

ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA

MODEL PSPICE DE LA CÈL.LULA SOLAR

Simulacions Pspice de les característiques elèctriques de la cèl.lula solar

Luis Castañer Muñoz

Santiago Silvestre Berges

Departament D'Enginyeria Electrònica

Introducció

Spice (Simulation program with integrated circuit emphasis) és una eina software standartizada, de propòsit general, molt popular i versàtil, molt utilitzada en nombroses Indústries i Universitats d'arreu del món per a simular i analitzar circuits electrònics de tot tipus. Spice incorpora precisos models elèctrics tant per a elements passius com actius, que el permeten realitzar diferent tipus d'anàlisis :

- Determinar el punt de treball d'un circuit
- Anàlisi DC
- Anàlisi AC
- Anàlisi transitori (en domini temporal)
- Anàlisi de l'efecte del soroll

Spice fou desenvolupat per la Universitat de California (Berkeley) a mitjans dels anys 70 i s'ha convertit en una robusta eina de treball, potent i eficaç per a la simulació de circuits electrònics. Spice no és en realitat un programa únic, hi ha tota una família d'aquest simulador. Particularment es poden dividir en aquests dos tipus :

- Versions principals, poden destacar-se :

Hspice, de Meta-Software
Rad-Spice també de Meta-Software
IG-Spice d'A.B. Associates
I-Spice de NCSS Time Sharing

- Versions per a PC, les mes destacables són :

ALLSPICE d'Acotech
IS-Spice d'Intusoft
Z-Spice de Z-Tech
Spice-plus d'Analog design tools
DSPICE de Daisy Systems
Pspice de Microsim

D'entre aquestes versions, les que són disponibles al Departament D'Enginyeria Electrònica són el Pspice per a PC (entorns MS-dos i Windows95) i HSpice per a Sun Station (entorn Unix). En aquestes pràctiques es treballarà amb la versió Pspice 5.0 per a PC.

II. Conceptes bàsics de Pspice

Pspice requereix que li sigui especificat el circuit a simular tot donant-li a conèixer els noms dels elements que el configuren, els nodes entre els que estan connectats, els seus valors, els paràmetres variables, el tipus d'anàlisi a realitzar i el format de la sortida.

Es possible realitzar una verificació de la correcta sintaxi del circuit d'entrada avanç de seguir amb la simulació. En versions del programa que treballen sobre Windows és possible entrar directament per esquemàtic.

Suposem per exemple el circuit de la figura 1, un simple divisor de tensió. Observar que cal numerar tots els nodes del circuit, de manera que el programa pugui saber on connectar cada un dels components del circuit.

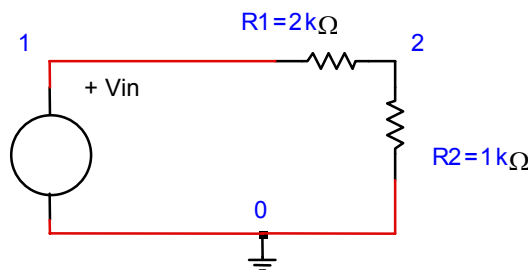


Figura 1. Exemple 1

En aquest cas, en el fitxer d'entrada amb les especificacions del circuit s'han de descriure tres elements: V_{in} , $R1$ i $R2$. També cal indicar els nodes entre els que es connecten i el tipus d'anàlisi a realitzar, que pot ser de tipus transitori. Per acabar s'han d'especificar les variables de sortida que volem obtenir i el seu format.

D'aquesta forma tindrem un fitxer d'entrada com el següent :

** Nom fitxer

* <u>Component</u>	<u>node+</u>	<u>node-</u>	<u>valor</u>
R1	1	2	2kΩ
R2	2	0	1kΩ
Vin	1	0	sin (0 10 1Hz)

* <u>tipus d'anàlisi</u>	<u>Increment</u>	<u>Temps total</u>
--------------------------	------------------	--------------------

.TRAN	10 ms	4s
-------	-------	----

* <u>format sortida</u>	<u>tipus anàlisi</u>	<u>variable</u>
-------------------------	----------------------	-----------------

```
.PRINT          TRAN          V(2)

.END
```

Com es pot veure la sintaxi és molt senzilla. Circuits molt més complexes s'especificaran de manera semblant. Per a més detall podeu consultar les següents referències :

(1) J W Nilsson & Susan A Riedel

" Introduction to Pspice"

Addison-Wesley 1993

(2) P W Tuinenga

" Spice: A guide to circuit simulation and analysis using Spice"

Prentice Hall 1988

(3) M H Rashid

" Spice for circuits and Electronics using Pspice"

Prentice Hall 1990

(4) Lluís Prat, R Bragós, J A Chavez, M Fernández, V Jiménez, J Madrenas, E

Navarro y J Salazar

"Circuitos y dispositivos electrónicos "

Edicions UPC 1996

(5) J Sánchez

" Simulación analógica basada en Spice"

Edicions UPC 1997

III. Model elèctric de la cèl.lula solar per Pspice

El circuit equivalent d'una cèl.lula solar il.luminada és el que apareix a la figura 2, el corrent I_L correspon a la component de corrent fotogenerat, I_d està associat als corrents de difusió de minoritaris en zones neutres, les resistències R_s i R_p , sèrie i paral.lel, inclouen els efectes no ideals del dispositiu.

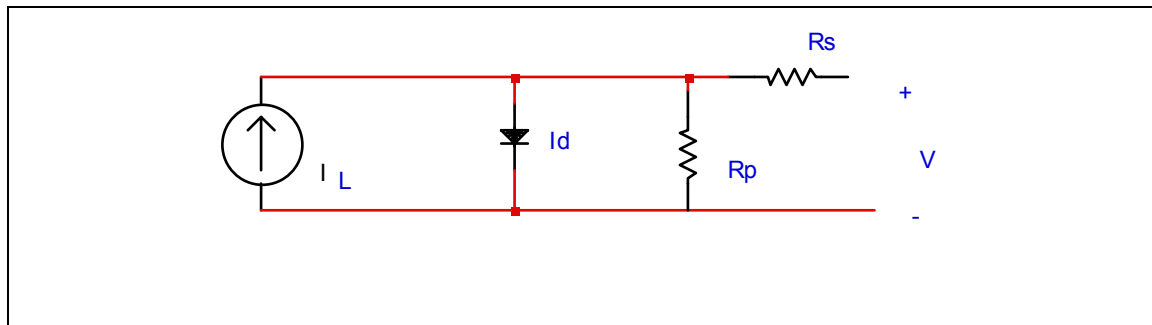


Figura 2.

Per treballar amb Pspice cal implementar un model general, en el que puguin escollir-se els principals paràmetres característics de la cèl.lula en cada una de les simulacions, d'aquesta forma poden ésser observats diferent tipus de comportament en funció dels valors d'aquests paràmetres.

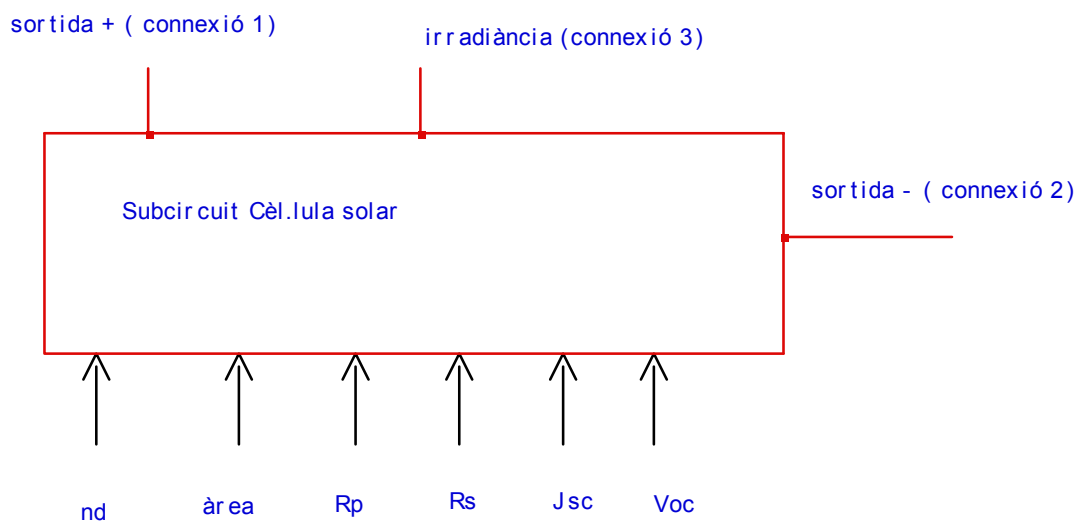
Els paràmetres més importants que cal incloure en el model son els següents :

- **Area** : àrea de la cèl.lula (cm²)
- **Rs** : Resistència sèrie (Ω)
- **Rp** : Resistència paral.lel (Ω)
- **nd** : Factor d'idealitat del diode de fosc (adimensional)
- **Jsc** : densitat de corrent de curtcircuit (A/cm²)
- **Voc** : Tensió de circuit obert (V)

Pspice permet la definició de subcircuits (opció .SUBCKT) en el fitxer d'entrada a la simulació, podem fer referència a subcircuits predefinits per l'usuari. Pot

pensar-se en definir un subcircuit que es correspongui amb el circuit equivalent de la cèl.lula solar il.luminada representat en la figura 2 i que permeti incloure informació referent als paràmetres més importants de la cèl.lula, així podem implementar el nostre model general de cèl.lula solar en forma de subcircuit.

D'altra banda s'ha de donar informació al subcircuit respecte d'un paràmetre variable amb el temps com es la irradiància, a partir d'aquest paràmetre pot calcular-se el corrent fotogenerat. Caldrà fer que aquest paràmetre es converteixi en un node del circuit, i que la tensió d'aquest node ens doni la informació referent a la irradiància.



**Figura 3. Connexions i paràmetres d'entrada
del subcircuit de la cèl.lula solar**

Totes les expressions que depenguin de la irradiància, en el nostre model, dependran de la tensió d'aquest node fictici. Les unitats d'aquesta tensió simularan W/m^2 , com correspon a una irradiància. Així el subcircuit, figura 3, el podem veure com una caixa negra amb 3 connexions per comunicar-se amb l'exterior i una sèrie d'entrades corresponents als principals paràmetres característics de la cèl.lula solar.

A la figura 3, Sortida + i sortida -, són connexions de sortida i representen unitats de V, mentre que perfil de irradiància és una connexió d'entrada i representa unitats de W/m^2 .

Si ens fem dins d'aquesta caixa negra representada a la figura 3 veurem el circuit que cal implementar i la numeració dels seus nodes, l'esquema que representa aquest circuit es pot veure a la figura 4.

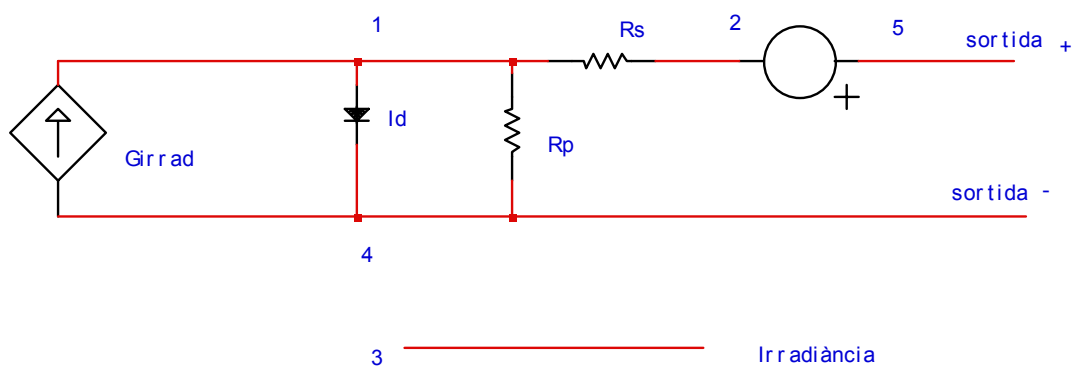


Figura 4. Estructura interna del subcircuit.

Pspice incorpora models elèctrics per poder representar les resistències, la font de corrent controlada, la font de tensió independent i el diode. La font de tensió s'ha inclòs en el model per mesurar el corrent que circula per la connexió sortida +. Aquesta font l'anomenarem Vcorrent.

El fitxer d'entrada a Pspice que es correspon amb el subcircuit de la figura 4, pot ser aquest :

- * subcircuit cell
- * connexions
- * node 5 : sortida + (V)
- * node 2 : sortida - (V)
- * node 3 : irradiància (W/m^2)

* Definició de paràmetres

* constant de Boltzman

.param k=1.38e-23

* càrrega de l'electró

.param q=1.6 e-19

*definició del subcircuit

.subckt cell 5 4 3 2 PARAMS : Area=1, Jsc=1, Voc=1, Rs=1, Rp=1, nd=1

girrad 4 1 value= (Jsc/1000*v(3)*Area)

rs 1 2 {Rs}

rp 1 4 {Rp}

d1 1 4 diode

.model diode d(is={ (Jsc*area)/(exp(Voc*q/(nd*k*300))-1)})

vcorrent 2 5 dc 0

virrad 3 4 dc 1000

.ends cell

IV. Comprovació del model per la cèl.lula solar

Amb el disseny del subcircuit de la figura 4 podem realitzar una sèrie de comprovacions per analitzar el comportament del model al variar els valors dels principals paràmetres que incorpora i observar els valors de tensions i corrents en els diferents nodes del circuit.

Per veure la característica corrent-tensió de la cèl.lula solar podem afegir al fitxer d'entrada Pspice una font de tensió que ens permeti fer un escombrat en tensió i mesurar el corrent. Per fer-ho cal afegir al fitxer anterior el següent :

* primera simulació

.temp=27

xcell 1 0 2 3 cell params: Area=25, Rs=42m, Rp=50, nd=1, Jsc=0.02, Voc=0.6

vpolarització 1 0 dc 0

Ri 2 0 1000000

.plot dc i(vpolarització)

.probe

.dc vpolarització -0.5 1 0.01

.end

Es demana :

(1) Editar el fitxer " primera simulació " amb el model de subcircuit per la cèl.lula solar, verificar els errors amb **F6**. Si no hi ha errors anar a **Analysis** (barra de menu) i executar l'opció **Run Probe** , després de la simulació triar l'opció d'entorn **gràficAdd-trace** , amb **F4** podeu triar la variable a representar. Representar la variable i (vpolarització), aquesta és la característica I(V) de la cèl.lula solar.

(2) Donar el valor dels paràmetres més importants resultat de la simulació :

- característica I(V) de la cèl.lula
- Corrent de curtcircuit, Isc.
- Tensió de circuit obert, Voc.

(3) Representar la potència generada definida com $P = i(vpolarització) \cdot v(1)$ en funció de vpolarització, això ens permet buscar el punt de màxima potència, MPP, de

coordenades (V_m , I_m). Per obtenir I_m cal veure el seu valor a la característica $I(V)$ de la cèl.lula en el punt de tensió V_m .

(4) Conegut el MPP, calcular el factor de forma, FF, del dispositiu, equació 3.

(5) Calcular el rendiment de conversió, η , definit com :

$$\eta = \frac{P_m}{P_t} = \frac{V_m I_m}{A P_{in}} = \frac{V_{oc} I_{sc}}{A P_{in}} FF \quad (1)$$

amb A l'àrea de la cèl.lula solar i P_{in} la densitat de potència de llum incident (W/m^2).

IV.1 Comportament del dispositiu variant la irradiància.

El corrent de curtcircuit és practicament proporcional a la irradiància, variacions en aquest paràmetre han de traduir-se en variacions equivalents a I_{sc} , mentre que la variació de V_{oc} és logarítmica, com podem veure tot seguit a l'equació 2.

$$V_{oc} = n V_t \ln\left(1 + \frac{I_l}{I_0}\right) \quad (2)$$

Es demana :

Fer simulacions amb el model de la cèl.lula solar presentat avanç amb diferents valors de la irradiància : 1500 W/m^2 , 700 W/m^2 i 250 W/m^2 .

Podeu fer això amb una única simulació, cal definir un paràmetre (IRRAD) per simular

la irradiància. Podeu fer aquestes modificacions en el fitxer anterior d'entrada a Pspice :

* subcircuit cell

params : IRRAD=1

Virrad 3 4 dc {IRRAD}

* simulacio de tot el circuit

.param IR=1

xcell 1 0 2 3 cell params: IRRAD={IR} (*i la resta de paràmetres*)

.step param IR list 1500 700 250

Per cada una de les simulacions realitzades amb diferent valor del paràmetre irradiància donar els valors obtinguts de :

Irradiància (W/m2)	1500	700	250
Isc			
Voc			

IV.2 Comportament de la cèl.lula solar al variar el factor n d'idealitat del diode.

El corrent de curtcircuit és practicament independent del valor n, factor d'idealitat del diode, mentre que la tensió de circuit obert és proporcional a aquest paràmetre (veure equació 2).

Es demana :

Realitzar simulacions amb el model de la cèl.lula solar presentat avanç amb diferents valors del factor d'idealitat del diode : 1, 1.2 i 1.5.

Agafar una irradiància de 1000 W/m² i omplir la taula següent amb els resultats obtinguts.

n	1	1.2	1.50
Isc			
Voc			

IV.3 Comportament de la cèl.lula solar en funció de la variació de la resistència sèrie Rs.

Per valors elevats de R_p, la tensió de circuit obert és independent de R_s, mentre que el corrent de curtcircuit disminueix a mesura que aquesta es fa gran. L'efecte més significatiu és la degradació del factor de forma, FF, encara que la variació del corrent de curtcircuit, I_{sc}, sigui petita. Per calcular el FF cal fer-ho així :

$$FF = \frac{I_m V_m}{I_{sc} V_{oc}} \quad (3)$$

En aquesta equació (I_m,V_m) són les coordenades del MPP. El factor de forma és un paràmetre adimensional, i ens dona una idea de la relació que hi ha entre la potència màxima donada per la cèl.lula i la que generaria una hipotètica cèl.lula solar amb una característica I(V) en forma de rectangle de costats I_{sc} i V_{oc}.

Es demana :

Realitzar simulacions amb el model de la cèl.lula solar que s'ha presentat avanç per diferents valors de R_s : $1\text{m}\Omega$, 0.3Ω i 2Ω . Agafar una valor constant per la irradiància (1000 W/m^2) i un valor del factor d'idealitat del diode $n = 1$. Per calcular el punt de màxima potència podeu seguir el procediment que apareix en el llibre " Energia Solar Fotovoltaica" d'en Lluís Castañer (pàgina 48). Per cada simulació donar els valors obtinguts d'aquests paràmetres :

R_s	0.3Ω	1Ω	2Ω
Isc			
Voc			
FF			

IV.4 Comportament de la cèl.lula solar al variar el valor de la resistència paral.lel R_p .

La variació de R_p afectarà també al valor del factor de forma, en aquest cas la tensió de circuit obert és molt sensible a les variacions d'aquesta resistència. Per valors petits de R_s , el corrent de curtcircuit és independent de la variació de R_p .

Es demana :

Realitzar simulacions amb el model de la cèl.lula solar per diferents valors de R_p , $R_p = 800\Omega$, 50Ω i 10Ω .

Suposar una irradiància de 1000 W/m² i $R_s = 42 \text{ m}\Omega$, amb el mateix factor $n = 1$.

A partir de les simulacions realitzades donar els valors obtinguts d'aquests paràmetres :

Rp	10 Ω	50 Ω	800 Ω
Isc			
Voc			
FF			

IV.5 Comportament de la cèl.lula solar al variar la temperatura.

Per simular les variacions de temperatura pot fer-se el mateix que en el cas de la irradiància, podem introduir el perfil de temperatura en el model de la cèl.lula solar per una connexió d'entrada de manera que la tensió d'aquest node d'entrada al sistema represente el perfil de temperatura desitjat.

Els paràmetres que podem escollir són els mateixos que en el model anterior, i cal afegir aquests altres :

- Ego Energia del gap a $T = 0^\circ \text{C}$ del semiconductor que constitueix la cèl.lula solar (eV)
- agap Paràmetre que relaciona $E_g(T)$ amb Ego (eV/ $^\circ\text{K}$)
- bgap També relaciona $E_g(T)$ amb Ego ($^\circ\text{K}$)
- Coef_Jsc Coeficient de temperatura de Jsc (A/ $^\circ\text{K cm}^2$)

Tots ells són necessaris per incloure els efectes de la temperatura en el model. D'aquesta forma la caixa negra de la figura 3 que representa el circuit ens quedarà com apareix a la figura 5.

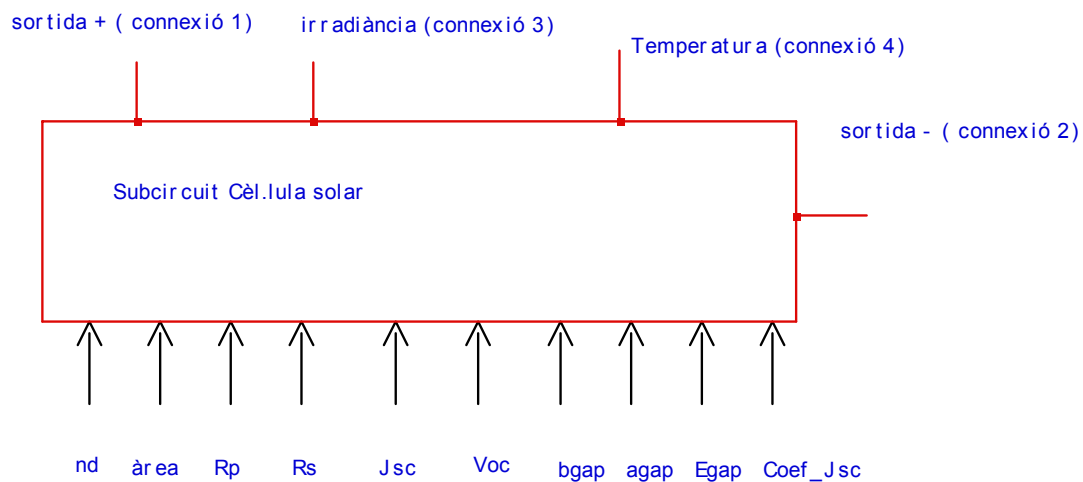


Figura 5. Connexions i paràmetres d'entrada al subcircuit de cèl·lula solar amb efectes de temperatura

En aquest cas les sortides : ' sortida +' i ' sortida -' són connexions de sortida i representen unitats de volts, mentre que perfil de irradiància i perfil de temperatura són connexions d'entrada i representen unitats de W/m² i °C respectivament.

Per modelar el diode del circuit de la figura 4 incorporant les variacions degudes a la temperatura no podem utilitzar les llibreries de Pspice. Cal simular la seva característica I(V) utilitzant una estratègia diferent. Les variacions degudes a la temperatura afecten als següents paràmetres :

$$I_d = I_o \left[\exp\left(\frac{V}{nV_t}\right) - 1 \right] = I_o \left[\exp\left[\frac{V}{n \frac{KT}{q}} \right] - 1 \right] \quad (4)$$

$$I_o = A_o T^3 \exp\left(\frac{-E_g(T)q}{KT}\right) \quad (5)$$

$$E_g(T) = E_{go} - \frac{a_{gap} T^2}{T + b_{gap}} \quad (6)$$

Amb $E_{go} = E_g(T=0^\circ\text{C})$, a_{gap} i b_{gap} són constants conegudes per a cada tipus de material emprat en la construcció de la cèl.lula. El valor de la constant A_o pot calcular-se a partir de $I_o(T=300^\circ\text{C})$, a partir dels paràmetres d'entrada J_{sc} , V_{oc} , n i àrea de la cèl.lula.

Pot simular-se I_o com la tensió en un node per donar-li caràcter variable durant la simulació, la seva expressió és aquesta :

$$I_o = \frac{J_{sc} A_{area}}{\exp\left(\frac{qV_{oc}}{nK300}\right) - 1} \quad (7)$$

$$A_o = \frac{I_o}{300^3 \exp\left[-q \frac{\left(E_{go} - \frac{a_{gap} 300^2}{300 + b_{gap}}\right)}{K300}\right]} \quad (8)$$

La variació de la tensió v_d , del diode, amb la temperatura també cal tenir-la present. Per incloure-la en el nostre model podem afegir una font de corrent controlada per tensió com es pot veure a la figura 6.

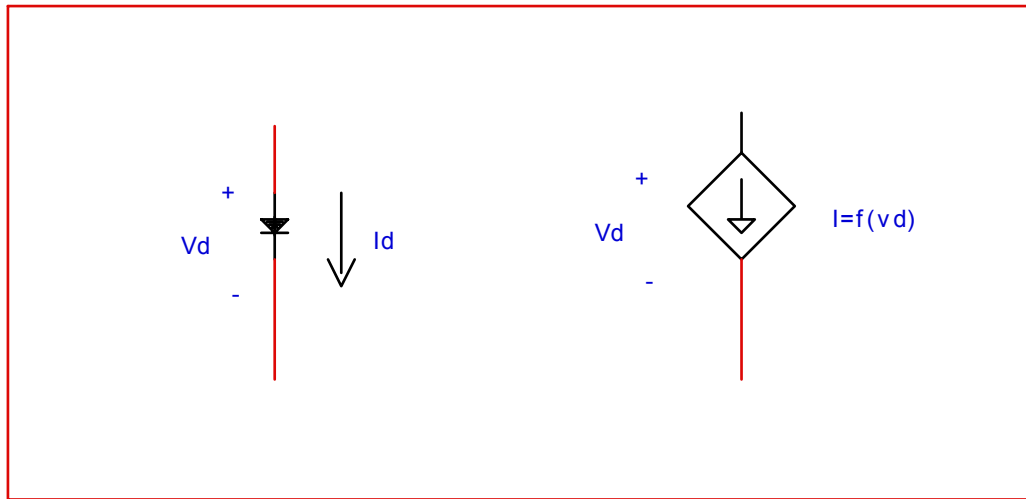


Figura 6. Model del diode com una font de corrent controlada.

Pel que fa al corrent fotogenerat, en aquest cas l'efecte de la temperatura es pot simular afegint un coeficient de temperatura (a escollir per l'usuari) a l'expressió de la font de corrent controlada equivalent. D'aquesta forma el subcircuit de la cèl.lula solar amb els efectes tèrmics que hem comentat és el següent :

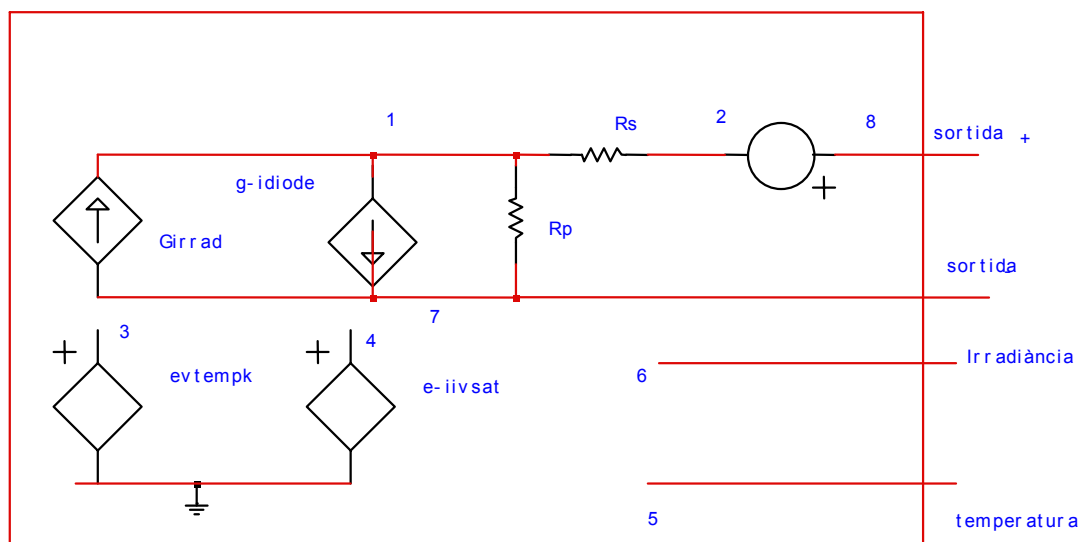


Figura 7. Estructura interna del subcircuit amb efectes de temperatura

Els nous paràmetres que apareixen al circuit de la figura 7 són :

- g-idiode: font de corrent controlada que simula el corrent fotogenerat.
- evtempk: font de tensió controlada que transforma el perfil de temperatura en °C en el mateix perfil en °K.
- e-iinvsat : font de tensió controlada que simula el corrent invers de saturació Io.
- g-irrad : font de corrent controlada per la temperatura i el perfil d'irradiància.

Els valors d'aquests paràmetres són :

$$g - \text{idiode} = V(4) \exp \left[\frac{V(1) - V(7)}{n \frac{KV(3)}{q}} \right] - 1 \quad (9)$$

$$\text{evtempk} = 273 + V(5) \quad (10)$$

$$e - \text{iinvsat} = V(4) = \frac{A_0 V(3)^3}{\exp \left[-q \frac{\left(E_{go} - \frac{a_{gap} 300^2}{300 + b_{gap}} \right)}{k 300} \right]} \quad (11)$$

$$g_{\text{irrad}} = (J_{sc}/1000) \text{ Area Irradiància} + \text{Coef_Jsc Temperatura Area} \quad (12)$$

Es demana :

Escriure el fitxer corresponent al model de la cèl.lula solar que s'ha presentat a la figura 7, és aconsellable col·locar una resistència de valor elevat en paral·lel amb les fonts controlades, per no deixar nodes sense connexió dins el circuit.

Podeu agafar els valors següents pels paràmetres de les equacions (9)-(12) :

Ego= 1.16 eV, agap=7e-4 (eV/°K), bgap=1100 (°K), Ao=9 , Coef_Jsc=30e-6 (A/°Kcm²)

Realitzar simulacions amb valors constants per la temperatura i omplir la taula següent amb els resultats obtinguts :

Temperatura (°C)	-20	10	40
Isc			
Voc			
FF			

Donar el fitxer d'entrada a Pspice corresponent al model de cèl.lula solar que inclou els efectes de la temperatura utilitzat en les simulacions.
