

# Lezione 15

## Sommario

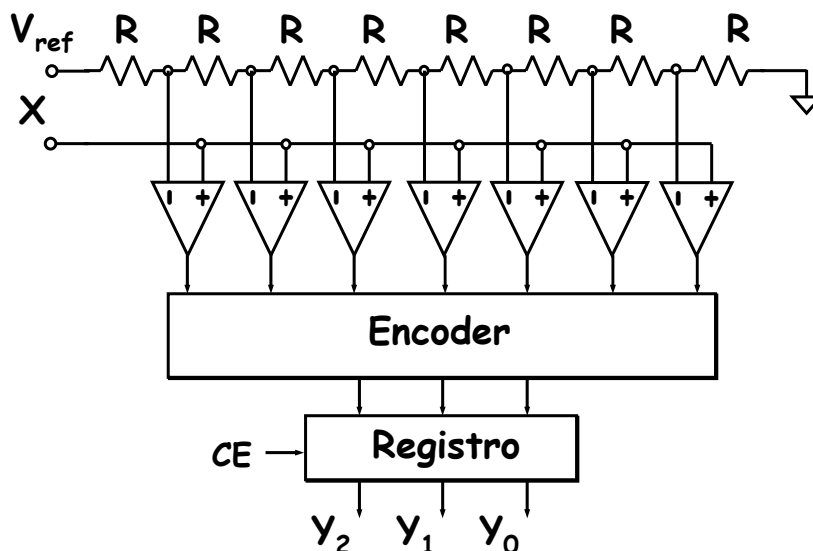
- Convertitore A/D di tipo Flash
- Convertitore A/D a gradinata
- Convertitore A/D a rampa
- Convertitore A/D ad approssimazioni successive (SAR)
- Convertitore A/D di tipo Sigma-Delta
- Esempi di convertitori A/D presenti a bordo di  $\mu$ C e DSP.

# Lezione 15

## Materiale di riferimento

1. W. Kleitz, "Digital and microprocessor fundamentals", Pearson Education, 2003.
2. D. F. Hoeschele, "Analog to digital to analog conversion techniques", Wiley and Sons, 1994.
3. B. Black, "Analog-to-Digital Converter Architectures and Choices for System Design", Analog Dialogue 33-8, 1999, disponibile sul sito del corso in formato pdf.

## ADC di tipo Flash



Simone Buso - Microcontrollori e DSP - Lezione 15

3

## ADC di tipo Flash

**Questo schema è il più veloce possibile. I bit della parola di uscita si formano in parallelo.**

**All'ingresso è presente un partitore resistivo composto da  $2^n$  resistenze uguali. Una schiera di  $2^n - 1$  comparatori realizza una codifica di tipo "termometrico" del segnale X.**

**Un encoder digitale (multiplexer) traduce la codifica termometrica nella sua equivalente rappresentazione binaria.**

**I tempi di conversione possono arrivare a valori dell'ordine di pochi nanosecondi (1 Gs).**

Simone Buso - Microcontrollori e DSP - Lezione 15

4

## ADC di tipo Flash

L'impiego di area di silicio per questo tipo di ADC è molto esteso. Infatti è richiesto un numero molto alto di resistenze e comparatori (255 per soli 8 bit).

Ciò rende la soluzione molto costosa. Anche la dissipazione di potenza diventa rapidamente molto elevata al crescere dei bit.

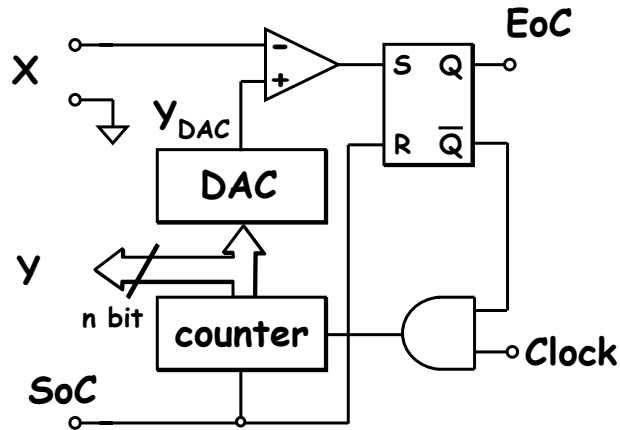
Il circuito è molto sensibile alle correnti di bias e di offset dei comparatori, che perturbano il funzionamento del partitore di ingresso (non linearità).

## ADC di tipo Flash

L'offset di tensione dei comparatori è il principale fattore che limita la linearità del convertitore, arrivando a provocare in alcuni casi fenomeni di missing code. L'effetto è tanto più difficile da controllare quanto più è elevato il numero dei bit.

L'ADC di tipo flash viene quindi usato solo per conversioni con numero di bit relativamente basso ( $< 10$ ) e dove sia richiesta una velocità di conversione molto elevata ( $f_c > 100 \text{ MHz}$ ).

## ADC a gradinata



**Il convertitore usa un DAC in retroazione attraverso un comparatore analogico.**

Simone Buso - Microcontrollori e DSP - Lezione 15

7

## ADC a gradinata

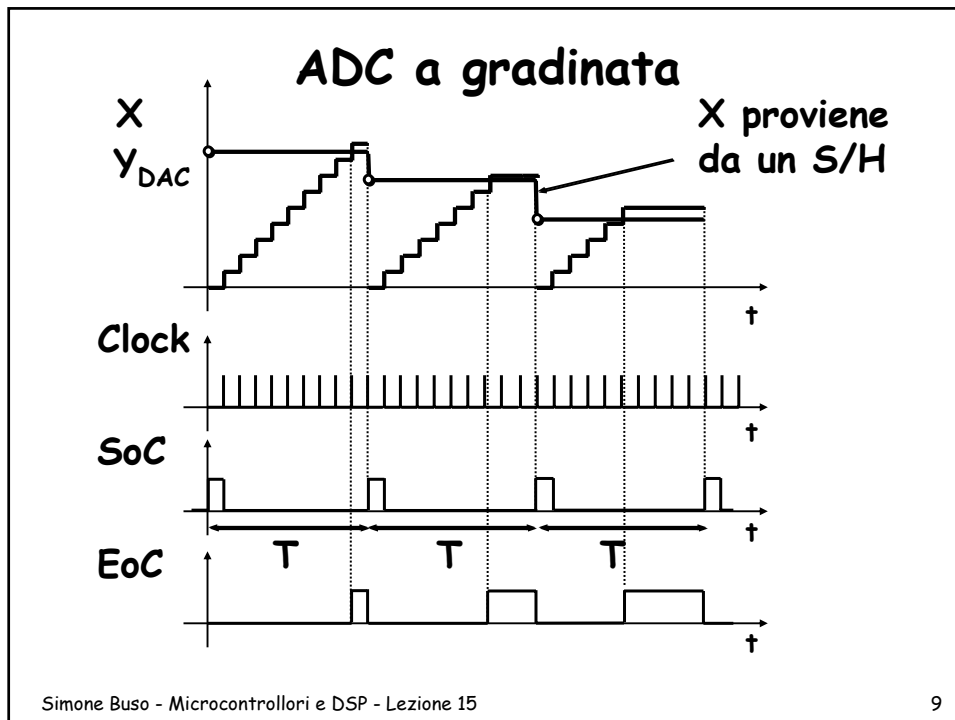
Nell'ADC a gradinata un convertitore DAC è pilotato da un circuito contatore binario. La sua uscita  $Y_{DAC}$  ha quindi un caratteristico andamento, da cui deriva il nome del convertitore.

L'uscita del DAC è continuamente confrontata con il segnale X di ingresso da un comparatore analogico. Quando l'uscita del DAC supera X il conteggio si arresta (il flip-flop cambia stato).

L'ingresso del DAC in quel momento rappresenta il risultato della conversione.

Simone Buso - Microcontrollori e DSP - Lezione 15

8



### ADC a gradinata

Questo schema di ADC, come tutti quelli che impiegano un DAC in retroazione, ha una precisione limitata da quella del DAC stesso.

Inoltre, anche il comparatore deve essere preciso: in particolare, il suo offset di tensione deve essere in modulo  $< \frac{1}{2}$  LSB.

Il tempo di conversione dipende dalla tensione di ingresso. Il dato viene prodotto con un ritardo massimo pari a  $2^n$  periodi di clock, quando  $X = \text{FSR}$ .

La massima frequenza del clock è limitata dal DAC. Si tratta di un ADC piuttosto lento.

## ADC a gradinata

**Esempio:**

un ADC a gradinata a 10 bit ha frequenza di clock  $F_{clk}$  di 10 MHz. Determinare il valore della frequenza limite di Nyquist.

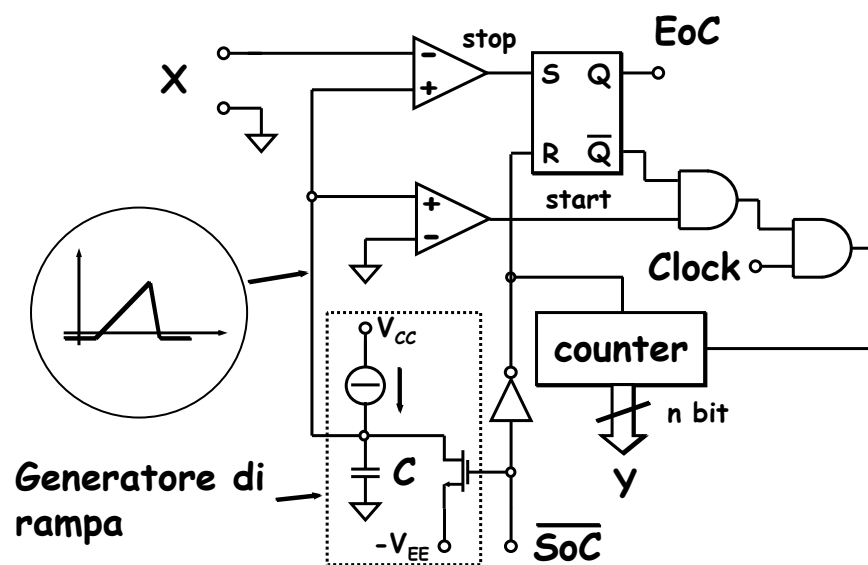
$$T_{C_{MAX}} = 1024 \cdot 1/F_{clk} = 102.4 \mu s$$

$$F_C = 1/T_{C_{MAX}} = 9.77 \text{ kHz}$$

$$F_{Nyq} = F_C/2 = 4.88 \text{ kHz}$$

**Attenzione:**  $F_{clk} = 10 \text{ MHz}$  significa che in soli 100 ns il DAC, il contatore e il comparatore devono assestare le proprie uscite.

## ADC a rampa



## ADC a rampa

Il convertitore a rampa funziona in modo simile a quello a gradinata. Usa un generatore di rampa analogico. Negli intervalli di tempo in cui il segnale di rampa è  $> 0$  e  $< X$ , un contatore viene incrementato da un clock.

Il suo valore finale è quindi proporzionale alla tensione presente in ingresso.

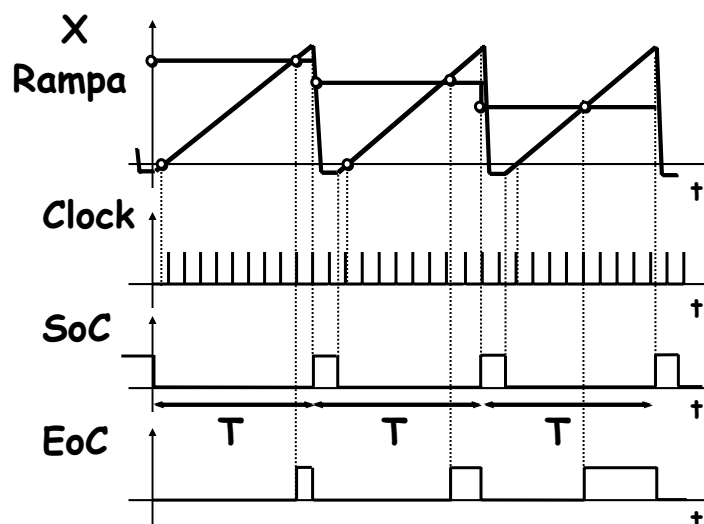
Il circuito è piuttosto sensibile alle non idealità dei componenti del generatore di rampa (C, generatore di corrente, MOSFET).

Esistono anche architetture a doppia rampa.

Simone Buso - Microcontrollori e DSP - Lezione 15

13

## ADC a rampa



Simone Buso - Microcontrollori e DSP - Lezione 15

14

## ADC a rampa

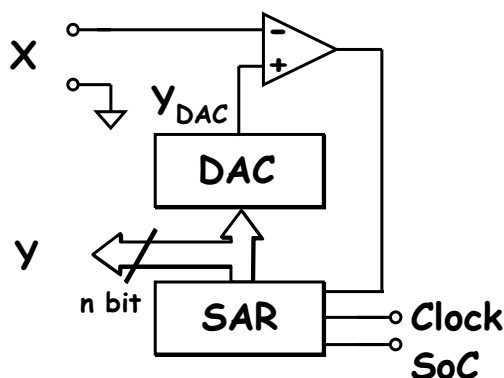
Tra gli accorgimenti necessari per un buon funzionamento del convertitore si nota la necessità di far partire la rampa da una tensione leggermente negativa. Questo evita problemi legati agli offset dei comparatori.

Il vantaggio del circuito è l'eliminazione del DAC, il che riduce la complessità.

Il tempo di conversione massimo è pari a  $2^n$  periodi di clock, come nel caso precedente.

In generale, il periodo di conversione ha una durata che dipende dal segnale X.

## ADC con SAR

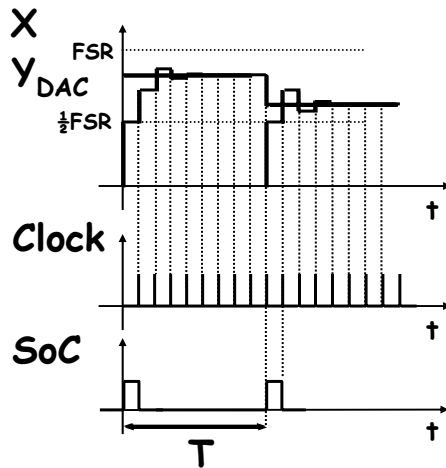


Il DAC in retroazione è pilotato da un circuito logico ad hoc detto registro ad approssimazioni successive (SAR). La logica è quella della ricerca binaria del codice Y.

Il numero di cicli richiesto per la conversione è pari al più al numero di bit n dell'ADC +1.



## ADC con SAR



Inizialmente il SAR imposta un valore del DAC pari a  $\frac{1}{2} FSR$ , settando il MSB di  $Y$ .

Se il comparatore segnala che  $X > Y_{DAC}$  il bit viene confermato.

Altrimenti viene posto a 0.

**Il SAR procede quindi iterativamente testando tutti i bit della parola di  $Y$  nello stesso modo.**

Simone Buso - Microcontrollori e DSP - Lezione 15

17

## ADC con SAR

**Esempio:**

un ADC ad approssimazioni successive a 10 bit ha frequenza di clock  $F_{clk}$  di 10 MHz.

Determinare il valore della frequenza limite di Nyquist.

$$T_{CMAX} = 11 \cdot 1/F_{clk} = 1.1 \mu s$$

$$F_C = 1/T_{CMAX} = 909 \text{ kHz}$$

$$F_{Nyq} = F_C/2 = 455 \text{ kHz}$$

**Le caratteristiche richieste al DAC sono analoghe a quelle per l'ADC a gradinata, ma  $F_{Nyq}$  è 100 volte maggiore!**

Simone Buso - Microcontrollori e DSP - Lezione 15

18

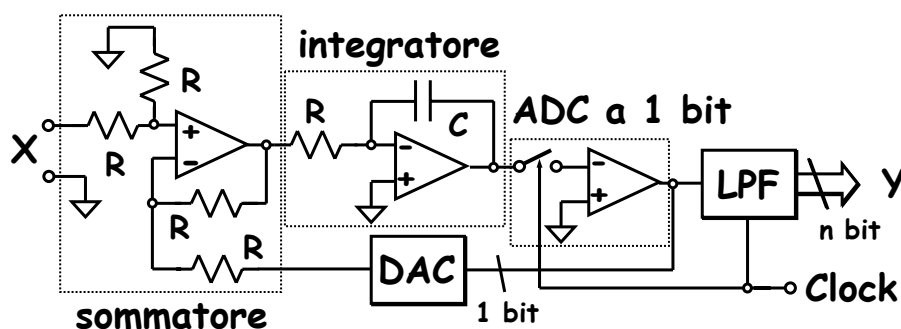
## ADC con SAR

Il convertitore ad approssimazioni successive è molto usato, sia come dispositivo stand-alone, sia come periferica integrata all'interno di  $\mu C$  o DSP.

Rappresenta un buon compromesso tra velocità di conversione e complessità del circuito.

La velocità di conversione è limitata solo dai tempi di assestamento dei segnali di controllo nel SAR e dell'uscita del comparatore. Sono comuni frequenze di conversione dell'ordine di qualche MHz.

## ADC di tipo Sigma-Delta



L'ADC di tipo sigma-delta usa un ADC a 1 bit (che di fatto è un comparatore analogico) e un DAC in retroazione sempre con un solo 1 bit.

## **ADC di tipo Sigma-Delta**

**La presenza di un anello di retroazione fa sì che il sistema si porti in equilibrio solo quando la tensione in ingresso all'integratore è nulla in media.**

**Questo accade quando la sequenza di bit prodotta dal ADC ha media pari alla tensione presente in ingresso  $X$ .**

**Il filtro passa basso digitale in uscita estrae il valore medio della sequenza e lo rende disponibile come parola di uscita a  $n$  bit.**

**Il numero di bit finale può essere anche relativamente elevato (fino a 20).**

Simone Buso - Microcontrollori e DSP - Lezione 15

21

## **ADC di tipo Sigma-Delta**

**Il convertitore sigma delta sfrutta il principio del sovracampionamento. Il convertitore ADC interno produce una sequenza di bit a frequenza molto alta, molte volte maggiore della banda del segnale di ingresso.**

**Il fattore di sovracampionamento può variare da alcune centinaia ad alcune migliaia. I convertitori sigma delta lavorano quindi a frequenze molto elevate (centinaia di MHz).**

**Questo permette di ottenere ottimi rapporti segnale rumore, anche se il campionatore interno è solo a 1 bit.**

Simone Buso - Microcontrollori e DSP - Lezione 15

22

## ADC di tipo Sigma-Delta

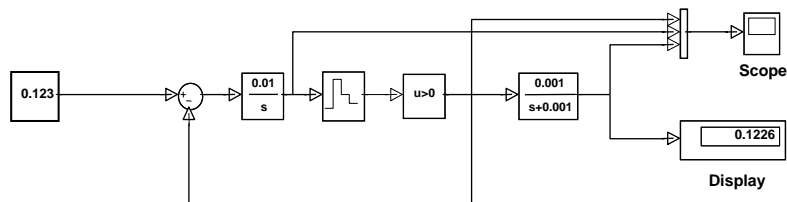
Il recupero dell'informazione associata al segnale richiede un filtro passa basso (LPF), che viene realizzato in modo digitale e integrato nel convertitore stesso.

In questo modo la gran parte (fino al 90%) dell'area di silicio richiesta dall'ADC è occupata da circuiti di tipo digitale.

Inoltre, i componenti analogici impiegati nel convertitore possono avere caratteristiche non molto spinte, il che riduce sensibilmente il costo di questo tipo di ADC.

## ADC di tipo Sigma-Delta

Per meglio illustrare il principio di funzionamento del convertitore A/D sigma delta è possibile ricorrere alla simulazione.



**Modello semplificato del convertitore sigma delta ottenuto con Simulink.**

## **ADC di tipo Sigma-Delta**

**Negli ADC sigma delta si riduce la complessità delle parti analogiche, complicando le parti digitali per ottenere le prestazioni volute.**

**I circuiti digitali sono però meno ingombranti e quindi più economici da produrre.**

**Anche con filtri digitali di modesta complessità è possibile sintetizzare un numero di bit finale piuttosto alto, ricorrendo a livelli elevati di sovracampionamento (es: 10 bit con fattori di sovracampionamento dell'ordine del migliaio).**

**Le frequenze di conversione possono arrivare a qualche centinaio di kHz.**

Simone Buso - Microcontrollori e DSP - Lezione 15

25

## **ADC multi stadio con pipeline**

**Recentemente, alle architetture di base viste finora si vanno affiancando architetture più complesse, di tipo multi-stadio.**

**Il convertitore viene cioè costruito collegando in serie o in parallelo strutture semplici, i.e. a pochi bit, realizzate secondo gli schemi visti.**

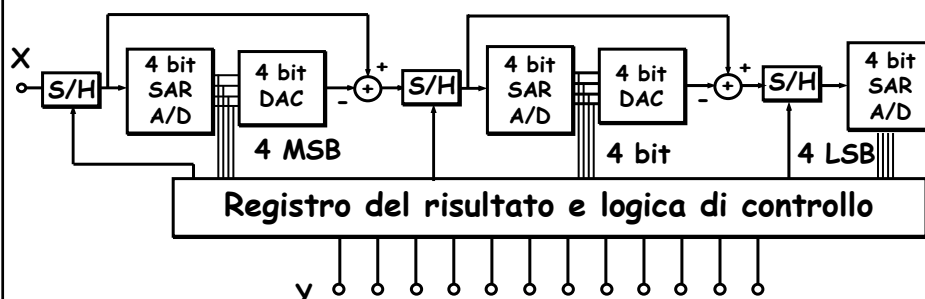
**Particolarmente usate sono le organizzazioni di tipo flash e quelle SAR.**

**Nelle combinazioni in serie vengono spesso usate pipeline, per abbreviare i tempi di conversione.**

Simone Buso - Microcontrollori e DSP - Lezione 15

26

## ADC multi stadio con pipeline



**Esempio di convertitore A/D a 12 bit di tipo SAR ottenuto con una pipeline a 3 stadi e 3 ADC a 4 bit.**

Simone Buso - Microcontrollori e DSP - Lezione 15

27

## ADC multi stadio con pipeline

**Un ADC a pipeline scompone la conversione di un campione in fasi successive (e.g. 3).**

**Ad ogni inizio conversione il primo stadio comincia a produrre i 4 MSB del nuovo dato.**

**Simultaneamente, lo stadio successivo converte i bit intermedi del campione acquisito al passo precedente, mentre l'ultimo stadio converte gli LSB del campione acquisito due passi prima.**

**Trascurando i ritardi dei blocchi S/H, l'ADC completa la conversione di un dato in 1/3 del tempo richiesto da un SAR a 12 bit.**

Simone Buso - Microcontrollori e DSP - Lezione 15

28

## ADC multi stadio con pipeline

Rispetto ad un ADC SAR a 12 bit, lo schema a pipeline comporta un moderato incremento di complessità (costo) perché richiede in più solo due S/H e un po' di logica di controllo (che costa molto poco).

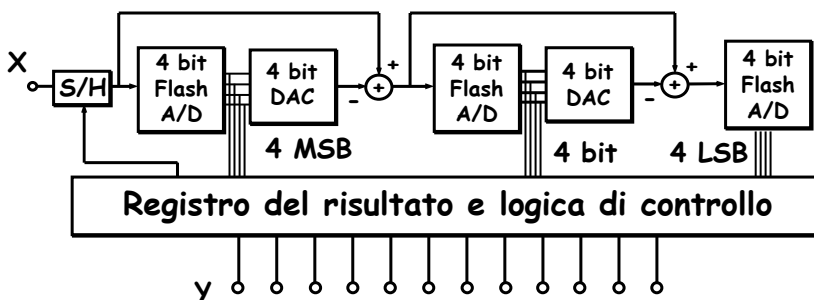
**Offre, in compenso, un tempo di conversione che è mediamente pari a  $1/3$  della soluzione senza pipeline (la frequenza di Nyquist quindi triplica).**

Come tutti i sistemi a pipeline, funziona bene solo se viene alimentato con continuità, cosa che comunque non è difficile da ottenere.

Simone Buso - Microcontrollori e DSP - Lezione 15

29

## ADC multi stadio di tipo Flash



### Esempio di convertitore A/D a 12 bit di tipo Flash ottenuto con 3 ADC Flash a 4 bit.

**Attenzione: non è uno schema a pipeline, le 3 unità lavorano in parallelo sullo stesso dato.**

Simone Buso - Microcontrollori e DSP - Lezione 15

30

## **ADC multi stadio di tipo Flash**

**Sebbene le 3 unità Flash operino insieme sullo stesso dato, i tempi di conversione di una soluzione multi-stadio sono sempre maggiori di quelli di una soluzione a singolo stadio (a causa dei ritardi nella catena).**

**Tuttavia, i tempi rimangono in assoluto molto bassi e il risparmio di componenti analogici (quindi di area, di potenza consumata e di costo) è molto consistente.**

**Ad esempio, il circuito a 3 stadi con 12 bit richiede solo 45 comparatori analogici, contro i 4095 della soluzione a stadio singolo!**

Simone Buso - Microcontrollori e DSP - Lezione 15

31

## **ADC multi stadio di tipo Flash**

**Recentemente, si stanno diffondendo soluzioni di tipo Flash multi stadio con pipeline, simili a quelle discusse nel caso degli ADC SAR.**

**L'uso delle pipeline permette di rilassare le specifiche richieste alle componenti analogiche delle singole unità e, come abbiamo visto, introduce un aggravio di costo relativamente piccolo (per l'aggiunta dei S/H e della logica di controllo).**

**Questi convertitori garantiscono frequenze di conversione comunque molto elevate, dell'ordine di alcune decine di MHz.**

Simone Buso - Microcontrollori e DSP - Lezione 15

32



# Esempio: Philips LP2129

Philips Semiconductors

Preliminary User Manual

ARM-based Microcontroller

LPC2119/2129/2194/2292/2294

## 17. A/D CONVERTER

### FEATURES

- 10 bit successive approximation analog to digital converter.
- Input multiplexing among 4 pins (LPC2119/2129/2194) or 8 pins (LPC2292/2294)
- Power down mode
- Measurement range 0 to 3 V
- 10 bit conversion time  $\approx 2.44 \mu\text{s}$
- Burst conversion mode for single or multiple inputs
- Optional conversion on transition on input pin or Timer Match signal

**ADC SAR,  
10 bit,  
400 ks/s.**

### DESCRIPTION

Basic clocking for the A/D converter is provided by the VPB clock. A programmable divider is included to scale this clock to the 4.5 MHz (max) clock needed by the successive approximation process. A fully accurate conversion requires 11 of these clocks.

### PIN DESCRIPTIONS

Table 172: A/D Pin Description

Pin Name	Type	Pin Description
Ain7:0	Input	<b>Analog Inputs.</b> The A/D converter cell can measure the voltage on any of these 8 input signals, but the 64-pin packages restrict the choice to Ain3:0. Note that these analog inputs are always connected to their pins, even if the Pin Multiplexing Register assigns them to port pins. A simple self-test of the A/D Converter can be done by driving these pins as port outputs.
V <sub>3A</sub> , V <sub>SSA</sub>	Power	<b>Analog Power and Ground.</b> These should be nominally the same voltages as V <sub>3</sub> and V <sub>SSD</sub> , but should be isolated to minimize noise and error. The VrefP and VrefN signals of the cell are internally connected to these pins as well.

# Esempio: Microchip dsPIC30F

## dsPIC30F

### 20.0 10-BIT HIGH SPEED ANALOG-TO-DIGITAL CONVERTER (A/D) MODULE

The 10-bit high-speed analog-to-digital converter (A/D) allows conversion of an analog input signal to a corresponding 10-bit digital number. This module is based on a Successive Approximation Register (SAR) architecture, and provides a maximum sampling rate of 500 ksp/s. The A/D module has up to 16 analog inputs, which are multiplexed into four sample and hold amplifiers. The output of the sample and hold is the input into the converter, which generates the result. The analog reference voltages are software selectable to either the device supply voltage (AVDD/AVSS) or the voltage level on the (VREF+/VREF-) pin. The A/D converter has a unique feature of being able to operate while the device is in SLEEP mode.

The A/D module has six 16-bit registers.

- A/D Control Register1 (ADCON1)
- A/D Control Register2 (ADCON2)
- A/D Control Register3 (ADCON3)
- A/D Input Select Register (ADCHS)
- A/D Port Configuration Register (ADPCFG)
- A/D Input Scan Selection Register (ADCSSL)

The ADCON1, ADCON2 and ADCON3 registers control the operation of the A/D module. The ADCHS register selects the input channels to be converted. The ADPCFG register configures the port pins as analog inputs or as digital I/O. The ADCSSL register selects inputs for scanning.

**Note:** The SSRC<2:0>, ASAM, SMP1<3:0>, BUFM and ALTS bits, as well as the ADCON3 and ADCSSL registers, must not be written to while ADON = 1. This would lead to indeterminate results.

The block diagram of the A/D module is shown in Figure 20-1.

**ADC SAR,  
10 bit,  
500 ks/s**

## Esempio: Infineon XC167



Preliminary

### 3.10 A/D Converter

**ADC SAR,  
10 bit,  
390 ks/s**

**XC167  
Derivatives**

**Functional Description**

For analog signal measurement, a 10-bit A/D converter with 16 multiplexed input channels and a sample and hold circuit has been integrated on-chip. It uses the method of successive approximation. The sample time (for loading the capacitors) and the conversion time is programmable (in two modes) and can thus be adjusted to the external circuitry. The A/D converter can also operate in 8-bit conversion mode, where the conversion time is further reduced.

Overrun error detection/protection is provided for the conversion result register (ADDAT): either an interrupt request will be generated when the result of a previous conversion has not been read from the result register at the time the next conversion is complete, or the next conversion is suspended in such a case until the previous result has been read.

For applications which require less analog input channels, the remaining channel inputs can be used as digital input port pins.

## Esempio: Intel 8XC196MC



8XC196MC

**ADC SAR,  
10 bit,  
100 ks/s**

### 10-BIT MODE A/D OPERATING CONDITIONS

Symbol	Description	Min	Max	Units
T <sub>A</sub>	Ambient Temperature	-40	+85	°C
V <sub>CC</sub>	Digital Supply Voltage	4.50	5.50	V
V <sub>REF</sub>	Analog Supply Voltage	4.00	5.50	V <sup>(1)</sup>
T <sub>SAM</sub>	Sample Time	1.0		μs <sup>(2)</sup>
T <sub>CONV</sub>	Conversion Time	10.0	20.0	μs <sup>(2)</sup>
F <sub>OSC</sub>	Oscillator Frequency	8.0	16.0	MHz

#### NOTES:

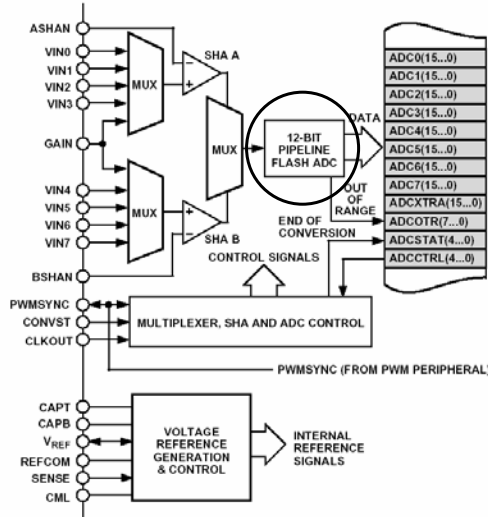
1. AVDD and VDD should nominally be at the same potential.  
2. The value of AD\_TIME is selected to meet these specifications.

### 10-BIT MODE A/D CHARACTERISTICS (Over Specified Operating Conditions)

Parameter	Typical <sup>(1)</sup>	Min	Max	Units*
Resolution		1024	1024	Levels Bits
Absolute Error		0	±4	LSBs
Full Scale Error	0.25 ±0.5			LSBs
Zero Offset Error	0.25 ±0.5			LSBs
Non-Linearity	1.0 ±2.0		±4	LSBs
Differential Non-Linearity		> -1	+2	LSBs
Channel-to-Channel Matching	±0.1	0	±1.0	LSBs
Repeatability	±0.25	0		LSBs
Temperature Coefficients:				
Offset	0.009			LSB/°C
Full Scale	0.009			LSB/°C
Differential Non-Linearity	0.009			LSB/°C

**Caratteristiche  
dell'ADC.**

## Esempio: Analog Devices ADMC401



**ADC SAR,  
12 bit ,  
500 ks/s**

**Schema a blocchi  
dell'ADC del DSP  
ADMC 401 di  
Analog Devices.**

Simone Buso - Microcontrollori e DSP - Lezione 15

37

## Esempio: Microchip PIC18FXX2

### PIC18FXX2

#### 17.0 COMPATIBLE 10-BIT ANALOG-TO-DIGITAL CONVERTER (A/D) MODULE

The Analog-to-Digital (A/D) converter module has five inputs for the PIC18F2X2 devices and eight for the PIC18F4X2 devices. This module has the ADCON0 and ADCON1 register definitions that are compatible with the mid-range A/D module.

The A/D allows conversion of an analog input signal to a corresponding 10-bit digital number.

The A/D module has four registers. These registers are:

- A/D Result High Register (ADRESH)
- A/D Result Low Register (ADRESL)
- A/D Control Register 0 (ADCON0)
- A/D Control Register 1 (ADCON1)

The ADCON0 register, shown in Register 17-1, controls the operation of the A/D module. The ADCON1 register, shown in Register 17-2, configures the functions of the port pins.

#### REGISTER 17-1: ADCON0 REGISTER

R/W-0	R/W-0	R/W-0	R/W-0	R/W-0	R/W-0	U-0	R/W-0
ADCS1	ADCS0	CHS2	CHS1	CHS0	GO/DONE	—	ADON
bit 7							bit 0

**ADC a 10 bit, 50 ks/s, tipo non precisato**

Simone Buso - Microcontrollori e DSP - Lezione 15

38

## **Uso dei convertitori A/D**

**Non sempre i costruttori forniscono una caratterizzazione completa dei convertitori A/D presenti a bordo di mC o DSP.**

**Spesso è necessario provvedere ad una analisi preliminare delle prestazioni del convertitore, valutandone la linearità, gli errori di offset, di guadagno... Questa fase è molto importante per le applicazioni di signal processing o controllo real time.**

**E' essenziale che il set-up di test che si usa sia adeguato alla precisione richiesta alle misure.**

## **Uso dei convertitori A/D**

**Il campionamento e la conversione A/D di grandezze analogiche consentita dalle unità ADC presenti a bordo di microcontrollori e DSP ampliano di molto le possibili applicazioni.**

**Diventa infatti possibile realizzare:**

- 1. misuratori di grandezze analogiche (temperatura, pressione, concentrazione di gas, ...);**
- 2. sistemi di controllo digitale a catena chiusa per la regolazione delle grandezze analogiche trasdotte.**

## **Uso dei convertitori A/D**

**Il primo ambito applicativo richiede di norma la realizzazione di circuiti analogici per il condizionamento del segnale e la realizzazione di filtri numerici.**

**Nel secondo ambito, invece, si aggiunge a quanto detto sopra anche la progettazione di regolatori a tempo discreto per i sistemi di interesse.**

**Le questioni di ordine teorico e pratico discusse nelle lezioni 12 e 13 giocano un ruolo determinante in entrambi i casi.**