

1222 • 2022  
**800**  
ANNI



UNIVERSITÀ  
DEGLI STUDI  
DI PADOVA



**UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA**

DIPARTIMENTO DI TECNICA E GESTIONE DEI SISTEMI INDUSTRIALI  
CORSO DI LAUREA TRIENNALE IN INGEGNERIA MECCATRONICA

PROGETTO DI TESI LAUREA TRIENNALE

---

## **Sviluppo di un sistema MPPT per applicazioni fotovoltaiche mediante microcontrollore**

*Relatore*

Magnone Paolo

*Correlatore*

Caldognetto Tommaso

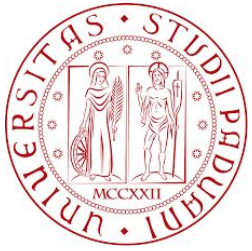
*Laureandi*                      *matricola*

Alberti Pietro                      1217791

Ambrosi Davide                      1219563

Cassinelli Filippo                      1219160

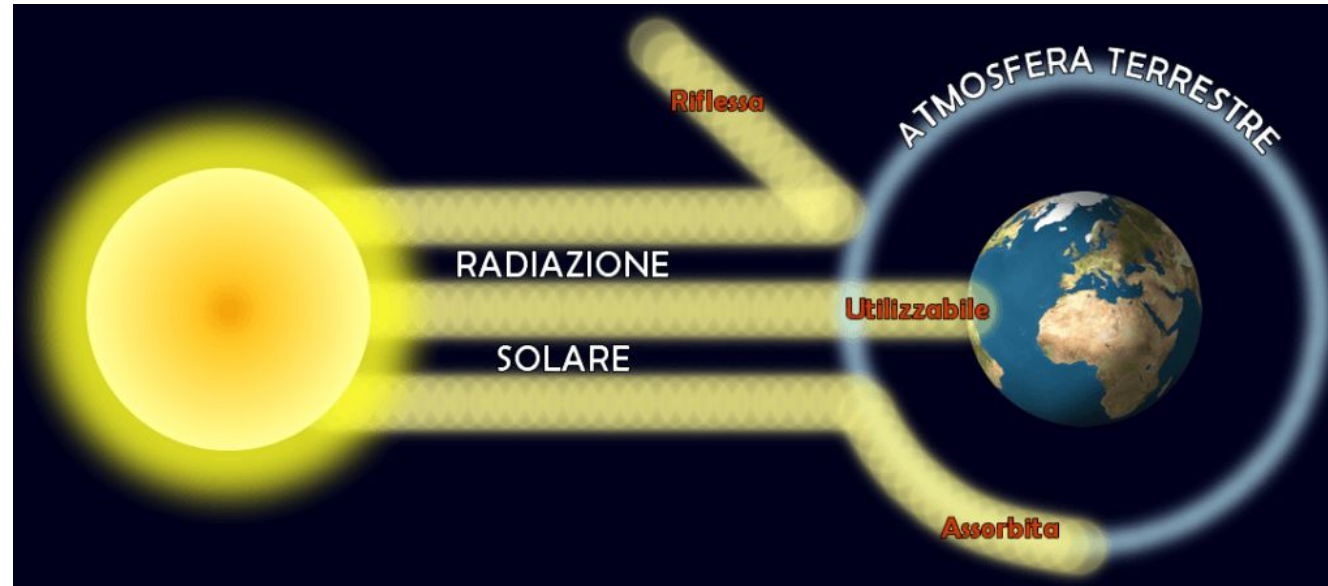
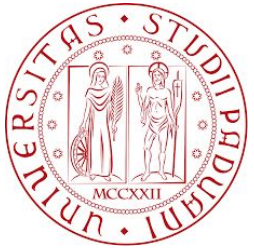
Veneri Leonardo                      1218954



# Sommario

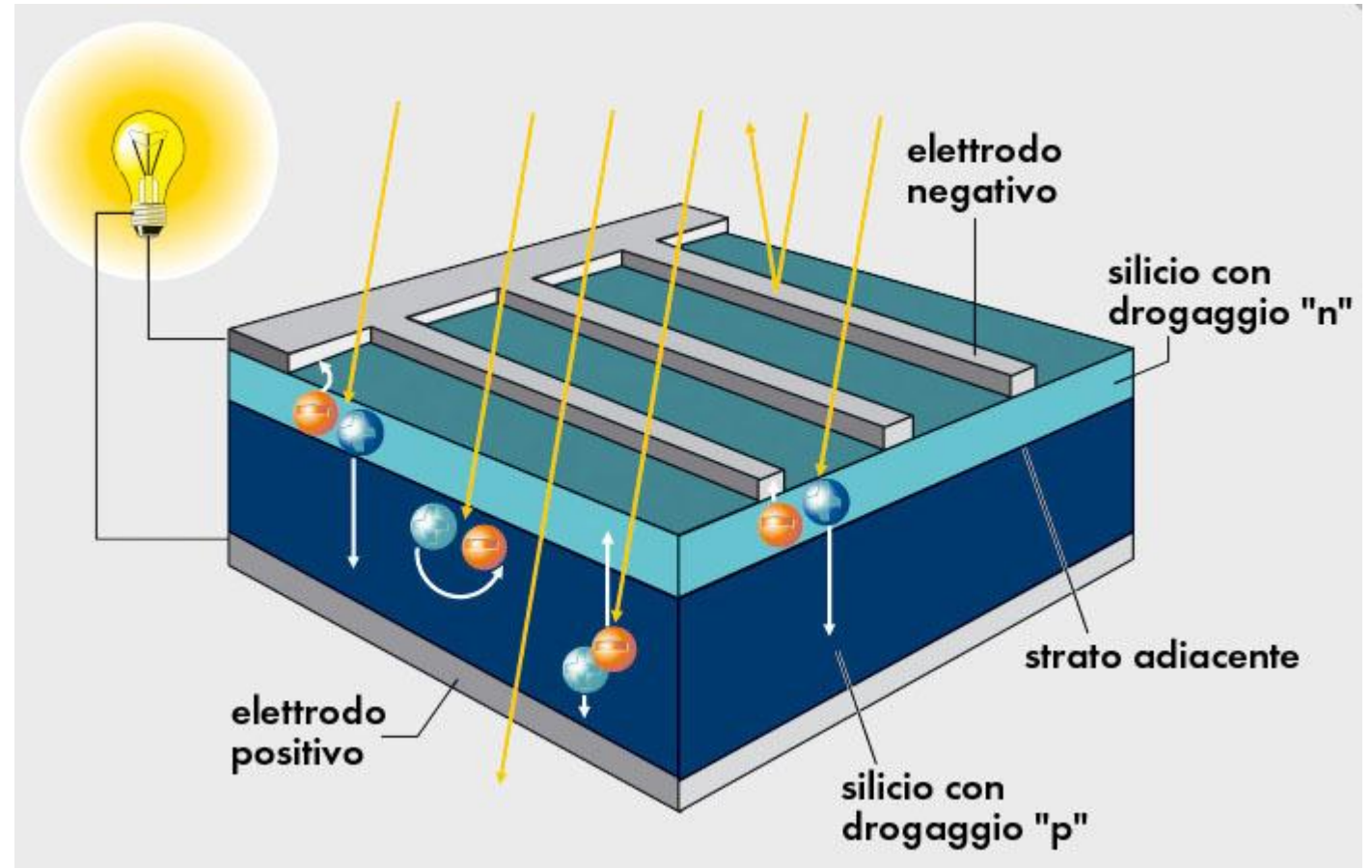
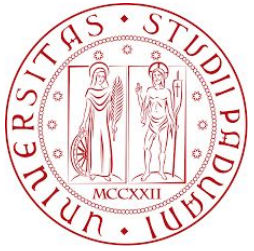
1. Introduzione
2. Modello elettrico
3. Modello termico
4. Schema del sistema complessivo
5. Impostazione periferiche su uC
6. File C di simulazione del pannello
7. Algoritmo MPPT
8. Codice implementato su uC
9. Salvataggio storico dati
10. Grafici ottenuti
11. Conclusioni

# Energia solare

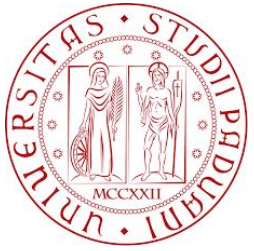


Il sole emette energia sotto forma di onde elettromagnetiche, solo parte di questa raggiunge la superficie terrestre e può essere utilizzata come fonte energetica sostenibile convertendola in elettricità tramite l'utilizzo della tecnologia fotovoltaica.

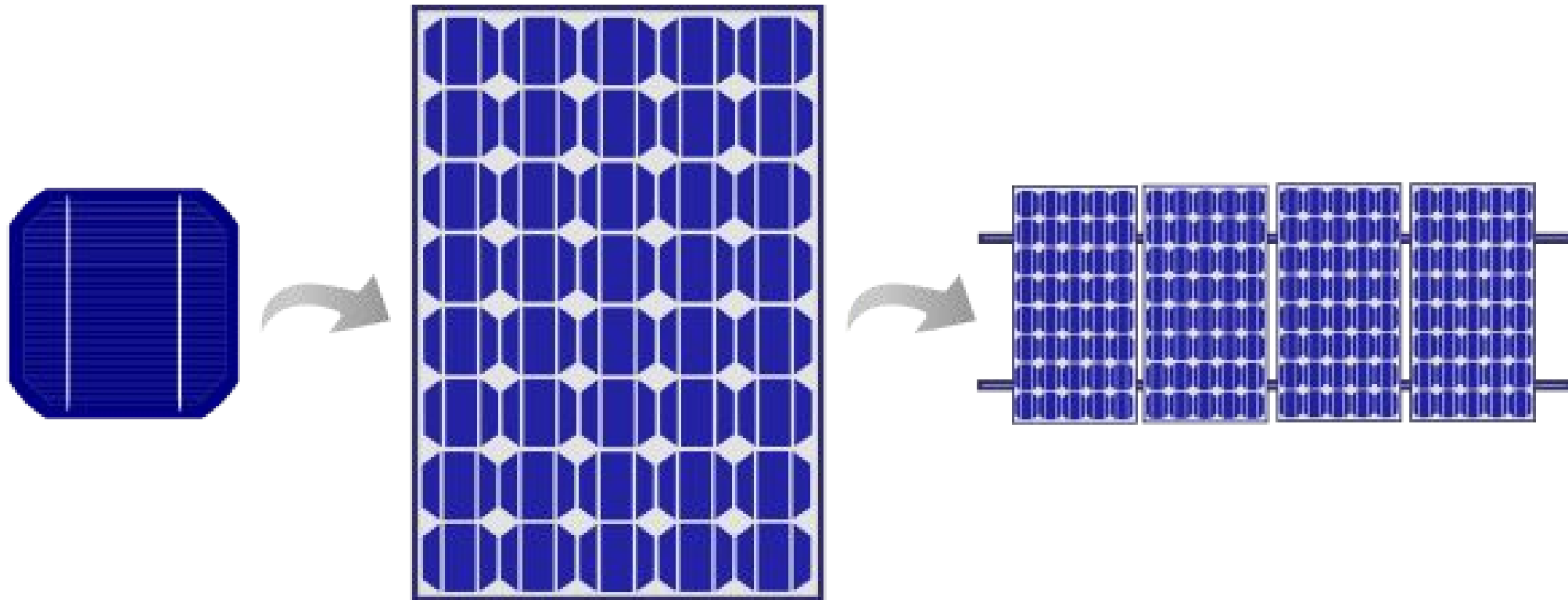
# Cella fotovoltaica



# Cella, modulo e pannello



per ottenere potenze maggiori le celle si possono raggruppare

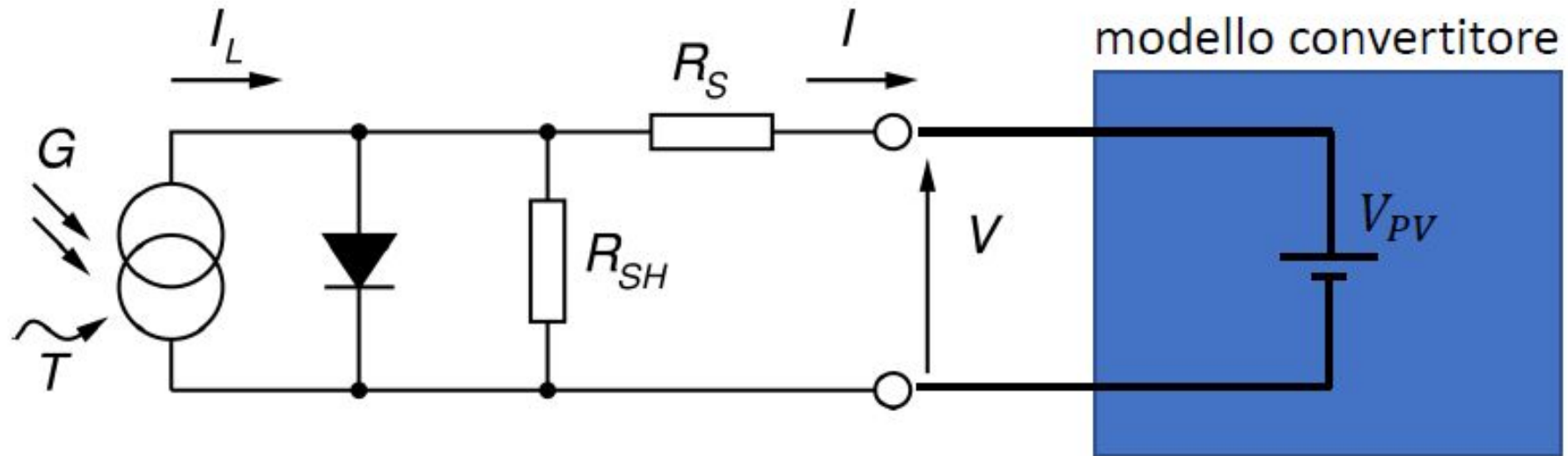


Cella

Modulo

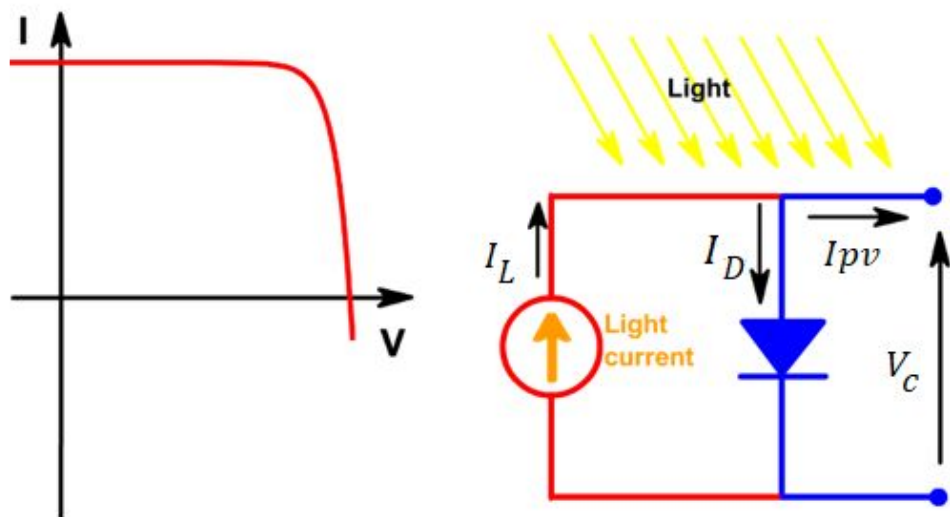
Pannello

# Modello elettrico cella solare



trascuriamo gli effetti delle resistenze

# Modello elettrico cella solare



## Equazione circuito

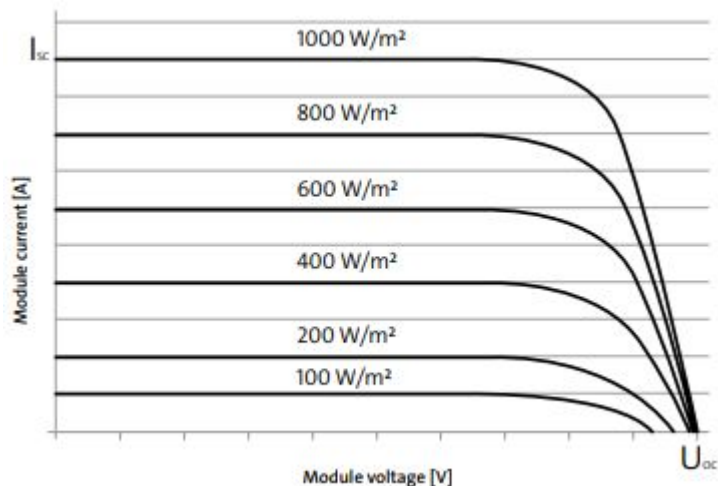
$$I_{pv} = I_L - I_D = I_L - I_0 \exp\left(\frac{qV_c}{n k T} - 1\right)$$

$$I_0 = qA n_i^2 \left(\frac{D_p}{L_p N_D}\right) \quad n_i^2 = B T^3 \exp\left(-\frac{E_g}{k T}\right) \quad I_L = G \cdot K$$

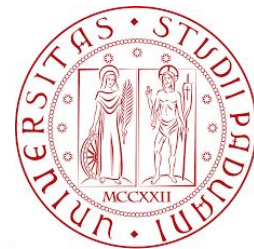


$$I_{pv} = G \cdot K - qA \frac{D_p}{L_p N_D} B T^3 \exp\left(\frac{qV_c - E_g}{kT}\right)$$

$$I_{pv} = G \cdot K - Z T^3 \exp\left(\frac{qV_c - E_g}{kT}\right)$$



si suppone che la corrente fotogenerata sia direttamente proporzionale all'irradianza secondo un coefficiente K



# Datasheet di riferimento

## Sunmodule<sup>®</sup> Plus SW 250 – 255 poly

### COMPORTAMENTO IN CONDIZIONI DI TEST STANDARD (STC\*)

		SW 250	SW 255
Potenza massima	$P_{max}$	250 Wp	255 Wp
Tensione a vuoto	$U_{oc}$	37,6 V	38,0 V
Tensione a massima potenza	$U_{mpp}$	30,5 V	30,9 V
Corrente di cortocircuito	$I_{sc}$	8,81 A	8,88 A
Corrente a massima potenza	$I_{mpp}$	8,27 A	8,32 A

Tolleranza di misurazione ( $P_{max}$ ) riconducibile al TÜV Rheinland: +/- 2% (TÜV Power controlled) \*STC: 1000W/m<sup>2</sup>, 25°C, AM 1.5

### COMPORTAMENTO A 800 W/m<sup>2</sup>, NOCT, AM 1.5

		SW 250	SW 255
Potenza massima	$P_{max}$	185,4 Wp	188,7 Wp
Tensione a vuoto	$U_{oc}$	34,2 V	34,5 V
Tensione a massima potenza	$U_{mpp}$	27,8 V	28,1 V
Corrente di cortocircuito	$I_{sc}$	7,24 A	7,30 A
Corrente a massima potenza	$I_{mpp}$	6,68 A	6,72 A

Limitata riduzione del grado di rendimento anche durante l'utilizzo a carico parziale a 25°C: a 200 W/m<sup>2</sup> si raggiunge il 100% (+/- 2%) del grado di rendimento secondo condizioni di test standard STC (1000 W/m<sup>2</sup>).

$$V_{oc} = 37,6 * 4 = 150,4 V; \quad I_{sc} = 8,81 A; \quad P_{mpp} = V_{mpp_{tot}} * I_{mpp} = (4 * 30,5) * 8,27 = 1008,94 W$$

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \quad \text{con} \quad P_{in} = G * Area_{cella} * 60 \text{ celle} = 1000 \frac{W}{m^2} (156 * 10^{-3} m)^2 * 60 = 1460,16 W \quad \text{quindi} \quad \eta = 17\%. \quad 8$$

### DIMENSIONI

Lunghezza	1675 mm
Larghezza	1001 mm
Altezza	31 mm
Intelaiatura	alluminio anodizzato argentato
Peso	21,2 kg

### CARATTERISTICHE TERMICHE

NOCT	46 °C
TC $I_{sc}$	0,051 %/K
TC $U_{oc}$	-0,31 %/K
TC $P_{mpp}$	-0,41 %/K

### CARATTERISTICHE TERMICHE

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

### MATERIALI IMPIEGATI

Celle per modulo	60
Tipo di cella	Policristallino
Dimensioni della cella	156 mm x 156 mm
Lato anteriore	4 mm vetro temperato (EN 12150)

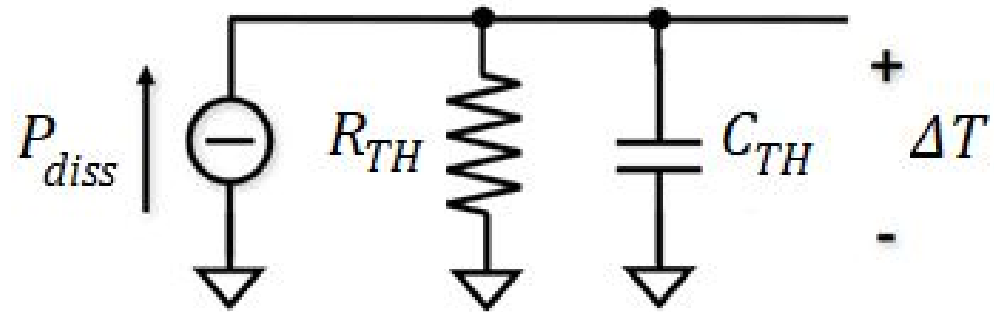
### ULTERIORI DATI

Classificazione di potenza	-0 Wp / +5 Wp
Scatola di connessione	IP65
Connettore	MC4 / KSK4



# Modello termico cella (Cth)

## Modello elettrico equivalente



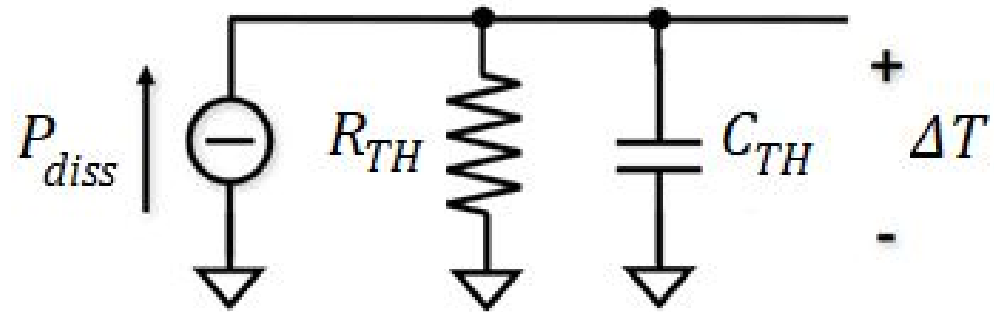
ipotizzando che lo spessore di una cella sia pari a 0.3 mm e che essa sia composta da silicio puro, avente calore specifico  $C_s = 700 \frac{J}{Kg K}$ , possiamo ottenere una stima della capacità termica:

$$M = \rho \cdot Vol = 2328 \frac{Kg}{m^3} \cdot (156 \cdot 10^{-3})^2 \cdot 0.3 \cdot 10^{-3} m^3 = 0,016996 Kg$$

$$C_{th} = C_s \cdot M = 12 J/K$$

# Modello termico cella (Rth)

## Modello elettrico equivalente



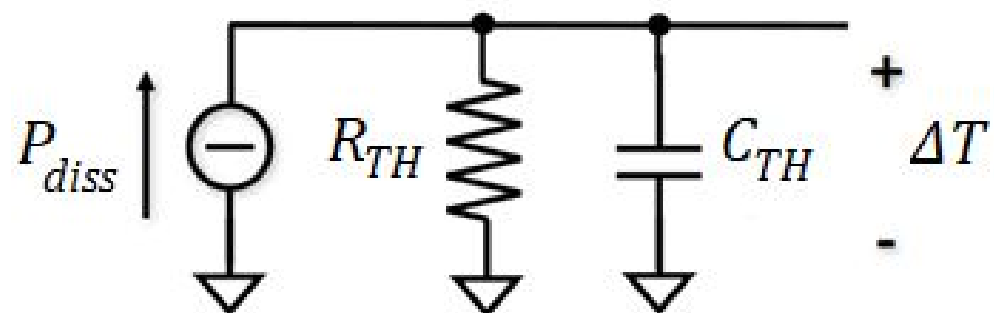
Nelle condizioni NOCT (Nominal Operating Cell Temperature), la temperatura a regime da datasheet risulta essere pari a 46°C, la temperatura ambiente di 20°C e  $G=0.8$  sun. Dunque si può calcolare la resistenza termica:

$$P_{diss} R_{th} = \Delta T \rightarrow R_{th} = \frac{\Delta T}{P_{diss}} = \frac{26^{\circ}\text{C}}{G \cdot 1000 \cdot Area_{cella} \cdot (1 - \eta)} = 1,61 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{W}}$$

$$\tau_{th} = R_{th} \cdot C_{th} = 19,32 \text{ s}$$

# Equazione del modello termico

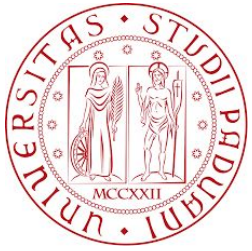
## Modello elettrico equivalente



$$\Delta T = H(s) \cdot P_{diss}$$

$$H(s) = \frac{R_{th}}{1 + s\tau_{th}} \quad \xrightarrow{s = \frac{1-z^{-1}}{T_s}} \quad \Delta T(k) = \frac{\tau_{th}}{\tau_{th} + T_s} \Delta T(k-1) + \frac{T_s}{\tau_{th} + T_s} R_{th} P_{diss}(k)$$

# Calcolo di Z



$$I_{pv} = G \cdot K - Z T^3 \exp\left(\frac{qV_c - E_g}{kT}\right)$$

Considerando la prima tabella del datasheet, alle condizioni di comportamento standard al punto di massima potenza, possiamo ottenere:

$$I_{pv}=8,27 \text{ A}; \quad G=1 \text{ sun}; \quad K=8,81 \text{ A/sun}; \quad V_{pv}=30,5 \text{ V}; \quad V_c=V_{pv}/60=0,5083 \text{ V}; \quad T_0=25^\circ\text{C};$$

Utilizzando invece il modello termico si può ottenere la temperatura di esercizio della cella (T) a regime:

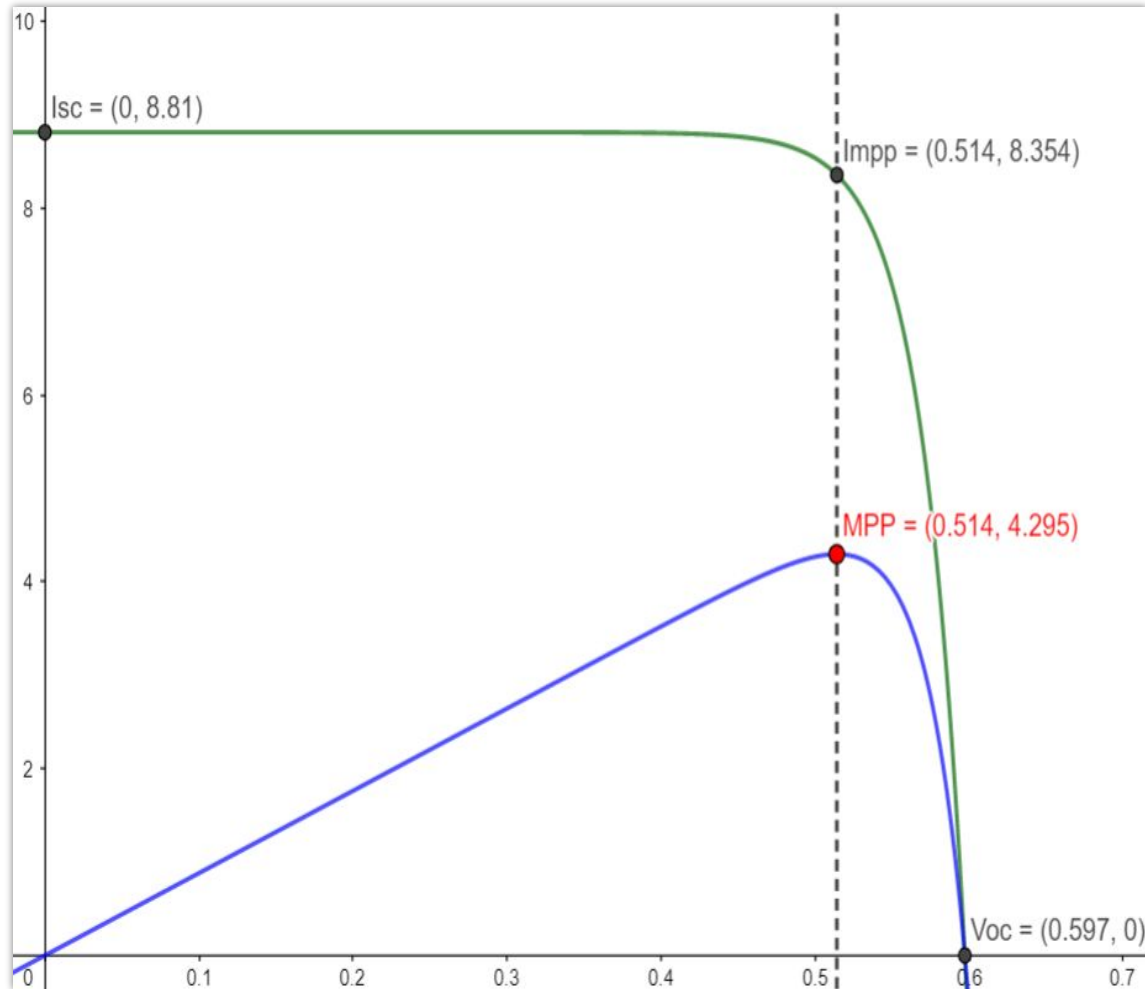
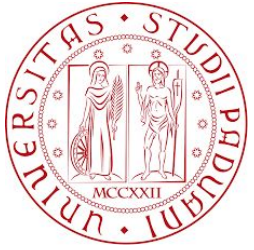
$$T = T_o + \Delta T \text{ e } \Delta T = P_{diss} R_{th} = G \cdot 1000 \cdot Area_{cella} \cdot (1 - \eta) \cdot R_{th} = 32,52^\circ\text{C} \rightarrow T = 57,52 = 330,67 \text{ K.}$$

Sostituendo questi valori nell'equazione del modello elettrico si può calcolare il valore di Z

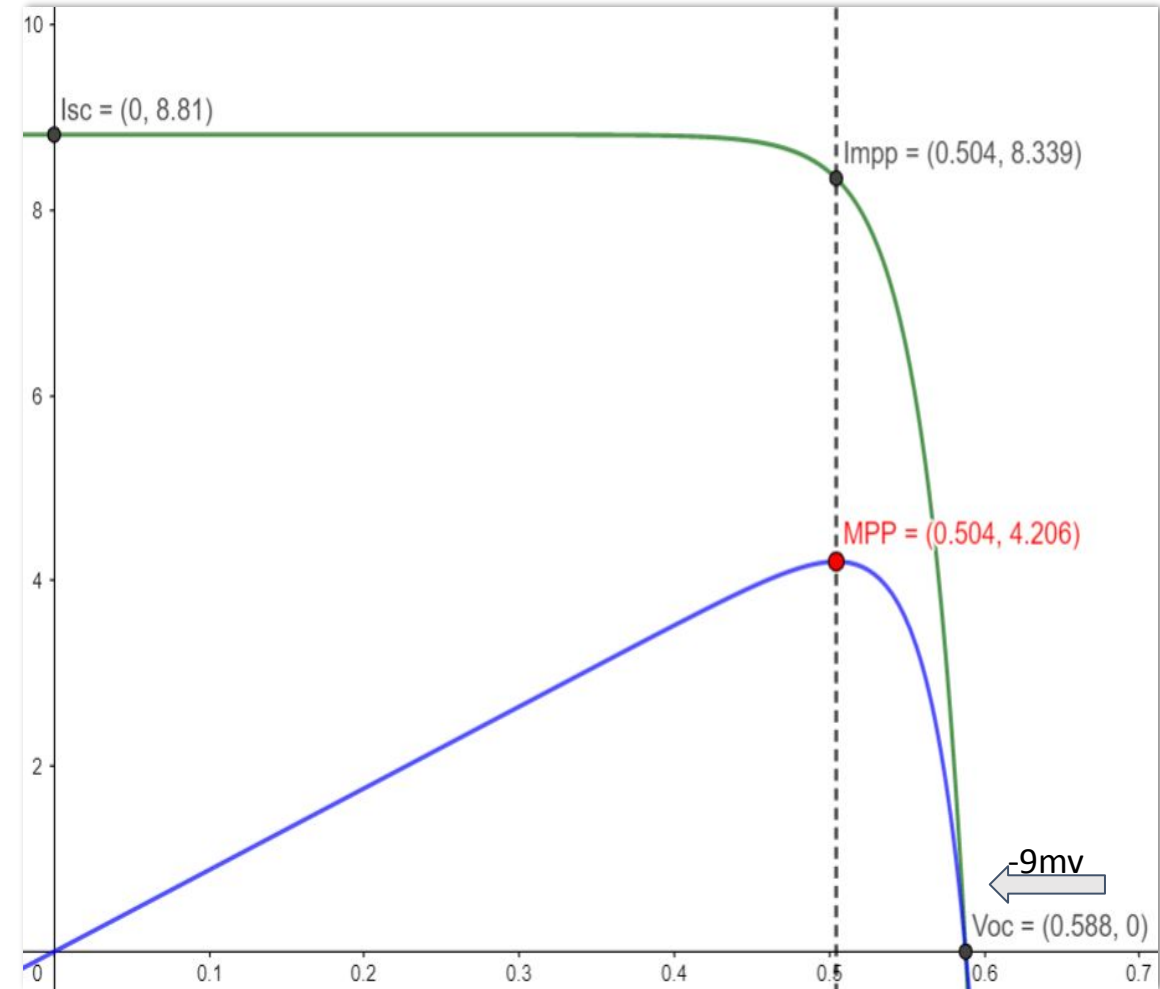
$$8,27 = 8,81 - Z 0,01483 \rightarrow Z \cong 36,4127$$

# Transcaratteristica cella(V-I)

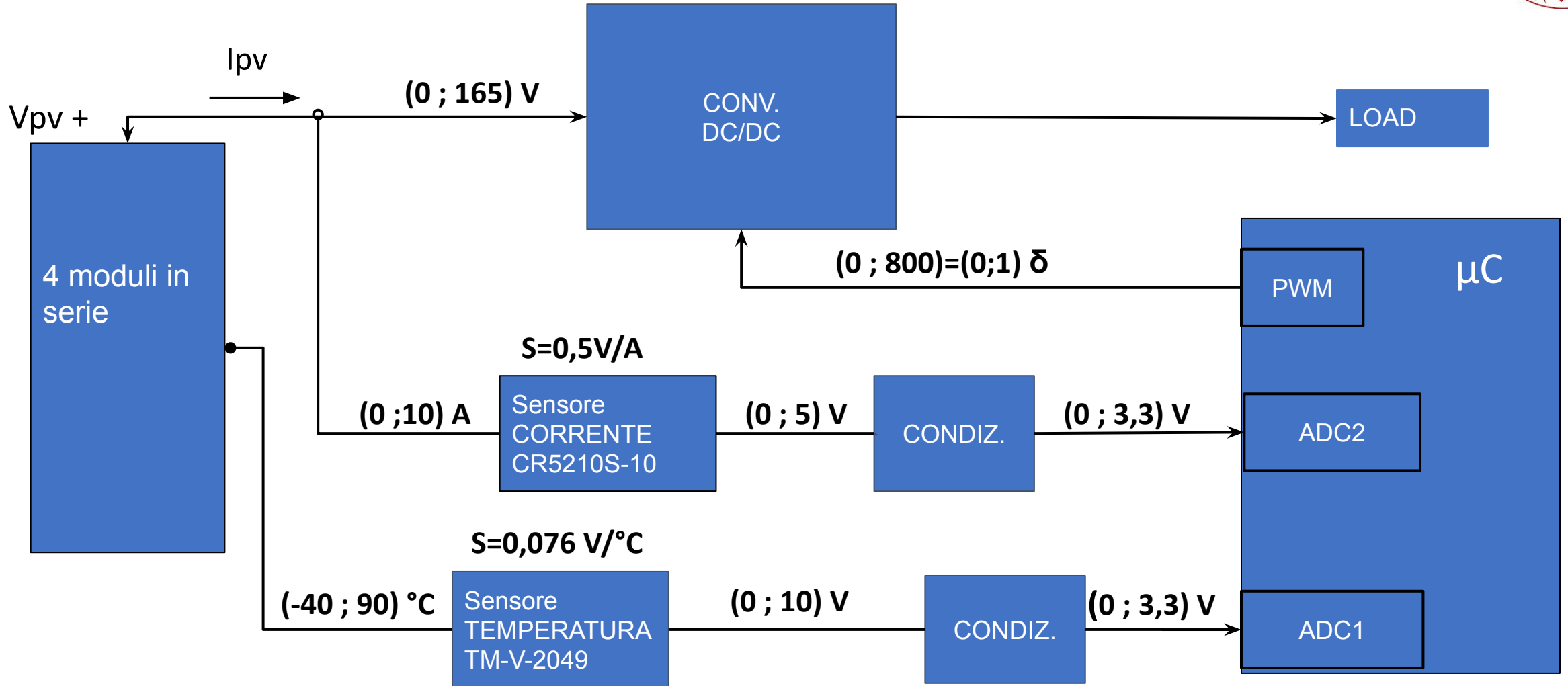
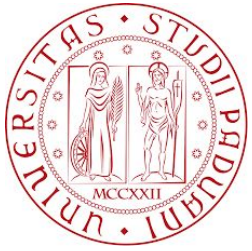
$$I_{pv} = G \cdot K - Z T^3 \exp\left(\frac{qV_c - E_g}{kT}\right)$$



+5 K →



# Schema a blocchi del sistema complessivo



# Sensori utilizzati



## Sensore di temperatura

Tm-V-4090

PT 1000 Classe A



**Input Range** = (-40;90)[°C]

**Output Range** = (0;10)[V]

## Sensore di corrente

CR5210S-10

Effetto Hall



**Input Range** = (0;10)[A]

**Output Range** = (0;5)[V]

Si definiscono i coefficienti per l'adattamento di scala:

$$K_{senseI} = \frac{OR(I)}{IR(I)} = 0.5 V/A$$

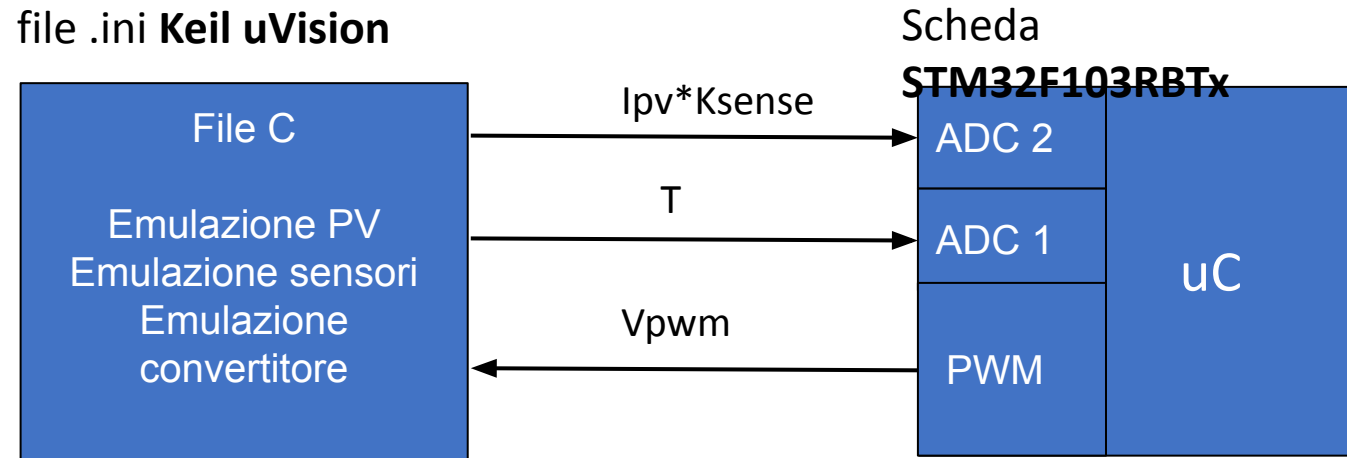
$$KI = \frac{RANGE_{ADC}}{OR(I)} = 0.66 V/V$$

$$K_{senseT} = \frac{OR(T)}{IR(T)} = 0.077 V/C^{\circ}$$

$$V_{senseT} = 40 \cdot K_{senseT} = 3.077V$$

$$KT = \frac{RANGE_{ADC}}{OR(T)} = 0.33 V/V$$

# Modello di simulazione



$$K_{sense} = K_{sense1} * KI = 0.33 V/A$$

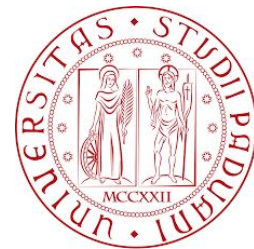
## Ambienti di sviluppo utilizzati:

- Keil uVision
- STM32CubeMX

## Principali periferiche del uC utilizzate:

- ADC2\_IN9 per campionamento valori corrente
- ADC1\_IN6 per campionamento valori temperatura
- Timer 2 in modalità PWM generation





# Impostazione periferiche su STM32MX

## ADC1 (Salvataggio Dati)

regular conversion, launched by software  
interrupt enable

## ADC2 (corrente) (NVIC)

external trigger conversion source: timer3 trigger out event  
interrupt enable

## TIMER 2 pin PA0 (NVIC)

mode configuration  
clock source: internal clock  
channel 1: **PWM** Generation CH1  
counter period: 800  
PWM generation channel 1, PWM Edge Aligned

## TIMER 1 (NVIC)

16 bit

mode configuration

clock source: internal clock

prescaler: 21818

counter period: 65535

## TIMER 3

16bit

mode configuration

clock source: internal clock

prescaler: 12

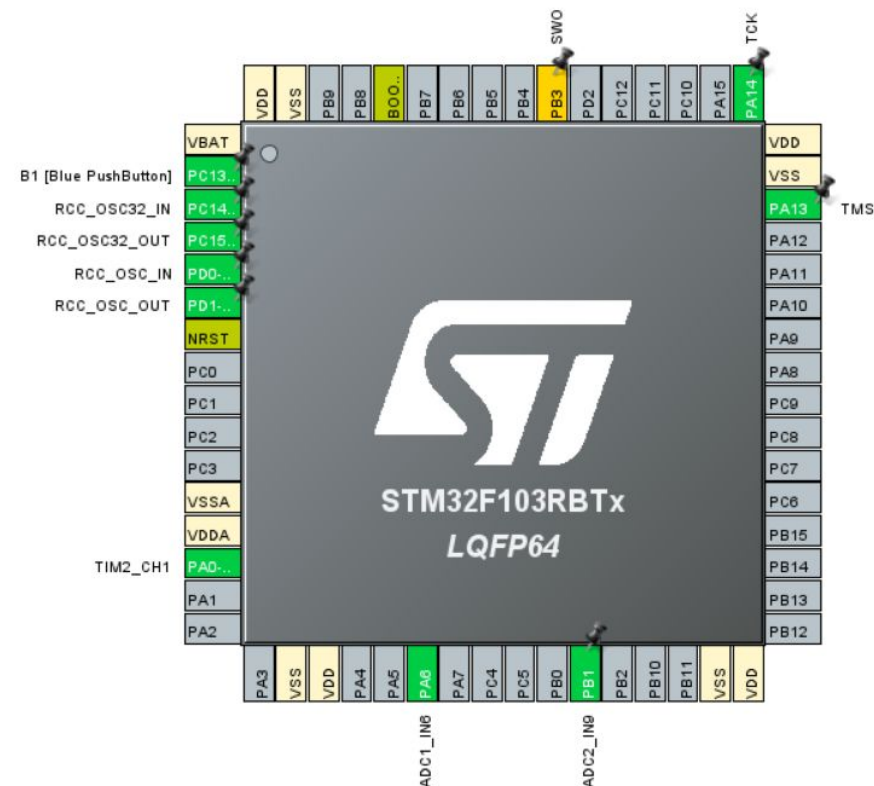
counter period: 65535

$$f_{Timer} = \frac{f_{clock}}{(Counter\ Period) \cdot (Prescaler)}$$

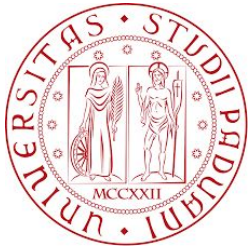
$$f_{PWM} = 10kHz$$

$$f_{ADC} = 10Hz$$

$$f_{ADC\ T} = 5,5mHz \text{ (ogni 3 minuti)}$$



# Simulazione PV attraverso file C



```
while() {
    if(tempo==100) {                //rete termica 100us

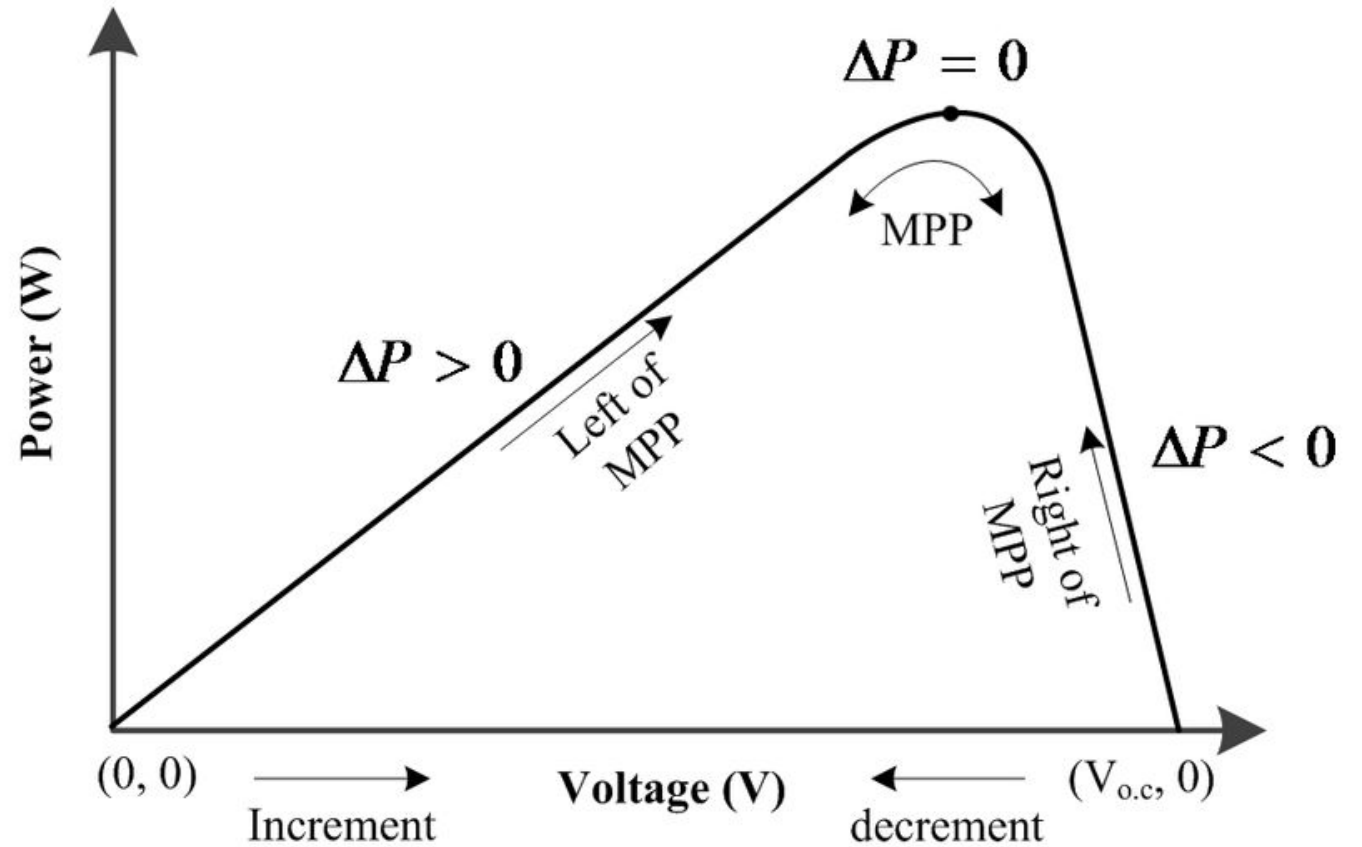
        P_diss = irradianza*1000*area_cella*(1-rendimento);
        delta_temp = ( ( a_th*delta_temp ) + ( b_th*Rth*P_diss ) );
        tempo=0;
    }
    temp_cella = ( delta_temp + T0 ) + t_kelvin;

    Vpwm = PORTA&0x00000001;        //Tensione PWM Convertitore DC/DC
    V_duty = Vpwm*b + V_duty*a;    //duty cycle =>(0;1) filtro PB (ft=100hz)
    V = V_duty*Kv;                 //KV=165(max range T=-40C°);tensione Pannello

    I_L = I_sc*irradianza;        //Icortocircuito
    exp_d = qk*( ( V/(N*num_celle) ) - Eg ) / temp_cella;
    h = __exp(exp_d);
    I_D = Z*( temp_cella*temp_cella*temp_cella )*h; //Idiodo
    I_pv = ( I_L - I_D );         //I uscita dal pannello fotovoltaico
    if(I_pv<=0) {
        I_pv=0;
    }
    ADC2_IN9 = (I_pv*KsenseI)*KI; //adattamento I
    ADC1_IN6 = ((temp_cella-t_kelvin)*KsenseT+VsenseT)*KT; //adattamento T
    tempo++;
    swatch(Tsample);             //1us
}
```

# Algoritmo MPPT

## Maximum Power Point Tracking



*Perturb & Observe*

# Perturb & Observe base

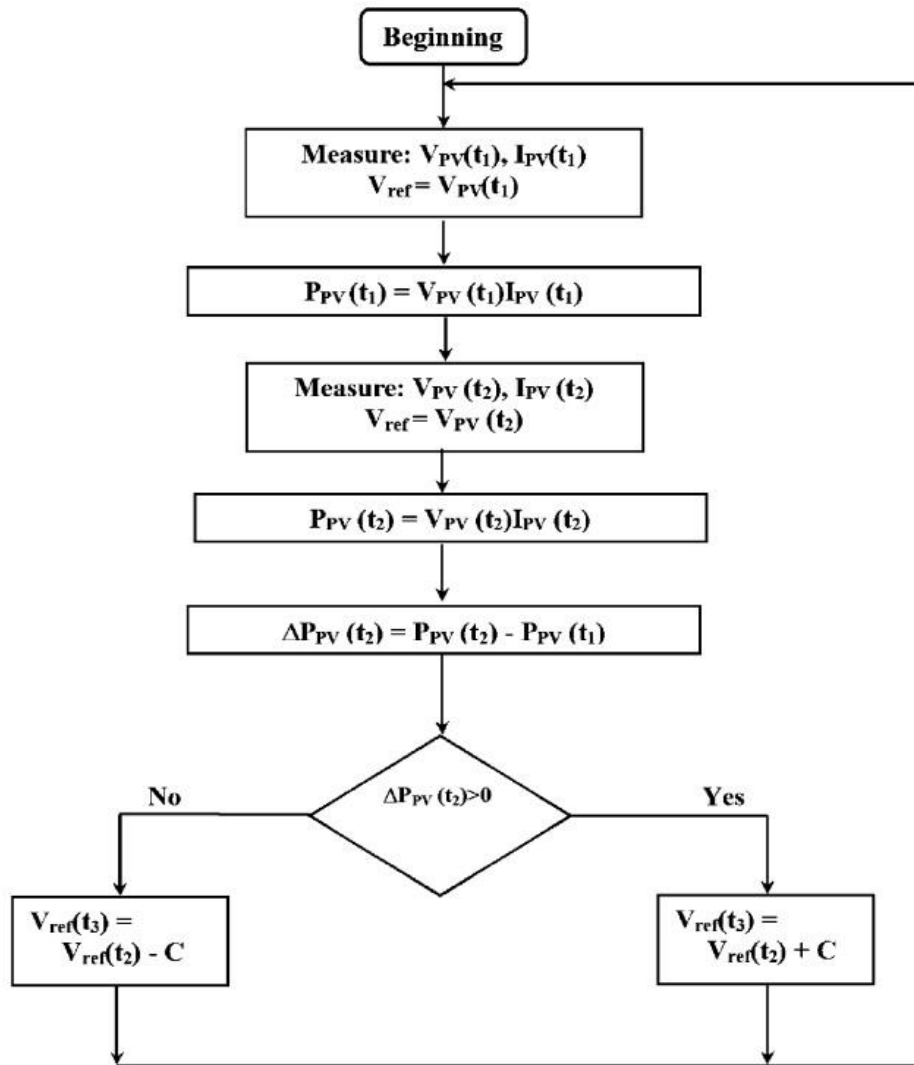


Figura1: Diagramma a blocchi P&O base

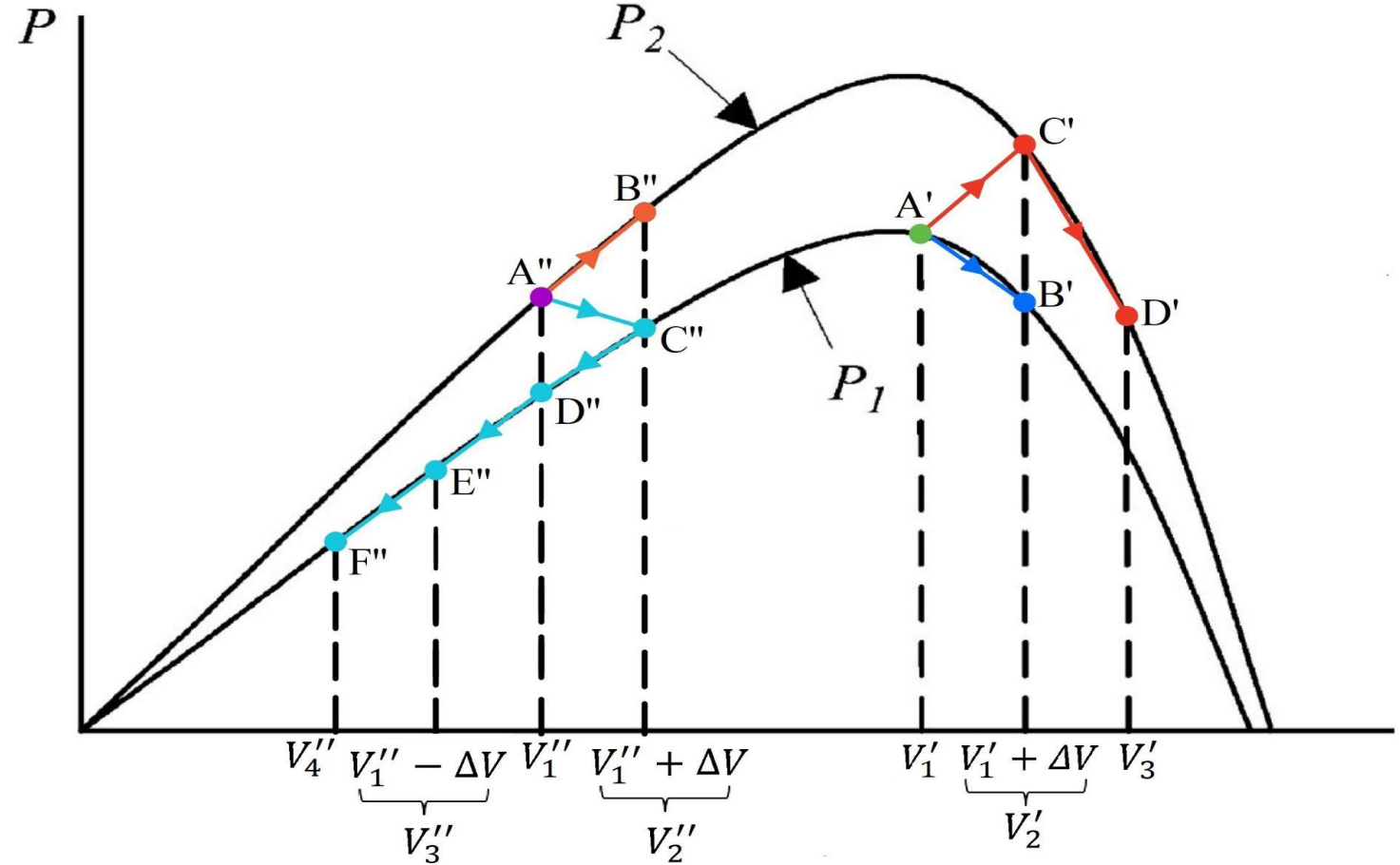
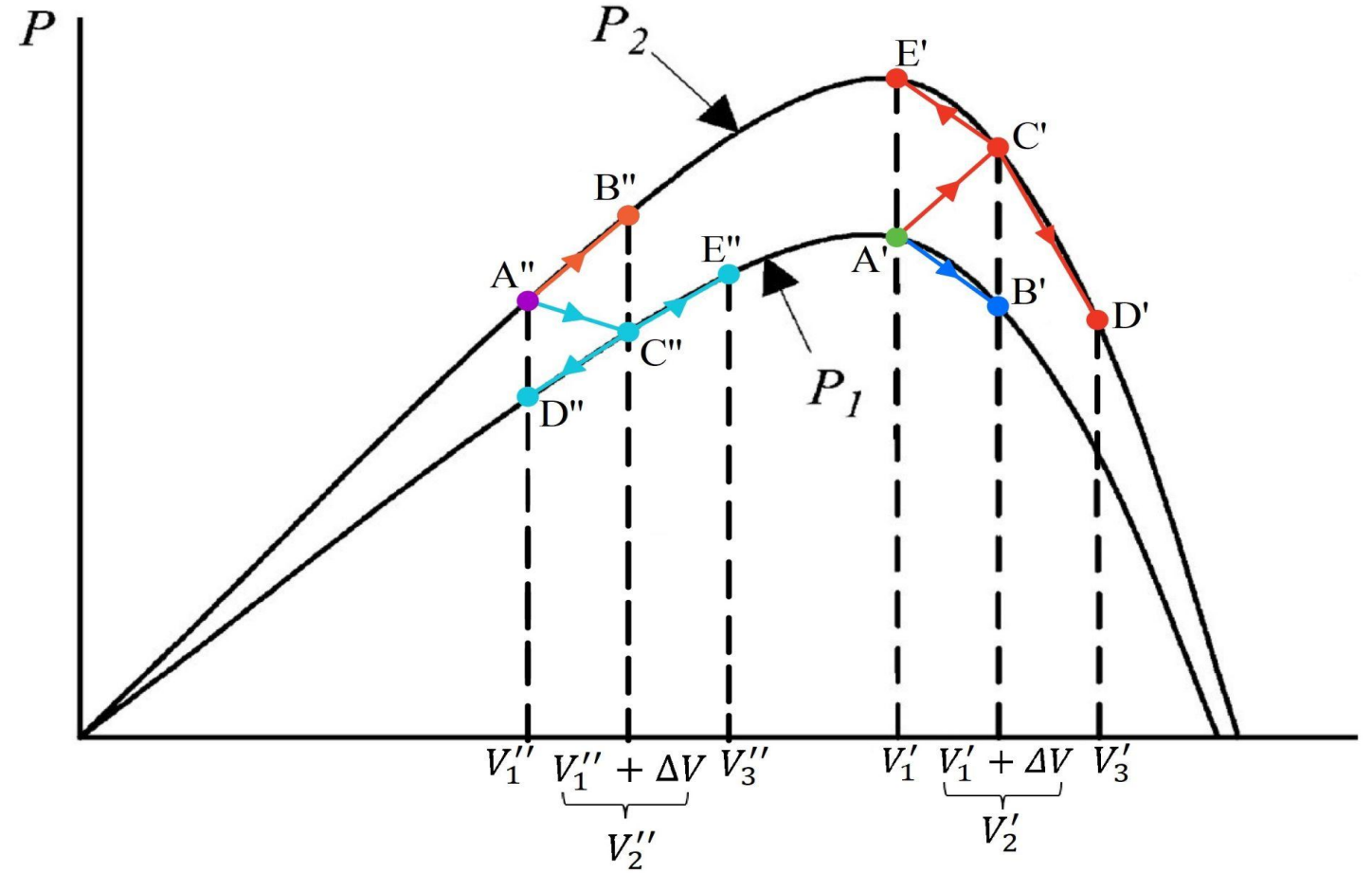
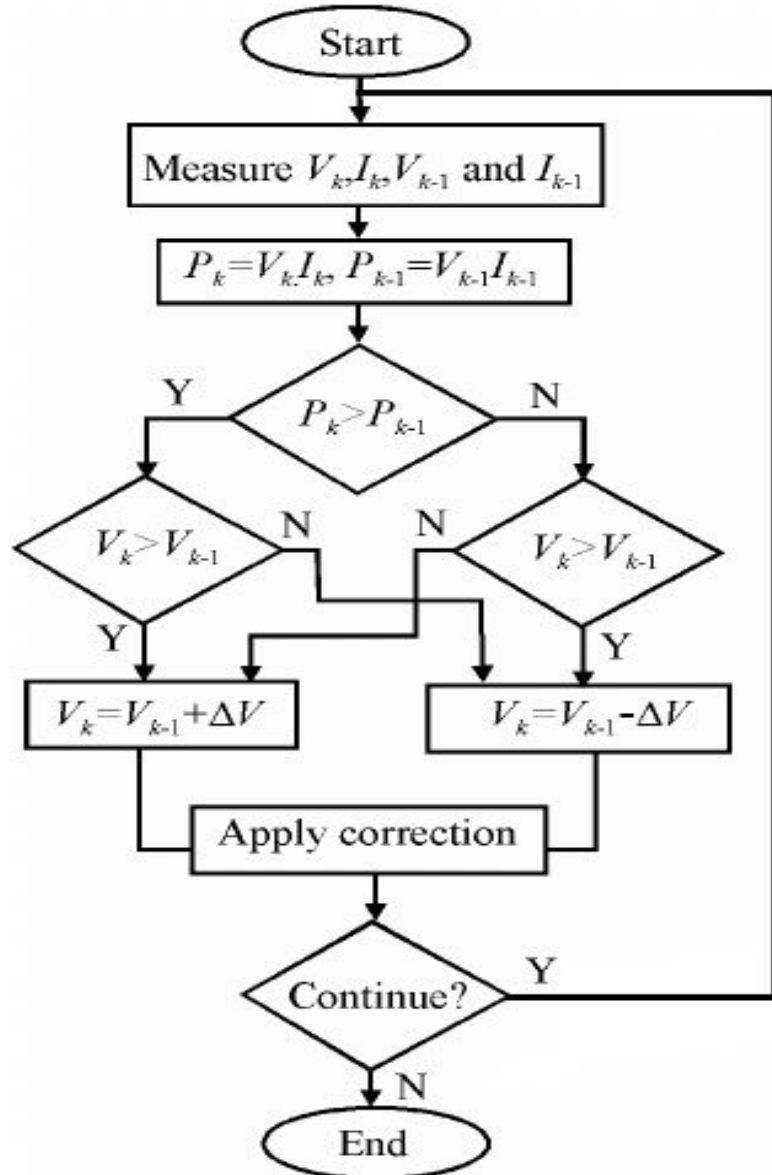
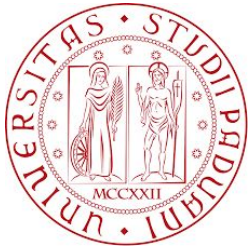


Figura2: variazione di potenza

# Perturb & Observe migliorato



# Codice P&O su ambiente Keil uVision



```
void ADC1_2_IRQHandler(void)
{
  /* USER CODE BEGIN ADC1_2_IRQn 0 */
  Iadc = HAL_ADC_GetValue(&hadc2); //Corrente acquisita dall'ADC
```

```
if( Iadc>0 ) {
```


```
  V = ( Vpwm*K_PWM ) >> 14; //valore di tensione in 10.2
  I = ( Iadc*KI ) >> 8; //valore di corrente in 12.8
```

```
  P_new = ( I*V ); //valore di potenza in 22.10
```

```
  P = P_new >> 10; //valore di potenza in 22.0
```

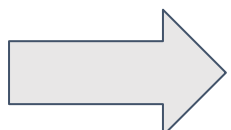
```
  //valutazione di V_STEP
```

```
  if( ((P_new-P_old)>>10) < ((P*5)/100) || ((P_old-P_new)>>10) < ((P*5)/100) ) {
```

$V\_STEP = 5;$    $K_{PWM} * V_{STEP} = \frac{165 [V]}{800} * 5 = 0.20625 * 5 \approx 1.03 [V] \rightarrow \frac{1.03}{240} \approx 4.3 [mV]$  su cella

```
  }
```

```
  else{
```

$V\_STEP = 20;$    $\frac{165 [V]}{800} * 20 = 0.20625 * 20 \approx 4.13 [V] \rightarrow \frac{4.13}{240} \approx 17.2 [mV]$  su cella

```
  }
```

```
#define K_PWM 13517 //0.20625 in formato: 0.16;
#define MAX_PWM 800
//conversione per la corrente:[0 ; 4095] => [0 ; +10] A
#define KI 160 //sensibilità: 0.002442 in formato 0.16
```

```
/*---ALGORITMO DI MPPT: PERTURB&OBSERVE---*/
```

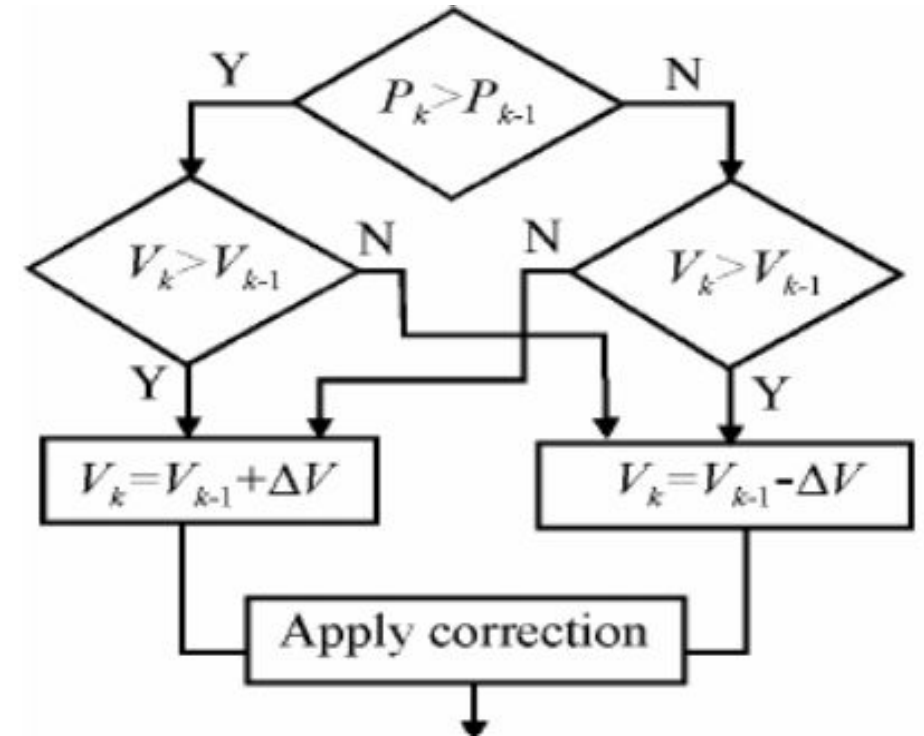
```

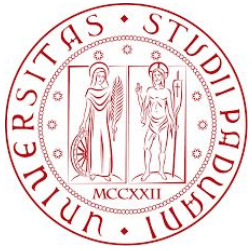
if ( P_new >= P_old ) {
    if( Vpwm >= Vpwm_old ) {
        Vpwm_old = Vpwm;           //aggiornamento tensione precedente
        Vpwm = Vpwm + V_STEP;
    }
    else {
        Vpwm_old = Vpwm;

        if( Vpwm < V_STEP ) {
            Vpwm = 0;
        }
        else {
            Vpwm = Vpwm - V_STEP;
        }
    }
}
else {
    if( Vpwm >= Vpwm_old ) {
        Vpwm_old = Vpwm;

        if( Vpwm < V_STEP ) {
            Vpwm = 0;
        }
        else {
            Vpwm = Vpwm - V_STEP;
        }
    }
}

```



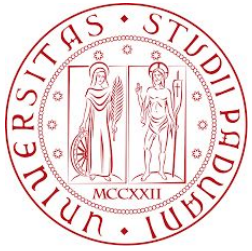


```
    else {
        Vpwm_old = Vpwm;
        Vpwm = Vpwm + V_STEP;
    }
}
}
else { //caso Iadc=0
    Vpwm=0;
    P_new=0;
    P = 0;
}
/**--controllo saturazione Vpwm--**/
if( Vpwm>MAX_PWM ) {
    Vpwm=MAX_PWM;
}
P_old = P_new; //aggiornamento potenza precedente
/* USER CODE END ADC1_2_IRQn 0 */
HAL_ADC_IRQHandler(&hadc1);
HAL_ADC_IRQHandler(&hadc2);
}

void TIM2_IRQHandler(void)
{
    /* USER CODE BEGIN TIM2_IRQn 0 */
    //Aggiorno valore registro per modificare valore di duty cycle
    htim2.Instance->CCR1 = Vpwm;
    /* USER CODE END TIM2_IRQn 0 */
    HAL_TIM_IRQHandler(&htim2);
}
```



# Salvataggio storico dati



```
void TIM1_UP_IRQHandler(void)
{
    HAL_ADC_Start (&hadc1);
    HAL_ADC_PollForConversion (&hadc1, 2);
    Tadc=HAL_ADC_GetValue (&hadc1);
    T= ((Tadc*KT) >>16) -VT;
    potenze [i]=P;
    temperature [i]=T;
    i++;
    if (i==999) {
        i=0;
    }
    HAL_TIM_IRQHandler (&htim1);
}
```

temperature	0x20000938 temperatu...	potenze	0x20000168 potenze
[0]	20	[0]	0
[1]	52	[1]	1025
[2]	52	[2]	1024
[3]	52	[3]	1033
[4]	43	[4]	516
[5]	36	[5]	531
[6]	36	[6]	526
[7]	36	[7]	529
[8]	36	[8]	532
[9]	0	[9]	0
[10]	0	[10]	0
[11]	0	[11]	0
[12]	0	[12]	0
[13]	0		

Watch rispettivamente degli array di temperatura e potenza riferiti a gradino da 1 a 0.5 sun dopo 700s . Il valori analizzati in figura sono salvati in 24min. Abbiamo una occupazione totale max di 4KByte ( totali dei 2 array completi) sulla RAM.

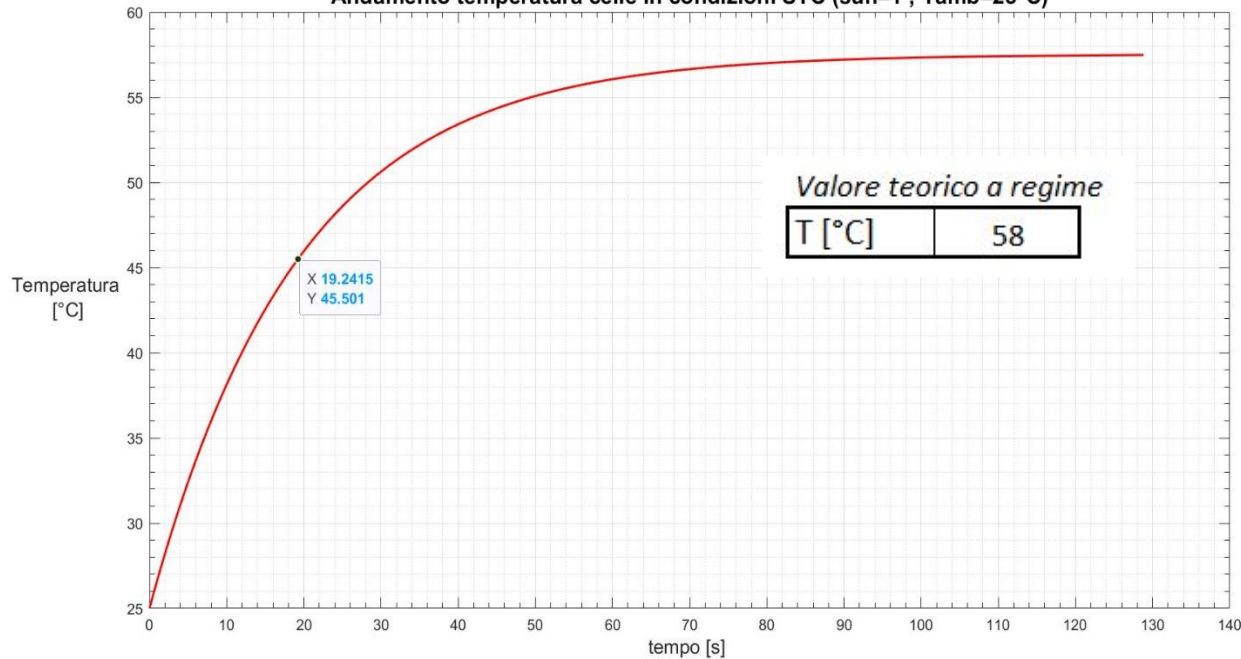
# Analisi dati ottenuti

## Andamenti Temperatura

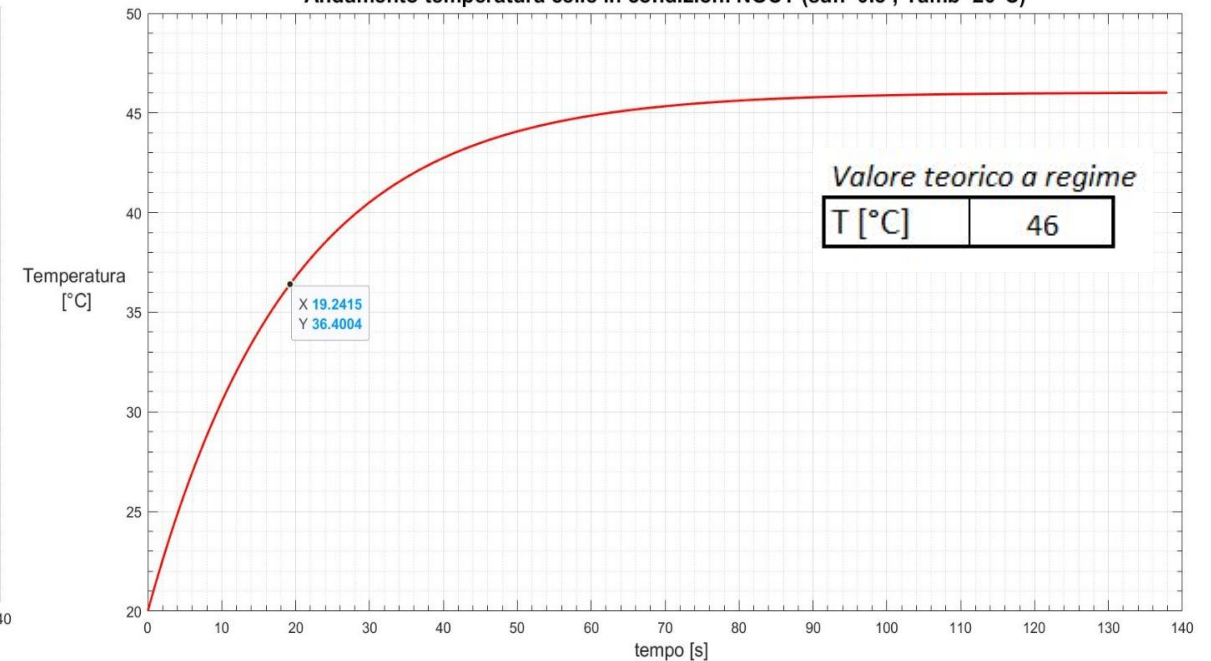
In condizioni STC ( $sun=1$ ;  $T_{amb}=25^{\circ}\text{C}$ )

In condizioni NOCT ( $sun=0.8$ ;  $T_{amb}=20^{\circ}\text{C}$ )

Andamento temperatura celle in condizioni STC ( $sun=1$ ;  $T_{amb}=25^{\circ}\text{C}$ )

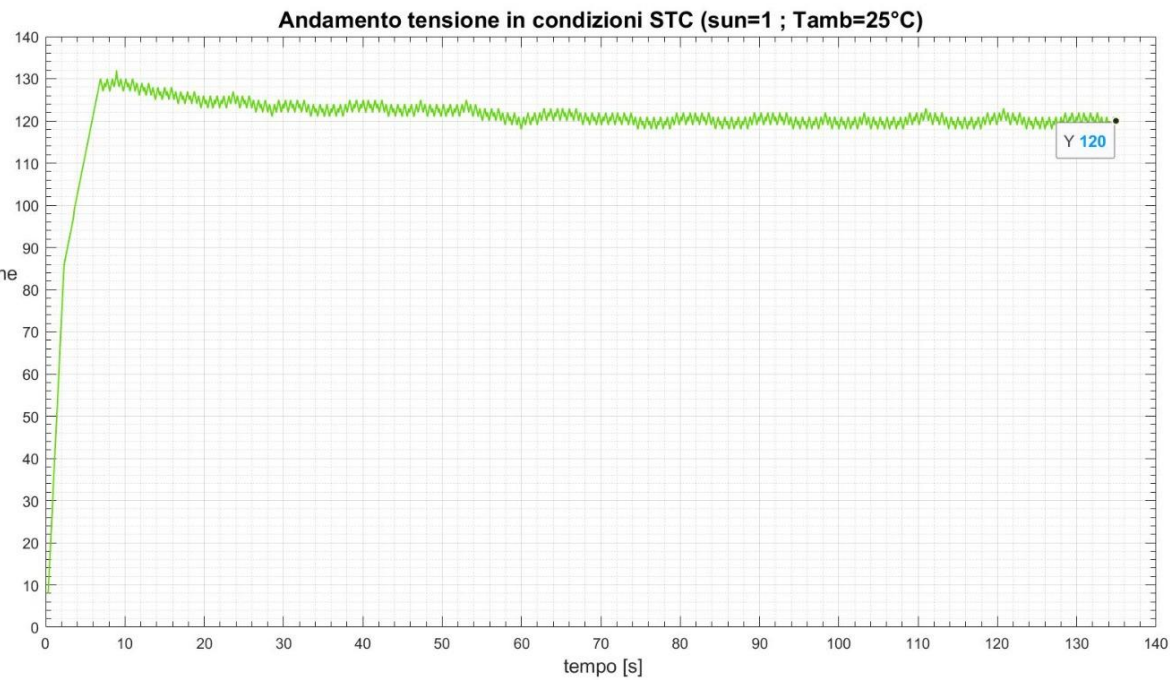


Andamento temperatura celle in condizioni NOCT ( $sun=0.8$ ;  $T_{amb}=20^{\circ}\text{C}$ )

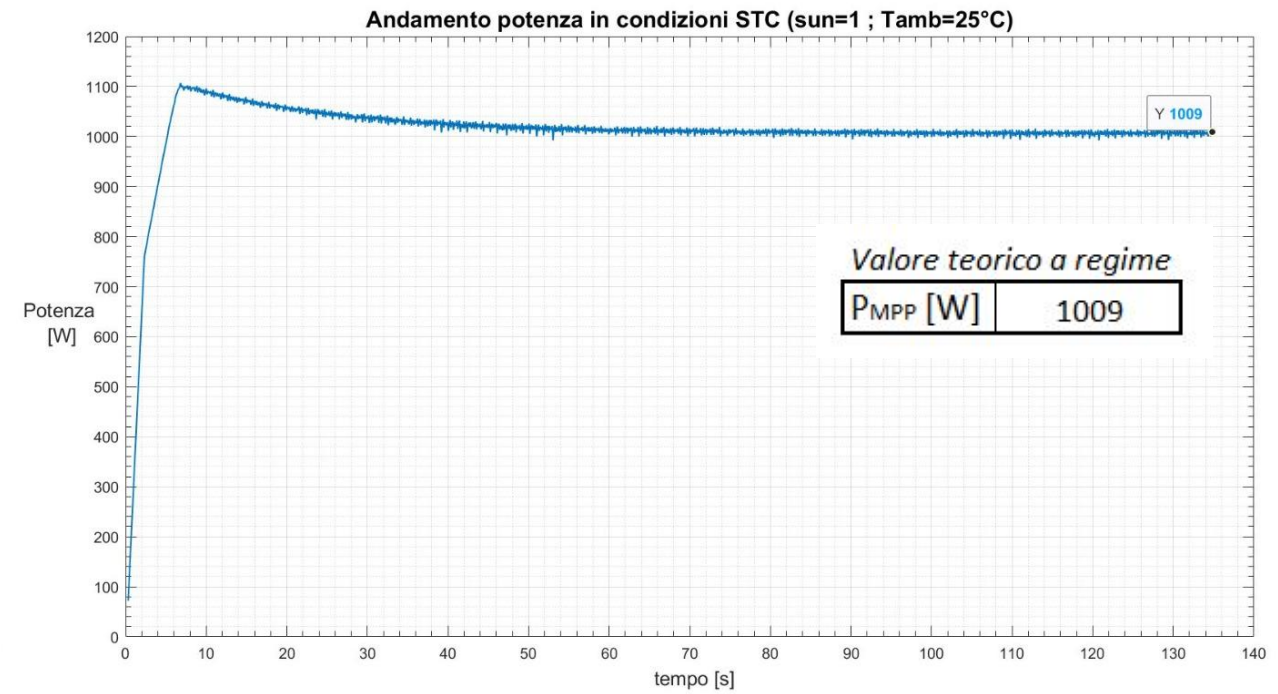


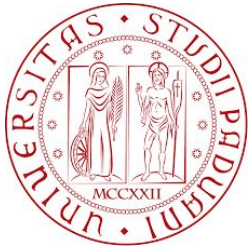
# Condizioni STC (sun=1 ; Tamb=25°C)

## Andamento *tensione*



## Andamento *potenza*

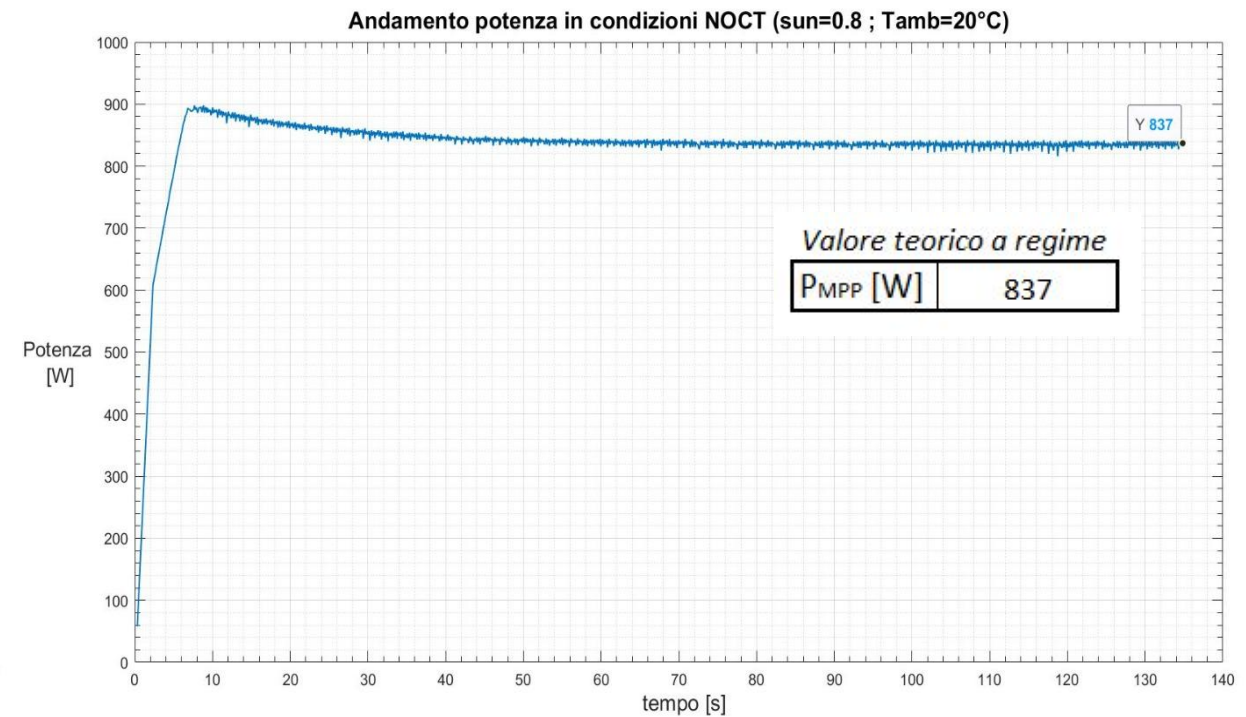
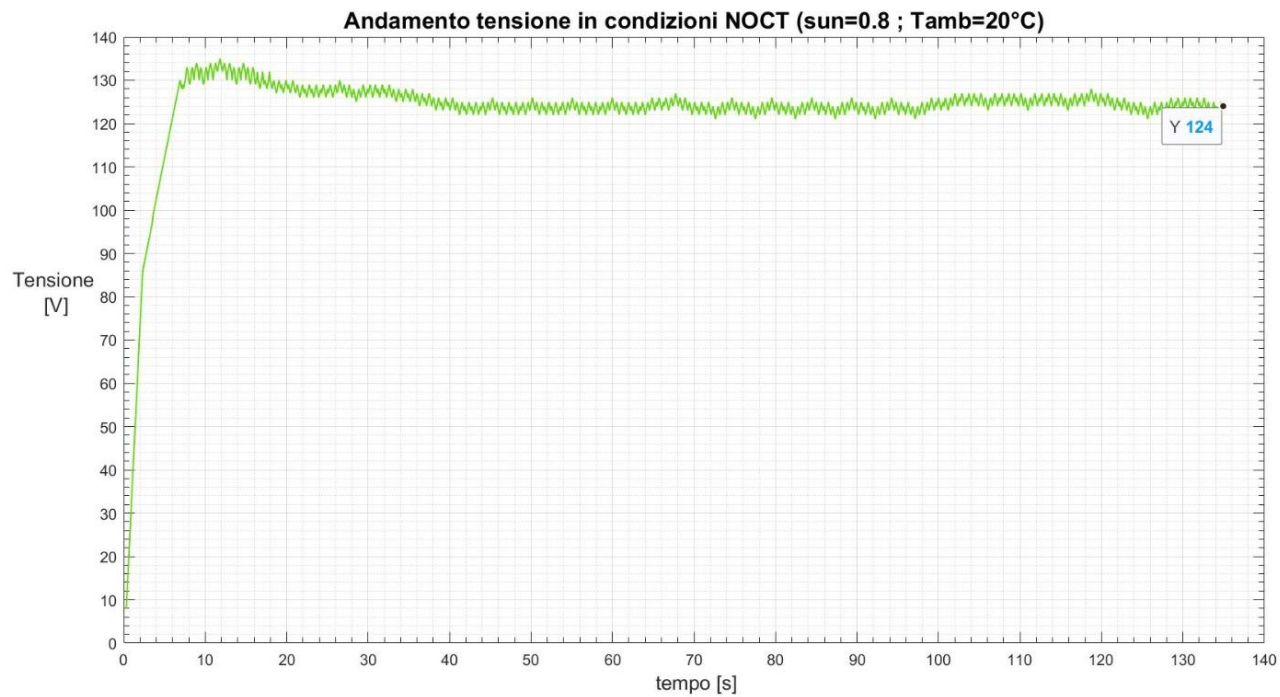


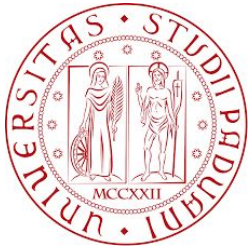


## Condizioni NOCT (sun=0.8; Tamb=20°C)

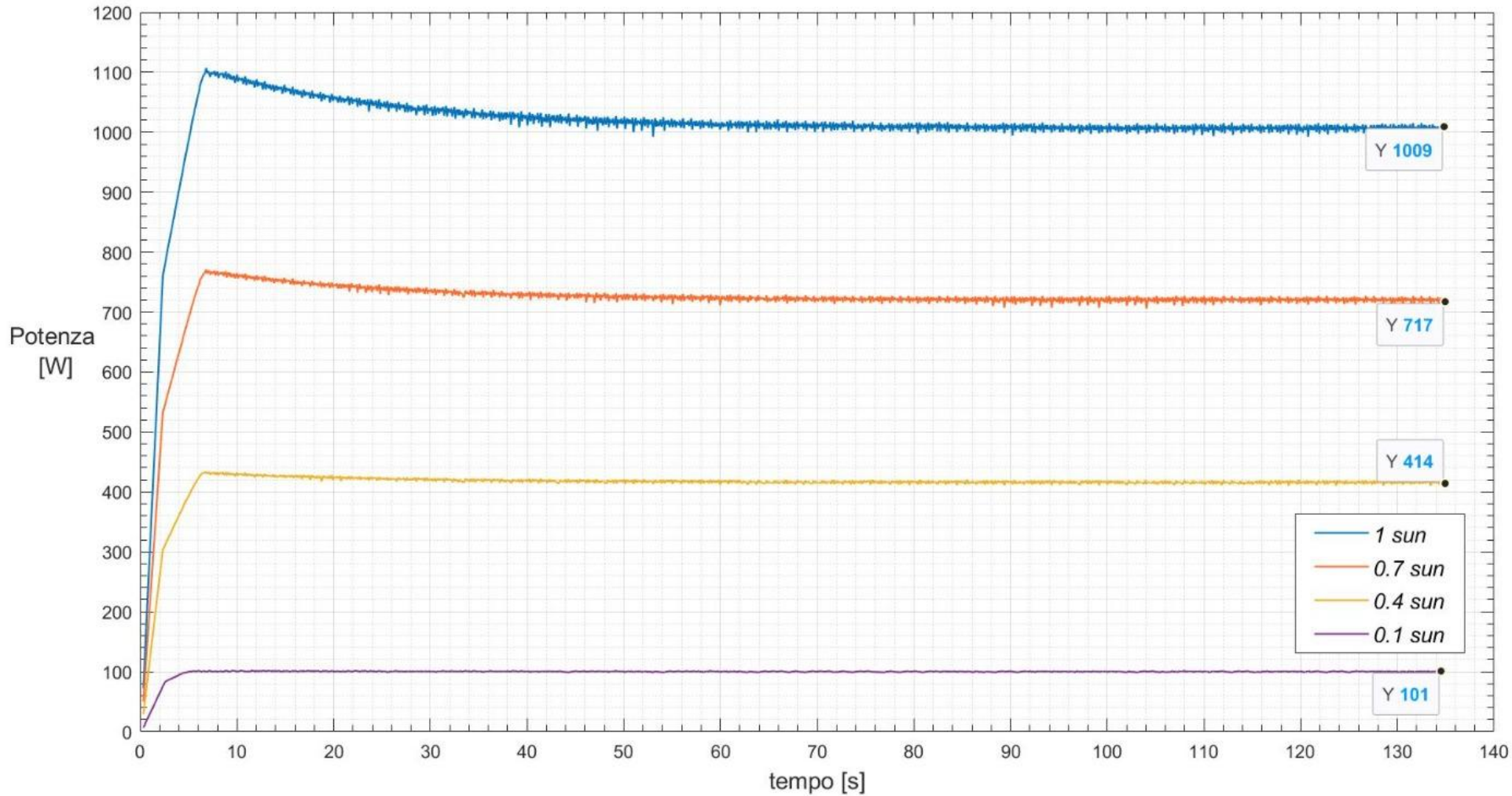
Andamento *tensione*

Andamento *potenza*



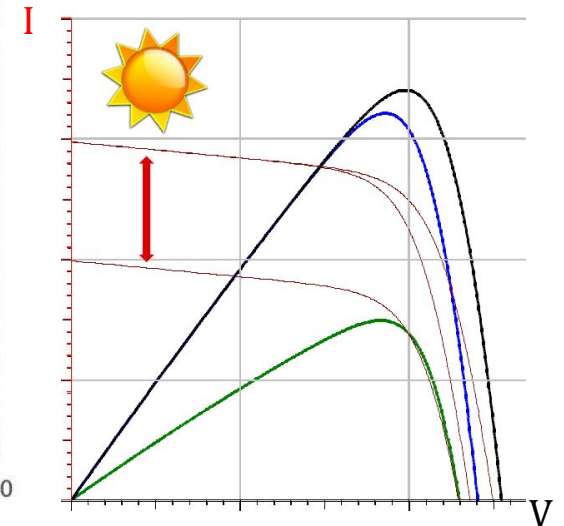


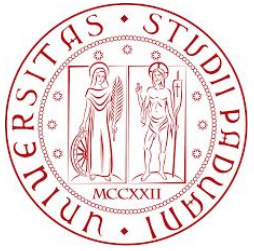
## Grafico a Tamb costante a 25°C



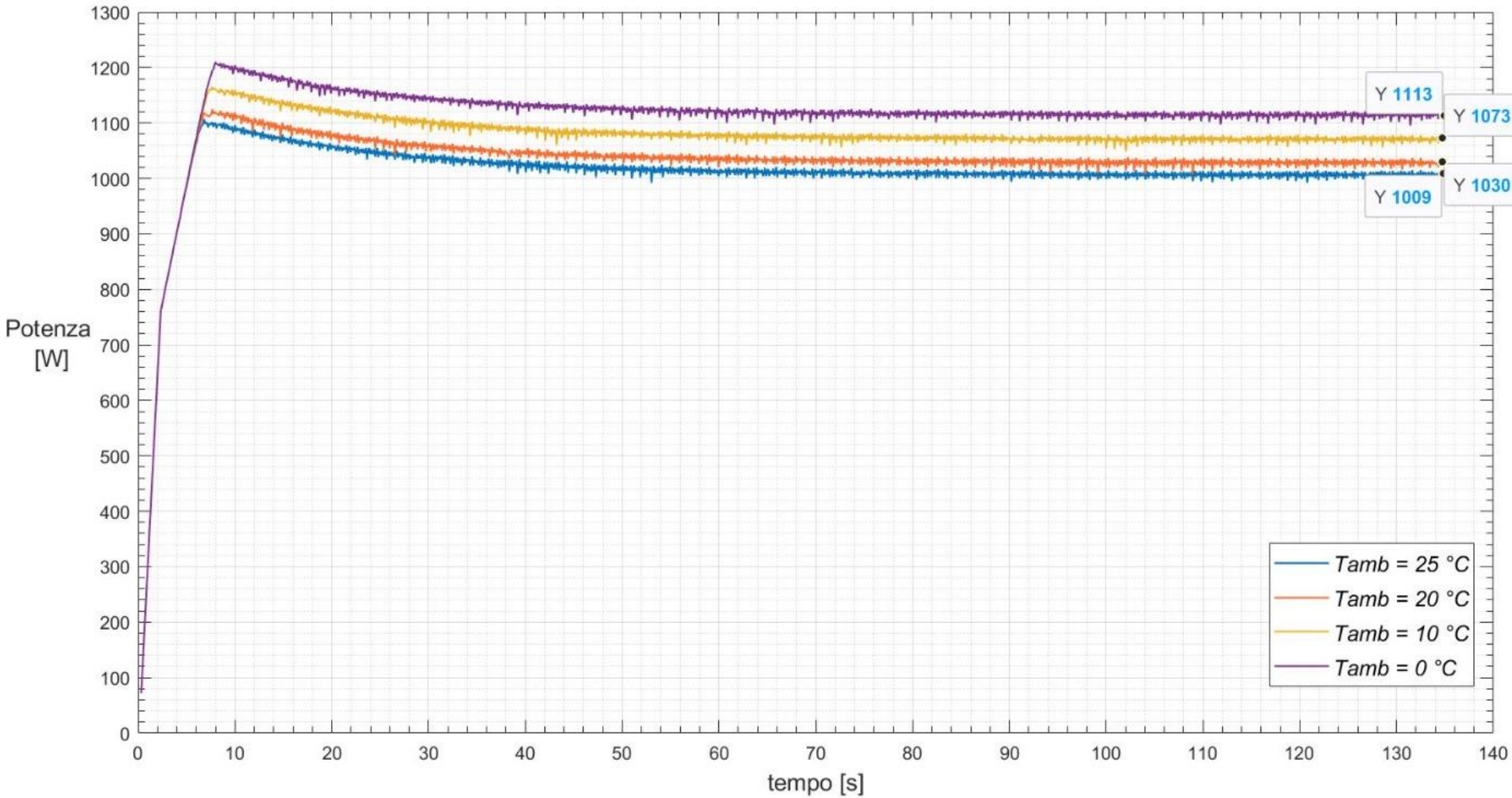
Valori teorici a regime

Tamb=25 °C	
G[sun]	P <sub>MPP</sub> [W]
1	1009
0,7	722
0,4	417
0,1	102



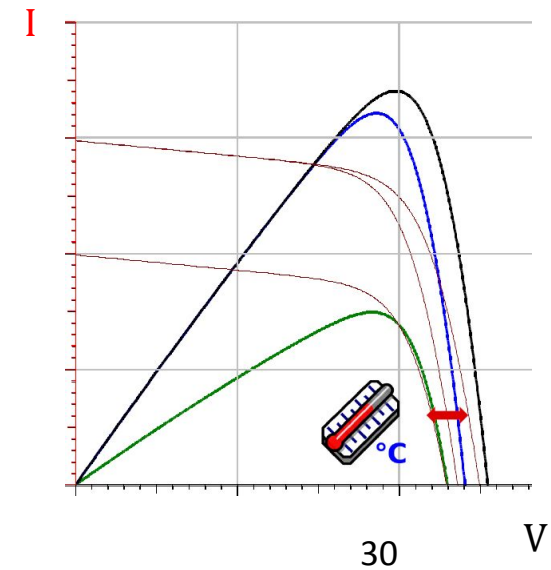


## Grafico a irradianza costante, 1 SUN

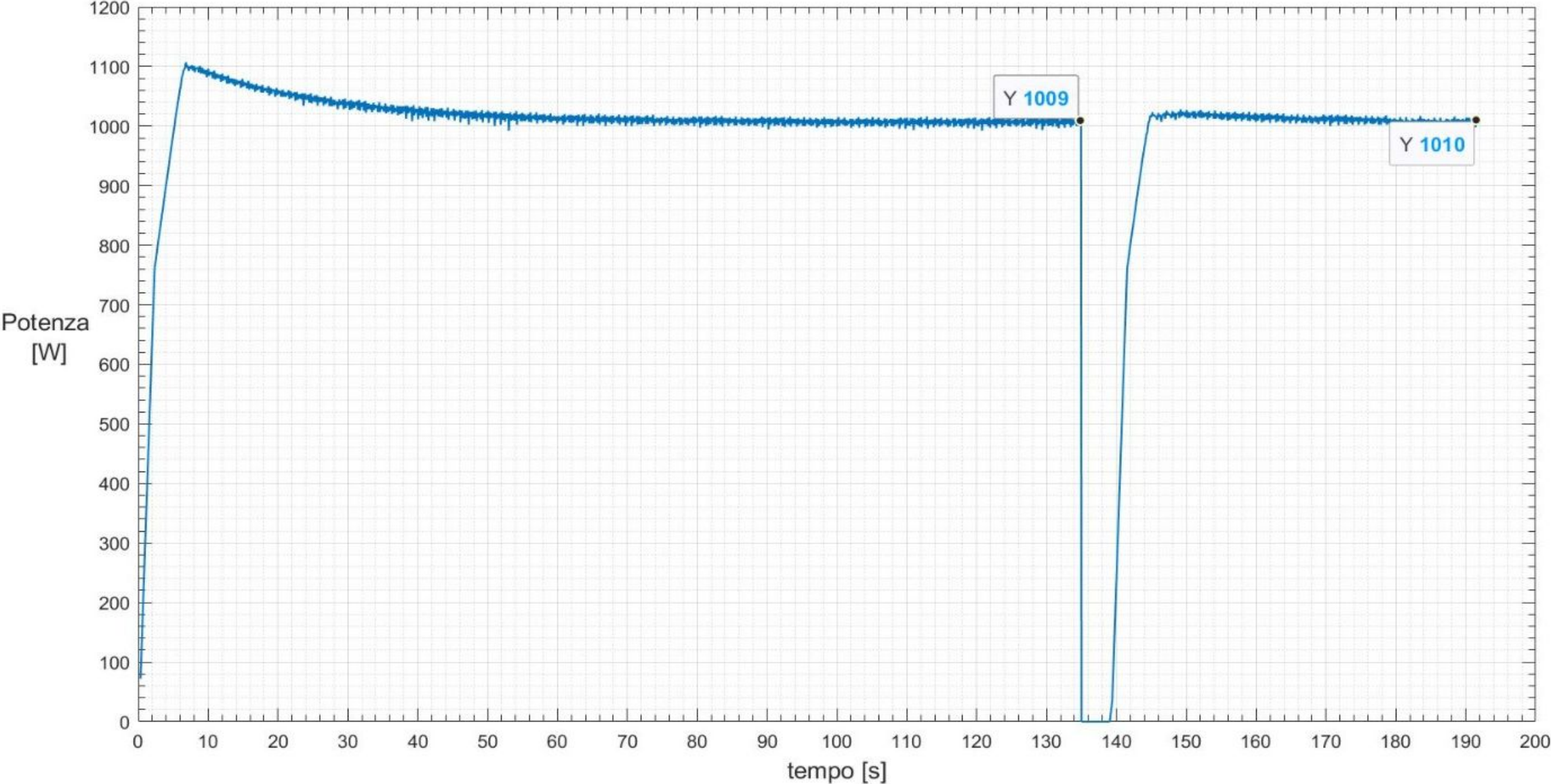


Valori teorici a regime

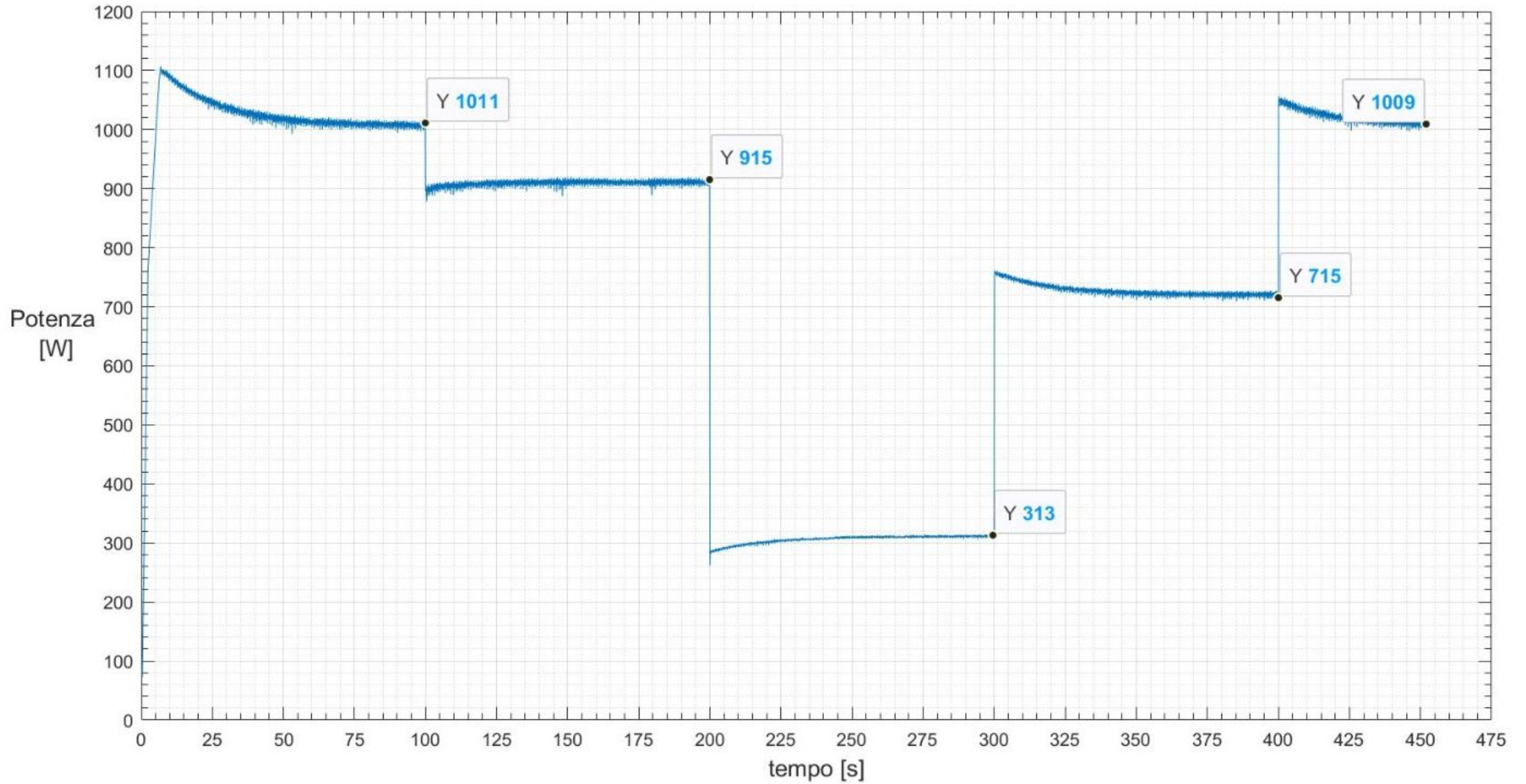
G=1sun	
$T_{AMB}$ [ $^{\circ}\text{C}$ ]	$P_{MPP}$ [W]
0	1116
10	1074
20	1031
25	1009



**Andamento potenza con irradianza variabile ( $G=[1, 0, 1]$ ) e  $T_{amb}= 25^{\circ}C$**



## Andamento potenza con irradianza variabile ( $G=[1, 0.9, 0.3, 0.7, 1]$ ) e $T_{amb}= 25^{\circ}\text{C}$





# Conclusioni

## Confronto prestazioni modulo simulato con modulo reale

STC	PV EMULATO	SW 250
Voc [V]	35,27	37,6
Isc [A]	8,81	8,81
Pmpp [W]	252	250
Vmpp [V]	30,16	30,5
Impp [A]	8,35	8,27

NOCT	PV EMULATO	SW 250
Voc [V]	36,19	34,2
Isc [A]	7,05	7,24
Pmpp [W]	208,25	185,4
Vmpp [V]	30,9	27,8
Impp [A]	6,73	6,68

Sono riportati i valori simulati e da datasheet nelle condizioni STC (25°C esterni; 1KW/m<sup>2</sup>) e NOCT (20°C esterni; 800W/m<sup>2</sup>).

Si può notare un lieve variazione dei valori simulati rispetto a quelli del datasheet.

I principali motivi sono l'aver trascurato:

- $R_s$  e  $R_{sh}$
- dipendenza da T di alcuni parametri (rendimento, corrente fotogenerata, Z)