



# Laboratorio di elettronica e tecniche d'acquisizione dati

## Esperienza II: Flash ADC

Gentili Irene, Pace Lorenzo, Tintori Filippo

5 novembre 2024

### Indice

1	Introduzione	2
2	Aspetti teorici	2
3	Strumentazione	4
4	Analisi delle fonti di errore	4
5	Analisi qualitativa	4
6	Costruzione del Flash ADC	5
6.1	Valutazione delle resistenze . . . . .	7
7	Funzionamento e acquisizione	8
8	Conclusioni	8

# 1 Introduzione

Lo scopo della presente relazione è quello di mostrare la metodologia dell'esperimento relativo alla costruzione di un Flash ADC a risposta digitale per una misura di temperatura. Si esporranno la teoria e le strutture circuitali alla base del funzionamento per poi mostrare la correttezza del comportamento del Flash ADC.

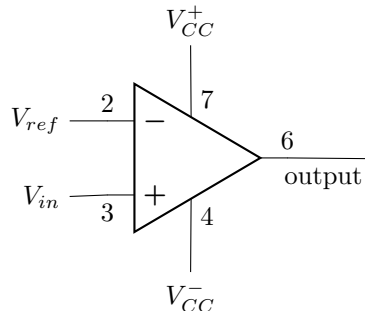
## 2 Aspetti teorici

In linea del tutto generale, un sistema *Analog to Digital Converter* (ADC) è impiegato per convertire segnali analogici in segnali digitali in modo che possano essere successivamente elaborati. Un convertitore ADC opera discretizzando le grandezze fisiche continue che si incontrano sperimentalmente, e con questo significato lo si andrà a costruire per digitalizzare un segnale di temperatura ottenuto tramite un LM35. Questo sensore di temperatura è calibrato direttamente in gradi centigradi e ha tre terminali. Di questi, uno è connesso a terra, uno alimentato con una tensione continua fra i 4 e i 30 V; l'ultimo terminale rappresenta il segnale in uscita. Nella sua zona lineare, fra i 2 e i 150 °C, il sensore eroga  $+10 \text{ mV}/^\circ\text{C} \cdot T$ , se  $T$  è la temperatura in °C del sensore stesso.

La struttura circuitale di base dell'ADC costruita è il comparatore, uno dei possibili utilizzi di un amplificatore operazionale a loop aperto. Questo op-amp è un circuito integrato, costituito da due input ( $\pm$ ) e un output, che amplifica la differenza di potenziale tra i due input per un fattore moltiplicativo chiamato *guadagno*  $A$ :  $V_{out} = A \cdot (V^+ - V^-)$ . L'amplificatore operazionale necessita due alimentazioni in tensione continua con valori  $V_{cc}^+$  e  $V_{cc}^-$  che fanno da limite alla  $V_{out}$ : quando il suo modulo supera una delle due soglie, l'op-amp va in saturazione. Negli amplificatori non ideali, i valori di  $V_{cc}^{out}$  in saturazione differiscono leggermente dai voltaggi di alimentazione. Ciò è dovuto in realtà alle tensioni di contatto del silicio, o comunque delle giunzioni, dei transistor posti internamente all'op-amp. Sulla base di questo comportamento dell'op-amp se ne può realizzare un'applicazione nota come *comparatore*, un circuito a un'uscita che confronta i due voltaggi in entrata, di cui uno, solitamente l'invertente, è posto come riferimento ( $V_{ref}$ ).

$$V_{in} < V_{ref} \implies V_{out} = V_{cc}^-; V_{in} > V_{ref} \implies V_{out} = V_{cc}^+$$

Essendo il guadagno dell'op-amp elevato, questo andrà rapidamente in saturazione, quindi l'output assumerà un valore pari ai voltaggi di alimentazione, a seconda dal valore di  $V_{in}$  rispetto a  $V_{ref}$ .



In sostanza, un comparatore può essere considerato come un convertitore ADC ad un bit, perché ha risposta binaria e ha in ingresso un segnale analogico. Si è posto il segnale in uscita dal sensore come input non invertente degli amplificatori, e per visualizzare correttamente questa conversione si è realizzato un Flash ADC, che rendesse l'attraversamento della soglia di temperatura (e dunque di voltaggio) tramite l'accensione di un LED. Il *Light Emitting Diode* è una giunzione  $p-n$  che emette luce quando attraversato da corrente nel suo verso di polarizzazione. Lo si è usato nel Flash ADC in modo che si accendesse alle tensioni di soglie stabili; ciò è possibile perché ad ogni LED arriva una corrente aggiuntiva. Per non rischiare che la corrente fornita dall'operazionale non fosse sufficiente ciascun LED è stato infatti collegato all'alimentatore attraverso una resistenza di *pull-up*. Nel circuito finito, ogni comparatore ha come input il segnale da discretizzare e

una soglia di tensione di riferimento opportuna. Per selezionare a priori le soglie si è scelto di implementare un partitore resistivo secondo la metodologia discussa di seguito.

### 3 Strumentazione

Si elencano di seguito gli strumenti e il materiale di cui si dispone per lo svolgimento dell'esperienza:

- un generatore di tensione in regime DC;
- un multimetro digitale;
- un ohmetro analogico;
- resistori vari;
- una basetta sperimentale;
- amplificatori operazionali 741;
- un oscilloscopio digitale;
- led gialli;
- un sensore di temperatura LM35.

Si considereranno gli strumenti facendo approssimazioni lecite nei limiti degli esperimenti considerati; in particolare, si trascura la dipendenza termica delle resistenze, la resistività dei fili, la resistenza interna del generatore. Si considera il multimetro ideale per la relazione fra la sua resistenza interna e quelle usate. Ciascuno degli apparati sperimentali implementati nelle esperienze distinte sarà discusso approfonditamente nella relativa sezione. L'incertezza strumentale associata a ciascuno degli strumenti di misura è riportata nel paragrafo seguente. Congiuntamente alla relazione si riporta in allegato la lista delle misure prese ed il codice implementato per l'analisi dati.

### 4 Analisi delle fonti di errore

Prima di cercare le possibili sorgenti di incertezza nelle misure effettuate è conveniente riportare le fonti certe di errore che derivano dall'incertezza strumentale come dichiarata dai costruttori. Il sensore di temperatura LM35 opera con un'accuratezza che a 25 °C è di 0,5 °C. Il voltmetro digitale ha associato un errore che è 0,5% + 2 *digits* della lettura. Per quanto riguarda l'ohmetro, esso ha un'incertezza strumentale dichiarata che è tutta di lettura sulle tacche analogiche (ampie certi  $X\Omega$ ), pertanto sarà  $\sigma_{R_{ohmetro}} = X/\sqrt{12}$ . La tensione erogata dal generatore DC con cui si alimenta l'operazionale ha un errore associato di 0,5% + 3 *digits* della lettura. Per tutte le misure indirette si userà infine la formula generale per la propagazione degli errori stimando la varianza come la somma in quadratura degli errori pesati con le derivate parziali:

$$f = f(y_1 \dots y_n) \implies \sigma_f = \sqrt{\sum_i \left( \frac{\partial f}{\partial y_i} \sigma_{y_i} \right)^2}$$

### 5 Analisi qualitativa

Per fissare qualche parametro utile in seguito, nonché per verificare il comportamento del sensore di temperatura LM35, si realizza un circuito preliminare. Nel circuito sarà semplicemente collegato il sensore sia a terra che al generatore continuo, valutando  $V_{out}$  prima con l'oscilloscopio e poi col multimetro usato come voltmetro. Visualizzare l'uscita sull'oscilloscopio è solo relativamente utile: si osserva una linea piatta corrispondente al segnale continuo, al massimo con salti finiti e discontinui nel momento in cui si scaldi il sensore manualmente. Invece, l'ampiezza del segnale in uscita è necessaria per il passo successivo. Lasciando il sensore il più possibile lontano da fonti di calore si osserverà la temperatura ambiente, pur con le sue fluttuazioni (dovute in ultima analisi sia alle variazioni di temperatura locali sia all'errore del sensore).

Questo valore sarà utile per stabilire la temperatura minima di riferimento per l'esperimento vero e proprio, ossia la soglia d'accensione del primo LED. Il voltaggio associato alla temperatura ambiente deve essere minore della  $V_1$  di riferimento del primo comparatore; inoltre, questa prima stima serve a verificare che l'LM35 funzioni avendo nota indicativamente la temperatura ambiente. In questo senso, il valore trovato fa supporre che non ci siano problemi nella strumentazione:

$$V_{amb} = (241 \pm 3) \text{ mV} \Rightarrow T_{amb} \simeq 24^\circ\text{C}$$

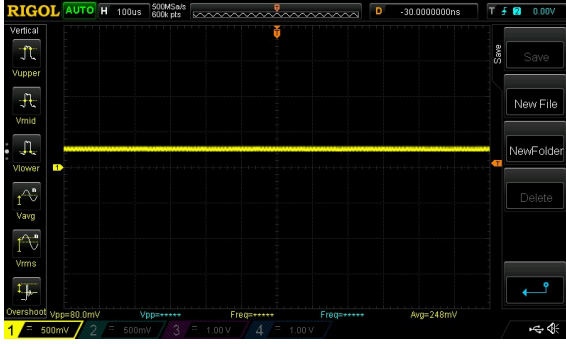


Figura 1: Uscita sull'oscilloscopio

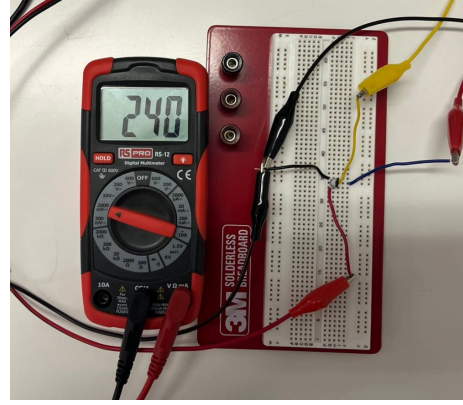


Figura 2: Lettura dell'output del sensore.

## 6 Costruzione del Flash ADC

Al fine di implementare quanto discusso nella teoria si sono realizzati quattro canali, ciascuno nella forma di un comparatore digitale con operazionale e resistore di pull-up. La risposta *digitale* del circuito è rappresentata dall'accensione del LED programmata da una certa soglia che sarà specificata nel seguito. Sfruttando opportunamente i collegamenti della basetta si sono utilizzate le linee connesse in verticale per il segnale in ingresso, la messa a terra e le due alimentazioni opposte degli amplificatori operazionali; il sensore di temperatura è sulla basetta adiacente, mentre l'uscita del sensore è letta dal voltmetro col parallelo apposito.

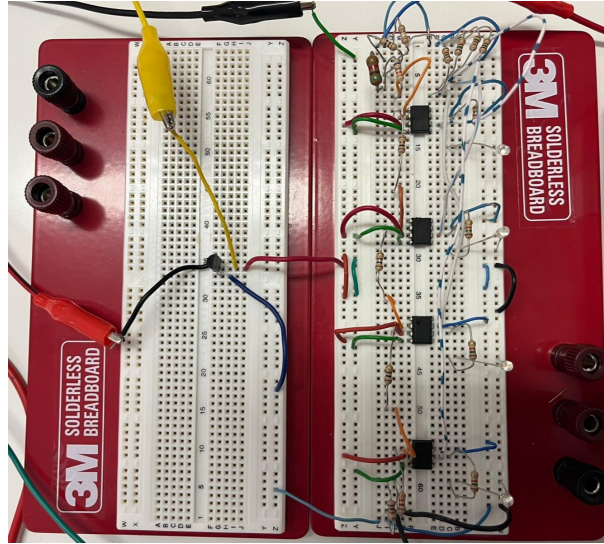
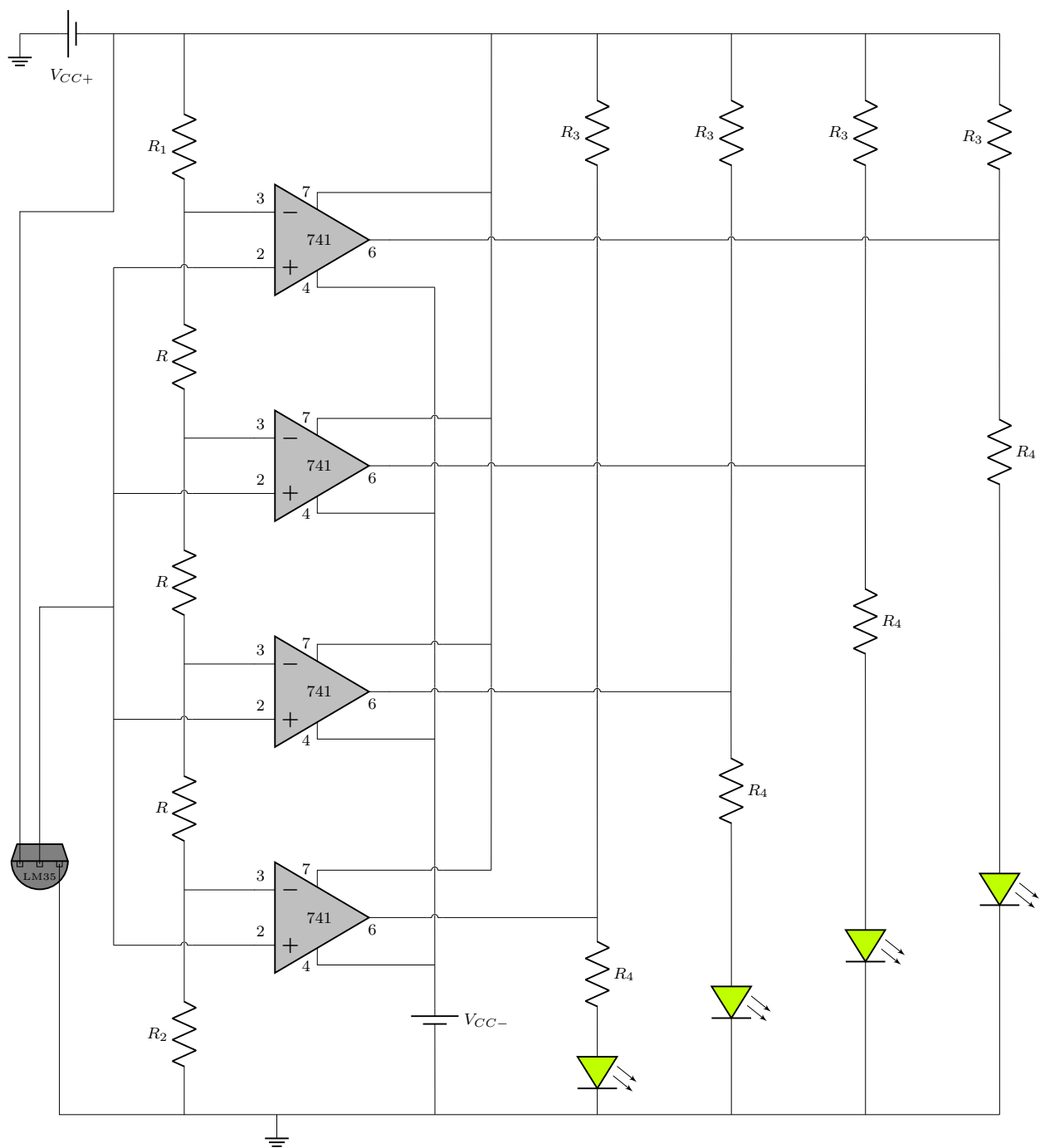


Figura 3: Circuito Flash ADC



Come anticipato, la risposta del circuito deve essere programmata a partire dalle condizioni dell'ambiente. Dalla stima qualitativa descritta al punto [5] segue che la prima risposta del circuito, ossia l'accensione del LED a soglia minima, deve corrispondere a temperature vicine a quella ambientale ( $\sim 24^\circ\text{C}$ ). Conseguentemente si fissa la prima soglia (teorica) a  $V_1 = 260 \text{ mV}$  in modo che anche il primo LED sia spento a temperatura ambiente. A partire da questa temperatura del sensore, quando lo si scaldereà si osserveranno le tre risposte successive a un passo che va scelto a priori. Si sceglie di apprezzare tramite i LED variazioni di temperatura del sensore di  $2^\circ\text{C}$ : la differenza costante fra le soglie  $\Delta V$  dovrà allora essere di  $0,02 \text{ V}$ . Per ottimizzare il comportamento degli operazionali e del sensore, si eroga un voltaggio di alimentazione diretta di  $V_{cc}^+ = (15,0 \pm 0,1) \text{ V}$  (di seguito  $V_{cc}$ ). La tensione  $V_{cc}^-$  che alimenta gli op-amp sull'ingresso negativo dei voltaggi diretti è fissata a  $(1,90 \pm 0,08) \text{ V}$ . Tale valore non ha significato specifico né ha rilievo nei calcoli successivi ma, sia per caratteristiche strutturali degli elementi del circuito sia per osservazione sperimentale, va mantenuto entro un certo intervallo affinché l'ADC funzioni.

## 6.1 Valutazione delle resistenze

La realizzazione dell'ADC impone di valutare a priori il valore dei resistori da porre nel partitore di tensione. Il valore di  $R_2, R_1, R$  stabilisce infatti univocamente (fissata l'alimentazione  $V_{cc}$ ) le soglie di tensione per l'accensione dei LED. La scelta dei valori si riduce però essenzialmente a quella di uno solo, perché due gradi di libertà sono eliminati dalla legge di Ohm applicata al partitore di tensione:

$$V_1 = \frac{R_2}{R_2 + R_1 + 3R} \cdot V_{cc}; \quad \Delta V = \frac{R}{R_2 + R_1 + 3R} \cdot V_{cc}$$

Fissata  $V_{cc}$  a  $(15,0 \pm 0,1) \text{ V}$ ,  $V_1 = 260 \text{ mV}$  e  $\Delta V = 0,02 \text{ V}$ , se per le tre  $R$  si impiegano resistori da  $R = (100 \pm 3) \Omega$  allora sarà necessario porre  $R_2 = 1300 \Omega$ ,  $R_1 = 73,45 \text{ k}\Omega$ . Per comodità queste due resistenze sono rese da serie apposite di resistori disponibili. Si può mostrare che tale scelta dei resistori permette di mantenere la potenza dissipata su ciascuno di essi inferiore al limite stabilito dal costruttore ( $0,25 \text{ W}$ ). Applicando al ramo che contiene in serie  $R_2, R_1$  e le tre  $R$  la legge di Ohm, si ricava facilmente la corrente che scorre nella serie: il ramo è infatti in parallelo con il ramo fra la terra e il generatore di tensione e pertanto è posto a  $15 \text{ V}$  di differenza di potenziale.

$$i = \frac{15 \text{ V}}{(73,4 \cdot 10^3 + 1300 + 3 \cdot 100) \Omega} \simeq 0,2 \text{ mA} \implies P \leq R_m \cdot i^2 \simeq 2,72 \text{ mW} \ll 0,25 \text{ W}$$

E come appena mostrato, anche sulla resistenza più grande (la  $R_2$  è resa dalla serie di 4 resistori di cui il maggiore è da  $R_m = 6,8 \cdot 10^4 \text{ k}\Omega$ ) la potenza dissipata per effetto Joule è notevolmente inferiore al limite strutturale. Per i valori delle 4 resistenze di pull-up saranno sufficienti resistori da  $R_{up} = (1500 \pm 30) \Omega$ . Per quanto riguarda infine le resistenze di protezione  $R_{pr}$ , si è scelto di procedere adeguandosi alla regola comune per cui in un LED come quelli utilizzati non debba scorrere una corrente maggiore di  $\sim 15 \text{ mA}$ . Avendo alimentato con una tensione diretta di  $15 \text{ V}$ , se  $V_f = 1,9 \text{ V}$  è il potenziale di giunzione del LED giallo:

$$R_{pr} \geq \frac{(15 - 1,9) \text{ V}}{15 \text{ mA}} \simeq 873 \Omega$$

Si sceglie conseguentemente di impiegare resistori da  $R_{pr} = (1500 \pm 30) \Omega$ , più che sufficienti a coprire la corrente massima interna al LED per evitarne il danneggiamento.

## 7 Funzionamento e acquisizione

Una volta completato il circuito si è accesa l'alimentazione diretta osservando correttamente tutti i LED spenti quando l'LM35 era a temperatura ambiente. Prima di procedere a verificare il funzionamento del Flash ADC si è però controllato che le soglie di tensione sui quattro comparatori fossero quelle attese.

[controllo delle soglie:]

<https://github.com/filippo-tintori/RelazioniGPT/blob/main/Rel2/Soglie.mp4>

È immediato notare che, nonostante si fosse fissata la  $V_1$  a 260 mV, ossia la temperatura per l'accensione del LED a 26°, la prima soglia ha effettivamente inizio ad una differenza di potenziale di 250 mV. A questo proposito va specificato che, innanzitutto, i resistori scelti per una temperatura minima di 26° hanno incertezza associata che copre lo scarto che divide quei valori di resistenza con quelli calcolabili se fosse  $V_1^{(2)} = 250$  mV. Il motivo più probabile per quest'incongruenza però è che esista un offset interno al sensore LM35 che, se ciò fosse vero, dovrebbe essere dell'ordine dei 10 mV. Quanto invece a  $\Delta V$ , si nota che essa non è costante a 20 mV quanto piuttosto (da lettura) a 19 mV. In realtà essendo misurate col voltmetro digitale hanno almeno 2 mV d'incertezza associata, ma questo non è rilevante per almeno due motivi. In primo luogo, che  $\Delta V$  avesse un certo errore è anche conseguenza della certa presenza di incertezza sulle resistenze; invertendo lo stesso sistema lineare da cui si sono ricavate  $R_2, R_1, R$ , con gli errori discussi al punto 4 (in realtà su  $R_2, R_1$  si usa come errore un'incertezza leggermente superiore data dalla somma semplice delle incertezze dei singoli resistori che compongono le serie):

$$\sigma_R = 3 \, \Omega; \, \sigma_{R1} = 203 \, \Omega; \, \sigma_{R2} = 103 \, \Omega; \, \sigma_{V_{cc}} = 0,1 \, V; \, \Delta V = \frac{R}{\sum R} \cdot V_{cc} \implies \sigma_{\Delta V} \simeq 4 \, mV$$

In secondo luogo, ai fini dell'esperimento l'incertezza di definizione delle soglie è solo parzialmente rilevante. Ciascuna soglia è infatti comunque sufficiente affinché i LED si accendano a temperature che differiscano di 2°C entro l'errore dell'LM35 che è accurato fino a 0,5°C a temperatura ambiente. Si è proceduto dunque a riscaldare manualmente il sensore in maniera graduale, ponendo a fianco il voltmetro digitale che leggesse il segnale diretto in uscita dal sensore stesso in mV. Il risultato è stato il seguente:

[funzionamento ADC flash:]

<https://github.com/filippo-tintori/RelazioniGPT/blob/main/Rel2/FuocoPuro.mp4>

## 8 Conclusioni

Com'è stato mostrato, il circuito è funzionante. La logica discussa è resa dal comportamento del Flash ADC e l'accensione dei LED riproduce correttamente le variazioni di temperatura pur nei limiti del sensore e dell'offset continuo che probabilmente ha incorporato. Uno degli aspetti più importanti che si è osservato è che il circuito dipende in maniera massiccia dal comportamento dei singoli componenti. In particolare, dopo diverse prove, è stato evidente che solo voltaggi dell'ordine di quelli usati per  $V_{cc}^{\pm}$  rendevano efficiente il Flash ADC: ciò è probabilmente dovuto non al sensore di temperatura ma piuttosto ai 4 amplificatori operazionali, che nelle configurazioni a loop aperto, come il comparatore che è la struttura di base di questa ADC, funziona bene solo con una tensione diretta di alimentazione sufficientemente grande. In sostanza, l'esperimento non solo è riuscito ma anche facilmente migliorabile. Infatti, con calcoli piuttosto brevi si è in grado di estendere o restringere l'intervallo delle temperature leggibili digitalmente (cioè dall'accensione dei LED) discretizzando con una diversa  $\Delta V$  o aggiungendo canali; inoltre basterebbe disporre di selettori di temperatura, o sorgenti di calore a temperatura nota, per eliminare l'offset dell'LM35 ed eventualmente ricalibrarlo.