

6

La conversione Analogico-Digitale

Introduzione

Il concetto di Misura in Fisica

Una delle basi concettuali della fisica moderna a partire da Galileo è la nozione di **misura**. Si può dire che senza misure qualunque disciplina fisica si ridurrebbe ad un insieme di **chiacchiere**.

Il valore di una misura è il risultato **numerico** di una procedura che permette di stabilire il rapporto tra una proprietà o caratteristica di un **corpo** (massa, lunghezza, temperatura, **differenza di potenziale**, ...) e la stessa proprietà di un **altro corpo**, ad esso **omogeneo**, che viene assunta come unità di misura, o comunque come **riferimento**. E quindi, coerentemente:

Una misura diretta (in fisica) è una procedura, definita attraverso la sequenza di azioni elementari, che permette il confronto numerico tra una proprietà di un corpo qualunque e la stessa proprietà di un corpo di riferimento che viene assunta come unità campione.

Un **convertitore Analogico-Digitale** è un dispositivo fisico (tipicamente elettronico) che effettua ripetute misure di una grandezza fisica (tipicamente il **voltaggio**) che varia con continuità. Il risultato della misura è una serie di numeri che vengono trasmessi per via elettronica in forma digitale. Per la delicatezza dell'implementazione e le complicazioni costruttive in genere tutti i convertitori Analogico-Digitale sono realizzati sotto forma di **circuiti integrati** progettati ad hoc.

La nozione di **referimento** è come visto sopra essenziale, nel caso dei convertitori Analogico-Digitale è necessario disporre di una **tensione costante** e di un **clock preciso**, ogni errore su questi si riflette automaticamente sulla qualità della misura.

Vediamo ora i principali punti di interesse e le problematiche di progetto di un convertitore Analogico-Digitale.

Range di ingresso

Per ogni dispositivo deve essere definito un intervallo di accettazione che può essere nella forma $(-A, A)$ oppure $(0, A)$, ogni valore di ingresso fuori dall'intervallo di accettazione causa distorsione. Se l'intervallo di variazione del segnale di ingresso è molto piccolo rispetto all'intervallo di accettazione si ha una corrispondente perdita di **gamma dinamica**. L'adattamento tra la sorgente musicale (microfoni, strumenti, apparecchiature analogiche) deve essere realizzato con circuiti elettronici di tipo **analogico**.

Frequenza di campionamento

È indispensabile stabile a priori la **frequenza di campionamento** a cui il convertitore dovrà lavorare, tale frequenza può essere fissa oppure si può progettare l'apparecchiatura che conterrà i chip del convertitore in modo da permettere dall'esterno la selezione di una frequenza di campionamento. Per il trattamento di segnali audio ad alta fedeltà la minima frequenza accettabile è quella usata per il **CD Audio** ovvero **44100 Hz**, al giorno d'oggi sono molto usate frequenze maggiori **48000 Hz**, **96000 Hz** e anche **192000 Hz**, non tanto per riprodurre gli ultrasuoni (*operazione inutile se non per intrattenere i pipistrelli domestici*) quanto per rendere più semplici le operazioni che seguono.

Filtraggio anti-alias

Prima della conversione è **indispensabile** sottoporre il segnale analogico ad un filtraggio passa basso ad una frequenza minore o uguale alla **frequenza di Nyquist**. Questa operazione porta con sé molte problematiche in quanto un filtraggio analogico ripido è di difficile implementazione e comporta problemi di fase che danno origine a danni udibili nel risultato. D'altra parte se la **frequenza di Nyquist** è **22050 Hz** il filtraggio **deve** essere ripido altrimenti insieme *all'acqua sporca* si butta via anche un po' di *bimbo* (le frequenze sotto i **20000 Hz**). Uno dei principali vantaggi delle frequenze di campionamento elevate è la possibilità di utilizzare, in questa fase, un filtraggio analogico più blando.

Profondità di quantizzazione, risoluzione

Un altro parametro fondamentale che deve essere definito è la **profondità di quantizzazione**, i valori più usati allo scopo in campo audio sono 16 bit (lo standard del CD) o **24 bit** (lo standard dell'audio ad alta definizione). La **risoluzione teorica** q è il più piccolo valore di tensione che può essere distinto nel segnale in uscita. È però importante tenere presente che un convertitore può uscire anche con **centinaia di bit** ma la sua **risoluzione reale** è determinata dalla combinazione delle varie componenti che causano l'errore totale. Alcuni autori definiscono **risoluzione** come il numero di bit in uscita. Mentre q è un parametro che dipende anche dalla massima accettazione, la definizione di **risoluzione reale** come **il numero di bit buoni** in uscita permette di confrontare direttamente la qualità di due sistemi di conversione e sarà questa la definizione da noi adottata nel seguito.

Rumore, linearità, errore di apertura, irregolarità temporali

La **risoluzione reale** di un convertitore non dipende solamente dal numero n di bit in uscita ma anche dal contributo di tutte le principali forme di errore.

- **Errore di quantizzazione.**

Se si usa un corretto **dither** l'errore di quantizzazione è scorrelato dal segnale e la **sua potenza totale** dell'ordine di $-6n$ dB.

- **Rumore analogico.**

Il segnale analogico in ingresso è affetto dal suo rumore inevitabile (almeno quello **termico** è sempre presente) ovviamente il rapporto segnale-rumore in uscita non può essere migliore del rapporto segnale-rumore in ingresso.

- **Linearità.**

Le inevitabili imperfezioni fisiche del dispositivo causano inevitabili non linearità nella risposta che a sua volta limitano la massima risoluzioni. Se questi errori sono **sistematici** possono essere ridotti attraverso un processo di **calibrazione** che può avvenire al momento della costruzione o dinamicamente al momento della accensione del dispositivo.

- **Irregolarità temporali (Jitter)**

Per poter misurare il valore del segnale ad intervalli regolare è necessario di un riferimento temporale stabile e preciso. Un errore Δ nella temporizzazione di un segnale di frequenza f e ampiezza a causa un errore nel risultato di circa $2\pi a f \Delta$. Si noti che per sfruttare tutta la gamma dinamica teorica in tutta la banda audio sarebbe necessario verificare la disuguaglianza

$$2 \pi A f \Delta < q$$

Per esempio nel caso di **24 bit** questo limite sarebbe inferiore al **picosecondo**. In realtà le cose stanno molto diversamente e il problema dell'errore temporale (detto **Jitter**) sarà trattato diffusamente in una lezione a parte.

- **Errore di apertura.**

Ricordiamo l'equazione che definiva la delta di Dirac

$$s(t_0) = \int_{-\infty}^{\infty} \delta(t - t_0) s(t) dt$$

Può sembrare che usare questa equazione per calcolare $s(t_0)$ sia l'equivalente matematico dell'uccisione di un verme a colpi di cannone, ma purtroppo questa equazione dà un'idea di quello che succede *davvero* nella realtà fisica. Infatti in fisica l'**istante** non esiste e per misurare una tensione bisogna pure che un po' di cariche si muovano da una parte all'altra (per esempio fluendo in un condensatore). Per cui in pratica la misura di $s(t_0)$ avviene attraverso la media integrale

$$s(t_0) \approx \int_{t_0-T}^{t_0+T} w(t - t_0) s(t) dt$$

dove $w(t)$ è un impulso fisicamente realizzabile ad area unitaria nell'intervallo $(-T, T)$. Quanto più piccolo è T quanto meno precisa può essere la misura ai bassi livelli (passano troppe poche cariche); quanto più grande è T quanto meno precisa può essere la misura alle alte frequenze in quanto non si riescono a catturare le variazioni di s , in ogni caso il compromesso è d'obbligo.

- **Errore numerico**

Se nel processo di conversione sono usate elaborazioni numeriche, per esempio un **filtro digitale**, allora i risultati di questa elaborazione sono affetti da un errore inevitabile, detto **errore algoritmico**, che viene percepito sotto forma di un ulteriore fondo di rumore. Il problema può essere attenuato o anche risolto contemporaneamente usando per i calcoli una lunghezza di parola maggiore della profondità di quantizzazione. Per esempio se si quantizza a 24 bit è bene fare i calcoli successivi almeno a 32 bit se non a 48.

Riassumendo:

Al momento attuale, qualunque sia il numero di bit in uscita è praticamente impossibile ottenere una risoluzione reale maggiore di 20 bit (120 dB).

Due parametri globali di misura della bontà di un convertitore, che permettono di stimare la risoluzione reale, sono la **Distorsione Totale + Rumore (Total Harmonic Distortion + Noise, THD+N)** e la **Gamma Dinamica (Dynamic Range)**.

- La misura di **Distorsione Totale + Rumore** si effettua discretizzando un segnale sinusoidale e esprimendo in decibel il rapporto tra la potenza RMS del segnale originale e quella dell'uscita privata del segnale originale che a questo punto conterrà solo distorsione e rumore.
- La **Gamma Dinamica** si ottiene misurando in decibel la Distorsione Totale + Rumore per un segnale sinusoidale di livello -60 dB e aggiungendo 60 dB a questo valore.

Tipologie di convertitori

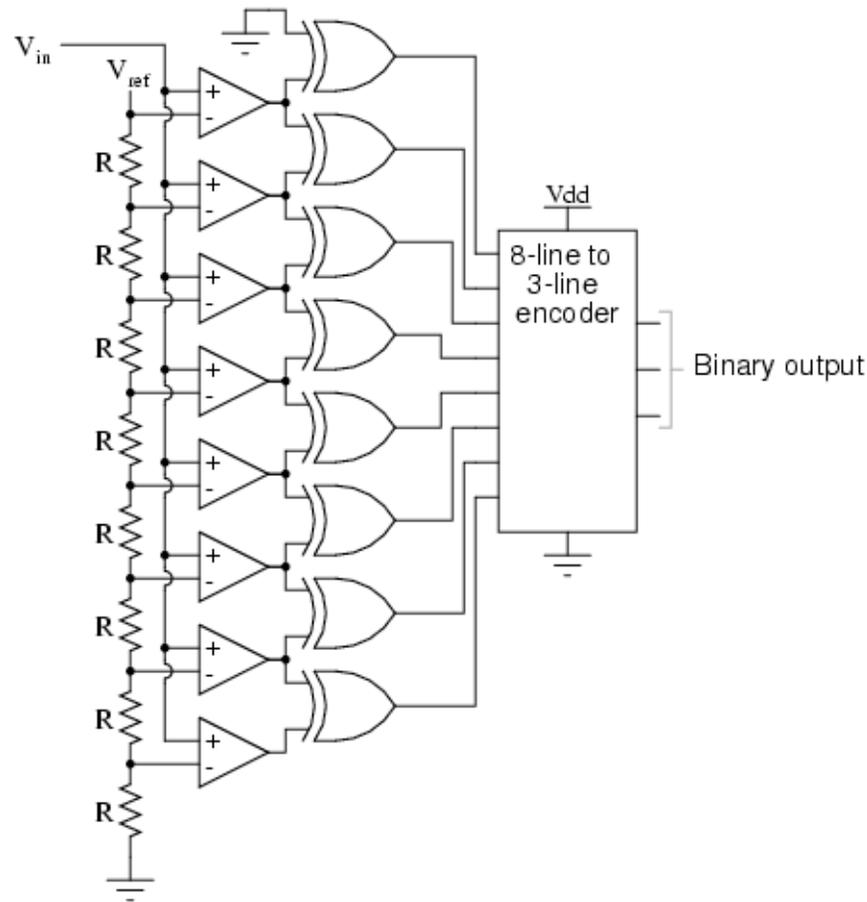
Vediamo adesso alcune tipologie di convertitore Analogico-Digitale, discutendone la applicabilità in campo audio.

Flash

È il modello più semplice e più veloce di convertitore ma anche il meno adatto all'audio di qualità. Il segnale viene confrontato in parallelo con 2^n livelli di tensione di riferimento, il più alto dei livelli che viene superato pilota un codificatore binario, Il circuito è intrinsecamente asincrono e molto veloce. Se si desidera un segnale campionato bisogna legger l'uscita ad intervalli regolari. Purtroppo il numero di comparatori è pari a 2^n e un circuito del genere sarebbe irrealizzabile con 16 o 24 bit in uscita.

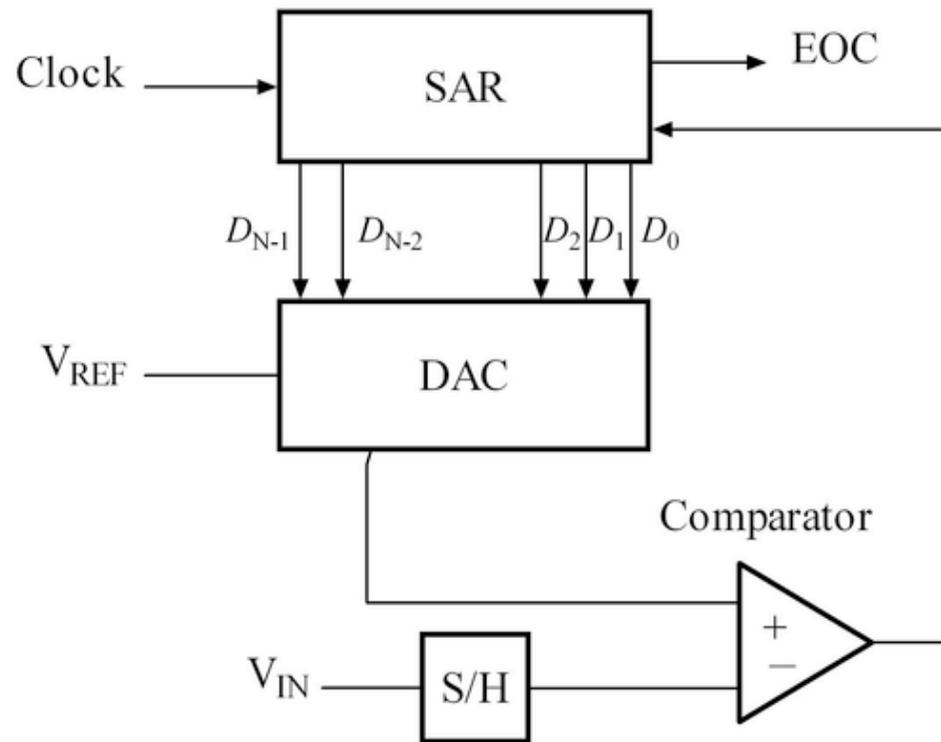
Spesso convertitori flash con pochi bit di uscita sono usati come componenti interne di schemi di conversione più complicati.

Nella figura seguente è presentato lo schema di un convertitore flash asincrono a 3 bit.

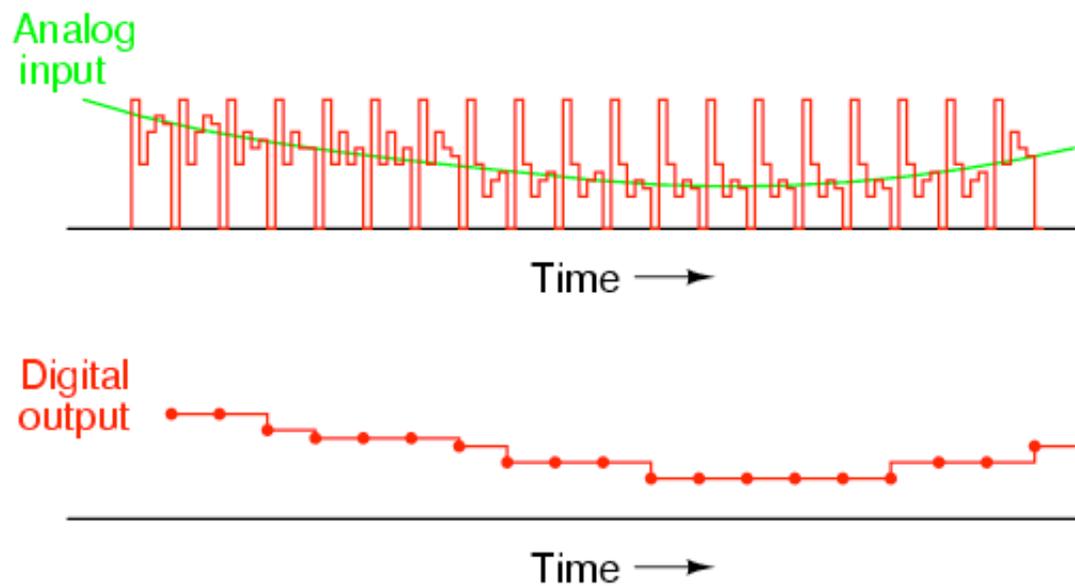


Approssimazioni successive

In questo tipo di convertitore i bit di uscita vengono determinati uno per volta attraverso un procedimento di ricerca binaria, il valore analogico di ingresso viene confrontato con l'uscita di un convertitore digitale analogico (DAC) che viene inizializzato con il bit più significativo ad uno e tutti gli altri a zero, il risultato del confronto determina il valore di questo bit e poi si passa a determinare nello stesso modo il bit successivo fino alla fine. In questo modo il risultato finale viene determinato in n passi.



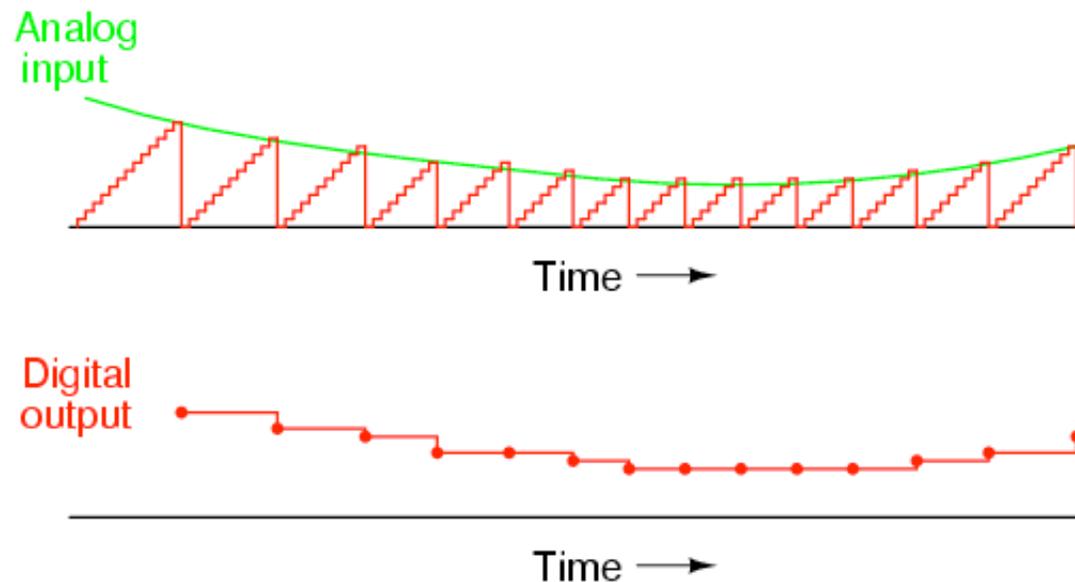
La figura seguente mostra l'approssimazione del segnale nel dominio del tempo.



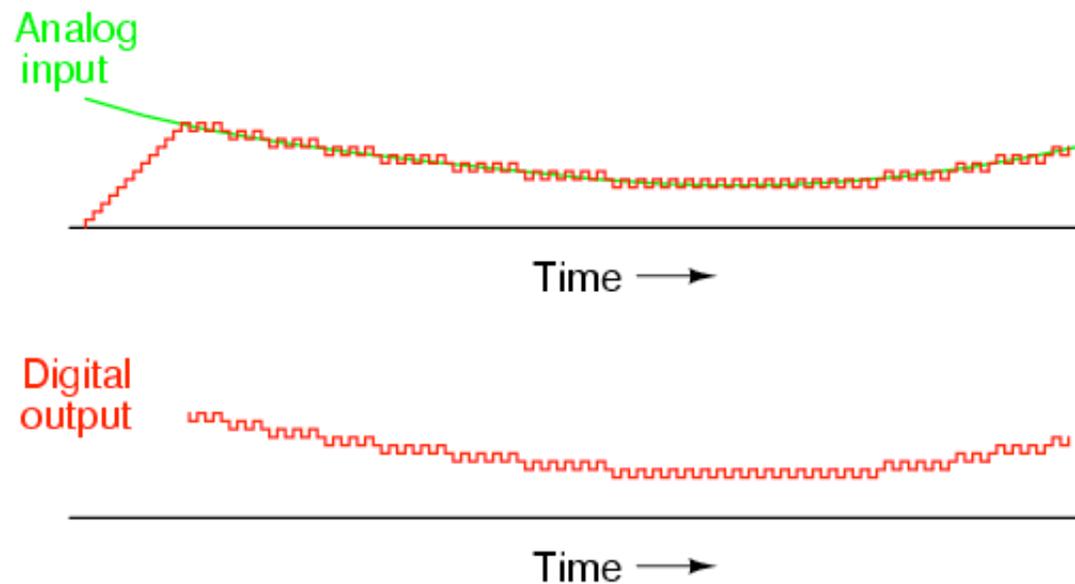
Convertitori a contatore

Un'altra tipologia di convertitori fa uso di un qualche tipo di contatore. Per esempio si può generare un segnale crescente a gradini e fermarsi quando si raggiunge il segnale da quantizzare. Contare in binario il numero di gradini produce la parola in uscita.

Esistono molte varianti di questa metodologia ma tutte hanno in comune la lentezza e la difficoltà di fare uscire il segnale digitale a tempi prefissati visto che il valore è pronto dopo che è finito il conteggio.



Se il contatore e il livello dei gradini vanno in entrambe le direzioni si ottiene una approssimazione più veloce.



Oversampling e conversione Sigma-Delta

Una metodologia generale, decisamente vincente, molto usata sia nella conversione Analogico-Digitale che in quella Digitale-Analogica è quella dell'**Oversampling** o **Sovracampionamento**. Supponiamo di volere in uscita un segnale campionato a 44100 Hz, come abbiamo visto è obbligatorio un filtro anti-alias a pendenza molto ripida. Se invece facciamo il campionamento a 176400 Hz otteniamo tre vantaggi considerevoli

- Il filtro anti-alias può avere una pendenza dolce e partire per esempio da 25000 Hz, l'importante è che non passino frequenze sopra gli 88200 Hz.
- Il rumore in banda audio si riduce di 6 dB (3 dB per ogni raddoppio di frequenza).
- È possibile effettuare operazioni successive alla quantizzazione con un filtraggio digitale o un rimodellamento del rumore.

Alla fine di tutte le operazioni il segnale può essere decimato, ovvero ricondotto alla frequenza desiderata scartando 3 campioni su 4 (attraverso un procedimento di filtraggio digitale).

Quella che abbiamo presentato è solo la metodologia di principio in realtà questa metodologia viene spinta agli estremi per ottenere le migliori prestazioni.

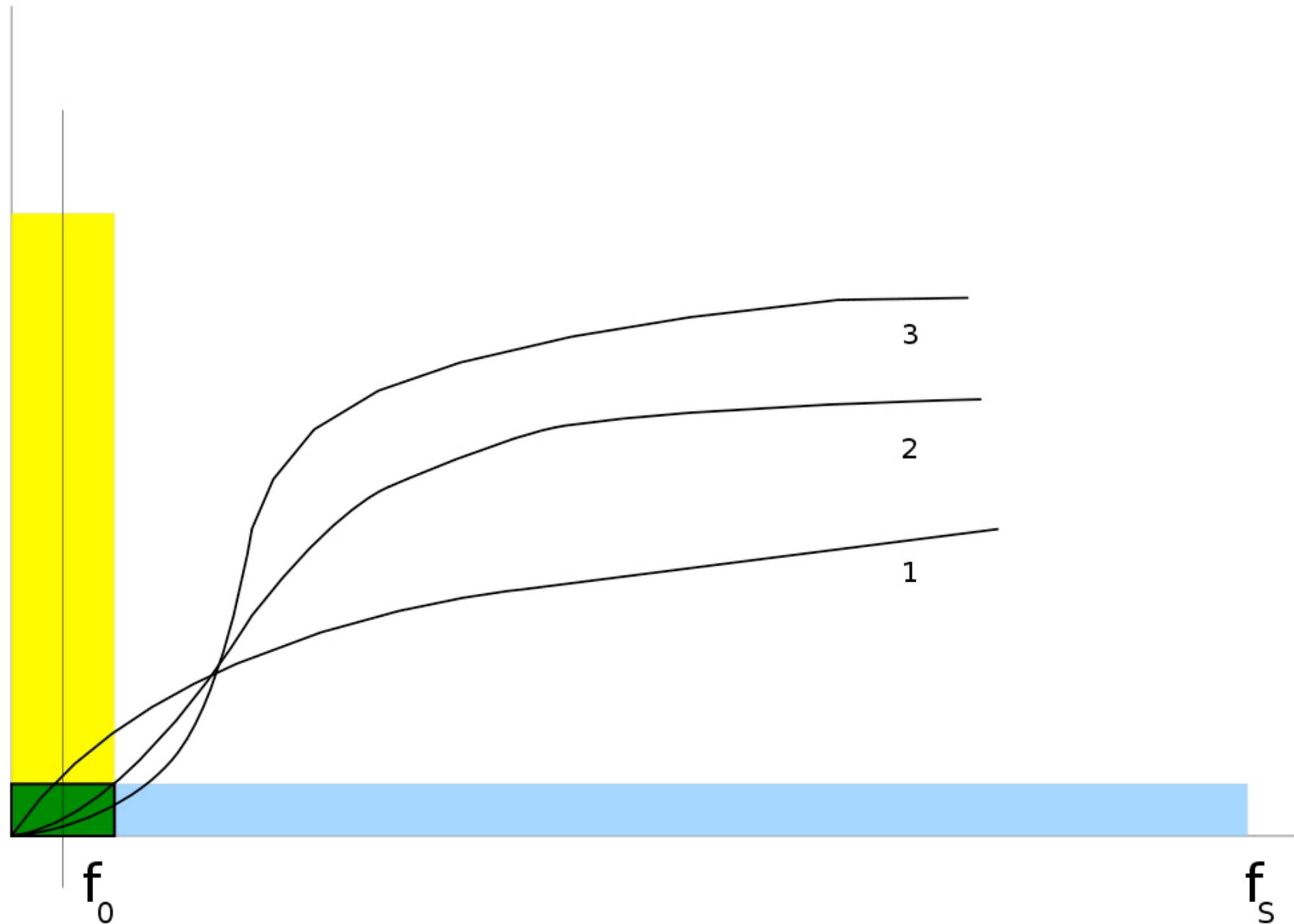
La struttura generale di un convertitore **Sigma-Delta** (o anche **Delta-Sigma**) è la seguente.

- Si effettua un blando filtraggio analogico **anti-alias**.
- Un veloce convertitore **flash** fornisce una approssimazione del segnale con pochi bit (al limite uno solo) ma con una frequenza di campionamento molto elevata (anche 128 volte la frequenza desiderata in uscita).
- Uno o più stadi di **noise-shaping** abbattano il rumore in banda audio scaricandolo alle alte frequenze.
- Uno stadio finale di **filtraggio digitale e decimazione** elimina le componenti ad alta frequenza producendo il segnale con il numero di bit e la frequenza desiderati.

La riduzione di rumore di 3 dB¹ ogni raddoppio di frequenza dovuta al solo **oversampling** non giustificherebbe da sola tutta la complicazione della architettura, l'uso del noise-shaping è di fondamentale importanza. Nella figura seguente si vede il comportamento del rumore in

¹ Alcuni testi riportano un valore di 6 dB ma senza dimostrazione, il valore di 3 dB è tratto dal testo **A. Oppenheim, R W. Schaffer, Discrete Time Signal Processing, Prentice Hall**, pp. 201-205 e la relativa dimostrazione è decisamente convincente.

funzione della frequenza per tre valori del numero di stadi di noise-shaping. La parte di rumore che resterà udibile è quella nel rettangolo verde.



Conversione a 1 Bit

Supponiamo di usare la tecnica della conversione **Sigma-Delta** con un solo bit e una frequenza di campionamento dell'ordine di qualche MegaHertz. La sequenza di bit che dovrebbe alimentare lo stadio di filtraggio e decimazione contiene tutta l'informazione relativa al segnale campionato e quantizzato. Si può quindi decidere di eliminare l'ultimo stadio ed uscire con questa sequenza che può essere trasmessa o memorizzata sugli opportuni supporti.

Una scelta di questo tipo è stata fatta dalla Sony con il formato **DSD** che è usato nei **Super Audio CD (SACD)**. Questa tipologia di prodotti sarà trattata in una lezione apposita.

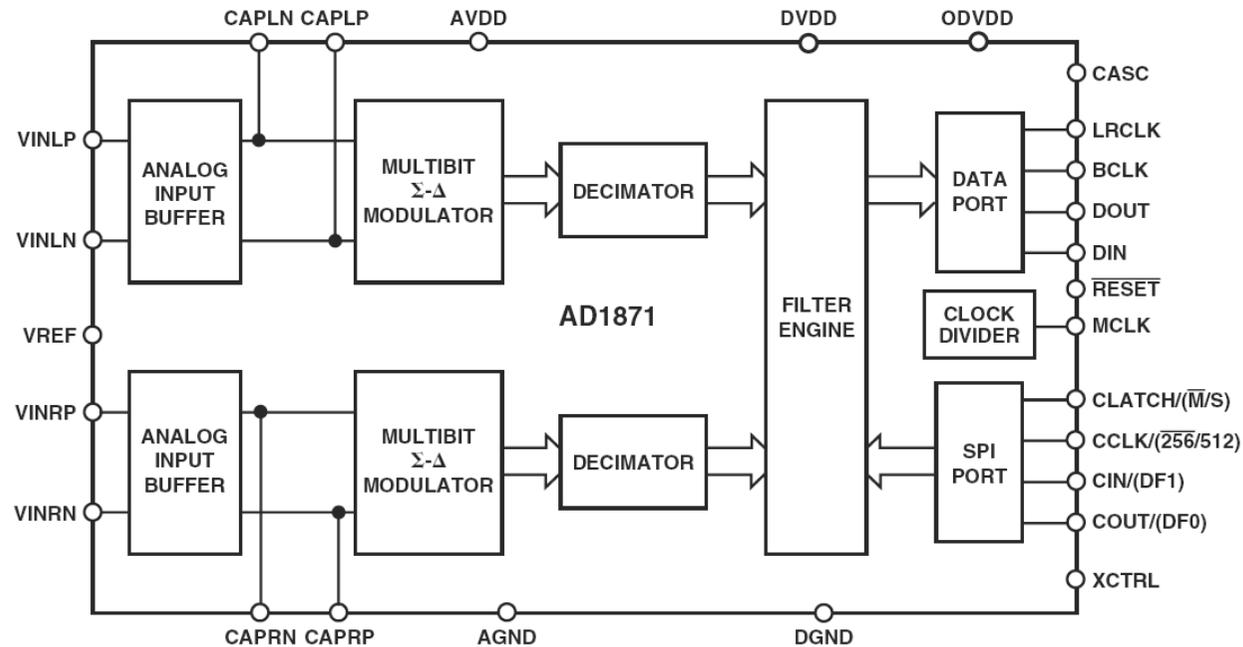
Modelli commerciali di convertitore AD

Vediamo le specifiche e la struttura interna di alcuni convertitori Analogico-Digitale allo stato dell'arte nell'anno 2010.

Analog Devices AD1871

Si tratta di un convertitore Sigma-Delta Multibit con oversampling 64x a 96 Khz.

- **Diagramma funzionale**



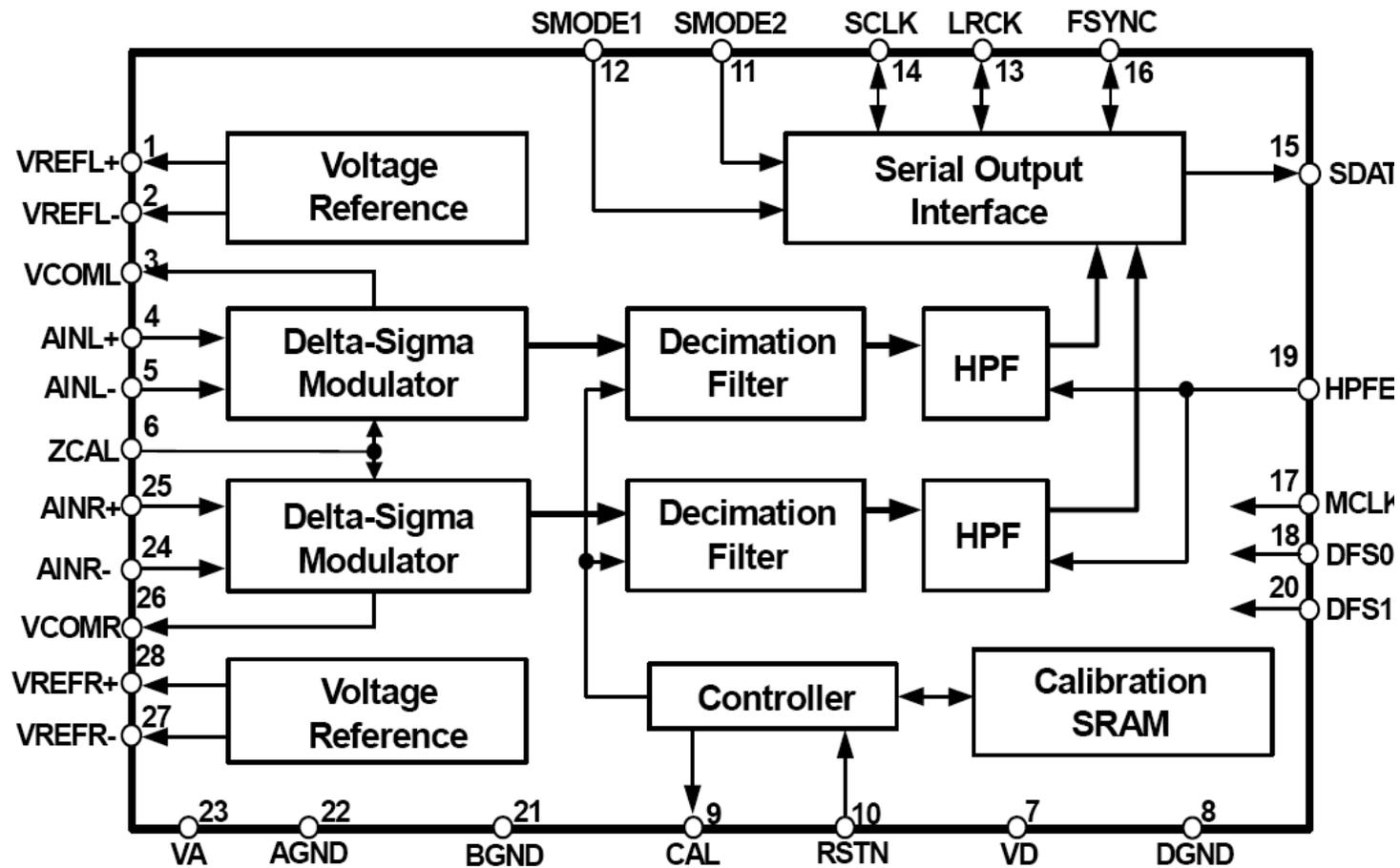
- **Specifiche**

Frequenza di campionamento	fino a 96 KHz
Bit in uscita	24
Gamma Dinamica	min 98 dB
THD+N a -0.5 dB	85 dB
THD+N a -20db	103 dB

Asahi Kasei Microdevices AK5394A

Si tratta di un convertitore Sigma-Delta Multibit con oversampling 32x a 192 KHz.

- Diagramma funzionale



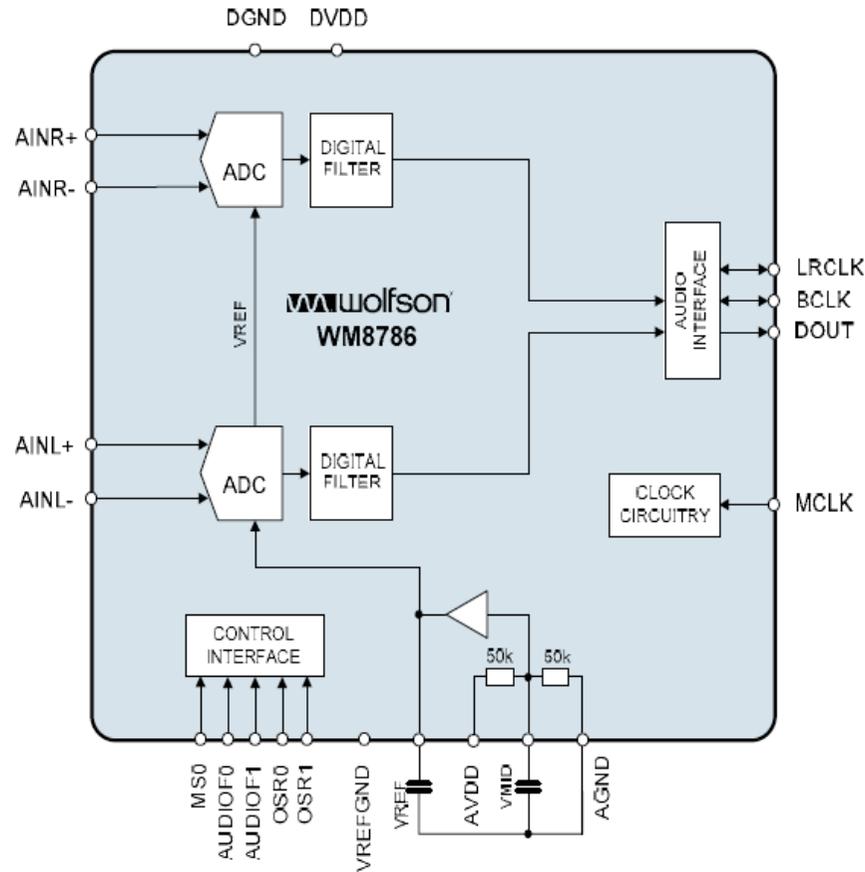
- Specifiche

Frequenza di campionamento	fino a 192 Khz
Bit in uscita	24
Gamma Dinamica (pesato A)	min 117 dB
THD+N a -1 dB @ 192 Khz	94 dB
THD+N a -20db	92 dB

Wolfson WM8786

Si tratta di un convertitore Sigma-Delta Multibit con oversampling 32x a 192 KHz.

- **Diagramma funzionale**



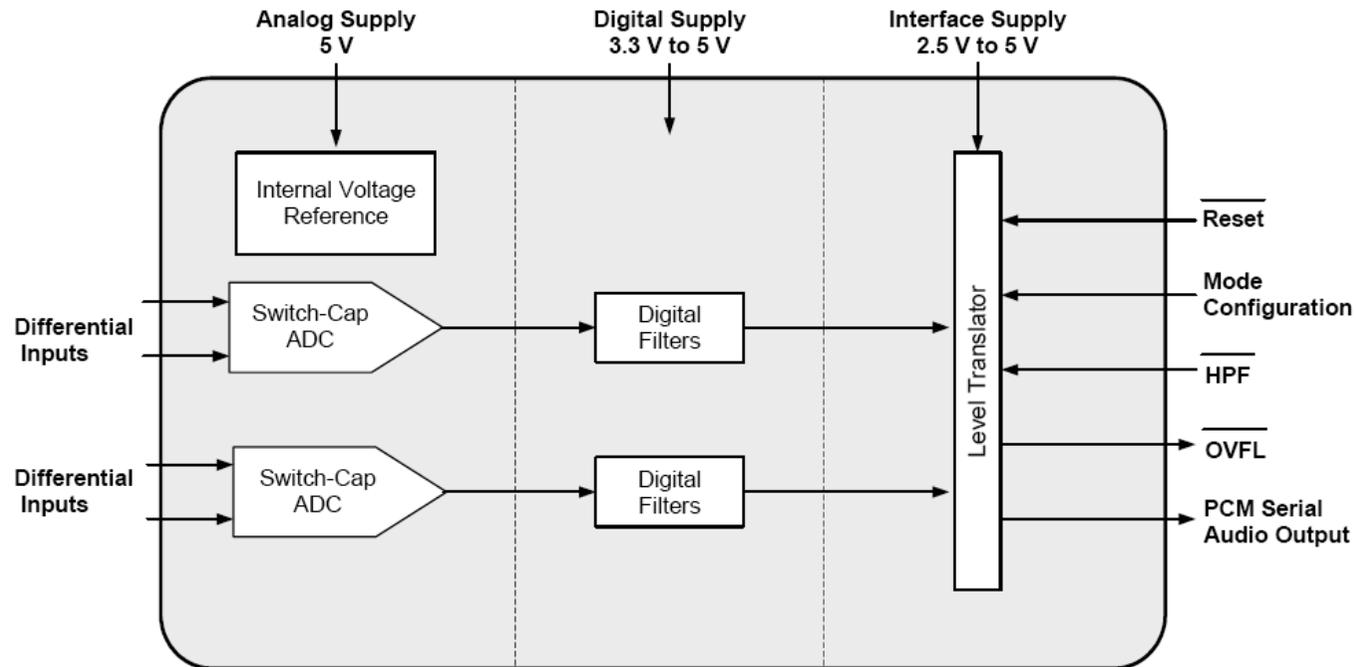
- **Specifiche**

Frequenza di campionamento	fino a 192 KHz
Bit in uscita	da 16 a 32
Gamma Dinamica	min 102 dB
THD+N a -1 dB @ 192 KHz	102 dB

Cirrus Logic CS5381

Si tratta di un convertitore Sigma-Delta (del quinto ordine) Multibit con oversampling 32x a 192 KHz.

- **Diagramma funzionale**



- **Specifiche**

Frequenza di campionamento	fino a 192 KHz
Bit in uscita	24
Gamma Dinamica (pesato A)	min 111 dB
THD+N a -1 dB @ 192 KHz	107 dB
THD+N a -20db	97 dB

Conclusioni

Da quanto visto si possono trarre le seguenti conclusioni.

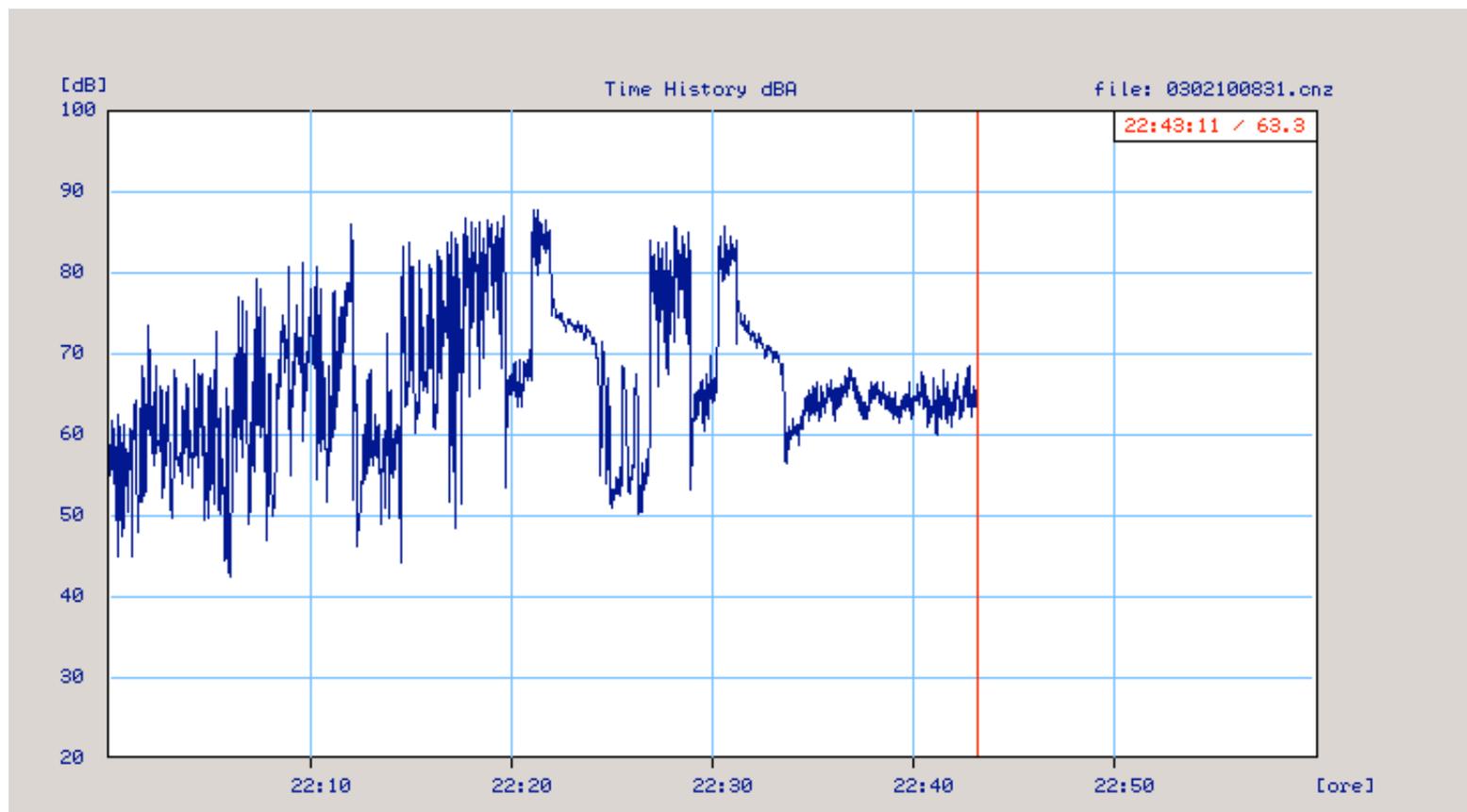
Delle varie tecniche per la digitalizzazione solo una veloce conversione a pochi bit seguita da un **sovracampionamento** estremo e da più stadi di **noise shaping** (tecnica Sigma-Delta) può garantire le migliori prestazioni.

Ciò nonostante i limiti fisici intrinseci difficilmente potranno permettere di superare i 20 bit di risoluzione reale, ovvero 120 dB di **gamma dinamica**.

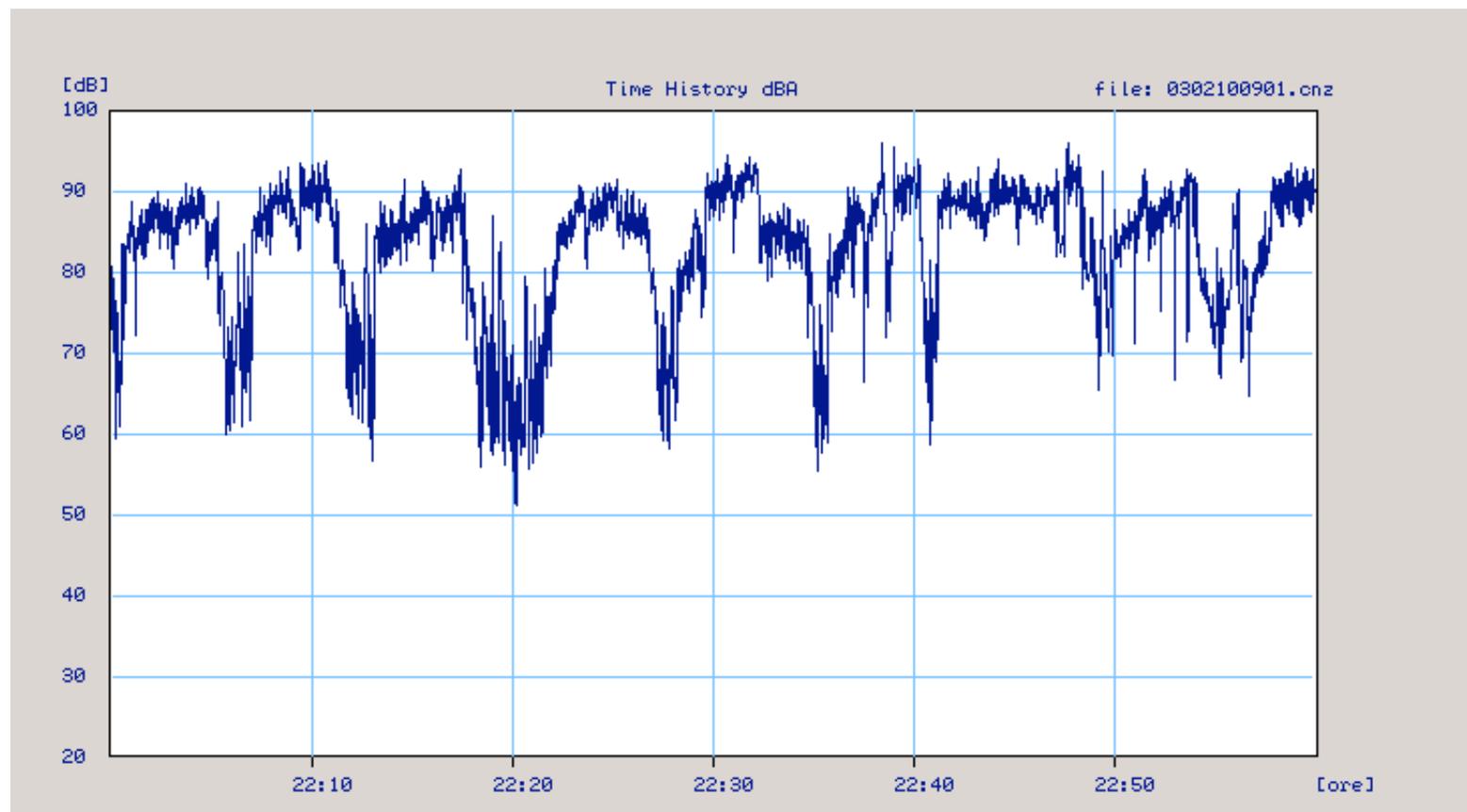
Per avere un'idea del significato di questo valore bisogna pensare la che la gamma dinamica di un sistema analogico di lettura di LP non supera in nessun caso i 70 dB.

D'altra parte raramente la riproduzione di eventi musicali richiede una gamma dinamica superiore a questi valori.

Nella figura seguente si vede l'andamento dei livelli di un monitoraggio di un concerto all'aperto di musica classica **Carmina Burana** di **Orff** per coro e orchestra. Microfono omnidirezionale, a 25 metri dal palco, all'aperto (la location è l'Arena Giardino di Cremona), praticamente a metà della tribuna superiore. Dalle 22:31 alle 22:34 si ripete l'andamento dei livelli registrato dalle 22:22 alle 22:25 circa: è stato eseguito il bis di "O Fortuna". Dalle 22:34 a chiusura monitoraggio, applausi. La ripresa è stata effettuata da un tecnico di grande esperienza e i dati sono pubblicati con il suo consenso.



Il grafico che seguente invece mostra con le stesse modalità una parte di un concerto di **Elio e le Storie Tese** tenuto pochi giorni dopo nello stesso luogo.



Ed ecco *in corsivo* i commenti del tecnico (**Gianpiero Majandi**).

Cominciamo con il dire che i livelli che si vedono sono pesati A, quindi con il bilanciamento tonale che ho riscontrato sul concerto amplificato (Elio) vanno incrementati di almeno 20 (o forse qualcosa di più) dB per avere il livello senza pesatura (che è quello che il sistema audio deve essere in grado di emettere). Da ciò deriva un livello massimo intorno ai 115 dB (slow), il che in costante di tempo Impulse vuol dire almeno 10 dB in più. Quindi 125 dB (dei quali la maggior parte a bassa e bassissima frequenza). Il livello di rumore minimo è intorno ai 55 dBA, con un incremento inferiore riportando la curva in lineare (il rumore di fondo con prevalenza

traffico ha parecchio contribuito a bassa frequenza, ma non quanto la musica: consideriamo un incremento intorno a 15 dB, con relativamente bassa capacità di mascheramento sul segnale musicale): diciamo 70 dB di fondo: $125 \text{ dB} - 70 \text{ dB} = 55 \text{ dB}$ (ragioniamo sui livelli in lineare, perché se dobbiamo riportarci a dei livelli per un sistema elettroacustico dobbiamo andare a parare lì, cioè a quel che il sistema deve poter fare).

Quindi per registrare anche un evento live la dinamiche raggiungibili con il digitale sono sovrabbondanti. Diverso è il discorso se in casa vogliamo riprodurre eventi live con lo stesso impatto del concerto originale.

Se la dinamica è relativamente ridotta, i livelli massimi non lo sono per niente. Rifacendo il calcolo con i livelli di rumore di fondo "da casa", entro le cui mura possiamo contare su livelli di rumore di fondo inferiore (50 dB in pesatura lineare sono un valore più che ragionevole), vuol dire che per ottenere la medesima dinamica ci serve un sistema in grado di erogare 105 dB nei picchi, soprattutto a bassa e bassissima frequenza.

Per ottenere la medesima dinamica (ma nemmeno per idea la medesima sensazione e il medesimo impatto, per ottenere i quali occorre generare gli stessi livelli del live) con il 90% degli impianti domestici si sfondano i woofer (ammesso che l'amplificazione sia abbastanza potente da poterlo fare, il che quasi sempre non è).

Si noti infine che la stragrande maggioranza delle registrazioni è fortemente compressa per permetterne una fruizione mediamente accettabile in casa, in auto e sui mezzi pubblici.