



# EsD4 ADC-DAC: Convertitore sigma-delta

Gruppo 1.AC  
Matteo Rossi, Bernardo Tomelleri

14 maggio 2022

## Misura componenti dei circuiti

Resistenze [ $\Omega$ ]	$R$	$\sigma R$	Capacità [nF]	$C$	$\sigma C$
$R_1$	992	8	$C_1$	99	4
$R_2$	994	8			
$R_3$	993	8			
$R_4$	994	8			
$R_5$	996	8			

Tabella 1: Valori di resistenza e capacità misurate con il multimetro dei componenti del primo circuito.

Resistenze [ $\Omega$ ]	$R$	$\sigma R$	Capacità [nF]	$C$	$\sigma C$
$R_1$	995	8	$C_1$	109	4
$R_2$	999	8			
$R_3$	998	8			
$R_4$	998	8			
$R_5$	996	8			

Tabella 2: Valori di resistenza e capacità misurate con il multimetro dei componenti del secondo circuito

Riportiamo per completezza anche i valori delle tensioni di alimentazione continue per i circuiti integrati misurate con il multimetro

$$V_{CC} = 4.99 \pm 0.03 \text{ V}$$

$$V_{EE} = -4.99 \pm 0.03 \text{ V}$$

Per tutto il resto della trattazione come ampiezze dei segnali si intendono misurate non “picco - picco”, a meno che non venga esplicitato altrimenti.

## 1 Analisi e costruzione del circuito

### 1.a Costruzione del circuito

Si è costruito il circuito secondo lo schema riportato in fig. 1, alimentando con  $V_{CC} = 5 \text{ V}$  il D Flip-Flop e gli OpAmp alla medesima  $V_{CC}$  e  $V_{EE} = -5 \text{ V}$  con l'AD2. Dunque abbiamo collegato l'ingresso analogico V3 del circuito al canale 1 del Waveforms (generator) e il pin CLK del FF ad un segnale di clock di frequenza  $f_{\text{clk}} = 50 \text{ kHz}$  generato in DIO 0 con Patterns (generator). Con i canali 1 e 2 dell'oscilloscopio si osservano gli andamenti nel tempo del segnale in ingresso e del segnale di uscita (OUT) dall'ultimo amplificatore U4, al contempo si registra il valore logico assunto dall'uscita Q del Flip-Flop U3A con Logic (analyzer).

### 1.b Verifica del funzionamento

Per verificare il corretto funzionamento del circuito si è inviata all'ingresso analogico del circuito una sinusoide di bassa frequenza ( $f = 10 \text{ Hz} \ll f_{\text{clk}}$ ) con ampiezza di 2.5 V e media nulla. Riportiamo l'acquisizione con l'oscilloscopio di qualche periodo dell'onda sinusoidale su CH1 e dell'uscita di U4 su CH2 in fig. 2.

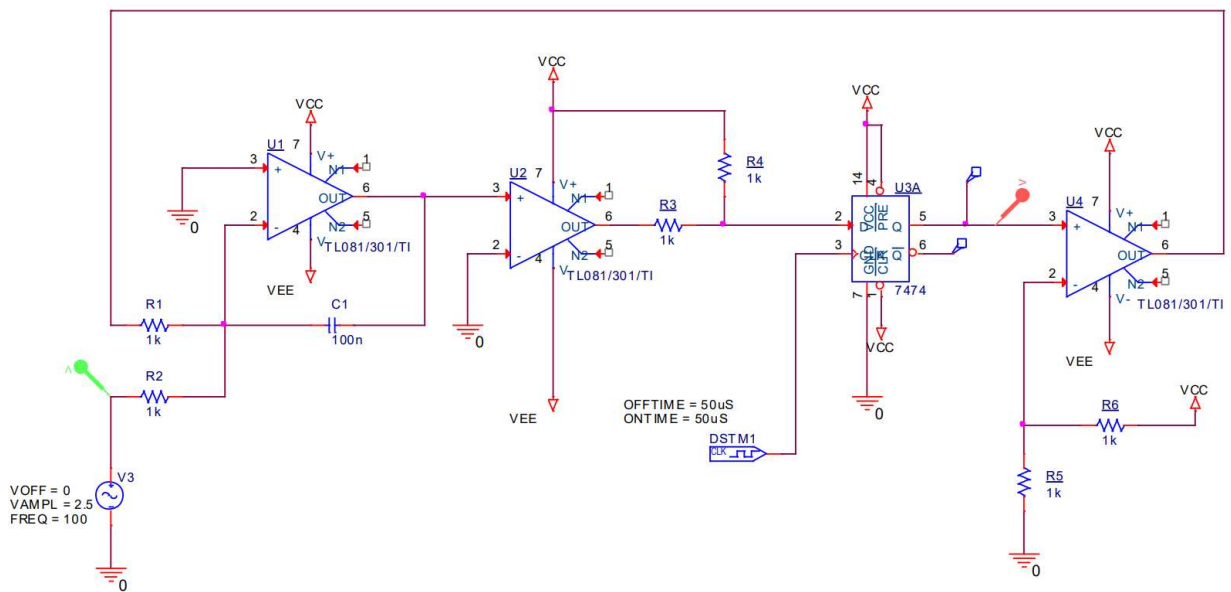


Figura 1: Schema elettrico del circuito convertitore analogico digitale sigma-delta studiato

2.1

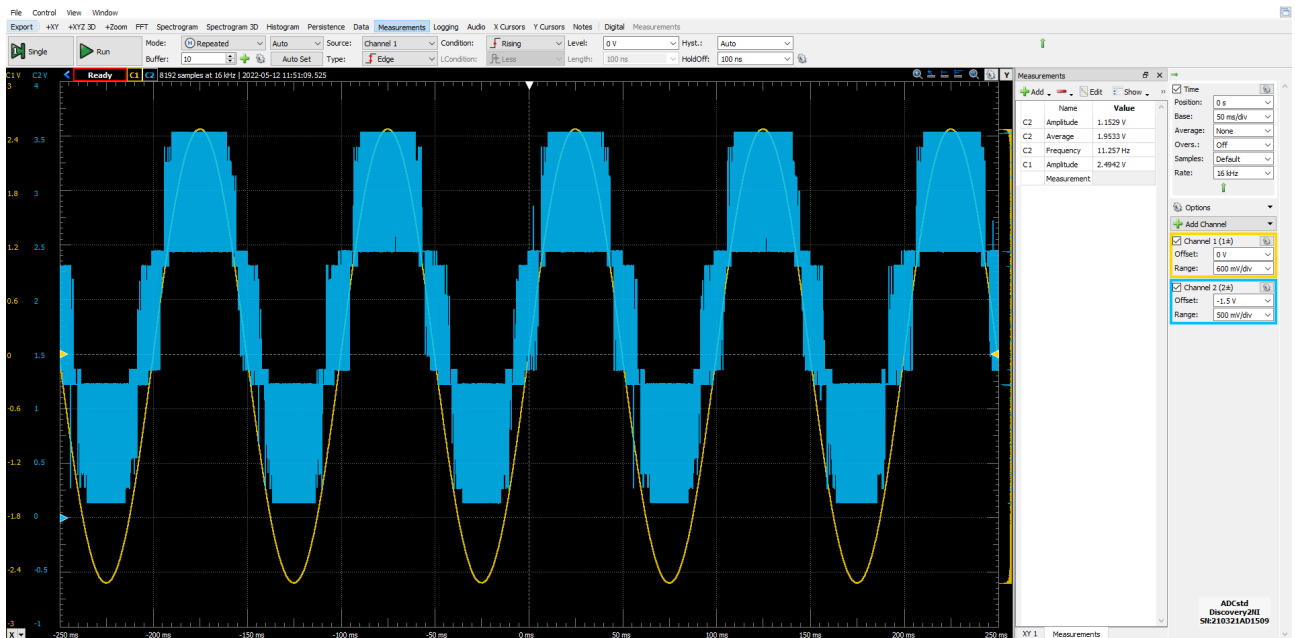


Figura 2: Acquisizione dell'andamento temporale del segnale in ingresso (CH1) e del segnale in uscita (CH2) dall'ADC

### 1.c Analisi qualitativa del funzionamento del circuito

Possiamo dividere il circuito in 3 blocchi funzionali: basandoci sullo schema mostrato in fig. 1 individuamo da sinistra verso destra un circuito sommatore e integratore invertente, un comparatore con  $V_{ref} = GND$  e un flip flop che faranno da convertitore A->D a 1 bit, e infine un convertitore D->A anch'esso da 1 bit.

Il compito del sommatore e integratore è quello di calcolare la media nel tempo del segnale di feedback sommato a quello analogico in ingresso all'ADC, in modo che l'uscita dell'integratore sia  $> 0$  quando la media del segnale di feedback è inferiore a  $V_{in}$  e viceversa.

L'uscita dell'integratore viene poi inviata all'ingresso di un comparatore la cui uscita in assenza di partitore di tensione corrisponderebbe alle tensioni di saturazione degli OpAmp:  $V_{sat,+} \approx 3.5V$  nel caso in cui l'uscita dell'integratore sia positiva, e  $V_{sat,-} \approx -3.5V$  nel caso opposto.

Dunque, per modificare il segnale in modo che l'ingresso del FF possa interpretarlo correttamente come segnale digitale, si fa uso del partitore di tensione  $R_3 + R_4$  in modo che H e L del segnale siano rispettivamente 4.25 V (cioè maggiore del valore nominale di  $V_{IH}$ ) e 0.75 V (minore del valore nominale di  $V_{IL}$ ) e l'uscita del flip flop costituisca quindi l'uscita del nostro DAC.

Infine, l'uscita digitale passa attraverso un ultimo comparatore che implementa la funzione di convertitore Digitale->Analogico ad un singolo bit, la cui uscita sarà inviata al circuito sommatore+integratore come segnale di feedback. In maniera del tutto simile a prima il partitore  $R_5 + R_6$  assicura che il segnale in uscita assuma valori di saturazione degli OpAmp; in particolare si compara il segnale digitale con 2.5 V, e nel caso in cui sia maggiore, all'uscita si avrà  $V_{sat,+}$  o  $V_{sat,-}$  nel caso complementare.

Si procede alla verifica del funzionamento del convertitore A->D: per farlo inviamo un segnale di clock al FF di frequenza pari a 50 kHz, e un'onda sinusoidale di ampiezza 2.5 V e frequenza 10 Hz all'ingresso analogico. Ci aspettiamo di osservare con l'oscilloscopio in uscita dal flip flop un segnale simile ad un'onda quadra con duty cycle  $\sim 50\%$  quando l'onda vale circa 0 V, e che il Duty Cycle cresca in maniera proporzionale all'ampiezza dell'onda in ingresso. Dalle acquisizioni riportate in fig. 3, fig. 4 e fig. 5 il comportamento del circuito risulta

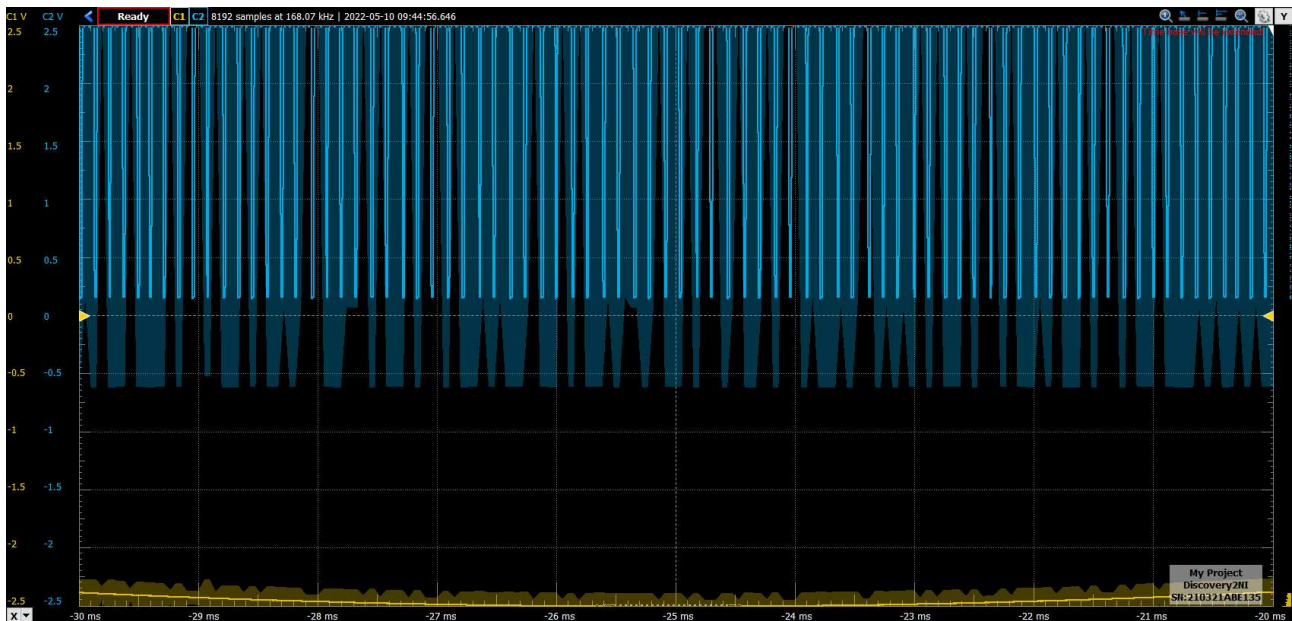


Figura 3: Acquisizione del segnale analogico in ingresso (un'onda sinusoidale di frequenza pari a 10 Hz e ampiezza pari a 2.5 V) e del segnale logico in uscita dal pin Q del Flip-Flop durante il minimo del segnale

compatibile con quanto atteso.

### 1.d Risposta del convertitore al variare dei parametri del seno

Modificando i valori di offset e ampiezza dell'onda in ingresso si nota immediatamente come il segnale in uscita venga tosato ai livelli di saturazione basso  $V_{OL} = 138 \pm 2$  mV e alto  $V_{OH} = 3.52 \pm 0.02$  V quando il segnale in ingresso raggiunge valori di tensione pari a circa  $V_s \approx \pm 3$  V per via della portata limitata del nostro convertitore.

Si riporta la risposta del circuito per un'onda della stessa ampiezza (2.5 V) e offset = 2 V in fig. 6 e per un'onda di ampiezza maggiore (5 V) e offset = 0 V in fig. 7.

Quanto trovato risulta compatibile con il massimo intervallo di tensioni che il segnale logico di ingresso può assumere senza rischiare saturazioni nel nostro circuito  $\approx 7$  V, assumendo che il valore di uscita del nostro DAC risulti essere  $-V_{sat}$  in corrispondenza di uno 0 logico e  $V_{sat} \approx 3.5$  V in corrispondenza di un 1.

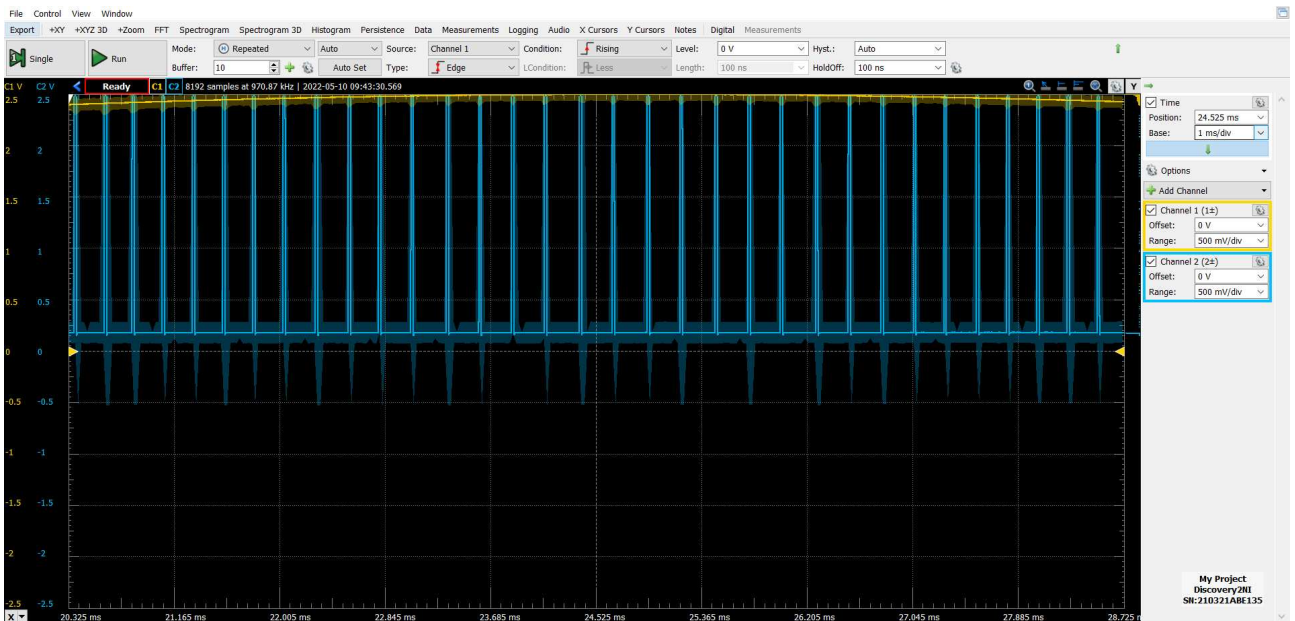


Figura 4: Acquisizione del segnale analogico in ingresso (un'onda sinusoidale di frequenza pari a 10 Hz e ampiezza pari a 2.5 V) e del segnale logico in uscita dal pin Q del Flip-Flop durante il massimo del segnale

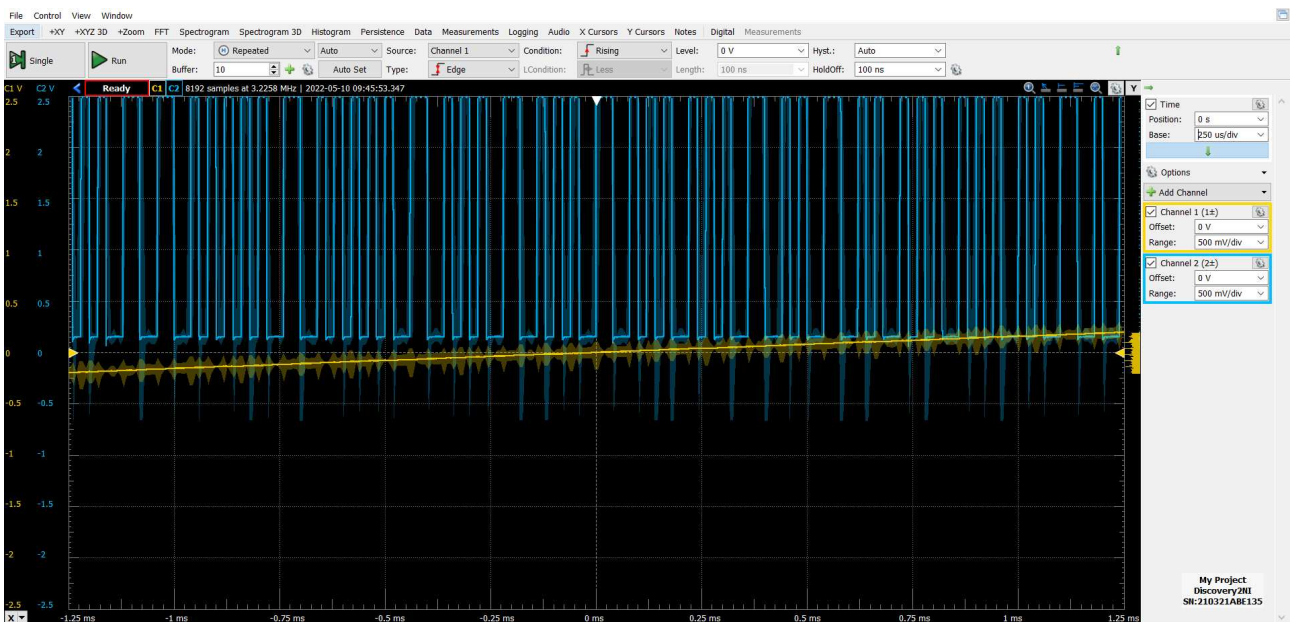


Figura 5: Acquisizione del segnale analogico in ingresso (un'onda sinusoidale di frequenza pari a 10 Hz e ampiezza pari a 2.5 V) e del segnale logico in uscita dal pin Q del Flip-Flop durante il punto medio dell'onda

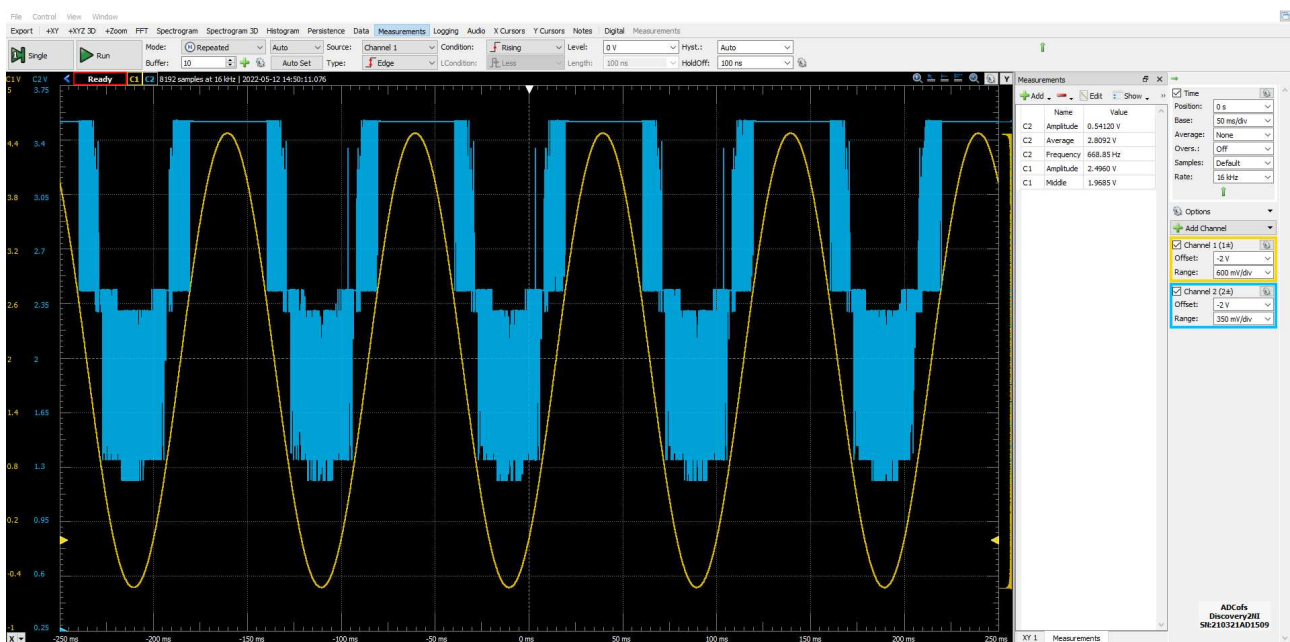


Figura 6: Acquisizione dell'andamento temporale del segnale in ingresso (CH1) e del segnale in uscita (CH2) dall'ADC

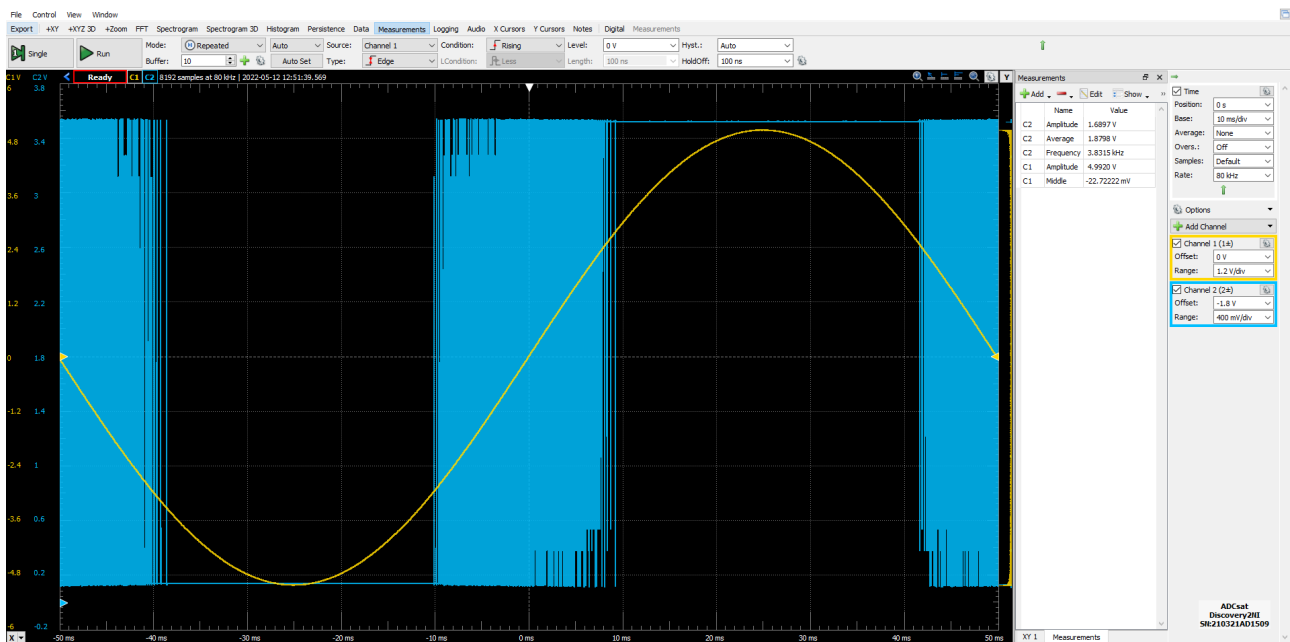


Figura 7: Acquisizione dell'andamento temporale del segnale in ingresso (CH1) e del segnale in uscita (CH2) dall'ADC



Aumentando la frequenza  $f$  del segnale in ingresso al circuito si nota come l'informazione in uscita sull'onda da ricostruire (proporzionale al numero di punti campionati/alla densità di fronti d'onda) diminuisce man mano che  $f$  si avvicina alla frequenza massima di campionamento  $f_{clk}$ , come si mostra in fig. 8 per  $f = 100$  Hz. e in

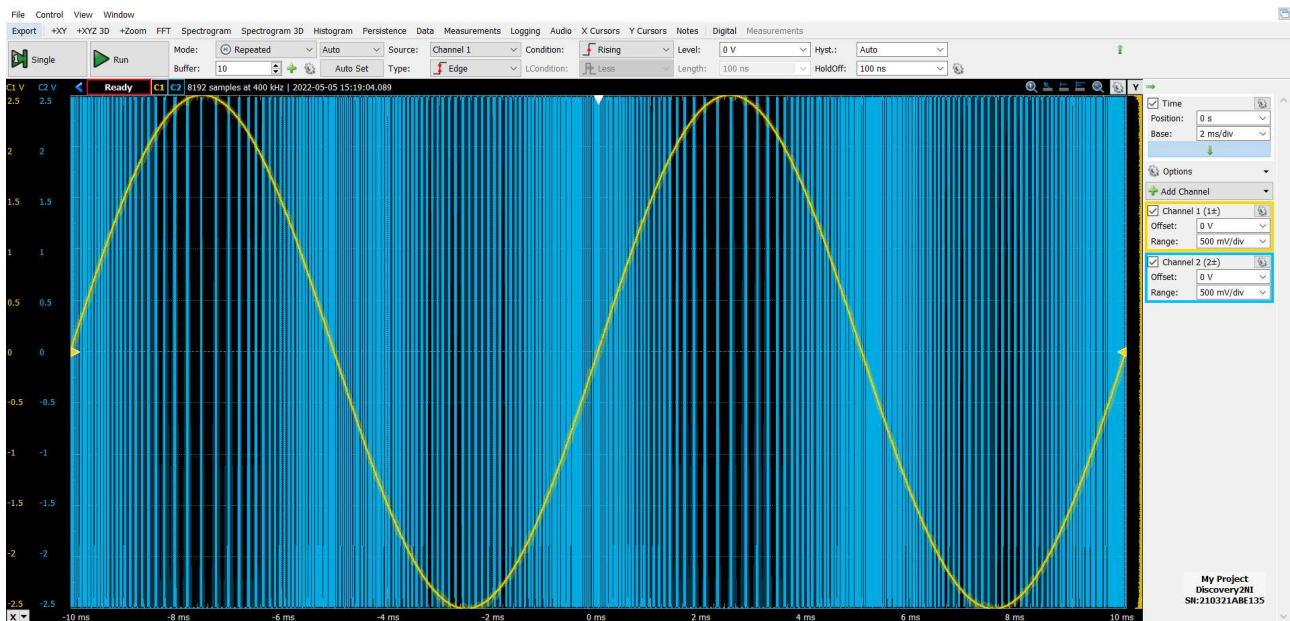


Figura 8: Acquisizione del segnale sinusoidale in ingresso (CH1)  $f = 100$  Hz e ampiezza 2.5 V e del segnale in uscita dal DAC (CH2)

fig. 9 per  $f = 2$  kHz.

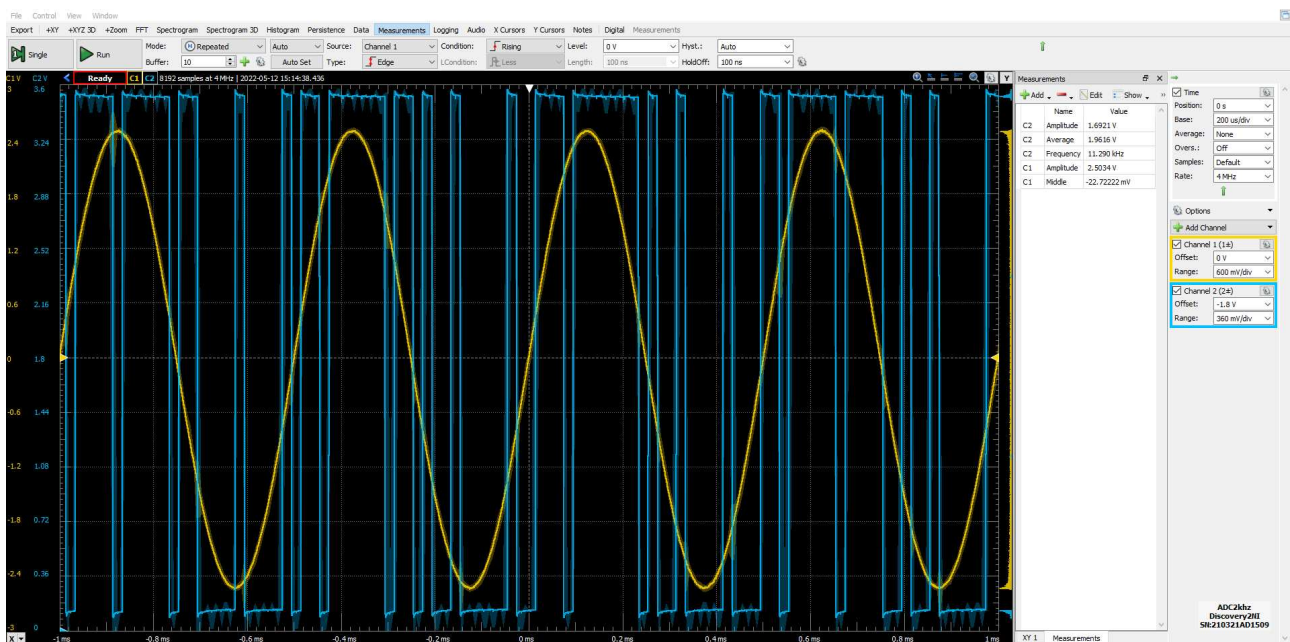


Figura 9: Acquisizione del segnale sinusoidale in ingresso (CH1)  $f = 2$  kHz e ampiezza 2.5 V e del segnale in uscita dal DAC (CH2)

Questo risulta compatibile con quanto ci aspettiamo per via della risoluzione temporale limitata (proprio dalla frequenza di clock) del nostro modulatore delta. Infatti, per ripristinare la densità di informazione che avevamo su segnali più lenti, è sufficiente aumentare proporzionalmente la frequenza di clock/campionamento inviata con DIO 0 al FF.



## 2 Descrizione delle misure e acquisizione dati

### 2.a Campionamento e acquisizione del segnale

Per acquisire il segnale in uscita dal Flip-Flop con l'AD2 si sono reimpostate la frequenza della sinusoide in ingresso a  $f = 100$  Hz e la frequenza del clock come prima a  $f_{\text{clk}} = 50$  kHz, dunque leggiamo in modalità Spy un bus SPI creato con lo strumento Protocol di Waveforms, impostando i parametri come segue:

**Select:** None

**Frequency:** 50 kHz (come il clock in DIO 0)

**Clock:** DIO 0

**Data:** DIO 1

**Mode:** Three-wire

**Data bits:** 8

**Format:** Decimal

Si registrano una decina di periodi della sinusoide lasciando lo strumento in modalità Receive per qualche frazione di secondo, quindi salviamo la serie di valori campionati su file di testo per analizzarli e ricostruire il segnale in ingresso.

## 3 Analisi dei dati

### 3.a Ricostruzione dei segnali in ingresso

Come abbiamo visto, il segnale in uscita dal Flip-Flop  $Q$  commuta in corrispondenza dei fronti di salita del clock l'ampiezza del segnale in ingresso è proporzionale alla densità relativa di bit a livello logico alto nella sequenza in OUT. Quindi per ricostruire l'ampiezza del segnale possiamo effettuare un conteggio di quanti bit sono in stato 1 nella sequenza in uscita da Protocol in un intervallo di tempo con una media mobile su 8 bit.

Riportiamo in fig. 10 la forma d'onda ottenuta su un grafico con Python, in cui i punti blu rappresentano i valori digitali in uscita dal DAC, i punti in giallo sono il risultato della prima operazione di media mobile a 8 bit e i punti in verde il risultato dopo una seconda operazione di media mobile sempre a 8 bit e decimati di un fattore pari a 8.

### 3.b Fit sinusoidale

Si è effettuato un fit con un legge della forma  $A \sin(2\pi ft + \varphi) + B$

```
def sin(t, A, f, phi, B):  
    return A*np.sin(2*np.pi*f*t + phi) + B
```

lasciando liberi tutti i parametri, da cui si ottengono il grafico riportato in fig. 11 e come stime dei valori ottimali:

$$\begin{aligned} A &= (386.8 \pm 0.2) \times 10^{-3} & f &= 100.00 \pm 0.01 \text{ Hz} \\ B &= (454.7 \pm 0.1) \times 10^{-3} & \varphi &= -79 \pm 4 \text{ mrad} \\ \chi^2/\text{d.o.f} &= 4/20554 \end{aligned}$$

### 3.c Risposta in frequenza dell'ADC

Come visto in sezione 1.d il convertitore studiato riesce a funzionare correttamente per segnali in ingresso fino a frequenze dell'ordine di qualche kHz; oltre cui la forma d'onda ricostruita in uscita risulta affetta da aliasing per via del basso numero di punti campionati lungo un periodo del segnale in ingresso.

Riportiamo quindi in fig. 12 la ricostruzione ottenuta per lo stesso segnale sinusoidale di frequenza  $f = 2$  kHz (visualizzato all'oscilloscopio prima in fig. 9) Come regola generale infatti ci aspettiamo che per riuscire a ricostruire fedelmente il segnale in ingresso la frequenza di campionamento debba essere almeno  $f_{\text{clk}} \geq 20f_{\text{max}}$  dove  $f_{\text{max}}$  è la frequenza massima dell'onda in ingresso.

Una volta ricostruite le onde per valori di frequenza  $f = [100, 200, 500, 1k, 2k, 5k, 10k]$  Hz abbiamo misurato la loro ampiezza ripetendo il fit come in sezione 3.b per ognuno di questi valori di  $f$  per ottenere il grafico dell'andamento dell'ampiezza in uscita in funzione della frequenza riportato in fig. 13 Da cui si vede di come

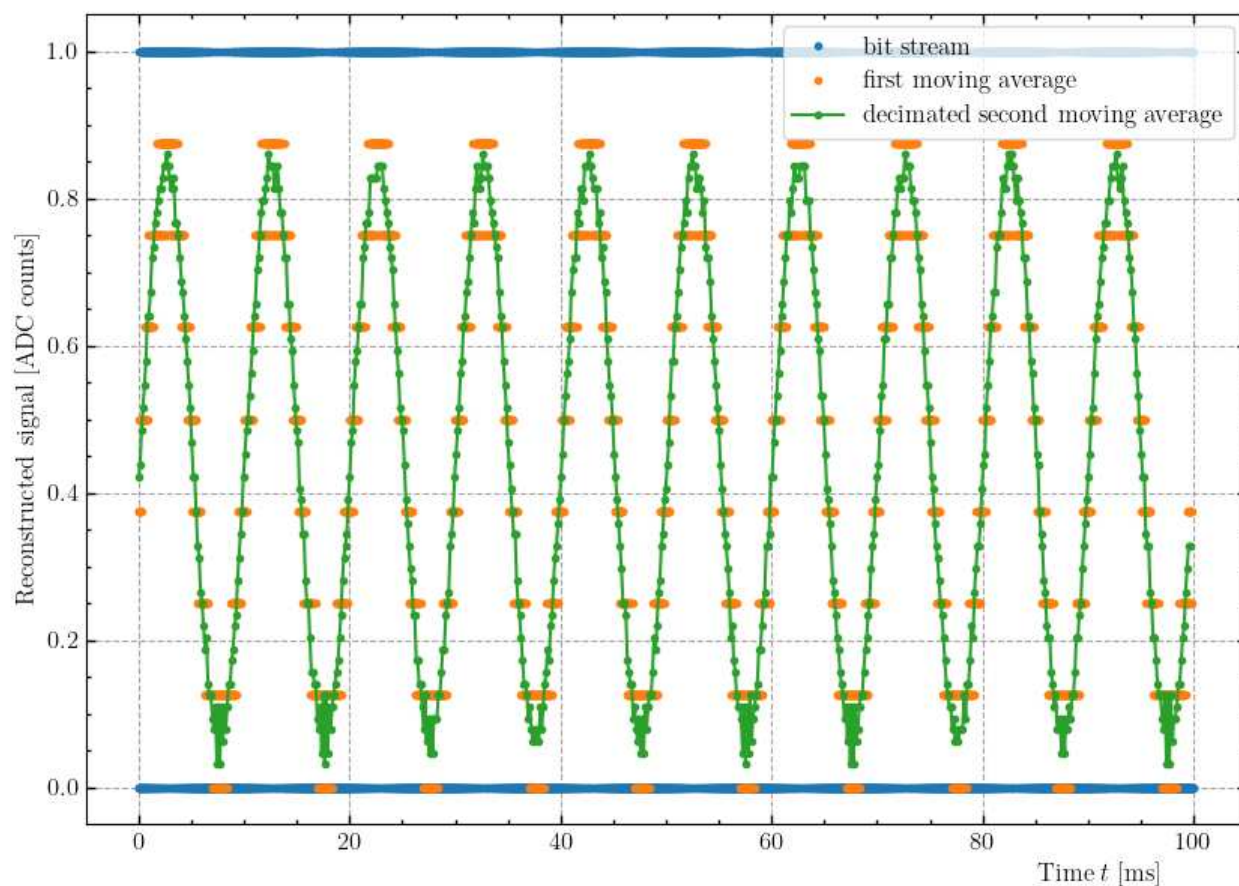


Figura 10: Ricostruzione del segnale sinusoidale in ingresso di  $f = 100$  Hz e ampiezza 2.5 V a partire dall'acquisizione del segnale in uscita dall'ADC con Protocol.

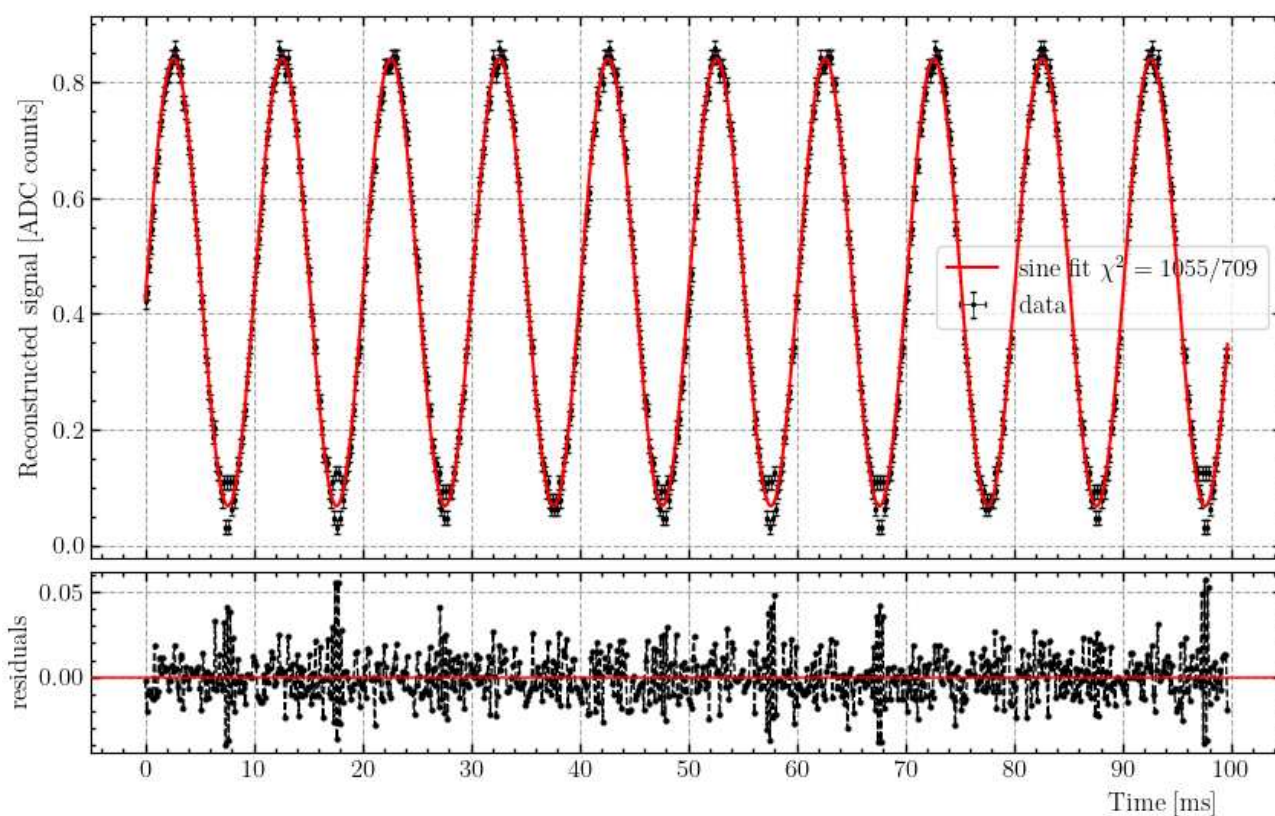


Figura 11: Grafico del fit con una forma d'onda sinusoidale e dei residui per l'andamento nel tempo dei punti campionati e ricostruiti dal secondo ADC.



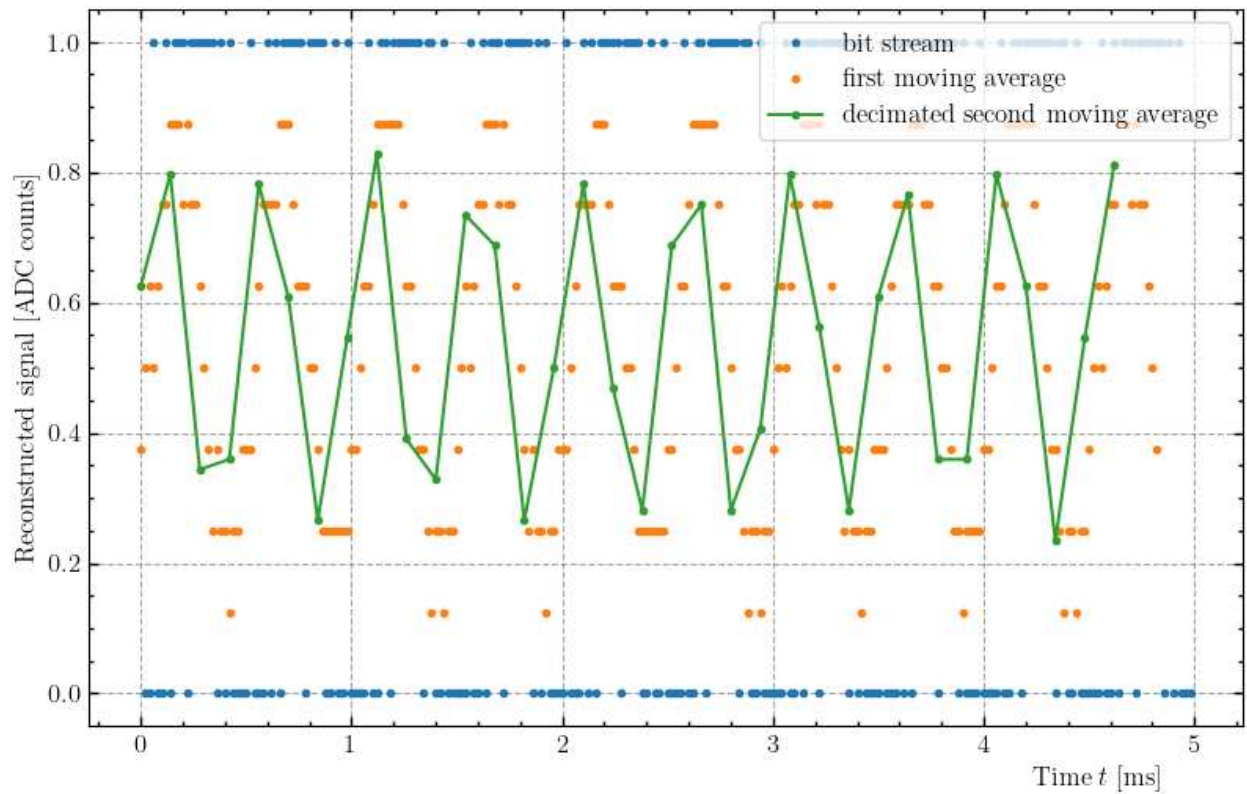


Figura 12: Ricostruzione del segnale sinusoidale in ingresso di  $f = 2$  kHz e ampiezza 2.5 V a partire dall'acquisizione del segnale in uscita dall'ADC con Protocol.

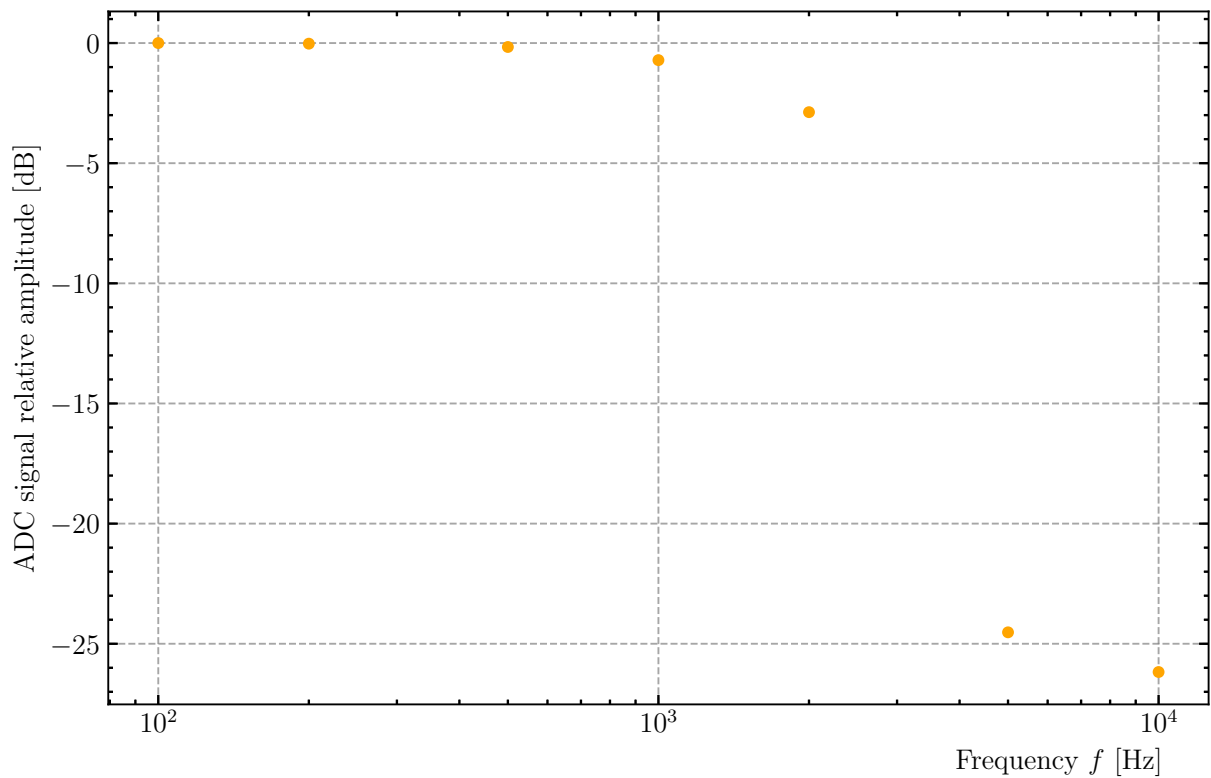


Figura 13: Plot di Bode per l'ampiezza del segnale ricostruito dall'ADC per frequenze tra 100 Hz e 10 kHz con segnale sinusoidale in ingresso di ampiezza fissata a  $v_{in} = 2.5$  V. Ad una frequenza di circa 2 kHz il grafico presenta un ginocchio in cui l'ampiezza è diminuita rispetto a centro banda di  $-3$  dB.

l'andamento dell'ampiezza del segnale in uscita dal circuito ha una risposta in frequenza simile a quella di un integratore, come quello presente in U1.

Riportiamo finalmente in fig. 14 la risposta in frequenza all'uscita U4 del circuito ottenuta da uno scan con Network Analyzer inviando una sinusoide di ampiezza fissata a 2.5 V e frequenza tra 100 e 10 kHz all'ingresso analogico dello stesso da cui si vede che anche la fase del segnale in uscita ha un andamento in frequenza

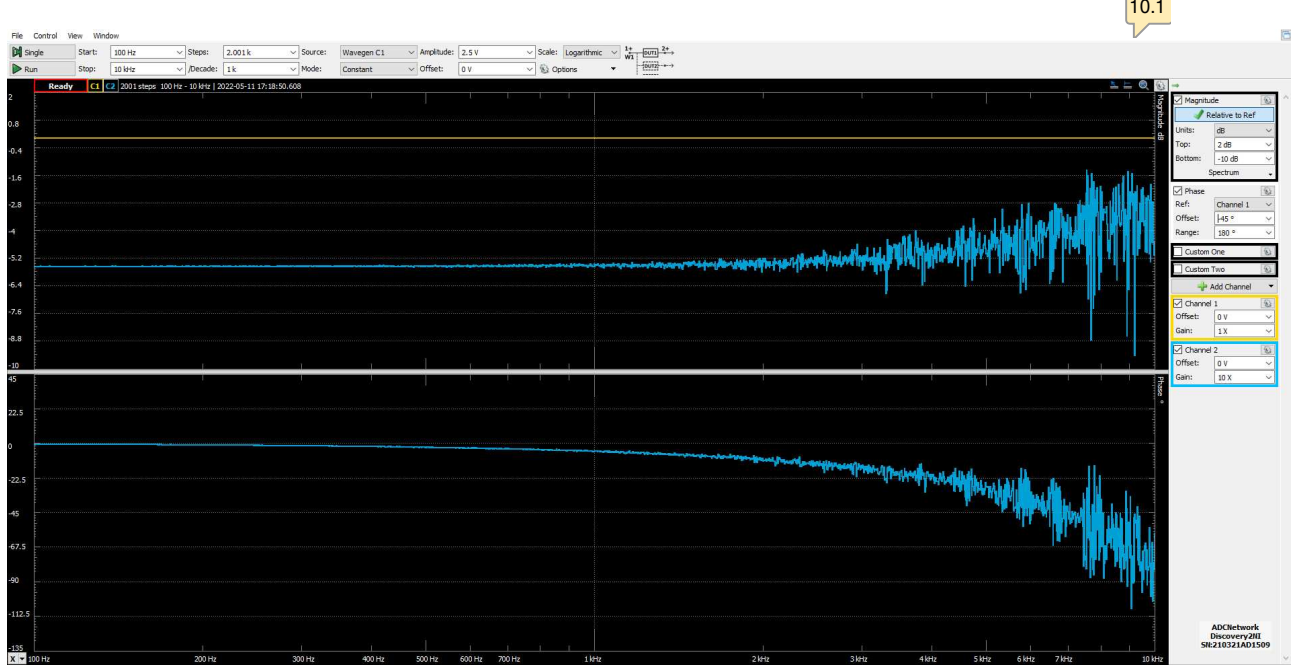


Figura 14: Analisi in frequenza dell'ADC ottenuta dallo scan con Network tra 100 Hz e 10 kHz con segnale sinusoidale in ingresso di ampiezza fissata a  $v_{in} = 2.5$  V. L'unico punto di interesse si trova a circa 2 kHz, frequenza oltre alla quale il circuito assume un comportamento irregolare. L'andamento della fase risulta qualitativamente simile a quello atteso per un filtro passa basso.

grossolanamente compatibile con quello atteso per un filtro passa basso.

### 3.d Stima del fattore di calibrazione del convertitore

Per ottenere una legge di conversione tra i conteggi in uscita dall'ADC e la d.d.p in Volt al suo ingresso abbiamo ricostruito alla stessa maniera dei segnali di tensione nota e costante, in modo da esplorare il range di valori ammessi per il nostro circuito. Per prima cosa ricaviamo il conteggio di zero che corrisponde alla lettura in uscita dall'ADC con ingresso collegato a massa, dunque effettuiamo un fit lineare per ricavare il fattore di scala per convertire da Volt a conteggi dell'ADC.

Riportiamo in fig. 15 e di seguito i risultati del fit lineare

$$\begin{aligned} \text{intercetta} &= 0.536 \pm 0.002 \text{ [ADC counts]} & \text{pendenza} &= 0.155 \pm 0.007 \text{ [counts/V]} \\ \text{correlazione} &= -0.97 & \chi^2 &= 0.1 & \text{d.o.f.} &= 10 \end{aligned}$$

Per l'altro circuito si è provato un secondo metodo per la calibrazione inversa del convertitore; per cui ad un conteggio ricostruito dall'ADC  $Y \in [0, 1]$  corrisponde una misura in Volt  $X = (Y - O) \cdot C$ .

Dopo avere eseguito il fit dell'onda ricostruita, si divide l'ampiezza dell'onda in ingresso misurata tramite oscilloscopio, per il valore dell'ampiezza ricavato dal fit, da cui otteniamo

$$\begin{aligned} C &= 6.39 \pm 0.06 \text{ V/count} \\ O &= (454.6 \pm 0.1) \times 10^{-3} \text{ ADC counts} \end{aligned}$$

### 3.e Misura del signal/noise ratio (SNR)

Assumendo che il valore RMS del rumore del nostro circuito corrisponda al valore RMS dei residui del fit alla sinusoide effettuato in sezione 3.c, si è stimato il rapporto segnale/rumore in potenza tramite la formula

$$\text{SNR} = \frac{A_{pp}^2/8}{\sigma_{\text{noise}}^2} = \frac{A^2/2}{\text{Var}(\text{residuals})} = 380 \quad (1)$$

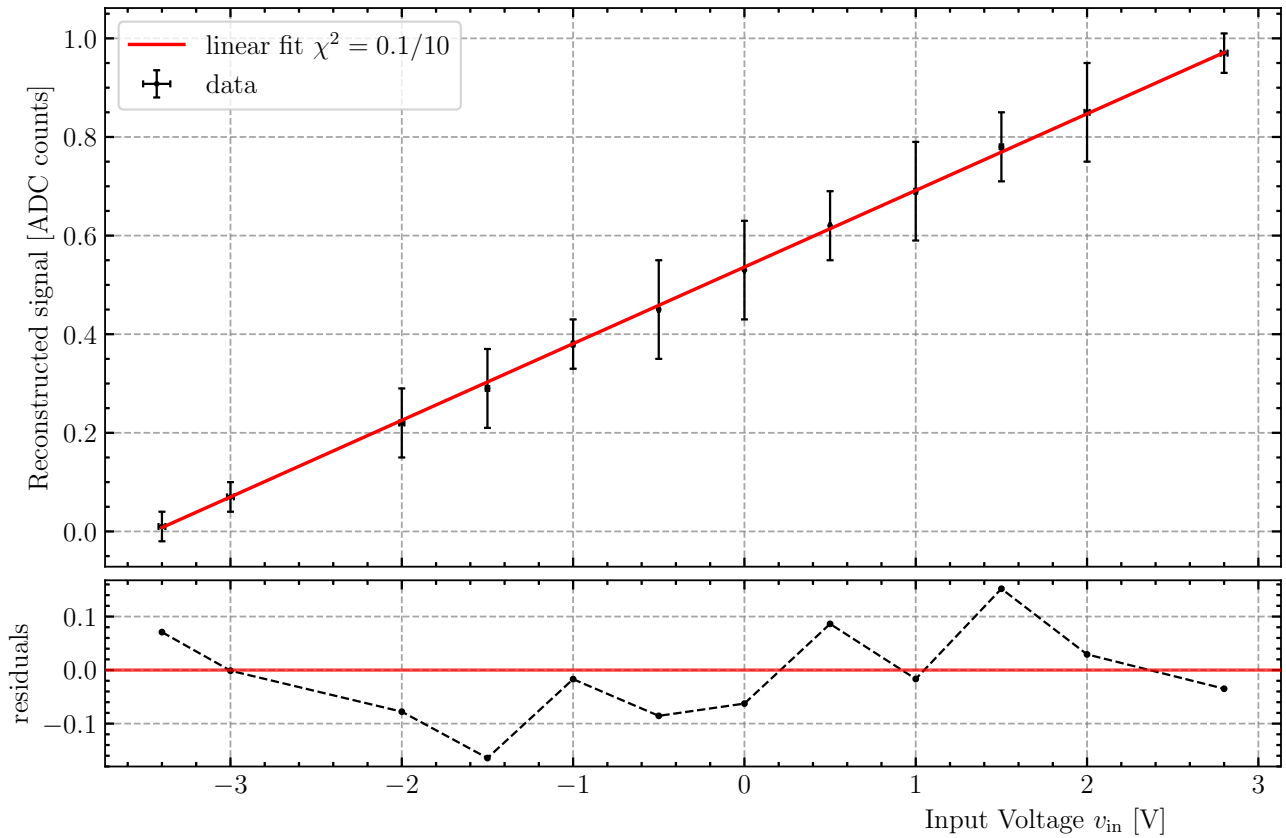


Figura 15: Grafico con retta di best-fit e residui della lettura dell'ADC al variare della tensione in ingresso per la calibrazione dell'ADC

in cui  $A_{pp}$  è l'ampiezza massima (picco-picco) e  $\sigma_{\text{noise}}$  indica il valore rms del rumore <sup>11.1</sup>e.

Dunque abbiamo ricavato il numero di bit effettivi del convertitore studiato tramite la formula

$$n_{\text{bits}} = \frac{40 \log_{10} \text{SNR} - 1.76 \text{ dB}}{6.02 \text{ dB}} = 8.3 \quad (2)$$

### Nota sul metodo di fit

Per determinare i parametri ottimali e le rispettive covarianze si è implementato in Python un algoritmo di fit basato sui minimi quadrati mediante la funzione `curve_fit` della libreria SciPy.

## Conclusioni e commenti finali

Si è riusciti a costruire e studiare il comportamento di un convertitore analogico-digitale Sigma-Delta facendo uso di tre amplificatori operazionali (TL081) e un D-FF (74LS74).

In particolare si è riusciti a descrivere e verificare sperimentalmente il corretto funzionamento del circuito e a caratterizzarne la risposta in uscita sia nel dominio dei tempi che delle frequenze al variare dei parametri del segnale analogico inviato al suo ingresso.

## Dichiarazione

I firmatari di questa relazione dichiarano che il contenuto della relazione è originale, con misure effettuate dai membri del gruppo, e che tutti i firmatari hanno contribuito alla elaborazione della relazione stessa.

# Indice dei commenti

---

- 2.1 La forma d'onda in uscita (se ho capito bene l'uscita di U4) e' sbagliata. Dovrebbe essere un onda quadra che oscilla tra +Vsat e -Vsat con duty cycle funzione dell'ampiezza istantanea del segnale di ingresso.
- 3.1 Non tornano i livelli. In particolare per Vh mi aspetto una tensione sicuramente maggiore dei 2.5V della figura 3
- 3.2 Questo e' corretto ma non vedo nessuno screenshot che lo faccia vedere.
- 6.1 L'andamento in questa figura e' coretto ma la saturazione a +/- 2.5V non torna con i circa 3.5V aspettati
- 6.2 Ancora lo stesso problema. In questo caso l'uscita dell'operazionale sembra oscillare tra zero e +3.5V. Non e' quindi compatibile con le misure precedenti.
- 7.1 In uscita da un DAC mi aspetto valori analogici e non digitali
- 10.1 Attenzione: l'uscita di U4 oscilla tra +Vsat e -Vsat e non e' un segnale che puo' essere utilizzato per la misura della funzione di trasferimento.
- 10.2 Anche in questo caso il valore e' corretto ma non ha corrispondenza nei grafici riportati nella relazione
- 11.1 dB ->  $10 \log_{10}(x)$  se x e' una potenza ovvero se e' funzione di  $V^2$ .