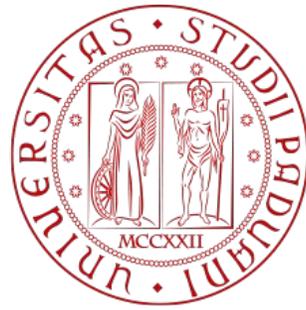


1222 • 2022
800
ANNI



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

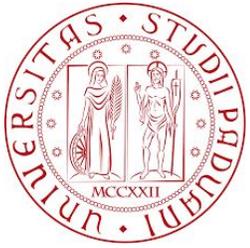
Laureandi *matricola*

Alberti Pietro 1217791

Ambrosi Davide 1219563

Cassinelli Filippo 1219160

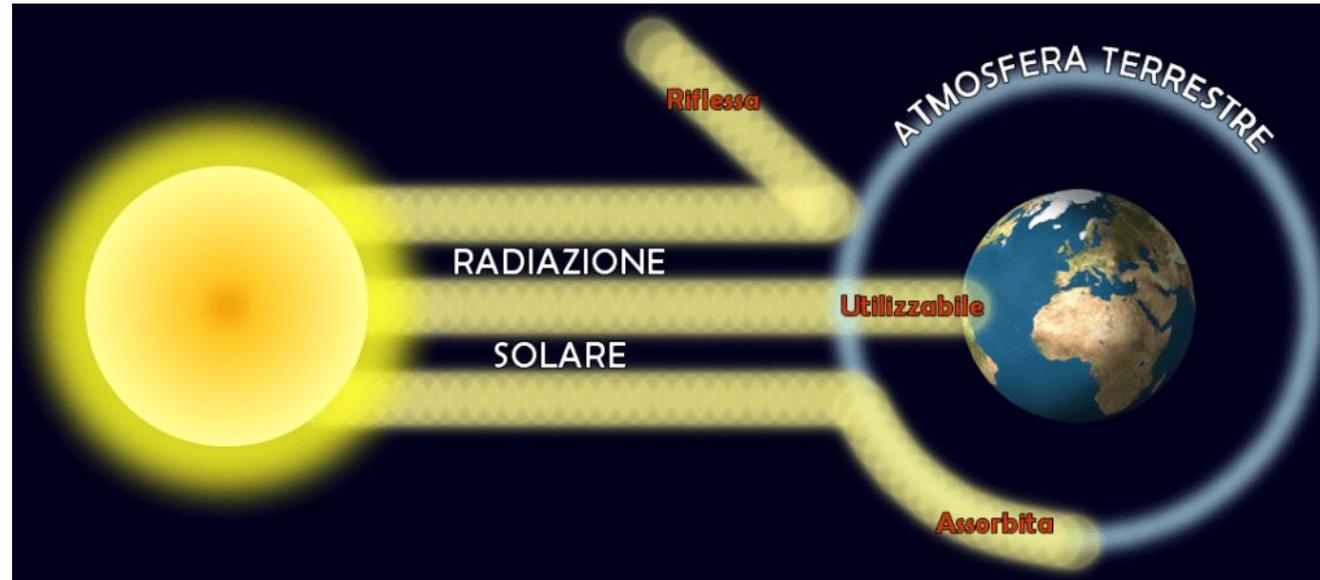
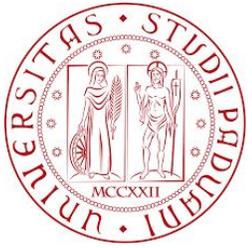
Veneri Leonardo 1218954



Sommario

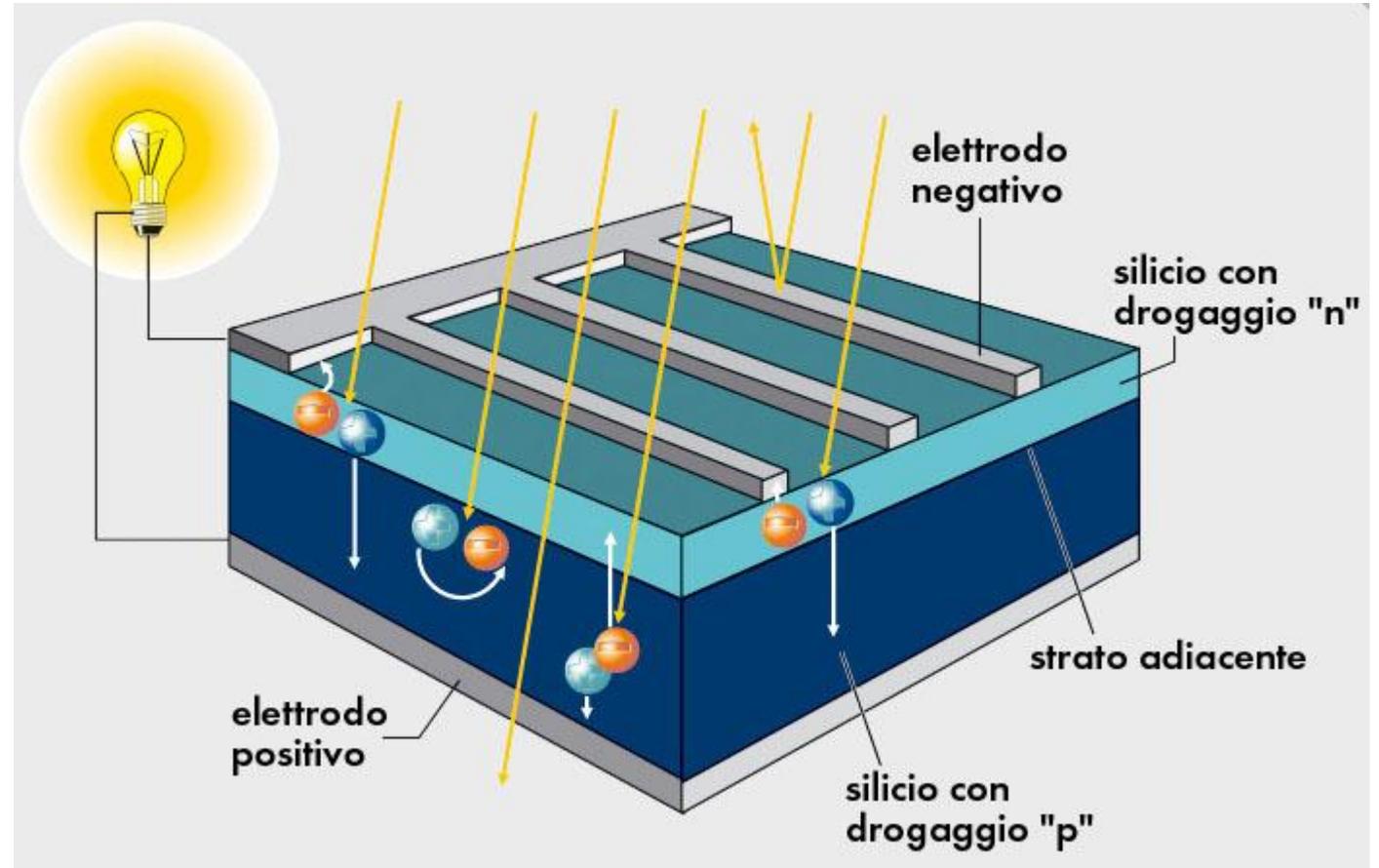
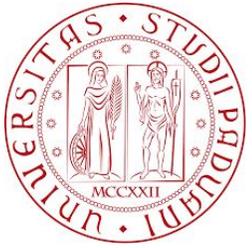
1. Introduzione
2. Modello elettrico
3. Modello termico
4. Schema del sistema complessivo
5. Impostazione periferiche su uC
6. File C di simulazione del pannello
7. Algoritmo MPPT
8. Codice implementato su uC
9. Salvataggio storico dati
10. Grafici ottenuti
11. Conclusioni

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.

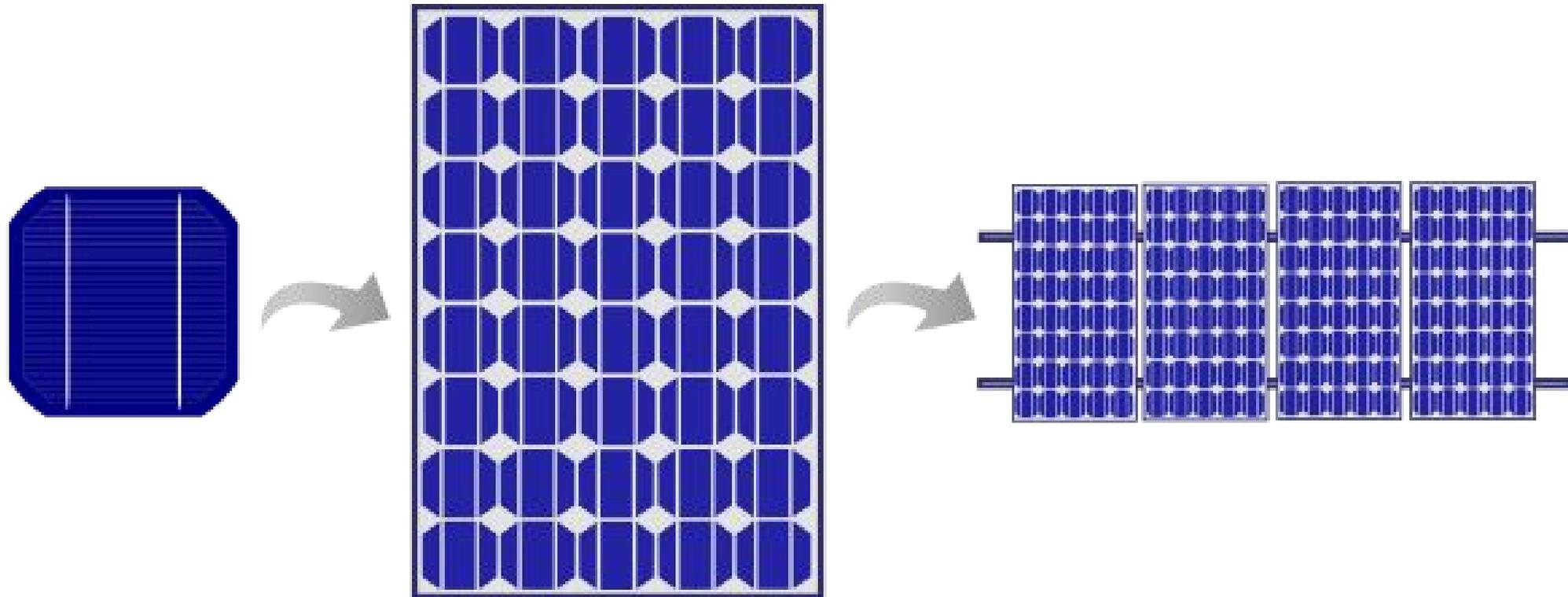
Cella fotovoltaica



Cella, modulo e pannello



per ottenere potenze maggiori le celle si possono raggruppare

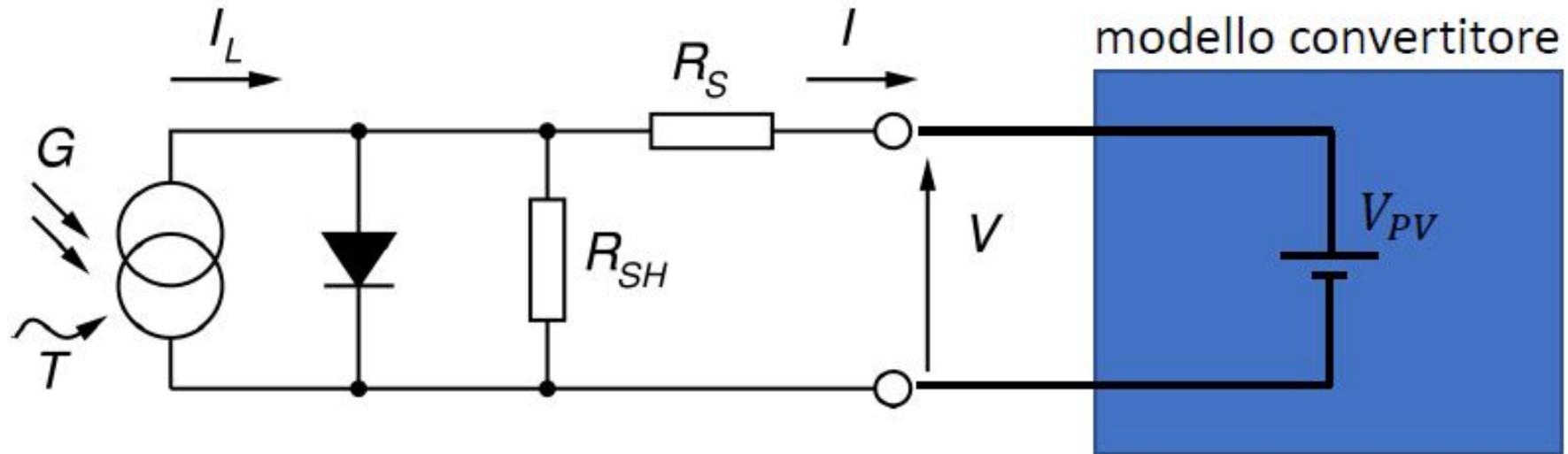


Cella

Modulo

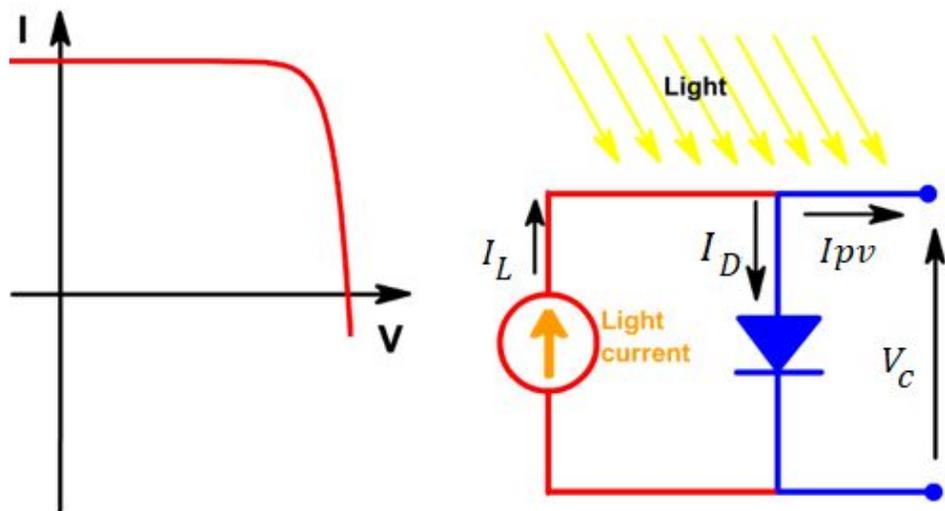
Pannello

Modello elettrico cella solare



trascuriamo gli effetti delle resistenze

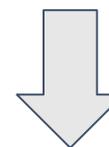
Modello elettrico cella solare



Equazione circuito

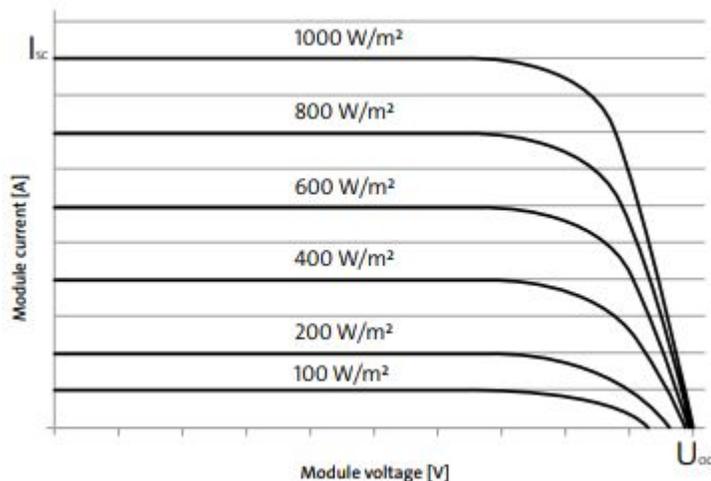
$$I_{pv} = I_L - I_D = I_L - I_0 \exp\left(\frac{qV_c}{n k T} - 1\right)$$

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

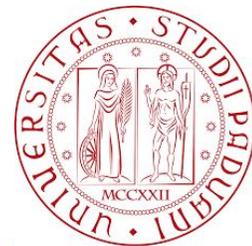


$$I_{pv} = G \cdot K - qA \frac{D_p}{L_p N_D} B T^3 \exp\left(\frac{qV_c - E_g}{kT}\right)$$

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



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



Datasheet di riferimento

Sunmodule[®] 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/m², 25°C, AM 1.5

COMPORTAMENTO A 800 W/m², 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/m² si raggiunge il 100% (+/- 2%) del grado di rendimento secondo condizioni di test standard STC (1000 W/m²).

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

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

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 ²
Numero dei diodi bypass	3
Temperatura di esercizio ammessa	-40°C a +85°C

MATERIALI IMPIEGATI

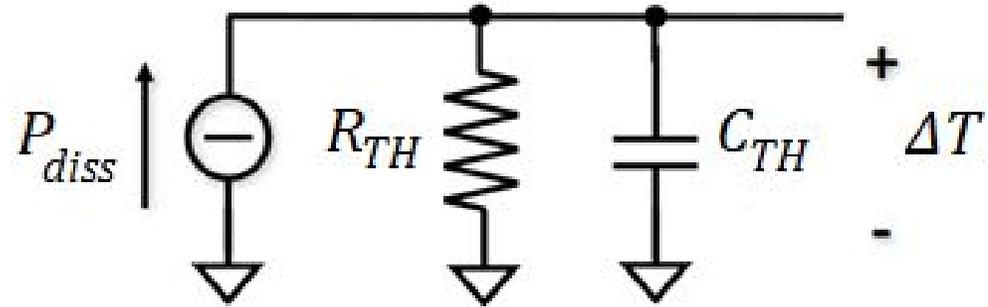
Celle per modulo	60
Tipo di cella	Policristallino
Dimensioni della cella	156 mm x 156 mm
Lato anteriore	4 mm vetro temperato (EN 12150)

ULTERIORI DATI

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

Modello termico cella (Cth)

Modello elettrico equivalente



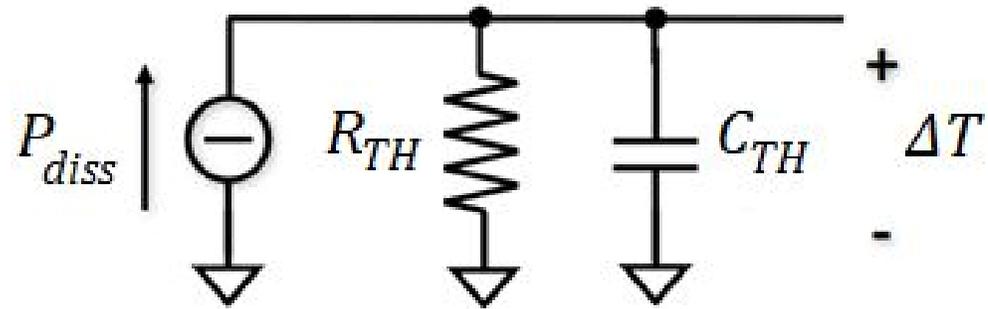
ipotizzando che lo spessore di una cella sia pari a 0.3 mm e che essa sia composta da silicio puro, avente calore specifico $C_s = 700 \frac{J}{Kg K}$, possiamo ottenere una stima della capacità termica:

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

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

Modello termico cella (Rth)

Modello elettrico equivalente



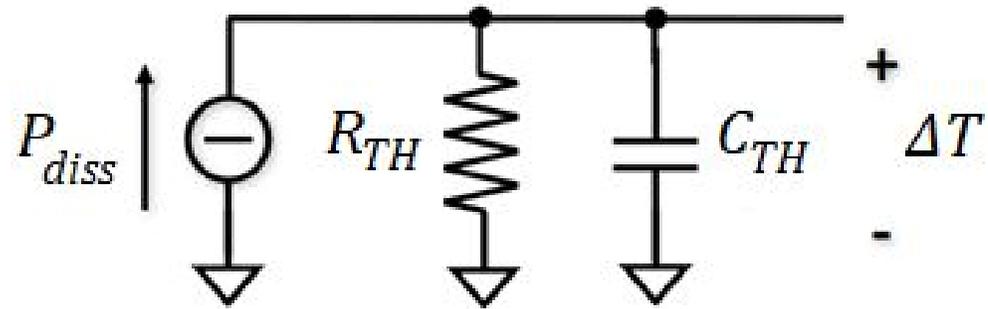
Nelle condizioni NOCT (Nominal Operating Cell Temperature), la temperatura a regime da datasheet risulta essere pari a 46°C, la temperatura ambiente di 20°C e $G=0.8$ sun. Dunque si può calcolare la resistenza termica:

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

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

Equazione del modello termico

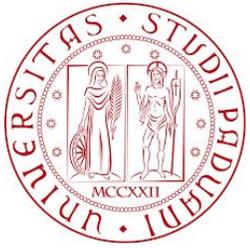
Modello elettrico equivalente



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

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

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:

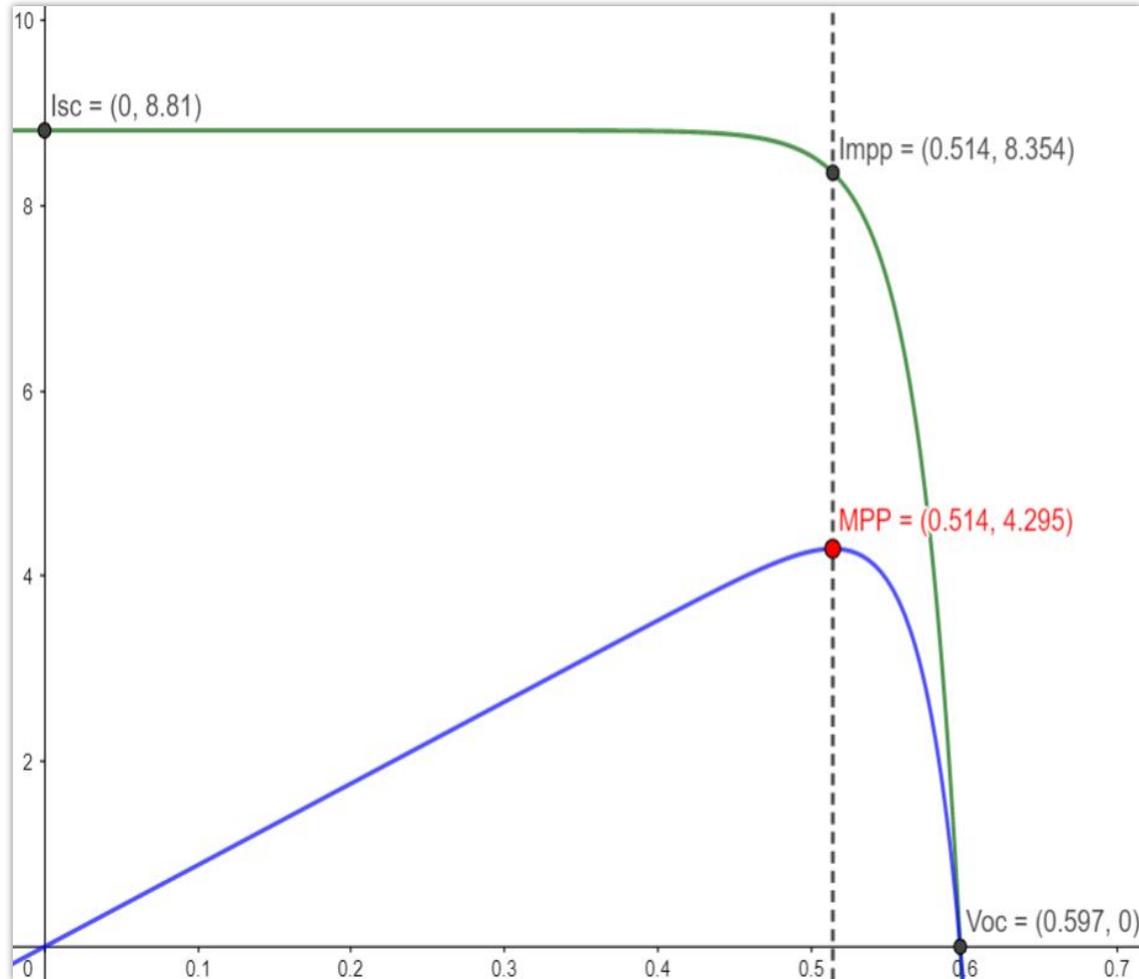
$$T = T_o + \Delta T \text{ e } \Delta T = P_{diss} R_{th} = G \cdot 1000 \cdot Area_{cella} \cdot (1 - \eta) \cdot R_{th} = 32,52^\circ\text{C} \rightarrow T = 57,52 = 330,67 \text{ K.}$$

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

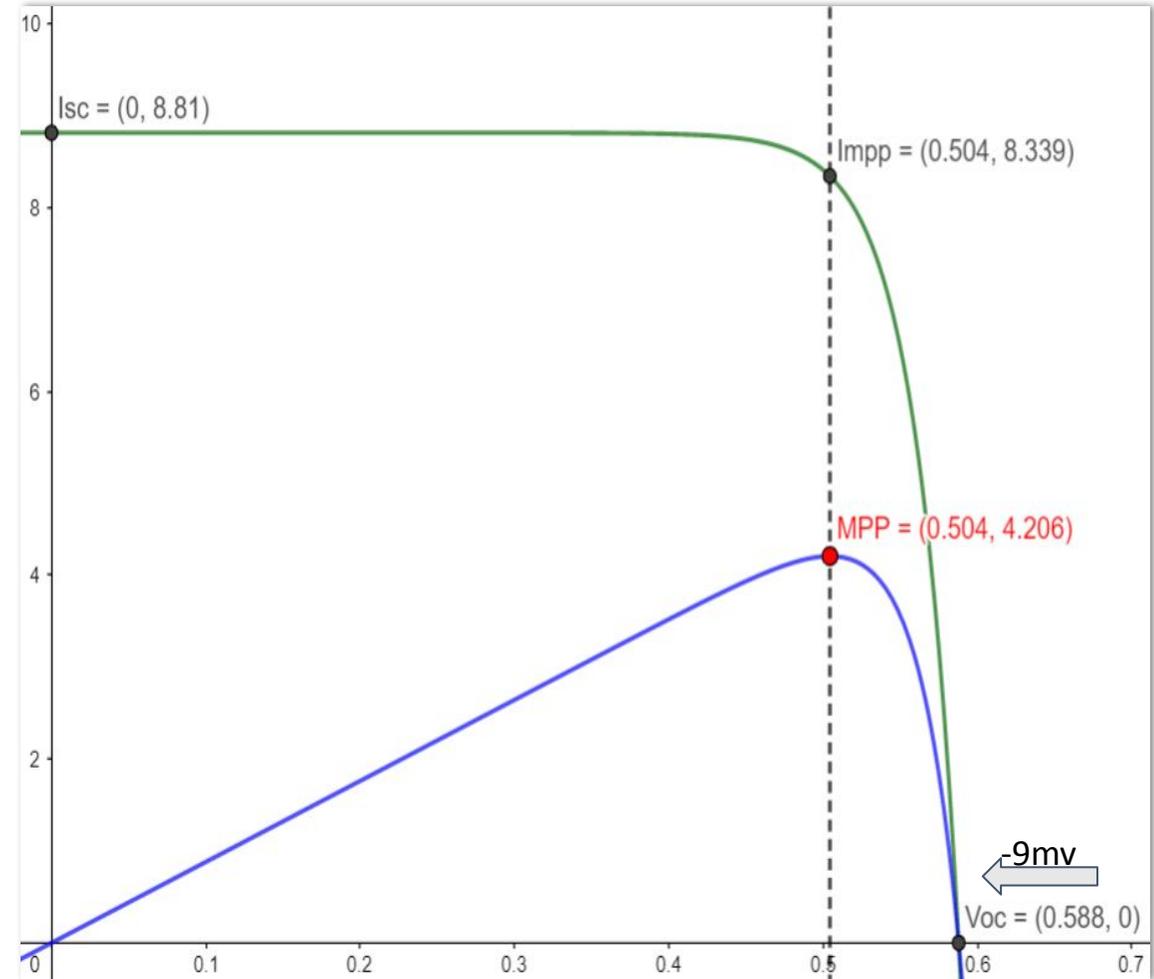
$$8,27 = 8,81 - Z 0,01483 \rightarrow Z \cong 36,4127$$

Transcaratteristica cella(V-I)

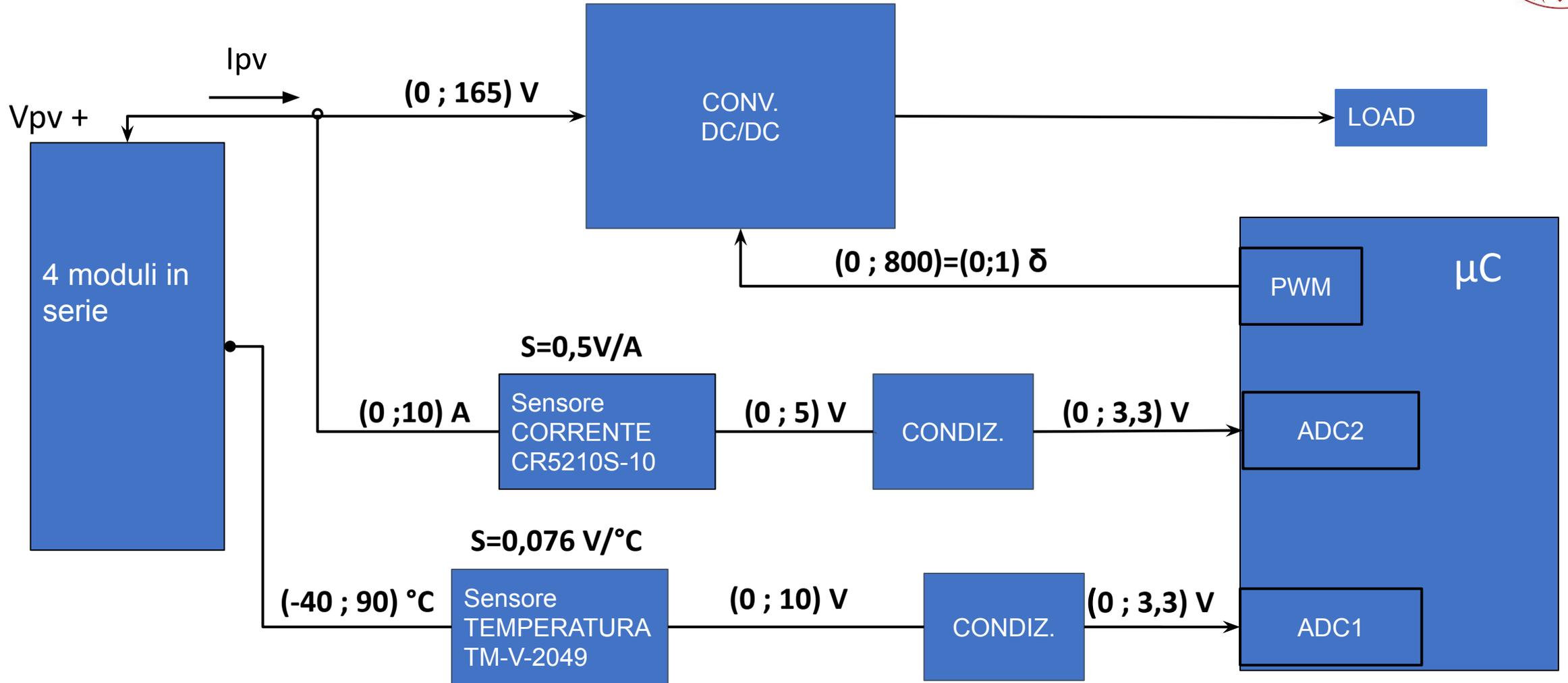
$$I_{pv} = G \cdot K - Z T^3 \exp\left(\frac{qV_c - E_g}{kT}\right)$$



+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:

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

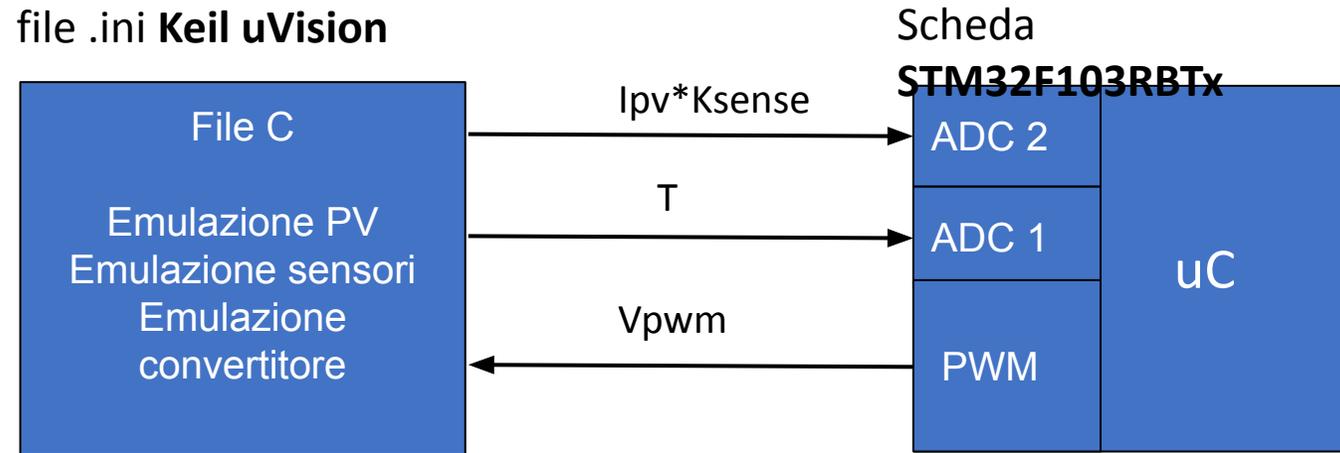
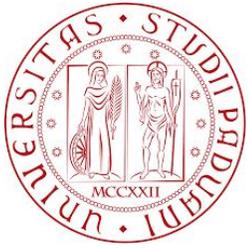
$$KI = \frac{RANGE ADC}{OR(I)} = 0.66 V/V$$

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

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

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

Modello di simulazione



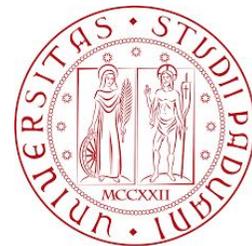
$$K_{sense} = K_{sense1} * KI = 0.33 V/A$$

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

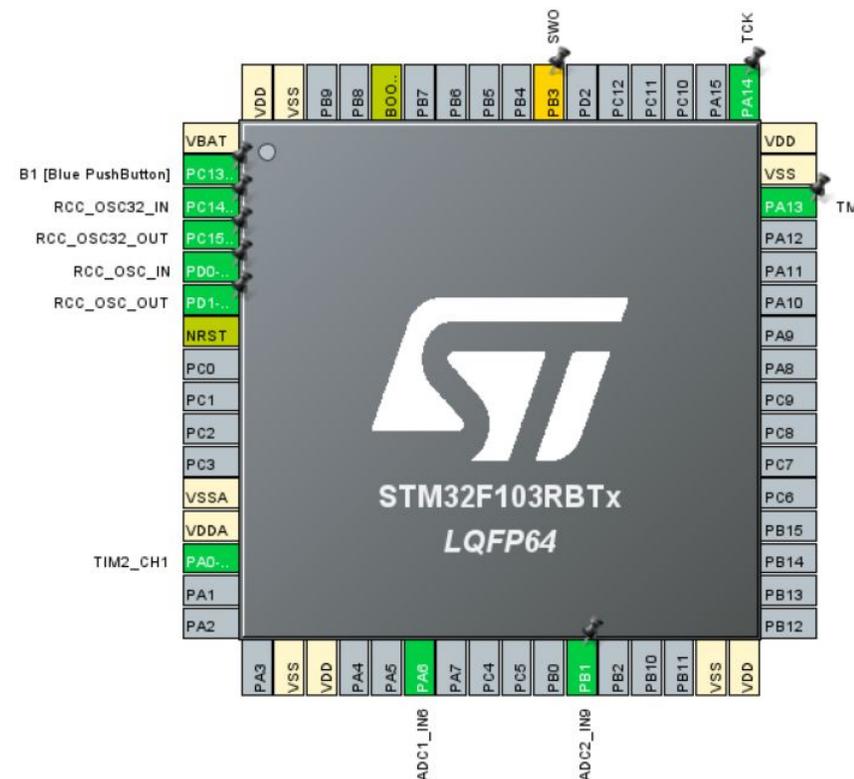
counter period: 65535

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

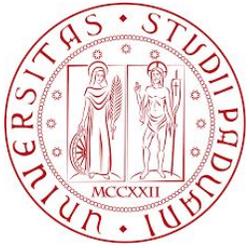
$$f_{PWM} = 10kHz$$

$$f_{ADC\ I} = 10Hz$$

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



Simulazione PV attraverso file C



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

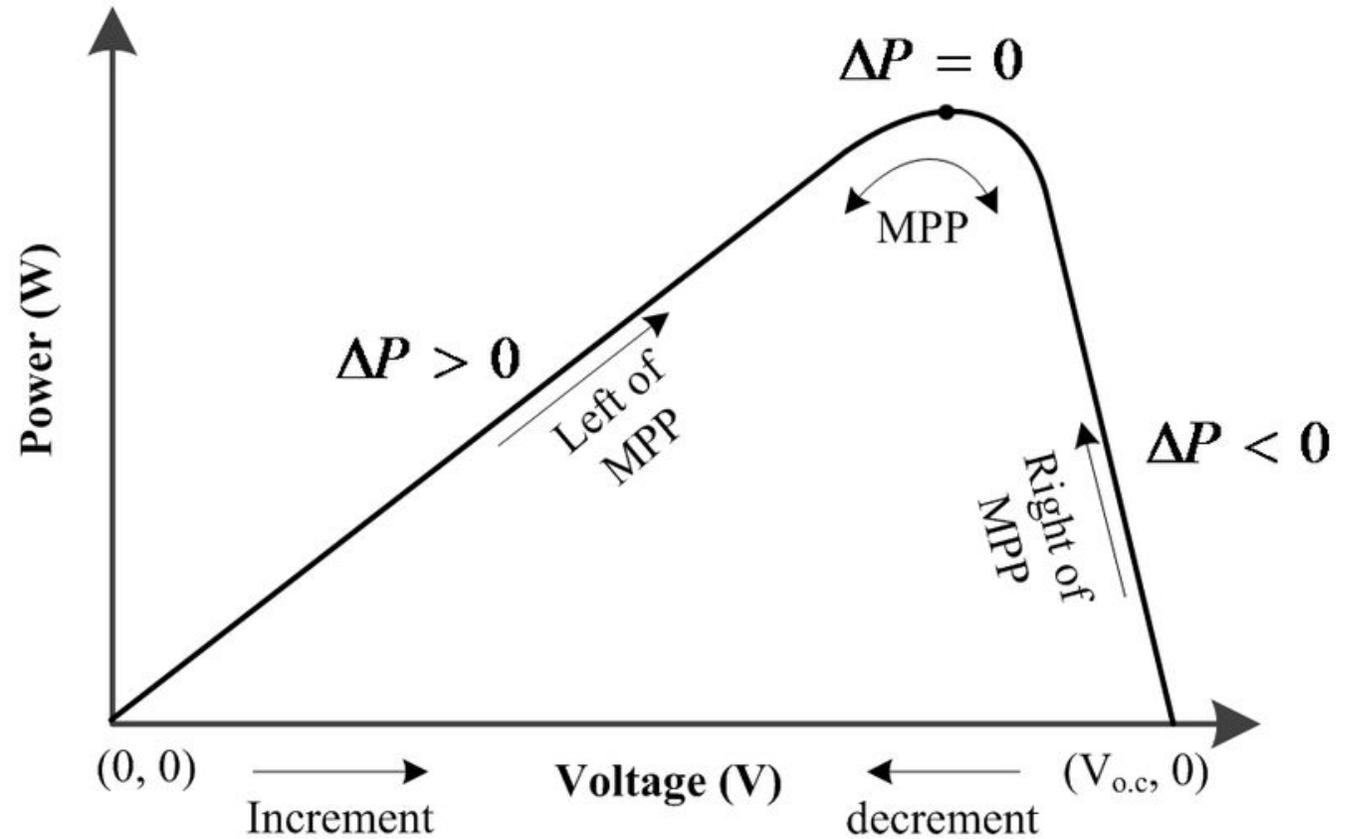
        P_diss = irradianza*1000*area_cella*(1-rendimento);
        delta_temp = ( ( a_th*delta_temp ) + ( b_th*Rth*P_diss ) );
        tempo=0;
    }
    temp_cella = ( delta_temp + T0 ) + t_kelvin;

    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

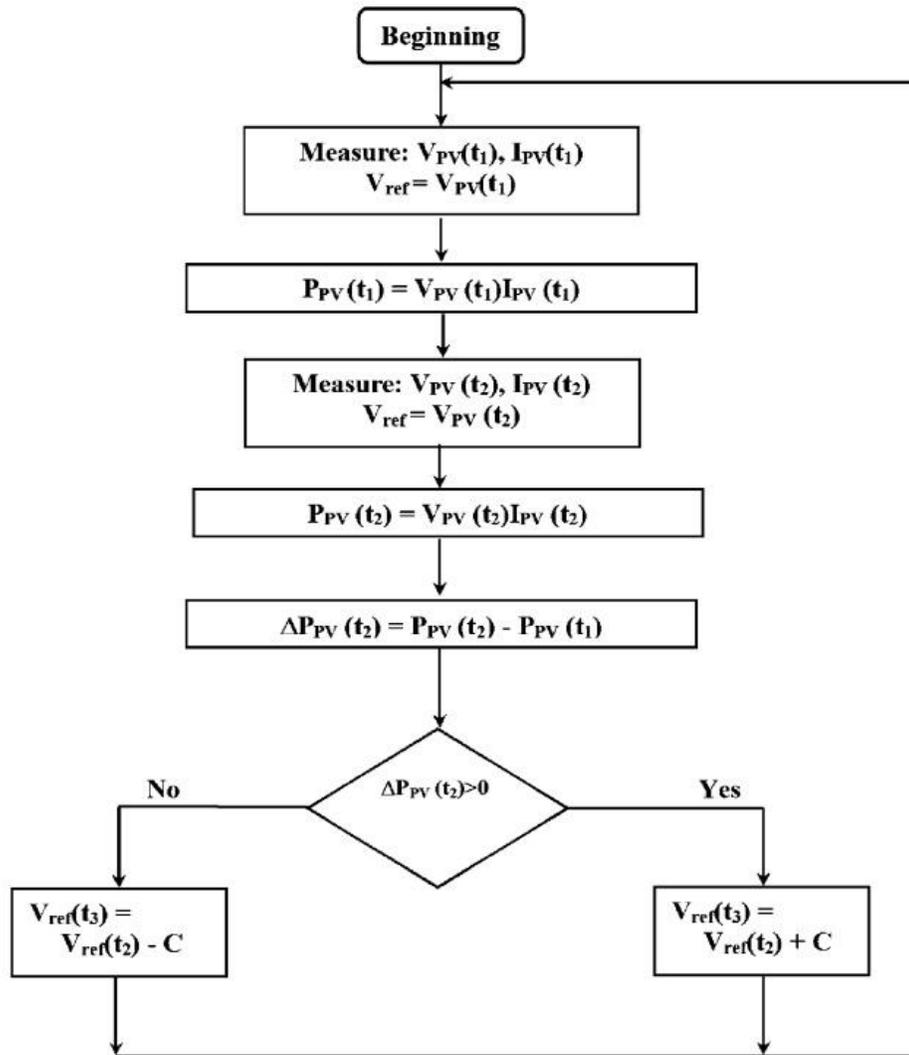


Figura1: Diagramma a blocchi P&O base

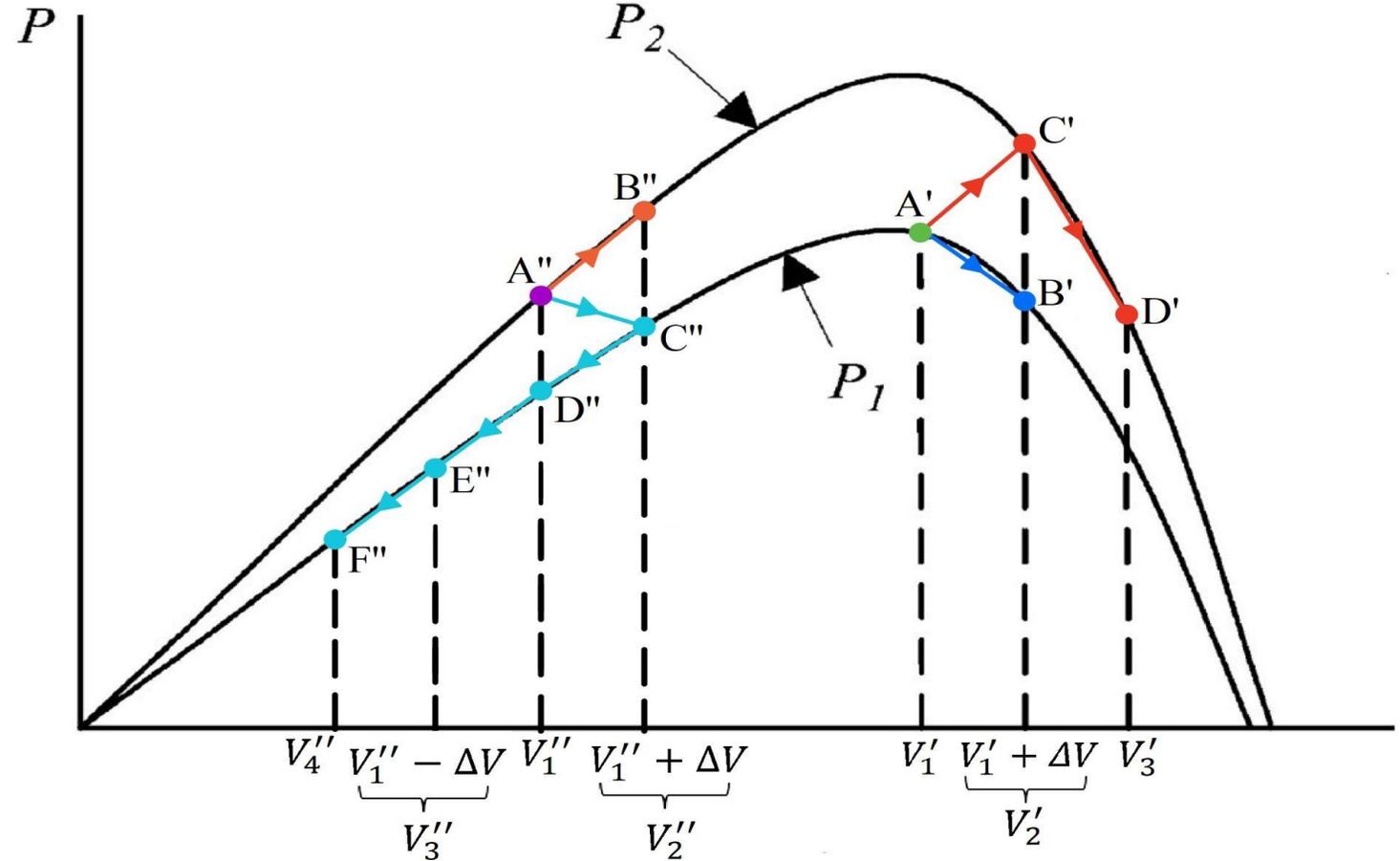
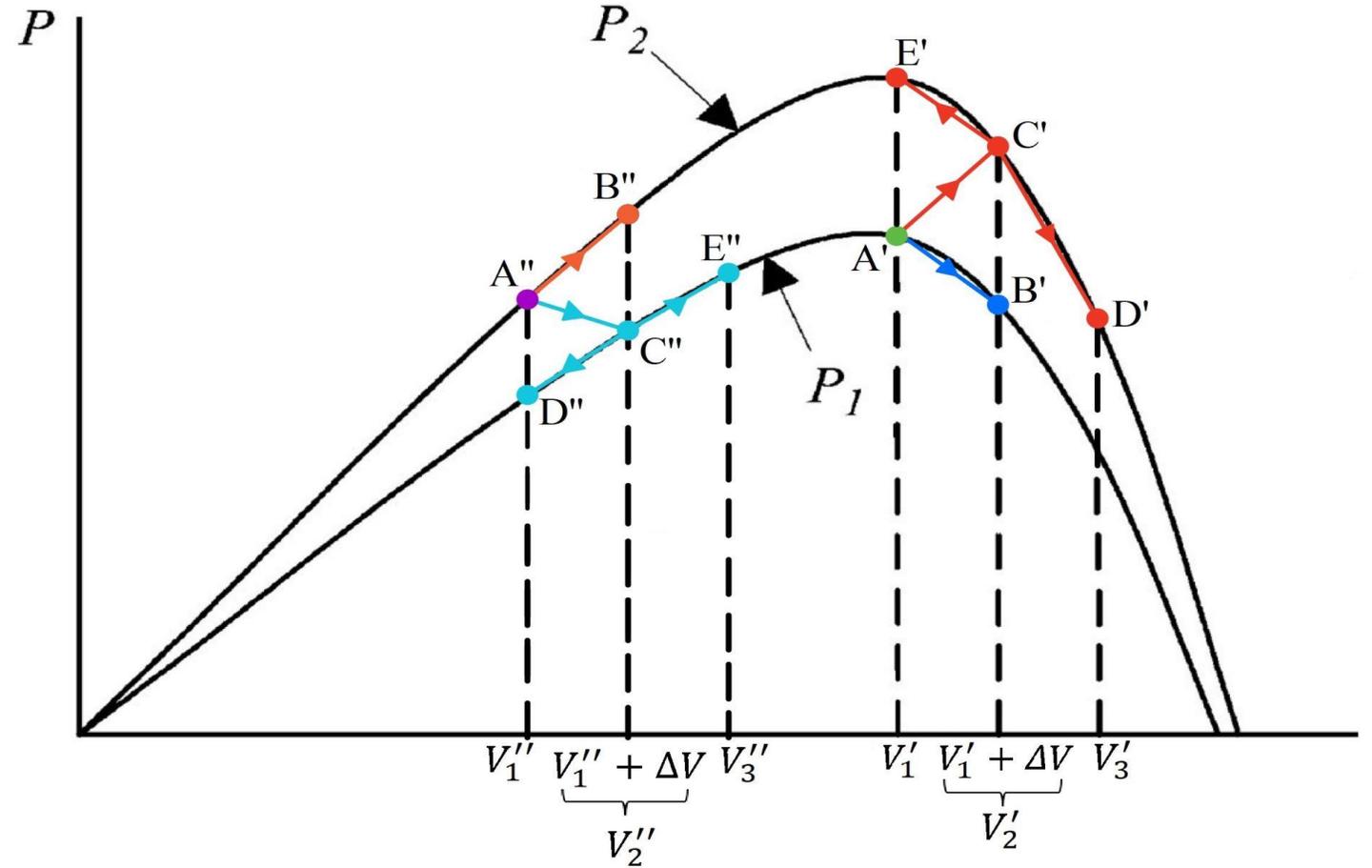
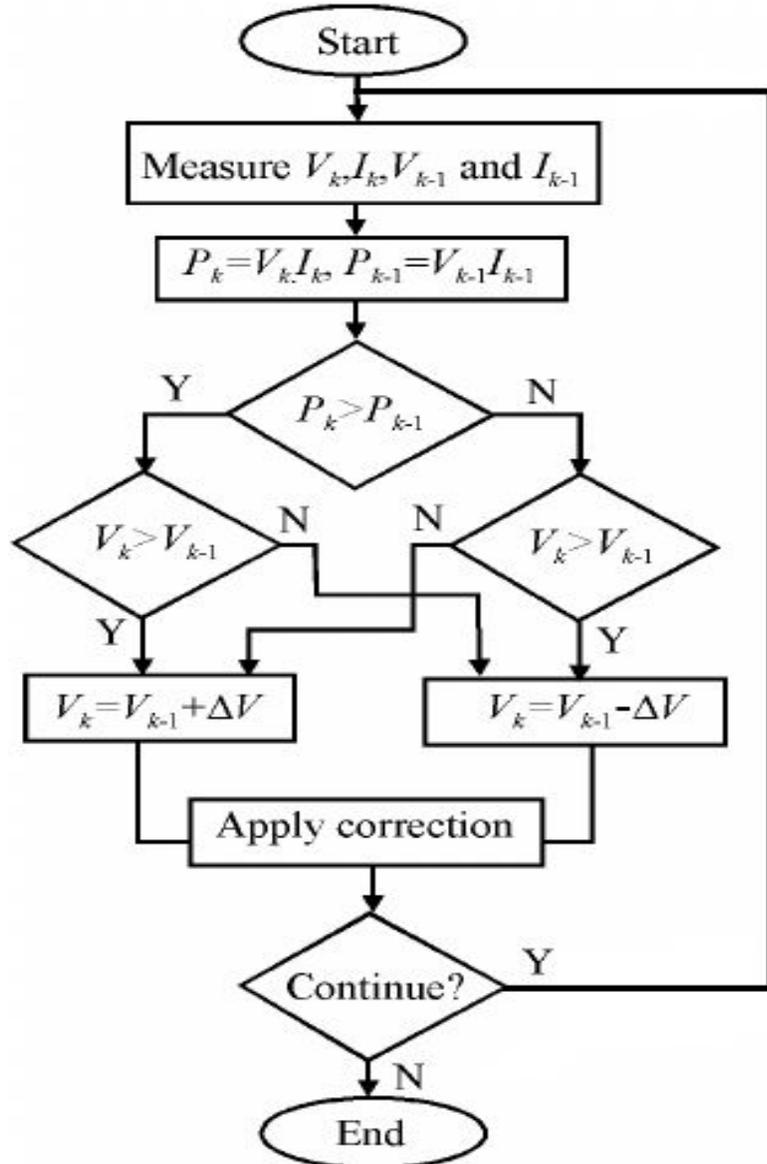


Figura2: variazione di potenza

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 ) {
```

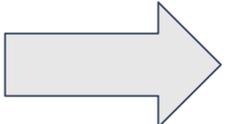
```
  V = ( Vpwm*K_PWM ) >> 14; //valore di tensione in 10.2
  I = ( Iadc*KI ) >> 8; //valore di corrente in 12.8
```

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

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

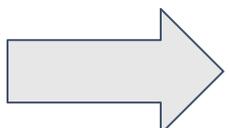
```
  //valutazione di V_STEP
```

```
  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---*/
```

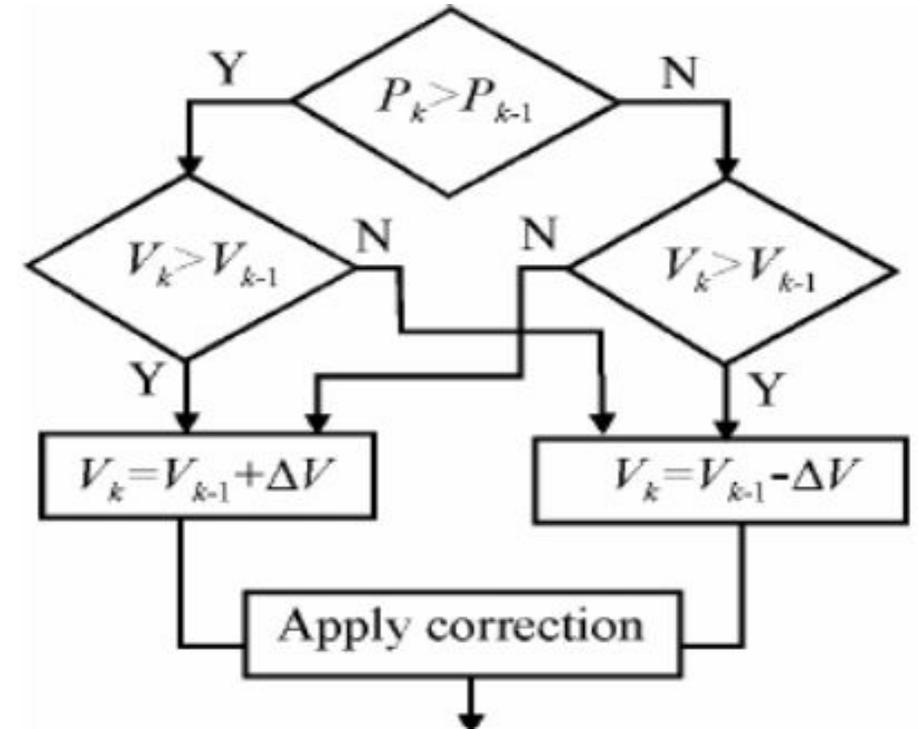
```

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);
}
```

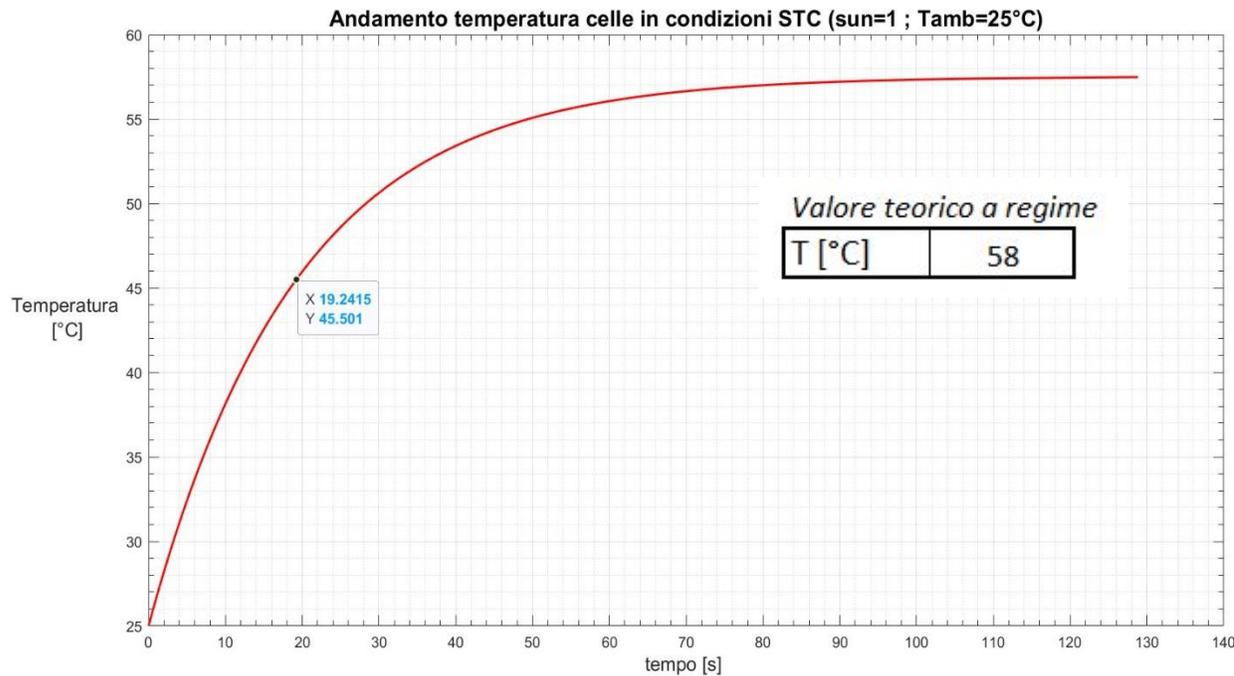
temperature	0x20000938 temperatu...	potenze	0x20000168 potenze
[0]	20	[0]	0
[1]	52	[1]	1025
[2]	52	[2]	1024
[3]	52	[3]	1033
[4]	43	[4]	516
[5]	36	[5]	531
[6]	36	[6]	526
[7]	36	[7]	529
[8]	36	[8]	532
[9]	0	[9]	0
[10]	0	[10]	0
[11]	0	[11]	0
[12]	0	[12]	0
[13]	0		

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.

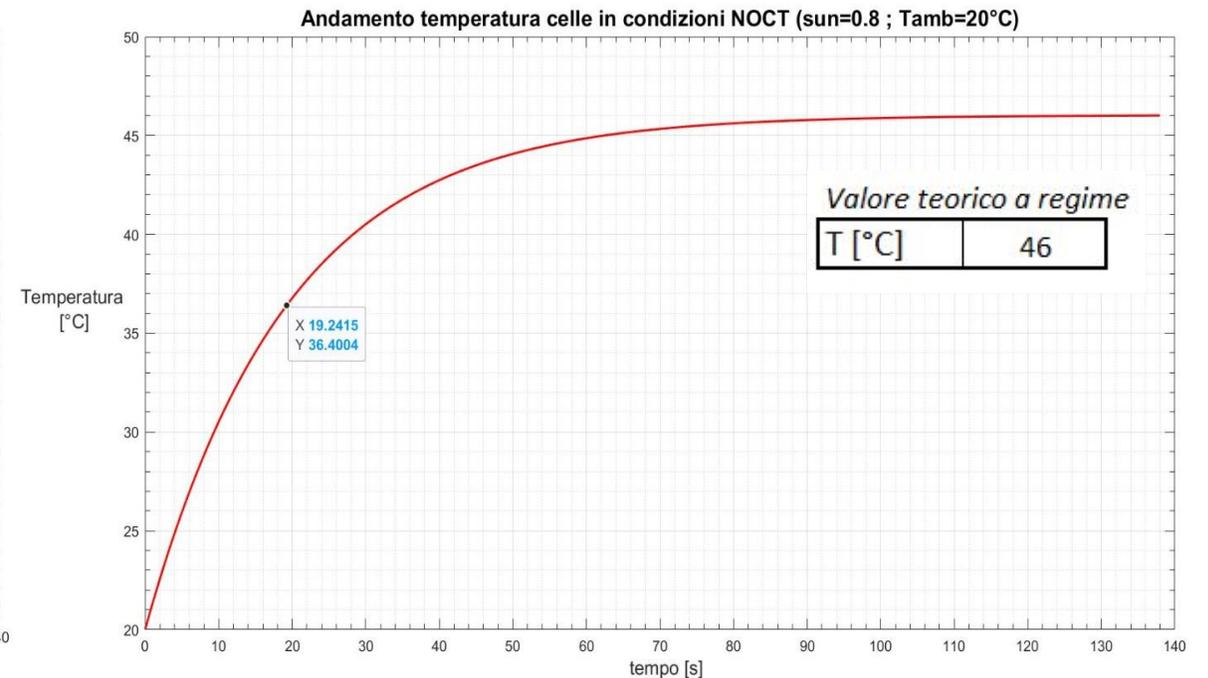
Analisi dati ottenuti

Andamenti Temperatura

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

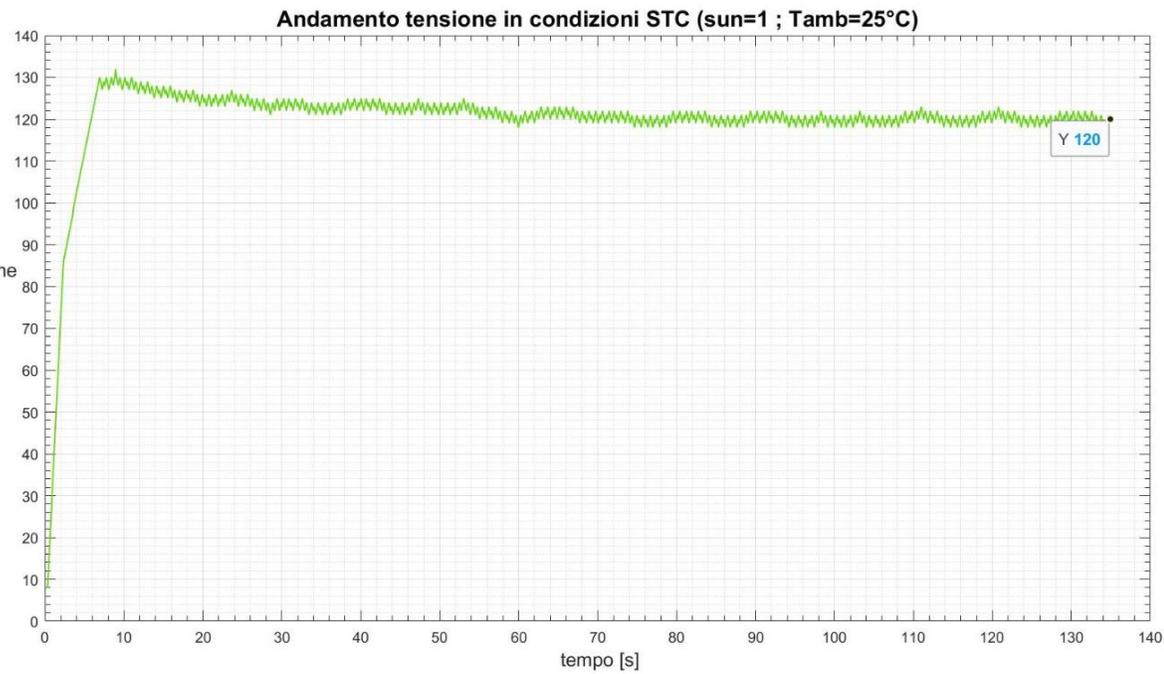


In condizioni NOCT ($sun=0.8$; $T_{amb}=20^{\circ}\text{C}$)

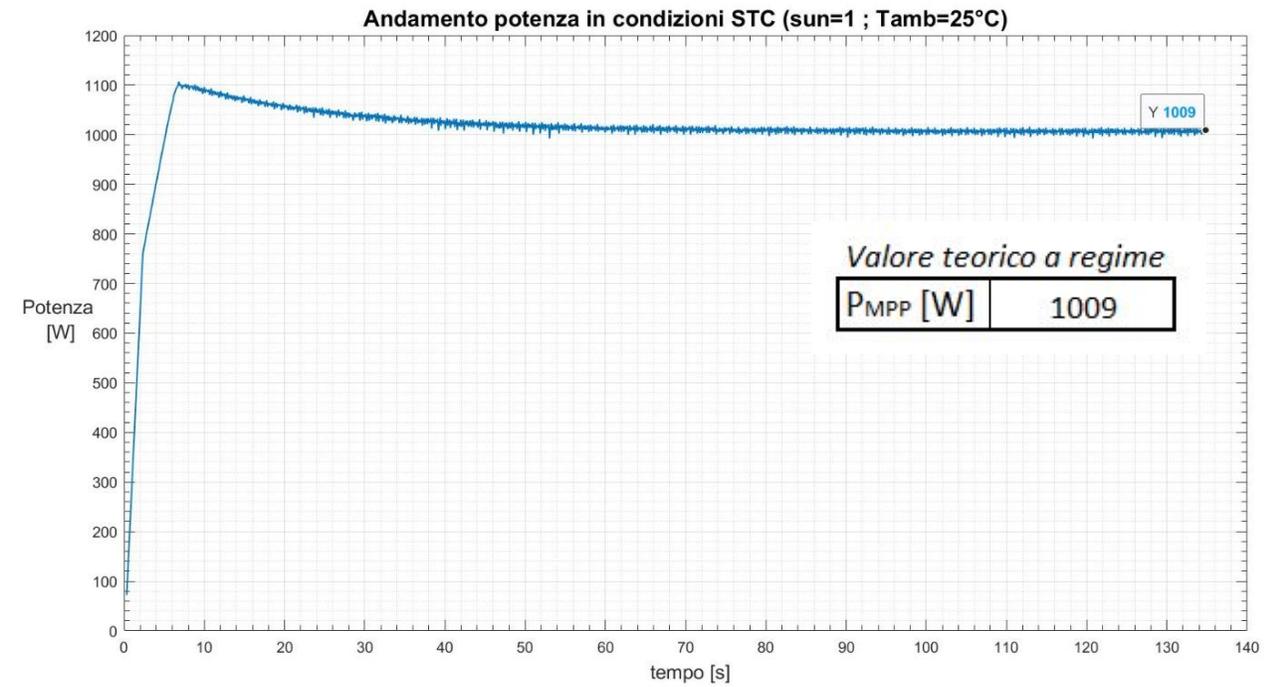


Condizioni STC (sun=1 ; Tamb=25°C)

Andamento *tensione*



Andamento *potenza*





Condizioni NOCT (sun=0.8; Tamb=20°C)

Andamento *tensione*

Andamento *potenza*

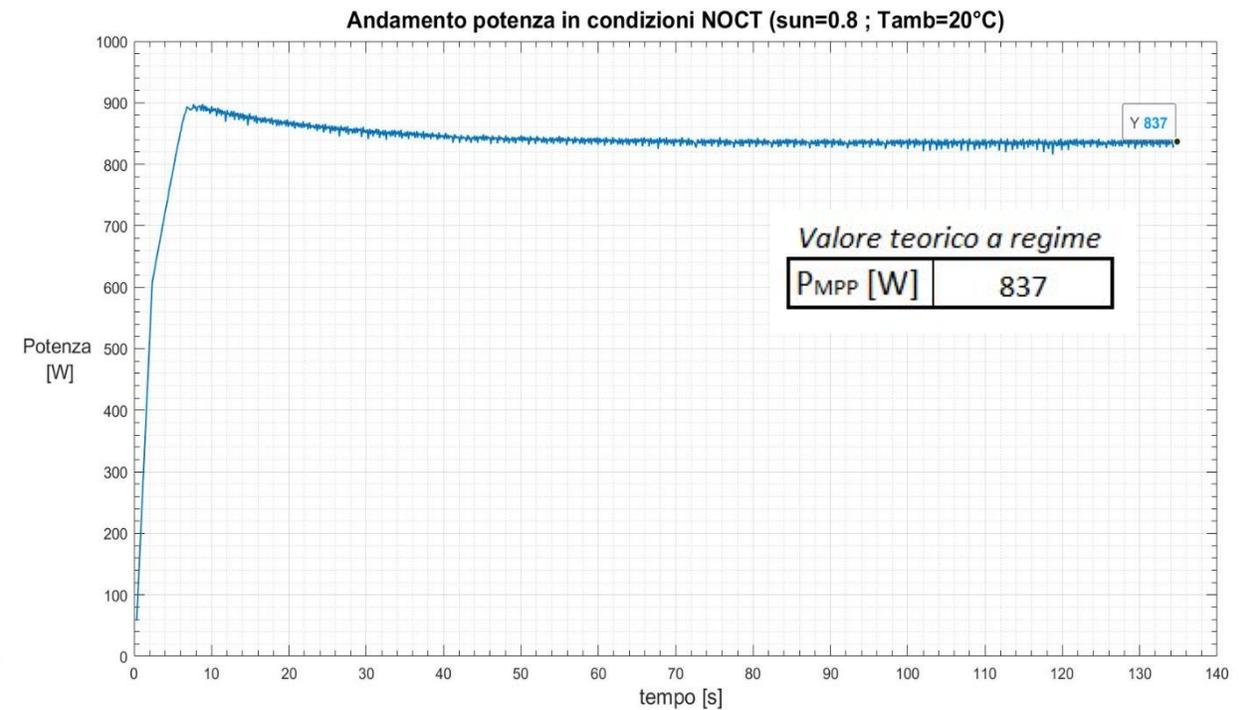
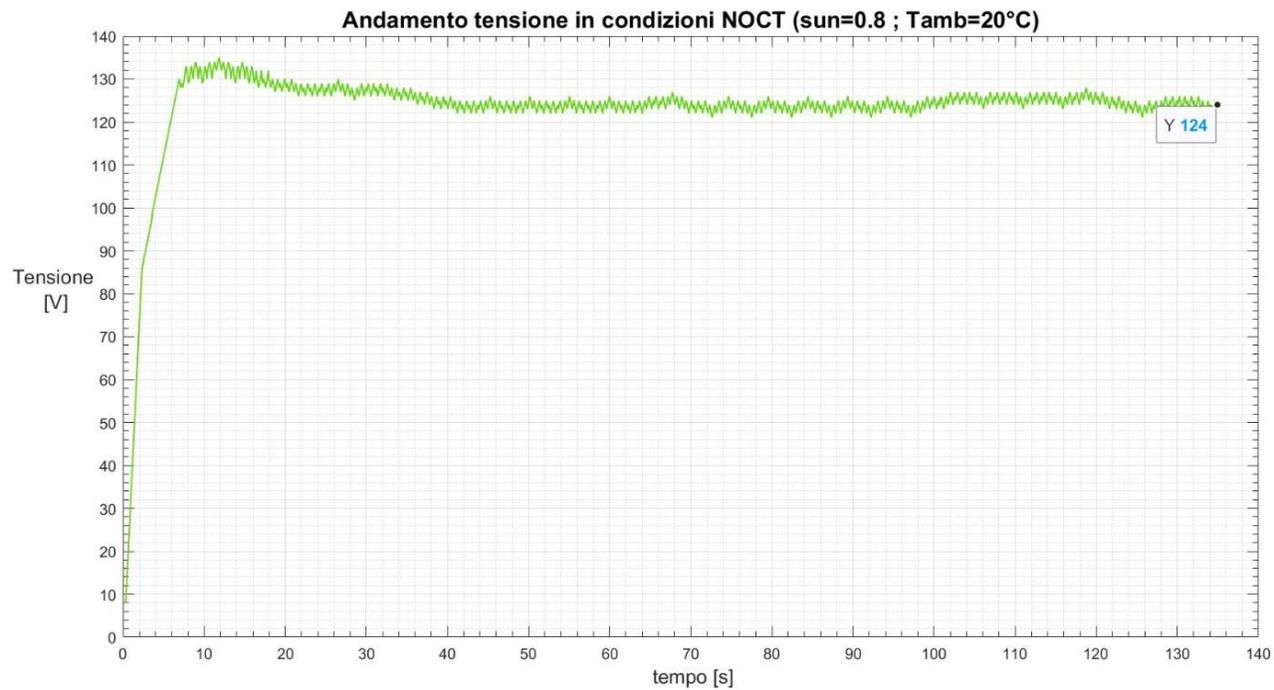
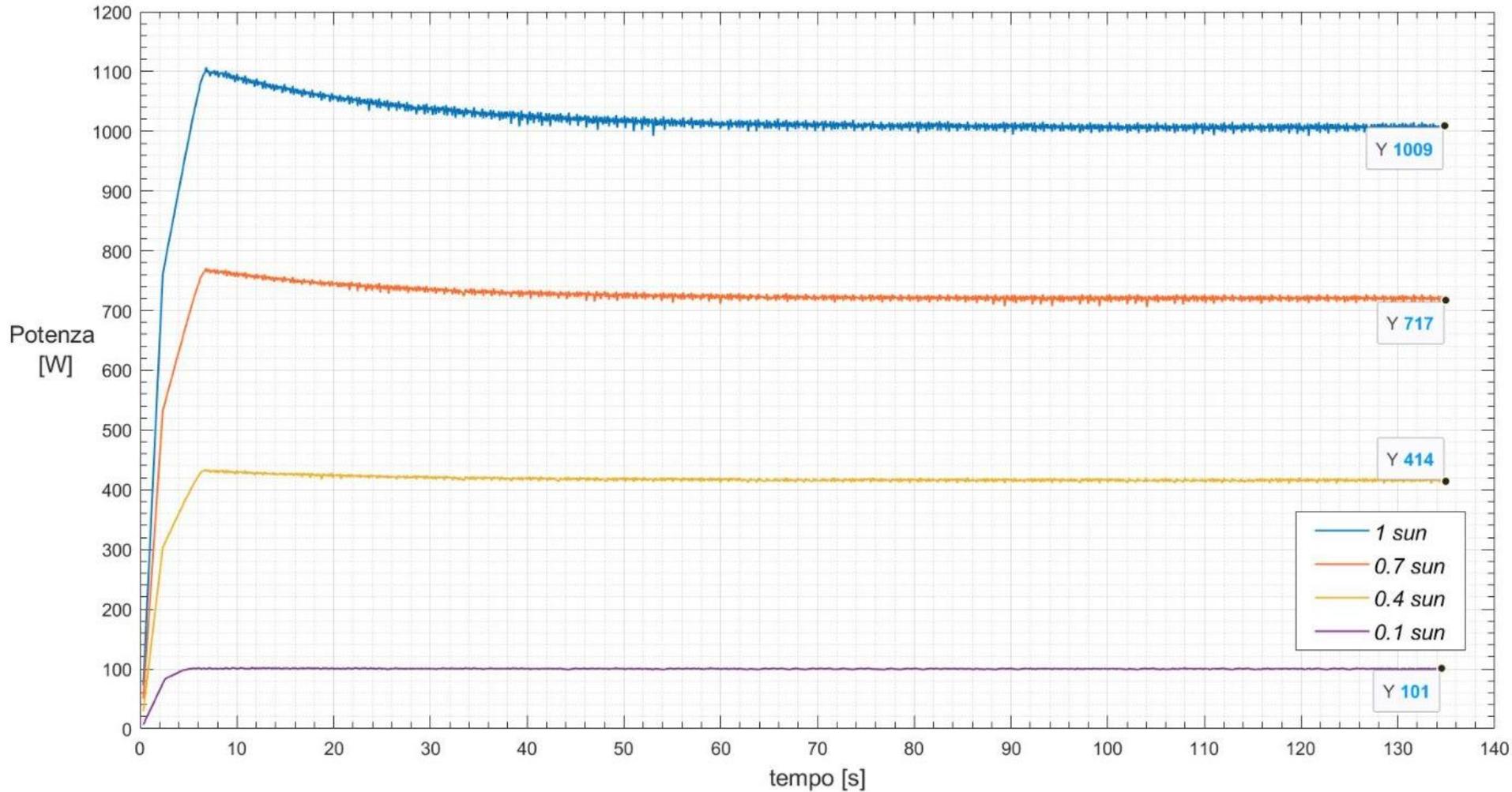
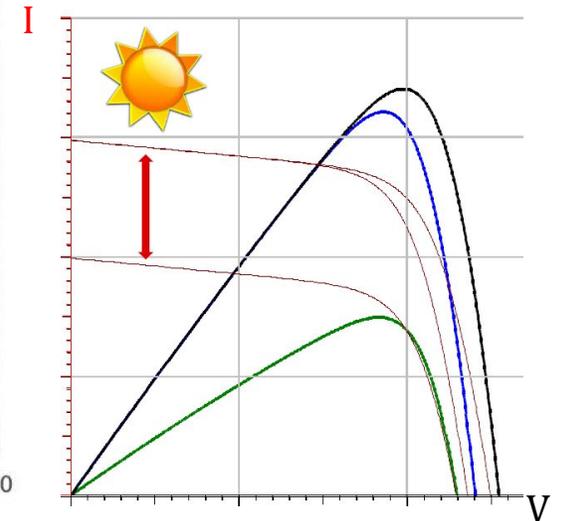


Grafico a Tamb costante a 25°C



Valori teorici a regime

Tamb=25 °C	
G[sun]	P _{MPP} [W]
1	1009
0,7	722
0,4	417
0,1	102



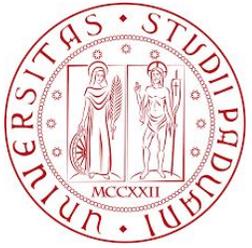
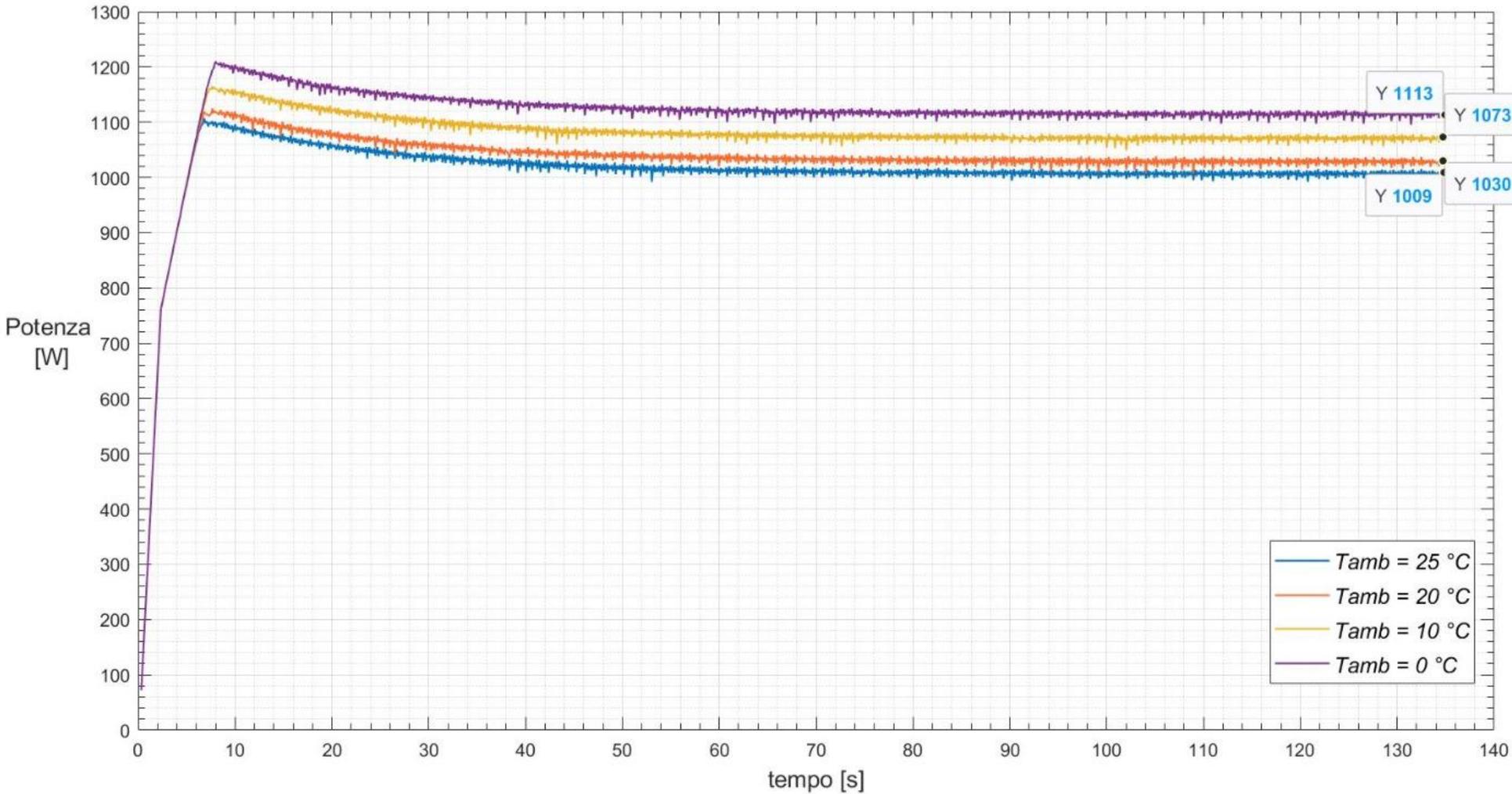
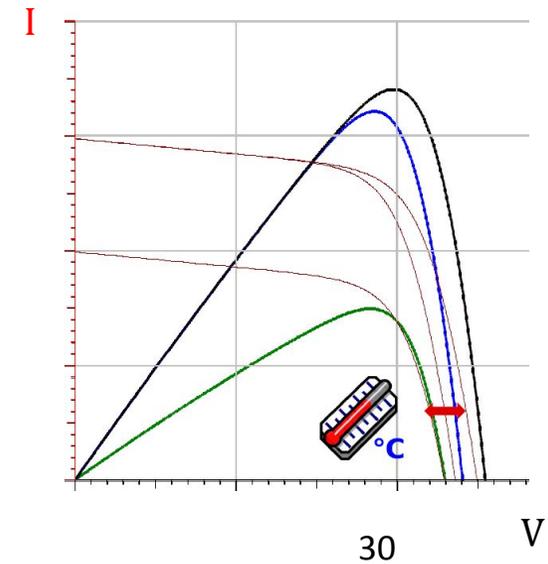


Grafico a irradianza costante, 1 SUN



Valori teorici a regime

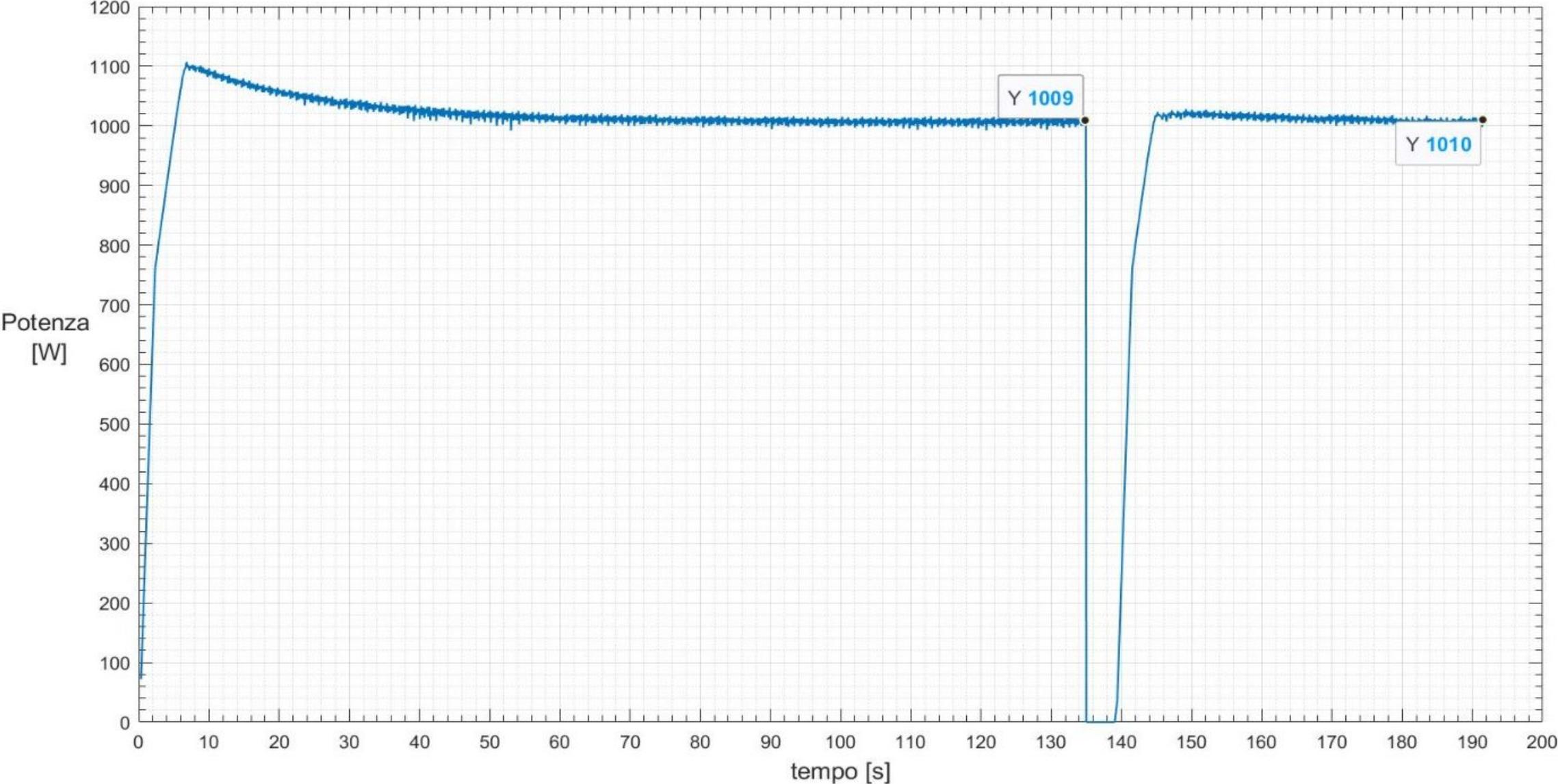
G=1sun	
T_{AMB} [$^{\circ}\text{C}$]	P_{MPP} [W]
0	1116
10	1074
20	1031
25	1009



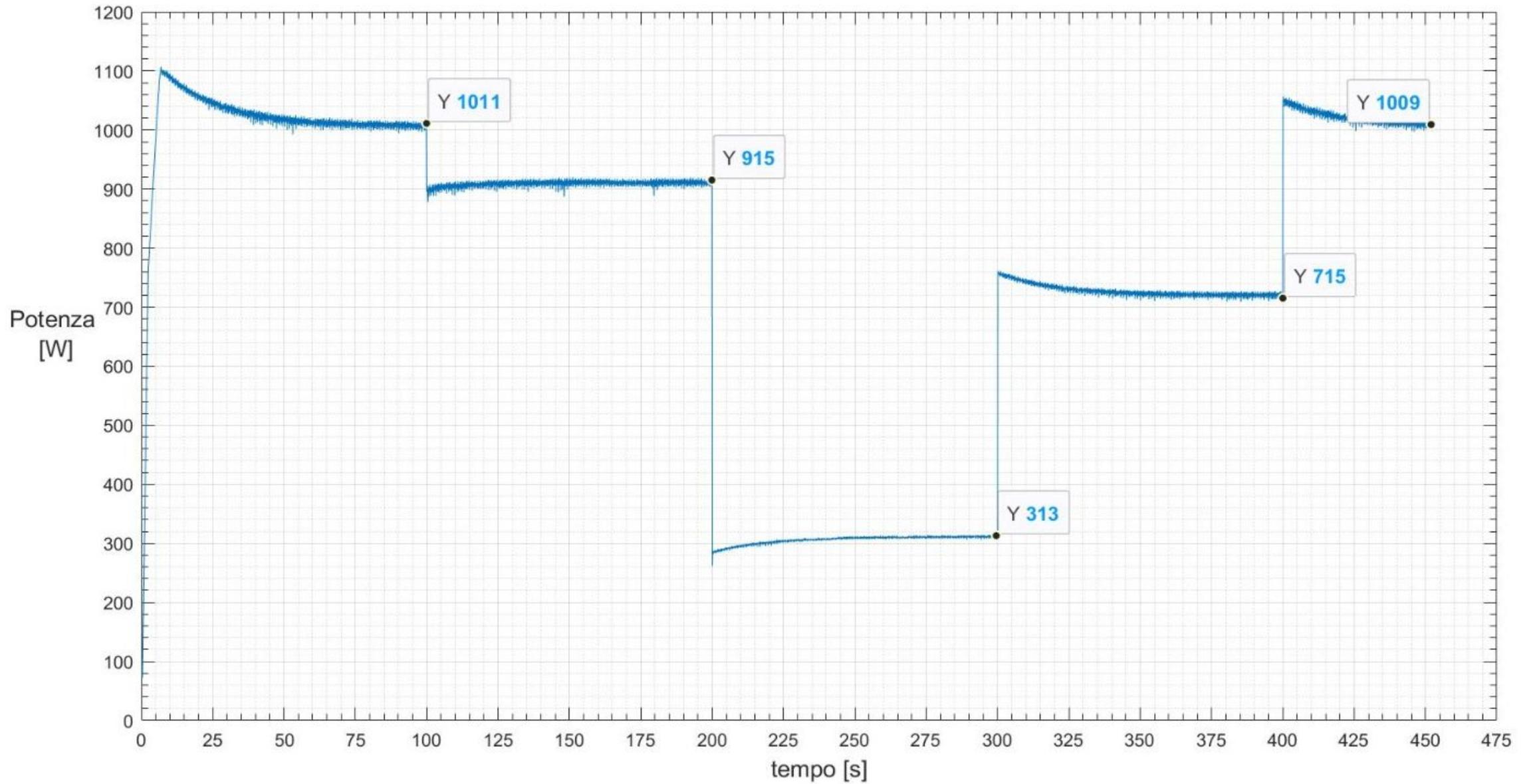
30

V

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/m²) e NOCT (20°C esterni; 800W/m²).

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)