

## Power / Motor Green Energy



**IN QUESTO NUMERO:**

**I CIRCUITI INTEGRATI PIÙ POPOLARI TRA I MAKERS**

**GESTIONE TERMICA NEI SISTEMI DI POTENZA PER MOTORI ELETTRICI**

**CORSO DI ELETTRONICA APPLICATA - UN SENSORE INDUTTIVO PER MISURARE LE INDUTTANZE**

**E MOLTI ALTRI ARTICOLI E PROGETTI!**

***COSA LEGGERAI NEL 2026?***

<b><i>TOPICS</i></b>	<b><i>MAKERS ZONE</i></b>	<b><i>DATA DI PUBBLICAZIONE</i></b>
IoT	Cybersecurity	1 Febbraio
Artificial Intelligence	Edge Machine Learning	1 Marzo
Power/Motor	Green Energy	1 Aprile
PCB	Microcontrollers	1 Maggio
Test & Measurements	DIY Tools	1 Giugno
Automotive	Sensors	1 Luglio
Open-Source	Development Boards	1 Settembre
Wireless/RF	LoRa Networks	1 Ottobre
Industry 4.0	Automation & Robotics	1 Novembre
Healthcare	Medical Wearable	1 Dicembre

## L'energia che muove il futuro dell'elettronica

**C**ari lettori, c'è una parola che attraversa trasversalmente quasi tutte le innovazioni tecnologiche di oggi: energia. Dalla mobilità elettrica alle infrastrutture per le rinnovabili, dai data center ai dispositivi industriali intelligenti, l'elettronica ruota attorno alla capacità di gestire, convertire e utilizzare l'energia in modo efficiente. Non è quindi un caso che questo numero di Firmware 2.0 sia dedicato proprio al tema "Power/Motor-Green Energy", tre dimensioni profondamente interconnesse che hanno un forte impatto sull'ingegneria elettronica.

Negli ultimi anni l'elettronica di potenza ha attraversato diversi cambiamenti. Se per decenni il silicio è stato il protagonista quasi esclusivo dei dispositivi di conversione energetica, oggi assistiamo alla rapida diffusione dei semiconduttori wide bandgap, in particolare GaN (nitruro di gallio) e SiC (carburo di silicio), materiali innovativi che offrono ottime caratteristiche elettriche e termiche, e che promettono di superare molti dei limiti tradizionali del silicio. Maggiore efficienza, frequenze di switching più elevate, minori perdite e dimensioni più compatte dei sistemi di conversione caratterizzano i dispositivi di potenza wide bandgap, con risultati evidenti in molte applicazioni. I convertitori di potenza diventano più piccoli e leggeri, gli inverter per motori elettrici raggiungono maggiori livelli di efficienza, mentre i sistemi per la ricarica rapida dei veicoli elettrici possono gestire potenze elevate con prestazioni e affidabilità superiori.

Ma l'adozione di queste tecnologie richiede anche un nuovo approccio progettuale. Progettare elettronica di potenza oggi significa affrontare questioni multidisciplinari che coinvolgono layout PCB, gestione termica, compatibilità elettromagnetica e controllo digitale. **Frequenze di commutazione più elevate implicano vantaggi in termini di densità di potenza**, ma richiedono anche una maggiore attenzione ai fenomeni parassiti ed alla stabilità del sistema. **Parlare di elettronica significa inevitabilmente parlare anche di energia**. Non si tratta solo di produzione energetica da fonti rinnovabili, ma di utilizzo nel modo più intelligente possibile. Efficienza, riduzione delle perdite e ottimizzazione dei consumi sono ormai requisiti indispensabili in ogni progetto. Dai microcontrollori che gestiscono algoritmi di power management fino ai sistemi di conversione che alimentano infrastrutture e motori elettrici, l'energia è il filo conduttore che collega innovazione tecnologica e sostenibilità a lungo termine. Ed è proprio in questo spazio, tra elettronica di potenza e green energy, che si sta costruendo una parte fondamentale del nostro futuro tecnologico.

Buona lettura!

*Giordana Francesca Brescia*



## Funzionamento a 5V in Qualsiasi Condizione

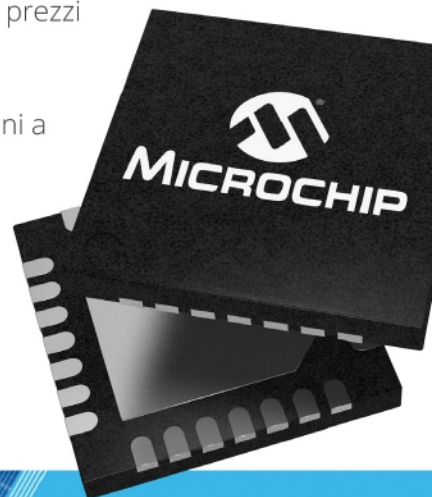
### Prestazioni Efficienti senza Penalizzare la Potenza

I microcontroller PIC32CM PL10 ridefiniscono ciò che è possibile per gli ingegneri che cercano un equilibrio ideale tra semplicità e performance. Basati su core ARM Cortex-M0+ questi microcontroller forniscono un vero funzionamento a 5V, raro tra le MCU a 32 bit, che garantisce un'immunità eccezionale al rumore per applicazioni industriali, elettrodomestici e automotive. Con l'avanzato rilevamento tattile, il consumo di energia ultra-basso e il supporto continuo per i familiari strumenti di sviluppo, il PIC32CM PL10 unisce la semplicità e le prestazioni con una robusta capacità di rilevamento tattile capacitivo e un affidabile supporto a 5V.

#### Caratteristiche Chiave

- Funzionamento a 5V: prestazioni solide in ambienti rumorosi
- Rilevamento Tattile Avanzato: Peripheral Touch Controller che supporta un numero elevato di canali e resiste alle interferenze
- Modalità di consumo ultrabasso: Sleepwalking e basso consumo di corrente in stand-by prolungano la durata della batteria
- Migrazione facile: progettato per utenti 8-bit per upgrade senza crescenti preoccupazioni
- Strumenti noti per lo sviluppo: compatibili con Microsoft® Visual Studio Code (VS Code®) e MPLAB® Code Configurator e supportato da catene di strumenti di partner come IAR Embedded Workbench, Keil e Segger.
- Posizionamento Prezzo Competitivo: caratteristiche di alto livello ma senza i prezzi di livello premium

Aggiorna il tuo prossimo progetto con il PIC32CM PL10 per sperimentare prestazioni a 32-bit senza la complessità.



[microchip.com/pic32cm-pl10](https://microchip.com/pic32cm-pl10)



Il nome e logo Microchip, e il logo Microchip sono marchi registrati di Microchip Technology Incorporated negli Stati Uniti e in altri paesi. Tutti gli altri marchi sono di proprietà dei rispettivi titolari.  
© 2026 Microchip Technology Inc. Tutti i diritti riservati.  
MEC2639A-ITA-03-26

# Power/Motor Green Energy



**Founder&Editor**  
Emanuele Bonanni

**CFO**  
Lidia Balica

**Editorial Assistant**  
Maria Pisani

**Maker in Chief**  
Giordana Francesca Brescia

**Advertising & Marketing**  
Cristian Balica  
cristian@contangosl.com

**Graphic Designer**  
Marilde Mirra

**Circulation**  
Users - 149.382  
Social Network - 130.441

## © Copyright

Tutti i diritti di riproduzione o di traduzione degli articoli pubblicati sono riservati. Manoscritti e disegni sono di proprietà di Contango SL.

È vietata la riproduzione anche parziale degli articoli salvo espressa autorizzazione scritta dell'editore.

I contenuti pubblicitari sono riportati senza responsabilità, a puro titolo informativo.

## EDITORIALE

L'ENERGIA CHE MUOVE IL FUTURO DELL'ELETTRONICA

2

I CIRCUITI INTEGRATI PIÙ POPOLARI TRA I MAKERS

5

PROBLEMI REALI E SOLUZIONI PRATICHE PER EMI/EMC NEI SISTEMI DI POTENZA

9

GAN E SIC NEL CONTROLLO MOTORI: QUANDO CONVENGONO DAVVERO?

11

RELÈ DI PRECARICA DA 1500V PER SISTEMI ESS E RICARICA RAPIDA DEI VEICOLI ELETTRICI

14

4 CIRCUITI OP-AMP DI SICURO INTERESSE

15

ARDUINO VENTUNO Q, LA NUOVA PIATTAFORMA EDGE AI CHE PORTA INTELLIGENZA ARTIFICIALE E ROBOTICA AVANZATA NEL MONDO EMBEDDED

20

ENERGY HARVESTING PER SENSORI IOT

23

GESTIONE TERMICA NEI SISTEMI DI POTENZA PER MOTORI ELETTRICI

25

GEOPOLITICA ED ELETTRONICA. QUALI SCENARI INDUSTRIALI E TECNOLOGICI?

27

L'IDROGENO NELLA TRANSIZIONE ENERGETICA PER LA DECARBONIZZAZIONE GLOBALE

29

GUIDA ALLA PROGETTAZIONE DI UN MINI GENERATORE EOLICO OPEN SOURCE

31

CONTROLLO SENSORLESS DEI MOTORI BLDC

34

CORSO DI ELETTRONICA APPLICATA - UN SENSORE INDUTTIVO PER MISURARE LE INDUTTANZE

36



# I CIRCUITI INTEGRATI PIÙ POPOLARI TRA I MAKERS

di **Andrea Garrapa**

*I circuiti integrati o chip sono i mattoni fondamentali di tutte le moderne applicazioni elettroniche. Questi dispositivi sono presenti in quasi tutti gli strumenti elettronici che utilizziamo nella nostra vita quotidiana, come televisori, lavatrici, telefoni e smartwatch, fino ai progetti che le persone realizzano a casa per divertimento (elettronica fai-da-te o per hobby). Sono presenti anche in cose grandi come automobili e razzi. Ma quali sono i chip più popolari tra gli hobbisti/makers? In questo articolo cercheremo di rispondere alla domanda, esplorando i chip più utilizzati tra gli appassionati.*

## INTRODUZIONE

**M**igliaia di tipi diversi di **circuiti integrati (IC)** sono oggi disponibili sul mercato per realizzare i dispositivi elettronici più disparati. La maggior parte di questi chip sono stati progettati per applicazioni molto specifiche (**embedded**). Tuttavia, molti altri circuiti integrati sono stati progettati per un uso generico (**general purpose**) e quindi sono utilizzati in un'ampia varietà di applicazioni.

Molti di questi IC sono in circolazione da decenni, ma il loro design multiuso, l'ampia disponibilità e il basso costo hanno conferito loro una popolarità duratura. Questo articolo cerca di definire una lista di IC rappresentativa della frequenza d'uso o della popolarità da parte di hobbisti e makers, mentre non è affatto rappresentativa della frequenza d'uso o della popolarità da un punto di vista professionale/aziendale.

**È interessante notare quanto gli hobbisti possano essere conservatori quando scelgono i componenti elettronici. Alcuni degli elementi nell'elenco hanno sostituti ben più moderni spesso migliori di loro sotto molti aspetti.** Ad esempio, l'amplificatore operazionale  $\mu$ A741 è un progetto obsoleto e pochissime persone dovrebbero usarlo nel 2024, eppure sorprendentemente si classifica come uno dei 20 componenti più popolari. Parte di questa popolarità è probabilmente dovuta a libri e altre pubblicazioni che contengono progetti di circuiti con questo amplificatore operazionale.

## IC ANALOGICI

I **circuiti integrati lineari**, o IC analogici, funzionano con un intervallo continuo di valori, il che significa che possono avere un numero infinito di stati operativi. Ciò li rende diversi dagli IC digitali, che hanno un numero definito di distinti stati di input e output. Gli IC analogici servono come elementi costitutivi fondamentali per cir-

cuiti elettronici complessi e trovano applicazioni in vari dispositivi come aeroplani, astronavi e radar. Progettare IC lineari è più impegnativo, nonostante abbiano meno transistor. Nella **Tabella 1** sono elencati alcuni degli IC lineari più comunemente utilizzati.

Tipo	Part Number	Descrizione
Amplificatori operazionali (op-amp)	LM741	op-amp general purpose
	LM358	op-amp duale
	TL072	op-amp duale a JFET con basso rumore
Regolatori di tensione	LM7805	regolatore a tensione positiva +5V
	LM7905	regolatore a tensione negativa -5V
	LM317	regolatore a tensione positiva aggiustabile
Comparatori di tensione	LM339	comparatore quadruplo
	LM311	tensione accurata
Timer	NE555N	IC di temporizzazione
PLL	LM4041BEX3	anello ad aggancio di fase

*Tabella 1: Alcuni degli IC lineari più comunemente utilizzati*

Un **amplificatore operazionale** è un tipo speciale di circuito amplificatore che ha molte applicazioni in tutta l'elettronica. Sebbene esistano molti tipi diversi di amplificatori operazionali, **LM741** è il più comune. Il 741 è un singolo circuito di amplificatori operazionali in un package DIP a otto pin. È stato introdotto per la prima volta nel 1968 ed è ancora uno dei circuiti integrati più ampiamente utilizzati mai realizzati. Il 741 è uno di quegli IC che richiedono sia tensione positiva che negativa.

**LM358** è un circuito integrato (IC) a doppio amplificatore operazionale (op-amp) creato da Texas Instruments. Questo IC contiene due op-amp indipendenti ad alto guadagno e compensati in frequenza. Ciò che lo distingue dagli altri amplificatori operazionali è la sua capacità di funzionare da un singolo alimentatore su un'ampia gamma di tensioni, rendendolo ideale per applicazioni alimentate a batteria. Il circuito integrato LM358 è costituito da diversi componenti, tra cui due amplificatori operazionali indipendenti, capacità di compensare l'offset per ogni amplificatore operazionale e ampio intervallo di alimentazione. Queste caratteristiche lo hanno reso una scelta popolare tra gli appassionati di elettronica.

L'amplificatore operazionale **TL072** è un componente versatile e ad alte prestazioni, ampiamente utilizzato nei circuiti dei sintetizzatori grazie al suo basso rumore, all'elevata velocità di variazione e alla bassa distorsione.

Il regolatore di tensione non regolabile **LM7805** da 5 V era un punto fermo di ogni circuito logico TTL costruito su circuiti integrati 74xx. Risalente anch'esso agli anni '70, la sua popolarità era dovuta alla sua facilità d'uso: basta aggiungere due condensatori e si ottiene un'alimentazione stabile da 5 V per un'ampia gamma di tensioni di ingresso. Ed è un'ottima scelta, a patto che non

breadboard per makers.

**LM339** (Four-Way Differential Motion Comparison) è un comune circuito integrato con quattro comparatori di tensione indipendenti all'interno del chip. È utilizzato principalmente nei circuiti di porte logiche digitali ad alta tensione. LM339 può facilmente formare vari circuiti comparatori di tensione e circuiti oscillatori.

Il comparatore **LM311** è in circolazione da molti anni, ma sembra ancora molto popolare per alcune caratteristiche uniche, come l'alimentazione a  $\pm 15$  V che consente di confrontare tensioni bipolari elevate sui pin di ingresso. Ciò è molto utile in tutti i tipi di circuiti audio, come amplificatori e sintetizzatori che utilizzano alimentazioni  $\pm 12$  V e nei circuiti di controllo motore. Inoltre, è veloce e, a differenza di altri comparatori, ha un emettitore isolato portato sul pin 1.

**NE555N** appartiene alla serie di circuiti integrati **timer 555**. Funzionando come un circuito di temporizzazione monolitico, eccelle nel generare ritardi temporali precisi, oscillazioni e impulsi. La sua resilienza e affidabilità lo hanno reso un componente fondamentale in un ampio spettro di applicazioni elettroniche. Il circuito integrato timer **NE555** è stato inizialmente introdotto da *Signetics*, ora parte di *ON Semiconductor*, nel 1972. Da allora, si è evoluto in uno dei circuiti integrati più ampiamente utilizzati nel campo dell'elettronica. Il suo fascino duraturo può essere attribuito alla sua semplicità, economicità e versatilità.

## IC LOGICI

I **circuiti integrati logici** o, come vengono comunemente chiamati, circuiti integrati digitali sono dispositivi semiconduttori progettati per elaborare operazioni logiche di base (ad esempio, segnali che hanno solo due stati possibili: vero/falso o vero/falso). Tali circuiti in-

**QUELLO CHE HAI LETTO E' UN ESTRATTO, L'ARTICOLO COMPLETO E' RISERVATO AGLI ABBONATI AD ELETTRONICA OPEN SOURCE.**

**PERCHE' ABBONARSI A PLATINUM 2.0?**

**UN ANNO DI FIRMWARE 2.0  
TUTTI GLI ARTICOLI TECNICI RISERVATI  
CONTEST E PROMOZIONI RISERVATI**



**VOGLIO ABBONARMI!**

# GESTIONE TERMICA NEI SISTEMI DI POTENZA PER MOTORI ELETTRICI

di Firmware Focus

*Nei sistemi di potenza per motori elettrici la gestione termica riduce guasti prematuri e ottimizza le prestazioni in ambito industriale, automotive e nelle applicazioni ad alta densità di potenza.*

## LA DISSIPAZIONE TERMICA NEI SISTEMI DI POTENZA

**N**ei sistemi di azionamento per motori elettrici, la gestione termica è determinante per garantire efficienza e lunga vita operativa. È considerata una delle principali sfide progettuali poiché l'incremento della densità di potenza e delle frequenze di switching comporta inevitabilmente un aumento delle perdite termiche. I dispositivi di potenza come **MOSFET**, **IGBT** o moduli basati su carburo di silicio, generano calore sia per conduzione sia per commutazione, e la mancata rimozione efficace di tale energia termica può ridurre drasticamente l'affidabilità del sistema. La temperatura di giunzione dei semiconduttori costituisce un parametro critico strettamente correlato al tempo medio tra i guasti, noto come **MTBF**, un indicatore fondamentale per valutare la robustezza dell'intero azionamento. Nei drive per motori elettrici impiegati in ambito industriale o automotive, l'esposizione a cicli termici ripetuti può generare stress meccanici e fenomeni di delaminazione nei package, accelerando il degrado dei componenti. È opportuno quindi che la dissipazione termica venga considerata fin dalle prime fasi di progettazione, integrando soluzioni di raffreddamento passivo e attivo in un'ottica di ottimizzazione complessiva del sistema. La corretta gestione delle perdite, unita ad un'accurata valutazione delle condizioni operative reali, è la base per garantire prestazioni costanti e sicurezza nel lungo periodo.

## PROGETTAZIONE DEL LAYOUT PCB E IMPATTO TERMICO

Il layout del circuito stampato svolge un ruolo fondamentale nella gestione termica dei sistemi di potenza per motori elettrici, poiché influenza direttamente la distribuzione del calore e la capacità di trasferirlo verso l'esterno. Tracce di rame dimensionate in modo adeguato riducono le perdite resistive, e contribuiscono a diffondere il calore su una superficie più ampia, migliorando la dissipazione complessiva. L'impiego di piani di

massa estesi e di layer interni dedicati consente di sfruttare la conducibilità termica del rame per creare percorsi preferenziali di trasferimento del calore verso dissipatori o chassis metallici. Parallelamente, le thermal vias assumono un'importanza strategica poiché permettono di collegare termicamente il lato superiore del PCB con strati inferiori o con una base metallica, riducendo la resistenza termica complessiva.

*“La disposizione dei componenti di potenza deve essere studiata attentamente per evitare concentrazioni eccessive di calore in aree ristrette, che potrebbero generare hotspot difficili da controllare.”*

Errori comuni includono la sottovalutazione delle correnti impulsive e l'assenza di un adeguato isolamento tra zone ad alta e bassa potenza, fattori che possono influenzare non solo la temperatura ma anche l'integrità del segnale e la compatibilità elettromagnetica. Un layout ottimizzato rappresenta dunque uno dei pilastri della progettazione termica avanzata.

## SOLUZIONI DI RAFFREDDAMENTO E MATERIALI AVANZATI

La gestione termica nei sistemi di potenza per motori elettrici richiede un'integrazione coerente tra dissipatori, materiali termoconduttivi e, in alcuni casi, sistemi di raffreddamento attivo. I dissipatori in alluminio o rame vengono dimensionati in base alla potenza dissipata e alla differenza di temperatura ammessa tra giunzione e ambiente, tenendo conto della resistenza termica complessiva del percorso. L'utilizzo di interfacce termiche, come pad siliconici o paste ad alta conducibilità, riduce le discontinuità tra superficie del dispositivo e dissipatore, migliorando il trasferimento del calore. Nei sistemi ad alta potenza, come inverter per veicoli elettrici o azionamenti industriali di grande taglia, il raffreddamento a

liquido rappresenta una soluzione sempre più diffusa grazie alla capacità di rimuovere quantità significative di energia termica in spazi contenuti. Anche i materiali innovativi, come substrati ceramici ad alta conducibilità o basi metalliche isolate, contribuiscono a migliorare le prestazioni termiche complessive. La scelta della soluzione di raffreddamento deve essere effettuata considerando sia la potenza nominale sia le condizioni ambientali, la ventilazione disponibile ed i vincoli meccanici del sistema. Una progettazione attenta consente di prevenire sovratemperature che potrebbero compromettere l'affidabilità e ridurre drasticamente la vita utile del drive motore.

### SIMULAZIONI TERMICHE E VALIDAZIONE DEL PROGETTO

L'adozione di strumenti di simulazione termica rappresenta oggi una best practice imprescindibile nella progettazione dei sistemi di potenza per motori elettrici. Software basati su metodi agli elementi finiti consentono di modellare la distribuzione della temperatura all'interno del PCB, dei moduli di potenza e dell'intero contenitore, individuando potenziali criticità prima della realizzazione fisica del prototipo. Le simulazioni permettono di valutare scenari operativi realistici, includendo carichi variabili, cicli di lavoro e condizioni ambientali estreme, fornendo al progettista indicazioni quantitative sulla temperatura di giunzione e sulle zone a maggiore stress termico. Tuttavia, la simulazione deve essere accompagnata da una fase di validazione sperimentale, attraverso l'utilizzo di termocoppie, sensori integrati e termocamere a infrarossi, al fine di verificare la corrispondenza tra modello teorico e comportamento reale. Un errore frequente consiste nel considerare la simulazione come un risultato definitivo, senza tenere conto delle tolleranze di produzione e delle variazioni dei parametri materiali. L'approccio corretto prevede un ciclo iterativo di simulazione, validazione sperimentale e

zione significativa del tempo medio tra i guasti, secondo modelli di accelerazione termica ampiamente validati in ambito industriale. La progettazione orientata all'affidabilità deve quindi considerare non solo le condizioni nominali, ma anche i picchi di carico, le fasi di avviamento e le situazioni di sovraccarico temporaneo. Tra gli errori più comuni si riscontrano la sottostima delle perdite di commutazione alle alte frequenze, l'adozione di dissipatori sottodimensionati e la mancata considerazione dell'invecchiamento delle interfacce termiche. Anche l'installazione del sistema in ambienti con ventilazione insufficiente o temperature elevate può compromettere le prestazioni previste in fase di progetto. La gestione termica non deve essere percepita come un elemento secondario rispetto al controllo del motore o all'efficienza energetica, poiché rappresenta un fattore determinante per la continuità operativa e per la riduzione dei costi di manutenzione. Un approccio sistemico e preventivo consente di minimizzare i rischi e di offrire soluzioni di azionamento robuste e durature nel tempo.

### CONCLUSIONI

La gestione termica nei sistemi di potenza per motori elettrici costituisce un elemento strategico per garantire affidabilità, efficienza e lunga vita operativa in applicazioni industriali e automotive sempre più esigenti. Dalla progettazione del layout PCB all'utilizzo di thermal vias, dalla scelta dei dissipatori alle simulazioni avanzate, ogni fase contribuisce a definire il comportamento termico complessivo del sistema. L'attenzione ai dettagli progettuali, unita alla validazione sperimentale e all'analisi dell'MTBF, consente di prevenire guasti prematuri e di ottimizzare le prestazioni nel tempo. In un mercato orientato alla massima densità di potenza e alla riduzione degli ingombri, la gestione termica non rappresenta soltanto un requisito tecnico, ma un vero fattore competitivo capace di determinare il successo di un sistema di

**QUELLO CHE HAI LETTO E' UN ESTRATTO, L'ARTICOLO COMPLETO E' RISERVATO AGLI ABBONATI AD ELETTRONICA OPEN SOURCE.**

**PERCHE' ABBONARSI A PLATINUM 2.0?**

**UN ANNO DI FIRMWARE 2.0  
TUTTI GLI ARTICOLI TECNICI RISERVATI  
CONTEST E PROMOZIONI RISERVATI**



**VOGLIO ABBONARMI!**

# CORSO DI ELETTRONICA APPLICATA – UN SENSORE INDUTTIVO PER MISURARE LE INDUTTANZE

di **Fulvio De Santis**

*In questa nuova puntata del Corso di Elettronica Applicata studieremo il progetto di un interessante dispositivo che abbiamo chiamato "Sensore Induttivo". E' un semplice ma versatile circuito costituito da due circuiti integrati: il comparatore LM311, ovvero il factotum che consente di misurare con precisione il valore di un'induttanza; il quattro porte NAND Trigger di Shmitt 74HC132 utilizzato per squadrare ulteriormente il segnale ad onda quadra fornito dal comparatore. Per le misurazioni delle induttanze occorre un frequenzimetro che naturalmente non può mancare in un laboratorio di elettronica. In alternativa, si può impiegare un microcontrollore per effettuare la misurazione della frequenza e anche visualizzare su un display direttamente il valore di un'induttanza.*

## INTRODUZIONE

Il sensore induttivo è un circuito che, abbinato ad un frequenzimetro o gestito da un microcontrollore, può essere utilizzato come un preciso strumento di misura di un'induttanza di un induttore o di una bobina, è quindi utile averlo a disposizione in un laboratorio di elettronica o di elettrotecnica. **Questo progetto esprime il concetto e la tecnica di misurazione dell'induttanza basandosi su un circuito integrato comparatore e alcune porte NAND Trigger di Shmitt.** Sinteticamente, il principio di funzionamento del sensore induttivo è basato sulla misurazione della frequenza di risonanza di un circuito risonante LC parallelo costituito da un condensatore ed un induttore di valore noto. In serie all'induttore di questo circuito LC viene collegato un induttore di cui si vuole misurare la sua induttanza. Di conseguenza, la frequenza di risonanza naturale del circuito LC varia con il valore d'induttanza dell'induttore sotto test, per cui, una volta nota la frequenza, il valore dell'induttanza viene ottenuto con l'aiuto di semplici calcoli matematici. In sostanza, il sensore induttivo è fondamentalmente un generatore di segnale digitale, il cui valore di frequenza determinato dal circuito di risonanza LC applicato in ingresso al sensore, viene utilizzato nei calcoli (come vedremo più avanti in dettaglio) per ricavare il valore estremamente preciso dell'induttanza sconosciuta dell'induttore testato.

## IL CIRCUITO DEL SENSORE INDUTTIVO

Come mostrato nello schema elettrico del sensore induttivo in **Figura 1**, il circuito è costituito da due circuiti

integrati, il comparatore LM311 (U1) e il NAND Trigger di Schmitt a quattro porte 74HC132, (U2), e alcuni resistori e condensatori. L'LM311 fornisce il segnale ad onda quadra, il cui valore di frequenza è determinato dal circuito risonante parallelo L1-C1.

Il segnale ad onda quadra all'uscita dell'LM311 viene ulteriormente squadrato da due porte NAND trigger di Schmitt (U2:A, U2:B) del 74HC132 poste in cascata. All'uscita della porta U2:B, al connettore J2 si rende disponibile il segnale TTL (0-5V) per la misurazione della frequenza e il conseguente calcolo dell'induttanza dell'induttore sotto test, che deve essere collegato in serie all'induttore L1, ovvero ai due terminali del connettore J1. L'LM311 è ideale per i misuratori di induttanza o capacità. Grazie all'alta velocità di commutazione riesce ad oscillare a frequenze da centinaia di kHz. Per la sua natura di comparatore il segnale di uscita è perfettamente squadrato, rendendo agevole per un microcontrollore misurarne la frequenza. L'uscita open-collector permette all'LM311 di interfacciare il segnale di uscita a qualunque tensione logica, ad esempio a 2,8 V, 3,3 V o a 5 V, semplicemente cambiando la resistenza di pull-up sul pin 7.

Il circuito mostrato in **Figura 1** realizza tre funzioni in un'unica soluzione circuitale: **Comparatore, Trigger di Schmitt, Oscillatore.** Ogni funzione è interdipendente dalle altre per ottenere la generazione di un segnale ad onda quadra estremamente preciso e stabile, la cui frequenza può essere misurata direttamente da un fre-

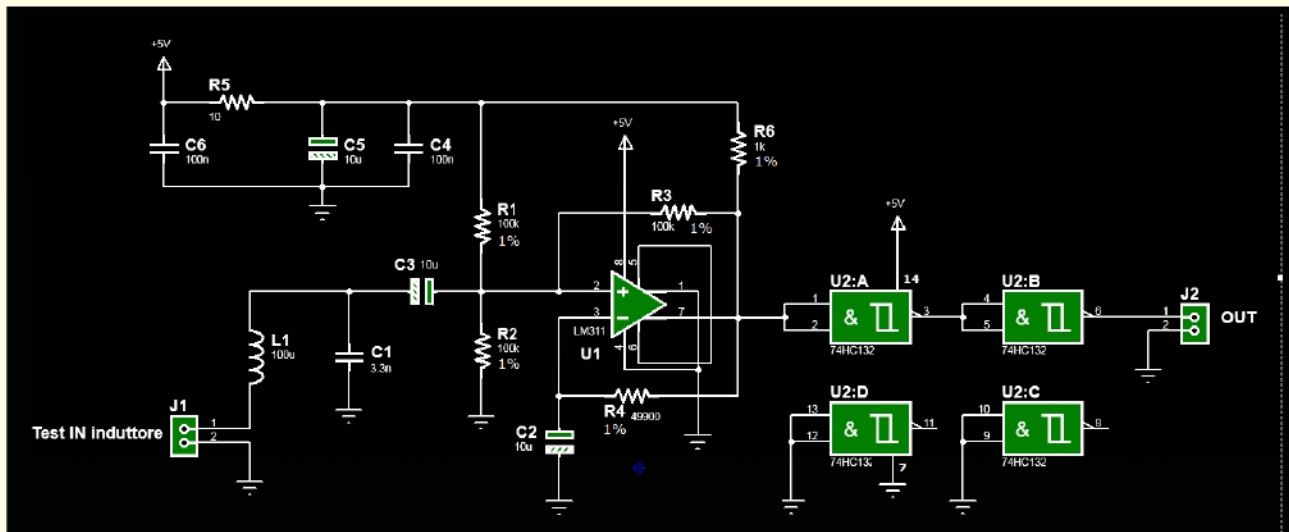


Figura 1: Schema elettrico del sensore induttivo

quenzimetro con risoluzione di 1 Hz, oppure mediante un microcontrollore (ad esempio un *PIC*, *Arduino*, *ESP32*, ecc.), che con un semplice codice possa misurare la frequenza, calcolare l'induttanza e visualizzarne su un display il valore esatto.

Nella funzione di **Comparatore**, l'LM311 ha il compito di confrontare i suoi due ingressi e stabilire se la tensione sul Pin 2 (IN+), ovvero l'ampiezza della sinusoide generata dal risonatore LC, è maggiore o minore della tensione di riferimento sul Pin 3 (IN-). Quando la tensione è maggiore, si ottiene un livello alto in uscita (una tensione di valore di poco meno della tensione di alimentazione +5V), mentre se è inferiore, l'uscita sarà un livello basso (prossima a 0 V). Quindi, questa funzione consente di ottenere in uscita un segnale binario. In pratica, la funzione comparatore trasforma la natura analogica del circuito risonante L1-C1, in un segnale digitale interpretabile da qualsiasi microcontrollore o strumento di misura con ingresso TTL. L'LM311 amplifica (notevolmente) il segnale di ingresso.

Il pin 3 (IN-) gioca un ruolo importante nella stabilità di funzionamento del comparatore, e quindi di tutto il sistema di generazione del segnale.

La funzione **Trigger di Schmitt** si realizza mediante il resistore R3 di retroazione positiva posto tra il pin 2 (IN+) e l'uscita pin 7 dell'LM311. Questa configurazione del comparatore lo trasforma in uno switch con isteresi, appunto in un Trigger di Schmitt, evitando così che il rumore causato da interferenze elettriche causi commutazioni indesiderate. Quindi, per realizzare un Trigger di Schmitt con il comparatore, occorre utilizzare la retroazione positiva. Inoltre, si deve considerare che, a differenza degli operazionali comuni, l'LM311 ha un'uscita open collector, pertanto richiede sempre una resistenza di pull-up, che nel nostro circuito è il resistore R6 collegato fra il pin 7 e l'alimentazione.

La presenza del circuito risonante LC, unitamente al loop di retroazione positiva, trasforma il circuito in un comparatore a soglia controllato da un risonatore.

## QUELLO CHE HAI LETTO E' UN ESTRATTO, L'ARTICOLO COMPLETO E' RISERVATO AGLI ABBONATI AD ELETTRONICA OPEN SOURCE.

PERCHE' ABBONARSI A PLATINUM 2.0?

UN ANNO DI **FIRMWARE 2.0**  
TUTTI GLI ARTICOLI TECNICI RISERVATI  
CONTEST E PROMOZIONI RISERVATI



VOGLIO ABBONARMI!

# ABBONATI A

# Firmware 2.0

PER AVERE **TUTTA L'ELETTRONICA A PORTATA DI CLICK** E RESTARE SEMPRE AGGIORNATO SULL'ELETTRONICA EMBEDDED, I MICROCONTROLLORI E L'INNOVAZIONE TECNOLOGICA



 Elettronica Open Source

# + 150.000

REGISTERED USERS

+ 80.000 AVERAGE MONTHLY PAGEVIEWS

+ 500.000 2025 ANNUAL VISITORS

THE BIGGEST  
**EMBEDDED  
COMMUNITY**  
IN ITALY

SOCIAL CONNECTIONS

 + 85.000

 + 30.000

## CATEGORIES

PROFESSIONALS

**53 %**

ACADEMICS/STUDENTS

**25 %**

MAKERS/HOBBYISTS

**22 %**

