Versione N° 1.1

LaurTec

Input e Output

Come collegare tra loro due sistemi elettronici

Autore : *Mauro Laurenti*

ID: AN2008-IT

Copyright © 2025 Mauro Laurenti

Informativa

Come prescritto dall'art. 1, comma 1, della legge 21 maggio 2004 n.128, l'autore avvisa di aver assolto, per la seguente opera dell'ingegno, a tutti gli obblighi della legge 22 Aprile del 1941 n. 633, sulla tutela del diritto d'autore.
Tutti i diritti di questa opera sono riservati. Ogni riproduzione ed ogni altra forma di diffusione al pubblico dell'opera, o parte di essa, senza un'autorizzazione scritta dell'autore, rappresenta una violazione della legge che tutela il diritto d'autore, in particolare non ne è consentito un utilizzo per trarne profitto.
La mancata osservanza della legge 22 Aprile del 1941 n. 633 è perseguibile con la reclusione o sanzione pecuniaria, come descritto al Titolo III, Capo III, Sezione II.
A norma dell'art. 70 è comunque consentito, per scopi di critica o discussione, il riassunto e la citazione, accompagnati dalla menzione del titolo dell'opera e dal nome dell'autore.

AVVERTENZE

I progetti presentati non hanno la marcatura CE, quindi non possono essere utilizzati per scopi commerciali nella Comunità Economica Europea.

Chiunque decida di far uso delle nozioni riportate nella seguente opera o decida di realizzare i circuiti proposti, è tenuto pertanto a prestare la massima attenzione in osservanza alle normative in vigore sulla sicurezza.
L'autore declina ogni responsabilità per eventuali danni causati a persone, animali o cose derivante dall'utilizzo diretto o indiretto del materiale, dei dispositivi o del software presentati nella seguente opera.
Si fa inoltre presente che quanto riportato viene fornito così com'è, a solo scopo didattico e formativo, senza garanzia alcuna della sua correttezza.

L'autore ringrazia anticipatamente per la segnalazione di ogni errore.

Tutti i marchi citati in quest'opera sono dei rispettivi proprietari.

Indice

Introduzione....4
Analisi delle problematiche....4
Regole da tenere a mente....5
Leggere la documentazione e note applicative....6
Tensione operativa....6
Accensione del sistema, transienti e extra tensioni....7
Progettare con massimi e minimi e dovuti margini....11
Livelli di tensione accettati dagli I/O....13
Variazione della tensione in funzione del carico....15
fan-in e fan-out....18
Sink e source current non sono sempre uguali....19
La corrente di leakage....20
Resistori di pull-up e pull-down ed effetti della corrente di leakage....21
Rise-time e fall-time – specifiche I2C....21
Uscite Open Drain....22
Dissipazione di energia di un'uscita....23
Effetti di carichi induttivi e capacitivi sulle uscite....23
Cosa fare dei pin non usati....24
Conclusioni....25
Bibliografia....26
History....26

Introduzione

Al giorno d'oggi, per accelerare l'introduzione di un prodotto sul mercato, si ricorre frequentemente all'impiego di moduli o sottosistemi preassemblati, che devono semplicemente essere interconnessi. Questo approccio consente di sviluppare sistemi complessi in tempi ridotti, semplificando notevolmente la fase di progettazione. Tuttavia, se da un lato permette un notevole risparmio di tempo, dall'altro introduce sfide significative in termini di integrazione, che richiedono una progettazione accurata per garantire il corretto funzionamento del sistema nel suo insieme.
Analogamente a quanto avviene nell'integrazione di un sistema, anche nella progettazione di uno schema elettrico complesso si fa ampio uso di circuiti integrati che racchiudono al loro interno molteplici funzionalità. Anche in questo contesto, è necessario interconnettere correttamente i vari componenti e assicurarsi che il sistema operi in modo affidabile. Collegare un'uscita a un ingresso può sembrare un'operazione banale, ma, come si vedrà a breve, le problematiche da affrontare e le attenzioni richieste per realizzare un sistema robusto, sono tutt'altro che trascurabili.

Analisi delle problematiche

L'integrazione di sistemi presenta un ostacolo spesso sottovalutato, ma cruciale:

- L'erronea convinzione che tutto sia semplice.

Questa sottovalutazione è una delle principali cause di malfunzionamenti, specialmente quando si lavora con sistemi apparentemente modulari. Nel contesto hobbistico o *maker*, tale leggerezza può facilmente tradursi in un sistema instabile o non funzionante. Ma anche in ambito professionale, non è raro imbattersi in progetti in cui il semplice collegamento tra ingressi e uscite, pur funzionando nella maggior parte dei casi, può causare problemi in condizioni particolari o impreviste.
I progettisti più esperti sanno bene che la robustezza di un sistema nasce da una progettazione accurata, fatta di domande, verifiche e, soprattutto, di un sano "pessimismo ingegneristico". Considerare anche i casi peggiori, per quanto remoti possano sembrare inizialmente, è essenziale per realizzare un sistema davvero affidabile.
Quando si integrano sottosistemi complessi o circuiti integrati avanzati, ci si trova spesso ad affrontare delle "scatole nere": componenti di cui conosciamo solo le funzionalità dichiarate, ma non necessariamente il comportamento in tutti i possibili scenari. In questi casi, la documentazione potrebbe non essere sufficiente a rispondere a tutte le domande progettuali. È quindi fondamentale un'analisi attenta dei collegamenti, valutando accuratamente le implicazioni di ogni connessione.
Ciò che inizialmente può sembrare un collegamento banale tra un'uscita e un ingresso, può rivelarsi un punto critico, soprattutto in assenza di informazioni complete. In queste situazioni, è necessario fare delle valutazioni: analizzare i rischi, considerare l'eventuale sostituzione del componente o l'inserimento di elementi intermedi (buffer, protezioni, adattatori) per mitigare potenziali problemi.
In conclusione, ciò che può apparire semplice a prima vista, come il collegamento tra due pin, richiede in realtà un'attenta analisi. La robustezza e l'affidabilità di un sistema passano proprio da qui.

Regole da tenere a mente

Sebbene ogni progetto e sistema presenti caratteristiche uniche, esistono alcune considerazioni generali che possono essere valide in numerosi contesti di progettazione. Di seguito è riportato un elenco di punti chiave, che saranno approfonditi nei paragrafi successivi. Questa lista non pretende di essere esaustiva, ma vuole rappresentare un utile punto di partenza, stimolando ulteriori domande e valutazioni specifiche che ciascun progetto può richiedere. La lista può servire come *checklist* iniziale o di base, per verificare, con le dovute modifiche, che tutte le considerazioni pertinenti alle esigenze del sistema siano state incluse e verificate.

- Leggere la documentazione e note applicative
- Tensione operativa
- Accensione del sistema, transienti e extra tensioni
- Progettare con massimi e minimi e dovuti margini
- Livelli di tensione accettati dagli I/O
- Variazione della tensione in funzione del carico
- fan-in e fan-out
- Sink e source current non sono sempre uguali.
- Corrente di *leakage*
- Resistori di *pull-up* e *pull-down* ed effetti della corrente di *leakage*
- *Rise-time* e *fall-time* – specifiche I2C
- Uscite Open Drain
- Dissipazione di energia di un'uscita.
- Effetti di carichi induttivi e capacitivi sulle uscite
- Cosa fare dei pin non usati

Leggere la documentazione e note applicative

Per collegare correttamente due sistemi, il primo passo fondamentale è verificare la disponibilità della documentazione tecnica, in particolare del datasheet (scheda tecnica) e, se presenti, delle note applicative. È essenziale che questa documentazione venga letta attentamente e compresa a fondo, poiché costituisce la base per un'integrazione corretta e affidabile tra i componenti. In assenza di documentazione, e qualora siano reperibili solo informazioni sparse online, è opportuno classificare il progetto come hobbistico. In questi casi il sistema potrebbe anche funzionare, ma non è possibile garantirne l'affidabilità.
Senza documentazione idonea è possibile pensare a un semplice progetto come un impianto per l'annaffiatura automatica delle piante durante una vacanza. Tuttavia, non si può avere la certezza che al rientro le piante siano ancora in buone condizioni. L'assenza di documentazione completa rende impossibile rispondere con precisione a molte delle domande progettuali fondamentali, rendendo difficile prendere decisioni consapevoli, se non basandosi su rischi che non possono nemmeno essere quantificabili.
Inoltre, la documentazione tecnica è un elemento essenziale per ottenere la marcatura CE di un prodotto destinato al mercato europeo. È quindi indispensabile scegliere componenti e dispositivi per i quali sia disponibile una documentazione completa, che consenta anche di dimostrare la conformità alla Direttiva 2011/65/UE (RoHS), relativa alla restrizione dell'uso di determinate sostanze pericolose nelle apparecchiature elettriche ed elettroniche.

Tensione operativa

Ogni modulo o circuito integrato (IC) deve essere alimentato con una tensione operativa specifica. Le schede tecniche dei moduli, in particolare, tendono a indicare la tensione di alimentazione in modo semplificato, ad esempio 3.3 V, 5 V o 12 V. Tuttavia, una specifica di questo tipo non è sempre sufficiente per garantire un funzionamento affidabile. È preferibile che vengano indicate anche la tolleranza o il range di tensione accettabile. In generale la precisione richiesta aumenta al diminuire della tensione nominale.
Ad esempio, un modulo alimentato che richieda 1.5V può tollerare variazioni ridotte rispetto a uno da 12 V. Un regolatore di tensione con una tolleranza tipica del ±5%, non è in generale adatto ad alimentare dispositivi come le FPGA o processori, che richiedono sui livelli di tensione 0.9V-1.5V, tolleranze più strette, dell'ordine dell'1%. In particolare l'abbassamento di tensione, richiede spesso correnti elevate, e la risposta ad un transiente, e variazione di tensione, va sommata anche alla tolleranza finale. Gli abbassamenti di tensione derivano dai progressi tecnologici, come l'utilizzo di processi che hanno dimensioni tipiche inferiori a 28nm. Questo se da un lato permette sempre di aumentare la frequenza operativa e diminuire le tensioni operative, richiede sempre più attenzioni.
I circuiti integrati, al contrario dei moduli, sono solitamente accompagnati da specifiche più dettagliate. Nei datasheet di produttori come Texas Instruments, viene chiaramente indicato il range di tensione operativa raccomandato (valori minimo e massimo) e il valore massimo assoluto ("*Absolute Maximum Rating*"), ovvero la tensione oltre la quale il dispositivo può subire danni permanenti. Per esempio, nel datasheet dell'amplificatore operazionale LM358, troviamo una Tabella che riporta i valori sotto:

			MIN	MAX	UNIT
V_S	Supply voltage, V_S= ([V+] – [V–])	LM358B, LM358BA, LM2904B, LM2904BA	3	36	V
		LM158, LM258, LM358, LM158A, LM258A, LM358A, LM2904V	3	30	
		LM2904	3	26	

In particolare sono mostrati i valori raccomandati di tensione operativa: valore minimo e massimo, entro cui il componente funziona in modo ottimale.

La Tabella dei valori massimi assoluti mostra in particolare il valore massimo assoluto, da non superare mai.

		MIN	MAX	UNIT
Supply voltage, V_S = ([V+] – [V–])	LM358B, LM358BA, LM2904B, LM2904BA		±20 or 40	V
	LM158, LM258, LM358, LM158A, LM258A, LM358A, LM2904V		±16 or 32	
	LM2904		±13 or 26	

Lavorare all'interno del range raccomandato garantisce prestazioni ottimali. Tuttavia, per maggiore sicurezza, è consigliabile progettare i circuiti in modo da rimanere a una distanza del 20-30% dai limiti estremi del range operativo, in modo da coprire eventuali variazioni o transienti.
È importante notare che scendere al di sotto del valore minimo raccomandato non danneggia il componente, ma il suo funzionamento non è più garantito. Al contrario, superare il valore massimo assoluto, può compromettere irreversibilmente il dispositivo.

Considerazioni progettuali
L'intervallo compreso tra il massimo raccomandato e il massimo assoluto deve essere utilizzato con cautela. In casi eccezionali, come durante brevi transienti, si può tollerare un funzionamento in questo intervallo, ma non è adatto per un'operatività continua. Le prestazioni non sono verificate in questa zona e la vita utile del componente potrebbe ridursi significativamente. Pertanto, nella progettazione di un sistema di alimentazione, è fondamentale scegliere un alimentatore la cui tensione di uscita rientri completamente nel range operativo raccomandato del modulo o integrato.
Evitare sia *undervoltage* (tensioni basse) che *overvoltage* (tensione alta), per garantire affidabilità, sicurezza e lunga durata del sistema.

Accensione del sistema, transienti e extra tensioni

La tensione operativa è il valore di tensione al quale si prevede che il sistema operi in condizioni normali. Tuttavia, durante l'accensione del sistema possono verificarsi variazioni rapide di corrente e tensione, che possono generare sia sovratensioni (o extra-tensioni), che tensioni negative, le cui ampiezze devono essere accuratamente verificate.
In particolare, i picchi di tensione, anche se transitori, devono rientrare nei limiti massimi assoluti tollerati dal sistema alimentato. Per questo motivo, quando si collega un'alimentazione a un sistema esterno, è fondamentale analizzare l'andamento della tensione durante la fase di accensione.
Le variazioni di tensione possono essere causate da effetti induttivi parassiti, tipicamente

dovuti ai cavi di collegamento tra i due sistemi, ma anche dalla presenza di un filtro EMC in ingresso al sistema alimentato o sull'uscita dell'alimentatore.
All'ingresso del sistema da alimentare sono normalmente presenti condensatori, per cui, l'effetto complessivo di un sistema integrato, può essere modellato come un circuito costituito da un'induttanza parassita L (cavi e piste del PCB) e da condensatori in ingresso. Inoltre, per limitare le perdite energetiche nei filtri, si impiegano spesso filtri di tipo LC (induttore + condensatore). Questi, dal punto di vista matematico, costituiscono un sistema del secondo ordine, il che può introdurre fenomeni oscillatori. In particolare, a causa della frequenza di risonanza del circuito, possono manifestarsi picchi di tensione anche superiori alla tensione nominale di alimentazione.
Infine, la tensione ai capi di un'induttanza L, indicata come V_L, in presenza di una variazione di corrente i(t), è data dalla seguente relazione:

$$V_L = -L\frac{di(t)}{dt}$$

Da questa relazione si comprende che una extratensione V_L, generata da un'induttanza, non dipende solo dall'intensità della corrente, ma anche dalla rapidità con cui essa varia nel tempo. In particolare, più rapida è la variazione della corrente, maggiore sarà la tensione indotta ai capi dell'induttore. Inoltre la caduta di tensione è negativa rispetto alla variazione di corrente.
Nel momento in cui si accende il sistema, i condensatori di ingresso, inizialmente scarichi, tendono a comportarsi come cortocircuiti. Ciò provoca un impulso di corrente rapido e di ampiezza elevata. L'interazione tra questa corrente impulsiva e l'induttanza parassita (dovuta ad esempio ai cavi di collegamento e tracce del PCB) può generare picchi di tensione significativi all'ingresso del sistema.
Analogamente, allo spegnimento del sistema, la corrente tende a diminuire bruscamente. Poiché l'induttore si oppone a variazioni rapide della corrente, la derivata negativa della corrente, genera una tensione negativa ai suoi capi. A seconda dell'ampiezza di tali extratensioni, può essere necessario prevedere protezioni specifiche.
Molti circuiti integrati includono diodi ESD di protezione. Tuttavia, questi componenti non sono progettati per sopportare correnti elevate per periodi prolungati: tipicamente, la corrente continua massima tollerabile è dell'ordine di 10 mA. Spesso questo valore non è esplicitamente indicato nei datasheet; in tal caso, è prudente assumere un valore massimo di 2 mA per non rischiare danneggiamenti. In generale, i diodi ESD iniziano a condurre intorno a 0,3 V e limitano la tensione negativa a circa -0,5 V, ma la tensione ai loro capi aumenta all'aumentare della corrente, come per qualsiasi altro diodo. Inoltre, i diodi ESD non sono progettati per supportare tale scenario, ma hanno lo scopo di proteggere il sistema da scariche elettrostatiche, per cui non è sempre bene fare affidamento a questi.

Uno dei casi peggiori dal punto di vista delle extratensioni si verifica quando l'alimentatore è già acceso e i condensatori di uscita sono carichi, e il collegamento al sistema secondario avviene tramite un interruttore o un *high-side switch* (tipicamente un MOSFET).
In questo scenario, la tensione di alimentazione può salire molto rapidamente, causando extratensioni di ampiezza elevata e persino fenomeni di *latch-up* negli integrati a valle. Il *latch-up* si manifesta come un cortocircuito interno, e può portare alla distruzione del componente a causa dello stress termico generato.

Quando si utilizza un alimentatore da banco di buona qualità, l'uscita viene attivata in modo controllato e relativamente lento, riducendo notevolmente il rischio di extratensioni. Un esempio è mostrato in Figura 1, in cui è possibile vedere che 12V vengono raggiunti in circa 30ms.
In un secondo scenario, rappresentato in Figura 2, la tensione di uscita dell'alimentatore da banco viene mantenuta stabile (attiva), e un MOSFET posto sulla linea positiva (+) controlla l'attivazione del carico, per esempio pilotandolo con un generatore ad onda quadra. In questo secondo caso si può notare che il tempo di salita è di circa 80ns.
Questo secondo caso è del tutto analogo a una connessione *hot-plug*, in cui il sistema secondario viene collegato a un alimentatore già acceso, ovvero si collegano i terminali positivo e negativo direttamente all'uscita dell'alimentatore in funzione. In questi casi non è insolito vedere delle scintille sia al momento del collegamento che scollegamento. In particolare il setup con il MOSFET può essere un ottimo test di stress ON-OFF e validare se un sistema è robusto.

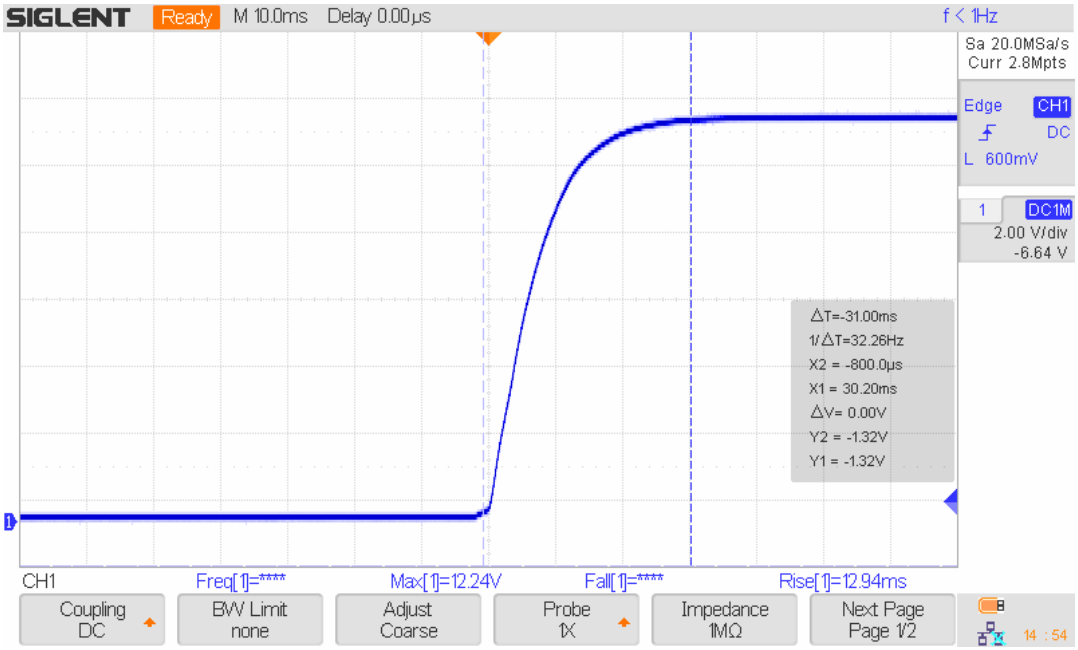

Figura 1: *Andamento della tensione di uscita di un alimentatore da banco.*

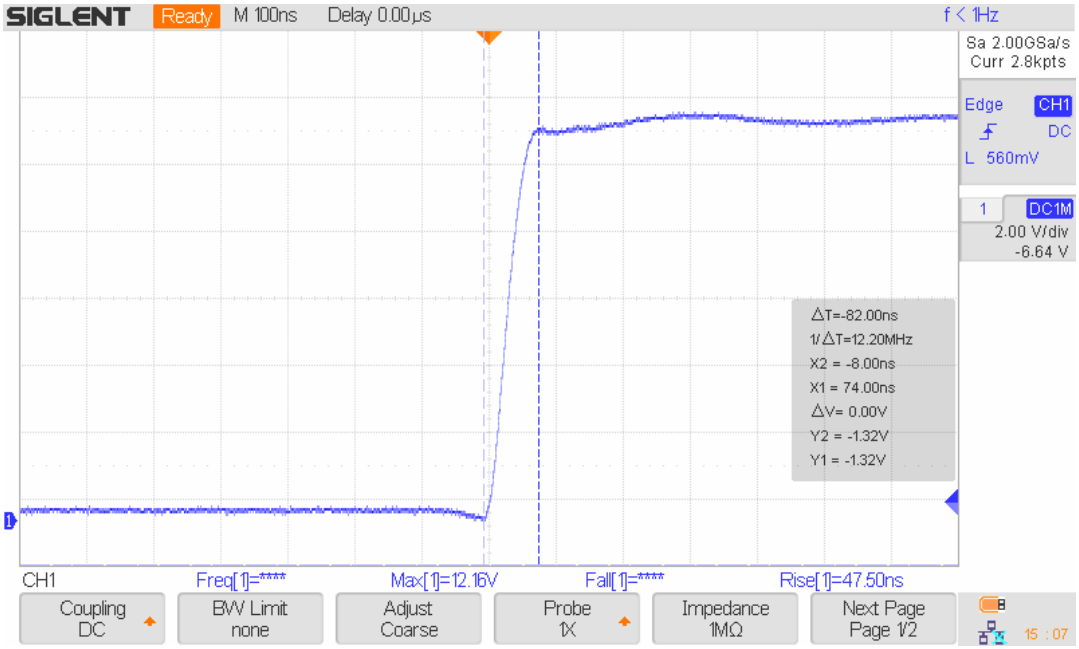

Figura 2: *Andamento della tensione di uscita ad un MOSFET sulla linea +.*

Progettare con massimi e minimi e dovuti margini

Dall'analisi svolta finora, è emerso un concetto fondamentale: ogni volta che si lavora con le tensioni, è essenziale fare riferimento ai valori massimi, ovvero i limiti da non superare. In molti dispositivi elettronici esistono due tipi di valori massimi:

- Valori massimi consigliati
- Valori massimi assoluti

Superare i valori massimi assoluti può causare danni permanenti al dispositivo. Il margine di sicurezza tra il valore massimo consigliato e quello assoluto rappresenta una zona operativa che aggiunge un margine di sicurezza al nostro progetto, e non è bene stare in questa zona operativa.

Questo principio non si applica solo alla tensione di alimentazione, ma a tutti i parametri riportati nei datasheet (schede tecniche) dei componenti elettronici. I datasheet solitamente indicano, per i diversi parametri che caratterizzano un determinato componente elettronico:

- Valori massimi e/o minimi
- Valori tipici

I valori tipici rappresentano il comportamento "medio" del componente, calcolato durante la fase di progettazione su un numero elevato di campioni (es. 1000 circuiti integrati). Questi campioni possono provenire da diverse fabbriche (in Asia, America, Europa, ecc.), e anche diversi *die* aumentando così la varianza del parametro, ma rendendo il valore tipico più rappresentativo a livello globale.

- I valori tipici derivano da misurazioni statistiche durante la progettazione e spesso sono rilevati a temperatura ambiente e in condizioni standard.
- I valori massimi/minimi sono invece testati in produzione, il che li rende più affidabili per valutare il comportamento del componente in condizioni estreme (temperature, alimentazioni, ecc.).

Fare affidamento sui valori massimi e minimi, garantisce che il circuito possa funzionare correttamente anche nei casi peggiori.

Per esempio un parametro di progettazione importante per un amplificatore operazionale è la variazione con la temperatura della tensione di uscita di offset, espressa in µV/°C.
Questo parametro può avere:

- un valore tipico, utile per valutazioni generiche
- un valore massimo, fondamentale per garantire l'affidabilità del sistema

Un errore derivante dalla tensione di offset si può spesso compensare, mentre la variazione dell'offset con la temperatura è più difficile compensarla, per cui avere il valore del caso peggiore, mette nelle condizioni di conoscere un eventuale errore massimo, anche qualora non possa essere compensato.

In fase di progetto, è preferibile considerare il valore massimo, soprattutto se il dispositivo sarà usato in ambienti variabili o critici, poiché il valore tipico è in generale diverse volte inferiore al valore massimo.

Un esempio è la scheda tecnica del TLV9001 della Texas Instruments, in cui l'offset è specificato on il valore massimo, mentre la sua variazione con la temperatura ha solo il valore tipico. In generale la serie TLV9xxx è una serie di amplificati operazioni a basso costo.

For V_S = (V+) – (V–) = 1.8 V to 5.5 V (±0.9 V to ±2.75 V), T_A = 25°C, R_L = 10 kΩ connected to V_S / 2, and V_{CM} = V_{OUT} = V_S / 2 (unless otherwise noted)

PARAMETER		TEST CONDITIONS	MIN	TYP	MAX	UNIT
OFFSET VOLTAGE						
V_{OS}	Input offset voltage	V_S = 5 V		±0.4	±1.6	mV
		V_S = 5 V, T_A = –40°C to 125°C			±2	
dV_{OS}/dT	V_{OS} vs temperature	T_A = –40°C to 125°C		±0.6		µV/°C

Prendendo invece come esempio la scheda tecnica dell'amplificatore operazionale di precisione OPA383, viene riportato sia il valore massimo del'offset che la sua variazione.

at T_A = 25°C, R_L = 10kΩ connected to V_S / 2, V_S = 1.7V to 5.5V, V_{CM} = V_S / 2, V_{OUT} = V_S / 2, and min and max specification established from manufacturing final test (unless otherwise noted)

PARAMETER		TEST CONDITIONS	MIN	TYP	MAX	UNIT
OFFSET VOLTAGE						
V_{OS}	Input offset voltage(1)	V_S = 5.5V		±0.4	±5	µV
		T_A = –40°C to +125°C		±0.5		
dV_{OS}/dT	Input offset voltage drift	T_A = –40°C to +125°C(1)		±0.004	±0.025	µV/°C

Dal valore particolarmente piccolo della sua variazione, si capisce indirettamente che si tratta di un *chopping amplifier*. In particolare al Texas Instruments li chiama *Zero Drift*.

Naturalmente il costo dei due amplificatori operazionali è diverso. In particolare l'OPA383 è circa 4 volte più costoso. Il suo utilizzo è tipicamente in strumenti di misura, dove la precisione è importante, come anche la valutazione dell'errore totale.

Margini di sicurezza

Quando un dispositivo ha un limite massimo (es. 12V di alimentazione), è buona pratica introdurre un margine di sicurezza per non lavorare troppo vicino a quel limite. Se il valore massimo assoluto è superiore al valore massimo consigliato, si può adottare un margine del 10-20% sul valore consigliato. In progetti molto robusti o critici, questo margine può salire fino al 40-50% (es. dispositivi medicali come pacemaker, dove l'affidabilità è vitale).

Scelta dei componenti in base ai parametri garantiti

Non tutti i parametri riportati nei datasheet sono testati in produzione. Per esempio, in molti amplificatori operazionali economici, l'offset è fornito solo come valore tipico, senza una garanzia sul valore massimo. Questo accade perché testare ogni parametro in produzione ha un costo aggiuntivo.
In progetti in cui un parametro specifico è cruciale, è opportuno scegliere componenti che forniscano valori garantiti per quel parametro, anche a costo di spendere di più.

Per cui:

- I valori massimi vanno sempre considerati come riferimento per la progettazione di un sistema robusto.
- I valori tipici possono essere utili in fase di analisi, ma non vanno presi come base per il dimensionamento, soprattutto in contesti critici.
- È fondamentale valutare per ogni progetto quali parametri sono davvero critici, e in base a ciò scegliere componenti che offrano specifiche adeguate, inclusi margini di sicurezza sufficienti.

Livelli di tensione accettati dagli I/O

Ogni volta che si alimenta un sistema elettronico con una determinata tensione, ad esempio 5V o 3,3V, ci si aspetta che il livello logico alto (HIGH) di un segnale corrisponda alla tensione di alimentazione e un livello basso a GND (0V). In realtà, come vedremo, questa corrispondenza non è sempre né perfetta né vera.

Supponiamo di collegare l'uscita di un dispositivo all'ingresso di un altro. È fondamentale verificare che le tensioni di uscita e di ingresso siano compatibili. Se, ad esempio, un sistema lavora a 5 V e l'altro a 3,3 V, si può incorrere in un problema fisico: il segnale a 5V potrebbe danneggiare il dispositivo a 3,3V. Questo perché gli ingressi dei circuiti integrati sono dotati di diodi di protezione ESD (ElectroStatic Discharge) che si attivano quando la tensione di ingresso supera la tensione di alimentazione. In tal caso, il diodo entra in conduzione, generando un cortocircuito tra l'ingresso e la linea di alimentazione o di 0V del dispositivo, con il rischio di danneggiarlo.
Quando si interfacciano sistemi con alimentazioni diverse, ad esempio 5V e 3,3 V, occorre quindi prestare particolare attenzione.
Una soluzione comune è ridurre il livello di tensione mediante un partitore resistivo o, in alternativa, con un l*evel shifter* (traslatore di livello).

- Il partitore resistivo, è semplice da realizzare e poco costoso, ma introduce una resistenza serie che, insieme alle capacità parassite della linea, può rallentare il segnale. Per questo motivo non è adatto a comunicazioni digitali ad alta velocità.
- I *level shifter*, invece, sono dispositivi progettati appositamente per tradurre i livelli logici tra sistemi con tensioni diverse. Hanno spesso uscite *push-pull*, che consentono di lavorare anche a frequenze elevate. A seconda delle esigenze di velocità, si possono scegliere diverse famiglie di *level shifter*.

Alcuni microcontrollori, pur essendo alimentati a 3,3 V, dispongono di ingressi 5V tolleranti, ovvero in grado di ricevere direttamente segnali a 5V senza danni.

Anche quando due dispositivi operano alla stessa tensione di alimentazione (ad esempio 3,3V), è necessario verificare la compatibilità dei livelli logici.
I datasheet specificano sempre i valori di tensione che vengono riconosciuti come livelli logici "0" (LOW) e "1" (HIGH). In molti casi si parla di dispositivi compatibili TTL (Transistor Transistor Logic), in riferimento alla storica famiglia logica a 5V basata su transistor. Questa famiglia di dispositivi logici era la principale utilizzata negli anni 70-90.

Ad esempio, osservando le specifiche di un microcontrollore della famiglia MSPM0, come riportato in tabella sotto:

PARAMETER		TEST CONDITIONS		MIN	TYP	MAX	UNIT
V_{IH}	High level input voltage	ODIO (1)	VDD≥1.62V	0.7*VDD		5.5	V
			VDD≥2.7V	2		5.5	V
		All I/O except ODIO & Reset	VDD≥1.62V	0.7*VDD		VDD+0.3	V
V_{IL}	Low level input voltage	ODIO	VDD≥1.62V	-0.3		0.3*VDD	V
			VDD≥2.7V	-0.3		0.8	V
		All I/O except ODIO & Reset	VDD≥1.62V	-0.3		0.3*VDD	V

si può notare che alcuni ingressi sono tolleranti a 5V (indicati come ODIO – *Open Drain* IO), mentre altri fanno riferimento alla tensione di alimentazione VDD.

Nei casi in cui il limite massimo di tensione ammesso sia VDD + 0,3V, quel valore aggiuntivo (0,3V) corrisponde alla tensione di soglia del diodo ESD. Se la tensione di ingresso supera questo valore, il diodo entra in conduzione, con il rischio di generare un cortocircuito, specialmente se la sorgente del segnale ha bassa impedenza. Questo può danneggiare oltre che l'ingresso, anche l'uscita o sorgente di tensione.

I livelli logici accettati sono in funzione di Vdd. Per esempio il livello alto in ingresso accettato da un ingresso digitale generico, è 0.7 * Vdd. Per cui, se il sistema è alimentato a 3.3V, vale 2.31V mentre se fosse alimentato a 1.9V, varrebbe 1.33V.

Livelli logici e zone di incertezza

I livelli di tensione accettati in ingresso vengono generalmente suddivisi in due categorie:

- Livello basso (LOW), livello logico "0"
- Livello alto (HIGH), livello logico "1"

Ciascuno di questi ha un valore minimo e uno massimo accettabile. I due livelli non si sovrappongono. Per un'alimentazione a 3.3V, il livello minimo di tensione per il livello logico 1, è pari a 2.31V mentre il livello massimo di tensione per il livello logico 0, è 0,99V. Per cui tra 1V e 2.30V c'è una zona di incertezza.

Affinché la comunicazione tra due dispositivi sia affidabile, il livello di uscita del primo deve essere interamente compreso nel range accettato come ingresso dal secondo.
Se le due finestre di tensione non si sovrappongono completamente, ovvero si entra nella finestra di tensione di incertezza, nella quale il sistema non è in grado di determinare con certezza, se il segnale corrisponda a uno "0" o a un "1, si possono verificare dei problemi.

In queste condizioni possono verificarsi errori di comunicazione difficili da rilevare, poiché il sistema potrebbe funzionare apparentemente in modo corretto, ma fallire in determinate condizioni (ad esempio con variazioni di temperatura o alimentazione).
Per questo motivo, è sempre buona pratica verificare preventivamente la compatibilità dei livelli di tensione tra uscita e ingresso. Una mancata verifica può portare a malfunzionamenti che emergono solo nelle fasi finali di test o addirittura dopo la produzione.

Nelle sezioni successive vedremo come anche l'uscita di un segnale digitale non abbia un unico valore fisso, ma un intervallo di tensioni che varia in funzione della corrente erogata dal dispositivo.

Variazione della tensione in funzione del carico

Abbiamo visto che l'ingresso di un sistema digitale è caratterizzato da livelli di tensione che consentono di riconoscere correttamente gli stati logici "0" e "1".
Lo stesso principio vale anche per le uscite: è necessario verificare che la tensione fornita da un'uscita sia compatibile con quella accettata in ingresso dal dispositivo successivo.
Spesso, però, le uscite digitali non vengono utilizzate solo per collegarsi ad altri ingressi logici. Possono anche servire a pilotare un carico, come un LED, oppure a fare entrambe le cose contemporaneamente: fornire un livello logico e accendere un LED in parallelo.
In questi casi, dove bisogna fornire una corrente al carico non trascurabile, la tensione di uscita non è costante, ma dipende dalla corrente erogata. Le uscite digitali moderne sono generalmente di tipo CMOS *push-pull*.

Ciò significa che sono costituite da due transistor:

- uno collega l'uscita a 0V per generare un livello logico basso ("0"),
- l'altro collega l'uscita alla tensione di alimentazione (Vcc o Vdd) per generare un livello logico alto ("1").

In teoria questi transistor dovrebbero comportarsi come interruttori ideali, ma nella pratica presentano una resistenza interna. Di conseguenza, quando l'uscita eroga corrente, per esempio verso un LED, un altro ingresso o un carico qualsiasi, si verifica una caduta di tensione proporzionale alla corrente e alla resistenza interna del transistor.

La corrente massima che un'uscita può fornire dipende fortemente dal tipo di dispositivo. Ad esempio, nei microcontrollori della famiglia MSPM0 sono presenti diversi tipi di pin:

- HDIO (High Drive I/O): uscite ad alta capacità di pilotaggio, fino a circa 20 mA.
- SDIO o HSIO: ottimizzate rispettivamente per bassa potenza o alta velocità, con correnti più limitate (pochi mA).

È importante ricordare che la tensione di uscita varia con la corrente erogata. A seconda della struttura, possono comunque essere presenti dei vincoli, derivanti dal funzionamento del transistor stesso come interruttore. Nel caso degli MSPM0, quando il pin fornisce un livello logico alto, non raggiungerà mai esattamente VDD, ma un valore leggermente inferiore, ad esempio VDD – 0,4 V.

Analogamente, quando l'uscita fornisce uno "0", la tensione non sarà 0 V, ma un valore leggermente superiore, come 0,4 V.
Queste cadute di tensione sono dovute alla resistenza dei transistor e diventano più significative all'aumentare della corrente, ma anche alla struttura stessa del transistor, e poter garantire che lo stesso possa lavorare come interruttore.

È fondamentale verificare che tali valori restino compatibili con i livelli logici di ingresso del dispositivo successivo. Ad esempio, se un microcontrollore MSPM0 fornisce come livello basso massimo 0,45 V e un altro MSPM0 considera come livello basso valido qualunque tensione inferiore a 0,99 V, i due dispositivi sono pienamente compatibili: l'uscita da 0,45 V sarà sempre riconosciuta come "0".

Non bisogna però affidarsi ciecamente alle diciture "*TTL compatible*" o "*CMOS compatible*" presenti nei datasheet. È sempre buona norma verificare numericamente i livelli di tensione effettivi, soprattutto quando l'uscita deve fornire una corrente non trascurabile o un sistema sia alimentato a tensione differente. Infatti, come visto, i livelli logici vengono a dipendere da Vcc.

Quando un'uscita pilota un LED, bisogna considerare che questo richiede una tensione minima di accensione.
Se la caduta di tensione sul transistor interno al microcontrollore è troppo elevata, la tensione residua potrebbe non essere sufficiente per accendere il LED, anche se il software attiva correttamente il pin.
In modo analogo, quando si pilota un relè tramite transistor BJT, è necessario garantire che la corrente sia sufficiente a portare il transistor in saturazione e ad eccitare correttamente la bobina.
Se è necessario fornire una corrente superiore a quella che un singolo pin può erogare, si possono collegare più uscite in parallelo. Tuttavia, questo è possibile solo se:

- Le uscite appartengono alla stessa porta (così da poter essere commutate simultaneamente da software).
- Se la somma delle correnti non supera i limiti massimi indicati nel datasheet sulla porta o come corrente massima per Vcc.

Infatti, i datasheet dei microcontrollori, specificano non solo la corrente massima per i singolo pin, ma anche:

- La corrente massima per porta.
- La corrente totale massima che l'intero dispositivo può supportare.

Superare uno di questi limiti può causare cadute di tensione anomale, riscaldamenti locali, malfunzionamenti e la rottura del dispositivo.

In sintesi, il corretto funzionamento di un sistema digitale non dipende solo dai valori logici nominali, ma anche dal comportamento elettrico delle uscite sotto carico. Verificare la compatibilità tra i livelli di tensione di uscita e di ingresso, tenendo conto delle correnti effettive e dei limiti del dispositivo, è fondamentale per evitare errori di progetto e garantire un funzionamento affidabile del sistema.

Nelle tabelle sotto sono riportati i livelli logici dell'MSPM0G1507. Si può vedere che sono presenti diversi tipi di uscite, per le quali la corrente massima supportata è diversa. Ciononostante la variazione di tensione al variare della corrente non è eccessiva. In particolare V_{OH}, identifica la tensione per il livello alto, mentre V_{OL}, la tensione per un livello basso.

PARAMETER		TEST CONDITIONS		MIN	TYP	MAX	UNIT
V_{OH}	High level output voltage	SDIO	VDD≥2.7V, $\lvert I_{IO}\rvert_{,max}$=6mA VDD≥1.71V, $\lvert I_{IO}\rvert_{,max}$=2mA VDD≥1.62V, $\lvert I_{IO}\rvert_{,max}$=1.5mA -40 °C ≤$T_a$≤25 °C	VDD-0.4			V
			VDD≥2.7V, $\lvert I_{IO}\rvert_{,max}$=6mA VDD≥1.71V, $\lvert I_{IO}\rvert_{,max}$=2mA VDD≥1.62V, $\lvert I_{IO}\rvert_{,max}$=1.5mA -40 °C ≤$T_a$≤125 °C	VDD-0.45			
		HSIO	VDD≥2.7V, DRV=1, $\lvert I_{IO}\rvert_{,max}$=6mA VDD≥1.71V, DRV=1, $\lvert I_{IO}\rvert_{,max}$=3mA VDD≥1.62V, DRV=1, $\lvert I_{IO}\rvert_{,max}$=2mA -40 °C ≤$T_a$≤25 °C	VDD-0.4			
			VDD≥2.7V, DRV=1, $\lvert I_{IO}\rvert_{,max}$=6mA VDD≥1.71V, DRV=1, $\lvert I_{IO}\rvert_{,max}$=3mA VDD≥1.62V, DRV=1, $\lvert I_{IO}\rvert_{,max}$=2mA -40 °C ≤$T_a$≤125 °C	VDD-0.45			
			VDD≥2.7V, DRV=0, $\lvert I_{IO}\rvert_{,max}$=4mA VDD≥1.71V, DRV=0, $\lvert I_{IO}\rvert_{,max}$=2mA VDD≥1.62V, DRV=0, $\lvert I_{IO}\rvert_{,max}$=1.5mA -40 °C ≤$T_a$≤25 °C	VDD-0.4			
			VDD≥2.7V, DRV=0, $\lvert I_{IO}\rvert_{,max}$=4mA VDD≥1.71V, DRV=0, $\lvert I_{IO}\rvert_{,max}$=2mA VDD≥1.62V, $\lvert I_{IO}\rvert_{,max}$=1.5mA -40 °C ≤$T_a$≤125 °C	VDD-0.45			
		HDIO	VDD≥2.7V, DRV=1[(5)], $\lvert I_{IO}\rvert_{,max}$=20mA VDD≥1.71V, DRV=1[(5)], $\lvert I_{IO}\rvert_{,max}$=10mA	VDD-0.4			
			VDD≥2.7V, DRV=0, $\lvert I_{IO}\rvert_{,max}$=6mA VDD≥1.71V, DRV=0, $\lvert I_{IO}\rvert_{,max}$=2mA	VDD-0.4			

PARAMETER		TEST CONDITIONS		MIN	TYP	MAX	UNIT
V_{OL}	Low level output voltage	SDIO	VDD≥2.7V, $\lvert I_{IO}\rvert_{,max}$=6mA VDD≥1.71V, $\lvert I_{IO}\rvert_{,max}$=2mA VDD≥1.62V, $\lvert I_{IO}\rvert_{,max}$=1.5mA -40 °C ≤$T_a$≤25 °C			0.4	V
			VDD≥2.7V, $\lvert I_{IO}\rvert_{,max}$=6mA VDD≥1.71V, $\lvert I_{IO}\rvert_{,max}$=2mA VDD≥1.62V, $\lvert I_{IO}\rvert_{,max}$=1.5mA -40 °C ≤$T_a$≤125 °C			0.45	
		HSIO	VDD≥2.7V, DRV=1, $\lvert I_{IO}\rvert_{,max}$=6mA VDD≥1.71V, DRV=1, $\lvert I_{IO}\rvert_{,max}$=3mA VDD≥1.62V, DRV=1, $\lvert I_{IO}\rvert_{,max}$=2mA -40 °C ≤$T_a$≤25 °C			0.4	
			VDD≥2.7V, DRV=1, $\lvert I_{IO}\rvert_{,max}$=6mA VDD≥1.71V, DRV=1, $\lvert I_{IO}\rvert_{,max}$=3mA VDD≥1.62V, DRV=1, $\lvert I_{IO}\rvert_{,max}$=2mA -40 °C ≤$T_a$≤125 °C			0.45	
			VDD≥2.7V, DRV=0, $\lvert I_{IO}\rvert_{,max}$=4mA VDD≥1.71V, DRV=0, $\lvert I_{IO}\rvert_{,max}$=2mA VDD≥1.62V, DRV=0, $\lvert I_{IO}\rvert_{,max}$=1.5mA -40 °C ≤$T_a$≤25 °C			0.4	
			VDD≥2.7V, DRV=0, $\lvert I_{IO}\rvert_{,max}$=4mA VDD≥1.71V, DRV=0, $\lvert I_{IO}\rvert_{,max}$=2mA VDD≥1.62V, DRV=0, $\lvert I_{IO}\rvert_{,max}$=1.5mA -40 °C ≤$T_a$≤125 °C			0.45	
		HDIO	VDD≥2.7V, DRV=1[(5)], $\lvert I_{IO}\rvert_{,max}$=20mA VDD≥1.71V, DRV=1[(5)], $\lvert I_{IO}\rvert_{,max}$=10mA			0.4	
			VDD≥2.7V, DRV=0, $\lvert I_{IO}\rvert_{,max}$=6mA VDD≥1.71V, DRV=0, $\lvert I_{IO}\rvert_{,max}$=2mA			0.4	
		ODIO	VDD≥2.7V, $I_{OL,max}$=8mA VDD≥1.71V, $I_{OL,max}$=4mA -40 °C ≤T_a≤25 °C			0.4	
			VDD≥2.7V, $I_{OL,max}$=8mA VDD≥1.71V, $I_{OL,max}$=4mA -40 °C ≤T_a≤125 °C			0.45	

fan-in e fan-out

Abbiamo visto come i livelli logici di ingresso e di uscita debbano essere tra loro compatibili affinché un sistema digitale funzioni correttamente.
Finora abbiamo analizzato il caso in cui un microcontrollore piloti un altro dispositivo o, ad esempio, un LED. Tuttavia, quando si interfacciano direttamente le uscite e gli ingressi di porte logiche (come AND, OR, XOR), entrano in gioco due parametri fondamentali: fan-in e fan-out.

Fan-in
Il fan-in indica il numero di ingressi di una porta logica, ossia quanti segnali può ricevere, o meglio fornisce, contemporaneamente. Ad esempio:

- Una porta NAND 7400 ha un fan-in di 2 (2 ingressi)
- Mentre una porta NAND 7430, dotata di otto ingressi, ha un fan-in di 8.

Il valore del fan-in influenza le prestazioni elettriche della porta: più ingressi significano più transistor interni, quindi un maggiore consumo e una velocità inferiore. Per questo motivo, è buona pratica scegliere una porta con fan-in adeguato alle esigenze. Se servono solo due ingressi, è preferibile evitare una porta a otto ingressi, che comporterebbe un inutile aumento di complessità e di consumo.

Fan-out
Il fan-out è invece un parametro ancora più importante in fase di progetto. Rappresenta il numero massimo di ingressi che una singola uscita può pilotare correttamente (della stessa famiglia), mantenendo livelli logici affidabili.
In altre parole, indica quante altre porte possono essere collegate all'uscita di una porta logica senza degradare il segnale.
Ad esempio, la porta NAND 7400 (TTL) ha un'uscita che può pilotare al massimo circa 10 ingressi TTL, quindi il suo fan-out è 10. Le porte CMOS, invece, possono arrivare a un fan-out anche di 50 o più.

Nelle porte TTL (*Transistor-Transistor Logic*), l'ingresso di ogni porta è costituito da transistor bipolari (BJT), che richiedono una certa corrente di base per funzionare. Poiché l'uscita di una porta TTL è in grado di fornire solo una quantità limitata di corrente, il numero di ingressi collegabili (fan-out) è necessariamente ridotto. Limitando il fan-out, si mantiene il livello logico entro i valori standard TTL (0 V → 0,8 V per "0" logico e 2 V → 5 V per "1" logico), garantendo che gli stati logici vengano riconosciuti correttamente.
Nel caso delle porte CMOS (*Complementary MOS*), l'ingresso è invece costituito dal gate di un transistor MOSFET, che ha un'impedenza molto alta e assorbe una corrente trascurabile.
Questo permette fan-out molto più elevati. Tuttavia, ogni gate presenta una capacità parassita (capacità di gate e capacità di Miller tra il drain e gate), che deve essere caricata e scaricata a ogni commutazione.
Durante una transizione logica, quindi, l'uscita deve fornire una certa corrente per caricare o scaricare queste capacità di ingresso.

Se il numero di ingressi collegati (cioè il fan-out effettivo) è troppo elevato, la capacità totale cresce e i tempi di commutazione aumentano, limitando la frequenza massima operativa del sistema. Si rischierebbe che tra una transizione logica e l'altra, non si riuscirebbe a raggiungere il corretto livello logico.
Infatti, nel caso delle porte CMOS, il fan-out non è limitato solo dalla corrente statica, ma anche dalla velocità di commutazione richiesta. Per cui potrebbero essere presenti anche più valori di fan-out, in funzione della frequenza operativa. Più alta è la frequenza del segnale, più rapidamente le capacità devono essere caricate e scaricate.
Se gli ingressi da pilotare è eccessivo, i segnali non raggiungono in tempo i livelli logici "0" e "1" corretti, generando errori.
Per questo motivo, anche nei circuiti CMOS moderni, è fondamentale verificare sempre la compatibilità elettrica tra le porte e il numero massimo di ingressi pilotabili da ogni uscita, soprattutto nei sistemi ad alta frequenza.

Sink e source current non sono sempre uguali

Come visto, la corrente di uscita influenza direttamente la tensione che l'uscita può effettivamente raggiungere. È quindi fondamentale verificare che la tensione di uscita sia compatibile con i livelli logici riconosciuti in ingresso.
La corrente massima che si può estrarre da un'uscita rappresenta un parametro cruciale.
Ad esempio, se si vuole pilotare direttamente un LED come indicatore di stato, occorre fornire tipicamente una corrente compresa tra 5mA e 20mA, a seconda delle condizioni operative e della luminosità desiderata e colore del LED stesso. Prima di farlo, è indispensabile verificare che l'uscita sia effettivamente in grado di erogare o assorbire tale corrente.

Quando si parla di "fornire corrente", occorre distinguere due modalità operative, note come *Sink* e *Source*:

- **Source current**: la corrente fluisce dall'uscita verso il carico, cioè l'uscita fornisce corrente. In questo caso è presente un transistor *high-side*, di tipo P, che collega il carico a Vcc. Per esempio, collegando il catodo del LED a GND e l'anodo all'uscita tramite una resistenza, il LED si accende quando l'uscita è a livello alto (1). In questo caso l'uscita "fornisce" corrente: è un funzionamento *Source*.
- **Sink current**: la corrente fluisce verso l'uscita, cioè l'uscita assorbe corrente e la porta a GND. In questo caso è presente un transistor *low-side*, tipicamente di tipo N, che collega il carico a GND. L'altro terminale del carico deve essere collegato a Vcc. Per esempio, collegando un LED con l'anodo a Vcc, una resistenza in serie e il catodo all'uscita dell'integrato, quando l'uscita è a livello basso (0 V), la corrente scorre da Vcc verso GND, attraverso il LED. L'uscita quindi "assorbe" la corrente: è un funzionamento *Sink*.

È importante osservare che un'uscita digitale non sempre "fornisce" corrente in senso stretto: in modalità *Sink*, infatti, si limita a creare il percorso verso GND.
Le capacità di corrente *Sink* e *Source* non sono sempre simmetriche, ovvero uguali, ma dipendono dall'integrato e dalla struttura dei transistor interni. Un esempio significativo è il PCF8574, un noto I/O Expander. Questo dispositivo può assorbire fino a 25 mA in modalità *Sink* (uscita a 0), ma può fornire 1 mA in modalità *Source* (uscita a 1). Nella

tabella estratta dal datasheet sono mostrati i dettagli.

I_{OH}	High-level output current	–1	mA
I_{OL}	Low-level output current	25	mA

Pertanto, se si desidera pilotare un LED che richiede 10 mA, è necessario farlo accendere con il livello logico basso (0), collegando il catodo all'uscita e l'anodo a Vcc tramite una resistenza.
Un collegamento opposto (accensione con "1") non funzionerebbe, poiché l'uscita non potrebbe fornire sufficiente corrente.

Questo tipo di asimmetria è comune in molti dispositivi digitali: spesso il transistor NMOS (*low-side*) è dimensionato più grande, mentre il PMOS (*high-side*) è più piccolo per ridurre l'area del chip e la complessità del *layout*.

La corrente di leakage

La corrente di *leakage*, o corrente di dispersione, è un fenomeno di grande importanza nei sistemi elettrici ed elettronici. Si tratta di una corrente indesiderata, che idealmente non dovrebbe esistere in un sistema perfettamente isolato, ma che nella realtà è sempre presente, seppure in misura molto ridotta.
Prendiamo ad esempio i due fili di una normale presa elettrica domestica, fase e neutro: anche se sono isolati tra loro da una guaina, quando colleghiamo un dispositivo, come un fono, alla presa, scorre una corrente tra fase e neutro. Quando il fono è scollegato sebbene ci si aspetti che non scorra corrente, una piccola corrente scorre ancora tra fase e neutro. Questa è proprio la corrente di dispersione, che può essere misurata con strumenti specializzati.
Per rilevare correnti di *leakage* molto piccole, ad esempio all'interno delle prese elettriche, si utilizzano procedure e apparecchiature specifiche in grado di applicare tensioni elevate, fino a 1000, 2000 o 5000 volt, al fine di misurare anche le minime correnti che fluiscono tra i conduttori isolati.
Questa corrente è anche presente in numerosi componenti elettronici: ad esempio, in un transistor spento non ci si aspetterebbe corrente, ma in realtà possono fluire correnti dell'ordine di nanoampere, picoampere o, in dispositivi molto raffinati, anche femtoampere. Analogamente, nei condensatori, pur avendo le armature teoricamente isolate, esiste una resistenza parassita che provoca una lenta scarica della carica accumulata. Lo stesso vale per le batterie: anche se non collegate a nessun carico, perdono gradualmente energia a causa di correnti di *leakage* dovute a processi chimici interni. Batterie di buona qualità possono presentare correnti di dispersione nell'ordine delle decine o centinaia di nanoampere, valori simili a quelli di correnti di *standby* di microcontrollori o CPU in modalità *deep sleep*.
Queste correnti, pur piccole, sono inevitabili e vanno sempre considerate in fase di progettazione, poiché influenzano il comportamento reale del sistema. Ad esempio, quando si dimensiona un resistore di *pull-up* o *pull-down*, è fondamentale tener conto della corrente di *leakage* per evitare errori sulla lettura di un livello logico digitale.
Essendo una corrente, la corrente di *leakage* influisce sull'errore di una eventuale conversione corrente-tensione all'interno dei circuiti. Pertanto, quando si leggono segnali analogici tramite ADC ad alta risoluzione (16 o 24 bit), anche correnti nell'ordine di

nanoampere possono influire significativamente sulla precisione della misura. In alcuni casi, specialmente con ingressi ad alta impedenza, correnti di *leakage* dell'ordine di femtoampere diventano rilevanti.
In sintesi, la corrente di *leakage* non va mai trascurata, ma va sempre valutata in relazione alle caratteristiche del sistema, alle sue impedenze e alla precisione richiesta.

Resistori di pull-up e pull-down ed effetti della corrente di leakage

I resistori di *pull-up* e *pull-down*, servono a definire in modo stabile il livello logico di un ingresso quando nessun segnale lo pilota attivamente.
Tuttavia, a causa delle correnti di *leakage* (correnti parassite), la scelta del valore di questi resistori non è banale.
Nei circuiti analogici le correnti di *leakage* sono spesso dell'ordine dei nanoampere, ma nei circuiti digitali o di potenza possono raggiungere 1–2 μA, influenzando significativamente il livello logico a causa del resistore di *pull-up* o *pull-down*.
Ad esempio, se un ingresso è vincolato a GND tramite un resistore di *pull-down* da 1 MΩ e la corrente di *leakage* è di 1 μA, ai capi del resistore si sviluppa una tensione di 1 V ($V = I \cdot R$). Questa tensione potrebbe essere interpretata dal sistema non più come "0" ma come livello indefinito.
Di conseguenza, il valore del resistore deve essere scelto in modo che la tensione causata dalla corrente di *leakage* che scorre nel resistore, rimanga inferiore alla soglia di riconoscimento logico dello zero. In maniera analoga, se si usasse un resistore di *pull-up*, la differenza tra Vcc e la caduta di tensione sul resistore, causata dalla corrente di *leakage*, deve essere nell'intervallo di riconoscimento dell'1 logico.
Nei sistemi a batteria si tende a utilizzare resistori di valore elevato (ad esempio 100 kΩ – 1 MΩ) per ridurre il consumo. Infatti, quando si preme il pulsante, sui resistori circola una corrente, dovuta alla tensione di alimentazione del sistema stesso e non solo quella di *leakage*. Ciò richiede un'attenta analisi delle correnti di *leakage* e scegliere il valore giusto dei resistori di *pull-up* e *pull-down*.

In generale:

- 10KΩ è un valore ottimale per la maggior parte dei sistemi anche con correnti di *leakage* elevate. Ma non è il valore ottimo per sistemi a batteria.
- 100KΩ è accettabile nei circuiti CMOS moderni.
- 1MΩ può essere usato solo se la corrente di *leakage* è molto bassa e non compromette il riconoscimento dei i livelli logici.

Rise-time e fall-time – specifiche I2C

Nel bus I²C, le linee SCL (clock) e SDA (data) sono di tipo *open-drain* e richiedono resistori di *pull-up* per funzionare correttamente.
La scelta di questi resistori influenza i tempi di salita (*rise time*) e discesa (*fall time*) dei segnali, che devono rientrare nei limiti specificati dallo standard per garantire una comunicazione affidabile.

- A 100 KHz (standard mode), sono ammessi tempi di salita più lenti.
- A 400 KHz (fast mode) o superiori, i tempi devono essere molto più rapidi.

Tempi di salita troppo lunghi possono causare errori nella lettura dei bit. Poiché il tempo di salita dipende dalla capacità parassita del bus (dovuta ai dispositivi collegati e alla lunghezza dei cavi), è importante stimarla correttamente.
Ogni periferica specifica nel datasheet la propria capacità aggiunta al bus, e la somma complessiva serve per dimensionare il resistore di *pull-up*. Ciononostante il valore della capacità parassita derivante dal PCB, non è facile valutarla.

Valori tipici di pull-up sono:

- 4.7 KΩ – 2.2 KΩ per velocità di 400 KHz.
- Valori più alti (10KΩ o superiori) solo per velocità ridotte

Quando il bus I²C si estende su cavi lunghi o collega sensori esterni, è consigliabile verificare con l'oscilloscopio i reali tempi di salita e discesa. I valori limiti, oltre che sulle specifiche del protocollo I²C, sono riportate anche sui datasheet delle periferiche I²C.
Ridurre il bitrate (ad esempio a 50 kHz) può mitigare i problemi, ma significa operare fuori dallo standard ufficiale e senza garanzie di compatibilità totale. Infatti molti integrati sono testati solo per i bit rate standard, 100KHz, 400KHz e 1MHz, per cui operare a frequenze diverse, sebbene tutto possa funzionare e sia lecito, richiede maggiori attenzioni e misure di verifica.

Uscite Open Drain

Alcuni dispositivi dispongono di uscite *open-drain*, che consentono di interfacciare sistemi con tensioni operative differenti.
In questo tipo di uscita, è presente un transistor (MOSFET o BJT) che collega la linea a GND quando attivo, ma non è presente il transistor "*high-side*" verso Vcc. Per questo motivo, è necessario un resistore di *pull-up* esterno, che porta la linea a livello logico alto quando il transistor è spento. In alternativa, questo aspetto si traduce nel fatto che un eventuale carico, come per esempio un *relay*, deve essere collegato tra l'uscita *open drain* e Vcc.

Esempi tipici:

- Un microcontrollore a 3,3 V può avere un'uscita *open drain* compatibile con sistemi a 5 V.
- Nei PLC industriali, le uscite *open drain* possono supportare tensioni nel range 24-48 V, sebbene siano alimentati a a 12V-24V.

E' fondamentale non superare la tensione massima indicata nel datasheet. Le uscite *open drain* vengono spesso utilizzate dai pin di segnalazione di errori, al fine di poter essere collegate in parallelo per realizzare funzioni di segnalazione condivisa (tecnica detta OR-ing). In questo modo qualunque dispositivo può vincolare la linea a livello basso per indicare una condizione di *fault* comune. La segnalazione di questo tipo è di tipo attiva bassa, ovvero quando la linea vale 0 (GND) è presente un errore.
Se non si usa il resistore di *pull-up*, la linea non ha modo di avere lo stato logico 1 e rimarrebbe fluttuante. Tale dimenticanza porterebbe il sistema a non funzionare correttamente.

Dissipazione di energia di un'uscita

Ogni linea di uscita è caratterizzata da un intervallo di tensione e di corrente validi. L'energia che una determinata uscita può fornire è quindi vincolata da questi parametri.
La potenza erogabile da un sistema è data dal prodotto tra tensione e corrente. Tuttavia, il fatto che una tensione massima sia di 60V e la corrente massima di 1A non implica necessariamente che sia possibile erogare 1A con una tensione operativa di 60V. Infatti, in molti dispositivi esistono grafici di *derating* che mostrano la corrente massima erogabile in funzione della tensione. È quindi fondamentale consultare tali curve per comprendere le effettive prestazioni di ciascuna uscita.
Un altro aspetto cruciale riguarda la dissipazione termica. I grafici di *derating* includono questo aspetto, ma se non sono presenti, l'aspetto termico è fondamentale. Ad esempio, un piccolo regolatore lineare (LDO) che può essere in grado di fornire in uscita 3.3V e 100mA fino a 60V in ingresso, non significa che, alimentandolo a 60 V, riuscirà realmente a erogare 100 mA in modo continuo. Infatti la potenza dissipata da un LDO è pari a:

$$P_{diss} = (V_i - V_o) \cdot I_{OUT}$$

Per cui l'LDO, se alimentato a 60V, si troverebbe a dissipare una potenza di circa 6W. Dissipare questa potenza è generalmente proibitiva senza l'ausilio di *package* grandi (TO220) e relative alette di raffreddamento.

Quando la corrente scorre attraverso un componente, come un MOSFET in configurazione *high-side* o *low-side*, essa incontra la resistenza RDS(on) del transistor. La potenza dissipata internamente è data da:

$$P_{diss} = I^2 \cdot R_{DSON}$$

Questa potenza, come per LDO, si trasforma in calore, provocando un aumento di temperatura del dispositivo. A questo punto entrano in gioco i parametri termici del *package*, come la resistenza termica giunzione-ambiente (θJA), che indica di quanti gradi aumenta la temperatura per ogni watt dissipato. L'aumento di temperatura va aggiunto al valore massimo della temperatura ambientale in cui il sistema deve operare.
Senza un adeguato raffreddamento, la temperatura del componente può superare i limiti operativi massimi, attivando il *thermal shutdown*, una protezione che spegne automaticamente il dispositivo per evitare danni permanenti.

Pertanto, anche se tensione e corrente risultano entro i limiti nominali, un eccessivo riscaldamento può comunque impedire il corretto funzionamento. È quindi necessario considerare non solo le specifiche elettriche, ma anche gli aspetti termici e di dissipazione del sistema.

Effetti di carichi induttivi e capacitivi sulle uscite

Ogni uscita può pilotare solo determinati tipi di carico. In genere vengono fornite le specifiche di tensione e corrente (ad esempio 12V, 100mA), ma non sempre viene chiarito quale tipologia di carico sia supportata.

- Carichi resistivi: generalmente non pongono problemi.

- Carichi induttivi: possono generare sovratensioni quando la corrente varia rapidamente, a causa della relazione:

$$V_L = -L\frac{di}{dt}$$

Durante la commutazione di un carico, questa tensione inversa (negativa) può superare i limiti massimi del MOSFET, danneggiandolo. È quindi necessario inserire dispositivi di protezione come diodi di *flyback* o soppressori di tensione (TVS).
Tipicamente, i datasheet indicano se un'uscita è già protetta internamente da questi dispositivi. Un esempio potrebbe essere l'uscita digitale fornita dal TIOS102 della Texas Instruments, che include il diodo TVS.
Per quanto riguarda i carichi capacitivi, essi comportano un altro tipo di criticità. All'accensione, un condensatore scarico si comporta come un cortocircuito. Se la capacità è elevata (ad esempio 10mF), l'uscita può trovarsi a fornire correnti molto alte per tempi prolungati, attivando le protezioni di sovracorrente o termiche del sistema.
Questo può generare cicli di accensione e spegnimento ripetuti "*hiccup mode*" (singhiozzo), durante i quali il dispositivo tenta di ricaricare il condensatore, va in protezione, e riparte ciclicamente. La tecnica di protezione *hiccup*, è spesso usata dagli alimentatori *switching*, i quali possono fornire correnti elevate di decine di ampere. Se dovessero entrare in protezione è tipico poter ascoltare un click periodico ad intervalli dell'ordine del secondo, da cui il nome di protezione a singhiozzo. Per evitare che all'accensione si attivino le protezioni di sovracorrente, alcune soluzioni prevedono:

- Limitazione controllata della corrente di carica (*soft-start* o *current limiting*).
- Correnti temporaneamente più elevate solo durante la fase di carica (prima accensione).

In sintesi, piccole capacità rallentano le transizioni, mentre grandi capacità possono compromettere il corretto funzionamento, simulando un cortocircuito prolungato.

Cosa fare dei pin non usati

In un circuito integrato, ogni pin deve essere considerato attentamente, anche se non viene utilizzato. A seconda delle specifiche e consigli o vincoli del datasheet, alcuni pin devono essere:

- Collegati a Vcc o GND tramite un resistore di *pull-up* o *pull-down*.
- Collegati direttamente a GND o Vcc per disattivare una funzione.
- Lasciati floating, se il datasheet lo consente esplicitamente.

In assenza di indicazioni chiare, è prudente vincolare sempre gli ingressi a un valore logico definito tramite un resistore *pull-up* o *pull-down*. Un ingresso lasciato fluttuante può generare transizioni spurie, consumi inutili e instabilità delle funzioni del sistema. In particole ridurre i consumi è particolarmente importante in sistemi a batteria.

Per i microcontrollori, un'alternativa è configurare i pin inutilizzati come uscite e fissarli a 0 o 1 logico, evitando così commutazioni indesiderate.

Se sulla linea è presente un LED, è importante assicurarsi che, nella condizione di riposo, rimanga spento per evitare correnti parassite.
Ogni pin non utilizzato deve essere analizzato singolarmente, verificando sul datasheet la condizione consigliata per garantire stabilità, bassi consumi e assenza di comportamenti indesiderati.

Conclusioni

Collegare correttamente l'uscita di un sistema elettronico all'ingresso di un altro, non è un'operazione banale, ma un processo che richiede attenzione a molti parametri. Affinché il segnale venga trasmesso in modo affidabile, è fondamentale che le caratteristiche elettriche di uscita e ingresso siano compatibili.

Ogni sistema elettronico ha come obiettivi principali non solo l'elaborazione delle informazioni, ma anche la loro corretta trasmissione; di conseguenza, un'interconnessione errata tra moduli può compromettere il funzionamento dell'intero sistema.

La trattazione vista in precedenza, per quanto possa essere sembrata lunga, rappresenta solo una parte di ciò che un progettista deve considerare.
In realtà, ogni progetto ha caratteristiche uniche: non basta verificare un elenco di parametri standard, ma occorre estendere e adattare tali verifiche a seconda del contesto specifico. Questo rende la progettazione un'attività complessa ma affascinante, che richiede studio, attenzione e una visione d'insieme per ottenere un sistema non solo funzionante, ma anche robusto e affidabile.

Bibliografia

[1] www.LaurTec.it : sito ufficiale dell'articolo presentato, dove trovare altri articoli, progetti e aggiornamenti.
[2] www.PCBWay.com: Sponsor ufficiale del corso.

PCBWay

PCBWay è tra i produttori di PCB più esperti per la prototipazione e la produzione di piccoli volumi in Cina. PCBWay si impegna a soddisfare le esigenze dei clienti di diversi settori in termini di qualità, consegna e convenienza. Con anni di esperienza accumulata nel settore, PCBWay ha clienti da tutto il mondo. Il marchio è diventato la prima scelta per i clienti, grazie alla sua elevata forza e servizi speciali, come:

- Prototipazione PCB e produzione schede FR-4 e Alluminio, ma anche PCB avanzati come schede Rogers, HDI, Flexible e Rigid-Flex.
- Assemblaggio PCB.
- Servizio di impaginazione e progettazione.
- Servizio di stampa 3D.

History

Data	Versione	Autore	Descrizione aggiornamenti
09/11/25	1.1	Mauro Laurenti	• Aggiunti chiarimenti sulle FPGA e processi tecnologici • Chiariti i punti con la parola "massa" • miglioramenti vari.
02/11/25	1.0	Mauro Laurenti	• Versione Originale.