



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

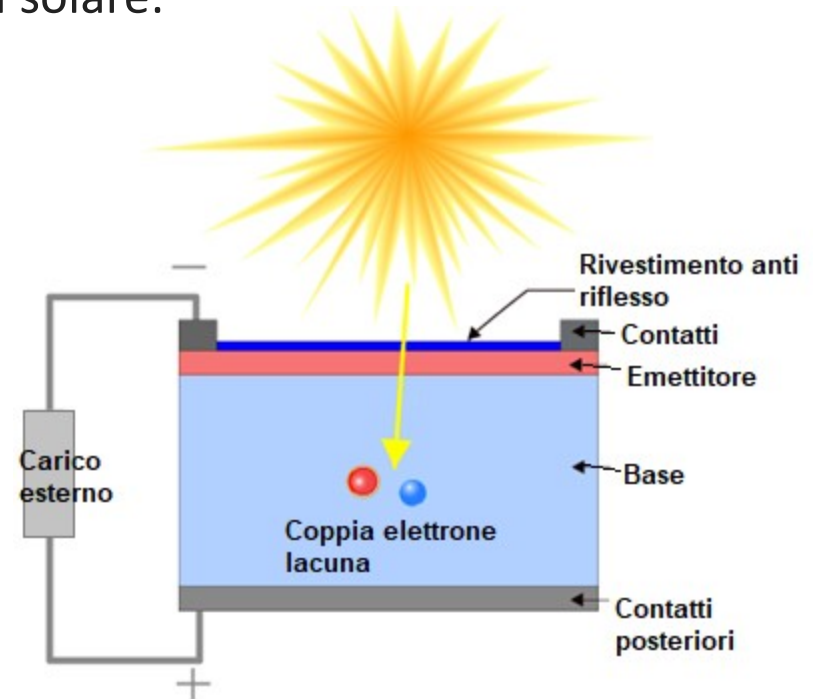
Bibliografia

Introduzione

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

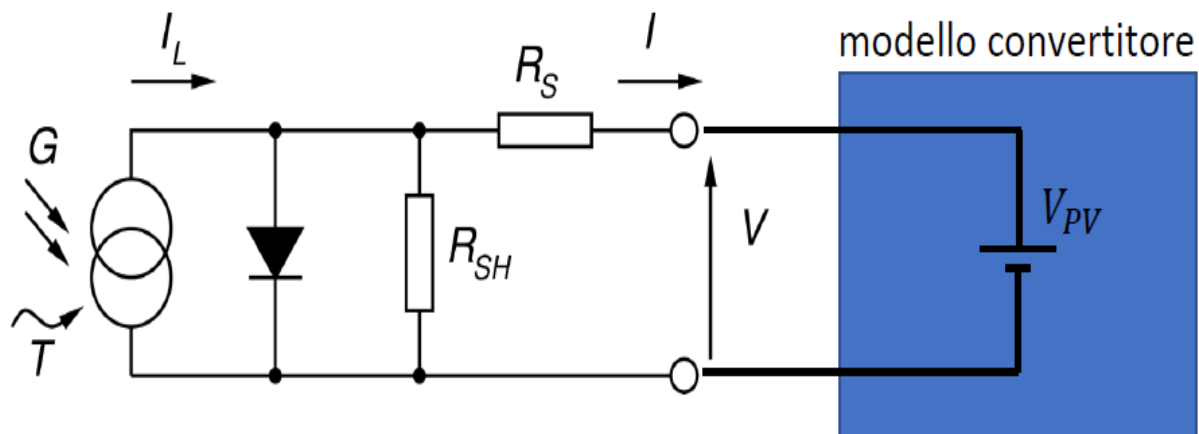
Punti necessari al funzionamento di una cella solare:

- 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

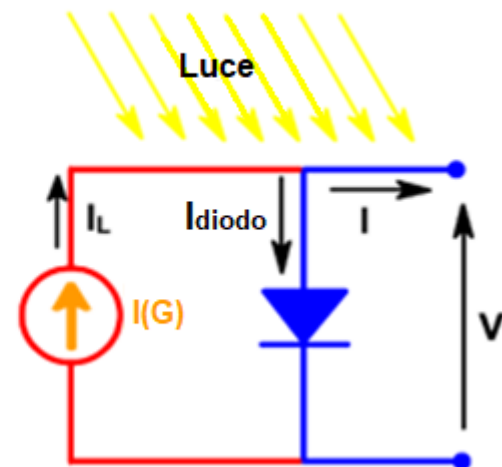
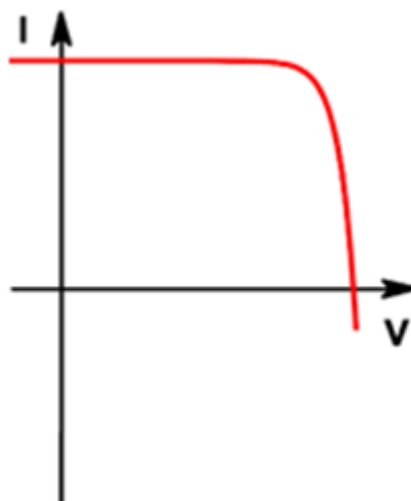
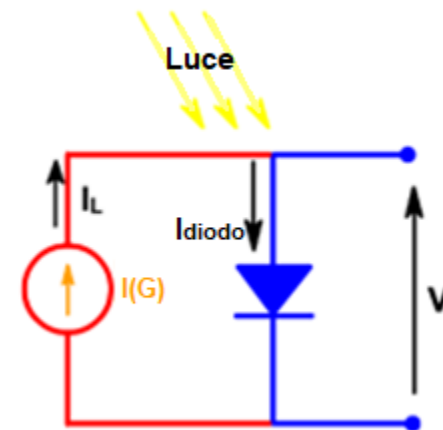
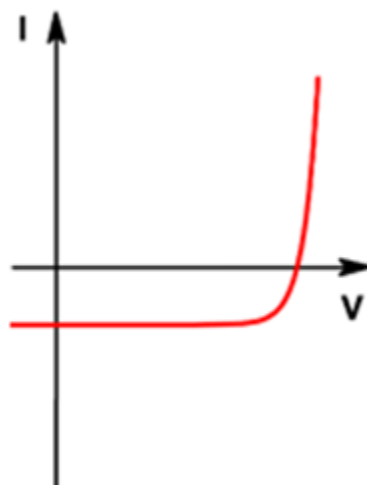
- Il generatore di corrente modella la **corrente generata dalla luce**
- Le resistenze R_S e R_{SH} sono legate alle **perdite** (resistenze delle regioni p-n, di contatto...)
- Il diodo simula il comportamento in condizioni di **oscurità**
- Il Modello convertitore **imposta il punto di lavoro**



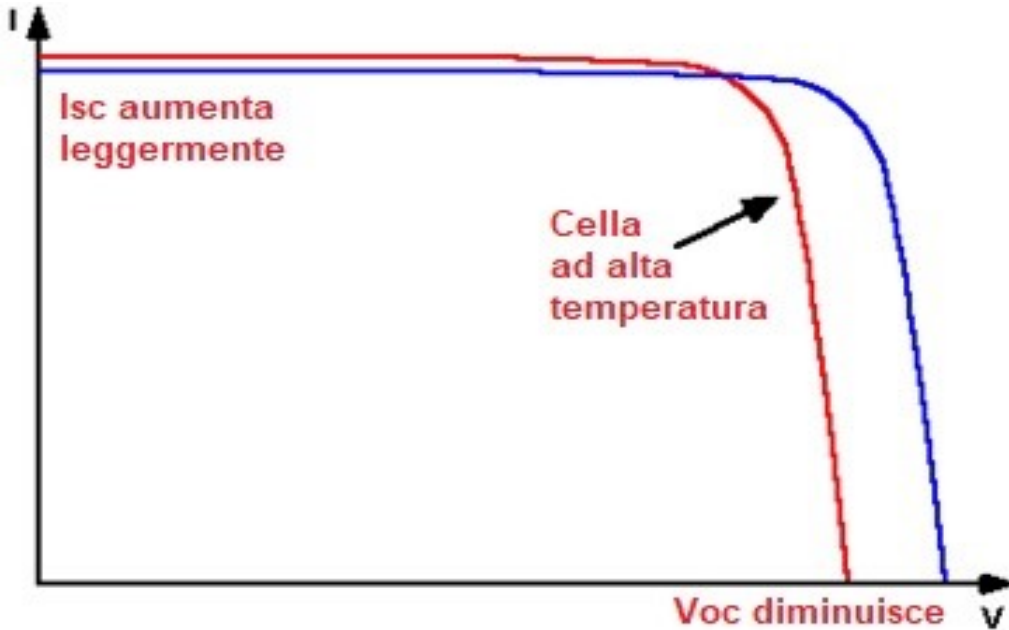
Curva IV

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



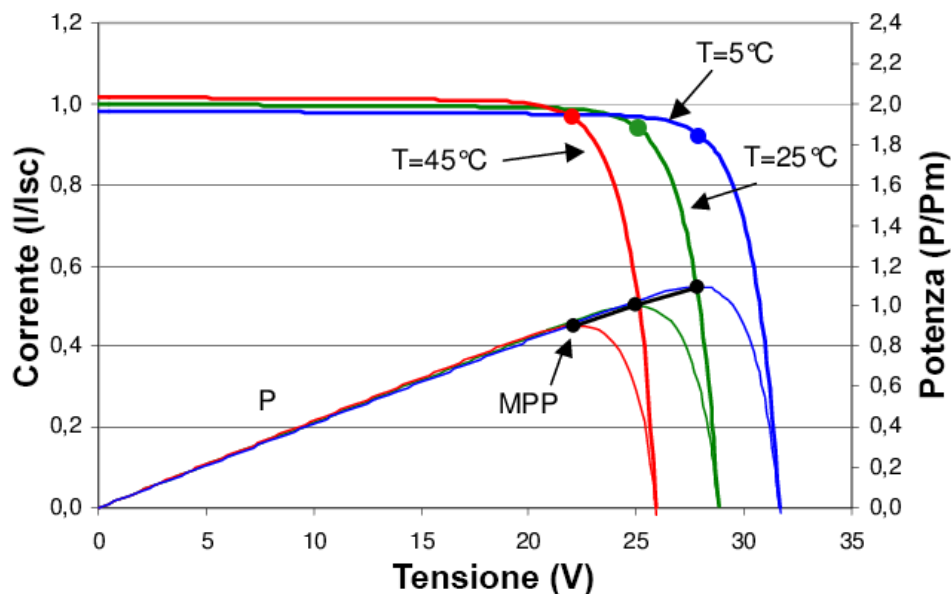
L'aumento della temperatura **riduce il bandgap** del semiconduttore, influenzando in particolare Voc ed Isc

Per celle in silicio:

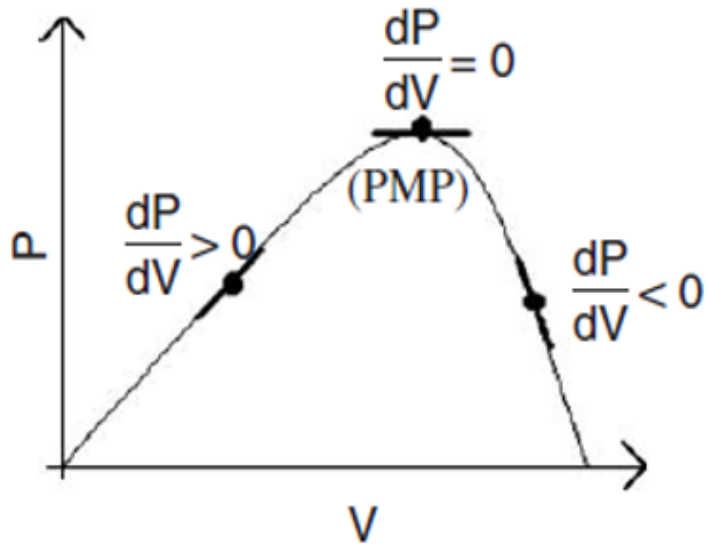
- La tensione di circuito aperto (Voc) decresce di circa $2.2\text{mV}/^\circ\text{C}$
- La corrente di corto circuito (Isc) aumenta di circa $0,6\text{ mA}/^\circ\text{C}$.

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



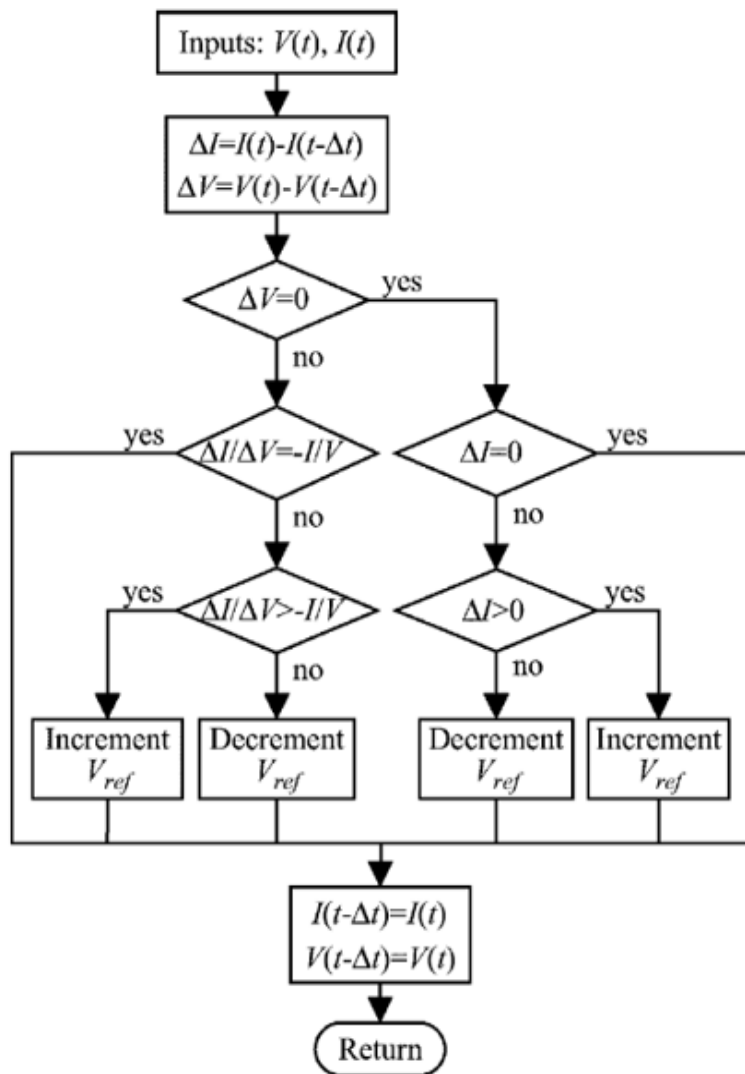
Il metodo della conduttanza incrementale è basato sul fatto che la **pendenza** della curva di potenza è **zero sull'MPP**, positiva alla sua sinistra e negativa alla sua destra. Partendo dalla seguente equazione:

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

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

Conductance incremental method



Il flowchart schematizza l'algoritmo C.I. implementato sul microcontrollore, con:

- V_{ref} : tensione di riferimento
- $V(t)$ e $I(t)$: tensione e corrente istantanee
- $\Delta V, \Delta I$: approssimazione delle derivate
- $\Delta I / \Delta V$: conduttanza incrementale
- I/V : conduttanza istantanea

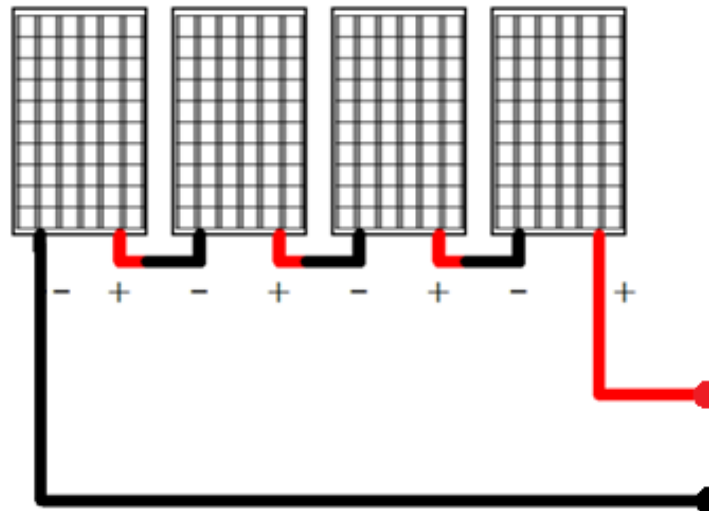
Richieste

- 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:

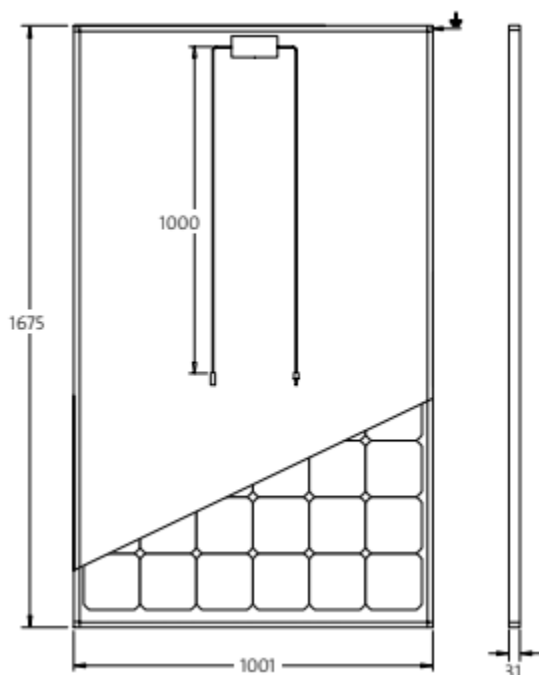
- Tensione a vuoto $\rightarrow N \cdot V_{oc} = 4 \cdot 38.9 = \mathbf{155.6 \text{ V}}$
- Potenza nominale $\rightarrow N \cdot V_{MPP} \cdot I_{MPP} = 4 \cdot 30.7 \cdot 8.56 = \mathbf{1051 \text{ W}}$



4 Pannelli Sunmodule Plus SW 260-280 mono

| COMPORTAMENTO A 1000 W/M ² , 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 ² , 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 ³ |
| Numero dei diodi di bypass | 3 |
| Temperatura di esercizio ammessa | - 40°C a +85°C |

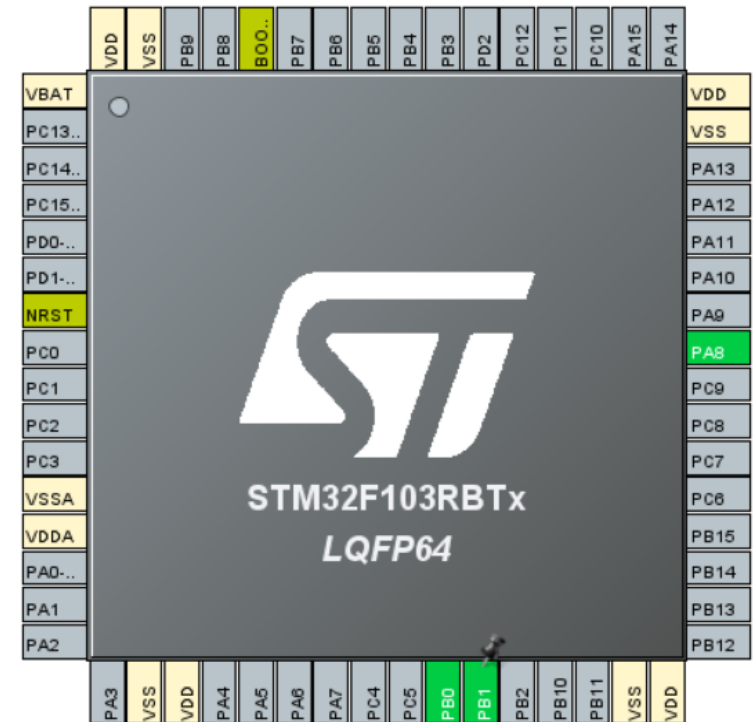
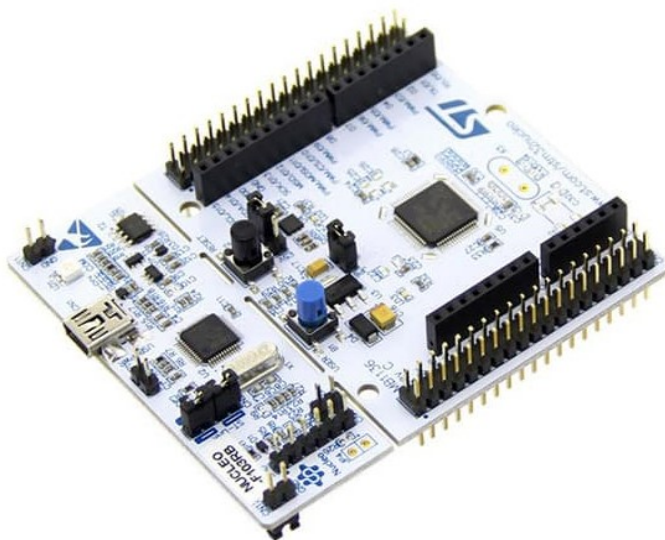
[Datasheet](#)

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

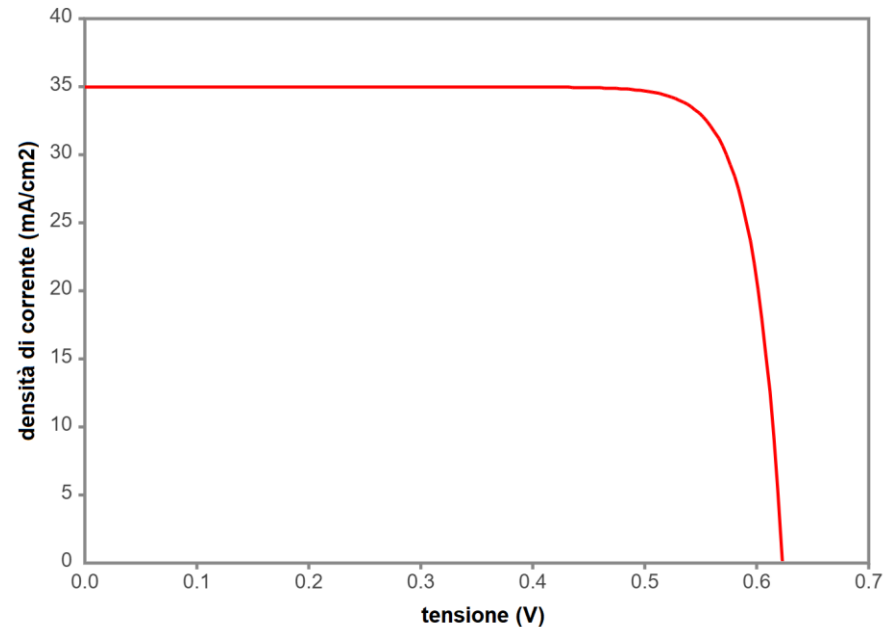
I_0 = corrente di saturazione

q = carica dell'elettrone

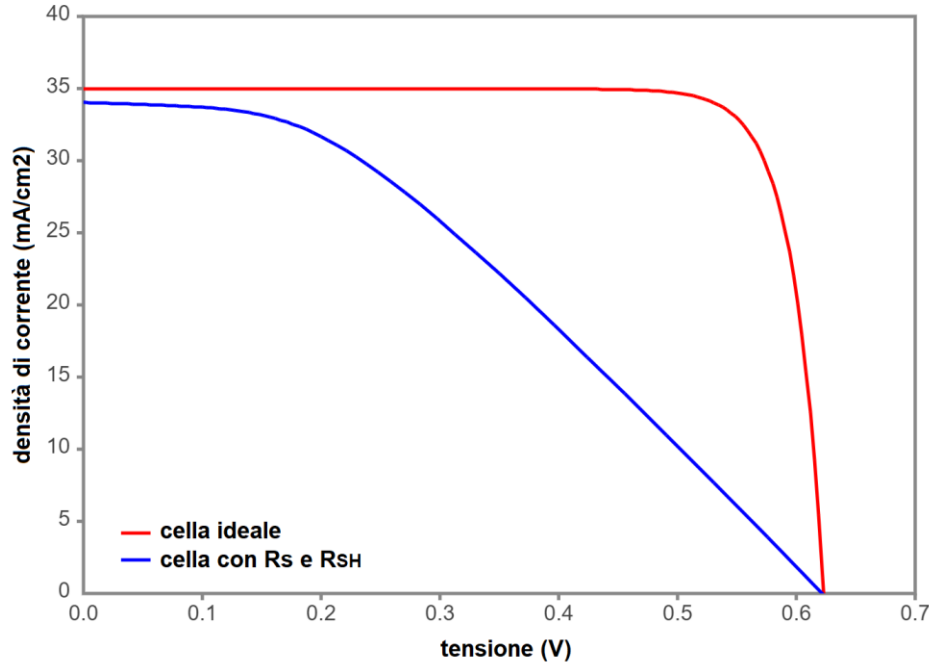
n = fattore di idealità

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

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

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

ΔT 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:

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

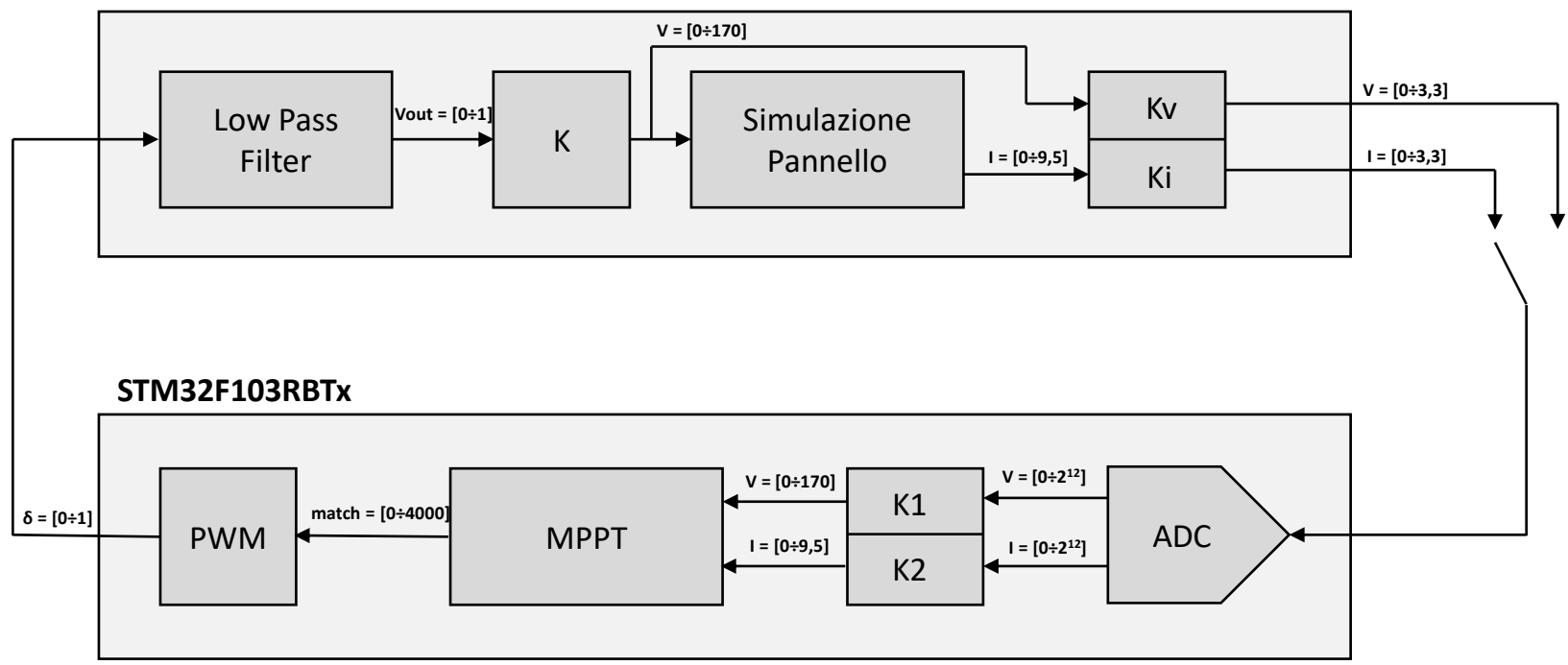
Thermalvoltage è una variabile utilizzata nel codice, e corrisponde a:

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

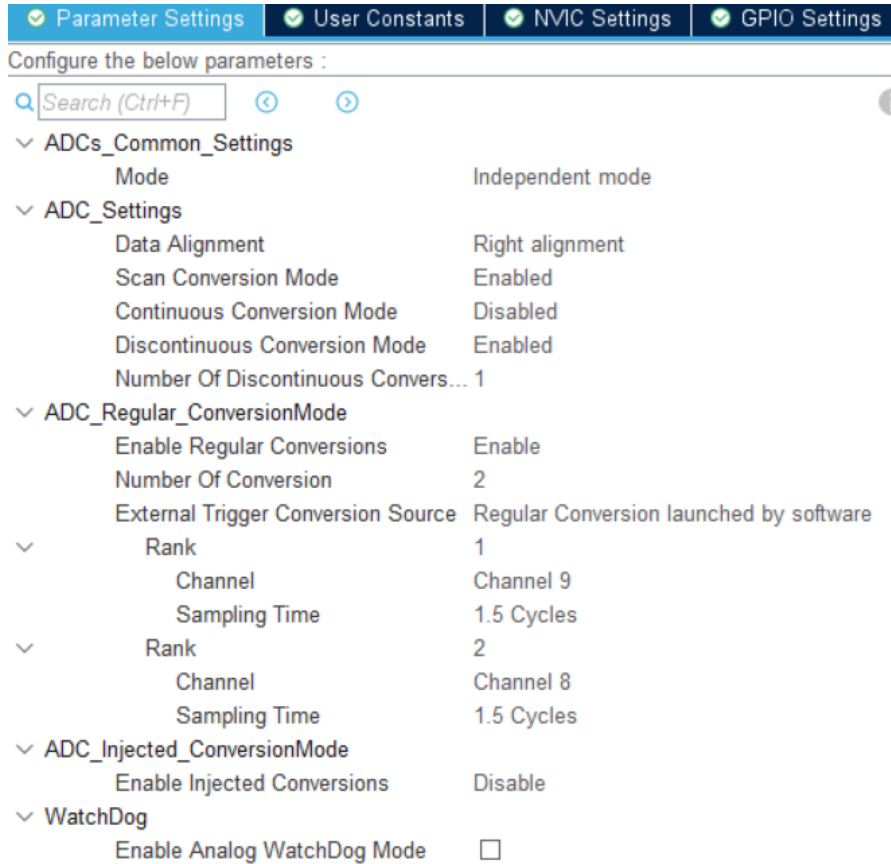


Schema a blocchi e periferiche

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)'. 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:

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

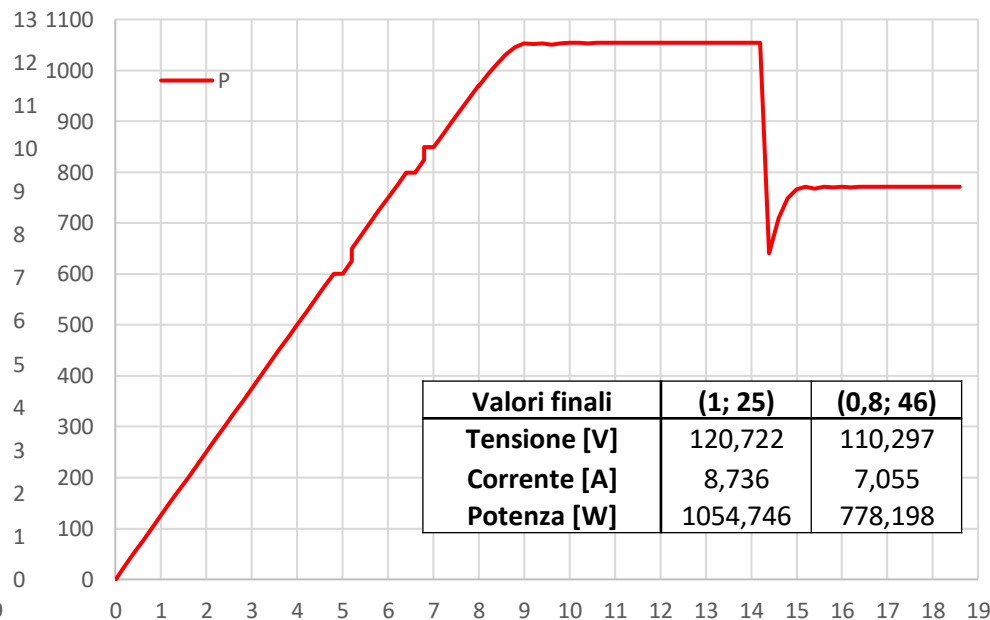
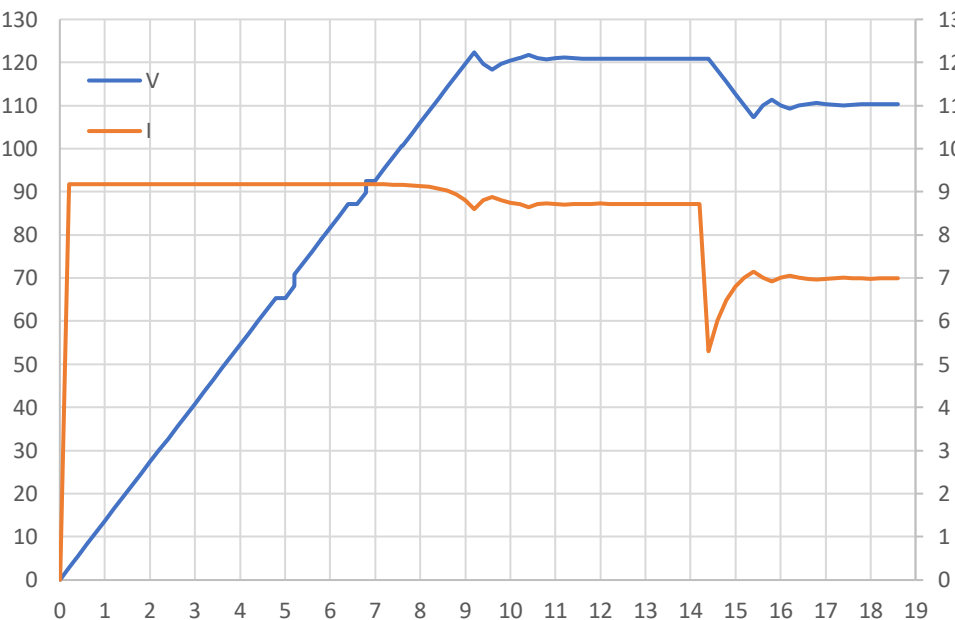
$$\text{Con } \tau = \frac{1}{2\pi \cdot f_t} \text{ e } f_t = 10 \text{ Hz} \quad T_S = 125 \text{ ns}$$

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

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



Esempi e grafici



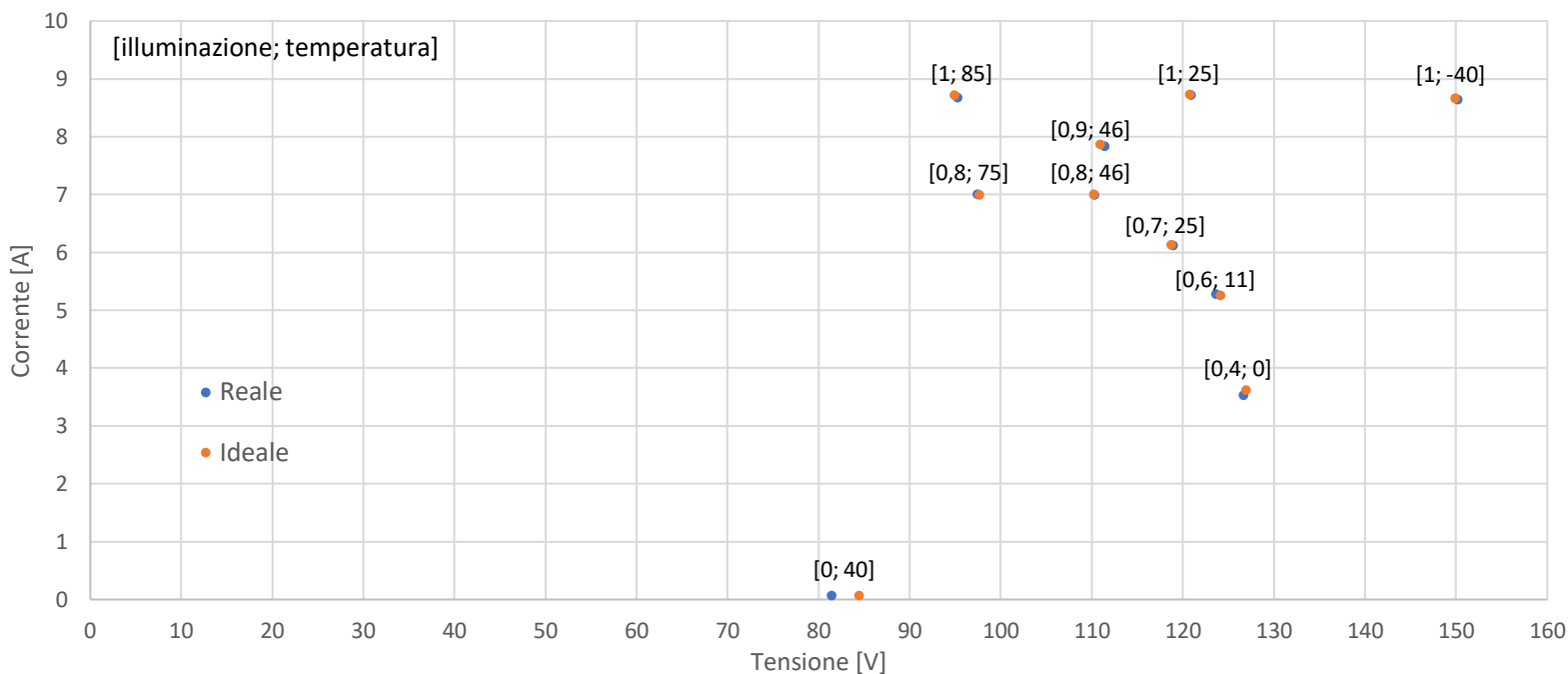
| | Voc | Isc | P |
|-----------|----------|--------|----------|
| (0,8; 46) | 129,1761 | 7,4198 | 711,4272 |
| (0,8; 75) | 116,9138 | 7,5052 | 682,2957 |
| TC% | -0.3273 | 0.0397 | -0.3984 |

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

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 _{mpp} [V] | I _{mpp} [A] | P [W] | V _{mpp} [V] | I _{mpp} [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
- [Pannelli fotovoltaici, datasheet e caratteristiche - Nowatech impianti a energia solare](#)