Programa de Cálculo, están definidos los límites físicos de los valores de parámetros de entrada, y fuera de ellos, el programa no los acepta. Por otro lado, si se utiliza la opción de considerar resistencias parásitas, el programa no acepta  $R_{sh} = 0$ . Además, una vez introducidos los valores de  $R_s$  y  $R_{sh}$ , en la misma corrida del programa no debe llamarse de nuevo la opción de Resistencias pues automáticamente se agregarían los nuevos valores a los previamente calculados, generando resultados falsos.

F I N

## REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- 1.- D.M.CHAPIN, C.S.FULLER, G.L. PEARSON. " A new silicon P-N junction photocell for converting solar raadiation into electrical power". J. Appl. Phys. vol 25 No.5 pp. 676-677. Mayo 1954.
- 2.-M.B.PRINCE,"Silicon Solar Energy Converters",J. Appl. Phys. Vol 26, pp. 534-540, 1955.
- 3.-J. J. LOFERSKI,"Theoretical considerations governing the choice of the optimum semiconductor for photovoltaic energy conversion". J. Appl. Phys. vol 27 pp. 777-784,1956.
- 4.-PAULRAPPAPORT."The photovoltaic effect and its utilization". R.C.A. Review, vol XX no. 3 pp. 373-397, sep. 1959.
- 5.-D.T.BERNATOWITZ."Sumary of high efficiency silicon solar cell". Meeting held at NASA-Lewis.Proc.11 th. IEEE Photovoltaic Spec. (mayo 1975).
- 6.-JOHN R HAUSER,P.M. DUNBAR." Perfomance Limitations Of Silicon Solar Cells "; IEEE Vol Ed 24 No.4 Abril de 1977 pp.305-321.
- 7.-H.P.LANYON, RICHARD A. TUFT. "Bandgap Narrowing in moderately to Heavily doped silicon" (IEEE VOL Ed-26.No 7 JULIO 1979)
- 8.-DAVID J. ROULSTON " Modeling and measurement of Minority carrier lifetime versus doping in N<sup>+</sup>/P Silicon Diodes." IEEE VOL Ed 29(2) pp. 287.Feb 1982.
- 9.-C.M.SINGAL. "Analytical expressions for the series resistance dependent maximum power point and curve factor for Solar Cells". Solar Cells, 3 (1981) pp. 163-177.
- 10.-W. SHOCKLEY and W.T.READ "Stattistics of the Recombinations of Holes and Electrons". Bell Telephone Laboratories, M. Hill, New Jersey.Phys.Rev. Vol 87, no. 5 Sep (1952),pp.835-842.
- 11.-S.M.SZE "Physics of Semiconductor Devices" (John Wiley. New York 1969) pp 51-57.
- 12.-W SHOCKLEY "Electrons and Holes in Semiconductors" (New York.Van Nostrand, 1950)

- 13.-H.P.D. LANYON.-"The physics of heavily doped  $N^+/P$  Junction Solar Cells". Solar Cells Vol 3 No.4 (julio 1981) pp.289-311.
- 14.- A. MORALES ACEVEDO. "Fermi Degeneracy and its effects on the open circuit voltage of Silicon Solar Cells"J.APPL. PHYS. 65(5) MAR. 1989.pp. 2121-2123.
- 15.- J.A.del ALAMO, R.M.SWANSON. IEEE Trans. Electron Devices Ed 34, 1580 (1987).
- 16.-J.J.PANKOVE. "Optical Processes in Semiconductors" (Englewood Cliffs. P.Hall, 1971)
- 17.-MARTIN A GREEN."Solar Cells". (Englewood Cliffs. P.Hall,1982)
- 18.- J.D.BECK.& R. CONRADT. "Auger recombination in Silicon". Solid State Commun. Vol 13 Julio. 1973.
- 19.-J.DZIEWOR,W. SCHMID "Auger Coefficients for Highly Doped and Highly excited Silicon". (App. Physics Letters Vol 31(5).1977)
- 20.-J. DEL ALAMO, S. SWIRHUM and R. M. SWANSON. " Simultaneous measurement of the hole lifetime, hole movility, and Bandgap Narrowing in heavily doped N-type silicon". in IEDM. Tech.Dig. 1985. pp. 290-294.
- 21.-S.E. SWIRHUM ,Y.H.KWARK and R.M.SWANSON. "Measurement of Electron lifetime, electron movility, and bandgap narrowing in heavily doped P-type silicon".in IEDM Tech. Dig. 1986, pp. 24-27.
- 22.-ARTURO MORALES ACEVEDO."Efectos de Superficie en Celdas Solares" Memorias del 3er Taller de Física de Superficies. Soc. Mex. de Fis. de Sup y de Vacío. Hermosillo Son. Mayo de 1985.pp 22-63.
- 23.-J. MICHEL, A MIRCEAU "Modele de Simulation sur ordinateur de Cellules Solaires Photovoltaiques" .(Acta Electronica 18. 4, 1975) pp. 312-317.
- 24.-Y.MARGONINSKI and Y. WALZER."Unique determination of the parameters of Surface recombination Centers in Semiconductors" Phys.Rev. Vol. 156, No.3 Abril 1967.pp.903-909.
- 25.-ARTURO MORALES ACEVEDO."Optimization of the Surface Impurity concentration of passivated emitter solar cells".J. Appl. Phys.

~~115-790~~  
RIS. 140196

- 80 (2) Julio de 1986. pp.815-819.
- 26.-ARTURO MORALES ACEVEDO."An improved simple procedure for calculating the open-circuit voltage of passivated emitter silicon Solar Cells". Solar Cells, 22 (1987) pp. 319-321.
- 27.-H.J.HOVEL. "Semiconductors and Semimetals".Vol II. Ac. Press New York (1975). pp.50-53.
- 28.-N. G. NILSSON. "Empirical approximations for the Fermi Energy in a semiconductor with parabolic bands." Appl. Phys. Lett. 33(7), Octubre 1978. 653-654.
- 29.-A. S. GROVE.-"Physics and Technology of semiconductor devices". pp. 35-85.Ed, John Wiley. New York (1967).
- 30.-J.S. BLAKEMORE.-"Semiconductor Statistics". Pergamon Press. Londres.(1962).pp 75-83.
- 31.-A. CUEVAS,M.BALBUENA.-"Thick-emitter silicon solar cells". Instituto de Energía Solar. E.T.S.I. Telecomunicación. E.T.S.I. Telecomunicación. Universidad Politécnica de Madrid. (1989)
- 32.-A.B.SPROUL,M.A.GREEN.-"Experimental Measurement of the intrinsic carrier concentration of silicon." Solar Photovoltaic Laboratory. University of New South Wales. Kensington Australia .2033 (1990)