



UNIVERSITÀ  
DEGLI STUDI  
DI PADOVA

19/09/2022

Corso di Laurea in Ingegneria Meccatronica  
Dipartimento di Tecnica e Gestione dei sistemi industriali

# **SVILUPPO DI UN SISTEMA MPPT PER APPLICAZIONI FOTOVOLTAICHE MEDIANTE MICROCONTROLLORE**

Relatore: prof Caldognetto Tommaso

Correlatore: prof Magnone Paolo

Laureandi:

Dal Bianco Giacomo, Fiscato Manuel, Vigolo Elia, Visonà Matteo



## **Introduzione**

- Modello fotovoltaico
- Curva I-V
- Effetto Temperatura

## **MPPT**

- Conductance Incremental Method

## **Caratteristiche dell'impianto e configurazione scelta**

- Scelta del pannello e relativi dati
- Scheda utilizzata

## **Parametrizzazione della curva I-V**

- Relazione tra  $I_{sc}$  e  $I_L$
- Dipendenza dalla temperatura
- Dipendenza dall'irraggiamento

## **Schema a blocchi e periferiche**

- Modello convertitore

## **Esempi e grafici**

## **Conclusioni**

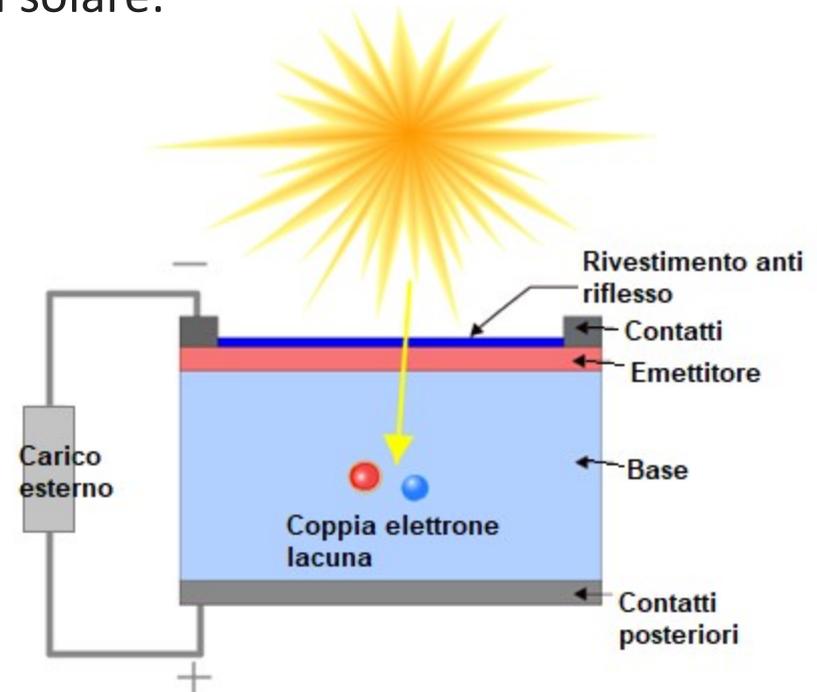
## **Bibliografia**

# Introduzione

La cella solare deve sfruttare l'energia della luce per produrre sia tensione che corrente, per poter **generare potenza elettrica**.

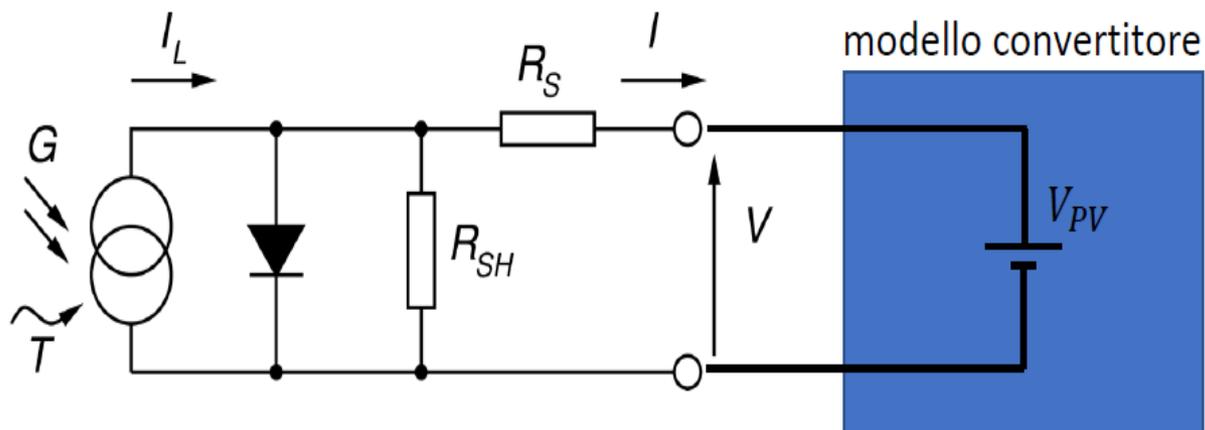
Punti necessari al funzionamento di una cella solare:

- Generazione di portatori generati dalla luce (assorbimento di **fotoni**)
- raccolta dei portatori per generare la **corrente**
- Generazione di un elevata **tensione** ai capi della cella
- Dissipazione della potenza sul carico collegato



# Modello fotovoltaico

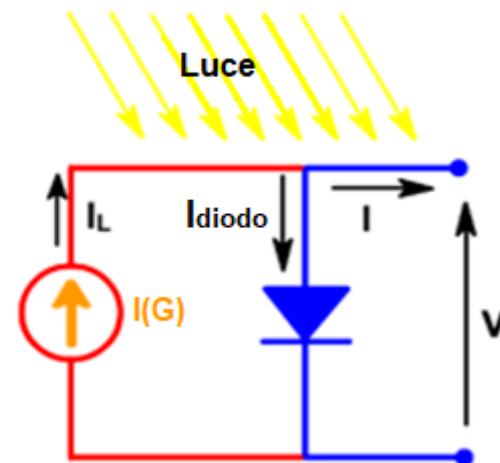
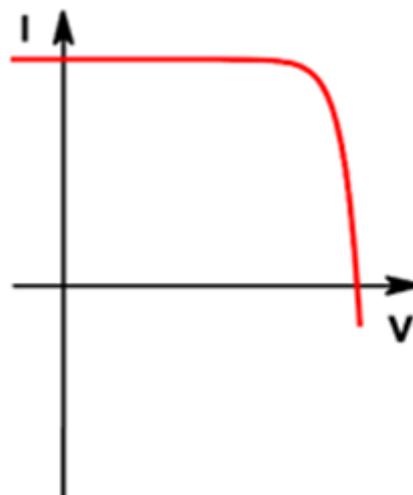
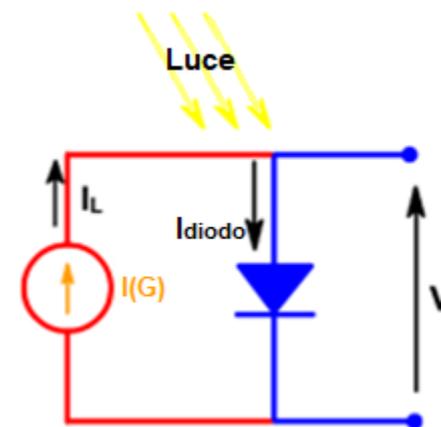
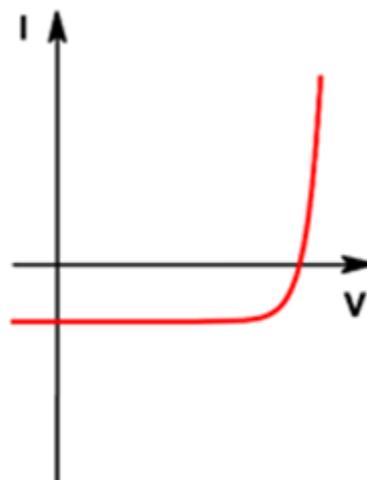
- Il generatore di corrente modella la **corrente generata dalla luce**
- Le resistenze  $R_S$  e  $R_{SH}$  sono legate alle **perdite** (resistenze delle regioni p-n, di contatto...)
- Il diodo simula il comportamento in condizioni di **oscurità**
- Il Modello convertitore **imposta il punto di lavoro**



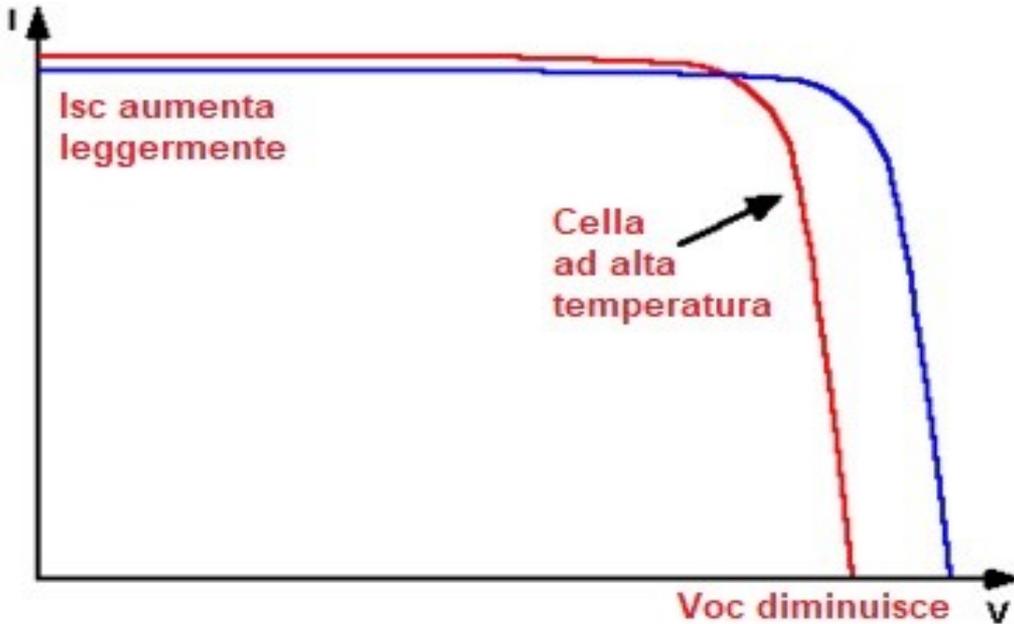
## Curva IV

La curva IV della cella solare si ottiene sovrapponendo la curva **caratteristica di un diodo** con la corrente generata dalla luce, che sposta la curva nel **quarto quadrante**.

Per convenzione la curva viene **capovolta** nel primo quadrante.



# Effetto della temperatura



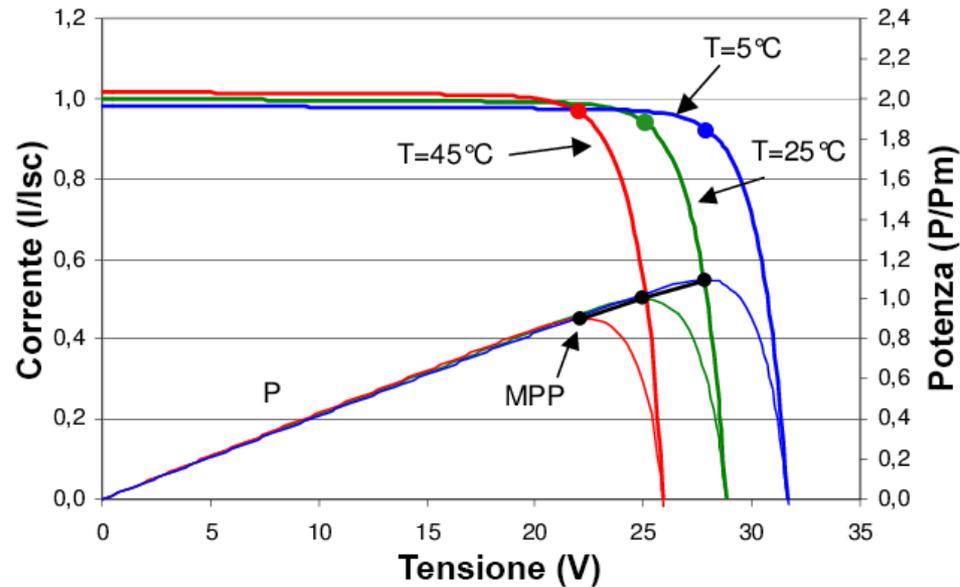
L'aumento della temperatura **riduce il bandgap** del semiconduttore, influenzando in particolare Voc ed Isc

Per celle in silicio:

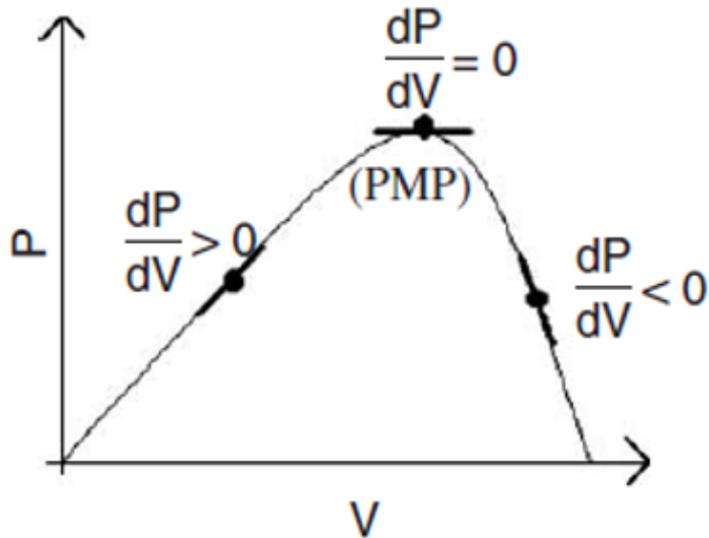
- La tensione di circuito aperto (Voc) decresce di circa  $2.2\text{mV}/^\circ\text{C}$
- La corrente di corto circuito (Isc) aumenta di circa  $0,6\text{ mA}/^\circ\text{C}$ .

## Maximum Power Point Tracking

Per **massimizzare la potenza** prodotta dai pannelli fotovoltaici è necessario implementare degli algoritmi di **inseguimento** del punto di **massima potenza** (abbreviato in MPPT) al variare delle condizioni operative.



# Conductance incremental method



Il metodo della conduttanza incrementale è basato sul fatto che la **pendenza** della curva di potenza è **zero sull'MPP**, positiva alla sua sinistra e negativa alla sua destra. Partendo dalla seguente equazione:

$$\frac{dP}{dV} = \frac{d(V \cdot I)}{dV} = \frac{I \cdot dV}{dV} + V \cdot \frac{dI}{dV} = I + V \cdot \frac{dI}{dV}$$

Unendo il risultato al fatto che  $dP/dV = 0$  si ottiene:

- $\frac{\Delta I}{\Delta V} = -\frac{I}{V}$  in MPP
- $\frac{\Delta I}{\Delta V} > -\frac{I}{V}$  a sinistra di MPP
- $\frac{\Delta I}{\Delta V} < -\frac{I}{V}$  a destra di MPP



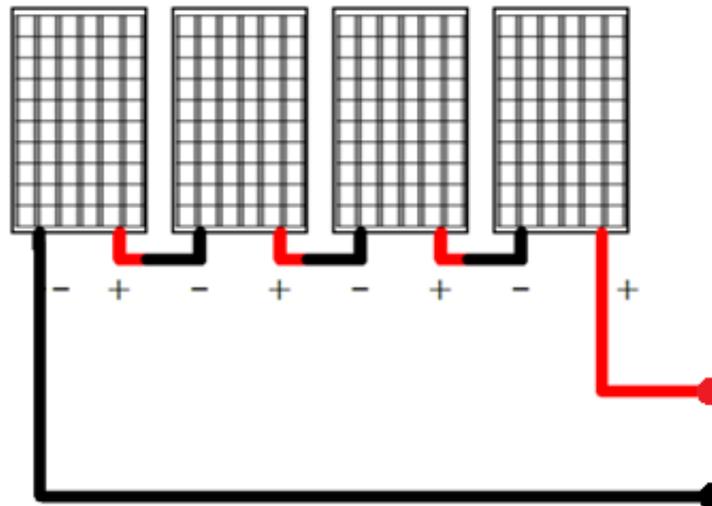
## Richieste

- Generare una tensione a vuoto dell'ordine delle centinaia di volt
- Potenza nominale nell'ordine dei kilowatt

## Scelte

Array formato da  $N = 4$  pannelli in serie:

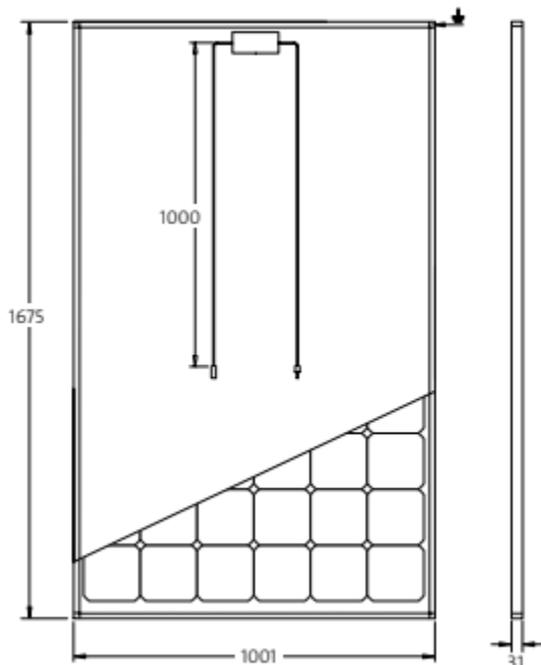
- Tensione a vuoto  $\rightarrow N \cdot V_{oc} = 4 \cdot 38.9 = \mathbf{155.6 \text{ V}}$
- Potenza nominale  $\rightarrow N \cdot V_{MPP} \cdot I_{MPP} = 4 \cdot 30.7 \cdot 8.56 = \mathbf{1051 \text{ W}}$



## 4 Pannelli Sunmodule Plus SW 260-280 mono

COMPORTAMENTO A 1000 W/M <sup>2</sup> , AM 1.5, STC		
Potenza massima	Pmax	260 Wp
Tensione a vuoto	Voc	38,9 V
Tensione a massima potenza	Vmpp	30,7V
Corrente di cortocircuito	Icc	9,18 A
Corrente a massima potenza	Impp	8,56 A

COMPORTAMENTO A 800 W/M <sup>2</sup> , NOCT, AM 1.5		
Potenza massima	Pmax	194,2 Wp
Tensione a vuoto	Voc	35,6V
Tensione a massima potenza	Vmpp	28,1V
Corrente di cortocircuito	Icc	7,42 A
Corrente a massima potenza	Impp	6,92 A



DIMENSIONI	
lunghezza	1675mm
larghezza	1001mm
altezza	31mm
peso	21,2kg

CARATTERISTICHE TERMICHE	
NOCT	46°C
TCI	0,040 %/K
TCV	- 0,3%/K
TCP	- 0.41%/K

MATERIALI IMPIEGATI	
celle per modulo	60
tipo di cella	monocristallino
dimensioni della cella	156x156mm
lato anteriore	4mm vetro temperato

CARATTERISTICHE TERMICHE	
Tensione massima di sistema classe II	1000V
Capacità di carico di corrente inversa	16A
Sovraccarico/carico dinamico	5,4 / 2,4 kN/m <sup>3</sup>
Numero dei diodi di bypass	3
Temperatura di esercizio ammessa	- 40°C a +85°C

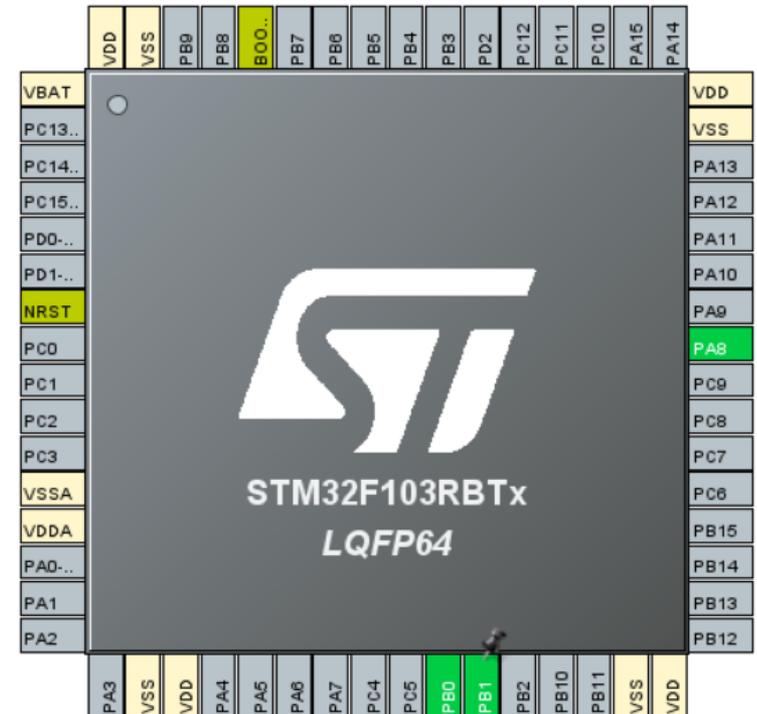
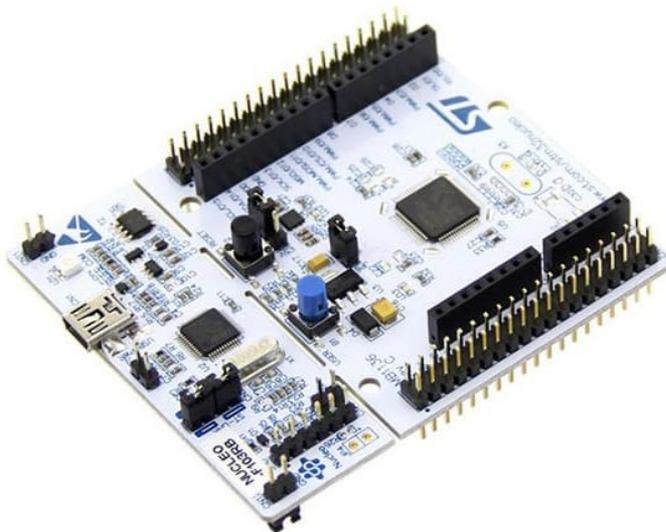
[Datasheet](#)

# Scheda utilizzata

Per implementare l'algoritmo è stato utilizzato il microcontrollore **STM32F103RBTx**.

Questo uC non mette a disposizione la periferica DAC.

Al suo posto è stato utilizzato un PWM che comanda un convertitore per imporre la tensione al pannello.



# Parametrizzazione della curva IV

Partendo dall'equazione della curva caratteristica bisogna trovare tutti i termini per essere in grado di simulare correttamente il funzionamento del sistema fotovoltaico.

$$I = I_L - I_0 \left[ \exp\left(\frac{qV}{nkT}\right) - 1 \right]$$

$I_L$  = corrente generata dalla luce

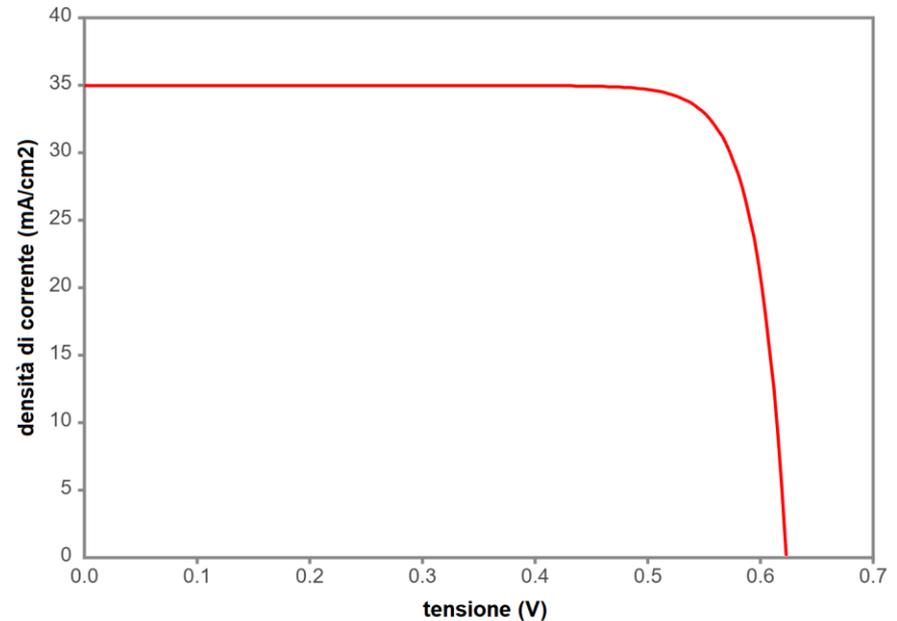
$I_0$  = corrente di saturazione

$q$  = carica dell'elettrone

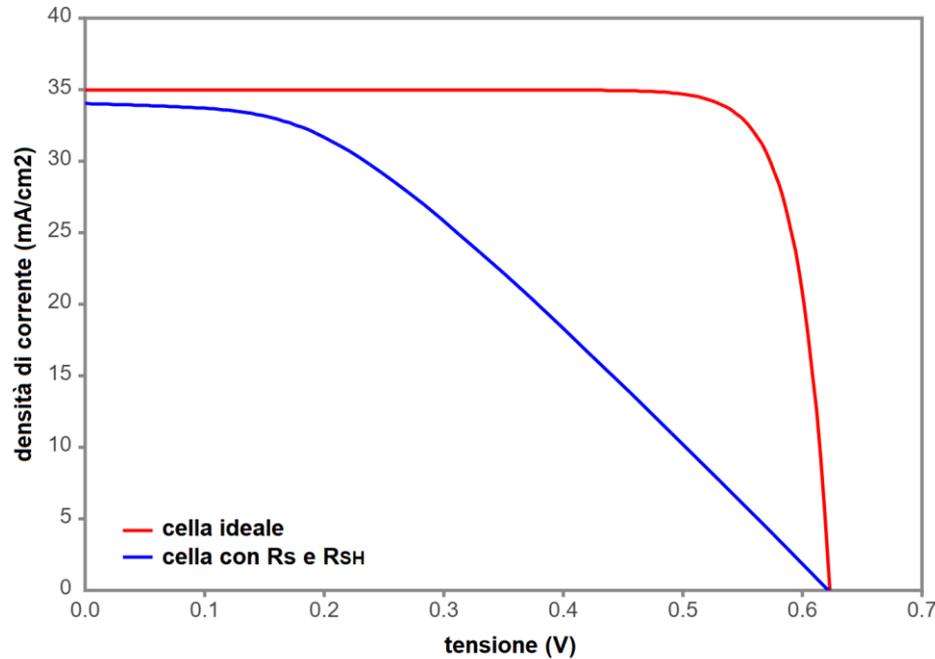
$n$  = fattore di idealità

$k$  = costante di Boltzmann

$T$  = temperatura (in gradi kelvin)



## Relazione tra $I_{sc}$ e $I_L$



Per una **cella ideale** la corrente generata dalla luce  $I_L$  e quella di cortocircuito  $I_{sc}$  sono **equivalenti**.

Per  $R_s$  molto elevata ( $> 10 \Omega\text{cm}^2$ )  $I_{sc}$  risulta **minore di  $I_L$**  e scrivere l'equazione della cella solare con  $I_{sc}$  non è corretto.

Il valore di  $I_{sc}$  si trova nel datasheet dei pannelli.

Considerando la cella ideale, risulta semplice inserire questo numero nella formula al posto di  $I_L$ .

# Corrente di saturazione

Non conoscendo le caratteristiche del materiale non è possibile risalire direttamente al valore di  $I_0$ , ma è possibile calcolare un **valore approssimato** conoscendo i valori di corrente e tensione nel MPP:

$$I_{mpp} = I_{sc} - I_0 \left[ \exp\left(\frac{q \cdot V_{mpp}}{NkT}\right) - 1 \right]$$

E quindi si ricava  $I_0$

$$I_0 = \frac{(I_{sc} - I_{mpp})}{\left[ \exp\left(\frac{q \cdot V_{mpp}}{N \cdot kT}\right) - 1 \right]} = 1,3944 \text{ nA}$$

La nuova Voc risulta:

$$V_{oc} = \frac{nkT}{q} \ln\left(\frac{I_{sc}}{I_0} + 1\right) = 34,855 \text{ V}$$



# Dipendenza dalla temperatura

$V_{oc}$  e  $I_{sc}$  dipendono dalla temperatura. Per tenerne conto nella formula della caratteristica I-V, lo viene espressa nel seguente modo:

$$I_0(T) = \frac{I_{sc}(T)}{\left[ \exp\left(\frac{q \cdot V_{oc}(T)}{N \cdot k \cdot T}\right) - 1 \right]}$$

Da datasheet  $I_{sc}$  aumenta dello 0.04%/K,  $V_{oc}$  diminuisce dello 0,3%/K

$$V_{oc}(T) = V_{oc} \cdot (1 - 0,003 \cdot \Delta T)$$

$$I_{sc}(T) = I_{sc} \cdot (1 + 0,0004 \cdot \Delta T)$$

$\Delta T$  è la differenza tra la temperatura e la temperatura ambiente (**25°C**)

# Dipendenza dall'irraggiamento

La dipendenza dall'irraggiamento viene **ipotizzata lineare**. Usando i punti forniti dal datasheet si trova l'equazione della retta.

$$\begin{cases} I_{sc}(1000; 25) = (a \cdot 1000 + b)(1 + 0,0004 \cdot 0) = 9,18 \text{ A} \\ I_{sc}(800; 46) = (a \cdot 800 + b)(1 + 0,0004 \cdot 21) = 7,42 \text{ A} \end{cases}$$

Si ricavano  $a = 0,00911 \text{ Am}^2/\text{W}$   $b = 0,07 \text{ A}$

L'equazione della curva risulta:

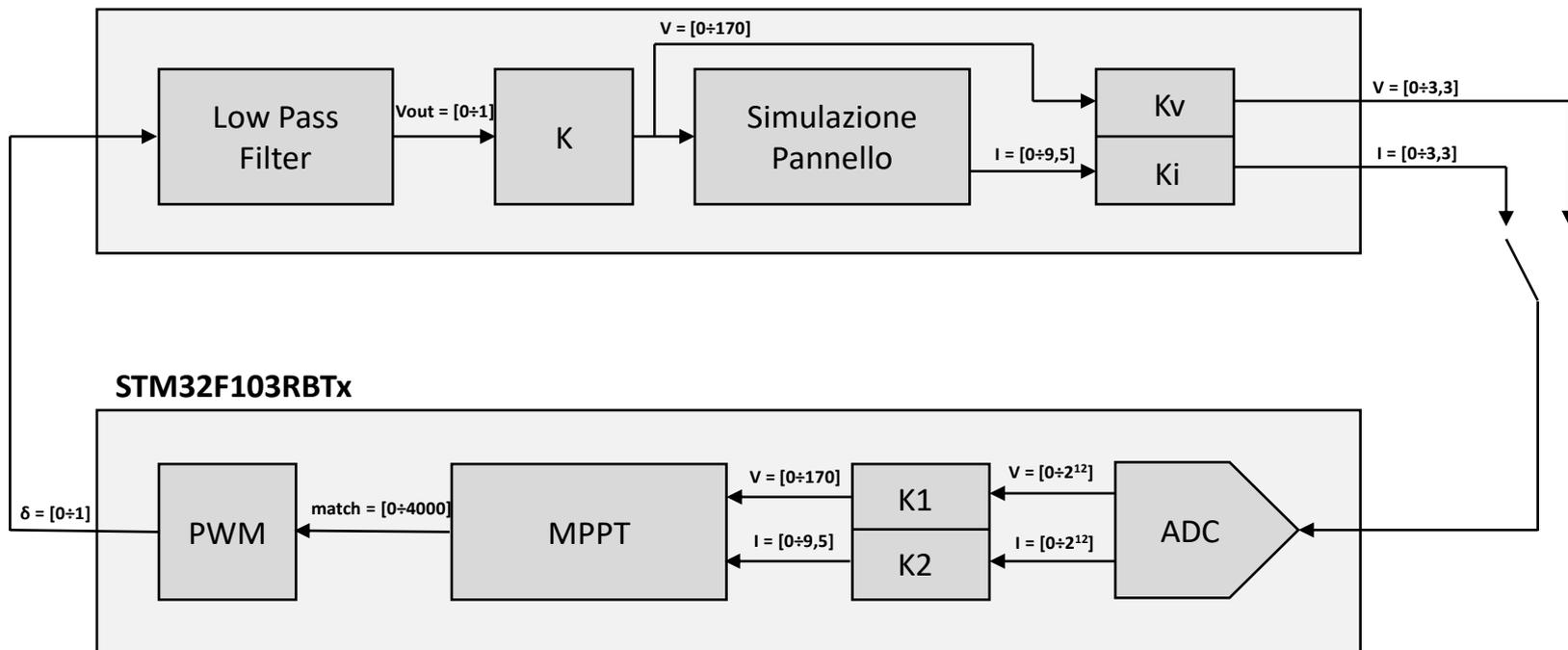
$$I = (a \cdot G + b)(1 + 0,0004 \cdot \Delta T) - I_0(T)(e^{V \cdot \text{Thermalvoltage}} - 1)$$

**Thermalvoltage** è una variabile utilizzata nel codice, e corrisponde a:

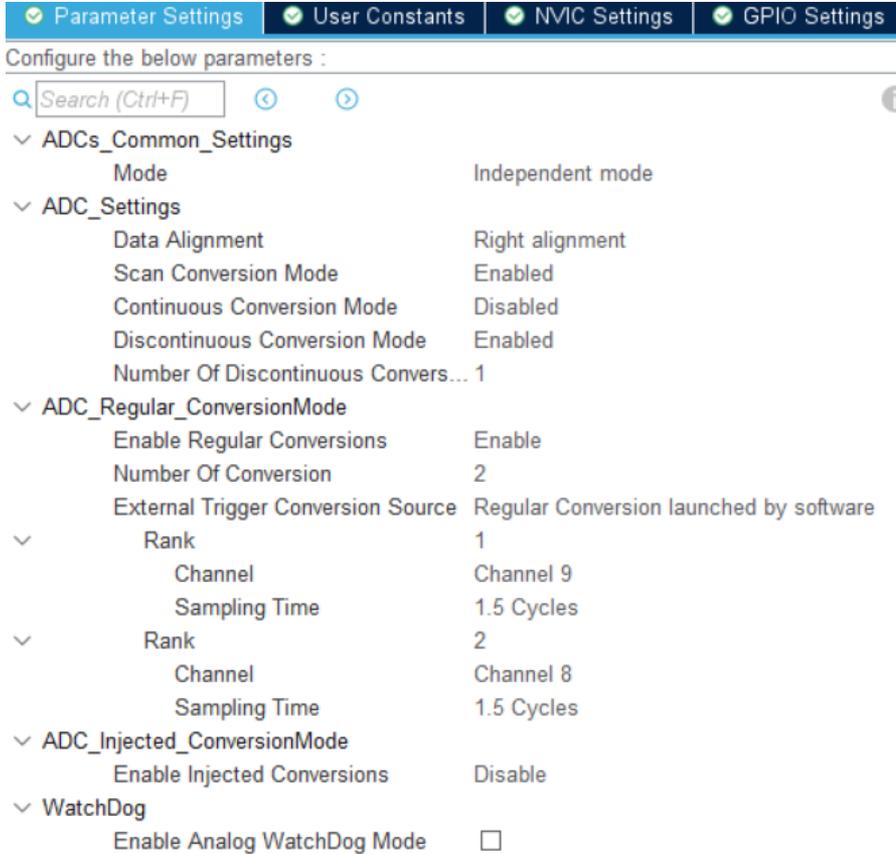
$$\text{Thermalvoltage} = \frac{q}{kT \cdot 240}$$

# Schema a blocchi e periferiche

## Simulazione



Attraverso il programma STM32CubeMX sono state configurati un **ADC** e un **Timer**



The screenshot shows the STM32CubeMX configuration interface. At the top, there are four tabs: "Parameter Settings" (selected), "User Constants", "NVIC Settings", and "GPIO Settings". Below the tabs, it says "Configure the below parameters :". There is a search bar with the text "Search (Ctrl+F)" and a search icon. The configuration tree is expanded to show ADC settings:

- ADCs\_Common\_Settings
  - Mode: Independent mode
- ADC\_Settings
  - Data Alignment: Right alignment
  - Scan Conversion Mode: Enabled
  - Continuous Conversion Mode: Disabled
  - Discontinuous Conversion Mode: Enabled
  - Number Of Discontinuous Convers...: 1
- ADC\_Regular\_ConversionMode
  - Enable Regular Conversions: Enable
  - Number Of Conversion: 2
  - External Trigger Conversion Source: Regular Conversion launched by software
- Rank 1
  - Channel: Channel 9
  - Sampling Time: 1.5 Cycles
- Rank 2
  - Channel: Channel 8
  - Sampling Time: 1.5 Cycles
- ADC\_Injected\_ConversionMode
  - Enable Injected Conversions: Disable
- WatchDog
  - Enable Analog WatchDog Mode:

Per l'ADC:

- Sono stati utilizzati **2 canali** per poter acquisire sia corrente che tensione del pannello dalla stessa periferica
- Campionamento eseguito ad una frequenza di **5 Hz**

# Configurazione delle periferiche

Il timer è utilizzato per generare il segnale PWM di tipo **CENTER-ALIGNED**.  
Conteggio massimo pari a 4000, ottenuto da

$$f_{pwm} = \frac{f_{APB1}}{(2(\text{counterperiod} + 1) - 2) \cdot (\text{prescaler} + 1)}$$

Dove  $f_{APB1} = 8 \text{ MHz}$ ,  $\text{prescaler} = 0$  e  $f_{PWM} = 1 \text{ kHz}$

Configure the below parameters :

Search (Ctrl+F)

- Counter Settings
  - Prescaler (PSC - 16 bits value) 0
  - Counter Mode Center Aligned mode1
  - Counter Period (AutoReload Regis... 4000
  - Internal Clock Division (CKD) No Division
  - Repetition Counter (RCR - 8 bits v... 0
  - auto-reload preload Disable
- Trigger Output (TRGO) Parameters
  - Master/Slave Mode (MSM bit) Disable (Trigger input effect not delayed)
  - Trigger Event Selection Reset (UG bit from TIMx\_EGR)
- Break And Dead Time management - BR...
- Break And Dead Time management - Out...
- PWM Generation Channel 1
  - Mode PWM mode 1
  - Pulse (16 bits value) 0
  - Output compare preload Enable
  - Fast Mode Disable
  - CH Polarity High
  - CH Idle State Reset

Vengono attivati gli interrupt di update per entrare nella ISR del timer ogni volta che il conteggio raggiunge 0 o 4001.

NVIC Settings		DMA Settings		GPIO Settings	
Parameter Settings			User Constants		
NVIC Interrupt Table			Ena...	Preemption Pr...	S
TIM1 break interrupt			<input type="checkbox"/>	0	0
TIM1 update interrupt			<input checked="" type="checkbox"/>	0	0
TIM1 trigger and commutation interrupts			<input type="checkbox"/>	0	0
TIM1 capture compare interrupt			<input type="checkbox"/>	0	0

# Modello Convertitore

Il convertitore è simulato con un filtro passa basso del primo ordine che trasforma l'onda quadra del PWM in una tensione pressoché continua, i coefficienti del filtro vengono calcolati come segue:

$$\begin{cases} a = \frac{\tau}{\tau + T_S} \\ b = \frac{T_S}{\tau + T_S} \end{cases} \quad \text{da cui } a = 0.9999922; \quad b = 0.0000078;$$

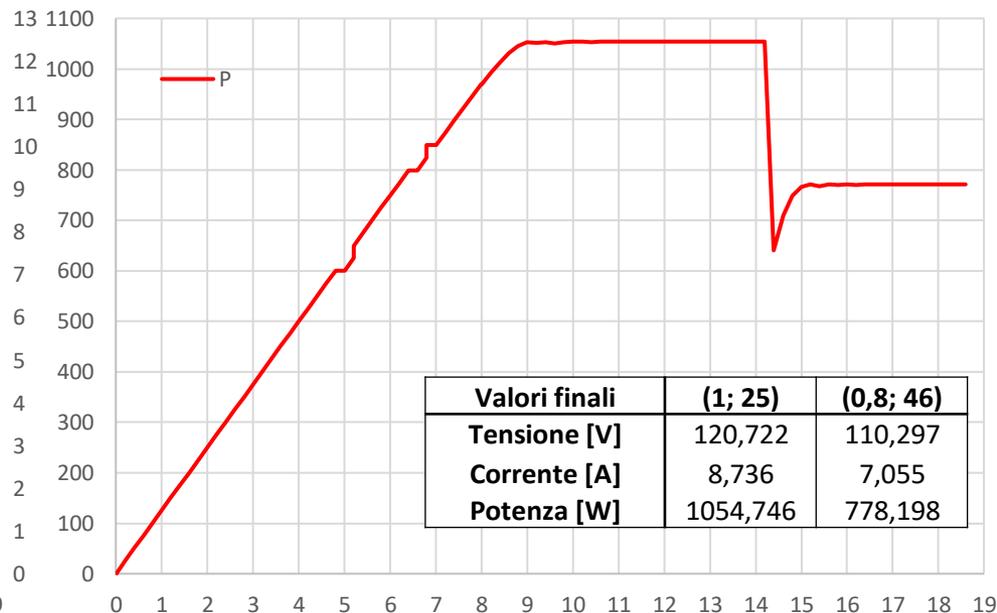
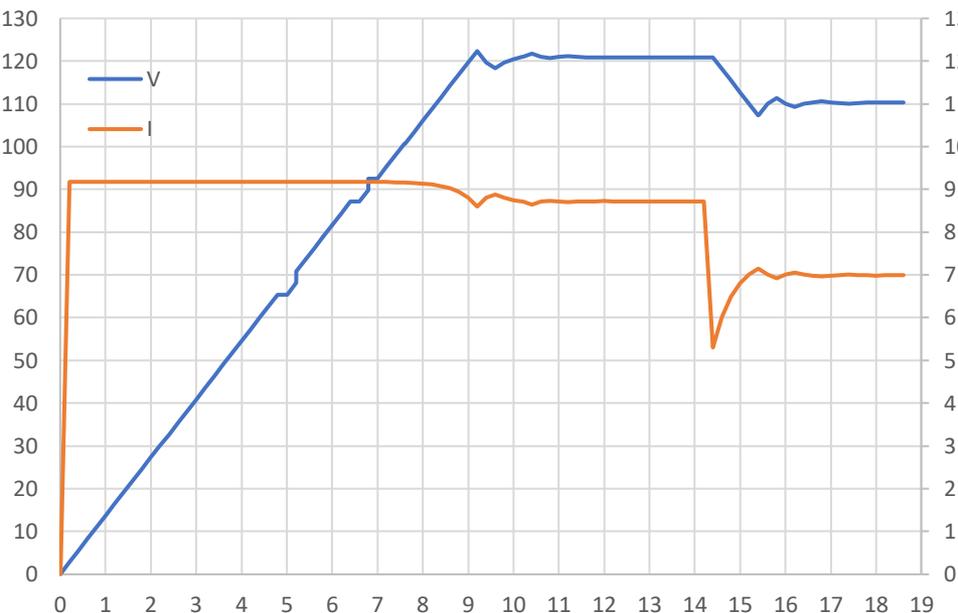
$$\text{Con } \tau = \frac{1}{2\pi \cdot f_t} \text{ e } f_t = 10 \text{ Hz} \quad T_S = 125 \text{ ns}$$

$$V_{in} = ((\text{PORTA} \& 0x0100) \gg 8)$$

$$V_{out} = (b \cdot V_{in}) + (a \cdot V_{out})$$



# Esempi e grafici



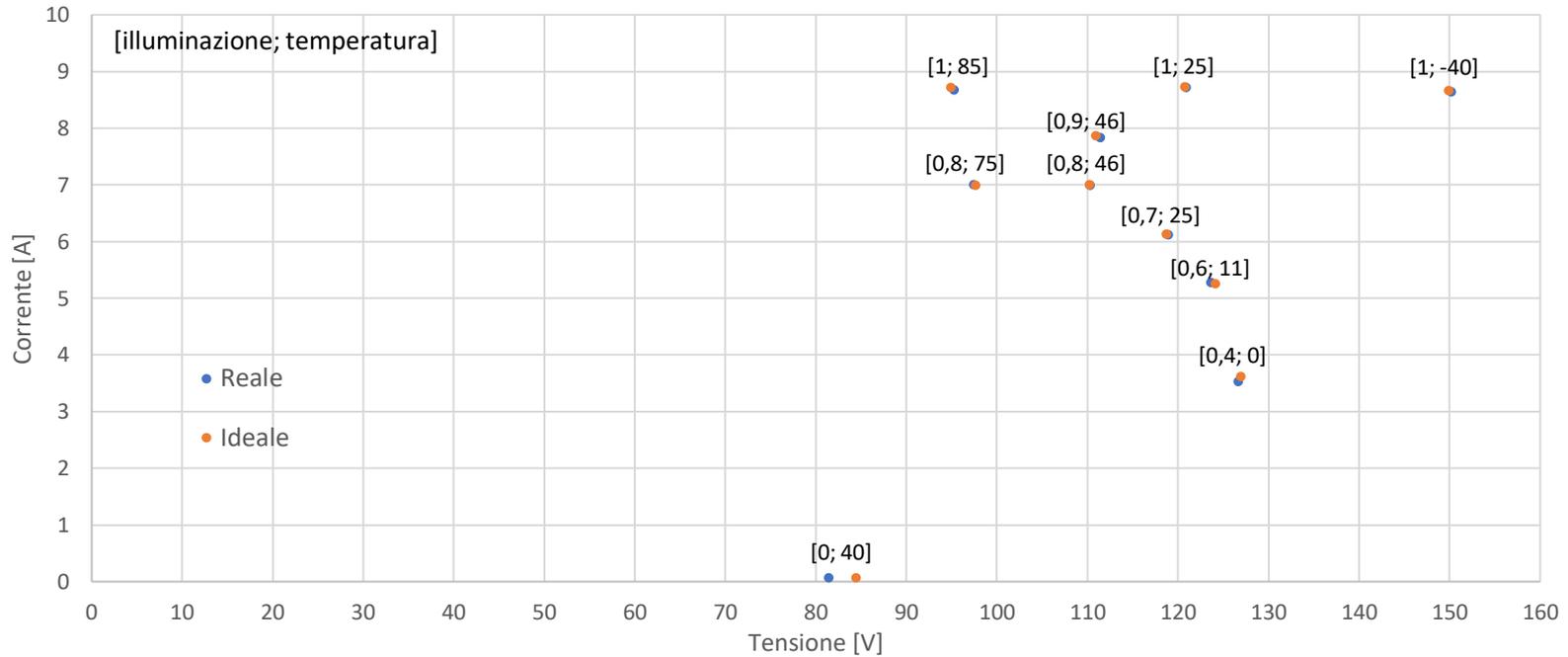
	Voc	Isc	P
(0,8; 46)	129,1761	7,4198	711,4272
(0,8; 75)	116,9138	7,5052	682,2957
TC%	-0.3273	0.0397	-0.3984

$$TCX\% = \frac{X_2 - X_1}{29 \cdot X_1} \cdot 100$$

## Datasheet

CARATTERISTICHE TERMICHE	
NOCT	46°C
TCI	0,040 %/K
TCV	- 0,3%/K
TCP	- 0.41%/K

# Esempi e grafici



G [Sun]	T [°C]	V <sub>mpp</sub> [V]	I <sub>mpp</sub> [A]	P [W]	V <sub>mpp</sub> [V]	I <sub>mpp</sub> [A]	P [W]	ΔV [V]
1	25	120,900	8,723	1054,621	120,768	8,734	1054,792	-0,132
1	-40	150,161	8,644	1298,018	149,881	8,662	1298,364	-0,279
1	85	95,292	8,678	827,043	94,877	8,719	827,281	-0,415
0,8	46	110,317	6,992	771,427	110,208	7,000	771,515	-0,108
0,8	75	97,409	7,004	682,295	97,628	6,989	682,385	0,218
0,9	46	110,857	7,874	872,888	110,938	7,870	873,100	-0,081
0,6	11	123,640	5,274	652,099	124,105	5,256	652,307	0,465
0,7	25	118,950	6,113	727,234	118,690	6,128	727,404	-0,259
0,4	0	126,628	3,527	446,708	126,935	3,622	459,86	0,306
0	40	81,389	0,067	5,474	84,450	0,0654	5,523	3,061

# Conclusioni

- A causa della parametrizzazione sul MPP si ottiene una VOC che si discosta dal valore indicato nel datasheet.
- Anche con match costante la corrente letta dall'ADC può variare a causa di errori dovuti alla sensibilità dell'ADC stesso (2,32 mA).
- Per aumenti di temperatura istantanei ed elevati, la corrente assume valori minori di 0. Il programma legge una corrente nulla che non vede più variare, e l'algoritmo non riesce a determinare il nuovo MPP.
  
- I risultati sperimentali si avvicinano molto a quelli teorici.

## **Possibili Sviluppi futuri:**

- Tener conto di  $R_s$  e  $R_{SH}$  per migliorare la curva di parametrizzazione.
- Decidere il valore per la variazione della tensione più adeguato.



## Documenti:

- Review of the maximum power point tracking algorithms for stand-alone photovoltaic systems (V. Salas, E. Olías, A. Barrado, A. Lázaro)
- Comparison of Photovoltaic Array Maximum Power Point Tracking Techniques (Trishan Eram, Student Member, IEEE, and Patrick L. Chapman, Senior Member, IEEE)

## siti e datasheet:

- <https://www.pveducation.org>
- [http://www.keil.com/support/man/docs/uv4/uv4\\_df\\_signalfunctions.htm](http://www.keil.com/support/man/docs/uv4/uv4_df_signalfunctions.htm)
- [Pannelli fotovoltaici, datasheet e caratteristiche - Nowatech impianti a energia solare](#)