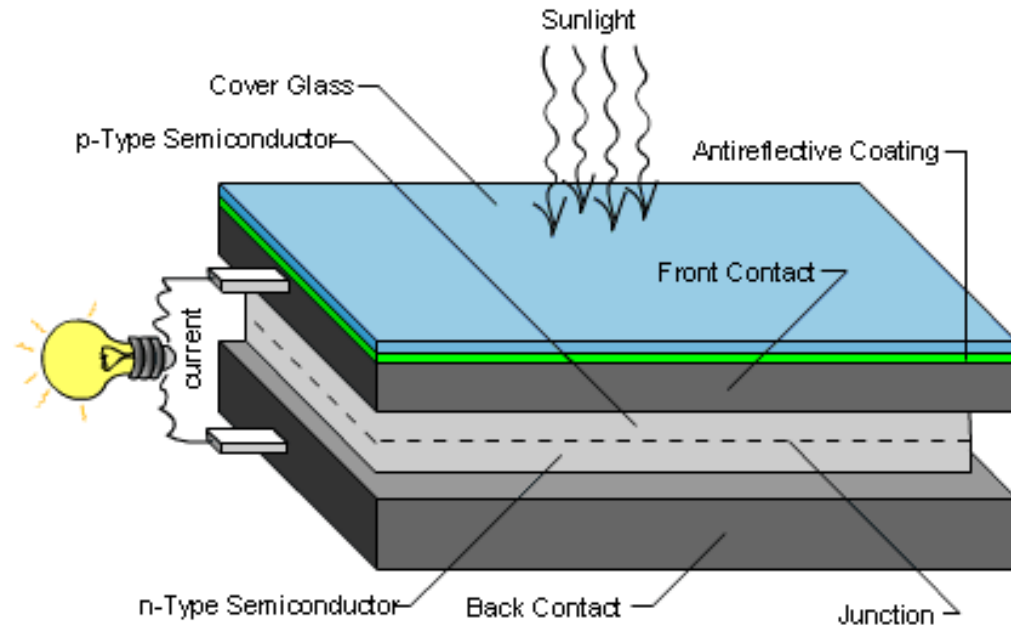


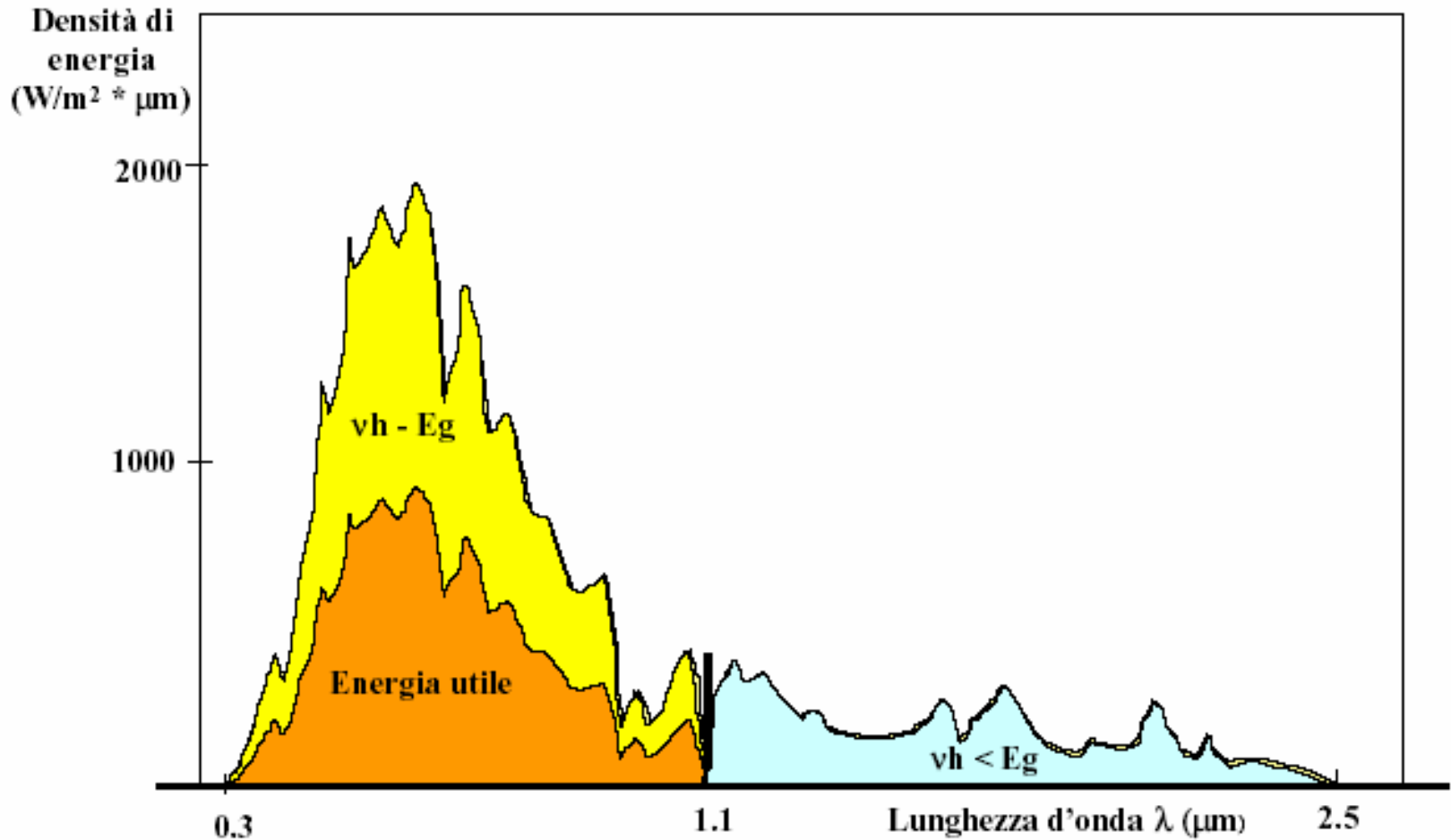
Modello di celle fotovoltaiche



Principio di funzionamento

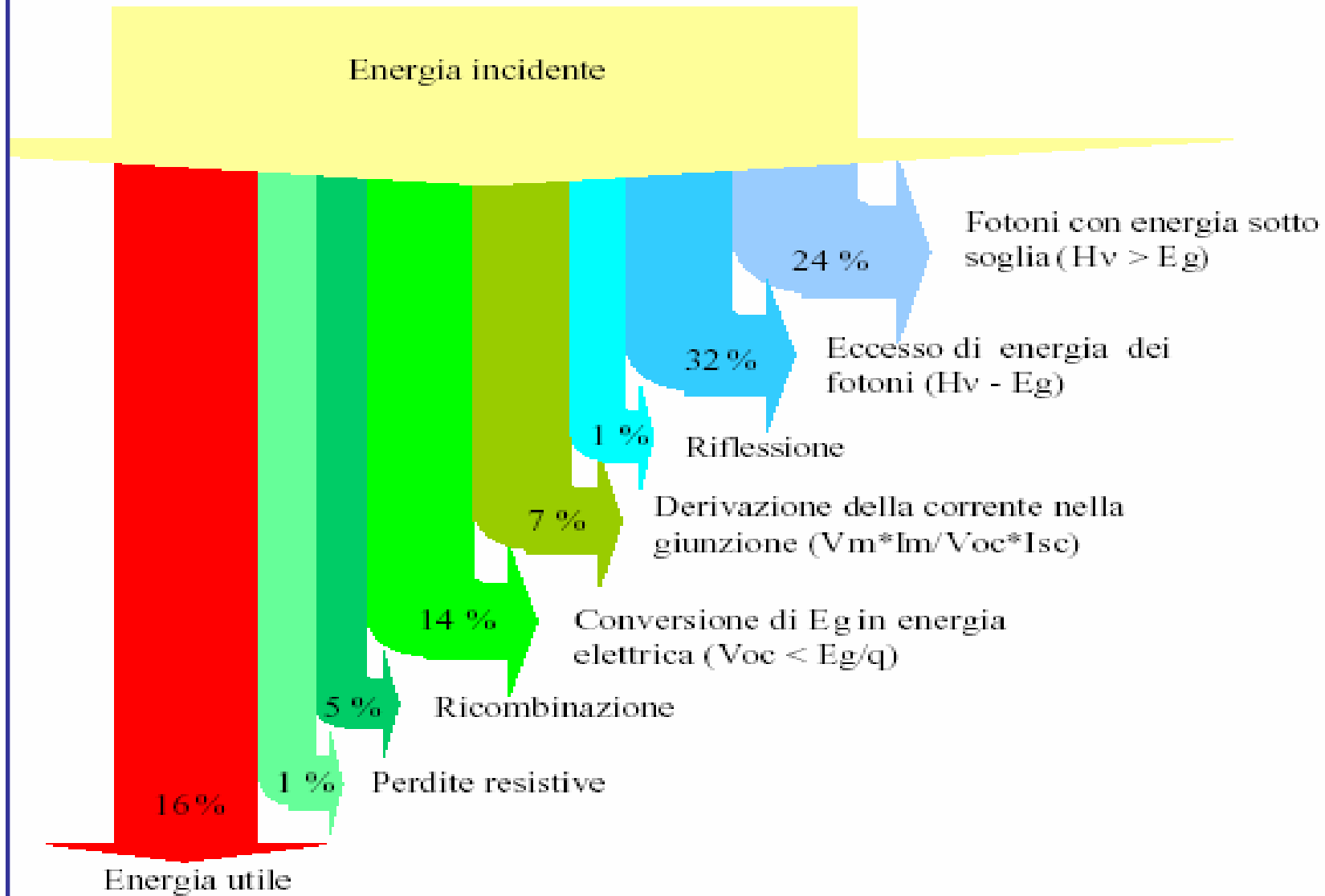


SPETTRO DELLA RADIAZIONE SOLARE



L'EFFICIENZA DELLA CELLA

Efficienza



Rendimento

L'efficienza di conversione di celle commerciali al silicio monocristallino è in genere compresa tra il 10% e il 14%, mentre realizzazioni speciali hanno raggiunto valori del 23%.

Massima efficienza raggiungibile

20% per il silicio monocristallino

17% per il silicio policristallino

10% per il silicio amorfo (che fa parte della tecnologia delle thin film cells o celle a film sottile).



Definizione

- La potenza massima erogabile in condizioni di illuminazione e temperatura specificate viene misurata in **Watt di picco (Wp)**
- Alla temperatura della giunzione di 25 °C e con un irraggiamento di 1000 W/m² (Condizioni Standard di Test **STC**), una cella ha una potenza nominale di 1 Wp se eroga la potenza massima di 1W.



Campo fotovoltaico



Un **Modulo Fotovoltaico** commerciale è costituito da 18-36 celle, disposte su 2-4 file parallele e collegate in serie tra loro per una potenza di 50-150 Wp

I moduli collegati in serie formano una **"stringa"**



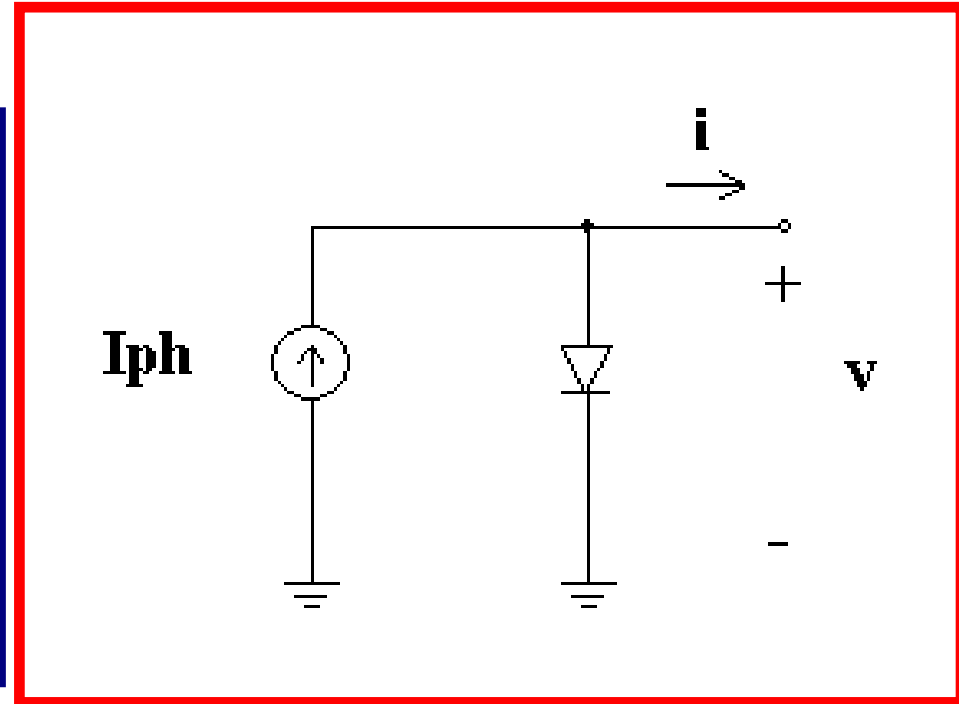
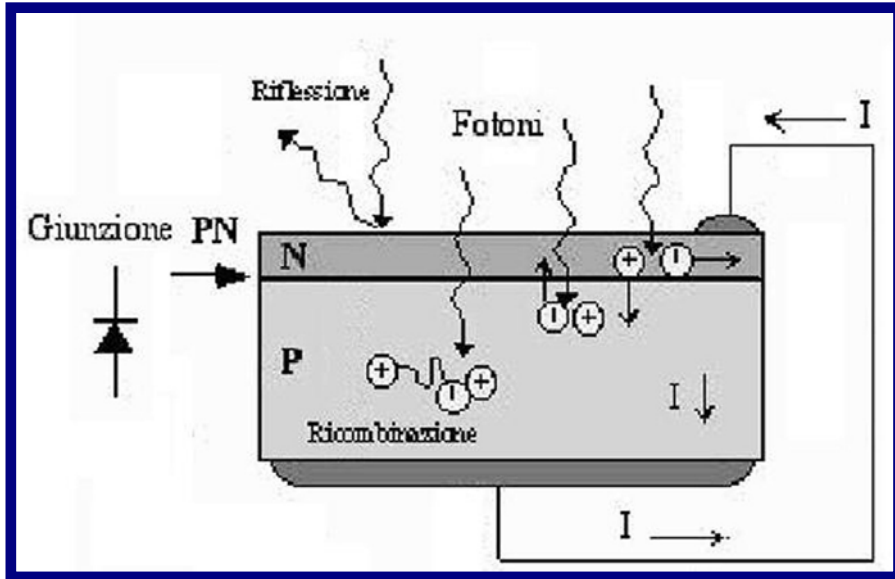
Il campo

Il collegamento parallelo di stringhe determina la corrente di lavoro.

Collegando in serie/parallelo un insieme di moduli si ottiene un **Campo Fotovoltaico (FV)** con le caratteristiche desiderate di corrente e tensione.



Modello IDEALE Cella Fotovoltaica



$$i(v) = I_{ph} - I_s \cdot \left(e^{\frac{q}{kT} \cdot v} - 1 \right)$$

La corrente fotoindotta

La corrente fotoindotta (light-induced current) è dovuta alla separazione ed allo spostamento (drift) della coppia elettrone-lacuna generata a causa dei fotoni sotto l'azione del campo.

Tale corrente è proporzionale al livello di soleggiamento.

$$I_{ph} = SA\bar{R}$$

$$\bar{R} = \frac{\int_{\lambda(E_g)} R(\lambda) \cdot E(\lambda) d\lambda}{\int_0^{\infty} E(\lambda) d\lambda}$$

A area singola cella [m²]

R spectral dependent responsivity [A/W]

S soleggiamento incidente [W/ m²]

solar irradiance
spectral distribution
function

wavelength corresponding to the band gap.



La corrente fotoindotta

La responsivity dipende dal materiale semiconduttore, ma anche dalle condizioni ambientali, in quanto la distribuzione della lunghezza d'onda della radiazione incidente cambia al passaggio dei raggi solari nell'atmosfera.

In realtà, al termine suddetto, andrebbe aggiunta una aliquota dovuta alla variazione di temperatura.

Il "band gap" si riduce a temperature elevate e ciò aumenta il numero di fotoni che generano coppie elettrone-lacuna. Nel contempo, l'elevata temperatura riduce la "diffusion length" ed il tempo di vita dei portatori, incrementando le perdite per ricombinazione.

L'effetto netto è che la corrente fotoindotta cresce solo debolmente ad alte temperature.



La corrente fotoindotta

$$I_{\text{ph}} = f(S, T, P) = \bar{R} \cdot A \cdot S + C \cdot (T - T_0) \cdot \frac{S}{S_0}$$

C =coefficiente di temperatura (0.0017A/K per celle al silicio)

S_0 =soleggiamento alla temperatura di riferimento T_0



Il diodo

Il diodo rappresenta la giunzione p-n della cella solare. In condizioni normali il potenziale è positivo, così che la corrente fotoindotta produce una potenza netta positiva. Il è polarizzato direttamente, ma conduce una corrente debole.

Fisicamente, la corrente di diodo è dovuta alla diffusione di portatori minoritari nella regione di svuotamento, che rappresenta un aggregato di coppie lacuna-elettrone dovute alla diffusione.

$$I_d = I_{\text{sat},d} \left(e^{\frac{V_d}{V_{t,d}}} - 1 \right)$$



Il diodo

$$I_d = I_{\text{sat},d} \left(e^{\frac{V_d}{V_{t,d}}} - 1 \right) \quad V_{t,d} = \frac{\gamma k T}{e}$$

$$I_{\text{sat},d} = I_{\text{sat},0} \left(\frac{T}{T_0} \right)^3 e^{\left[\frac{e}{\gamma k} \left(\frac{E_g(T_0)}{T_0} - \frac{E_g(T)}{T} \right) \right]}$$

e = carica dell'elettrone

γ = fattore di idealità del diodo

k = costante di Boltzmann

E_g = band gap in eV

T_0 = temperatura di riferimento per $I_{\text{sat},0}$, $E_g(T_0)$



La temperatura

$$T = T_a + \frac{(1 - \rho - \tau) \cdot S}{h} - \frac{V \cdot I}{A \cdot h}$$

A area singola cella [m^2]

ρ coefficiente di riflessione

τ coefficiente di trasmissione

V tensione ai morsetti della cella [V]

I corrente ai morsetti della cella [A]

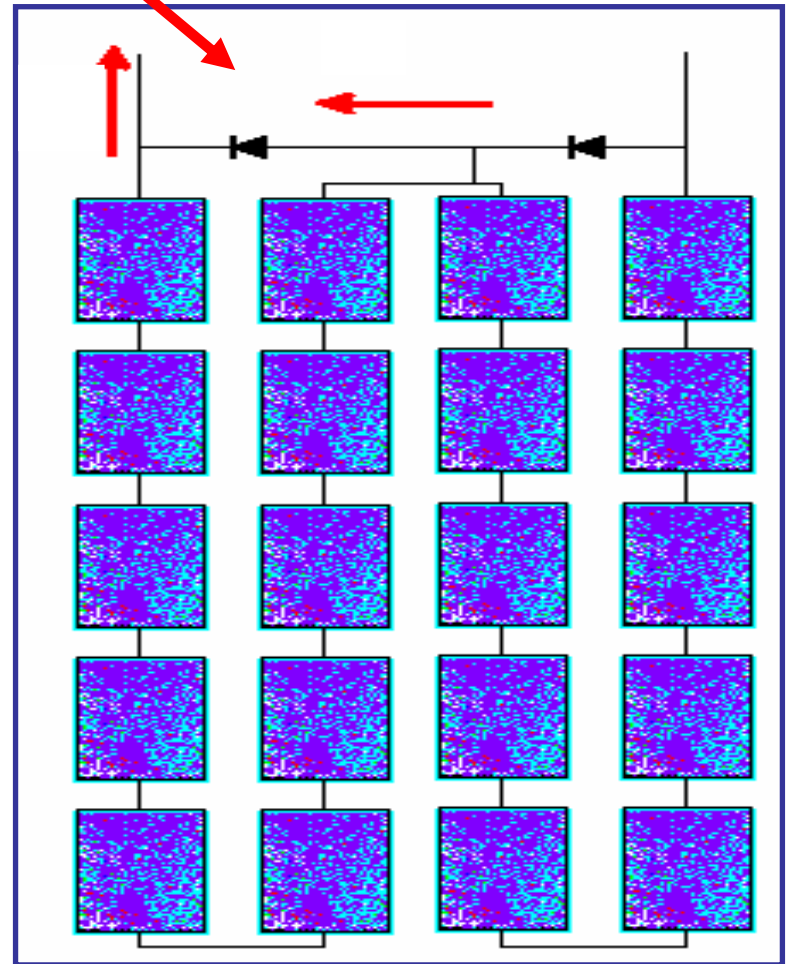
S soleggiamento incidente [W/m^2]

T_a temperatura ambiente [K°]

h resistenza termica [$W/(K^\circ m^2)$]



Diodi di By-pass



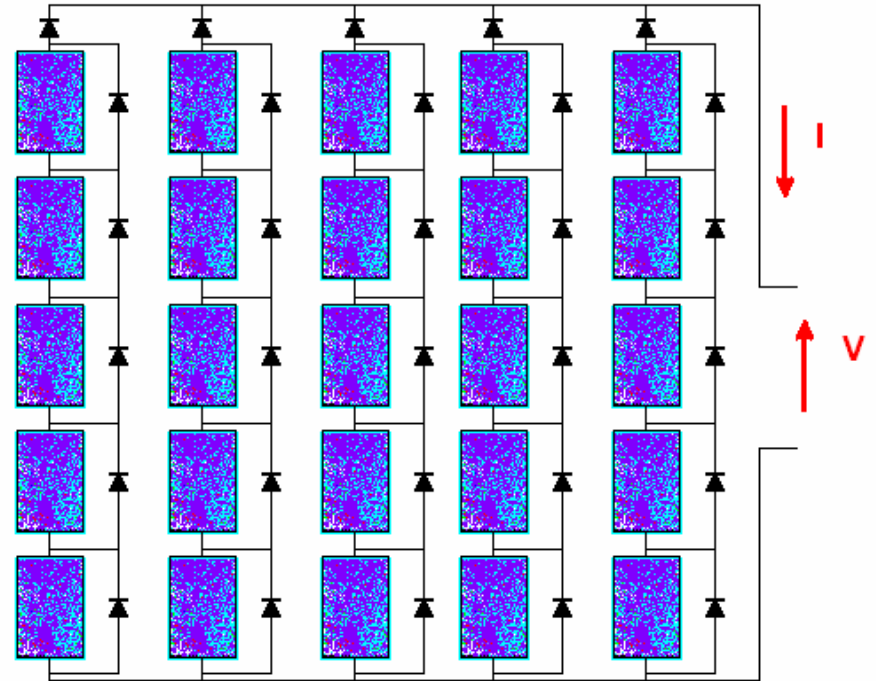
Caratterizzazione del Campo Fotovoltaico in condizioni di soleggiamento e temperatura uniformi

$$I_{ph_{eq}} = N_p \cdot I_{ph}$$

$$I_{sat_{eq}} = N_p \cdot I_{sat}$$

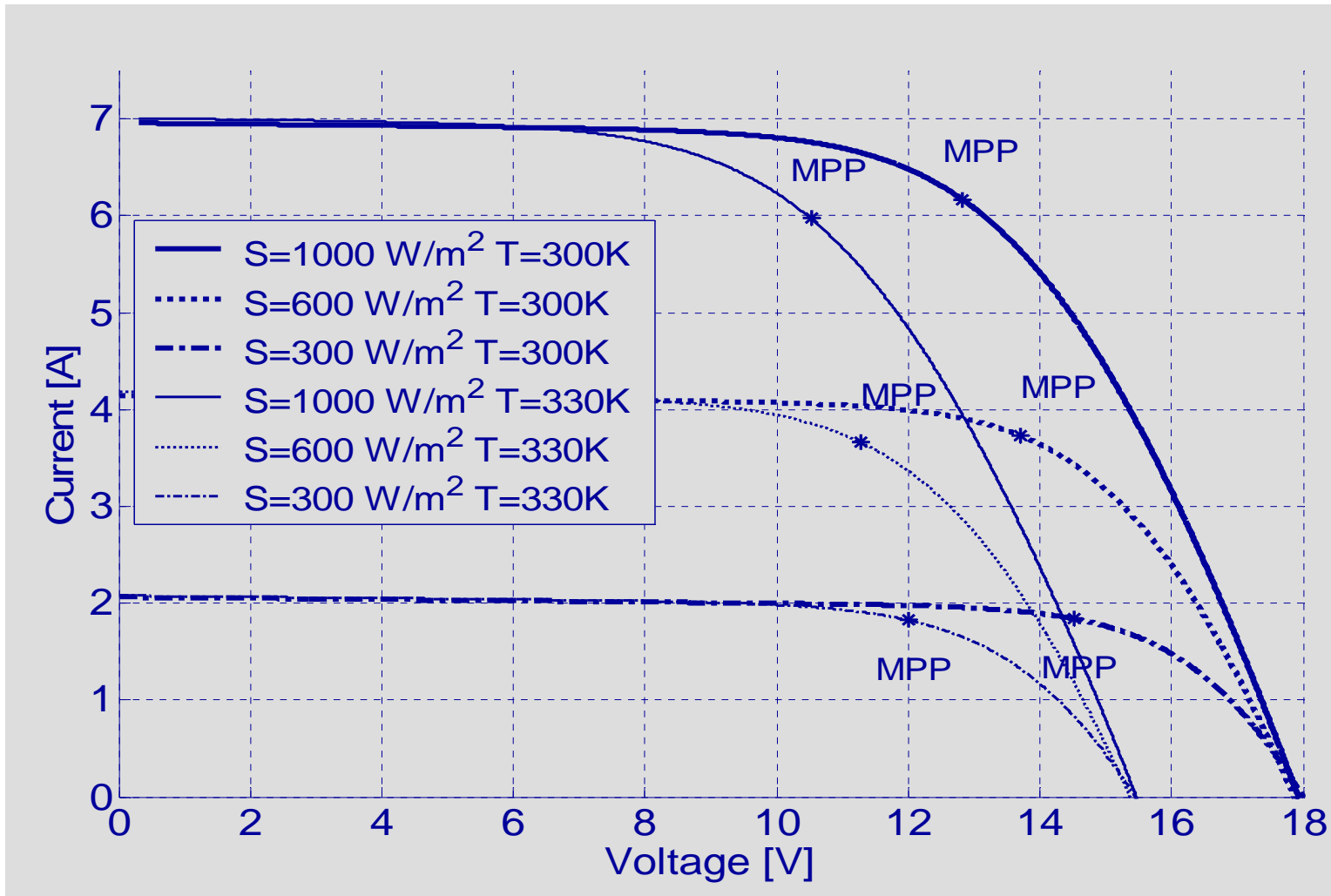
$$R_{s_{eq}} = \frac{N_s}{N_p} \cdot R_s \quad R_{p_{eq}} = \frac{N_s}{N_p} \cdot R_p$$

$$V_{T_{eq}} = N_s \cdot V_T = N_s \frac{k \cdot T}{q}$$

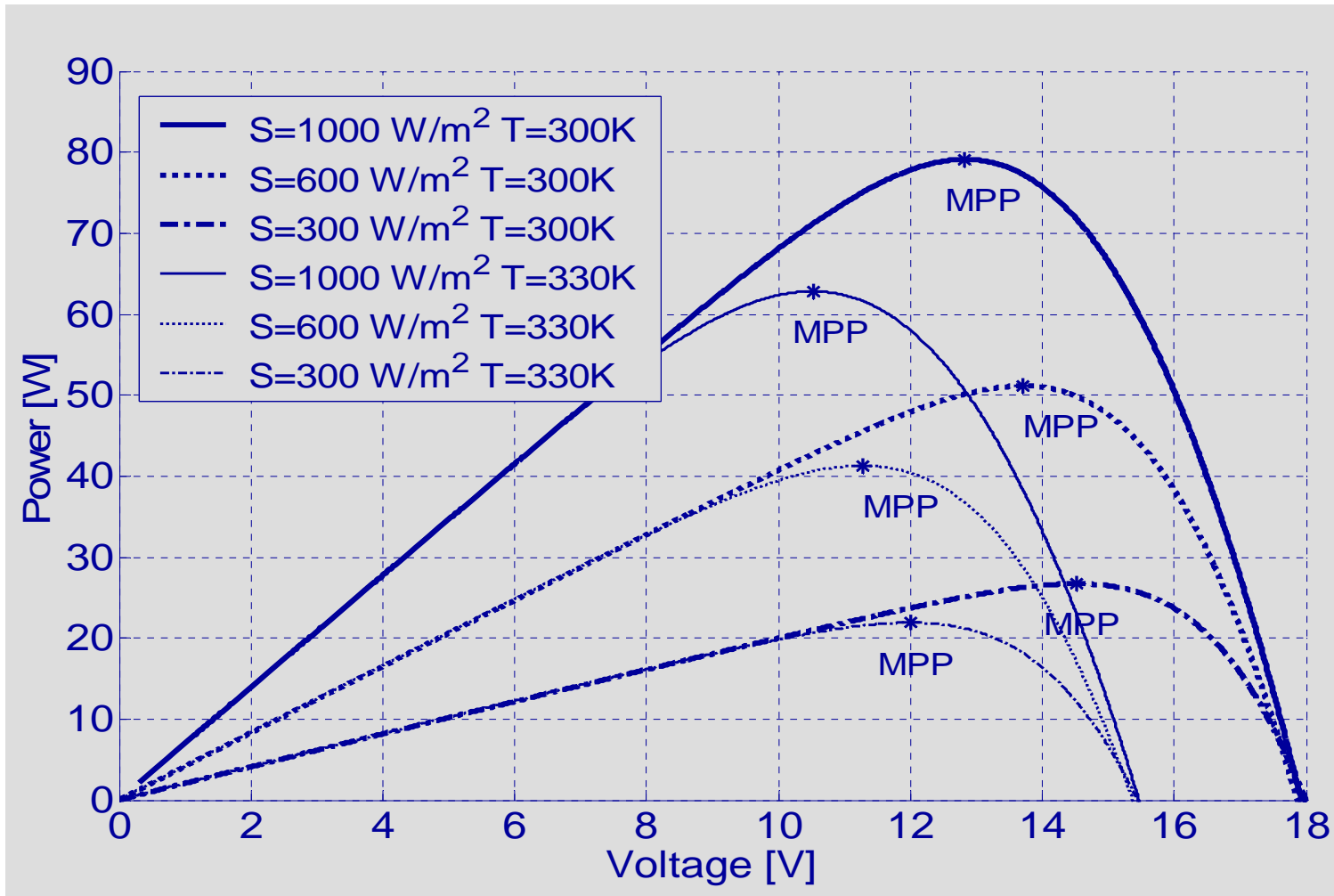


$$I = I_{ph_{eq}} - I_{sat_{eq}} \cdot \left(e^{\frac{V + R_{s_{eq}} \cdot I}{\eta \cdot V_{T_{eq}}}} - 1 \right) - \frac{V + R_{s_{eq}} \cdot I}{R_{p_{eq}}}$$

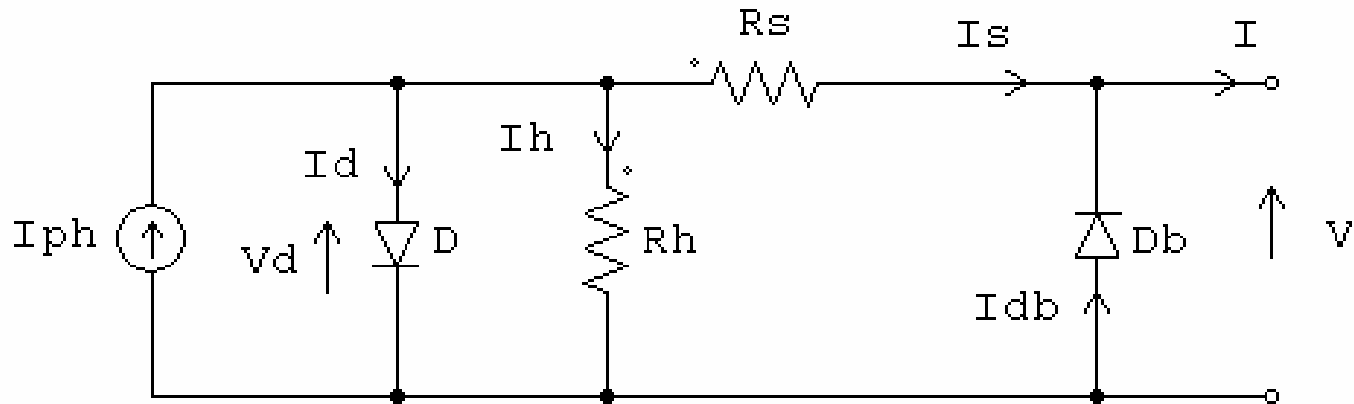
Caratteristica Tensione-Corrente Modulo Fotovoltaico



Caratteristica Tensione-Potenza Modulo Fotovoltaico

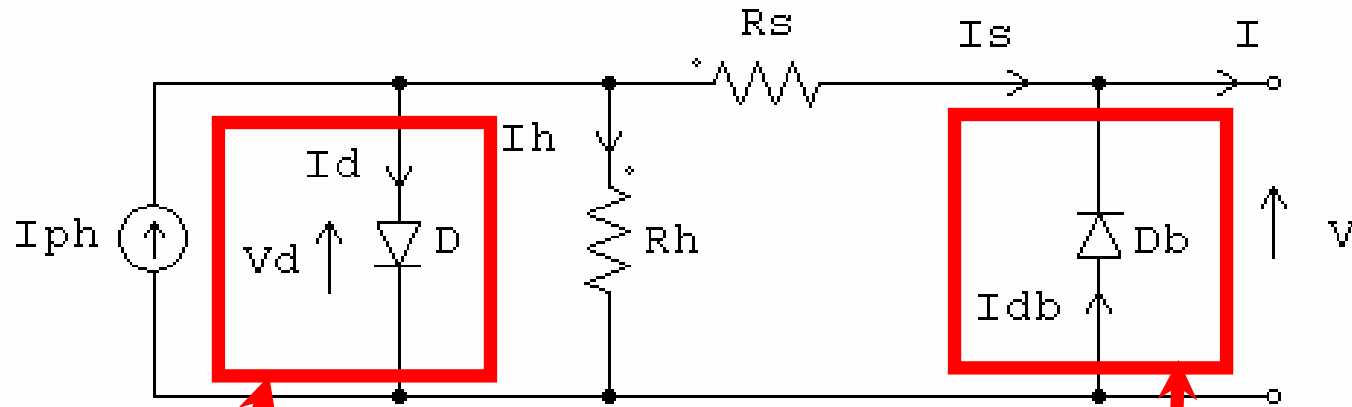


Modello completo



I_{ph} = generatore che rappresenta la fonte solare
 R_s, R_h = resistenza serie e resistenza parallelo
 D_b = diodo di bypass

Il modello completo

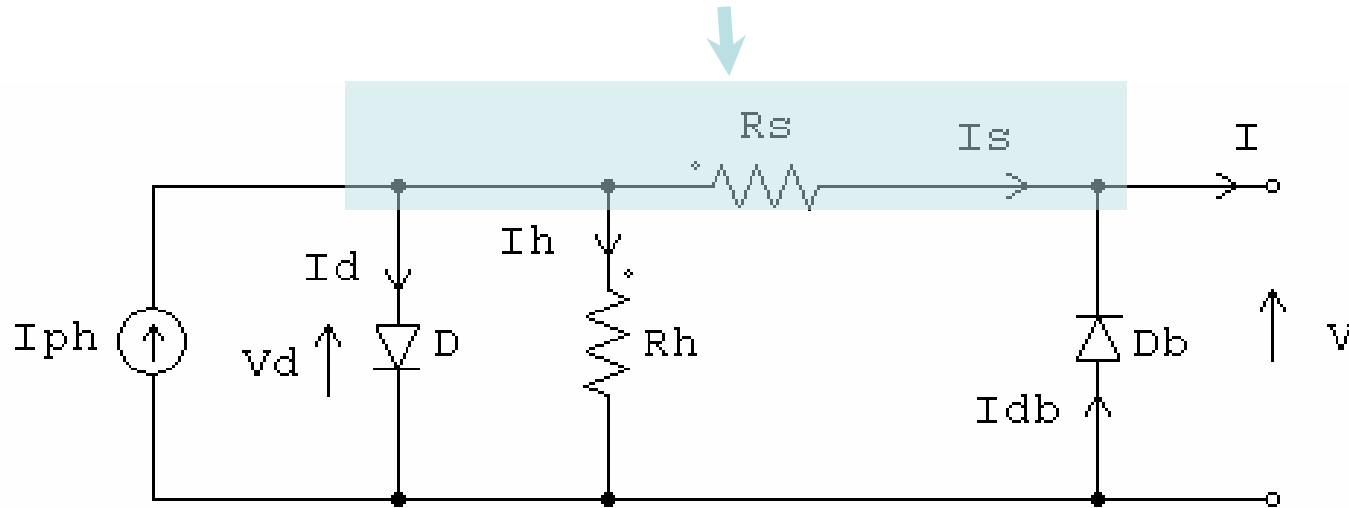


$$I_d = I_{sat,d} \left(e^{\frac{V_d}{V_{t,d}}} - 1 \right)$$

$$I_{db} = I_{sat,db} \left(e^{-\frac{v}{V_{t,db}}} - 1 \right)$$

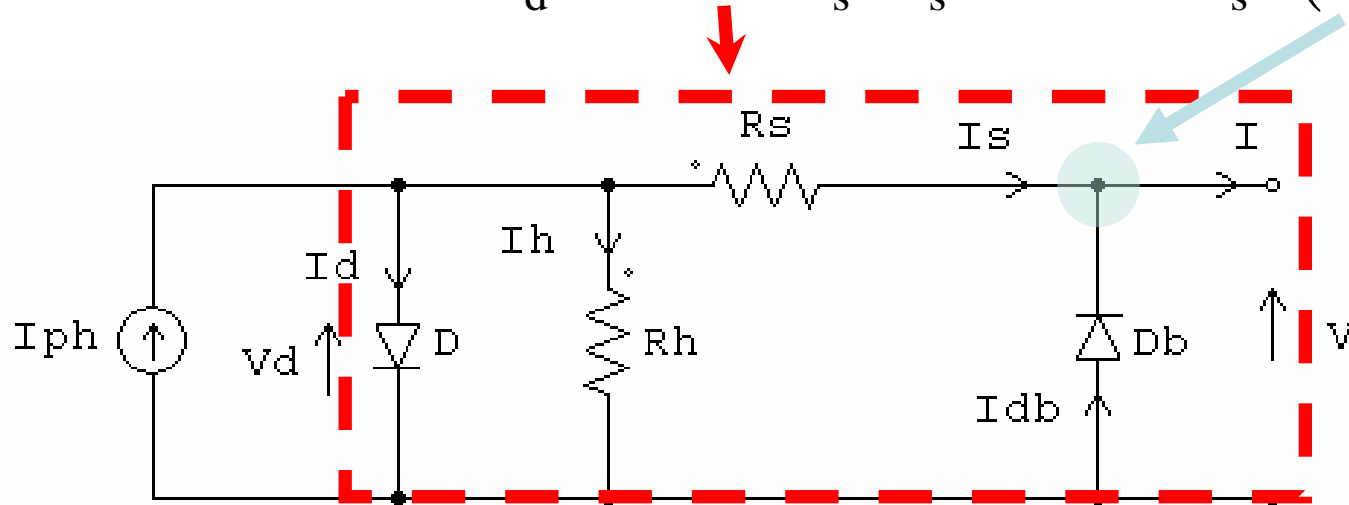
Il modello completo

$$I = I_{db} + I_{ph} - I_d - I_h$$

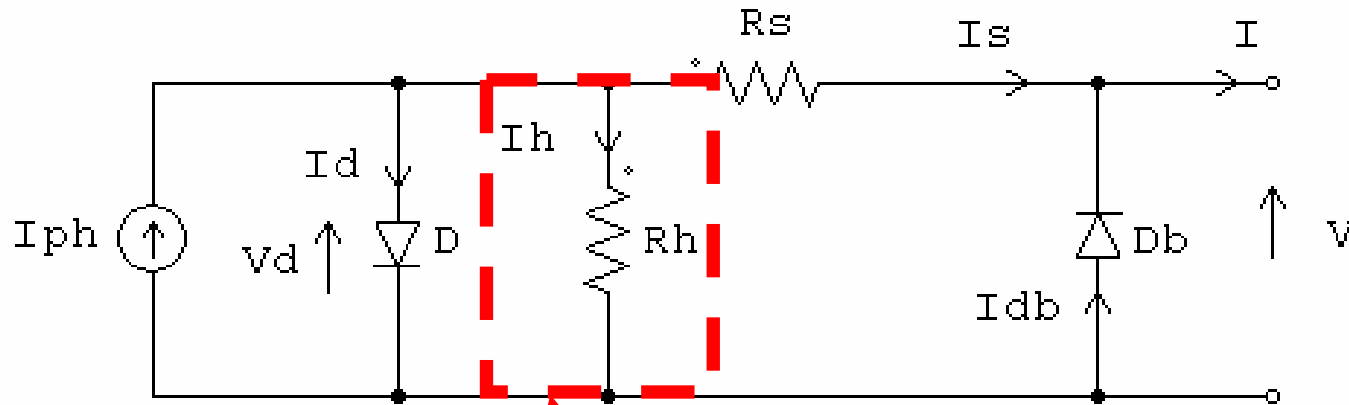


Il modello completo

$$V_d = V + R_s \cdot I_s = V + R_s \cdot (I - I_{db})$$



Il modello completo



$$I_h = \frac{V_d}{R_h} = \frac{V + R_s \cdot (I - I_{db})}{R_h}$$

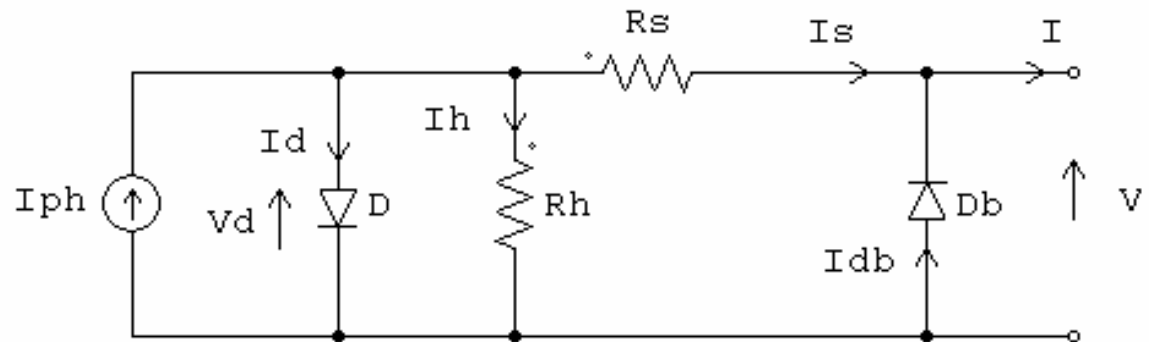
Il modello completo

$$I_d = I_{\text{sat},d} \left(e^{\frac{V_d}{V_{t,d}}} - 1 \right)$$

$$I_{\text{db}} = I_{\text{sat},\text{db}} \left(e^{-\frac{V}{V_{t,\text{db}}}} - 1 \right)$$

$$I = I_{\text{db}} + I_{\text{ph}} - I_d - I_h \quad V_d = V + R_s \cdot I_s = V + R_s \cdot (I - I_{\text{db}})$$

$$I_h = \frac{V_d}{R_h} = \frac{V + R_s \cdot (I - I_{\text{db}})}{R_h}$$



L'elaborazione simbolica

$$I = \frac{[R_h \cdot (I_{ph} + I_{sat,d}) - V]}{(R_h + R_s)} + I_{sat,db} \cdot \left(e^{-\frac{V}{V_{t,db}}} - 1 \right) - \frac{V_{t,d}}{R_s} \cdot \text{LambertW}(\theta)$$

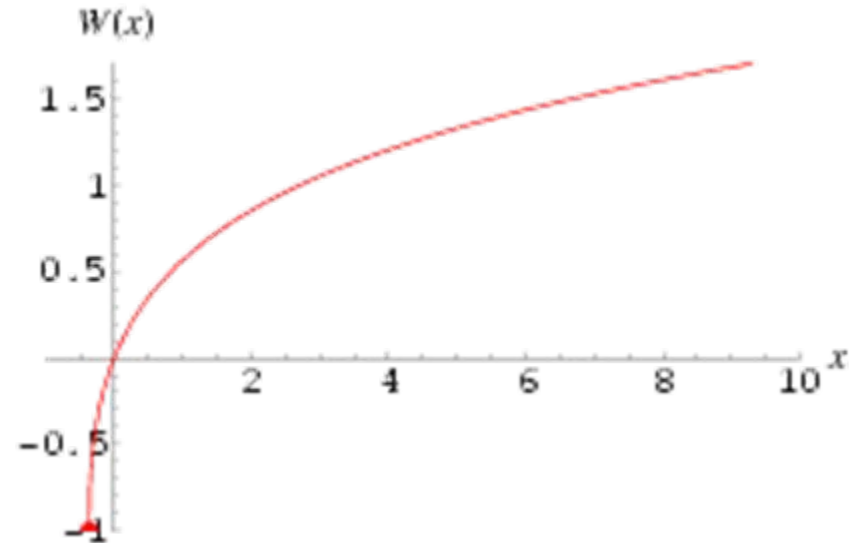
$$\theta = \frac{(R_h // R_s) \cdot I_{sat,d} \cdot e^{\left[\frac{R_h \cdot R_s \cdot (I_{ph} + I_{sat,d}) + R_h \cdot V}{V_{t,d} \cdot (R_h + R_s)} \right]}}{V_{t,d}}$$



La funzione LambertW

E' fornita direttamente
sia in Matlab che in
Mathematica

$$F(W)=W*\exp(W)$$



<http://mathworld.wolfram.com/LambertW-Function.html>

$$W(x) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^{n-1} x^{n-2}}{(n-1)!} x^n = x - x^2 + \frac{3}{2} x^3 - \frac{8}{3} x^4 + \frac{125}{24} x^5 - \frac{54}{5} x^6 + \frac{16807}{720} x^7 + \dots$$



Una importante proprietà

$$\frac{d}{d\theta} \text{LambertW}(\theta) = \frac{1}{[1 + \text{LambertW}(\theta)] \cdot e^{\text{LambertW}(\theta)}} = \frac{\text{LambertW}(\theta)}{[1 + \text{LambertW}(\theta)] \cdot \theta}$$

Questa proprietà permette di esprimere la conduttanza incrementale della sorgente fotovoltaica.



La conduttanza incrementale di pannello

$$\frac{dI}{dV} = -\frac{1}{(R_h + R_s)} - \frac{I_{\text{sat,db}}}{V_{t,\text{db}}} \cdot e^{-\frac{V}{V_{t,\text{db}}}} - \frac{R_h}{R_s \cdot (R_h + R_s)} \cdot \text{LambertW}(\theta)$$

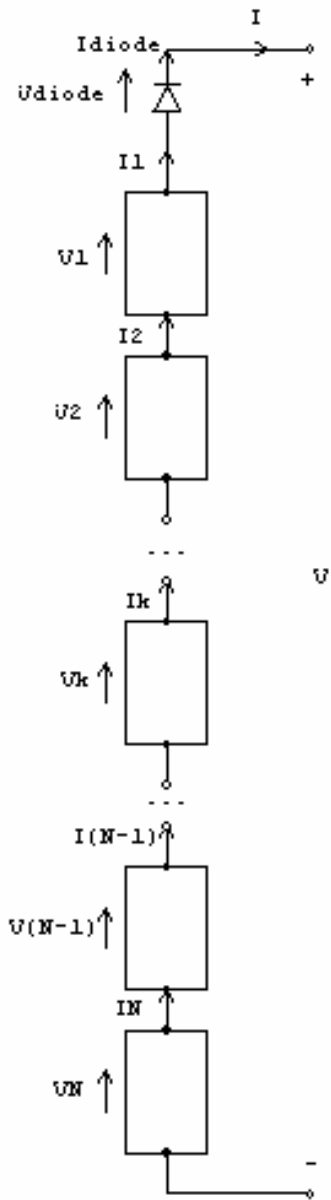
$$\theta = \frac{(R_h // R_s) \cdot I_{\text{sat,d}} \cdot e^{\left[\frac{R_h \cdot R_s \cdot (I_{\text{ph}} + I_{\text{sat,d}}) + R_h \cdot V}{V_{t,d} \cdot (R_h + R_s)} \right]}}{V_{t,d}}$$

La conduttanza incrementale è quindi solo funzione della tensione ai morsetti del generatore, ma non della corrente.



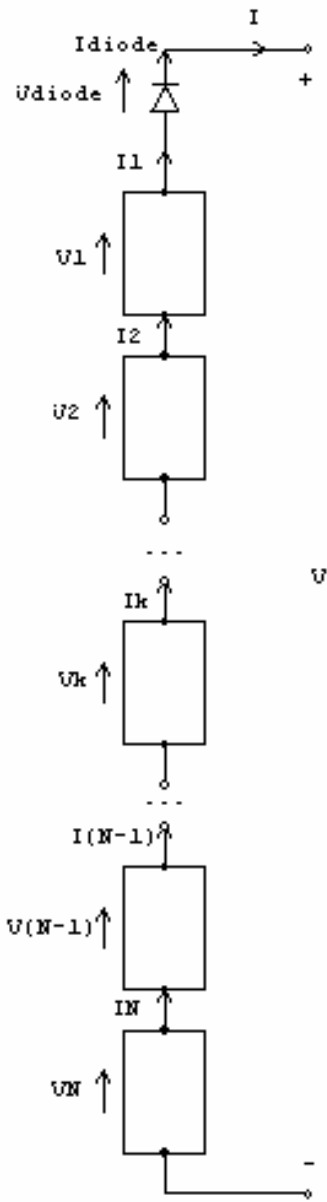
La stringa di pannelli

L'importanza del diodo di blocco ...



$$I_{diode} = I_{sat,diode} \left(e^{\frac{V_{diode}}{V_{t,diode}}} - 1 \right)$$





Il sistema di equazioni

$$\left\{ \begin{array}{l} V_1 + V_2 + \dots + V_k + \dots + V_{N-1} + V_N + V_{diode} - V = 0 \\ I_1(V_1) - I_2(V_2) = 0 \\ I_1(V_1) - I_3(V_3) = 0 \\ \dots \\ I_1(V_1) - I_k(V_k) = 0 \\ \dots \\ I_1(V_1) - I_{N-1}(V_{N-1}) = 0 \\ I_1(V_1) - I_N(V_N) = 0 \\ I_1(V_1) - I_{diode}(V_{diode}) = 0 \end{array} \right.$$



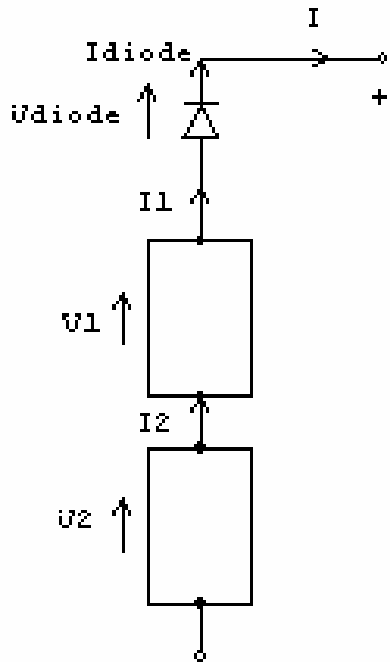
La matrice Jacobiana

$$\mathbf{J} = \begin{pmatrix}
 1 & 1 & 1 & \dots & 1 & \dots & 1 & 1 & 1 \\
 \frac{\partial I_1}{\partial V_1} & -\frac{\partial I_2}{\partial V_2} & & & & & & & \\
 \frac{\partial I_1}{\partial V_1} & & -\frac{\partial I_3}{\partial V_3} & & & & & 0 & \\
 \vdots & & & \ddots & & & & & \\
 \frac{\partial I_1}{\partial V_1} & & & & -\frac{\partial I_k}{\partial V_k} & & & & \\
 \vdots & & & & & \ddots & & & \\
 \frac{\partial I_1}{\partial V_1} & & 0 & & & & -\frac{\partial I_{N-1}}{\partial V_{N-1}} & & \\
 \frac{\partial I_1}{\partial V_1} & & & & & & & -\frac{\partial I_N}{\partial V_N} & \\
 \frac{\partial I_1}{\partial V_1} & & & & & & & & -\frac{\partial I_{diode}}{\partial V_{diode}}
 \end{pmatrix}$$



Caso applicativo: stringa di 2 pannelli

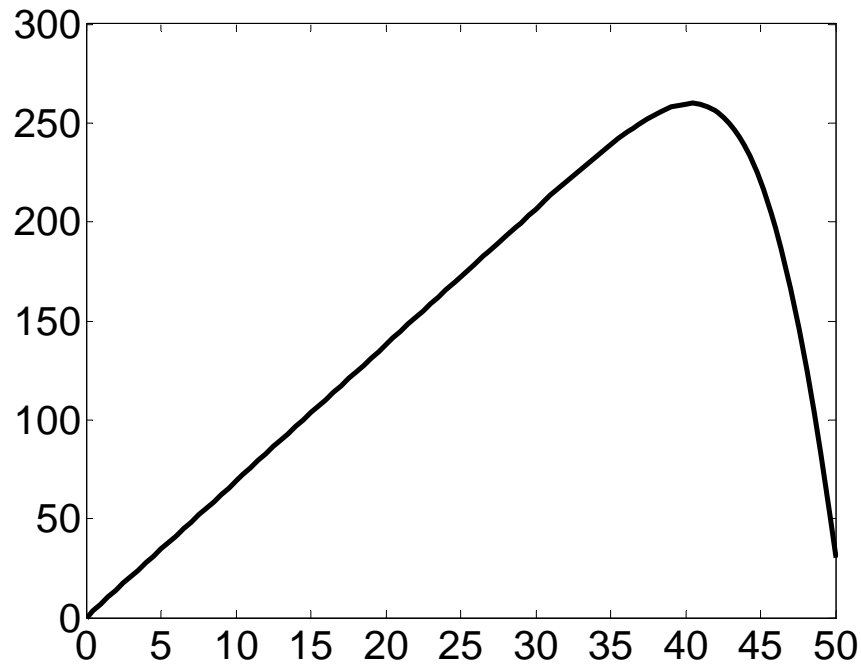
$$\begin{cases} V_1 + V_2 + V_{\text{diode}} - V = 0 \\ I_1(V_1) - I_2(V_2) = 0 \\ I_1(V_1) - I_{\text{diode}}(V_{\text{diode}}) = 0 \end{cases} \Rightarrow F(V_1, V_2, V_{\text{diode}}) = \begin{bmatrix} V_1 + V_2 + V_{\text{diode}} - V \\ I_1(V_1) - I_2(V_2) \\ I_1(V_1) - I_{\text{diode}}(V_{\text{diode}}) \end{bmatrix}$$



$$J = \begin{pmatrix} \frac{1}{\partial I_1} & \frac{1}{\partial I_2} & 1 \\ \frac{\partial I_1}{\partial V_1} & 0 & -\frac{\partial I_{\text{diode}}}{\partial V_{\text{diode}}} \end{pmatrix}$$



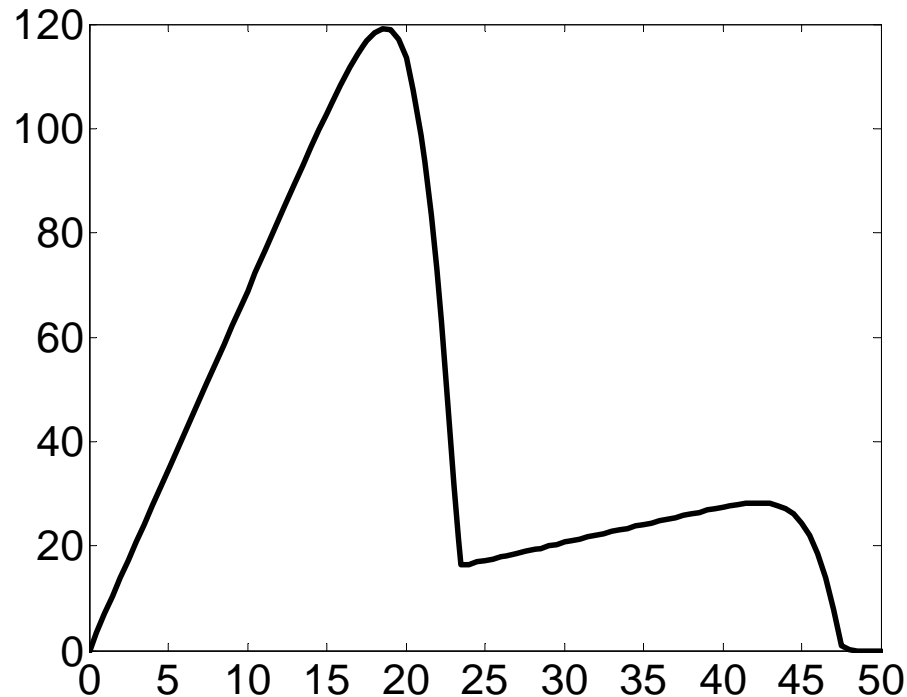
Caso applicativo: stringa di 2 pannelli



Power [W] vs. voltage [V] characteristic of the simulated **matched** PV field.



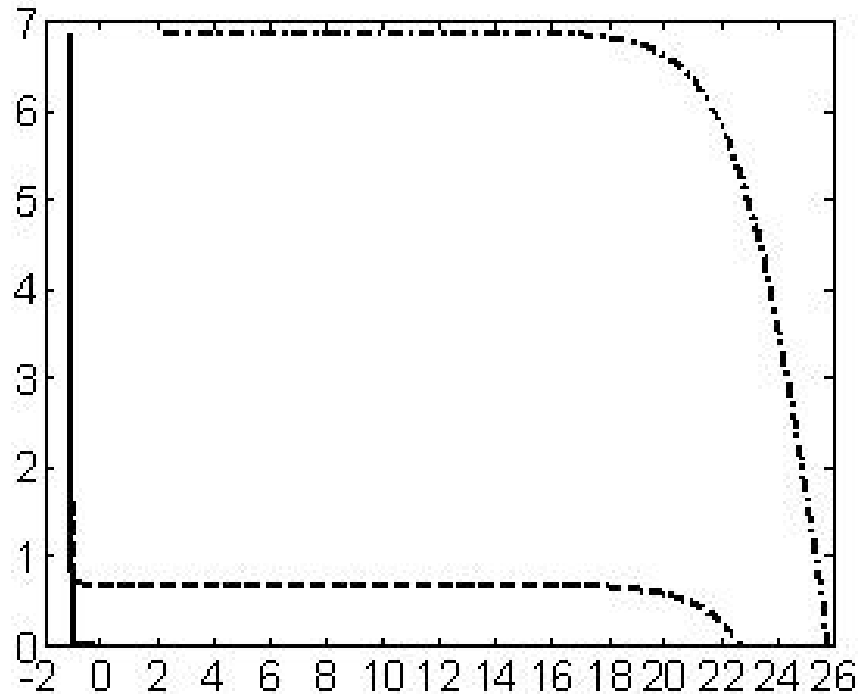
Caso applicativo: stringa di 2 pannelli



Power [W] vs. voltage [V] characteristic of the simulated **mismatched** PV field.



Caso applicativo: stringa di 2 pannelli

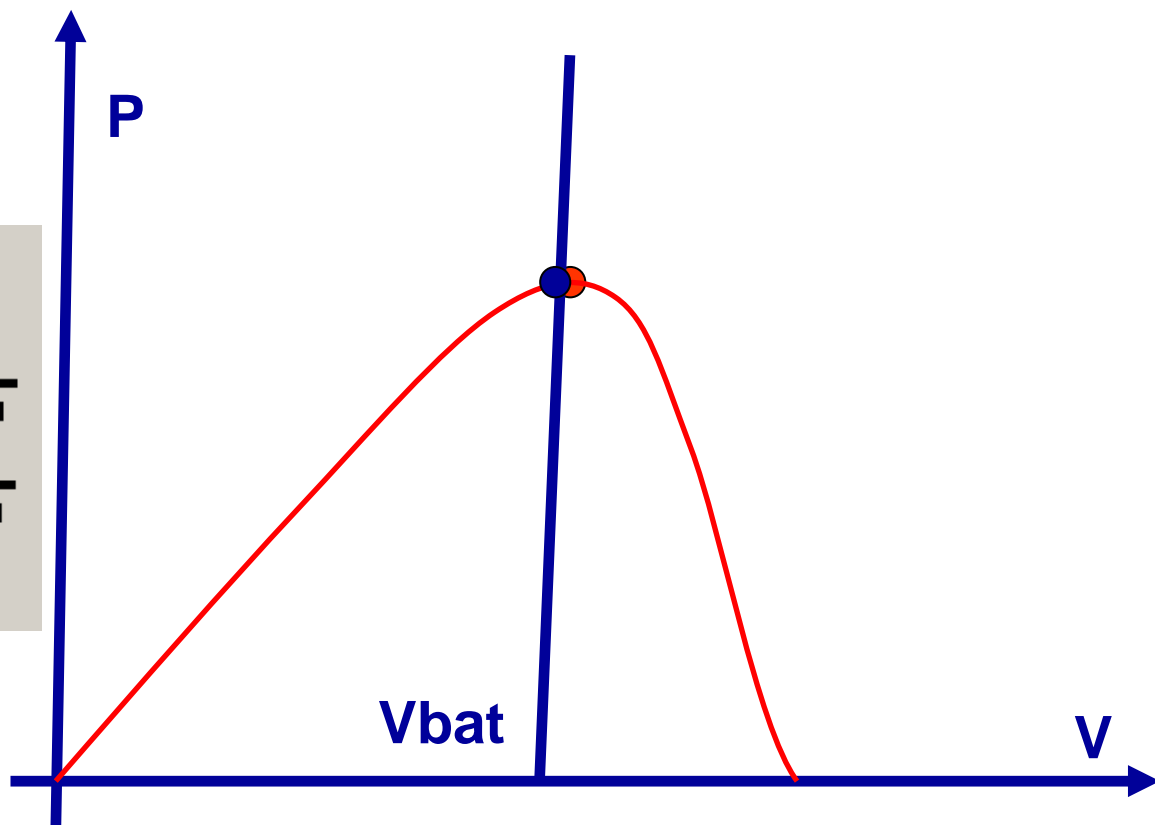
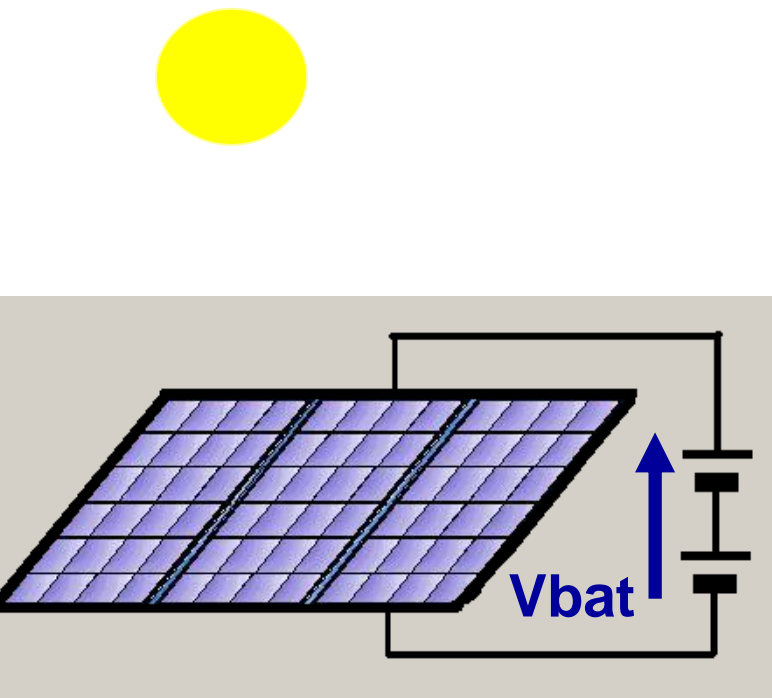


Current [A] vs. voltage [V] characteristic of the three devices in the simulated string. Continuous line = blocking diode curve, dashed line = curve of the panel with irradiation $S=100 \text{ W/m}^2$, dash-dotted line = curve of the panel with irradiation $S=1000 \text{ W/m}^2$.

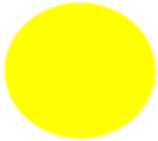


MPPT: Inquadramento del problema

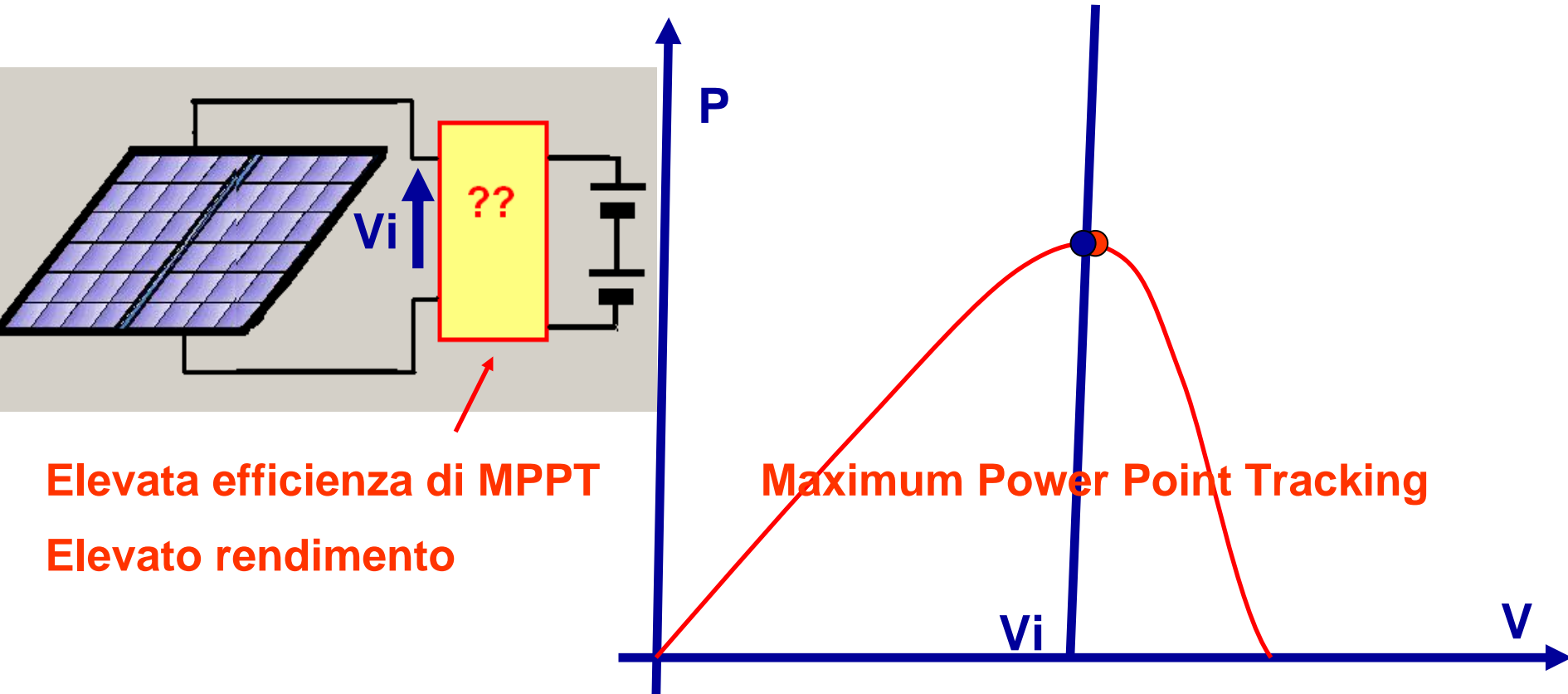
- Max Potenza Disponibile
- Potenza Erogata



Inquadramento del problema



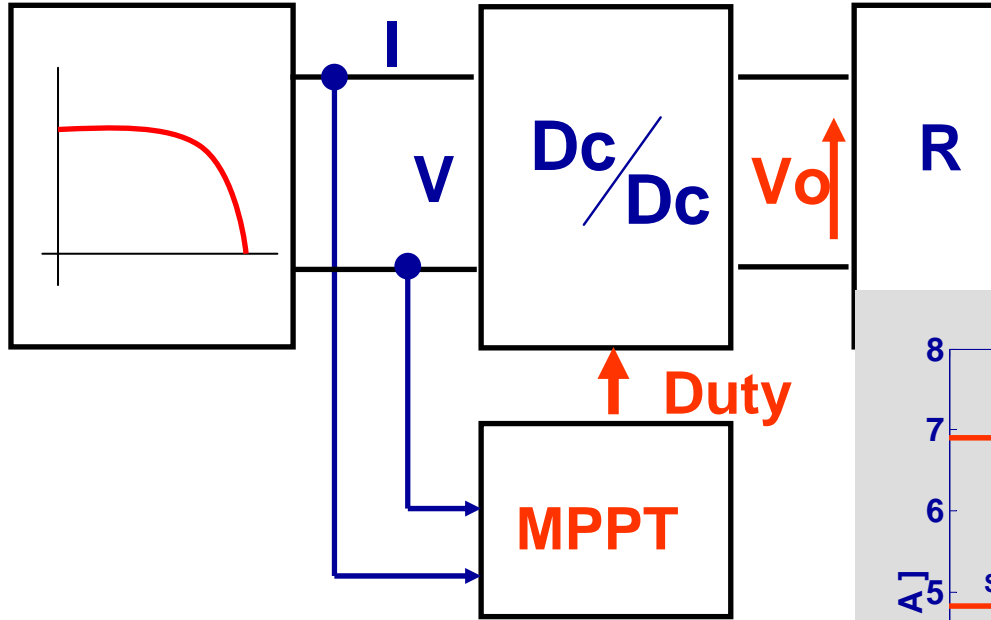
- Max Potenza Disponibile
- Potenza Erogata



Elevata efficienza di MPPT
Elevato rendimento

Maximum Power Point Tracking

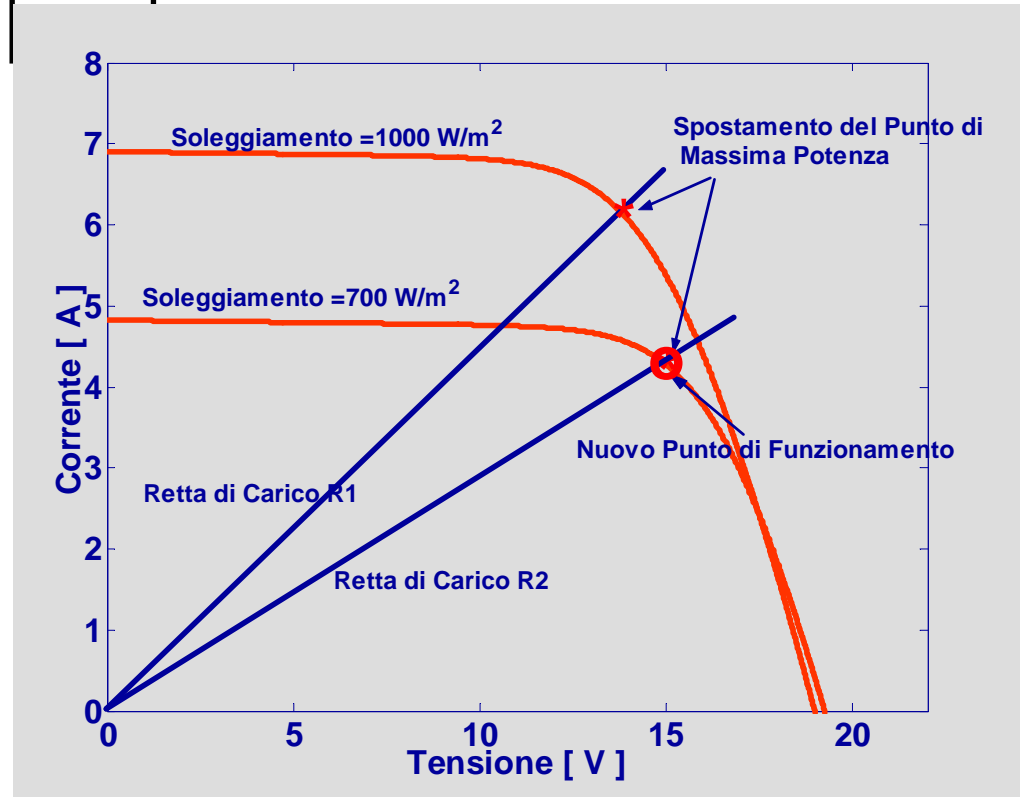




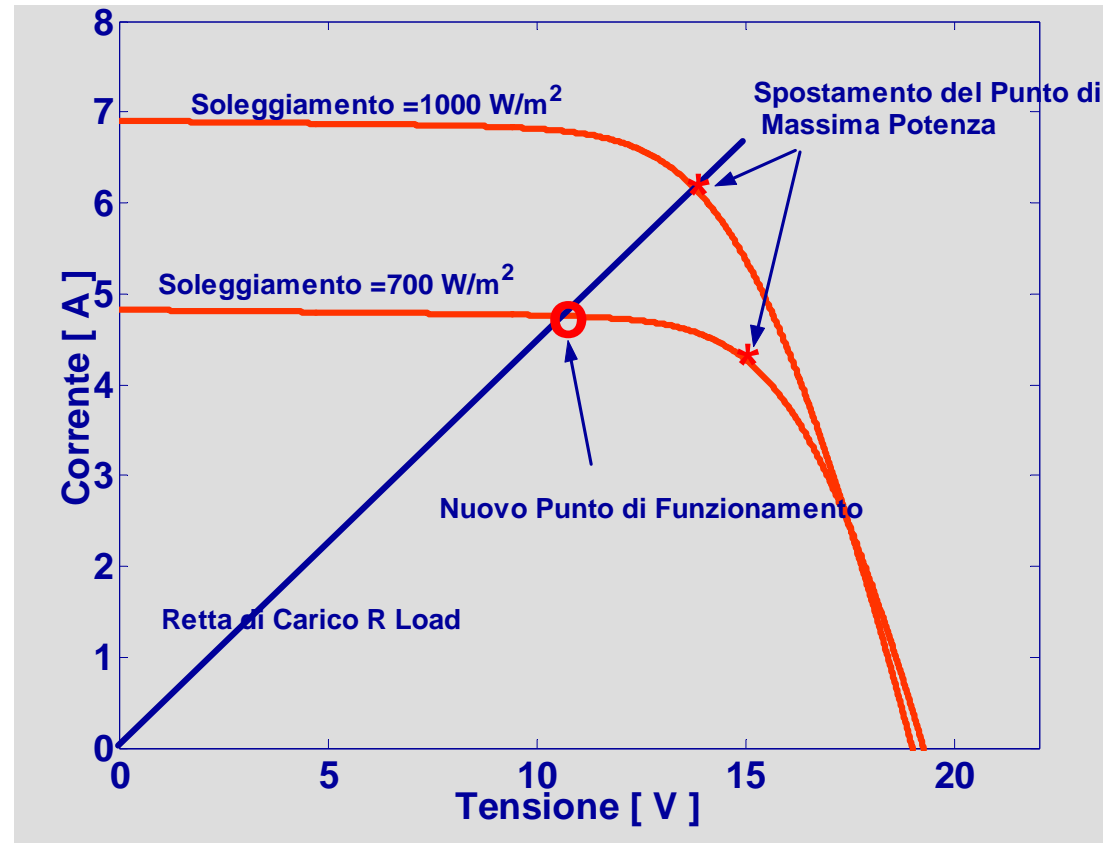
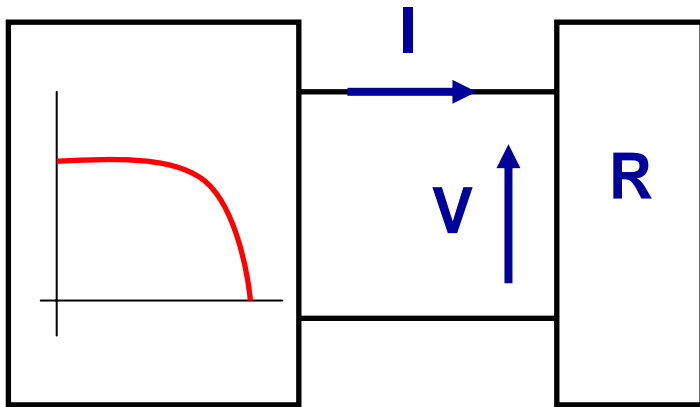
MPPT
 ↓
Teorema Max
Trasferimento di Potenza

$$V = \frac{V_o}{M(D)}$$

$$R_i = \frac{V}{I} = \frac{R}{M(D)^2}$$

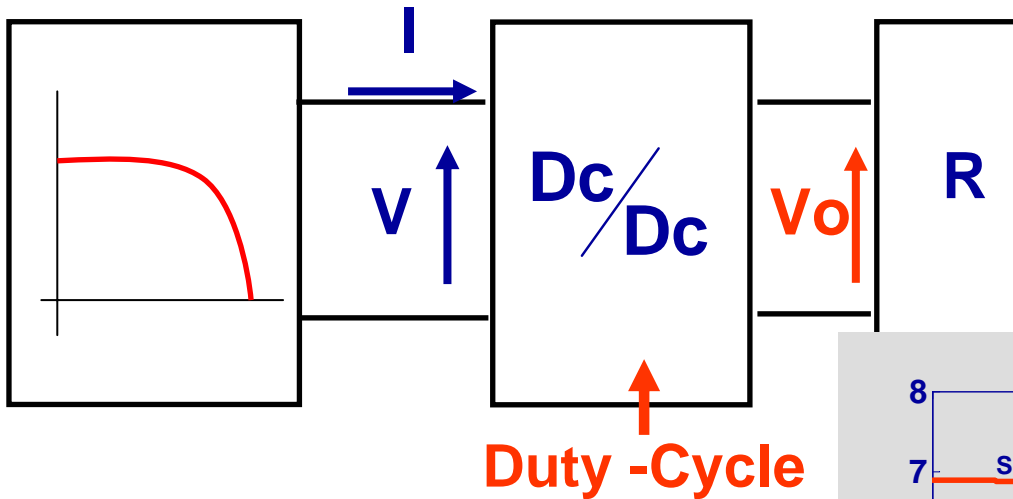


Interfacciamento Modulo Fotovoltaico-Carico



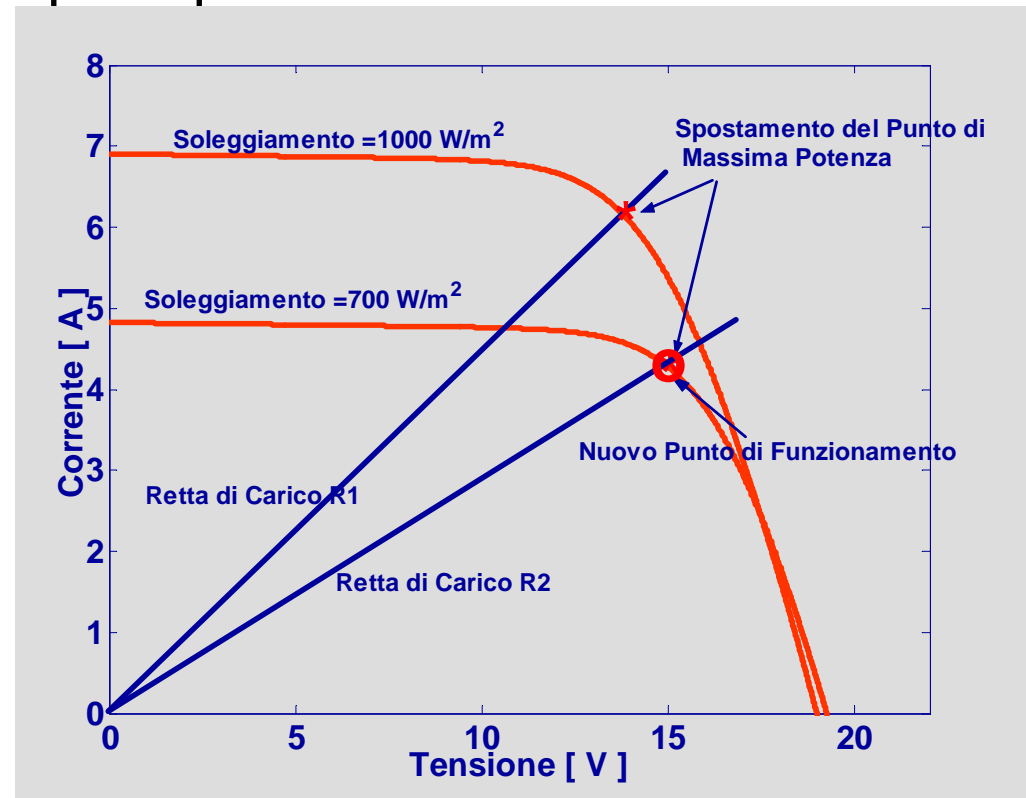
Per massimizzare la potenza erogata dal sistema è necessario modificare la retta di carico in funzione della caratteristica I-V della sorgente



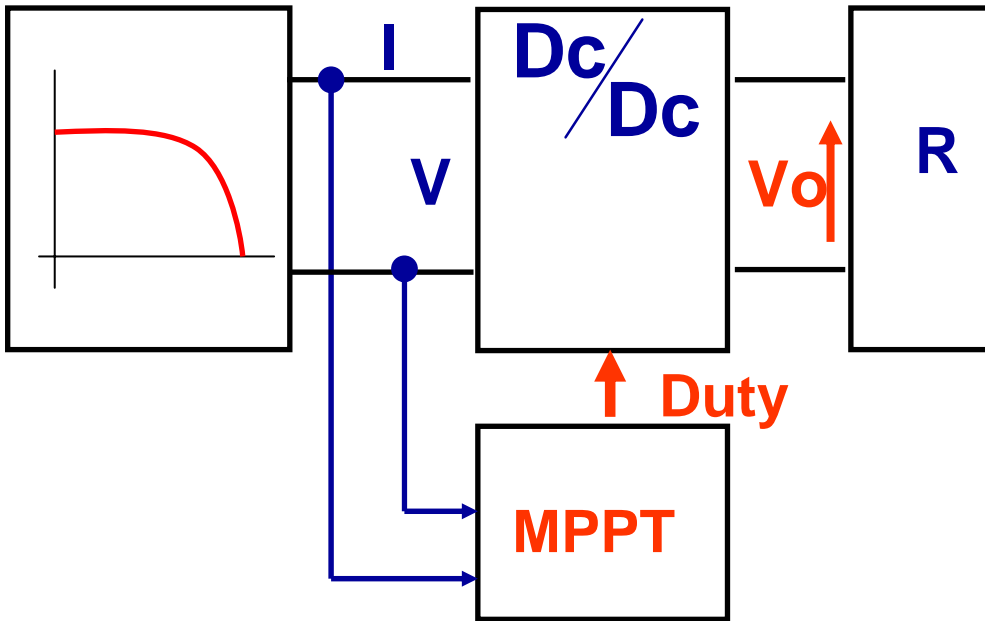


$$V = \frac{V_o}{M(D)}$$

$$R_i = \frac{V}{I} = \frac{R}{M(D)^2}$$



Descrizione della Tecnica MPPT Perturba e Osserva (P&O)



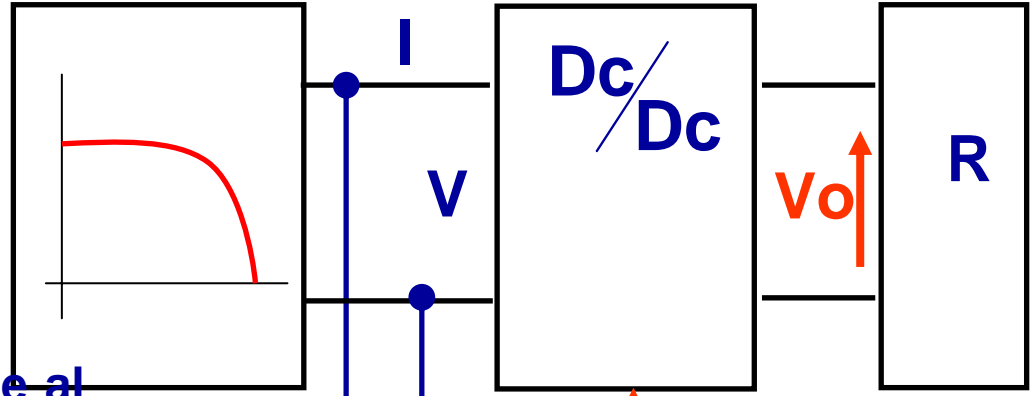
L'algoritmo di controllo, nel caso di P&O con regolazione diretta del duty cycle, può essere sintetizzato dalla seguente equazione:

$$D_{(k+1)Ta} = D_{kTa} + \Delta d \cdot \text{sign}(P_{kTa} - P_{(k-1)Ta}) \quad (1)$$

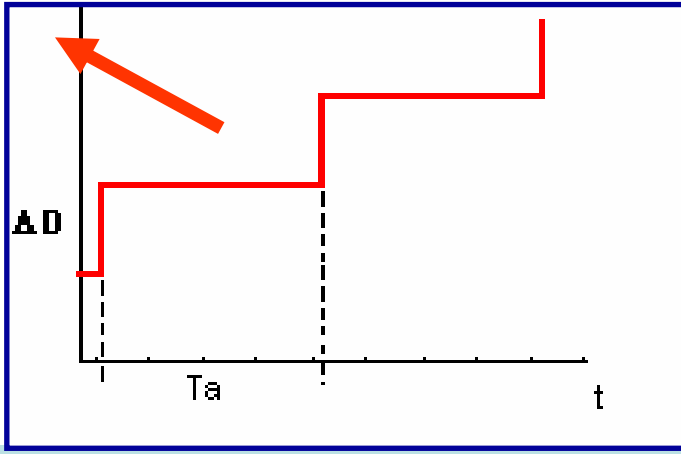
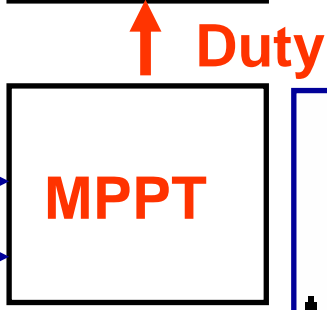
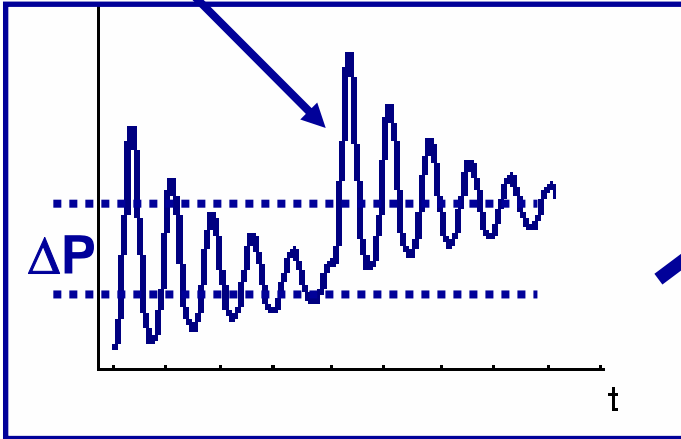
dove Δd è l'ampiezza della perturbazione e Ta è l'intervallo di tempo che intercorre tra due perturbazioni consecutive.

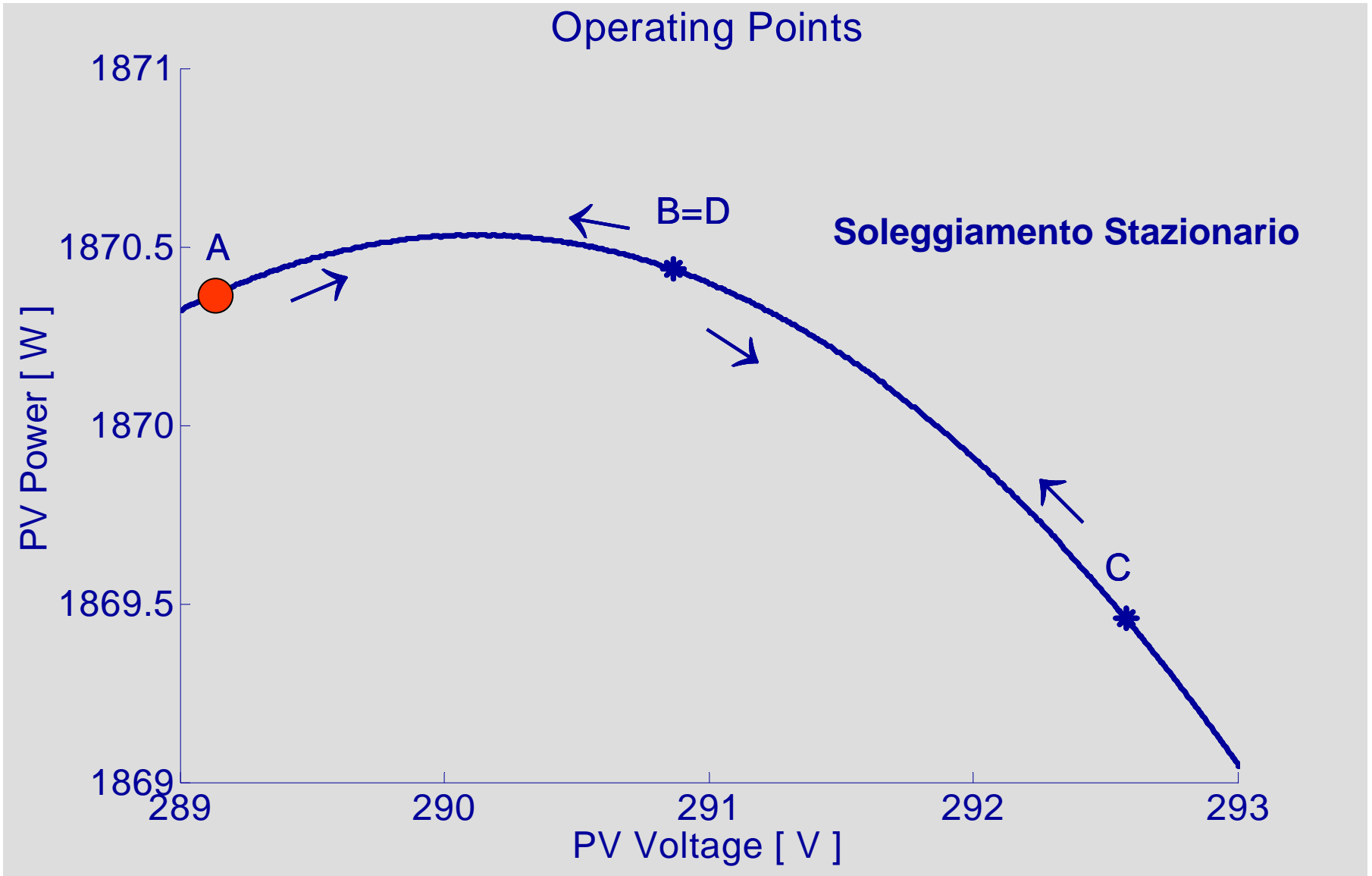


Per determinare i parametri del controllore MPPT P&O è necessario analizzare il modello alle variazioni dell'intero sistema



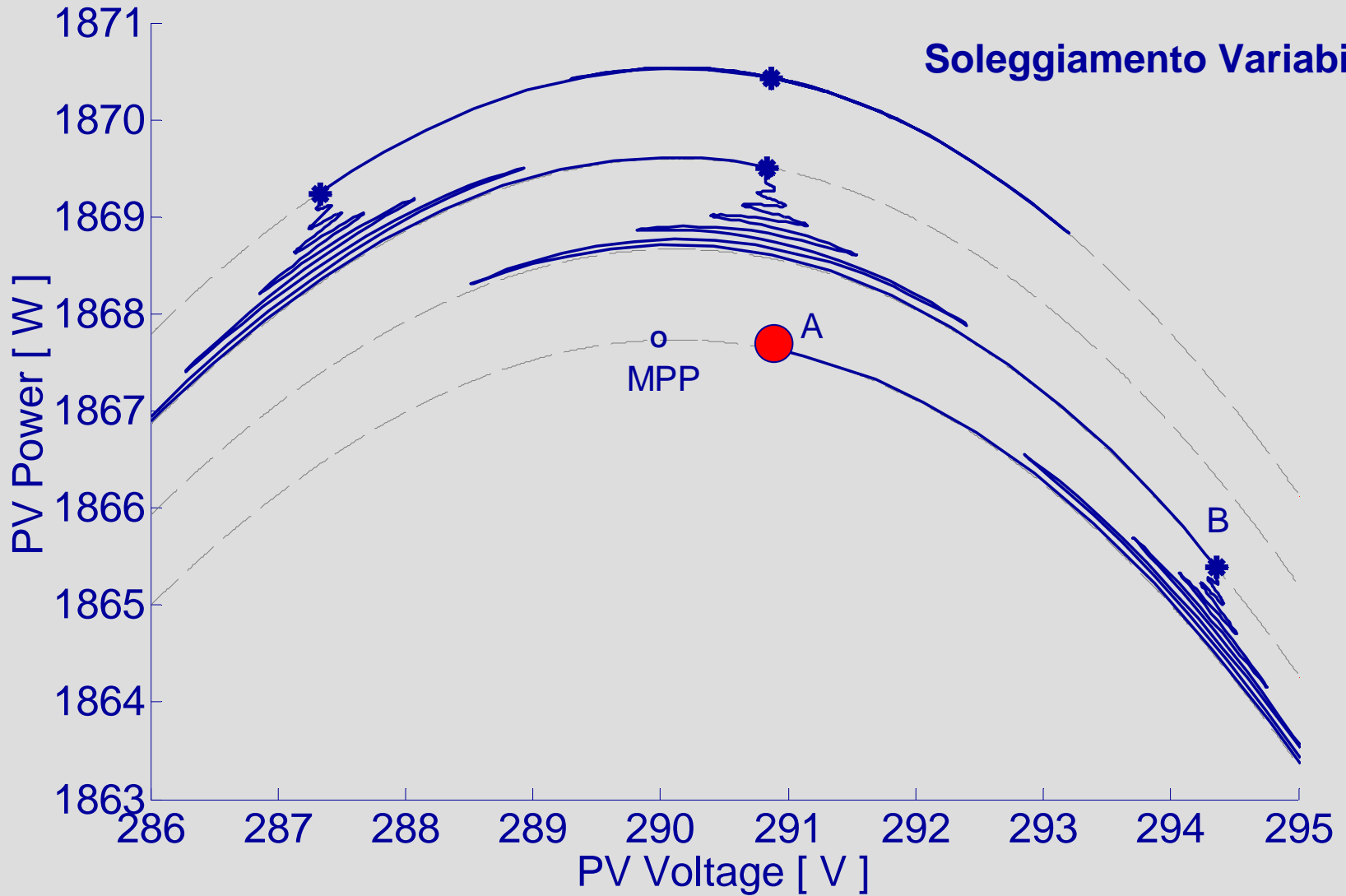
Oscillazioni dovute al sistema PV+DcDc+R





Irradiance

Soleggiamento Variabile



Validazione sperimentale

La stazione di testing realizzata presso il Laboratorio di Circuiti Elettronici di Potenza è costituito da:

- **2 moduli fotovoltaici Kyocera KC120 collegati in serie**
- **Convertitore switching tipo boost**
La scelta del convertitore boost è sostanzialmente legato al fatto di avere una corrente di ingresso continua
- **Pacco batterie da 48 V**
Il pacco batterie è stato emulato mediante un generatore di tensione costante a 48 V in grado di assorbire energia
- **Controllore digitale MPPT P&O con regolazione diretta del duty-cycle.**
Per realizzare il controllo digitale è stato utilizzato un personal computer corredato di una scheda di acquisizione National Instruments



$$I = I_{ph} - I_{sat} \cdot \left(e^{\left(\frac{q}{k \cdot T} \cdot \frac{V + I \cdot R_s}{\gamma} \right)} - 1 \right) - \frac{(V + I \cdot R_s)}{R_p} \quad I_{ph} = S \cdot A \cdot \underline{R}$$

$$R_s = 0.421 \, \Omega$$

$$R_p = 360 \, \Omega$$

$$I_{sat} = 0.887e-6 \text{ A}$$

$$\gamma = 1.182$$

$$R = 0.331 \text{ V}^{-1}$$

$$A = 225 \text{ cm}^2$$

