Corso di Laurea Triennale in Ingegneria Meccatronica
Progetto di Tesi Laurea Triennale

Università degli Studi di Padova

Sviluppo di un Battery Management System con bilanciamento attivo per batterie al litio implementato su microcontrollore

Relatore: Biadene Davide

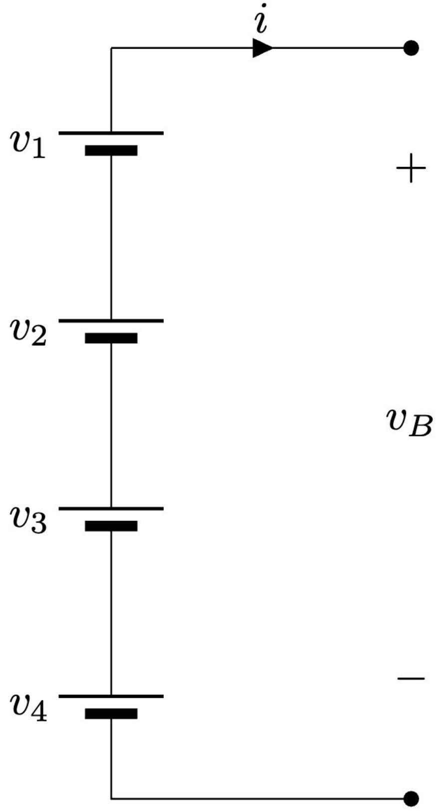
Laureandi:
Andreazza Filippo 1220260,
Pellizzari Nicolò 1219916,
Porcari Simone 2001345,
Tubaldo Tommaso 2004596

Anno Accademico 2022/2023

Introduzione

Attualmente le principali tecnologie per l'accumulo di energia elettrica, in campi applicativi quali veicoli a mobilità elettrica (EV) e dispositivi di continuità (UPS), sono le batterie, dispositivi elettrochimici capaci di immagazzinare un'elevata quantità di energia pur mantenendo dimensioni contenute (Densità di energia Li-ion = 250 ÷ 750 kWh/m^3).

Generalmente una batteria è l'insieme di più elementi posti in serie, detti celle. Per un corretto funzionamento della batteria è necessario che le celle si carichino/scarichino in modo equivalente, e ciò è possibile solo se la tensione ai loro capi è uguale. Quest'ultima condizione in un funzionamento normale si verifica solo se le celle hanno le stesse caratteristiche, ma questo viene a mancare a causa del loro deterioramento nel tempo dovuto a molteplici fattori (cicli di carica/scarica, temperatura di esercizio,ecc.).



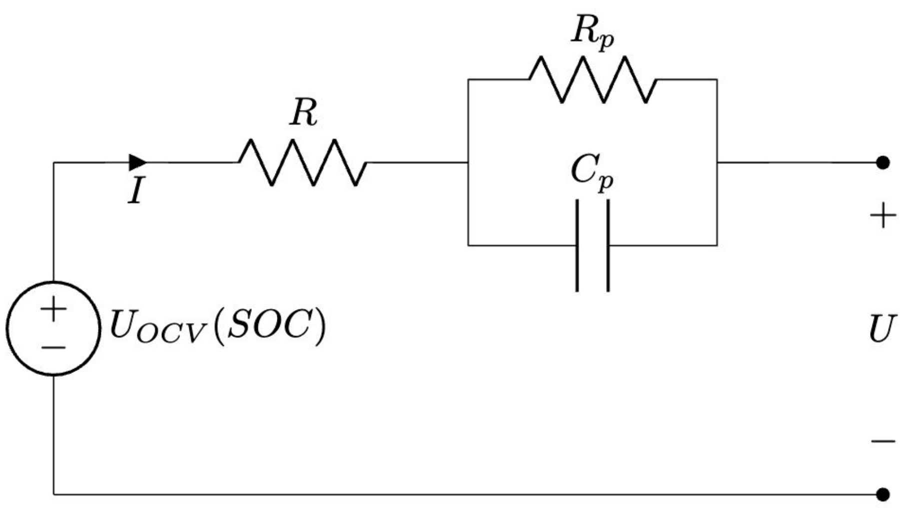
Introduzione

Risulta quindi necessario un dispositivo in grado di gestire le fasi di carica e scarica delle celle tramite un bilanciamento dei valori di tensione ai loro capi. Tale dispositivo prende il nome di Battery Management System (BMS), e include funzioni come

- Bilanciamento della carica delle celle
- Monitoraggio dei valori di tensione, corrente, temperatura e carica residua della batteria
- Generazione di segnali d'allarme per fenomeni di overvoltage, overcurrent e overtemperature

L'obiettivo del progetto è lo sviluppo di un algoritmo di bilanciamento per BMS da implementare su microcontrollore, e la validazione dell'algoritmo tramite modelli che simulino la batteria e il circuito del BMS. In particolare, si tratteranno i metodi per batterie con tecnologia agli ioni di litio (Lithium-ion) e bilanciamento di tipo attivo (ridistribuzione della carica).

Modello Elettrico Cella Li-ion



LKT alla maglia: $U = U_{OCV} - R \cdot I - U_p$

LKC del circuito RC: $C_p \dfrac{dU_p}{dt} + \dfrac{U_p}{R_p} = I$

$$\Downarrow$$

FDT del circuito RC: $\dfrac{U_p(s)}{I(s)} = \dfrac{R_p}{1 + s\,\tau_p} \qquad \tau_p = R_p \cdot C_p$

Discretizzando tramite approssimazione di Eulero:

$$U_p(s) = \frac{R_p}{1 + s\,\tau_p} I(s) \quad \overset{s = \frac{1 - z^{-1}}{T_c}}{\Longrightarrow} \quad U_p[k] = \underbrace{\frac{\tau_p}{T_c + \tau_p}}_{a_p} U_p[k-1] + \underbrace{\frac{T_c}{T_c + \tau_p}}_{b_p} R_p\, I[k]$$

Cella Li-ion di riferimento

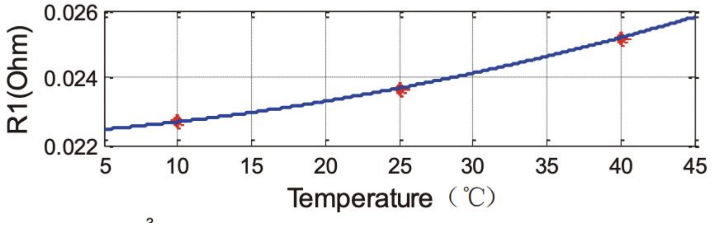
<u>Modello</u>: Samsung INR18650-30Q Lithium-ion Rechargeable Cell

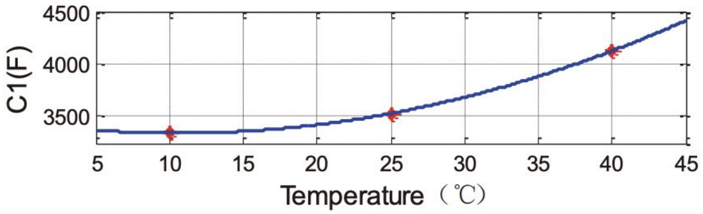
<u>Valori resistenze e capacità del modello</u>:

7.5 Initial internal impedance

Initial internal impedance measured at AC 1kHz after standard charge

Initial internal impedance $\leq$ 26mΩ





$$R = 0.020\,\Omega \div 0.025\,\Omega$$

$$R_p = 0.023\,\Omega$$

$$C_p = 3500\,F$$

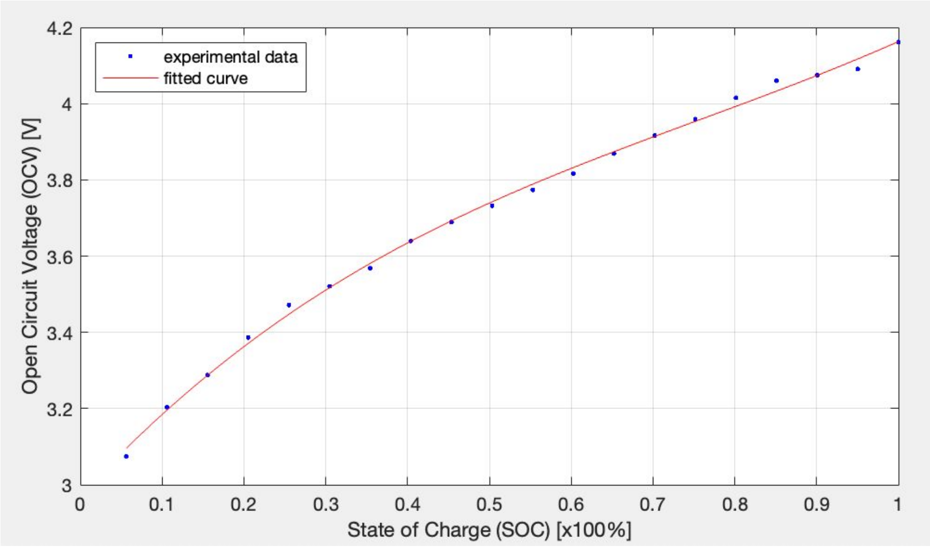
$$\tau_p = R_P \cdot C_p = 80.5\,s$$

Minimum Discharge Capacity	2950mAh
Nominal Voltage	3.6 V
Standard Charge	CCCV, 1.50 A, 4.20 $\pm$ 0.05V, 150mA cut-off
Standard Discharge	0.2C, 3.0V Discharge Cut-Off
Discharge Cut-Off	3.0 V
Operating Temperature	$0 \div 50°C$

Table 1: Nominal Specification

Calcolo della Open-Circuit Voltage U_{OCV}

U_{OCV}	SOC	U_{OCV}	SOC
4.1617	1	3.7317	0.5034
4.0913	0.9503	3.6892	0.4537
4.0749	0.9007	3.6396	0.4040
4.0606	0.8510	3.5677	0.3543
4.0153	0.8013	3.5208	0.3046
3.9592	0.7517	3.4712	0.2550
3.9164	0.7020	3.3860	0.2053
3.8687	0.6524	3.2880	0.1556
3.8163	0.6027	3.2037	0.1059
3.7735	0.5530	3.0747	0.0563



La tensione U_{OCV} è funzione dello stato di carica della cella (SOC) secondo una relazione non lineare:

$$U_{OCV} = f(SOC)$$

Tale relazione dipende dalle caratteristiche costruttive della cella e può essere ricavata partendo da dati sperimentali e applicando un metodo di curve fitting:

$$U_{OCV} = k_3 \cdot SOC^3 + k_2 \cdot SOC^2 + k_1 \cdot SOC + k_0$$

$$k3 = 0.8946$$
$$k2 = -2.0310$$
$$k1 = 2.3280$$
$$k0 = 2.9710$$

$$\text{RMSE} = 0.01602$$

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

Stima SOC - Coulomb Counting

Si definisce stato di carica della cella il rapporto tra la quantità di carica accumulata e la quantità di carica nominale:

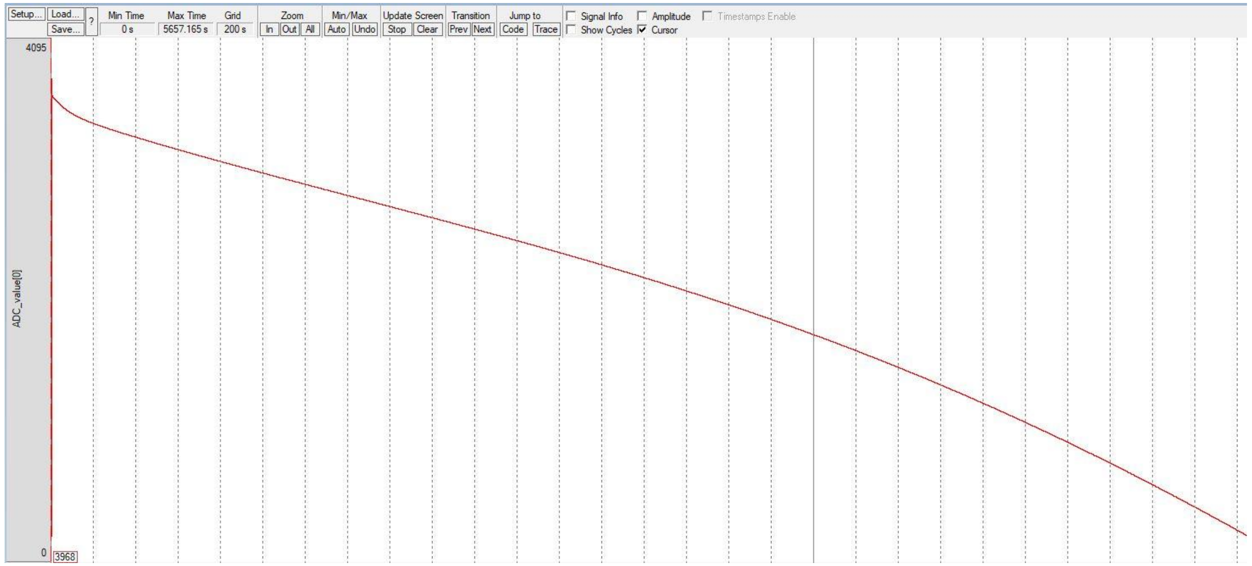
$$SOC(t) = \frac{Q(t)}{Q_n}$$

Per la stima del SOC si è scelto di adottare il metodo Coulomb Counting, metodo ricorsivo in funzione della corrente entrante alla cella:

$$SOC(t) = SOC(t_0) + \frac{1}{C_n}\int_{t_0}^{t} I(t)dt$$

$$SOC[k] = SOC[k-1] + \underbrace{\frac{T_c}{C_n}}_{k_c} I[k]$$

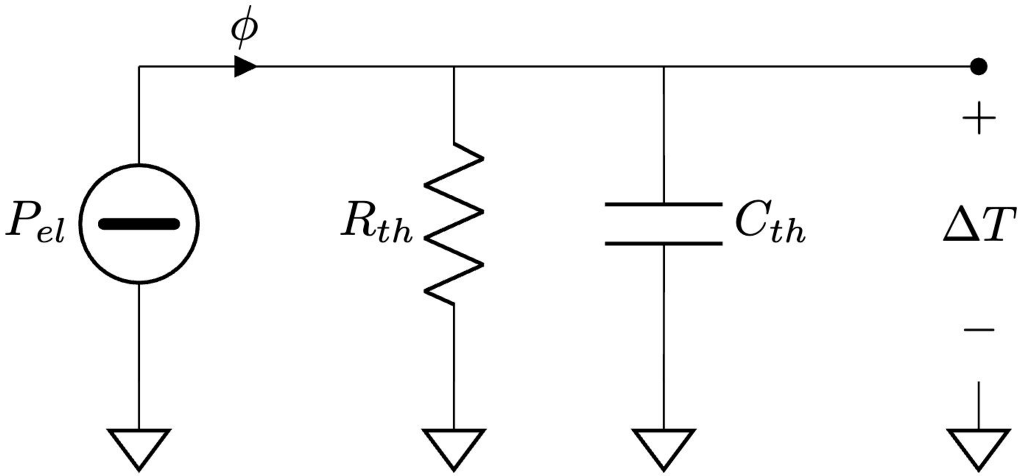
Simulazione



Scarica completa di una cella tramite carico resistivo

```
//ECM
soc1 = soc1 - (kc * I) - deltaQ1;  //Coulomb Counting for SOC Estimation
soc2 = soc2 - (kc * I) - deltaQ2;
soc3 = soc3 - (kc * I) - deltaQ3;
soc4 = soc4 - (kc * I) - deltaQ4;

//Open Circuit Voltage from SOC Estimation
ocv1 = k3 * soc1 * soc1 * soc1 + k2 * soc1 * soc1 + k1 * soc1 + k0;
ocv2 = k3 * soc2 * soc2 * soc2 + k2 * soc2 * soc2 + k1 * soc2 + k0;
ocv3 = k3 * soc3 * soc3 * soc3 + k2 * soc3 * soc3 + k1 * soc3 + k0;
ocv4 = k3 * soc4 * soc4 * soc4 + k2 * soc4 * soc4 + k1 * soc4 + k0;

//Ohmic Voltage of the internal resistance
Ur1 = Res1 * I;
Ur2 = Res2 * I;
Ur3 = Res3 * I;
Ur4 = Res4 * I;

//Polarization Voltage of the RC circuit
Up1 = a_p*Up1 + b_p*Rp*I;
Up2 = a_p*Up2 + b_p*Rp*I;
Up3 = a_p*Up3 + b_p*Rp*I;
Up4 = a_p*Up4 + b_p*Rp*I;

//Cell Voltage
v1 = ocv1 - Ur1 - Up1;
v2 = ocv2 - Ur2 - Up2;
v3 = ocv3 - Ur3 - Up3;
v4 = ocv4 - Ur4 - Up4;

//Battery Pack Voltage
Vb = v1 + v2 + v3 + v4;
```

Modello Termico



Si adotta come modello termico un modello del primo ordine caratterizzato dalla seguente funzione di trasferimento:

$$\Delta T = \frac{R_{th}}{1 + sR_{th}C_{th}} P_{el}$$

$$\tau_{th} = R_{th}C_{th} \quad \Downarrow \quad s = \frac{1 - z^{-1}}{T_c}$$

$$\Delta T[k] = \underbrace{\frac{\tau_{th}}{T_c + \tau_{th}}}_{a_{th}} \Delta T[k-1] + \underbrace{\frac{T_c}{T_c + \tau_{th}}}_{b_{th}} R_{th} P_{el}[k]$$

La quantità di calore generata coincide con la potenza dissipata per effetto joule dalle resistenze interne del battery pack:

$$P_i = (R_i + R_{pi}) \cdot I^2$$

$$P_{el} = \sum_i P_i$$

Modello Termico

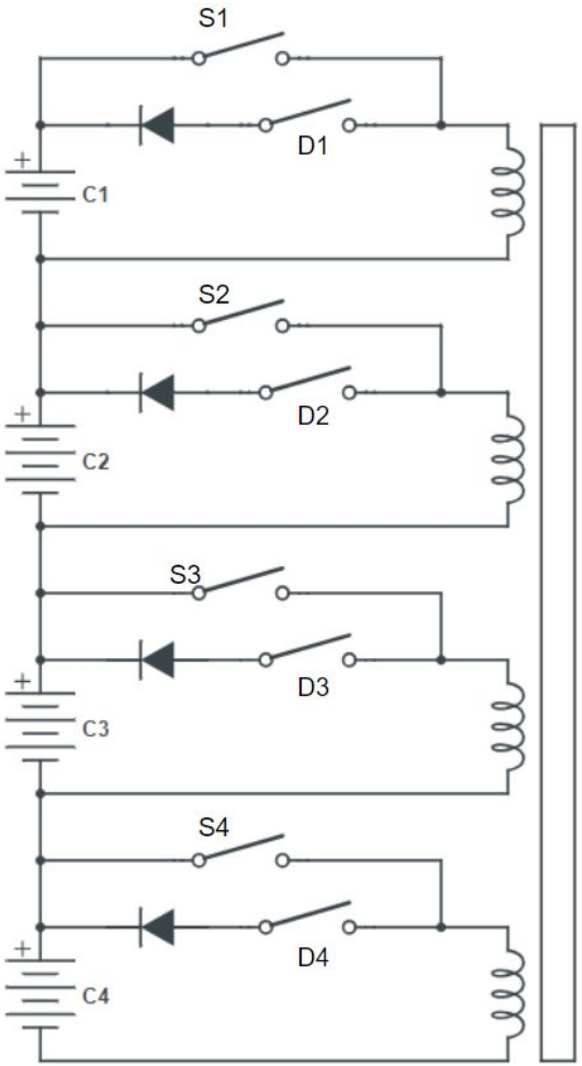
Per il dimensionamento di resistenza e capacità termica si è posto il criterio di scelta in funzione della costante di tempo desiderata:

$$R_{th} = 2\,\frac{°C}{W} \qquad C_{th} = 5\,\frac{J}{°C}$$

$$\tau_{th} = R_{th} \cdot C_{th} = 10\,s$$


```
//Thermic Model
i1 = v1 * n1 * Tsample / L;
i2 = v2 * n2 * Tsample / L;
i3 = v3 * n3 * Tsample / L;
i4 = v4 * n4 * Tsample / L;

Pel1 = (Res1 + Rp) * (I + i1) * (I + i1);
Pel2 = (Res2 + Rp) * (I + i2) * (I + i2);
Pel3 = (Res3 + Rp) * (I + i3) * (I + i3);
Pel4 = (Res4 + Rp) * (I + i4) * (I + i4);

Pel = Pel1 + Pel2 + Pel3 + Pel4;

dT = a_th*dT + b_th*Rth*Pel;

ADC1_IN15 = kth * (dT);
```

Circuito BMS



Caratteristiche di un BMS basato su trasformatore:

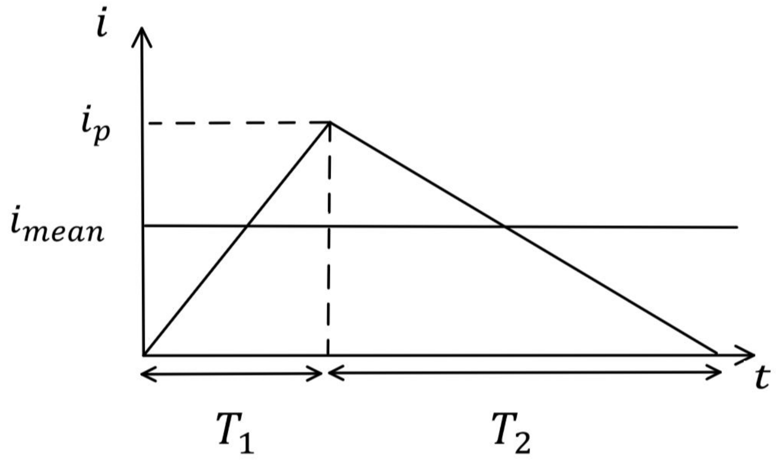
- Grande corrente di bilanciamento
- Velocità
- Alta efficienza
- Facile da controllare
- Costoso da implementare

$$L = 58\ \mu H$$

Simulazione

Semplificazioni e idealità:

- Nessuna perdita resistiva e al traferro
- Efficienza unitaria nello scambio di energia
- Stessa corrente media tra carica e scarica
- Tensione della cella costante durante la commutazione degli switch

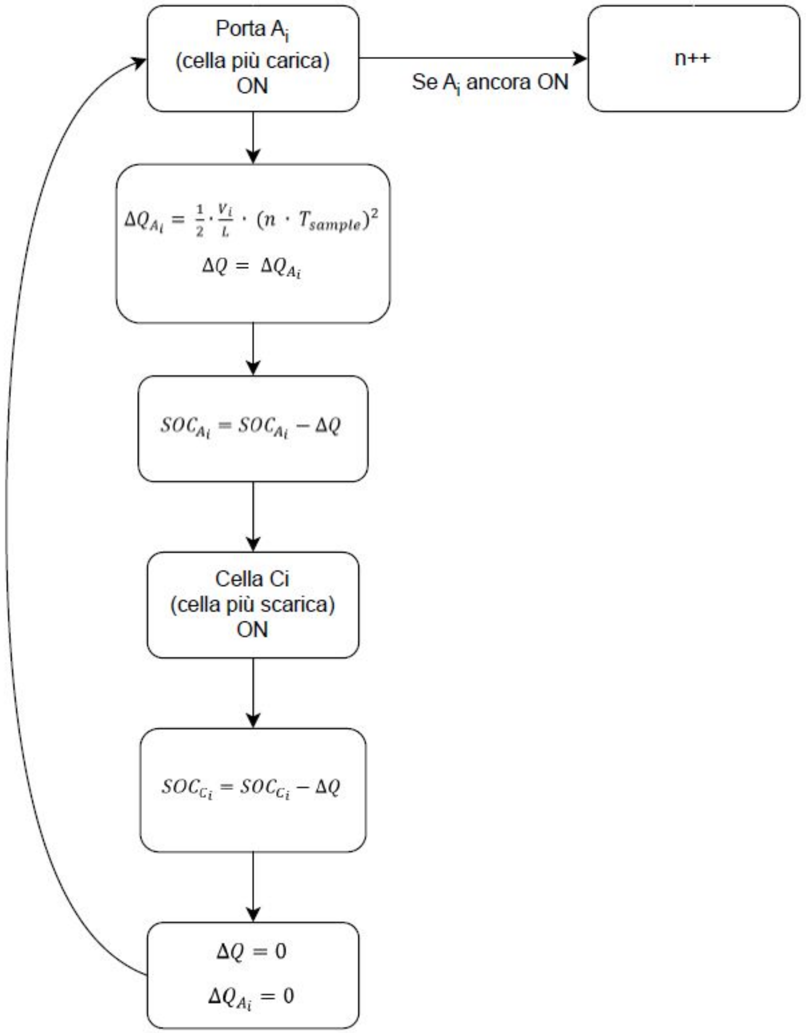


$$\frac{1}{2} \cdot L \cdot (i_{mean,1})^2 = \frac{1}{2} \cdot L \cdot (i_{mean,2})^2$$

$$i_{mean} = \frac{i_p}{2} \qquad i_p = \frac{V}{L} \cdot T_1 = \frac{V}{L} \cdot n \cdot T_{sample}$$

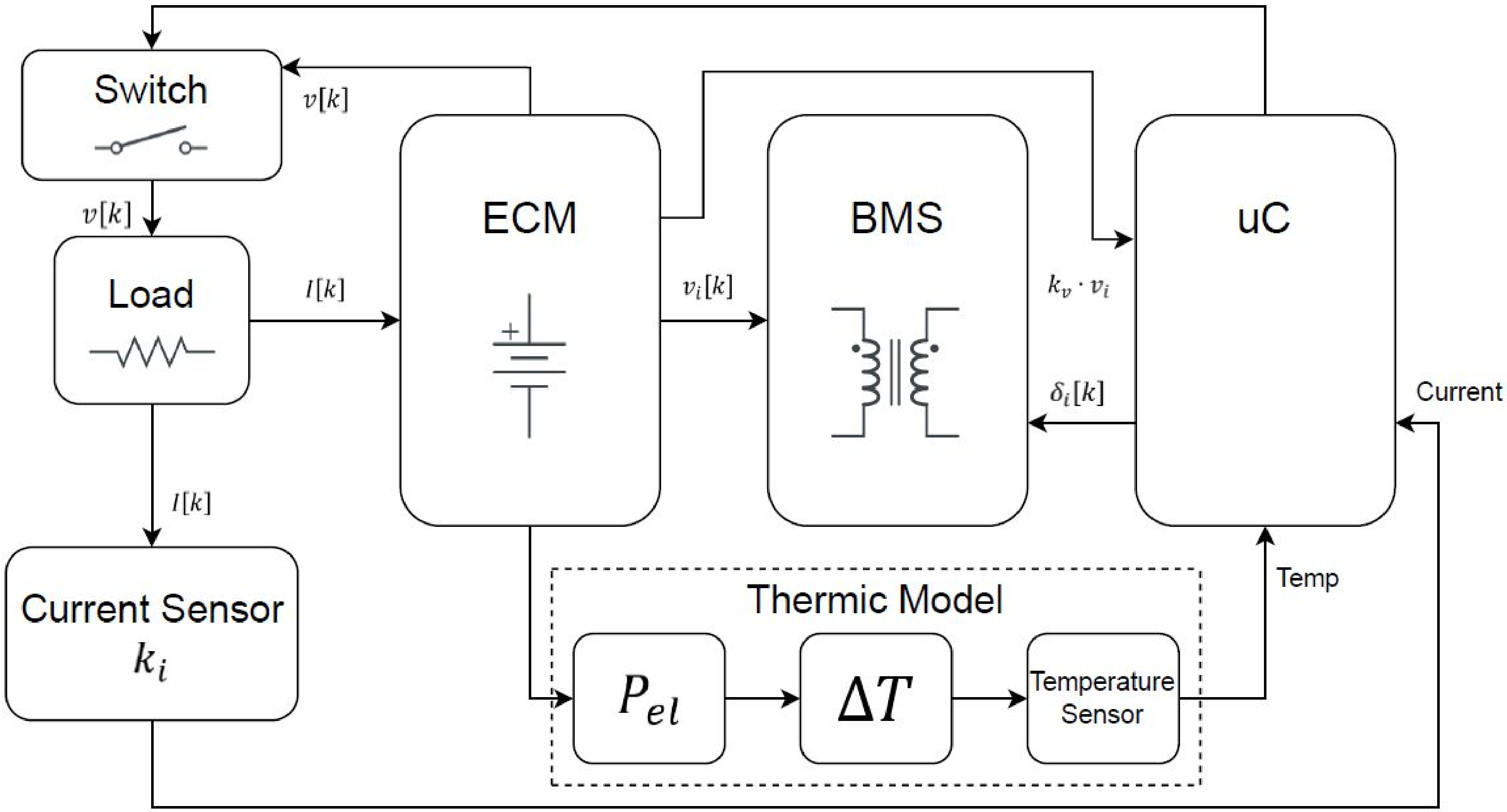
$$\Delta Q = i_{mean} \cdot T_1 = \frac{1}{2} \cdot \frac{V}{L} \cdot (n \cdot T_{sample})^2$$

Simulazione




```
//BMS

//Cell 1
if (PORTA & 0x00000200) {
  n1++;
  flag1 = 1;
} else if (PORTC & 0x00000200) {
  deltaQ1 = - deltaQ;              //Carica della cella 1
  deltaQ = 0;
}

if( (flag1 == 1) && !((n1 == 0) && (PORTA & 0x00000200)) ){
  deltaQ1 = ( 0.5 * v1 * n1 * n1 * kL );
  n1 = 0;
  flag1 = 0;
  deltaQ = deltaQ1;
}

//ECM
soc1 = soc1 - (kc * I) - deltaQ1;
soc2 = soc2 - (kc * I) - deltaQ2;
soc3 = soc3 - (kc * I) - deltaQ3;
soc4 = soc4 - (kc * I) - deltaQ4;
```

Diagramma a blocchi sistema

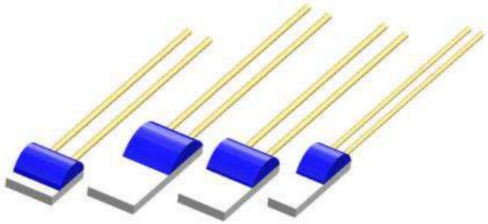


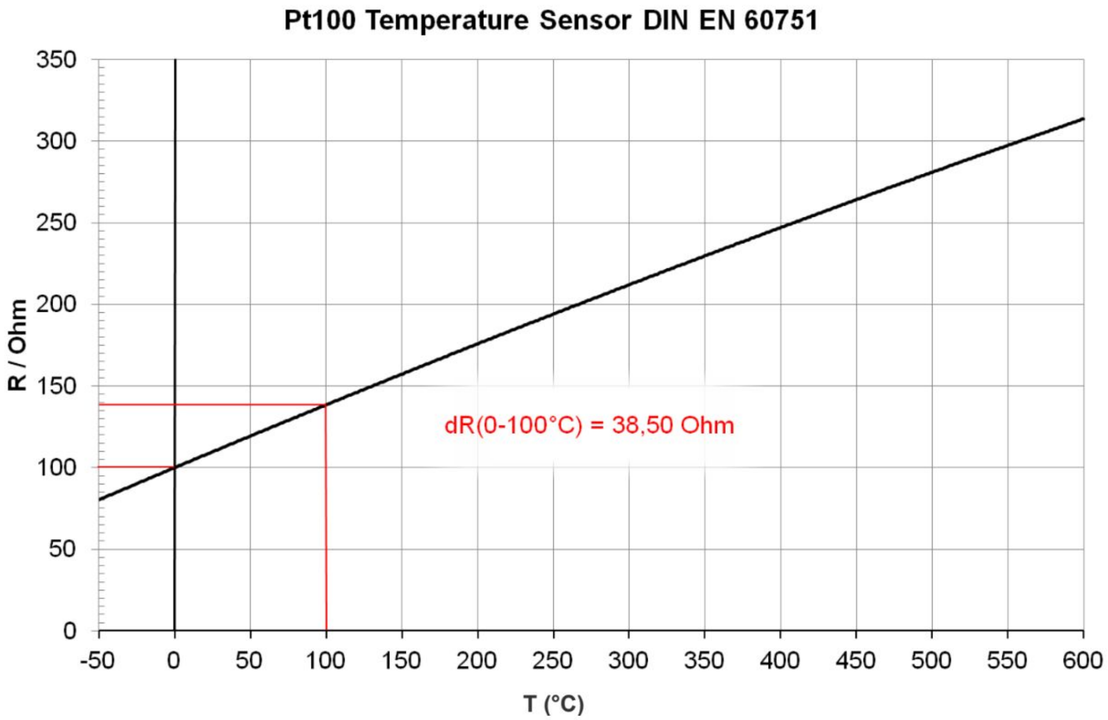
Sensore di temperatura

Parameter	Symbol	Condition	Min	Typ	Max	Unit
Nominal Resistance at 0 °C	R_0	Class B (F0.3) Pt100 Class B (F0.3) Pt1000	99.88 998.8	100.00 1000.0	100.12 1001.2	Ω
Tolerance at 25°C		Room temperature calibration	-0.43	0	0.43	°C
Temperature Coefficient of Resistance	TCR	0 °C, 100 °C		3850		ppm/°C
Tolerance Temperature Range*		Class C (F 0.6) Class B (F 0.3) Class A (F 0.15) Class T (F 0.1) Class B/Cryo (F 0.3)	-50 -50 -30 -30 -200		600 600 300 200 200	°C
Self-Heating Coefficient in Air Flow: 1 m/s		PTFC outline PTFD outline PTFF outline PTFM outline		0.5 0.33 0.5 0.5		°C/mW
Response Time Water Flow: 0.4 m/s	$\tau_{W,0.9}$	PTFC outline PTFD outline PTFF outline PTFM outline		0.2 0.35 0.2 0.2		s
Response Time Air Flow: 1 m/s	$\tau_{A,0.9}$	PTFC outline PTFD outline PTFF outline PTFM outline		10 17 10 10		s
Measuring Current R_0: 100 Ω		PTFC outline (Class B) PTFD outline (Class B) PTFF outline (Class B) PTFM outline (Class B)			1.4 1.7 1.4 1.4	mA
Measuring Current R_0: 1000 Ω		PTFC outline (Class B) PTFD outline (Class B) PTFF outline (Class B) PTFM outline (Class B)			0.4 0.5 0.4 0.4	mA

Scelta :

PTFC outline (Class B)





Sensore di temperatura

Per T > 0 °C vale : $R_{(T)} = R_{(0)} \cdot (1 + a \cdot T + b \cdot T^2)$

Dove :

- $R_{(0)} = 100\ \Omega$
- a = 3.9083E-03
- b = - 5.775E-07

Valuto l'approssimazione : $R_{(T)} = K \cdot T + R_{(0)}$

Per T $\in$ [0, 100] °C è dato: dR = 38.5

K = 38.5 / 100 = 0.385

Maggior differenza a : T = 50 °C

$e(T=50) = R_{(0)} \cdot (1 + a \cdot 50 + b \cdot 50) - K \cdot 50 + R_{(0)} = 0.147125$

e / R = 0.147129 / 119.397125 = 0.12 %

E' valida :

$R_{(T)} = R_{(0)} \cdot (1 + a \cdot T + b \cdot T^2) \approx K \cdot T + R_{(0)}$

Sensore di temperatura

Con I_m = 1.4 mA di misura ottengo :

$V_s = I_m \cdot R_{(T)} = 5.38\ E^{-4} \cdot T + 0.14$

Nel range considerato :

$V_s (0) = 0.14$ V.

$V_s (50) = 0.16695$ V.

Adatto tale range con quello del uC ed ottengo :

$\beta \approx 122.449$

per T = 0 °C ➜ $V_s(0) = -17.1429$ V

Implemento (INA) :

$V_{uC} (V_s) = 122.449 \cdot V_s - 17.1429$ V

Nel file simulazione :

$V_{uC} = 0.066 \cdot T$

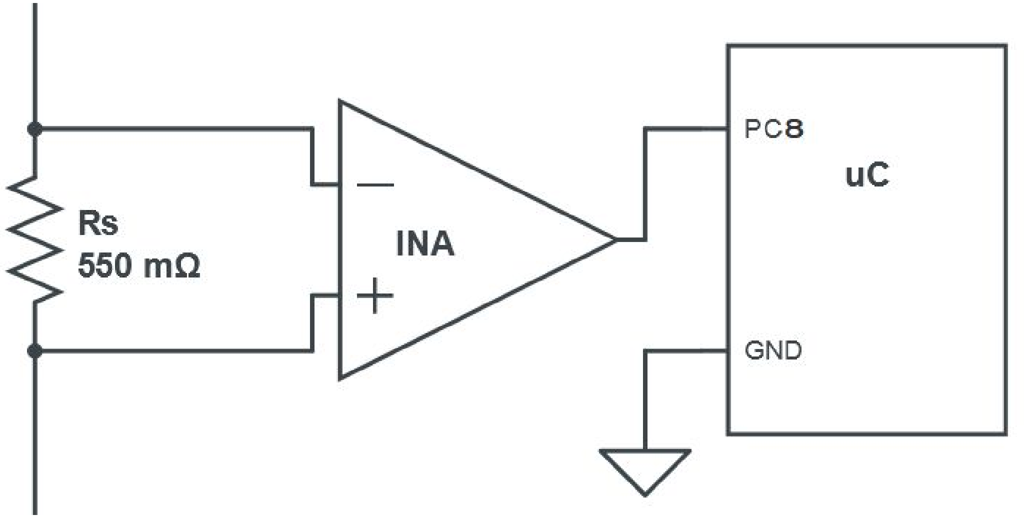
Shunt di corrente

Dato il range di corrente : $I \in [0, 6]$ A

Dato il range di ingresso del uC : $V_{uC} \in [0, 3.3]$ V

Ottengo una resistenza di shunt : $R_s = 3.3 / 6 = 0.55$

Implementato nel file simulazione : Ki = 0.55



Scelta delle periferiche

ADC :

- 6 canali
- conversione avviata tramite software (polling)
- f_{ADC} = 4 Mhz

Timer 2 :

- Internal clock
- modalità PWM edge aligned, porta PA0
- global interrupt
- f_{APB2} = 8 Mhz
- 16 Bit
- PS = 5 + 1
- f_{PWM} = 20 Hz

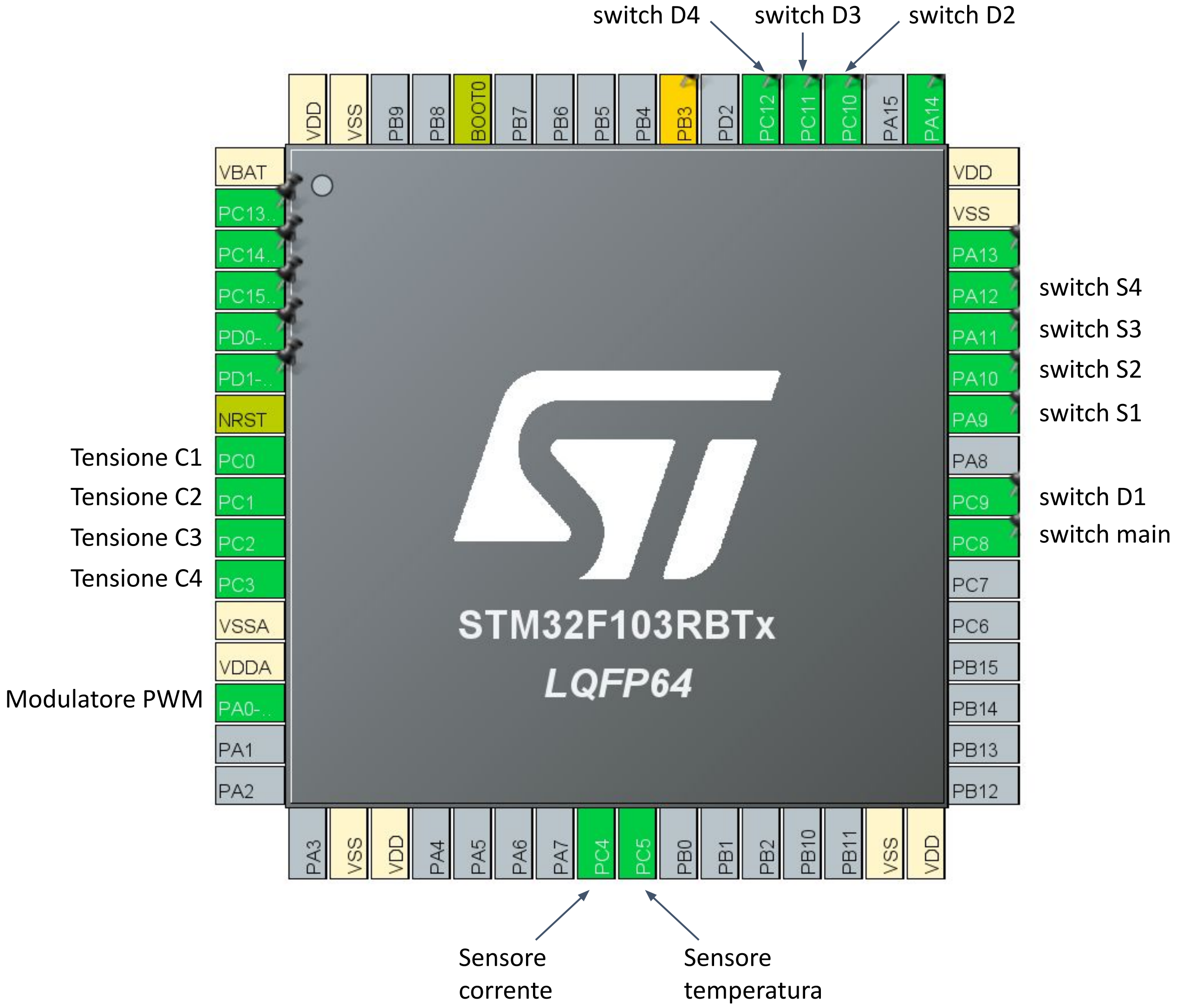
Timer 3 :

- Internal clock
- modalità timer
- f_{APB2} = 8 Mhz
- 16 Bit
- PS = 15 + 1
- T_{count} = PS / f_{APB2} = 2 µs.

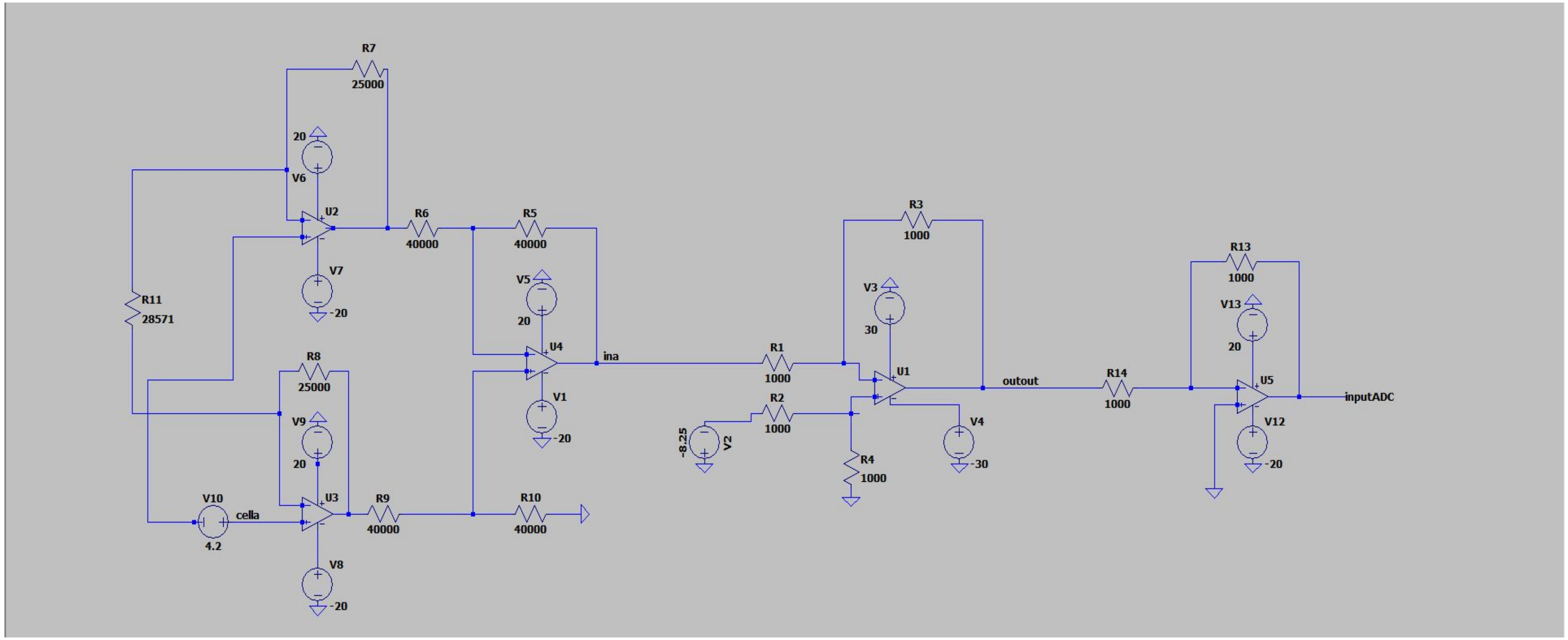
GPIO :

- celle : PA[9 - 12], PC[9 - 12]
- master switch : PA8
- maximum output speed : High

Scelta delle periferiche



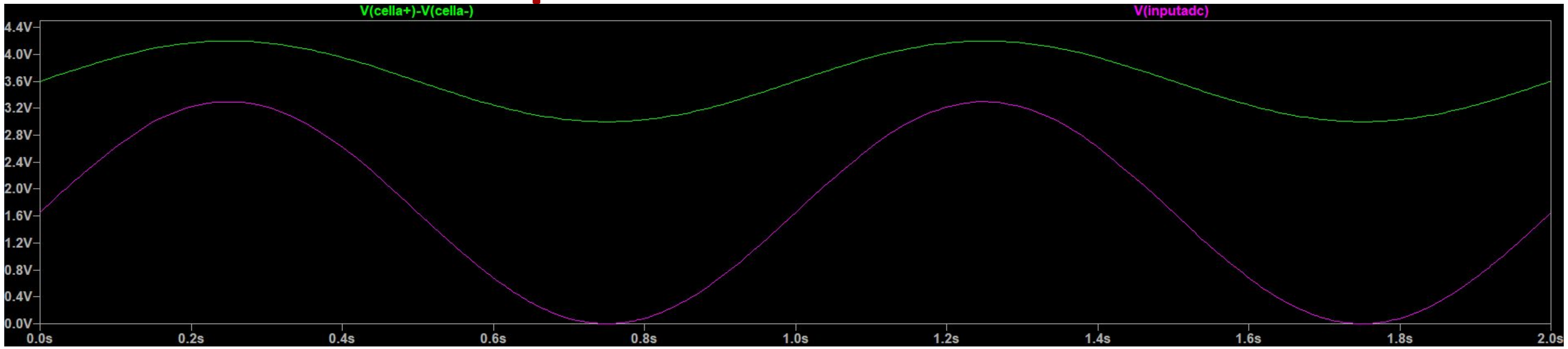
Amplificatore INA

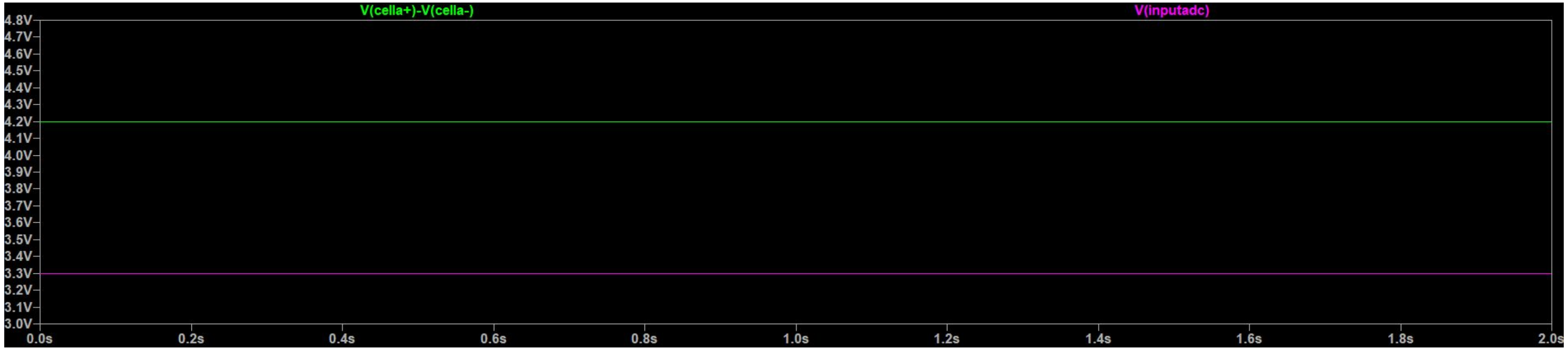


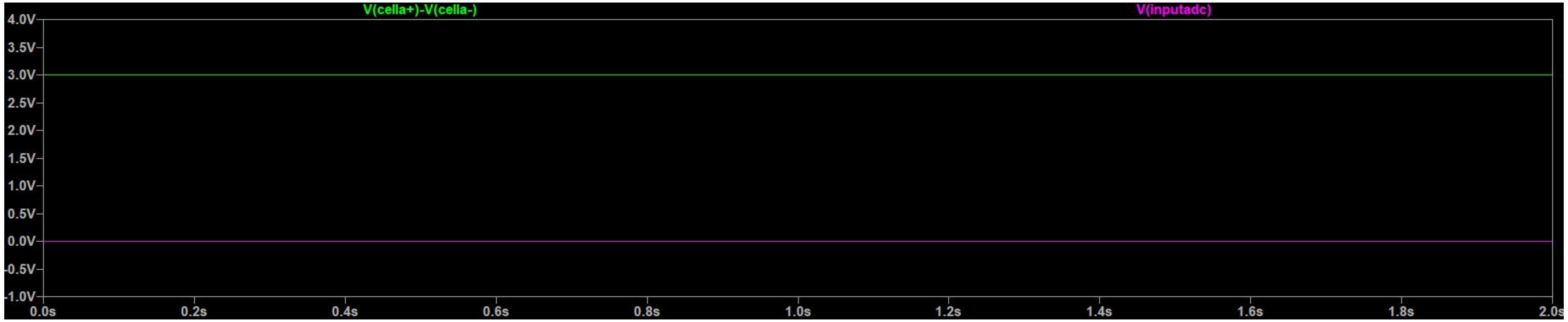
Adattamento ⟶ inputADC = 2.75*Vcella - 8.25 [V]

INA 118 (Texas Instruments) ⟶ Gain = 1+ 50000/RG RG = 28.571 KΩ

Amplificatore INA

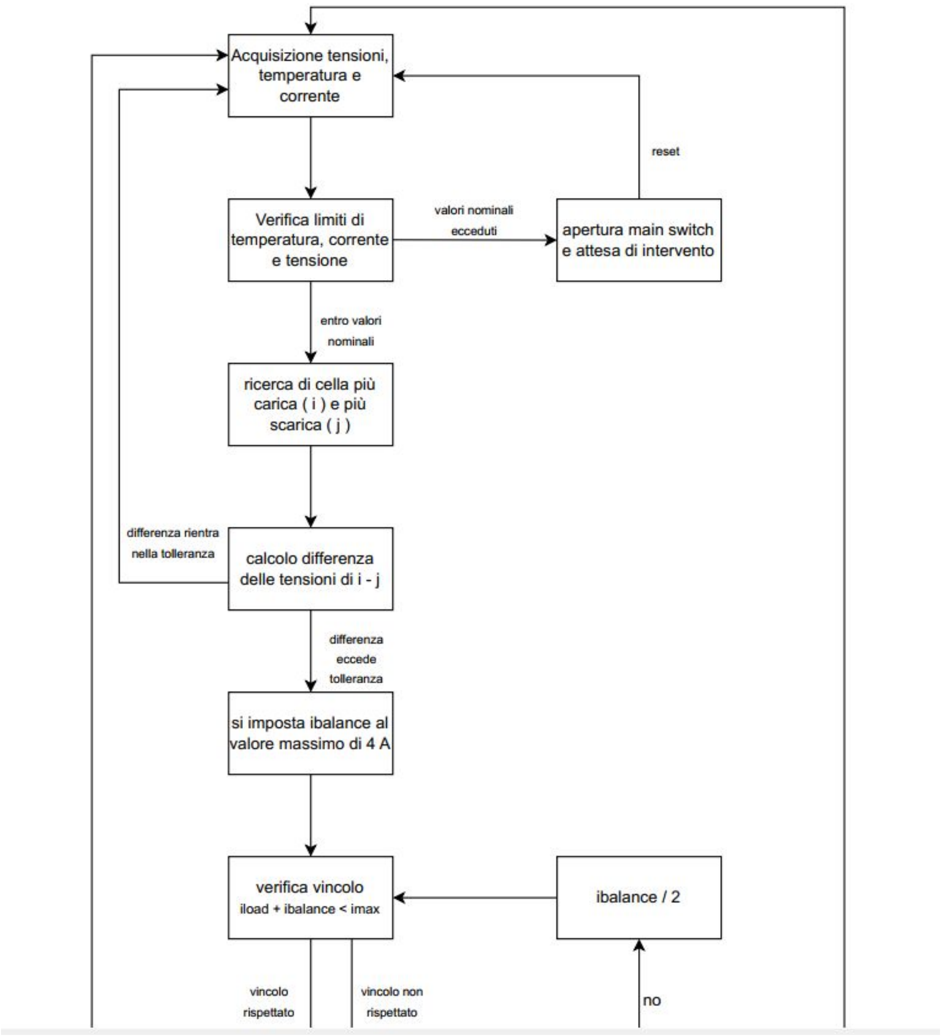




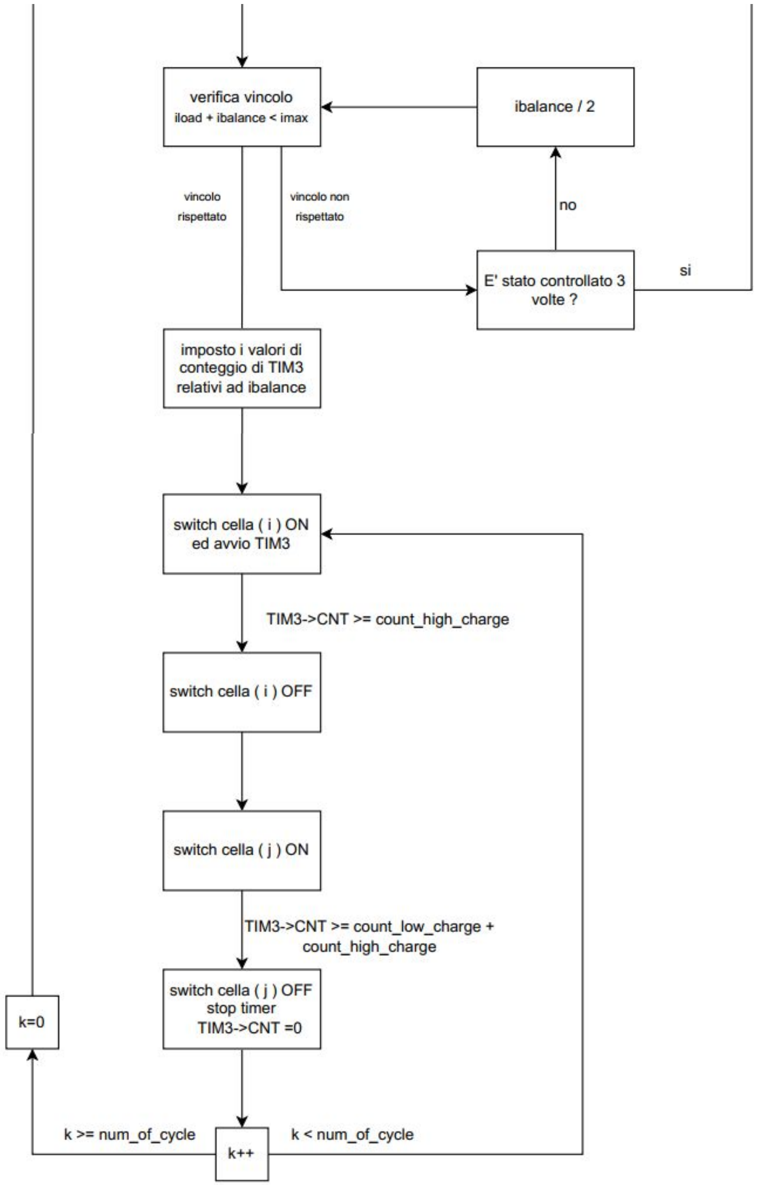


Università degli Studi di Padova

Algoritmo di bilanciamento



Algoritmo di bilanciamento



Algoritmo di bilanciamento

$$i = \frac{V}{L} * \Delta t$$

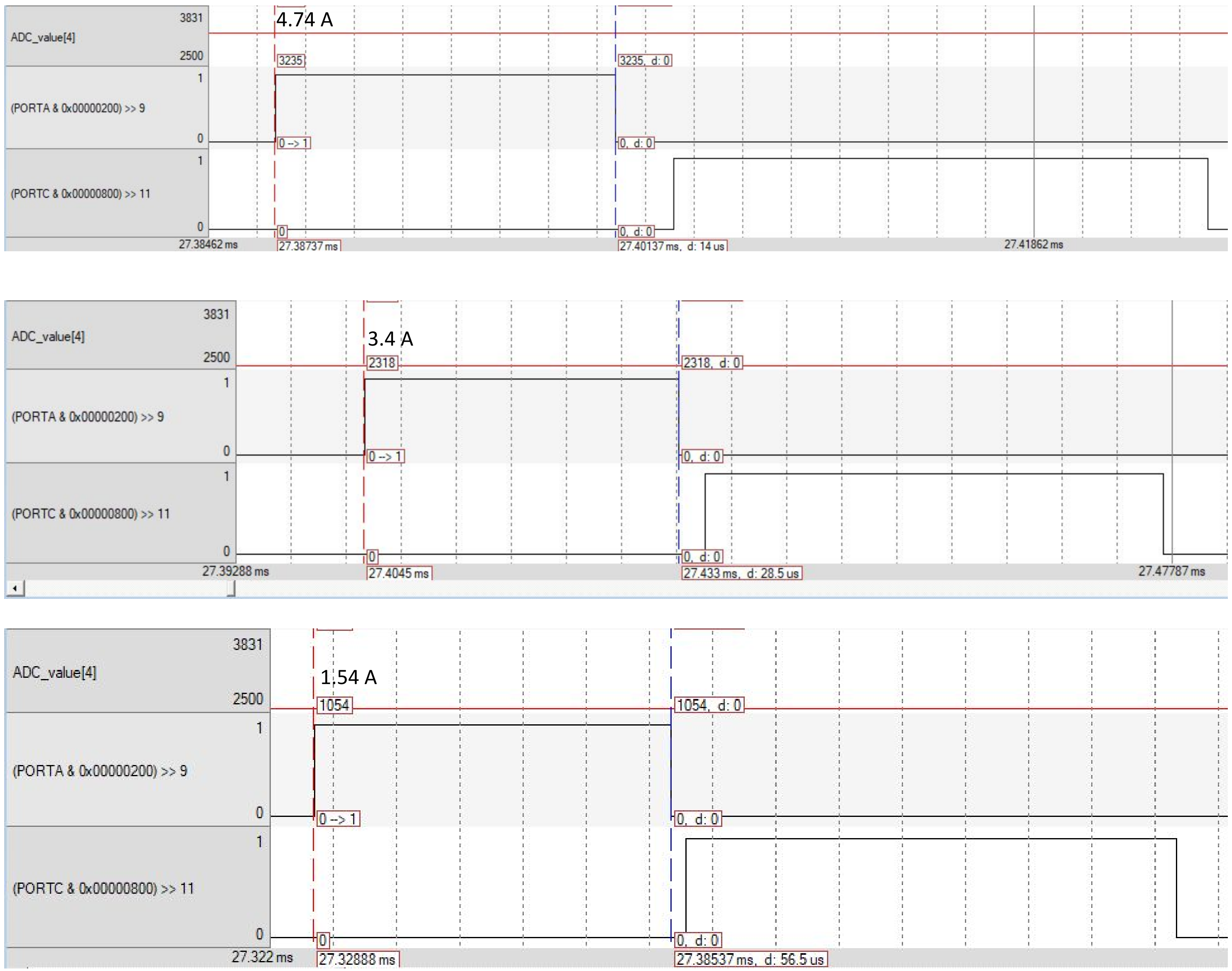
$$\Delta t = N * T_{count}$$

$$T_{count} = 2uS$$

Worst Case → $V_{cellaMax} = 4.2V, V_{cellaMin} = 3.0V$

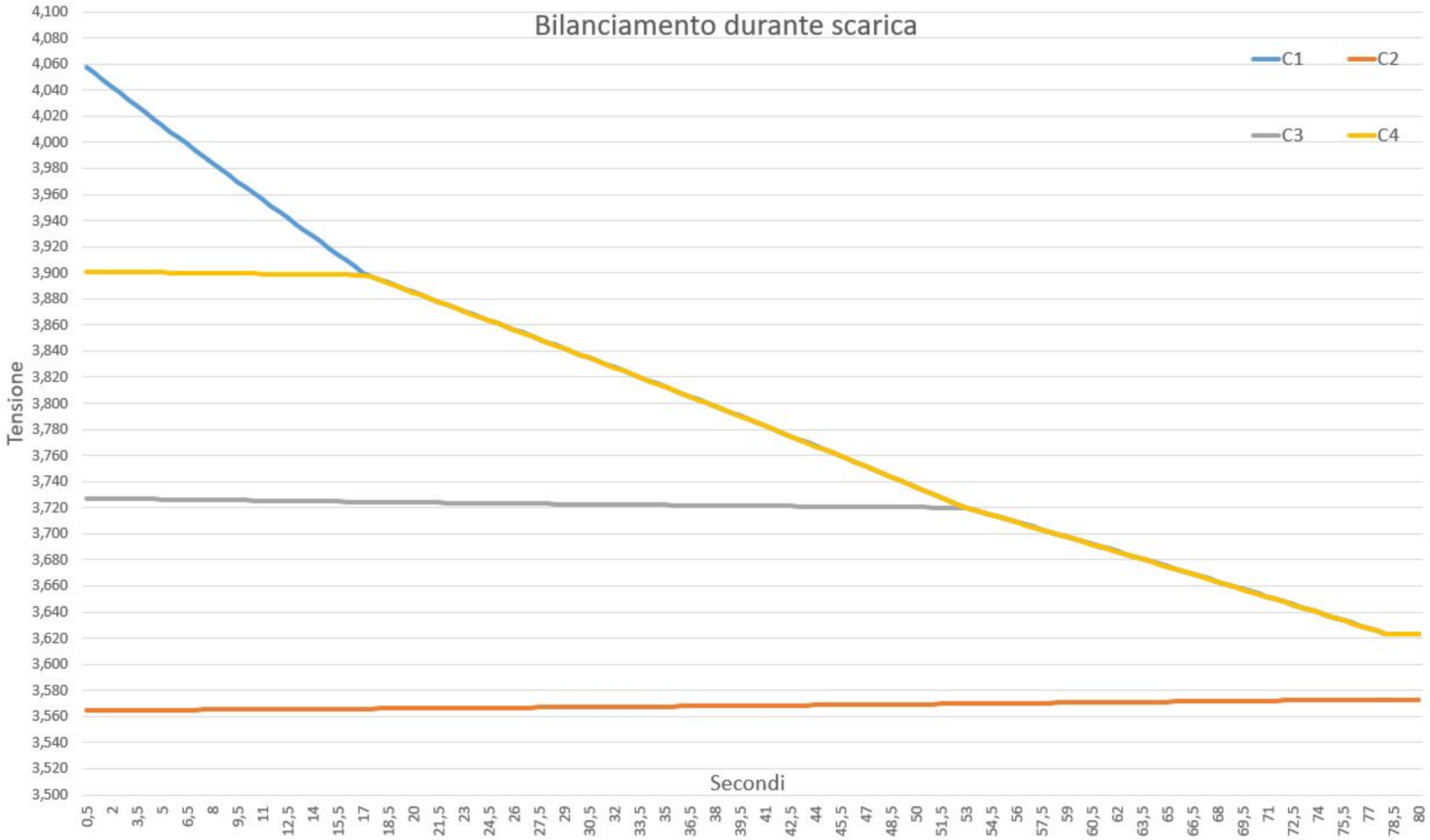
$N_{switchCellaMax}$	$N_{switchCellaMin}$	I_{peak} [A]
28	40	4
14	22	2.207
7	12	1.013

Algoritmo di bilanciamento



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

Algoritmo di bilanciamento



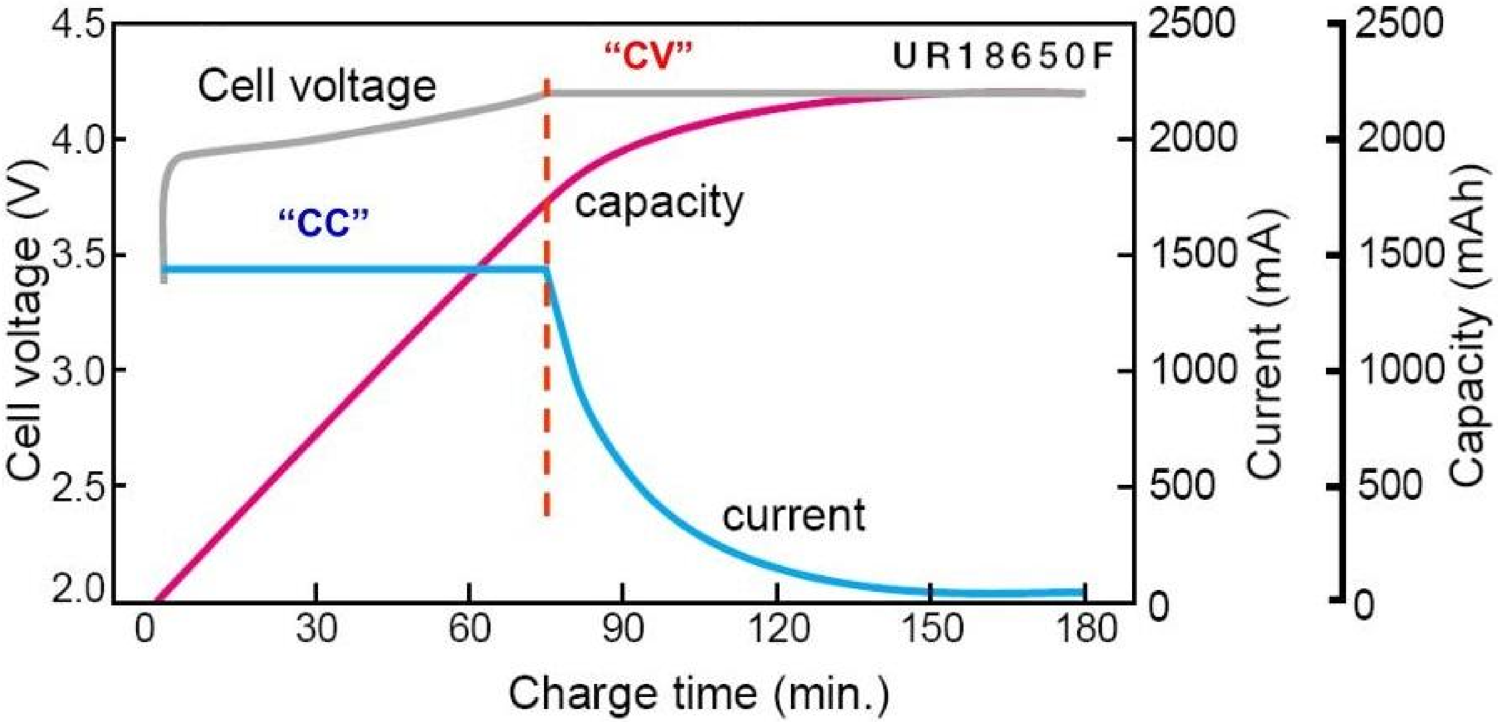
Rcarico = 30 Ω
Iscarica = 4A

SOC iniziali:

- C1 : 90 %
- C2 : 35 %
- C3 : 50 %
- C4 : 70 %

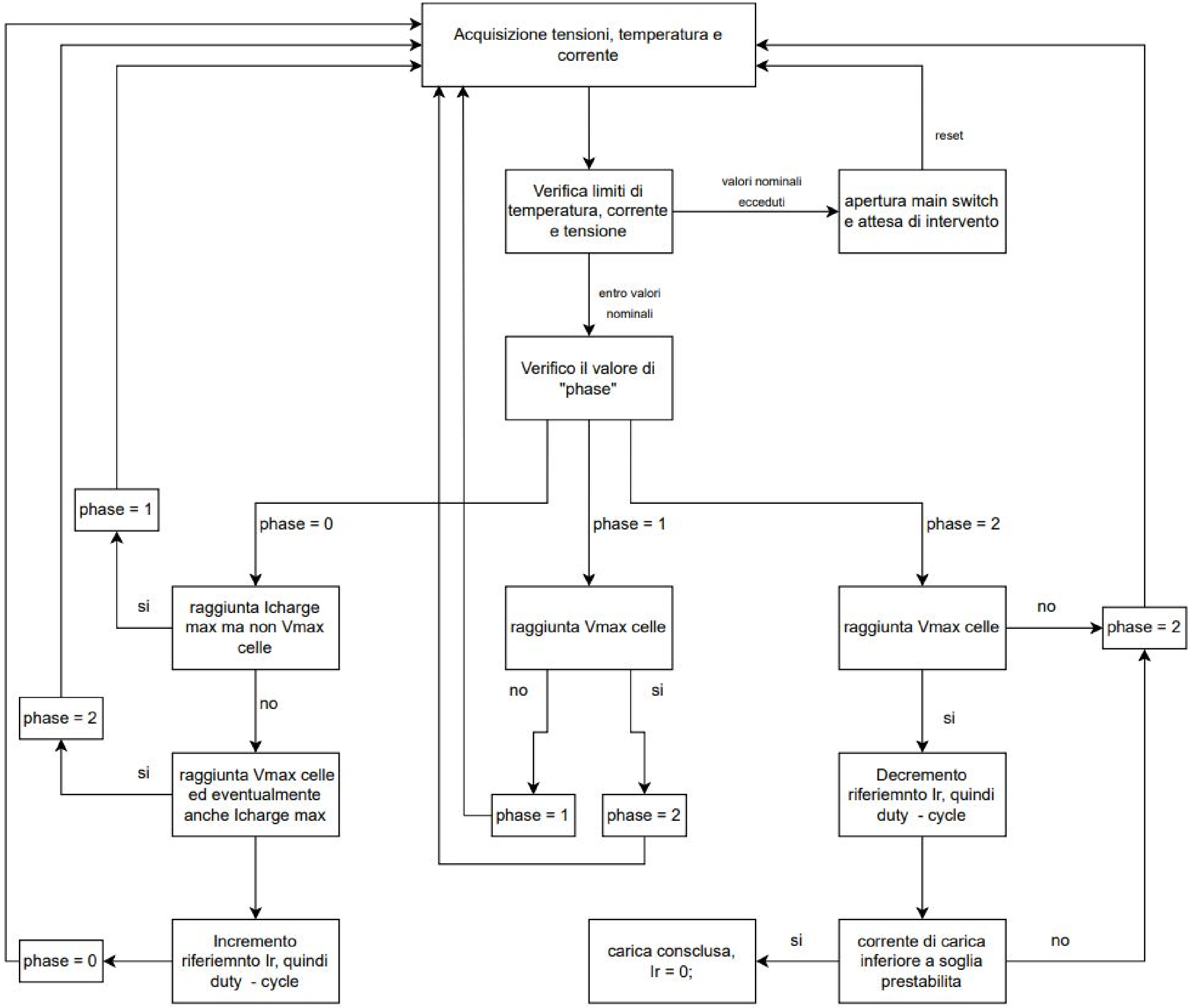
Università degli Studi di Padova

Algoritmo di ricarica

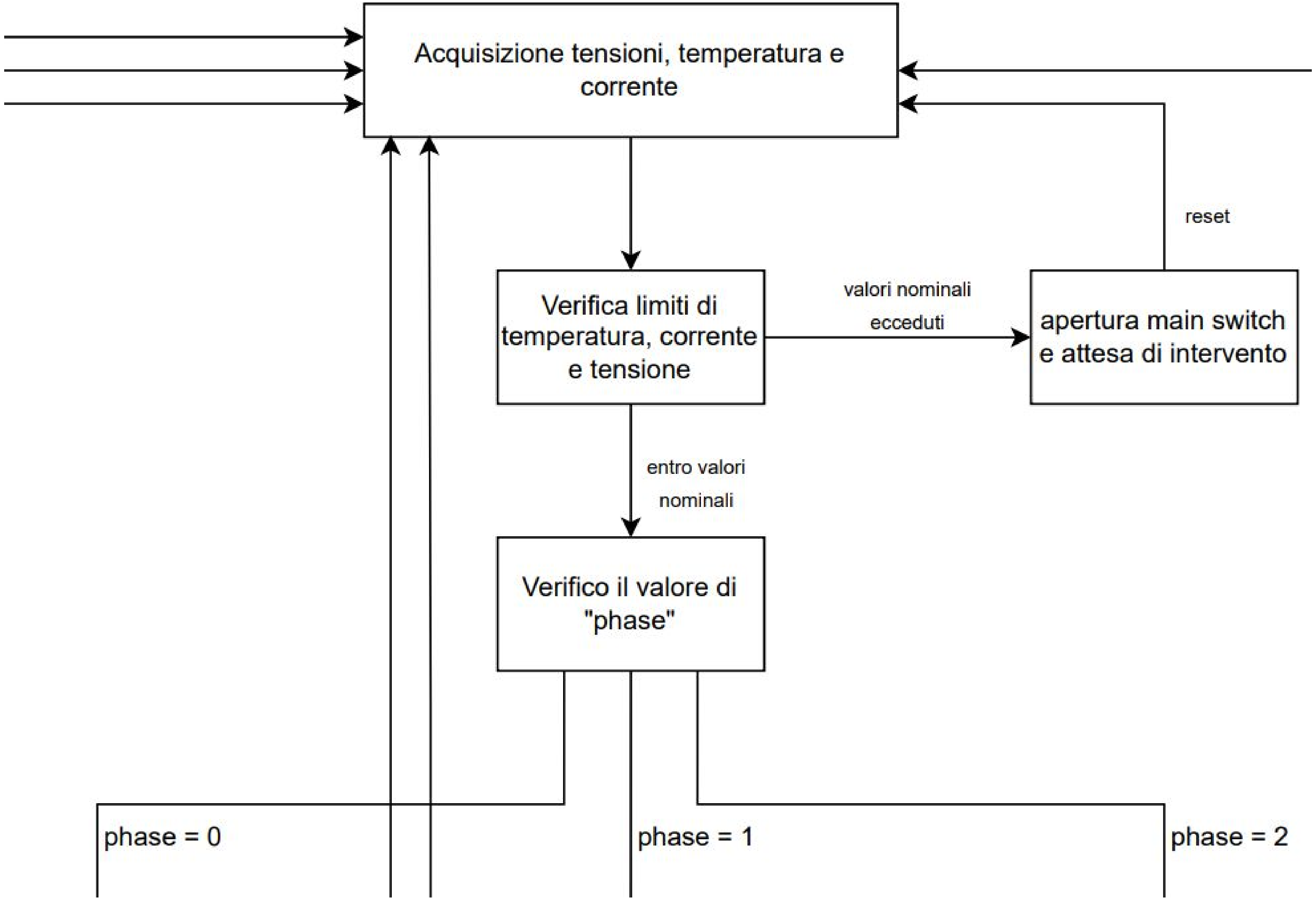


$$U = U_{OCV} + R \cdot I + U_P(I)$$

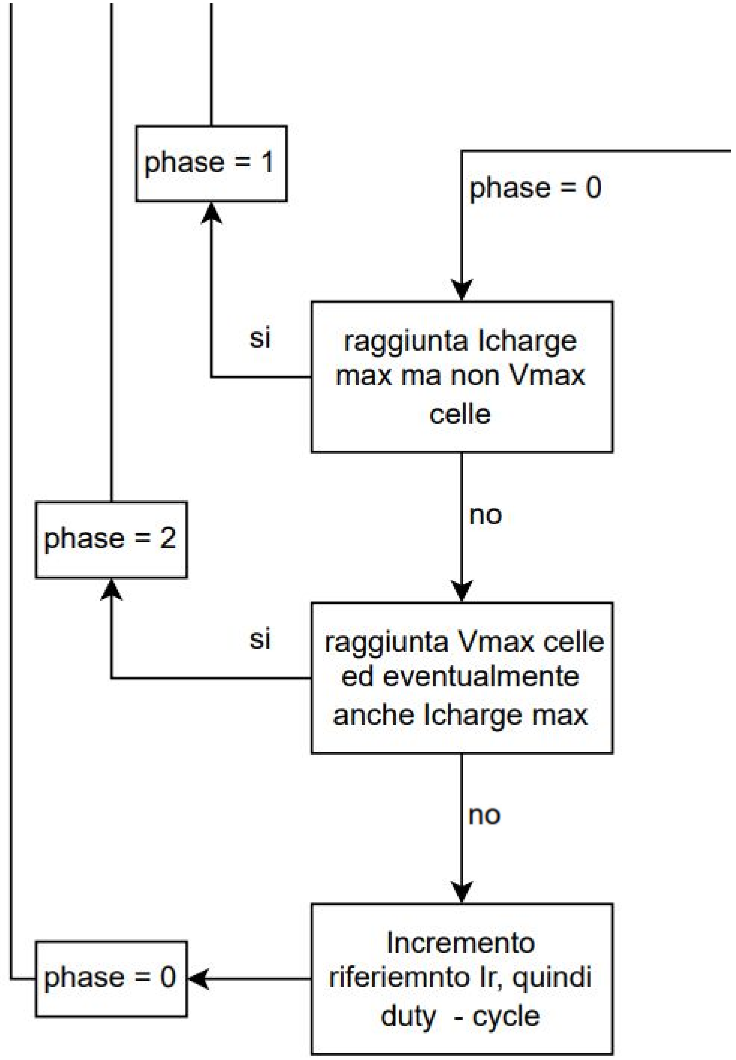
Algoritmo di ricarica

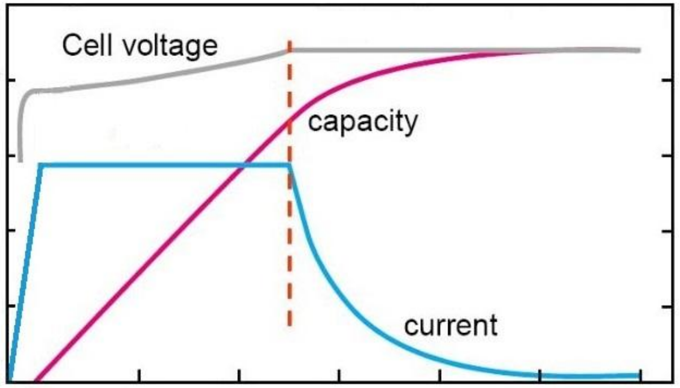


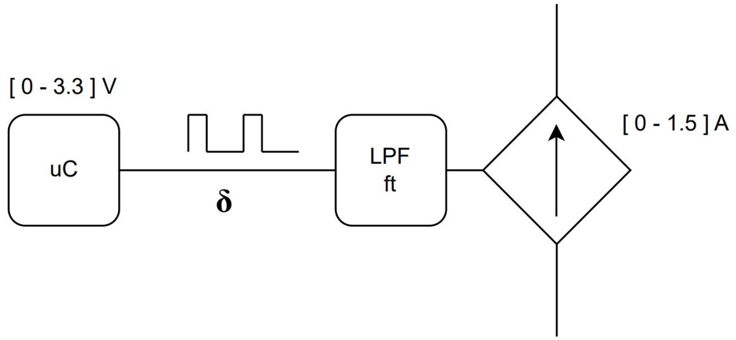
Algoritmo di ricarica



Algoritmo di ricarica



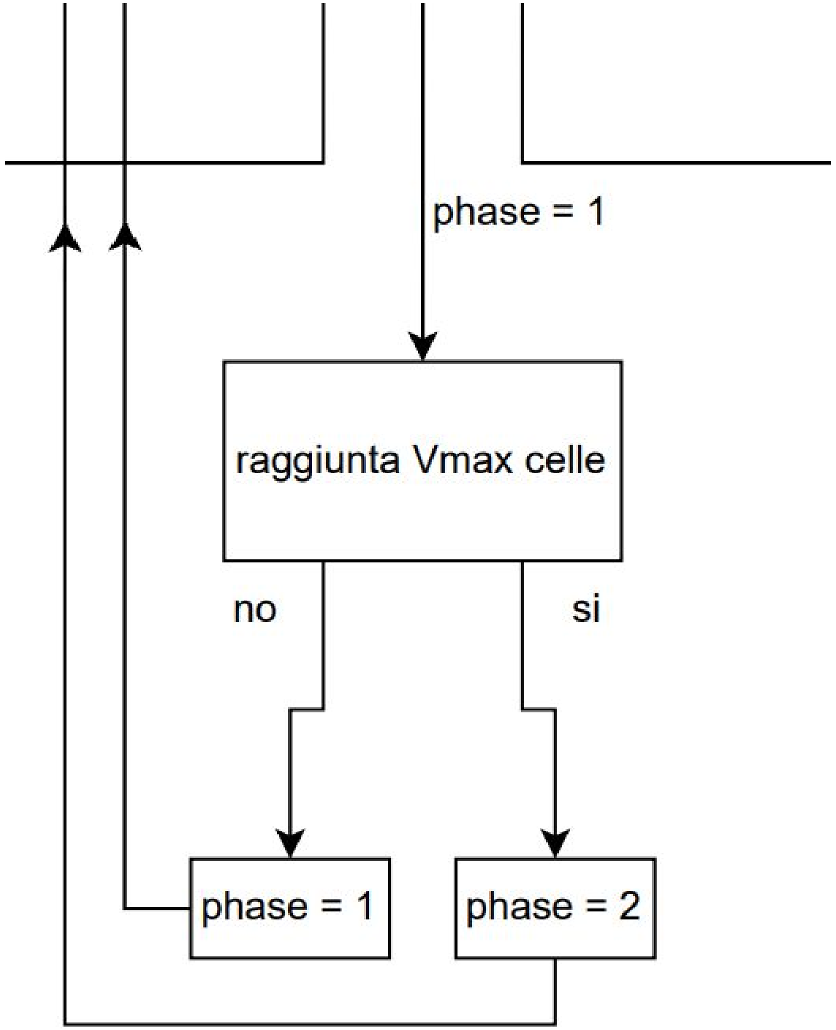


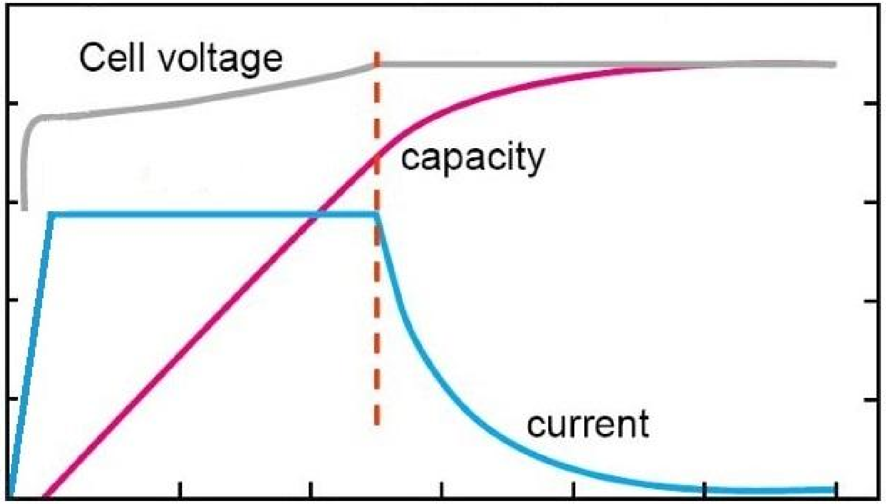


$\delta = 0\ \%$ ➜ $I = 0\ A$ $f_t = 0.1\ Hz$

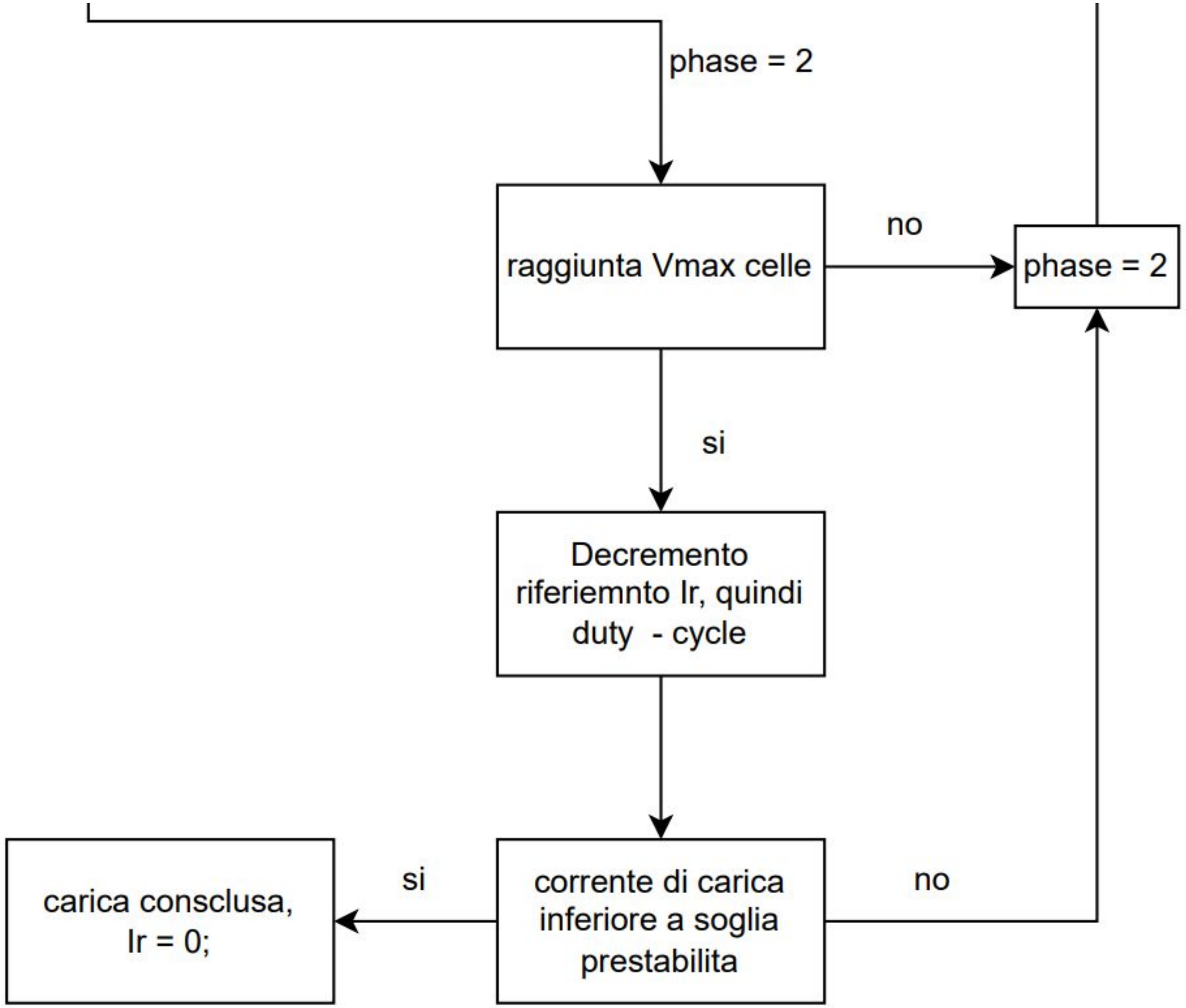
$\delta = 100\ \%$ ➜ $I_{max} = 1.5\ A$

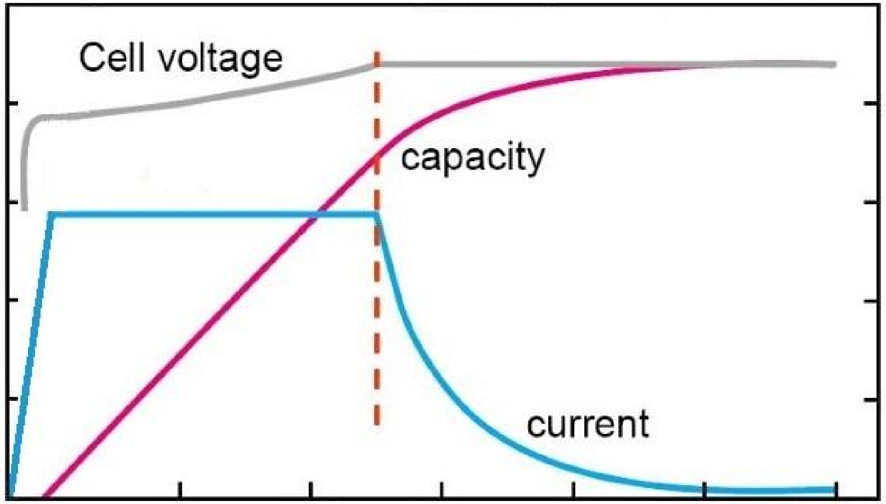
Algoritmo di ricarica





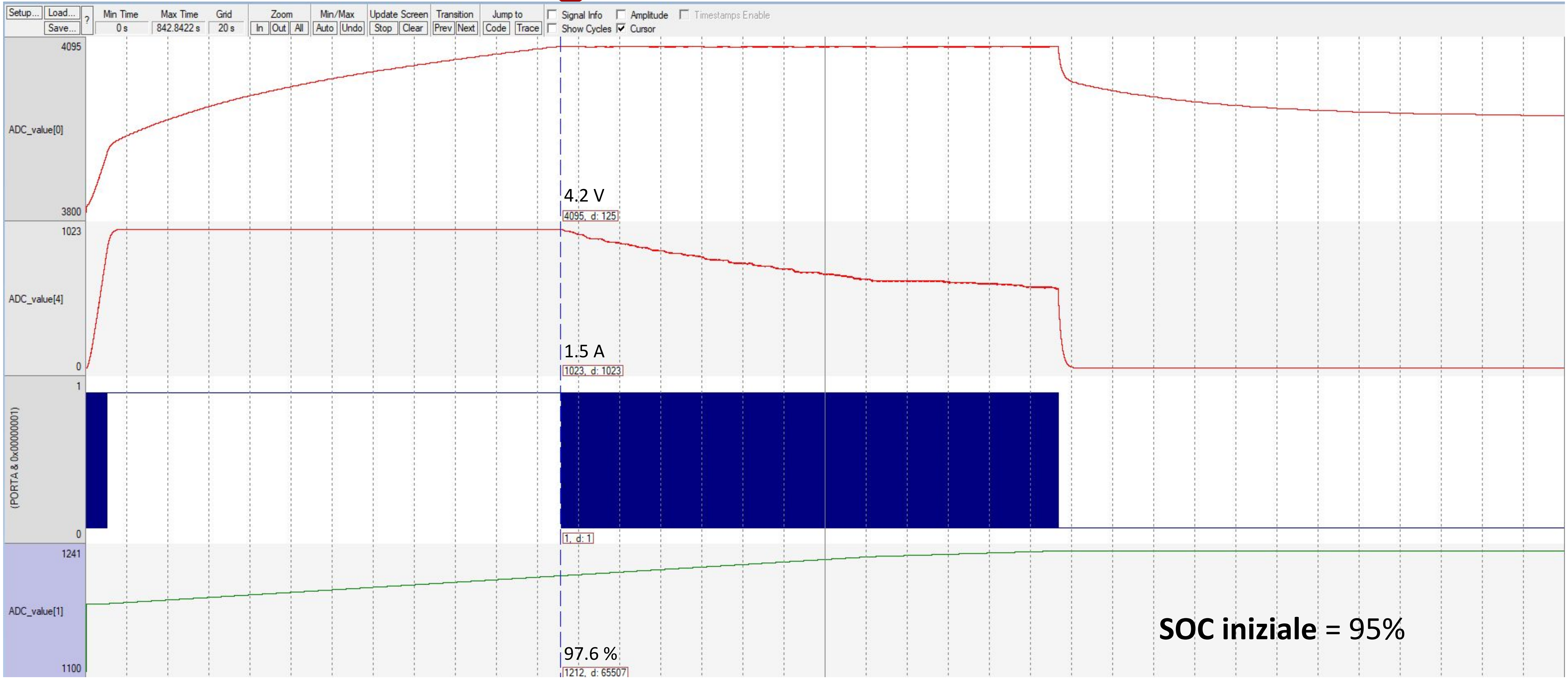
Algoritmo di ricarica





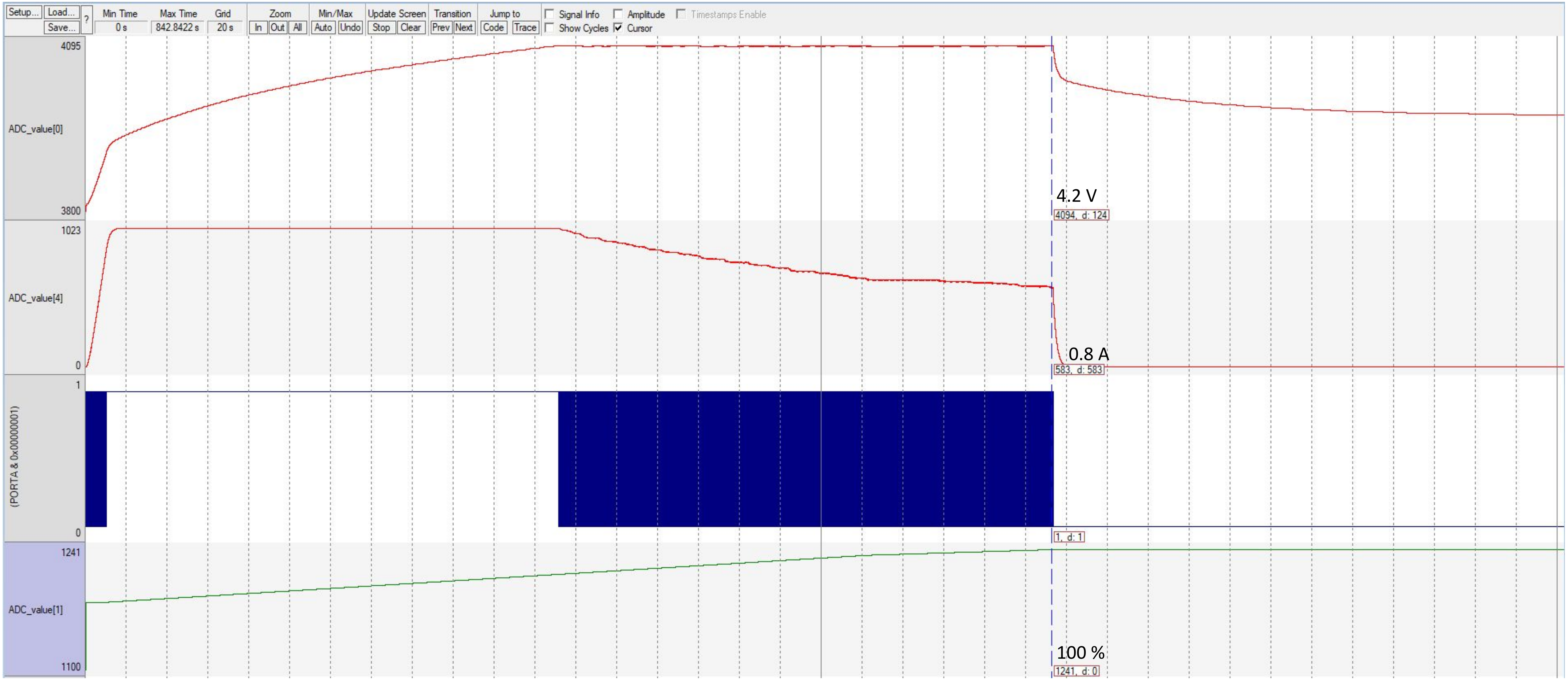
$$U = U_{OCV} + R \cdot I + U_P(I)$$

Algoritmo di ricarica

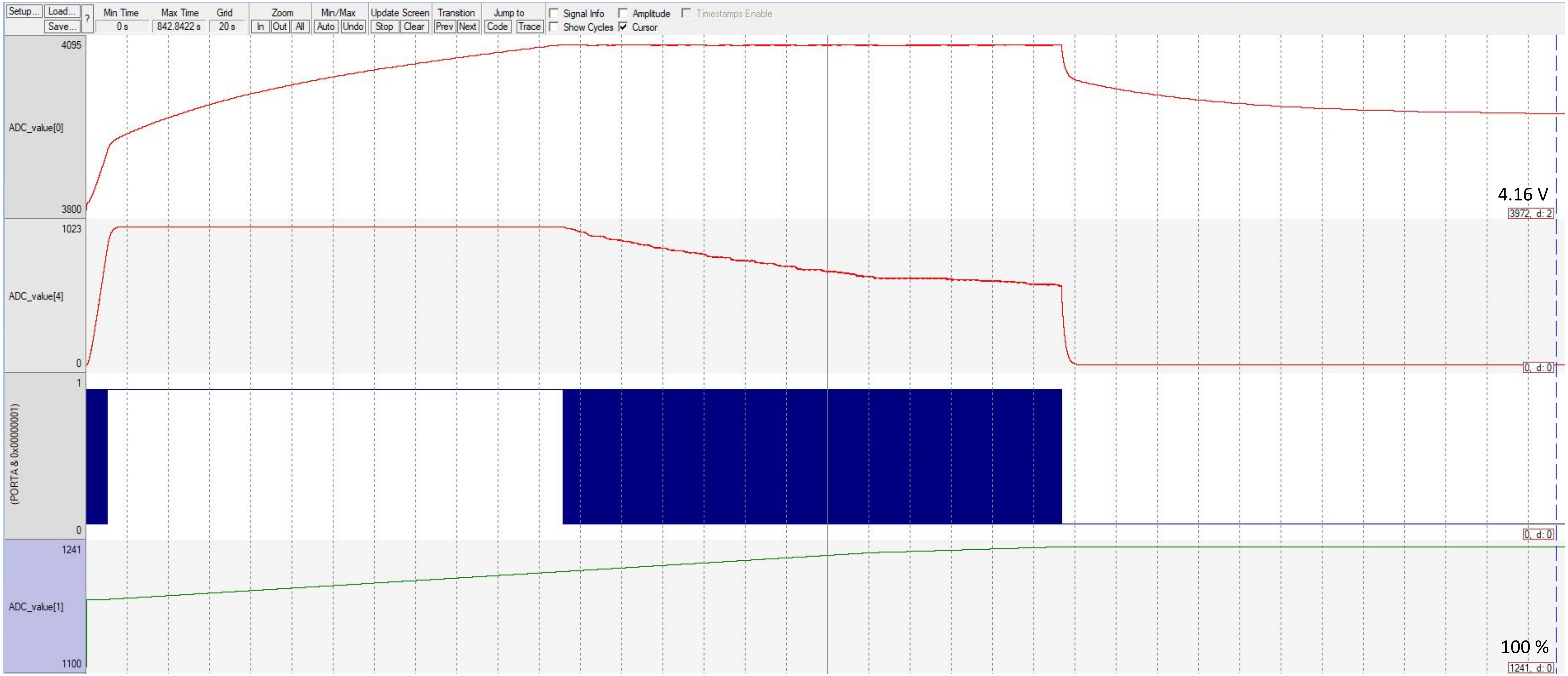


SOC iniziale = 95%

Algoritmo di ricarica

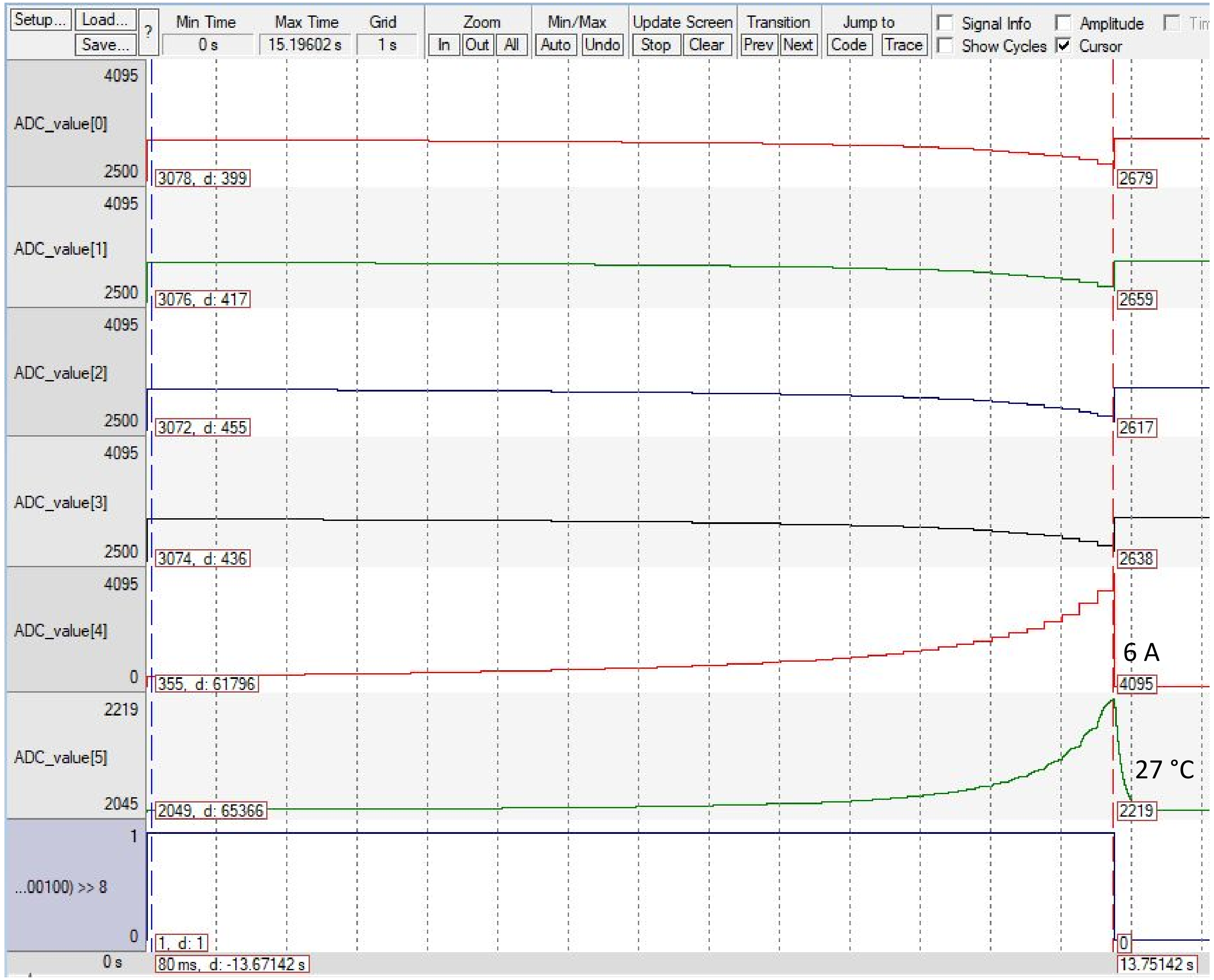


Algoritmo di ricarica



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

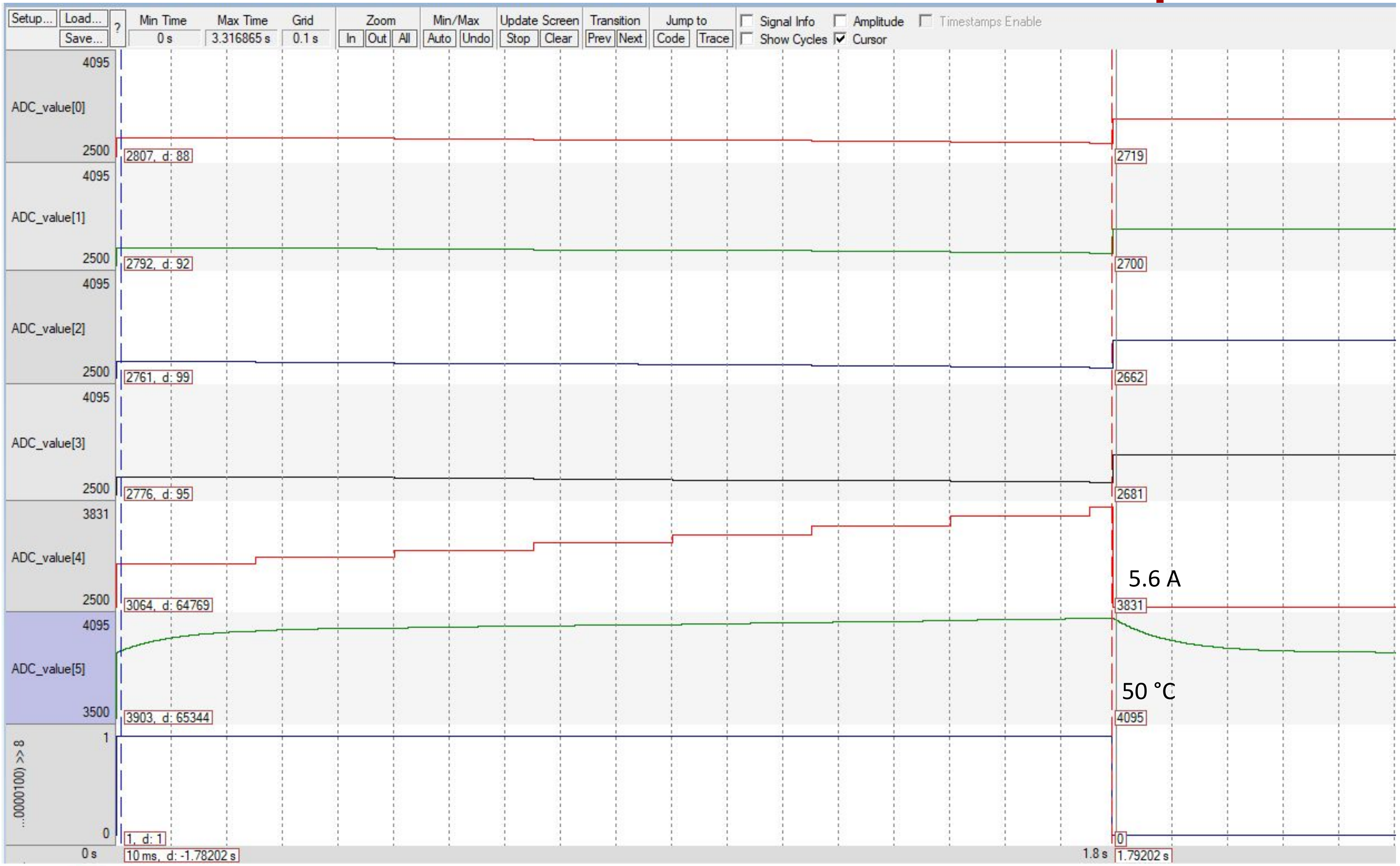
Allarme overcurrent



Nel file simulazione :

- Rload, che simula il carico, inizialmente a 30 ohm si riduce di 0.5 ohm ogni 0.5 secondi.
- Ta = 25 °C

Allarme overtemperature



Nel file simulazione :

- Rload, che simula il carico, inizialmente a 3.4 ohm si riduce di 0.1 ohm ogni 0.5 secondi fino al raggiungimento di 2.6 ohm
- Ta = 47.5 °C

Bibliografia

DI MONACO, M.,PORPORA, F. , TOMASSO, G. , D'ARPINO, M. , ATTAIANESE, C. , 2019. *High Performance Active Battery Management System with Multi-Winding Transformer.* Università Degli Studi Di Padova.

BONFIGLIO, C. , ROESSLER, W. , 2009. *A cost optimized battery management system with active cell balancing for lithium ion battery stacks.* Università Degli Studi Di Padova.

KYUNG-MIN, L. , SANG-WON, L. , YOON-GEOL, C. , BONGKOO, K. , 2016. *Active Balancing of Li-Ion Battery Cells Using Transformer as Energy Carrier.* IEEE Transactions on Industrial Electronics

ALA A. HUSSEIN , ABBAS A. FARDOUN, 2021. *An Effective Impedance-Phase Method for Sensorless Measurement of Li-ion Battery Cells'Internal Temperature,* Al-Marref University Beirut, Lebanon

BOBBY, S. , DEWANGGA, R. , WAHYUNGORO, O. , CAHYADI A. , 2019. *Comparison of Simple Battery Model and Thevenin Battery Model for SOC Estimation Based on OCV Method.* Department of Electrical Engineering and Information Technology Universitas Gadjah Mada.

OLIVIER T. ,LOUIS A. DESSAINT , Stavanger, Norway, May 13 - 16, 2009, *Experimental Validation of a Battery Dynamic Model for EV Applications* , Electrical Engineering Department, Ecole de Technologie Superieure

HURIA, T. , CERAOLO, M. , GAZZARRI, J. , JACKEY, R. , 2010. *High Fidelity Electrical Model with Thermal Dependence for Characterization and Simulation of High Power Lithium Battery Cells.* Department of Energy and Systems Engineering University of Pisa.

Bibliografia

SARRAFAN, K. , SUTANTO, D. , MUTTAQI K. , 2017. *An Electric Circuit based EV Battery Model for Runtime Prediction and State of Charge Tracking.* School of Electrical, Computer and Telecommunications Engineering University of Wollongong, NSW, Australia.

YIXIAO W. , YONG L. ,2019, *PSO-based optimization for constant-current charging pattern for li-ion battery,* Hunan University, Changsha, Hunan, CN

ALI F. MOGHADDAM, ALEX V. BOSSCHE ,2018,*Multi-Winding Equalization Technique for Lithium Ion Batteries for Electrical Vehicles,* 7th international conference on renewable energy research and applications

Chen Z., Liao W., Li P, Tan J., Chen Y., 2022. Simple and high-performance cell balancing control strategy. Vehicle Measurement, Control and Safety Key Laboratory of Sichuan Province.

*Fadlaoui E., *, Lagrat I. , and Masaif N., 2021. Fitting the OCV-SOC relationship of a battery lithium-ion using genetic algorithm method. Laboratory of Electronic Systems, Information Processing, Mechanics and Energy, Ibn Tofail University, Kenitra, Morocco.*

Yang C., Yan M., Peng D., Hong C., 2018. Estimation of State of Charge for Lithium-ion Battery Considering Effect of Aging and Temperature. Department of Control Science and Engineering, Jilin University, Changchun.