



**FARE Elettronica magazine:
ogni mese, il meglio di quanto pubblicato online**

**Puntiamo alla
sostenibilità ambientale!**

Per realizzare questo
magazine non sono
stati abbattuti alberi



IN EVIDENZA:

**Robodottori e sanità del futuro:
come stanno cambiando
la medicina**



SOLUZIONI

**Aggiornamento sicuro dei
dispositivi medicali connessi:
dall'architettura di boot al lifecycle**



DESIGN:

Convertitori dc-dc a 48V. il test per
l'ingresso del GaN nel mainstream
automobilistico

TECNOLOGIE:

Convertitori regolati e non regolati:
quando scegliere l'uno o l'altro



Cerca

M Forte

Lo strumento intelligente
per la DiBa



API



Condivisione
carrello/progetto

P&A
Assistant



Richiedi
un'offerta



Calcolatori di
conversione

Ordinare in tutta semplicità

Strumenti per la ricerca dei prodotti,
la verifica dello stock e l'acquisto

mouser.it/servicesandtools



MOUSER
ELECTRONICS

Convertitori DC-DC a 48V: il banco di prova per l'ingresso del GaN nel mainstream automobilistico

AUTORE: Maurizio Di Paolo Emilio

I SISTEMI AUTOMOBILISTICI A 48V SI STANNO ESPANDENDO RAPIDAMENTE

Il sistema mild-hybrid a 48V sta emergendo come un'architettura elettrica di transizione cruciale per l'industria automobilistica globale. Nel suo 2026 **Global Powertrain Outlook**, S&P Global Mobility rileva che i sistemi ibridi (inclusi i mild-hybrid a 48V) stanno crescendo rapidamente a causa di normative sulle emissioni sempre più stringenti, mentre persistono le pressioni sui costi associate all'elettrificazione completa.

In Europa, **Stellantis** ha confermato i piani per espandere la capacità produttiva di MHEV a 48V, mentre **Hyundai** continua a ottimizzare i suoi sistemi a 48V a livello

di piattaforma per ridurre ulteriormente i costi dei veicoli.

Questa tendenza è guidata non solo da singoli carichi come i motori start-stop, ma anche dalla migrazione di un numero crescente di funzioni elettroniche ad alta potenza verso il dominio alimentato a 48V: servosterzo elettrico, turbocompressore elettrico, aria condizionata a velocità variabile, nonché LiDAR, telecamere e processori grafici ad alte prestazioni richiesti per gli ADAS. Mentre le funzioni legate alla guida autonoma continuano a essere integrate nei veicoli, anche le richieste al sistema di distribuzione della potenza del veicolo aumentano di conseguenza. Un sistema a 48V può migliorare l'efficienza del carburante di circa il 10-15%, erogare fino a quattro volte la potenza senza aumentare le dimensioni del motore e ridurre le emis-

sioni di CO2 fino al 25%.

CONVERTITORE 48V <-> 12V: L'INTERFACCIA CHIAVE IN UN'ARCHITETTURA A DOPPIO BUS

Man mano che sempre più carichi migrano verso il dominio a 48V, sorge una sfida pratica: un gran numero di carichi tradizionali di bordo opera ancora a 12V, tra cui il BCM (*Body Control Module*), i fari, i quadri strumenti, i sistemi multimediali e i tergicristalli. Di conseguenza, il convertitore DC-DC bidirezionale 48V <-> 12V è diventato un'interfaccia critica nell'architettura a doppio bus.

Superficialmente, questa appare solo come una sfida progettuale per un convertitore DC-DC da 2-3 kW; tuttavia, nell'ingegneria pratica, le variabili coinvolte nei compromessi si estendono ben oltre una

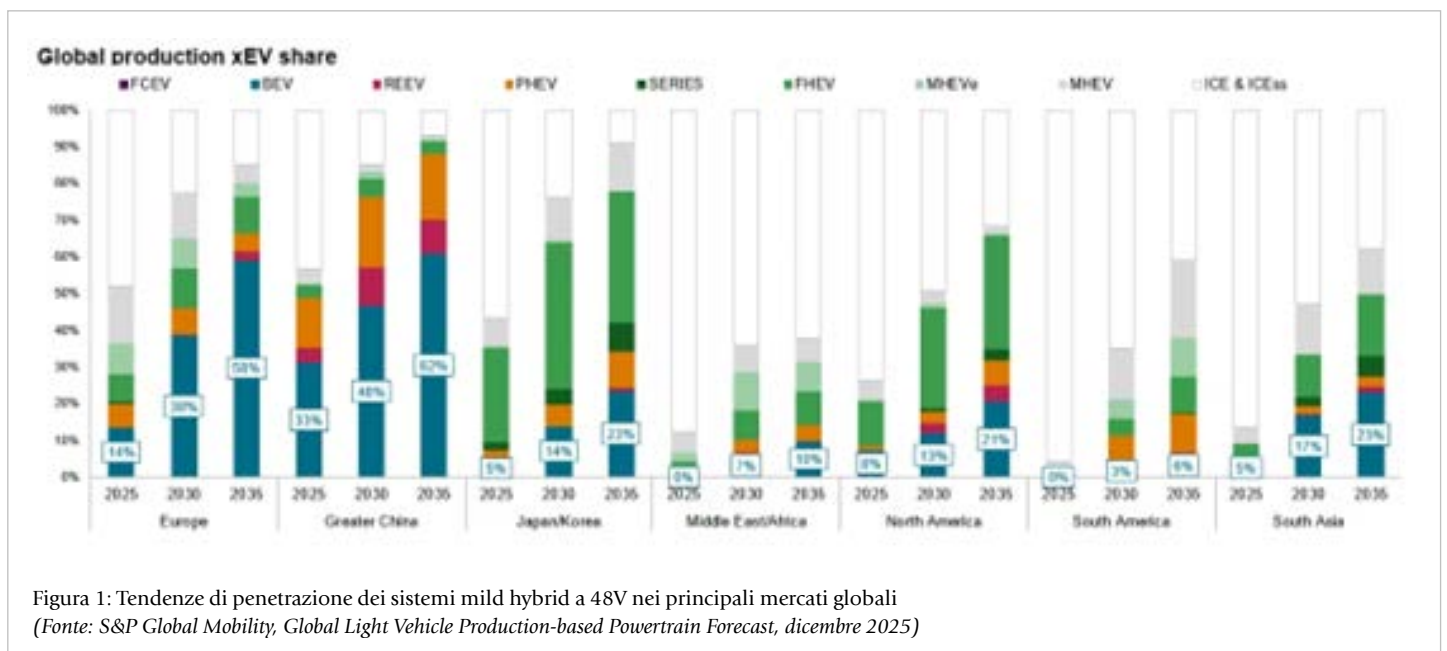
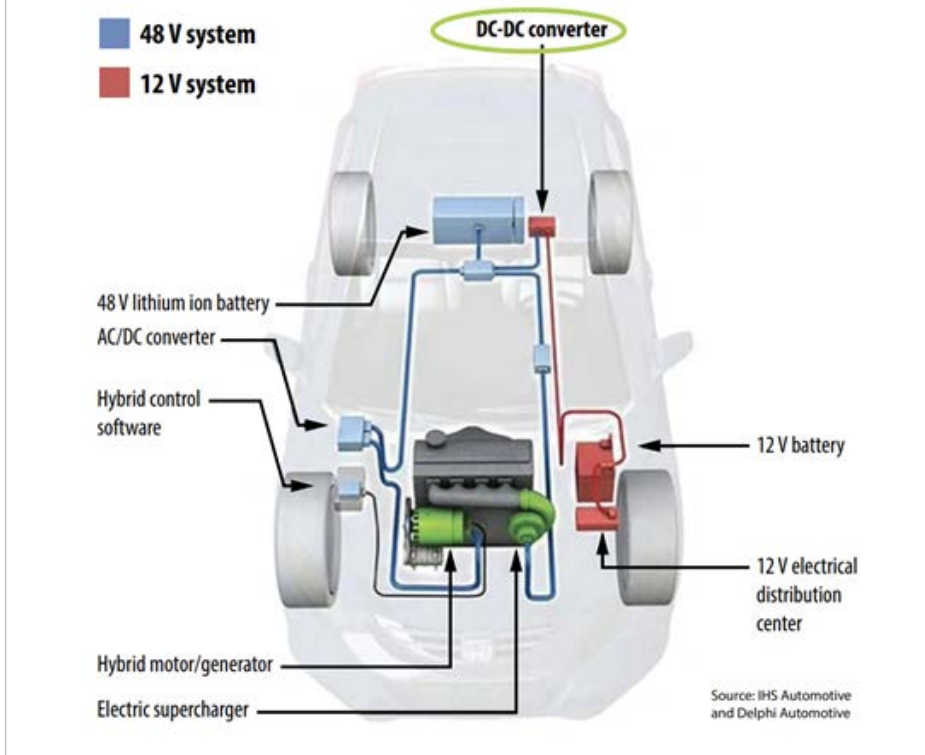


Figura 1: Tendenze di penetrazione dei sistemi mild hybrid a 48V nei principali mercati globali
(Fonte: S&P Global Mobility, Global Light Vehicle Production-based Powertrain Forecast, dicembre 2025)

Figura 2: Schema di un'architettura di sistema mild hybrid a 48V (Fonte: EPC)



singola cifra di efficienza. Frequenza di commutazione, numero di fasi, dimensioni dei componenti magnetici, margine termico, robustezza all'EMI e costo totale del sistema interagiscono tra loro e si vincolano nel progetto finale.

Nei nostri due precedenti articoli tecnici abbiamo discusso del valore a livello di sistema del GaN, rispettivamente negli azionamenti dei motori di robot umanoidi e nelle catene di alimentazione dei data center AI. Il convertitore automobilistico 48V <-> 12V rappresenta l'applicazione della stessa logica tecnica in un terzo scenario. I vincoli, tuttavia, sono chiaramente cambiati: i data center danno priorità alla densità di potenza e alla gestione termica; i robot enfatizzano la miniaturizzazione e la risposta dinamica, mentre le applicazioni automobilistiche si concentrano sull'affidabilità, sulla compatibilità con il processo produttivo e sul costo totale del sistema.

È proprio qui che risiede il valore di EPC in questo scenario. Per capire come questi vincoli ridefiniscano il percorso di adozione del GaN, abbiamo intervistato gli

esperti EPC sulle sfide ingegneristiche ad esso associate. Riguardo al convertitore bidirezionale 48V <-> 12V, EPC non offre un unico punto di vendita a livello di componente, bensì un percorso completo che spazia dalle caratteristiche del dispositivo ai progetti di riferimento, dalla verifica dell'affidabilità all'implementazione per la produzione di massa. Riconoscere questo è più importante che concentrarsi esclusivamente su una singola cifra di efficienza.

LA VERA FORZA TRAINANTE DIETRO IL 48V È LA RICOSTRUZIONE DEI COSTI DI SISTEMA

Nei programmi dei veicoli del 2026, qual è la ragione principale per cui gli OEM stanno espandendo il dominio a 48V? A vostro avviso, cosa sta effettivamente guidando i volumi oggi (ad esempio, riduzione del rame, nuovi carichi ad alta potenza, prestazioni start-stop/regen o architetture zonali)?

L'adozione di un bus di distribuzione elettrica a 48V è guidata dal risparmio sui costi. Questi risparmi sui costi sono realizzati attraverso il ridotto utilizzo di pesanti cablaggi in rame,

minori costi di produzione derivanti dal non dover assemblare auto con spessi cavi di rame che non si piegano facilmente all'interno della carrozzeria e i risparmi sui costi derivanti da sistemi a 48V di minor costo e peso come compressori per aria condizionata, pompe di raffreddamento, starter-alternatori, sterzo elettrico, nonché batterie agli ioni di litio a 48V più piccole e leggere su alcuni dei veicoli più avanzati.

Punto chiave di questa risposta:

la logica di crescita alla base del 48V risiede nella ristrutturazione dei costi sistemici, piuttosto che nell'essere guidata dalla domanda di un singolo carico ad alta potenza.

A 48V, la corrente richiesta per pilotare la stessa potenza è un quarto di quella a 12V, consentendo una riduzione significativa dell'area della sezione trasversale del cavo. Questa è la stessa logica alla base della distribuzione di potenza a 48V nei data center, ma i fattori trainanti differiscono: i data center sono guidati dalla densità, mentre il settore automobilistico è guidato dai costi. Ciò implica anche che l'adozione del 48V procederà a un ritmo più costante e diffuso, non limitato ai modelli di punta, ma partendo dai modelli più sensibili ai costi e diffondendosi verso i modelli meno costosi. Per i team di progettazione dei convertitori 48V <-> 12V: la pressione sui costi è onnipresente e nessuna soluzione può concentrarsi esclusivamente sulle metriche di efficienza.

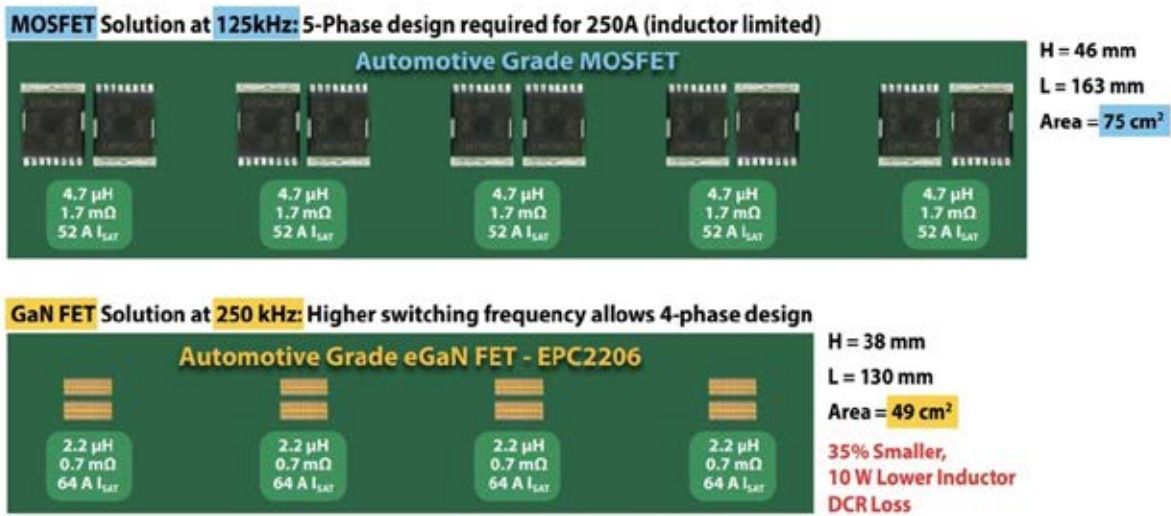
IL VALORE DEL GAN IN QUESTO SCENARIO È EVIDENTE INNANZITUTTO IN TERMINI DI DIMENSIONI E PESO

Quando il GaN viene utilizzato nella conversione 48V <-> 12V, in che caso offre il vantaggio a livello di sistema più affidabile? Se possibile, si prega di basare la risposta su un esempio di alto livello (ad esempio, intervallo di potenza, di corrente o di frequenza di commutazione), senza rivelare dettagli progettuali sensibili.

Il vantaggio a livello di sistema più evidente nell'utilizzo del GaN riguarda le dimensioni e

sada

Figura 3: Confronto dimensionale di soluzioni da 3kW 48V/12V basate su eGaN FET e MOSFET in silicio (Fonte: EPC)



il peso del sistema. I convertitori DC-DC che utilizzano il GaN possono essere del 10-20% più efficienti in termini di perdite di potenza, ma questo è un vantaggio minore rispetto al risparmio di peso di svariati chilogrammi. Questi risparmi di peso derivano sia da componenti più piccoli (che costano meno) sia da requisiti di raffreddamento ridotti. I ridotti requisiti di raffreddamento a volte significano l'eliminazione del raffreddamento a liquido o la possibilità di posizionare il sistema in una posizione più conveniente, ma termicamente peggiore, nel veicolo.

Una riduzione delle perdite del 10-20% è un dato solido, ma la valutazione di EPC è che le dimensioni e il peso siano i vantaggi più convincenti del GaN nei sistemi automobilistici a 48V. La ragione è semplice: per il veicolo nel suo complesso, il volume e il peso del convertitore determinano dove può essere installato, se è necessario il raffreddamento a liquido e il suo impatto sul peso complessivo e sul layout spaziale del veicolo; queste sono variabili a livello di sistema che le cifre di efficienza non possono catturare. In AB016, EPC utilizza come esempio un sistema da 3 kW, 48V/12V, 250A.

Confronto dell'architettura:

- **Soluzione MOSFET:**
125 kHz per fase, cinque fasi,

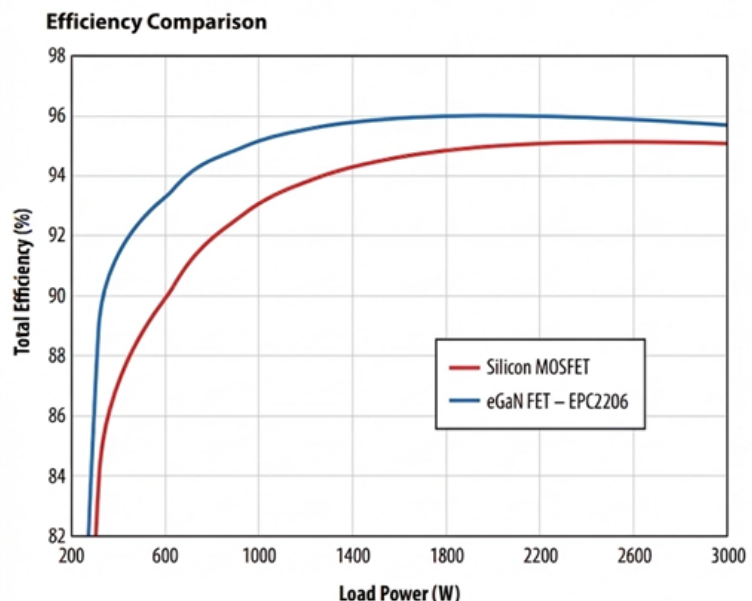
- induttore da 4,7 μH/1,7 mΩ/52 A per fase, area della soluzione 75 cm² (163 × 46 mm);
- **Soluzione eGaN (EPC2206):**
250 kHz per fase, quattro fasi, induttore da 2,2 μH/0,7 mΩ/64 A per fase, area della soluzione 49 cm² (130 × 38 mm).

Benefici chiave:

- 35% di riduzione dell'ingombro della soluzione;
- 10W di riduzione delle perdite DCR dell'induttore;
- **Una fase in meno** significa un set di induttori, FET e driver in meno. La leva principale per ridurre le dimen-

Figura 4: Confronto dell'efficienza tra eGaN FET e MOSFET in silicio in un sistema da 3kW 48V/12V (Fonte: EPC AB016)

GaN is ... MORE EFFICIENT



sioni è la frequenza di commutazione. I dispositivi GaN della famiglia 100V hanno un FOM di commutazione pari a circa un quarto di quello dei MOSFET in silicio equivalenti, il che significa che la frequenza può essere raddoppiata o più a parità di budget di perdita, con una conseguente riduzione significativa del volume dell'induttore.

Questa non è solo un'extrapolazione teorica: nella sua nota applicativa AN026, EPC ha testato sistematicamente 40 induttori appartenenti a 9 famiglie di prodotti di 4 produttori, tracciando una curva completa di ottimizzazione frequenza-induttanza-perdita: induttori più piccoli spingono le frequenze ottimali più in alto e il basso FOM del GaN rende questo punto ottimale realmente raggiungibile.

Le dimensioni ridotte offrono non solo risparmio di spazio, ma riducono direttamente anche i costi della distinta base (BOM). I costi totali sono diminuiti di circa il 20%. Questo è precisamente l'aspetto più convincente di EPC nell'applicazione automobilistica a 48V: qui il GaN non è semplicemente un'alternativa "a maggiore efficienza ma più costosa", bensì un approccio di sistema che riduce simultaneamente le dimensioni, allevia le sfide della gestione termica e abbassa i costi del sottosistema. Per le case automobilistiche, questo tipo di struttura dei benefici è ciò che le rende davvero attraenti.

IL PRIMO OSTACOLO ALLA PRODUZIONE DI MASSA NON È MAI STATO L'EFFICIENZA

Per un convertitore 48V <-> 12V di produzione, qual è tipicamente il primo vincolo "go/no-go": la mappa di efficienza (incluso il carico leggero), il margine termico, il margine EMI, il comportamento transitorio o il costo BOM? Qual è la causa principale di quel vincolo?

Il primo requisito go/no-go nell'elettronica automobilistica è l'affidabilità, seguita molto da vicino dal costo. I produttori automobilistici sono molto cauti riguardo alle nuove tecnologie perché le conseguenze — un richiamo del veicolo o un problema di sicurezza — sono

estremamente costose e possono danneggiare una reputazione costruita con cura. L'affidabilità del sistema ha molte dimensioni, tra cui il margine termico e il ciclo termico in condizioni estreme. Include anche la robustezza del sistema in caso di un comportamento transitorio imprevisto. Progettare per un'adeguata robustezza può comportare costi significativi per il sistema e, pertanto, componenti ben caratterizzati con condizioni di sovraccarico transitorio documentate statisticamente rappresentano un vantaggio significativo.

Questo passaggio articola chiaramente le differenze tra le applicazioni automobilistiche e gli altri scenari. I data center danno priorità alla densità di potenza e alla progettazione termica, mentre i robot umanoidi si concentrano sulle dimensioni e sulla risposta dinamica, ma non sul settore automobilistico. Per le applicazioni automobilistiche, l'affidabilità è sempre la massima priorità, seguita dal costo, con l'efficienza che arriva per ultima. Questo perché l'industria automobilistica teme i guasti imprevedibili molto più che le metriche prestazionali non ottimali. La risposta di EPC a questo ostacolo inizia con la certificazione di grado automobilistico. Le sue serie di FET eGaN da 80 V, EPC2206, EPC2218A e EPC2204A, sono tutte certificate secondo AEC-Q101. Tuttavia, AEC-Q101 è solo il punto di partenza per entrare nell'ecosistema automobilistico; ciò che interessa davvero agli OEM è se la durata del dispositivo in condizioni operative reali sia prevedibile e sufficientemente verificabile.

Questa è precisamente la domanda a cui EPC cerca di rispondere nel suo ultimo **Phase 18 Reliability Report**. Il nucleo di questo rapporto non consiste solo nel presentare i risultati dei singoli test, ma anche nello stabilire una corrispondenza tra i test accelerati di laboratorio e i profili di missione reali. Per raggiungere questo obiettivo, EPC ha ulteriormente affinato la sua analisi di affidabilità su tre dimensioni direttamente rilevanti per gli scenari DC-DC automobilistici:

- **Gate Wearout:** confini di affidabilità dei gate pGaN in condizioni di commuta-

zione dinamica, direttamente correlati alla commutazione ad alta frequenza sopra i 250 kHz nei convertitori a 48V;

- **Robustezza alle sovratensioni**

Drain-Source: confini di guasto e fattori di accelerazione sotto sovraccarico transitorio, una preoccupazione fondamentale in condizioni operative difficili come i carichi residui (load dump) automobilistici;

- **Usura termomeccanica:**

Meccanismi di durata del ciclo di temperatura a livello di chip e package, un input chiave per gli scenari di ciclo di temperatura del vano motore.

La Fase 18 ha anche introdotto soluzioni personalizzate per la valutazione dell'affidabilità per applicazioni a livello di missione, come gli azionamenti per motori; il contenuto pertinente è stato sottoposto a revisione paritaria e pubblicato in conferenze e riviste internazionali. Shengke Zhang, vicepresidente per l'affidabilità dei prodotti di EPC, lo spiega semplicemente: identificando i meccanismi di usura intrinseci e correlandoli alle condizioni di sollecitazione a livello di missione, la durata del dispositivo può essere prevista con maggiore precisione, a supporto di una progettazione del sistema più affidabile. Per le case automobilistiche, il livello di documentazione statistica stesso rappresenta un valore ingegneristico, poiché influenza direttamente il modo in cui vengono stabiliti i margini di progettazione, allocati i costi di verifica e definiti i confini di rischio.

Le specifiche dei tre FET eGaN da 80V di EPC per applicazioni 48V <-> 12V illustrano ulteriormente questo punto, come evidenziato nella *tabella 1*.

Dal punto di vista delle caratteristiche del dispositivo, una QRR pari a zero è un indicatore critico. I dispositivi GaN in modalità di arricchimento non presentano carica di recupero inversa, il che significa che, durante il processo di commutazione hard dei convertitori bidirezionali, una fonte di perdita può essere eliminata direttamente, fornendo un margine più ampio per la compressione del tempo morto (*dead-*

Tabella 1: Fonte dati tabella: EPC, AB016 eGaN FETs and ICs for Automotive DC-DC Applications

Parametri	EPC2206	EPC2218A	EPC2204A
V _{DS}	80V	80V	80V
R _{DS(on)} tip.	1.8 mΩ	2.4 mΩ	4.4 mΩ
Q _G tip. @50V	15 nC	10.5 nC	5.7 nC
QGD tip. @50V	3 nC	1.5 nC	0.8 nC
Q _{OSS} tip. @50V	72 nC	46 nC	25 nC
Q _{RR}	0 nC	0 nC	0 nC
Dimensioni dispositivo	13.9 mm ²	6.8 mm ²	3.75 mm ²

time). Nei convertitori bidirezionali automobilistici 48V<-> 12V, ciò non si traduce solo in minori perdite di commutazione, ma comporta anche meno eventi EMI e ridotte sfide di certificazione.

I BENEFICI DELL'ALTA FREQUENZA POSSONO ESSERE OTTENUTI? TUTTO INIZIA CON LA DISCIPLINA DEL LAYOUT

I fronti rapidi e il ringing sono preoccupazioni comuni. Quali due "parapetti" di progettazione contano di più per rendere producibile e ripetibile un convertitore GaN 48V <-> 12V ad alta densità (ad esempio, disciplina del layout, strategia di gate-drive, scelte dei magnetici, filtraggio, protezione, metodologia di validazione)?

La disciplina del layout è il problema più importante che riscontriamo quando i clienti adottano il GaN. Quando si passa a una frequenza di conversione più elevata, la sensibilità all'induttanza parassita esterna aumenta. Un layout scadente causerà oscillazioni di sovratensione e sovracorrente che possono influire sull'affidabilità del sistema. Un layout scadente può anche aumentare l'EMI, il cui rimedio può rivelarsi costoso.

Questa risposta evidenzia il vincolo ingegneristico più pratico per il GaN nelle

applicazioni automobilistiche: l'alta frequenza non si traduce automaticamente in benefici di sistema, a meno che il layout non sia adeguatamente progettato. Per i convertitori da 48V a 12V, il vero problema non è se la frequenza possa essere aumentata, ma se i parametri parassiti rimangano entro limiti controllabili dopo l'aumento della frequenza. Nello specifico, i due tipi più critici di induttanza parassita sono:

1. Induttanza del loop di potenza: il loop di commutazione tra i FET di lato alto e lato basso deve essere il più corto e compatto possibile. Sebbene il packaging LGA dei FET eGaN abbia eliminato l'induttanza parassita causata dal wire bonding, il posizionamento dei condensatori di disaccoppiamento, lo sbroglio delle tracce

in rame e il design dei via a livello di PCB determinano ancora i livelli di ringing del sistema in condizioni di elevato dv/dt;
2. Induttanza di sorgente comune: l'induttanza parassita nel percorso del terminale source influisce direttamente sulla risposta del gate drive, causando ulteriore distorsione dei tempi di commutazione. Questo è il motivo per cui, nei progetti ad alta frequenza, l'induttanza di sorgente comune spesso non è solo un "problema di efficienza" ma un "problema di ripetibilità": determina se le prestazioni di un prototipo possono essere replicate in modo affidabile nelle implementazioni a livello di scheda prodotte in serie.

I dati dei test di AB016 illustrano ulteriormente questo punto: sebbene le

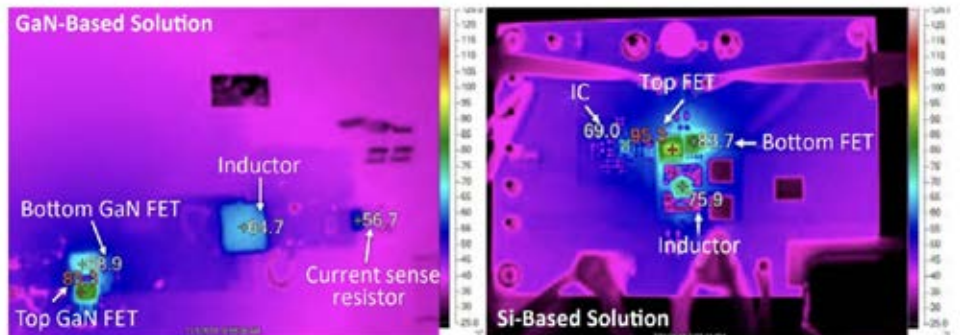


Figura 5: Confronto delle prestazioni termiche tra FET eGaN (EPC2055) e MOSFET in silicio - nonostante le loro dimensioni ridotte, le temperature degli hotspot sono circa 10 °C più basse (Fonte: EPC AB016)

dimensioni fisiche del FET eGaN siano significativamente più piccole di quelle del MOSFET in silicio, in condizioni di layout corrette la soluzione basata su GaN mostra effettivamente una temperatura di hotspot inferiore di circa 10 °C in assenza di flusso d'aria o di dissipatore di calore: le minori perdite di stato attivo e di commutazione sono la causa principale. Ciò è di significativa importanza per gli scenari di raffreddamento passivo automobilistico: i convertitori potrebbero non richiedere il raffreddamento a liquido e persino essere installati in posizioni più convenienti, ma con ambienti termici peggiori.

In altre parole, un layout disciplinato è un prerequisito per la realizzazione di successo del GaN nelle applicazioni ad alta frequenza. Solo con un layout corretto, le basse perdite e le piccole dimensioni del GaN possono tradursi in benefici tangibili per il sistema; altrimenti, gli stessi dispositivi potrebbero invece causare problemi di ringing ed EMI più gravi.

PROGETTI DI RIFERIMENTO AUTOMOBILISTICI A 48V

Dopo aver discusso le caratteristiche del dispositivo, l'affidabilità e la disciplina del layout, la domanda pratica che i team di progettazione devono affrontare è: da dove

iniziare? La risposta di EPC è un insieme di progetti di riferimento a livello di sistema che raggruppano selezione del dispositivo, controller, layout e magnetici in piattaforme verificate e pronte per essere valutate, come evidenziato nella seguente tabella:

Questi tre progetti coprono due percorsi topologici distinti. EPC9159 è un convertitore LLC a rapporto fisso che misura appena 17,5 mm × 22,8 mm, raggiungendo una densità di potenza di 5.130 W/in³ con un'efficienza di picco del 98% (96,2% a pieno carico di 83 A), rappresentando il limite di ciò che il GaN abilita in termini di densità estrema. EPC9163 e EPC9165 sono moduli di potenza bidirezionali scalabili destinati allo scenario più tipico di distribuzione della potenza mild-hybrid 48V <-> 12V: EPC9163 utilizza otto dispositivi EPC2218 che operano a 500 kHz; EPC9165 passa all'EPC2302 con package QFN, con un intervallo di tensione di uscita regolabile da 12V a 36V.

Entrambi supportano la scalabilità modulare: 1 kW per fase, 4 kW con due moduli in parallelo e 6 kW con tre moduli. Tutti e tre i progetti condividono lo stesso modulo di controllo (EPC9528 + Microchip dsPIC33CK256MP503), garantendo curve di apprendimento coerenti e il riutilizzo del software tra diversi livelli di potenza e topologie. Per i team di progettazione, il

valore di questo portafoglio risiede nell'offrire una linea di partenza ingegneristica completa da 1 kW a 6 kW, con layout validati, controller sintonizzati e un percorso di scalabilità della potenza definito.

L'OSTACOLO PIÙ FACILMENTE SOTTOVALUTATO RISIESTE SULLA LINEA DI PRODUZIONE

Avete affermato che efficienza, densità di potenza, dimensioni e costi sono al vertice della gerarchia dei requisiti per la conversione 48V <-> 12 V. Per un tipico progetto della classe da 2 – 3 kW, qual è il requisito più difficile da sacrificare e su cosa i team ottimizzano troppo in anticipo?

"Nella nostra esperienza, il compromesso più difficile riguarda la modifica dei processi di assemblaggio automobilistici esistenti. Se un nuovo dispositivo richiede anche solo una minima regolazione del processo di assemblaggio, il costo e la difficoltà percepiti spesso scoraggiano l'intenzione di adottarlo, anche se offre vantaggi significativi in termini di costi e affidabilità. Pertanto, i processi produttivi più flessibili sono spesso quelli più innovativi".

Questa affermazione può sembrare un'osservazione casuale basata sull'esperienza, ma è molto specifica del settore automobilistico. Molte nuove tecnologie non

Tabella 2: Fonte: Pagina web EPC relativa a 48V Hybrid Power DC-DC (epc-co.com)

Parametri	EPC2206	EPC2218A	EPC2204A
V _{DS}	80V	80V	80V
R _{DS(on)} tip.	1.8 mΩ	2.4 mΩ	4.4 mΩ
Q _G tip. @50V	15 nC	10.5 nC	5.7 nC
Q _{GD} tip. @50V	3 nC	1.5 nC	0.8 nC
Q _{OSS} tip. @50V	72 nC	46 nC	25 nC
Q _{RR}	0 nC	0 nC	0 nC
Dimensioni dispositivo	13.9 mm ²	6.8 mm ²	3.75 mm ²

muoiono in laboratorio, né muoiono sulle curve di efficienza; muoiono ai cancelli della fabbrica. I data center possono personalizzare i progetti a livello di scheda per densità estreme e molti progetti di robot umanoidi sono ancora nella fase di prototipazione in piccoli lotti, dove la flessibilità del processo è maggiore. L'automotive è diverso.

Le linee di assemblaggio delle case automobilistiche e dei fornitori Tier 1 hanno stabilito da tempo sistemi stabili centrati su packaging specifici, processi di saldatura, specifiche di test e documentazione di qualità. Anche se un nuovo componente richiede solo una minima regolazione alla linea di produzione, può innescare l'intero costo di rivalidazione, ricertificazione e reintroduzione.

Molti FET e GaN di EPC utilizzano un package LGA a pad inferiore, altamente compatibile con i processi di montaggio SMT QFN standard. Questa scelta non serve solo a ridurre i parametri parassiti, ma anche a raggiungere l'obiettivo dell'integrazione della produzione di massa. Spesso, la vera innovazione non risiede nel fatto che un singolo dispositivo sia estremo, ma nel fatto che possa entrare nella catena di fornitura mainstream senza interrompere i sistemi di produzione esistenti. EPC offre anche una gamma completa di pacchetti QFN (Quad-Flat-No-Lead) che talvolta si integrano più facilmente nelle linee di produzione mature e standard. Cercate le versioni qualificate secondo AEC Q-101 entro fine 2026.

VALUTARE IL GAN: EVITARE L'APPROCCIO "REPLACEMENT"

D: Se poteste dare una regola empirica per mantenere oneste le valutazioni del GaN a 48V, quale sarebbe? E qual è una trappola comune che porta i team a trarre conclusioni errate?

R: Se un progettista di sistemi vuole mantenere tutto invariato e limitarsi a sostituire i suoi vecchi MOSFET con un dispositivo GaN, rimarrà deluso. I risparmi ottenibili partendo da un progetto da zero sono piut-

tosto straordinari, ma richiedono più cura e impegno.

Questa affermazione può essere considerata la chiave metodologica generale dell'intero articolo. Che si tratti dei cambiamenti nelle dimensioni dell'induttore, della disciplina del layout e dei percorsi termici discussi in precedenza, o della migliore ripetibilità offerta dall'integrazione, tutti condividono una premessa comune: il valore del GaN non si materializza automaticamente "sostituendo un singolo dispositivo", ma viene sbloccato attraverso la riprogettazione del sistema.

Questo principio concorda con le conclusioni dei due articoli precedenti. Nelle applicazioni dei data center, la vera chiave risiede nel ridistribuire l'elevata corrente e lo stress termico all'interno del sistema; nella robotica umanoide, la vera chiave risiede nella ricostruzione dell'intero sistema - dalla meccanica e dalla gestione termica alla scheda driver. Quando si tratta di convertitori automobilistici 48V 12V, questa logica rimane invariata; i vincoli si espandono semplicemente dalla densità e dal volume, per includere anche l'affidabilità, la controllabilità del layout e la compatibilità con il processo di assemblaggio.

Pertanto, il concetto di "partire da zero" non è solo uno slogan astratto, ma un giudizio ingegneristico concreto: se il team di sistema continua ad aderire alle condizioni al contorno della soluzione MOSFET originale e si limita a sostituire i dispositivi di commutazione con il GaN, il risultato spesso non sarà il pieno beneficio, ma piuttosto nuovi problemi di alta frequenza. Al contrario, solo riesaminando induttori, layout, percorsi termici e metodi di integrazione dei dispositivi da una prospettiva di sistema, il valore del GaN si manifesterà in modo misurabile.

Il criterio di valutazione corretto non è "cosa succede quando il GaN viene inserito in un vecchio sistema", ma piuttosto "se un sistema GaN riprogettato può riscrivere i vincoli originali pur raggiungendo gli stessi obiettivi".

CONCLUSIONE

Attraverso questi tre articoli, abbiamo discusso dei percorsi di implementazione del GaN in tre scenari distinti: robot umanoidi, data center AI e sistemi automobilistici a 48 V. Sebbene le sfide tecniche affrontate in ciascuno siano diverse, la logica sottostante rimane coerente: **il valore più grande del GaN non risiede nel sostituire semplicemente i componenti esistenti, ma nello sbloccare opportunità di riprogettazione nei punti in cui il sistema incontra i primi vincoli.**

Nei robot umanoidi, questo vincolo si manifesta principalmente come limitazioni spaziali e raffreddamento passivo; nei data center, si manifesta come colli di bottiglia della densità a basse tensioni ed elevate correnti a livello di scheda; e nei convertitori automobilistici da 48V a 12V, le sfide sono ancora più pratiche e complete: l'affidabilità deve essere garantita per prima, il layout deve essere sufficientemente controllato e i processi di assemblaggio devono ridurre al minimo le interruzioni dei sistemi di produzione di massa esistenti.

Proprio per questo motivo, il valore del GaN nelle applicazioni automobilistiche non dovrebbe essere ridotto in modo semplicistico a "maggiore efficienza" o "maggiore frequenza".

Ciò che ridefinisce veramente è qualcos'altro: se i team di sistema possono ancora ottenere una nuova libertà di progettazione all'interno dei vincoli stabiliti per il costo del veicolo, la gestione termica e la produzione.

In questo senso, il convertitore da 48V a 12V non è solo un normale modulo DC-DC automobilistico, ma una finestra per capire se il GaN sia davvero entrato nell'ecosistema dell'ingegneria automobilistica mainstream.

In definitiva, ciò non dipende dal parametro di un singolo componente, ma dal fatto che il sistema giustifichi una riprogettazione e che le linee di produzione siano disposte ad abbracciarla.

Smart sensing industriale: nodi con AI e DSP integrati

Un nodo di smart sensing non è definito dalla presenza di una rete neurale. È definito dalla sua capacità di acquisire, filtrare, interpretare e reagire localmente, con vincoli reali di tempo, energia e memoria. Nel 2026 questa capacità non è più teorica: i microcontrollori integrano estensioni vettoriali DSP e acceleratori neurali nello stesso die, i sensori MEMS eseguono algoritmi a bordo, e i framework di machine learning producono modelli che occupano pochi kilobyte. Ma il fatto che si possa fare non significa che venga sempre farlo. La domanda progettuale vera non è "metto l'AI sul sensore?", ma: dove elaboro cosa, con quale architettura, e perché.

Questo articolo affronta la questione dal punto di vista di chi progetta sistemi embedded per l'automazione e l'IoT, partendo dalla distinzione che molti sottovalutano: cosa è DSP e cosa è AI, e quando serve davvero l'uno, l'altro, o entrambi.

DSP PRIMA DELL'AI: IL LIVELLO CHE MOLTI SOTTOVALUTANO

Filtraggio, FFT e feature extraction

In vibrazioni, corrente, pressione, audio e

segnali MEMS, gran parte del valore nasce ancora da catene di signal processing ben progettate. Denoising, decimazione, FFT, analisi a involuppo, estrazione di feature robuste (RMS, kurtosis, fattore di cresta, energie in banda). Queste operazioni sono deterministiche, verificabili, a basso consumo, e producono risultati interpretabili. Un filtro FIR che estrae la banda di interesse da un segnale vibrazionale non ha bisogno di dati di training, non soffre di drift, e si valida con un generatore di segnale.

Le estensioni vettoriali Helium (MVE, Armv8.1-M), disponibili sui core Cortex-M55 e M85, portano 4-5× di accelerazione su FFT e filtri FIR rispetto al Cortex-M4 a parità di clock, con FP16 vettoriale nativo. Per chi lavora con microcontrollori intelligenti per IoT, questo significa che la pipeline DSP che prima saturava un M4 ora gira con margine su un M55, lasciando cicli liberi per l'elaborazione successiva.

Dove il DSP resta la scelta migliore

Misure ripetitive con signature note. Soglie evolute ma stabili. Compressione intelligente per ridurre banda e RAM. Pre-processing che trasforma un

segnale grezzo in poche feature pronte per la trasmissione o per un classificatore. In tutti questi casi, il DSP non è un ripiego: è la scelta ottimale. Nel benchmark HUMS 2023 sui riduttori in endurance, le pipeline di signal processing tradizionale hanno superato i detector deep learning su tutti i canali testati. Nella MCSA (*Motor Current Signature Analysis*), la stima spettrale con decomposizione wavelet resta la tecnica più robusta per diagnosticare rotori rotti e eccentricità sotto carichi variabili.

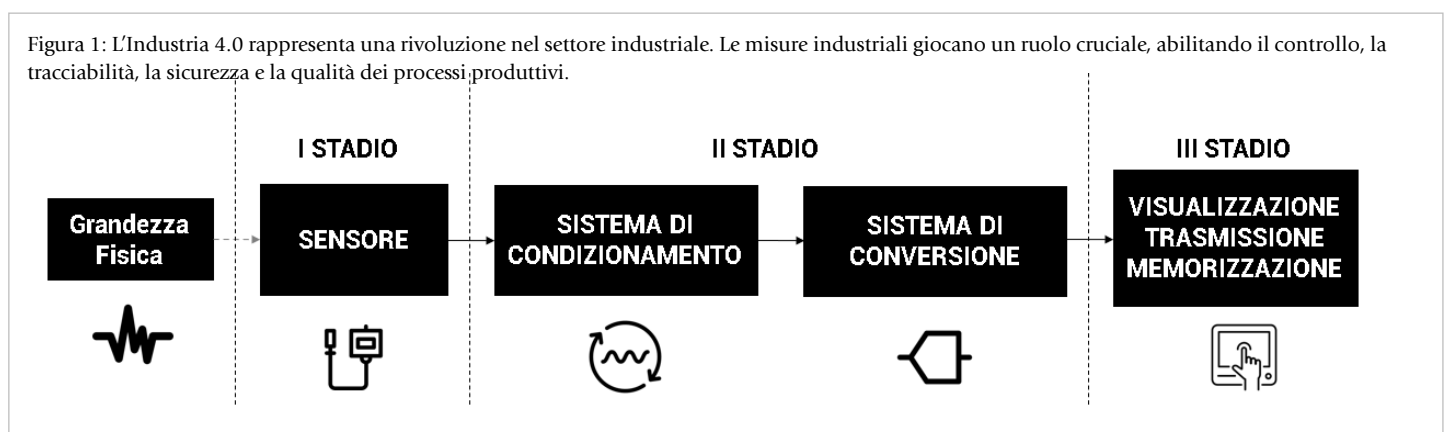
Quando le feature non bastano più o il contesto operativo è troppo variabile, lì entra in gioco l'AI.

QUANDO L'AI EMBEDDED HA SENSO DAVVERO

Pattern complessi, variabilità elevata, classificazione locale

L'AI aggiunge valore in tre scenari precisi. Il primo: quando la signature di guasto è sconosciuta e non esistono dati etichettati di guasto. È il caso dell'anomaly detection su una macchina nuova, dove un autoenco-

Figura 1: L'Industria 4.0 rappresenta una rivoluzione nel settore industriale. Le misure industriali giocano un ruolo cruciale, abilitando il controllo, la tracciabilità, la sicurezza e la qualità dei processi produttivi.



der sull'errore di ricostruzione o un one-class SVM sulle feature DSP rileva deviazioni dal profilo appreso senza sapere cosa sta cercando. Il secondo: con condizioni operative fortemente variabili dove le soglie fisse producono falsi allarmi inaccettabili. Studi recenti su motori asincroni riportano il 96% di accuratezza con classificatori ML single-sensor e oltre il 99% fondendo scalogrammi di corrente e immagini termiche tramite CNN. Il terzo: nella fusione multi-sensore non lineare (accelerometro + corrente + temperatura + acustico) dove gli algoritmi formulaici peggiorano rapidamente.

Il pattern che si afferma nella produzione industriale è ibrido: DSP per l'estrazione feature, seguito da un classificatore ML compatto. Non "AI everywhere", ma AI dove serve.

Quando invece è solo complessità inutile

Se il problema è lineare, stabile e ben modellabile, il DSP classico o le regole deterministiche restano la scelta migliore. Serve davvero una rete neurale per distinguere un evento che un filtro e tre feature separano già bene? La risposta, in molti casi industriali, è no. Un modello ML aggiunge complessità di training, rischio di drift, necessità di validazione su dati reali, e un layer di opacità che in contesto safety non è trascurabile. Chi progetta sistemi di misura per l'Industria 4.0 sa che la ripetibilità e l'interpretabilità del risultato contano quanto l'accuratezza.

LE ARCHITETTURE CHE OGGI CONTANO PER SMART SENSING

MCU con DSP vettoriale

La famiglia Cortex-M55 con Helium rappresenta il salto generazionale nel DSP embedded. Le istruzioni vettoriali a 128 bit con supporto INT8/INT16/FP16/FP32 accelerano sia le catene DSP classiche sia l'inferenza di reti neurali quantizzate, usando gli stessi registri. In pratica: un M55 senza acceleratore neurale chiude già la maggior

parte dei casi di keyword spotting, riconoscimento attività, anomaly detection vibrazionale e fusione sensori di piccola taglia. Per chi viene dal Cortex-M4, il guadagno su CMSIS-NN (le librerie Arm ottimizzate per inferenza) è nell'ordine di 5-15× a seconda del kernel e della precisione. Il Cortex-M85 spinge oltre, arrivando a 6,3 CoreMark/MHz con disponibilità fino a 1 GHz.

MCU con acceleratore neurale integrato

Quando il solo DSP vettoriale non basta, la generazione 2024-2026 di MCU integra NPU (*Neural Processing Unit*) dedicate nello stesso die. L'architettura tipica prevede un core Cortex-M per il controllo e il pre/post-processing DSP, affiancato da un acceleratore che esegue i layer della rete neurale in parallelo. I risultati misurati su piattaforme in produzione parlano chiaro: modelli di object detection che su un Cortex-M7 impiegano 3 secondi, su un MCU con NPU girano in 20-30 ms. Per la computer vision embedded a 30+ FPS su risoluzioni 256×256 o superiori, l'NPU è necessaria. Per audio always-on e vibrazione, spesso no.

Il punto da tenere a mente: l'NPU accelera l'inferenza ML, ma il core Cortex-M con Helium diventa più importante, non meno. FFT, MFCC, normalizzazione, softmax, decodifica bounding box, NMS: tutto il preprocessing e postprocessing gira sul core DSP, e spesso domina il budget energetico complessivo. Chi progetta l'architettura deve dimensionare entrambi.

Smart sensor con elaborazione a bordo

Il confine tra sensore e MCU sta sfumando. I sensori MEMS più recenti integrano nel package un core programmabile con FPU, fino a 32 KB di RAM, capace di eseguire FFT, filtri, piccole reti neurali e anomaly detection senza svegliare il microcontrollore esterno. Il consumo dell'intera catena (acquisizione + elaborazione + classificazione) resta sotto il milliampere. La logica è semplice: se l'algoritmo è fisso e la

batteria è il vincolo, conviene spostare l'intelligenza nel sensore. Se il modello deve evolvere via OTA e la RAM serve in abbondanza, il sensore resta "dumb" e l'intelligenza sta sull'MCU.

Per chi segue l'evoluzione dei sensori IIoT, è un cambio architetturale concreto: il sensore non si limita a misurare, ma filtra, classifica e decide se comunicare.

DOVE FAR GIRARE COSA: SENSORE, NODO SMART SENSING, GATEWAY

La distribuzione del carico computazionale è il primo atto progettuale di un nodo intelligente.

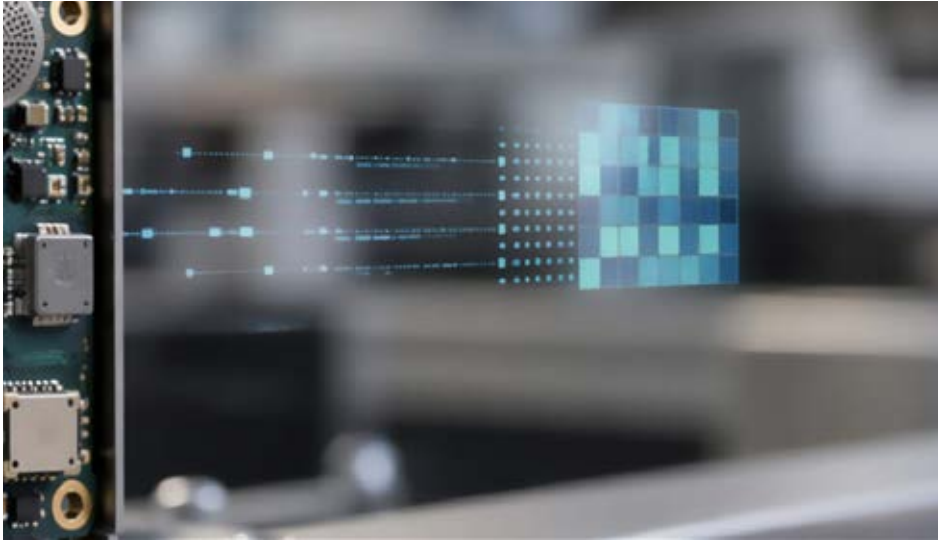
Il sensore tiene a bordo: bias correction, sensor fusion di base, event detection, wake-up intelligente. Consuma microampere, trasmette solo quando c'è qualcosa da segnalare. Il nodo edge gestisce: feature extraction pesante, inferenza locale, logica di controllo, connettività. Il backend si occupa di: training dei modelli, fleet analytics, correlazioni lunghe tra macchine, distribuzione OTA.

La trasmissione del dato grezzo verso il cloud è quasi sempre un errore. Si trasmettono feature estratte, embedding compressi, decisioni con livello di confidenza, o riassunti periodici. I modelli aggiornati viaggiano in direzione opposta.

LE METRICHE CHE CONTANO PIÙ DEI TOPS

I numeri di marketing (TOPS, GOPS) sul datasheet hanno valore ingegneristico limitato. Le metriche che decidono se un nodo di smart sensing funziona in campo sono altre.

Latenza sensore-decisione: in un loop di condition monitoring a 250 μs, conta il tempo dall'acquisizione alla classificazione. Consumo per inferenza



(μ /inferenza): determina l'autonomia reale di un nodo a batteria; le differenze tra architetture sono di ordini di grandezza. RAM e Flash occupate dal modello reale: un modello che occupa più RAM dell'arena allocata al runtime è un brick silenzioso. Accuratezza sul dato reale di campo, non sul dataset di laboratorio: il gap è spesso superiore al 10%. Robustezza al drift: un modello che funziona al 100% sul banco non resterà al 100% per sei mesi, perché il profilo operativo cambia con usura, carichi, stagione. Tempo di boot per nodi a duty cycle basso. Aggiornabilità: l'OTA per modelli ML richiede validazione del nuovo modello in parallelo al vivo e rollback automatico se i falsi positivi salgono.

VALIDAZIONE:

DOVE FALLISCONO DAVVERO GLI SMART SENSING INDUSTRIALI

Dataset sbagliato, contesto sbagliato

Il fallimento più comune non è tecnico: è metodologico. Un modello addestrato su dati di un banco prova non generalizza a un impianto reale perché il profilo vibrazionale dipende dal montaggio, dal carico, dall'ambiente. La regola: split del dataset di test per macchina diversa e giorno diverso, mai random split. Il random split nasconde l'overfitting agli artefatti del banco. I benchmark accademici più citati

(CWRU) sono ormai saturi; il dataset Paderborn PU, con guasti naturalmente indotti, è oggi il discriminatore più affidabile.

Drift, rumore, condizioni reali

La temperatura influenza l'offset dei MEMS e la risposta del front-end analogico. L'EMI industriale può corrompere il segnale in modi che il modello non ha mai visto. Il drift (*aumento dei falsi positivi nel tempo*) si rileva monitorando la divergenza statistica sulle feature. Le contromisure: retraining incrementale on-device, selezione dinamica tra modelli candidati, self-test periodico su golden dataset in flash.

Test hardware-in-the-loop sul target smart sensing

Un nodo di smart sensing non si valida solo con accuracy offline. Si valida con prove su target reale: latenza misurata, stabilità termica ($-40...+85$ °C), robustezza EMC (IEC 61000-4), comportamento dopo OTA update. Per chi progetta sistemi di monitoraggio nell'Industria 4.0, questa è la differenza tra un prototipo che funziona in demo e un prodotto che funziona in campo.

CASI D'USO CHE VALGONO DAVVERO

Il condition monitoring vibrazionale è il caso più maturo: pipeline DSP (FFT,

envelope, feature extraction) + classificatore ML compatto, con modelli da 5-8 KB di RAM che raggiungono il 99%+ su anomaly detection. L'acoustic event detection (*cavitazione pompe, leak, keyword spotting industriale*) richiede front-end MFCC + CNN leggera; i dispositivi con acceleratore audio dedicato operano always-on sotto il milliwatt.

La visione embedded (*ispezione difetti, conteggio persone*) è dove l'NPU fa la differenza: object detection a 30+ FPS su 256×256 è possibile solo con acceleratore dedicato. La MCSA (*Motor Current Signature Analysis*) è il caso in cui DSP e ML convergono: il segnale di corrente è già nel drive, nessun sensore aggiuntivo, pipeline FFT/wavelet + classificatore ML sotto 100 KB di flash.

LA SCELTA COME ATTO PROGETTUALE

La battaglia "DSP contro AI" è un titolo da convegno. La pratica quotidiana è una pipeline ibrida in cui il signal processing fisico-basato resta il nucleo e il deep learning si aggiunge dove il DSP formulaico cede: anomaly detection senza dati di guasto, carichi variabili, fusione multi-sensore non lineare. Il cambiamento più rilevante dell'ultimo biennio non è la nascita di NPU da centinaia di GOPS. È la consapevolezza che il partizionamento tra sensore smart, edge MCU e gateway è diventato il primo atto progettuale di un nodo di smart sensing. È lì che si decide il consumo, l'autonomia, la latenza, l'aggiornabilità e la robustezza sul campo. Chi lo ignora paga in milliampere e in giorni di autonomia. Chi lo progetta bene costruisce un sistema che funziona, non solo un sistema che inferisce. **Per chi progetta elettronica embedded per l'industria, la buona notizia è che gli strumenti ci sono.** La cattiva è che usarli bene richiede competenze che attraversano hardware, firmware, signal processing e machine learning. Nel 2026 il nodo intelligente non è un componente. È un sistema.

Robodottori e sanità del futuro: come stanno cambiando la medicina

La robotica ha fatto enormi passi avanti negli ultimi anni. Grazie ai progressi nella sensoristica, nei materiali responsivi, nelle interfacce uomo-macchina (HMI), nell'intelligenza artificiale (AI) e negli algoritmi software avanzati, i robot stanno diventando sempre più versatili. Oggi assumono forme molto diverse, dai bracci robotici ai robot mobili autonomi (AMR), fino ai robot umanoidi.

I progressi di hardware e software hanno portato allo sviluppo di robot molto più reattivi e interattivi rispetto all'ambiente circostante, capaci di rispondere ai cambiamenti improvvisi in modo più intelligente. Con l'impiego crescente di robot avanzati in numerosi settori, inclusi robot umanoidi dotati di sofisticate capacità di presa e manipolazione, si sta osservando anche un crescente interesse del settore sanitario verso i medici robotici, o robodottori. Questo interesse comprende l'uso dei robot come strumento per fornire servizi sanitari di routine, prevedere emergenze mediche, rispondere ai disastri ed eseguire procedure cliniche complesse. In questo articolo vediamo più da vicino come questi robodottori stiano entrando nel mondo della medicina.

IL PRIMO OSPEDALE AI AL MONDO

Nel 2024, ricercatori della Tsinghua University in Cina hanno lanciato il primo ospedale AI al mondo: una struttura composta da medici e infermieri basati su intelligenza artificiale in grado di diagnosticare, trattare e monitorare i pazienti. Il "personale clinico" è costituito da agenti autonomi alimentati da large language models



(LLM). Finora, l'ospedale comprende quattro infermieri AI^[1] e 42 medici AI distribuiti in 21 specialità, con ciascuna specialità addestrata su oltre dieci condizioni cliniche comuni.^[2]

Gli agenti AI dell'ospedale sono addestrati per interagire in modo autonomo con i pazienti a partire dalla consultazione iniziale e tutto il percorso di cura, dalla diagnosi clinica al follow-up.

L'ospedale AI ha due obiettivi principali. Il primo consiste nell'utilizzare medici AI dotati di competenze mediche specialistiche, acquisite tramite dataset di addestramento, per offrire un accesso all'assistenza sanitaria più semplice, più economico e disponibile 24 ore su 24, 7 giorni su 7.

Il secondo obiettivo è fornire un ambiente virtuale di formazione medica per gli studenti che si avvicinano alle professioni sanitarie. L'ospedale AI mette a disposizione un ambiente virtuale, inclusi pazienti virtuali, in cui gli studenti possono affrontare diversi scenari clinici per migliorare conoscenze e competenze e, di conseguenza, ottenere valutazioni migliori e risultati migliori con i futuri pazienti.

L'ospedale AI della Tsinghua University dimostra come i robotdottori possano aumentare l'efficienza medica e rivoluzionare l'erogazione delle cure. La semplificazione dei processi sanitari è stata il risultato più significativo di questa struttura: i medici AI sono in grado di diagnosticare oltre 300 malattie e di seguire fino a 3.000 pazienti al giorno. Ancora più importante, l'ospedale AI tratta grandi volumi di pazienti mantenendo un elevato livello qualitativo, con un'accuratezza superiore al 93% secondo il benchmark MedQA.^[3]

MEDICI E INFERMIERI ROBOTICI UMANOIDI AUTONOMI

I robot umanoidi autonomi con capacità AI avanzate non appartengono più alla fantascienza. Il lancio del

robot umanoide Sophia, sviluppato da Hanson Robotics nel 2016, ha segnato l'inizio di una nuova rivoluzione nella robotica umanoide.^[4]

Grazie ai continui progressi nella tecnologia dei robot umanoidi autonomi, i robot umanoidi abilitati dall'AI stanno entrando anche nel settore sanitario. Per esempio, il robot umanoide Beomni è presente dal 2022 e fornisce servizi assistenziali rivolti agli anziani.^[5] L'integrazione dell'AI nei robot umanoidi consente loro di comportarsi in modo più simile agli esseri umani e di trasmettere caratteristiche rassicuranti, un aspetto importante per chi è diffidente all'idea di essere valutato o curato da una macchina. Questo contribuisce ad affrontare uno dei principali nodi legati all'adozione dell'AI nei diversi settori: la fiducia.

Oltre a supportare le normali attività sanitarie, i robot umanoidi possono essere impiegati in situazioni pericolose al posto di un medico umano, che altrimenti metterebbe a rischio la propria salute e sicurezza. Per esempio, nel trattamento di malattie altamente infettive, i robot umanoidi potrebbero assistere i pazienti riducendo il rischio che il personale clinico contragga e diffonda l'infezione all'interno dell'ospedale. Durante la pandemia di COVID-19, il rischio per gli operatori sanitari ha rappresentato costantemente

te un ostacolo rilevante, e i robotdottori offrono una possibile soluzione per prevenire situazioni simili in futuro, così come per affrontare epidemie più localizzate e casi di pazienti con patologie altamente contagiose.^[6]

Robotdottori per la risposta ai disastri
Se alcuni robot umanoidi si adattano bene alla gestione dei pazienti in ospedali e strutture cliniche, altri robotdottori con architettura più simile a quella di un veicolo stanno compiendo grandi progressi nell'ambito della risposta ai disastri.

Recentemente, la University of Sheffield, nel Regno Unito, ha sviluppato una nuova piattaforma robotica mobile che combina le capacità di movimento di un veicolo terrestre senza equipaggio controllato (UGV) con la tecnologia di realtà virtuale (VR), consentendo ai medici di valutare la gravità delle condizioni dei feriti in ambienti pericolosi in cui il personale sanitario sarebbe esposto a rischi. Garantendo la sicurezza degli operatori, il robot permette di effettuare un triage remoto da una distanza sicura.

Il robot UGV è dotato di due bracci robotici che consentono di azionare a distanza strumenti medici e di effettuare le prime valutazioni sui pazienti sul campo: controllo della



frequenza cardiaca, della temperatura e della pressione arteriosa. Può persino somministrare antidolorifici tramite autoiniettore ed eseguire la palpazione dell'addome.

Tutti i dati in tempo reale vengono trasmessi all'operatore, così che il personale sanitario possa prendere decisioni informate sul piano di intervento.

La fase successiva di sviluppo di questo robodottore per la risposta ai disastri punta a trasformare la tecnologia in una piattaforma medica di emergenza integrata su larga scala, rapidamente dispiegabile nelle aree colpite da eventi con numerosi feriti.^[7]

ROBODOTTORI PER L'ASSISTENZA DOMICILIARE

Anche i robodottori per uso domestico stanno emergendo come applicazione medica concreta. La telemedicina è cresciuta molto in popolarità dopo la pandemia, ma un nuovo robot sviluppato dalla National Taipei University, a Taiwan, è in grado di esaminare e diagnosticare autonomamente le persone direttamente nelle loro abitazioni. Questo robodottore è dotato di un sistema di riconoscimento visivo che attiva il sistema diagnostico del robot quando il paziente si avvicina. I dati clinici del paziente possono essere recuperati prima della diagnosi, e il robot può tenerne conto sfruttando conoscenze di livello specialistico acquisite durante l'addestramento con professionisti sanitari.

Il robot possiede un braccio con sensore cardiaco integrato e termometro incorporato, che si estende quando inizia l'esame fisico. Oltre a fornire indicazioni dirette e a salvare nel cloud i risultati della diagnosi, rendendoli accessibili ai clinici, il robodottore può coordinarsi con medici umani in ospedale tramite comunicazioni di telemedicina, così che il medico possa contribuire con ulteriori valutazioni diagnostiche.

Oltre ai controlli generali di salute, questo robodottore domiciliare è stato addestrato anche per eseguire esami dermatologici nei casi in cui il paziente presenti pustole o condizioni cutanee di origine sconosciuta. L'assistenza sanitaria semplificata offerta da questi robodottori domestici consente ai pazienti di evitare lunghe attese in ospedale o in ambulatorio.^[8]

CHIRURGIA ROBOTICA

Oltre ai robodottori autonomi e indipendenti, i robot assistono oggi i chirurghi durante gli interventi. In queste procedure robot-assistite, il chirurgo controlla il braccio robotico che sostiene gli strumenti chirurgici tramite un controller e uno schermo di visualizzazione.

Questa applicazione è spesso utilizzata negli interventi mininvasivi, perché consente di effettuare incisioni più piccole rispetto alla chirurgia manuale tradizionale. I robot chirurgici permettono operazioni più precise, poiché i bracci robotici richiedono meno spazio all'interno del corpo durante la procedura, riducendo così il trauma sui tessuti e sugli organi interni.

Il chirurgo rimane sempre al comando, e una telecamera endoscopica viene introdotta attraverso l'incisione insieme al braccio robotico per garantire la visibilità necessaria durante tutto l'intervento.

I bracci robotici vengono utilizzati dai chirurghi sia per procedure di minore entità sia per interventi più complessi, tra cui:^{[9],[10]}

- appendicectomia
- colectomia
- chirurgia dell'epilessia
- colecistectomia
- bypass gastrico
- riparazione dell'ernia
- isterectomia
- riparazione della valvola mitrale

- pancreasectomia
- chirurgia cerebrale e spinale
- chirurgia cardiotoracica
- chirurgia generale
- chirurgia ginecologica
- trattamento chirurgico dell'endometriosi
- chirurgia testa-collo transorale
- chirurgia urologica

CONCLUSIONE

Sia la robotica sia l'intelligenza artificiale hanno compiuto progressi molto significativi negli ultimi anni, e oggi le loro applicazioni includono anche numerose soluzioni mediche.

Anche se il settore sanitario è più regolamentato rispetto ad altri ambiti industriali, esistono già diversi robodottori che stanno avendo un impatto clinico concreto. Resta ancora molto lavoro da fare per migliorare robustezza e versatilità di questi sistemi, ma con il continuo avanzamento di hardware e software il numero di robodottori coinvolti nella sanità quotidiana non potrà che aumentare.

Questa crescita renderà disponibili cure essenziali a persone che hanno bisogno di assistenza regolare o immediata, soprattutto in un contesto in cui tempi di attesa e costi continuano ad aumentare in molti sistemi sanitari nel mondo.

Fonti

[1] <https://med-tech.world/news/china-worlds-first-ai-hospital-milestone-in-healthcare-innovation/>

[2] <https://med-tech.world/news/chinas-ai-hospital-transforming-healthcare/>

[3] <https://rrysysthetechnologies.com/insights/chinas-breakthrough-ai-agent-hospital>

[4] <https://www.hansonrobotics.com/sophia>

[5] <https://www.beomni.ai>

[6] <https://www.frontiersin.org/journals/communication/articles/10.3389/fcomm.2024.1420312/full>

[7] <https://www.sheffield.ac.uk/news/new-robot-medics-go-where-doctors-cant-developed-university-sheffield-scientists>

[8] <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/8520218>

[9] <https://www.uclahealth.org/medical-services/robotic-surgery/what-robotic-surgery>

[10] <https://my.clevelandclinic.org/health/treatments/22178-robotic-surgery>



assodel

Dal 1984, l'Associazione Distretti Elettronica in Italia

Creiamo sinergie tra chi progetta, produce e distribuisce elettronica

+225

associati

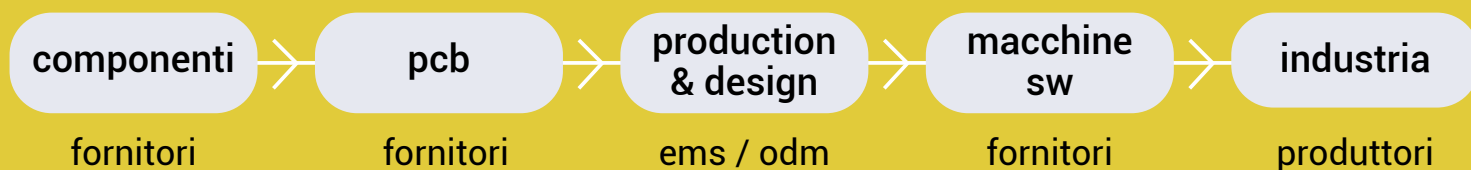
40

anni di industria

75%

della supply chain

TUTTA LA FILIERA ELETTRONICA, UN UNICO ECOSISTEMA



Scopri "chi fa cosa"
nell'elettronica su
electronicsmadeinitaly.com



**Electronic
Production & Design
Directory 2026**

Per maggiori informazioni
www.assodel.it

Aggiornamento sicuro dei dispositivi medicali connessi: dall'architettura di boot al lifecycle del prodotto

AUTORE: Ivan Scordato

L'aggiornamento sicuro dei dispositivi medicali connessi non è una funzione accessoria: è una capacità di prodotto che incide su sicurezza, efficacia, continuità di servizio e supporto sul campo. Non basta chiedersi se il dispositivo supporta l'OTA o se il firmware è firmato. Bisogna capire se esiste una catena di fiducia completa, dal boot alla verifica dell'immagine, dalla gestione delle chiavi al recovery dopo un aggiornamento fallito.

La differenza tra un dispositivo "aggiornabile" e uno realmente patchabile è molto

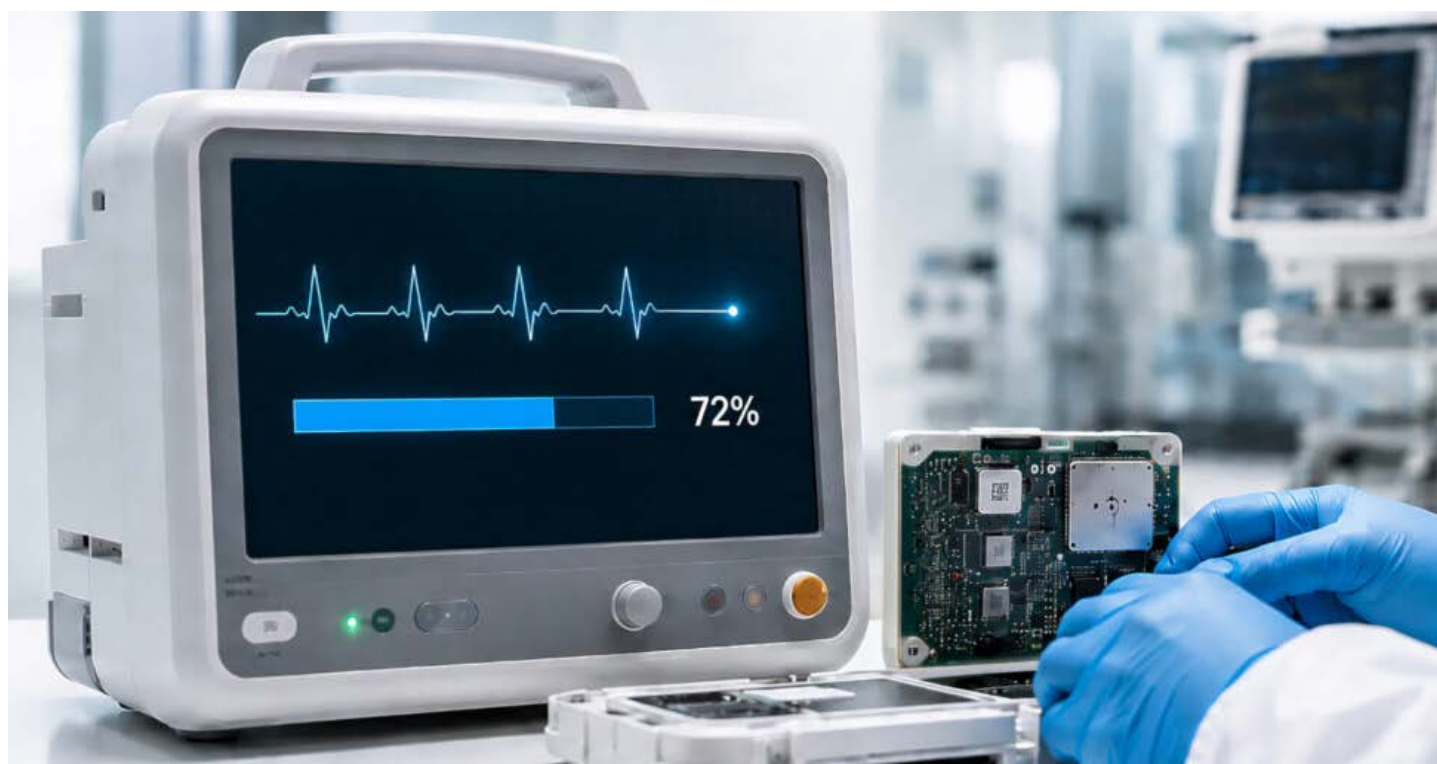
più concreta di quanto sembri. Questo articolo spiega cosa serve per progettare l'aggiornamento sicuro dei dispositivi medicali connessi, partendo dall'architettura embedded e dal quadro normativo che nel 2025-2026 ha reso questi requisiti espliciti e non più negoziabili.

PERCHÉ L'AGGIORNAMENTO SICURO DEI DISPOSITIVI MEDICALI È UN REQUISITO DI PROGETTO

La Section 524B del FD&C Act, introdotta dal FDORA ed effettiva dal 29 marzo 2023, ha cambiato le regole del gioco. Per un cyber device, un dispositivo che contiene software, ha la capacità di connettersi

a internet e presenta caratteristiche potenzialmente vulnerabili, la submission premarket deve includere processi per monitorare e gestire vulnerabilità nel post-market, procedure che diano ragionevole garanzia di cybersecurity e una SBOM che copra componenti commerciali, open-source e off-the-shelf.

La guidance finale FDA, aggiornata il 27 giugno 2025 con l'integrazione della Section VII dedicata ai cyber device, va oltre la formula normativa. Richiede un insieme coerente di artefatti: threat model, cybersecurity risk assessment, SBOM, informazioni sul supporto dei componenti, vulnerability assessment,



anomalie irrisolte e tracciabilità tra questi elementi e la documentazione di test. La FDA si aspetta inoltre che il produttore adotti un Secure Product Development Framework (SPDF) e ne dimostri l'applicazione lungo l'intero ciclo di vita, senza prescrivere quale framework specifico.

Il punto chiave per chi sviluppa: la FDA entra nel merito del post-market già dalla submission. Nel cybersecurity management plan raccomandato devono comparire ruoli, fonti di monitoraggio, tempi di sviluppo delle patch, processo di disclosure e la patching capability reale del dispositivo. Se queste scelte non esistono durante il progetto, non compariranno in validazione: l'aggiornamento sicuro dei dispositivi medicali si decide al giorno zero.

QMSR E LIFECYCLE: IL PESO CRESCENTE DEL SUPPORTO POST-VENDITA

Dal 2 febbraio 2026 è entrato in vigore il QMSR, che sostituisce la vecchia QS Regulation (21 CFR Part 820) incorporando per riferimento la ISO 13485:2016. L'effetto sulla progettazione è concreto: gestione del cambiamento, componenti terzi, supporto post-market e evidenze tecniche diventano parte integrante del sistema qualità. Gli aggiornamenti sicuri non sono più "buone pratiche software": sono qualità osservabile del prodotto medicale.

Sul fronte normativo internazionale, la IEC 81001-5-1 definisce le attività di lifecycle per lo sviluppo e la manutenzione dell'health software, con l'obiettivo di tenere insieme sicurezza, safety ed effectiveness.

Per chi sviluppa firmware, la norma ha un merito pratico: obbliga a non ragionare per silos. Bootloader, runtime, componenti terzi, configurazione, chiavi e strumenti di recovery fanno tutti parte dello stesso problema.

PERCHÉ IL MEDICALE È DIVERSO DA UN ALTRO EMBEDDED CONNESSO

In un dispositivo industriale, un aggiornamento fallito è un disservizio. In un dispositivo medico può diventare un problema di sicurezza del paziente, disponibilità operativa e validazione regolatoria. Un update introduce reboot, tempi di inattività, ricaricamento di configurazioni, possibili migrazioni di dati e nuovi comportamenti a runtime. Se il dispositivo ha vincoli temporali, interfacce con altri sistemi o componenti che non possono restare in stato ambiguo, il processo va pensato come parte del comportamento nominale del prodotto, non come procedura eccezionale.

La complessità cresce quando il dispositivo esegue elaborazione locale o inferenza AI. Il problema non è aggiornare un singolo binario, ma mantenere coerenti firmware, runtime e modello, ciascuno con le sue dipendenze e i suoi vincoli di compatibilità. Chi lavora su sistemi embedded con elaborazione edge conosce queste dinamiche e sa quanto un aggiornamento sicuro nei dispositivi medicali condivida superfici di attacco con altri verticali.

Dove comincia davvero l'aggiornamento sicuro nei dispositivi medicali? L'aggiornamento sicuro dei dispositivi medicali è una catena di decisioni che parte molto prima del momento in cui il dispositivo riceve il pacchetto firmware. Dipende da come è costruita la radice di fiducia, da come è organizzata la memoria firmware e da quanto è robusto il bootloader davanti a errori, interruzioni e tentativi di manomissione. Sono tre ambiti che vale la pena esaminare separatamente, perché ognuno produce vincoli e regressioni diverse sul resto dell'architettura.

ROOT OF TRUST, SECURE BOOT E VERIFICA DELL'IMMAGINE FIRMWARE

Un aggiornamento sicuro non comincia dall'OTA: comincia dal fatto che il

dispositivo abbia una radice di fiducia coerente: boot ROM o first-stage immutabile, chiavi gestite correttamente, verifica dell'immagine prima dell'esecuzione e policy chiare su integrità e anti-rollback.

Secure boot e aggiornamento non sono moduli separati. Se il dispositivo non sa distinguere un'immagine valida da una non autorizzata, il canale di update diventa un vettore per introdurre codice non previsto. Se la verifica è fragile o mal collegata alla gestione delle chiavi, il problema non emerge in demo ma si presenta in esercizio. Il NIST SP 800-193 resta un riferimento tecnico solido per la logica protect-detect-recover sul firmware, anche fuori dal contesto medicale.

Un aspetto spesso trascurato: la gestione delle chiavi nel tempo. La chiave usata per firmare l'immagine alla release 1.0 deve essere ancora gestibile alla release 5.0, cinque anni dopo. Se la chiave viene compromessa, il dispositivo deve poter transitare a una nuova chiave senza perdere la capacità di verificare le immagini precedenti. Se la chiave è hardcoded nel bootloader senza meccanismo di rotazione, il problema è strutturale e non si risolve con un update. Questo è il tipo di decisione architetturale che va presa al giorno zero e che ha conseguenze per l'intero lifecycle del prodotto.

PARTIZIONI A/B, ROLLBACK E RECOVERY DEL FIRMWARE MEDICALE

Cosa succede se qualcosa va storto? Un'immagine corrotta, una perdita di alimentazione durante la scrittura, un timeout in verifica o un componente incompatibile possono trasformare un update ben disegnato in un dispositivo fermo.

Le strategie A/B restano la scelta più robusta: immagine nuova su slot inattivo, verifica crittografica (tipicamente ECDSA P-256 o Ed25519 sul manifes-

SHA-256 sui blocchi dell'immagine), primo boot controllato, health check applicativo e promozione solo dopo esito positivo. Framework come MCU-boot (usato da Zephyr e supportato da FreeRTOS) implementano questo schema con anti-rollback basato su contatore monotono, impedendo il downgrade a versioni con vulnerabilità note.

Il vantaggio della doppia partizione è la semplicità del recovery: se la nuova immagine fallisce il self-test, il bootloader torna alla precedente senza intervento esterno. Costa il doppio dello spazio firmware, ma riduce il rischio operativo: scelta sensata quando il dispositivo non può tollerare un brick e il recupero manuale è costoso. Su dispositivi con embedded Linux, strumenti come Mender, RAUC e SWUpdate implementano lo stesso pattern con gestione automatica del rooffs e rollback a livello di partizione.

Il delta update può avere senso su dispositivi stretti in flash o banda, ma richiede maturità su atomicità, resume e coerenza dello stato. Il rischio: un delta calcolato su una versione base diversa da quella installata produce un'immagine corrotta. Se il dispositivo è piccolo ma clinicamente sensibile, la strategia più efficiente in byte potrebbe essere la meno robusta sul campo.

IL BOOTLOADER COME SUPERFICIE DI SICUREZZA DELL'AGGIORNAMENTO

Nel medicale connesso, il bootloader è una superficie di sicurezza, un meccanismo di servizio e una parte della giustificazione tecnica del prodotto. Deve saper rifiutare immagini non autorizzate, ma anche gestire casi reali: downgrade consentiti solo in condizioni controllate, reset di configurazioni, migrazione delle chiavi, recovery locale autenticata e aggiornamento del bootloader stesso senza rompere la catena di fiducia.

Il bootloader resta invisibile nella mag-

gior parte dei casi d'uso, e per questo tende a diventare debito tecnico. È lì che si concentra molta della resilienza reale del dispositivo. I compromessi tra boot time, watchdog, filesystem e recovery cambiano significativamente tra microcontrollore, RTOS ed embedded Linux, e la scelta della piattaforma influenza direttamente la robustezza dell'aggiornamento sicuro nei dispositivi medicali.

SBOM E COMPONENTI TERZI NELL'AGGIORNAMENTO SICURO DEI DISPOSITIVI MEDICALI

La SBOM è utile solo se la si guarda dal lato di chi deve reagire a una vulnerabilità. FDA e IMDRF la trattano come strumento operativo per risk management e vulnerability management. Per un team firmware, il significato pratico è semplice: quando esce una CVE su una libreria TLS, su uno stack di rete o su un parser incluso nel dispositivo, bisogna sapere subito quali prodotti, versioni e configurazioni sono coinvolti. Senza un inventario aggiornato e collegato alla release reale del prodotto, la reazione parte già in ritardo.

I problemi più insidiosi raramente stanno nel codice applicativo. Stanno nelle dipendenze: stack TCP/IP, librerie crypto, runtime, BSP, kernel, SDK del vendor, middleware di connettività. Componenti che restano sullo sfondo finché non compare una vulnerabilità critica, come la backdoor scoperta in xz-utils nel 2024, che ha dimostrato come una dipendenza apparentemente marginale possa compromettere l'intera catena. Il problema cresce quando il dispositivo esegue inferenza AI: runtime ML, librerie DSP e framework di inferenza entrano nella SBOM con lo stesso impatto operativo del firmware.

La guidance FDA chiede esplicitamente informazioni di supporto sui componenti software, soprattutto quando il produttore non controlla il sorgente. Ma una SBOM senza strategia di patch

serve a poco. Rende visibile il problema, non lo corregge. Il vero valore nasce quando la distinta software si collega a decisioni operative: patchare, mitigare, limitare l'uso, o dichiarare end of support. Chi si occupa di cybersecurity in contesti OT conosce bene questa dinamica, ed è la stessa dell'aggiornamento sicuro nei dispositivi medicali.

PATCHABILITY: QUANTO È AGGIORNABILE DAVVERO UN DISPOSITIVO MEDICALE

Parlare di patchability per un dispositivo medicale connesso significa misurare la distanza tra il dispositivo che hai in mano e un dispositivo realmente aggiornabile in produzione. Quella distanza dipende da due insiemi di fattori: i vincoli tecnici del prodotto e i vincoli operativi dell'ambiente clinico in cui vive. Entrambi pesano sull'aggiornamento sicuro dei dispositivi medicali e vanno valutati insieme, non in sequenza.

Vincoli tecnici del firmware medicale

La patchability non si misura dalla presenza di un menu di update. Si misura rispondendo a domande concrete: c'è abbastanza memoria per lo staging? Il processo è atomico? L'update è resumabile dopo interruzione? Il dispositivo verifica l'immagine prima di renderla attiva? La configurazione resta coerente? È possibile separare firmware, dati clinici e parametri? Cosa succede se cade l'alimentazione nel momento peggiore?

Queste domande distinguono un dispositivo aggiornabile in laboratorio da uno aggiornabile sul campo. Un log persistente dell'operazione, una regola di promotion chiara e un recovery che non dipenda dalla stessa rete che ha causato il problema fanno la differenza. Anche la separazione tra firmware, dati clinici e configurazione utente è un requisito architetturale da definire subito: un update che sovrascrive la ca-

librazione è un problema clinico, non solo tecnico. Per dispositivi in classe di rischio più alta, va considerato anche l'impatto regolatorio: un aggiornamento che modifica il comportamento previsto può richiedere una nuova valutazione di rischio e, in alcuni casi, una nuova submission. La IEC 62304 classifica il software per livello di safety concern, e il processo di change control deve essere coerente con quella classificazione.

Vincoli operativi nell'ambiente clinico

Un dispositivo medico si aggiorna dentro reti ospedaliere segmentate, ambienti con policy IT restrittive, finestre cliniche limitate, personale distribuito e connettività spesso intermittente. L'architettura dell'aggiornamento sicuro per i dispositivi medici viene spesso disegnata come se tutti fossero online e facilmente riavviabili. Nella realtà le condizioni operative sono molto meno comode.

La strategia tecnica deve dialogare con il modello di service: update remoto diretto, staging tramite server locale, supporto onsite, recovery locale o combinazioni ibride. Un ospedale con 200 dispositivi connessi non aggiorna tutto in una notte: serve un piano di deployment che tenga conto di finestre cliniche, dipendenze tra dispositivi e validazione operativa post-update.

Quando il dispositivo diventa legacy

Il documento IMDRF sui legacy medical devices introduce una definizione pratica: un legacy device non è un dispositivo vecchio, ma un dispositivo che non può più essere ragionevolmente protetto contro le minacce attuali. IMDRF descrive stadi di lifecycle (sviluppo, supporto, limited support, end of support) che aiutano a gestire la transizione.

Il passaggio a limited support non dovrebbe essere una palude indefinita, ma una fase in cui il produttore chiari-

sce limiti, mitigazioni residue e piano di uscita. Per chi progetta oggi, la lezione è concreta: una decisione su boot-loader, BSP, kernel o chiavi può facilitare o impedire una patch tra cinque anni. La legacy condition nasce molto prima della fine ufficiale del supporto.

POST-MARKET: UN PROBLEMA TECNICO, NON DOCUMENTALE

Il post-market serio comincia quando il team sa dove guardare, con che frequenza e come collegare vulnerabilità, versioni installate e clienti coinvolti. In pratica: fonti di monitoraggio (NVD, vendor advisories, mailing list dei componenti open-source), procedure di triage con criteri basati sull'impatto clinico e non solo sul punteggio CVSS, processo di disclosure coordinata e tracciamento delle versioni in campo. Senza visibilità sul parco installato, anche una buona patch arriva tardi.

Il tracciamento delle versioni in campo merita un approfondimento. Non si tratta solo di sapere quale firmware gira su quale dispositivo: serve collegare firmware, versione SBOM, configurazione, stato dell'ultimo update e struttura sanitaria di destinazione. Senza questa mappa, il triage di una CVE critica su una libreria crypto diventa un esercizio di indagine anziché una risposta operativa. I sistemi di fleet management che integrano questa visibilità con il processo di OTA non sono un lusso: sono una necessità per chi gestisce più di qualche decina di dispositivi medici in campo.

La comunicazione conta quanto la remediation. Nel medicale, un aggiornamento non è solo un file da distribuire: è una modifica da spiegare, contestualizzare e pianificare con la struttura sanitaria. Un ospedale con policy IT restrittive può richiedere settimane per autorizzare l'installazione di una patch, anche se è già disponibile. Il processo di disclosure deve prevedere questi tempi.

Quando il dispositivo entra in limited support, la trasparenza deve aumentare: cosa resta coperto, quali dipendenze non sono aggiornabili, quali finestre rimangono realistiche. La definizione di end of support non è un'informazione commerciale in fondo a un contratto: è un parametro tecnico di lifecycle. Se non è stata pensata bene, il parco installato si trasforma in un accumulo di eccezioni e responsabilità mal distribuite.

IL CRITERIO DI QUALITÀ NELL'AGGIORNAMENTO SICURO DEI DISPOSITIVI MEDICALI

Un dispositivo medico connesso è progettato bene se può essere aggiornato, verificato, recuperato e mantenuto in modo controllato lungo il suo ciclo di vita. Non basta che funzioni al rilascio. Deve restare difendibile, tracciabile e supportabile quando cambiano vulnerabilità, dipendenze, reti e condizioni operative.

La guidance FDA, il QMSR, la IEC 81001-5-1 e i documenti IMDRF convergono sullo stesso punto: l'aggiornamento sicuro dei dispositivi medici è il luogo in cui si incontrano qualità, cybersecurity, software lifecycle e progettazione embedded. Se questa capacità non viene pensata dall'inizio, raramente si recupera più avanti.

Con il Cyber Resilience Act europeo che estende requisiti di sicurezza e aggiornabilità ai prodotti con elementi digitali, lo spazio per i dispositivi "rilascia e dimentica" si è chiuso anche al di fuori del perimetro FDA.

Chi progetta il dispositivo oggi sta progettando anche la patch che dovrà rilasciare tra cinque anni, per una vulnerabilità che oggi non esiste, in una rete ospedaliera che oggi non conosce, con un componente terzo di cui oggi non sa se sarà ancora mantenuto. Che ne sia consapevole o meno.

Convertitori regolati e non regolati: quando scegliere l'uno o l'altro

Nell'elettronica di potenza, una delle prime considerazioni da fare quando si progetta un sistema CC è se utilizzare un convertitore CC/CC regolato o non regolato. La scelta ha un impatto diretto sulla stabilità della tensione, la precisione, l'efficienza, il costo e l'affidabilità complessiva.

Comprendere in che modo la regolazione influisce sulle prestazioni nell'automazione industriale, negli strumenti medici e nei dispositivi IoT può determinare il successo di un prodotto nell'uso quotidiano. Questo articolo illustra le differenze tra convertitori CC/CC regolati e non regolati, evidenziando i punti di forza di ciascun tipo e i limiti che ne derivano.

COSA SIGNIFICA REGOLAZIONE NEI CONVERTITORI CC/CC

Un convertitore CC/CC converte un livello di tensione CC in un altro, utilizzando tipicamente approcci a commutazione o lineari. Il termine "regolazione" si riferisce alla capacità del convertitore di mantenere una tensione di uscita costante nonostante le fluttuazioni della tensione di ingresso o della corrente di carico.

- I **convertitori non regolati** sono progettati semplici costituiti principalmente da un trasformatore (per l'isolamento), un raddrizzatore e componenti di filtraggio. Poiché sono privi di controllo di retroazione, la loro tensione di uscita è direttamente proporzionale alla tensione di ingresso e alla corrente assorbita dal carico. Quando l'ingresso aumenta o il carico diminuisce, la tensione di uscita tende a salire e viceversa.
- I **convertitori regolati**, d'altra parte,

Figura 1: Un convertitore CC/CC regolato | Fonte: Traco Electronics AG

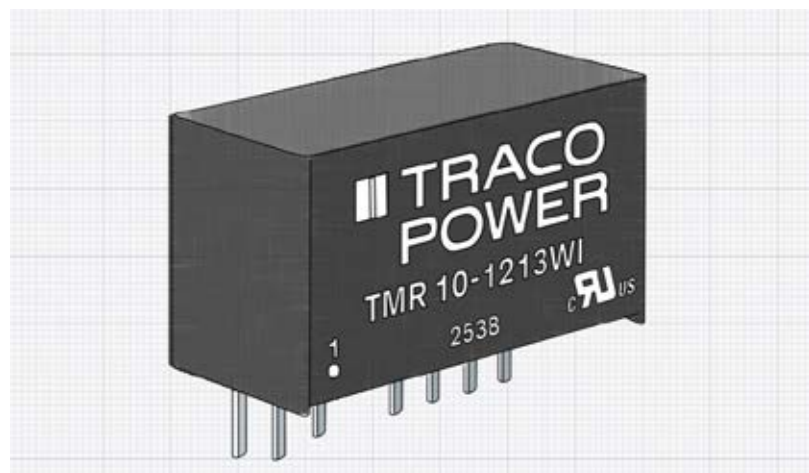


Tabella 1: Confronto a colpo d'occhio

Caratteristica	Convertitore regolato	Convertitore non regolato
Stabilità in caso di variazioni dell'ingresso	Eccellente, mantiene un'uscita costante	Scarsa – varia proporzionalmente all'ingresso
Precisione della tensione di uscita	Controllo della tensione rigoroso, deviazione minima	Dipende dalla corrente di carico
Complessità / Costo	Maggiore (include i circuiti di controllo)	Minore (progettazione più semplice)
Efficienza	Varia a seconda della topologia; può essere elevata con i moderni progetti a commutazione.	In genere più elevata grazie alla semplicità
Applicazioni tipiche	Apparecchiature di comunicazione, sensori, sistemi embedded	Motori, illuminazione a LED, carichi non critici
Ripple e rumore	Basso (con una buona progettazione e filtraggio)	Da moderato ad alto
Dimensioni e peso	Compatto negli switch ad alta frequenza	Generalmente compatto ma meno stabile

Soluzioni di potenza industriali

CC/CC da 1 a 300 watt e CA/CC da 3 a 1000 watt

- Ampia gamma di applicazioni che copre ambienti di ufficio, di produzione, industriali, problematici e pericolosi
- Immunità CEM industriale secondo IEC 61000-6-2
- Vari tipi di montaggio: scheda a circuito stampato, montaggio su telaio e guida DIN
- Stili di package: a telaio aperto, incapsulato e coperto
- 3 anni di garanzia

Per maggiori informazioni, certificazioni e per la scheda tecnica, visitate il nostro sito Web www.tracopower.com

CONVERTITORI CC/CC INDUSTRIALI

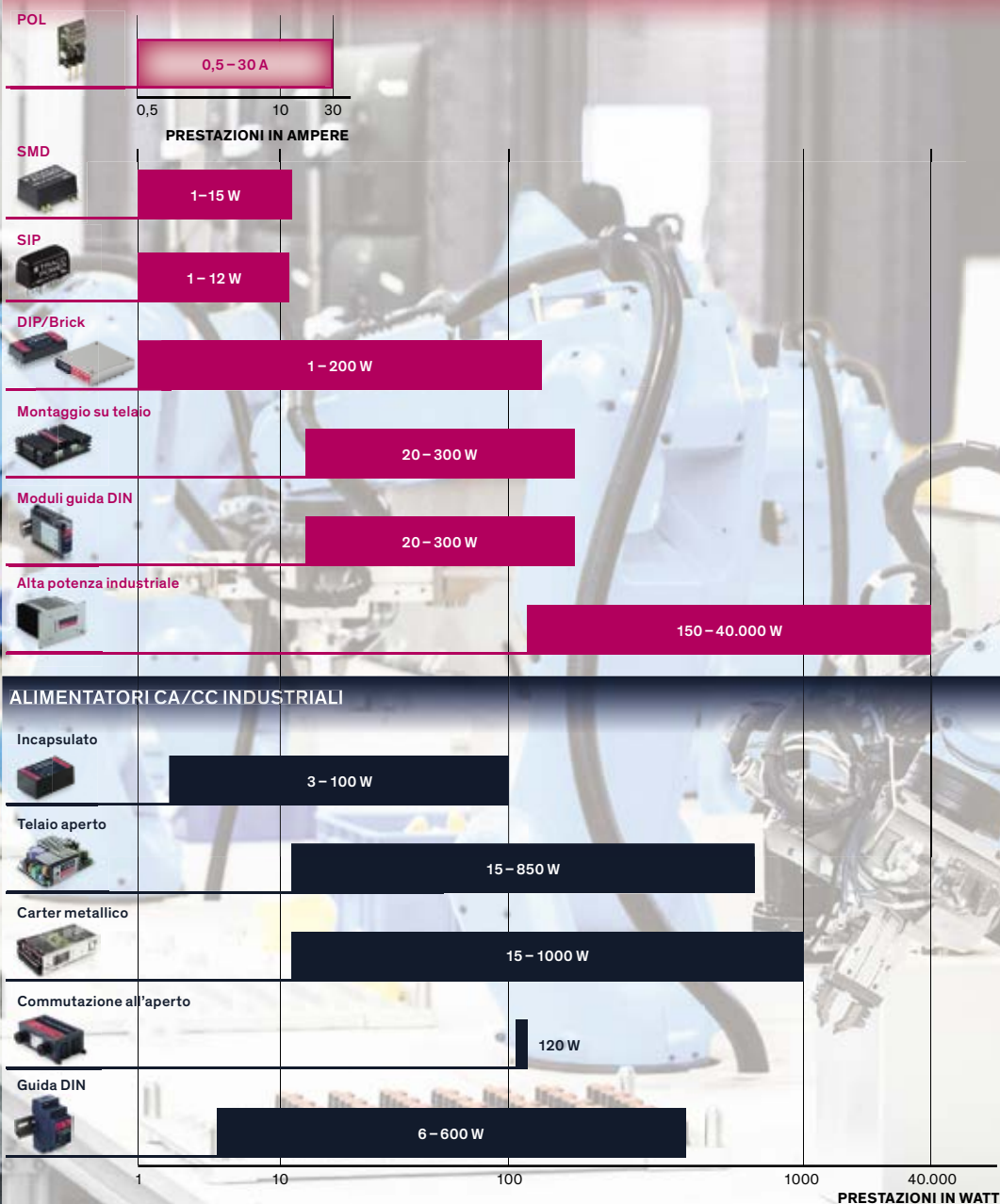


Figura 2: Un convertitore DCDC non regolato | Fonte: Traco Electronics AG



dispongono di un circuito di controllo a retroazione che monitora continuamente la tensione di uscita e modifica i cicli di lavoro di commutazione o gli elementi di controllo per mantenere la stabilità dell'uscita.

Che si utilizzino topologie di regolazione lineare o a commutazione (come buck, boost o forward/flyback isolato), lo scopo è lo stesso: misurare, confrontare e correggere. L'importanza della regolazione della tensione nei sistemi moderni non può essere sottovalutata, poiché vari sottosistemi si basano su un rail CC stabile.

QUANDO UTILIZZARE CIASCUN TIPO

Utilizzare convertitori CC/CC regolati quando:

- **La tensione di ingresso è soggetta a fluttuazioni:** i sistemi alimentati a batteria e quelli a energia rinnovabile sono spesso soggetti a forti oscillazioni di tensione. La regolazione garantisce che i componenti elettronici a valle ricevano una tensione costante, indipendentemente dal comportamento della fonte.
- **Il carico è sensibile:** microcontrollori, moduli di comunicazione e sensori analogici richiedono tensioni precise per funzionare correttamente

e prevenire malfunzionamenti o corruzione dei dati.

- **Più carichi condividono un unico convertitore:** il mantenimento della stabilità di tensione in sistemi dispersi con assorbimento di corrente fluttuante riduce le interferenze incrociate tra i circuiti.
- **Sono presenti cavi lunghi o variazioni ambientali:** le cadute di tensione causate dalla resistenza dei cavi o dai movimenti dei componenti dipendenti dalla temperatura potrebbero compromettere la precisione dell'alimentazione. La regolazione compensa automaticamente queste conseguenze.

Utilizzare convertitori CC/CC non regolati quando:

- **L'ingresso e il carico sono relativamente stabili:** un bus CC industriale fisso, ad esempio, può sopportare lievi fluttuazioni di tensione mentre serve carichi stabili.
- **È accettabile una tolleranza di tensione del $\pm 10-20\%$:** dispositivi come motori CC, solenoidi e riscaldatori resistivi possono funzionare normalmente entro questo intervallo.
- **Costo, semplicità e dimensioni hanno la priorità:** i convertitori non regolati, che hanno meno componenti e nessun circuito di retroa-

zione, sono spesso più piccoli e più efficienti con carichi moderati.

- **Il comportamento transitorio è ben compreso:** in applicazioni a bassa potenza o non critiche, le variazioni di tensione durante la commutazione o i cambiamenti di carico possono essere insignificanti.

Entrambi i tipi di convertitori hanno ancora una loro utilità.

I modelli regolati offrono un'uscita più stabile e prevedibile, mentre le versioni non regolate rimangono interessanti quando il basso costo e la semplicità hanno la precedenza sulla precisione.

L'opzione migliore è determinata dalla quantità di variazione di tensione che il sistema può sopportare senza compromettere le prestazioni.

CRITERI CHIAVE DI SELEZIONE

La scelta tra convertitori CC/CC regolati e non regolati va oltre la tensione di uscita specificata. Gli ingegneri dovrebbero esaminare le prestazioni di ciascun modello in scenari reali.

1. Intervallo di tensione in ingresso: determinare di quanto la tensione di alimentazione fluttua durante il funzionamento normale e transitorio. I sistemi dei veicoli e delle batterie possono variare notevolmente, a volte da 9 V a 36 V, quindi sono necessari convertitori regolati per mantenere rail costanti a 5 V o 12 V.

2. Caratteristiche del carico: i modelli non regolati possono essere adatti a carichi a corrente costante o resistivi. Tuttavia, i carichi dinamici o digitali producono rapidi impulsi di corrente che causano cali di tensione in assenza di una regolazione attiva.

3. Requisiti di precisione e ripple: l'elettronica di precisione e i circuiti sensibili ai dati richiedono una stabilità a livello di millivolt e un ripple minimo. Questi requisiti possono essere soddisfatti solo utilizzando convertitori CC/CC regolati con un adeguato filtraggio.

4. Obiettivi di efficienza:

mentre i modelli non regolati possono sembrare più efficienti grazie al minor numero di stadi di conversione, i convertitori regolati che combinano la rettificazione sincrona e i moderni circuiti integrati di controllo possono attualmente raggiungere efficienze superiori al 90%, anche con dimensioni ridotte.

5. Condizioni ambientali:

le fluttuazioni di temperatura possono causare una deriva evidente nell'uscita di un convertitore non regolato. Al contrario, i convertitori regolati correggono automaticamente queste derive, mantenendo una tensione costante in condizioni variabili.

6. Vincoli di budget e dimensioni:

nei progetti orientati al contenimento dei costi o a volumi elevati, spesso si opta per convertitori non regolati quando una lieve perdita di prestazioni è considerata un compromesso accettabile.

Tuttavia, nei sistemi critici, il rischio di guasti o tempi di inattività spesso supera il leggero vantaggio in termini di prezzo offerto da un'unità regolata.

7. Margini di sicurezza:

valutare come il convertitore gestisce i picchi di avvio, i brevi picchi di linea e le variazioni improvvise di carico. Il progetto dovrebbe rimanere stabile e prevedibile su tutto il suo campo di funzionamento.

CONSIDERAZIONI SULLA PROGETTAZIONE MODERNA

I progressi nel controllo dei semiconduttori, nel feedback digitale e nella tecnologia dei MOSFET di potenza hanno reso meno netta la distinzione tra convertitori regolati e non regolati.

Molti moduli regolati, piccoli ed economici, raggiungono ora un'eccellente efficienza e bassi livelli di rumore equivalenti a quelli dei dispositivi non regolati, ma con una gestione della tensione significativamente superiore.

Allo stesso tempo, i convertitori non regolati continuano a funzionare bene in contesti in cui la robustezza ha la precedenza sulla stabilità.

Ad esempio, le lampadine di segnalazione, i sensori di base o i nodi IoT a basso costo richiedono spesso circuiti minimi e una lunga durata piuttosto che una precisione inferiore all'uno per cento.

In molti casi, viene adottato un approccio ibrido per trovare un equilibrio tra costo e precisione.

Ad esempio, è possibile utilizzare un convertitore non regolato per fornire la tensione di alimentazione principale, mentre un regolatore lineare a bassa caduta di tensione in uscita livella la tensione finale.

CONCLUSIONE

La regolazione nei convertitori CC/CC è essenzialmente una questione di controllo contro semplicità.

Un convertitore regolato mantiene la tensione costante su ampie variazioni di ingresso e di carico, garantendo prestazioni precise e prevedibili in sistemi elettronici sensibili.

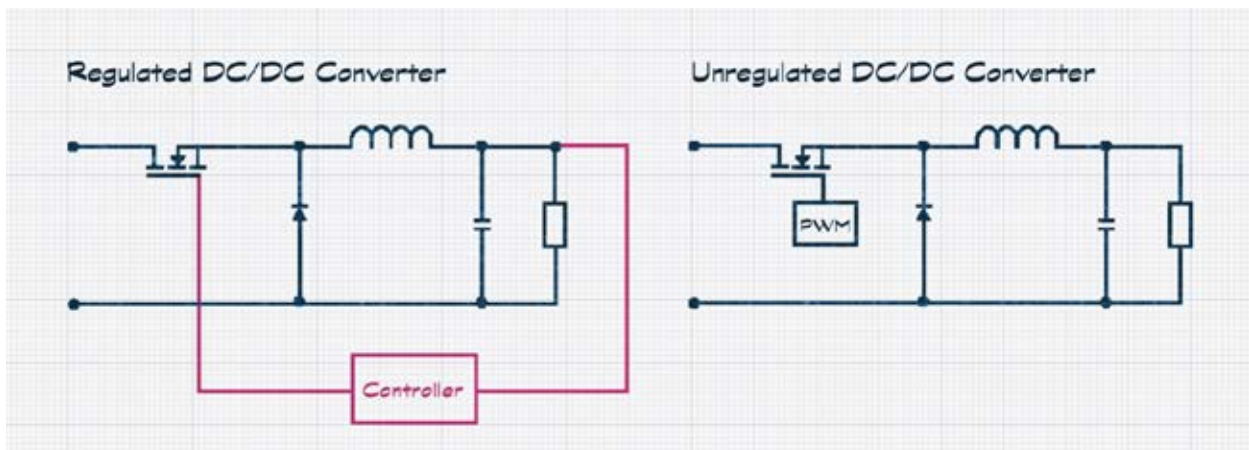
Un convertitore non regolato sacrifica una certa precisione a favore dell'efficienza, della compattezza e dell'economicità, rendendolo adatto ad applicazioni in cui le tolleranze di tensione sono ridotte e i carichi di sistema sono costanti.

La scelta progettuale ottimale è determinata da tre fattori essenziali: quanto è variabile la sorgente di ingresso, quanto è importante la precisione della tensione per le prestazioni del sistema e quanta complessità consentono il budget e lo spazio a disposizione.

Traco Power offre una vasta gamma di convertitori CC/CC regolati e non regolati progettati per garantire prestazioni, stabilità e affidabilità a lungo termine in contesti industriali, medici e di comunicazione .

tracopower.com

Figura 3: Progettazione di convertitori CC/CC regolati e non regolati



Cavli Wireless, il futuro della connettività LTE IoT a basso consumo energetico

Il partner di CODICO, Cavli Wireless sviluppa moduli cellulari IoT di livello industriale con eSIM integrata e connettività globale. In combinazione con la piattaforma Cavli Hubble™, semplificano la gestione dei modem e accelerano le implementazioni IoT in tutto il mondo.

Nell'IoT odierno, i dispositivi necessitano di connessioni a basso consumo e di lunga durata, spesso in aree remote prive di accesso alla rete elettrica. LTE Cat 1bis offre un equilibrio ideale tra consumo, velocità di trasmissione dati e costi.

A differenza di LTE-M o NB-IoT, Cat 1bis supporta i dati in tempo reale e una maggiore compatibilità, risultando perfetto per ridotti flussi di dati e lunghi cicli di vita. Sta rapidamente sostituendo le vecchie reti 2G/3G a livello globale.

L'EVOLUZIONE DI CAT 1BIS

L'IoT cellulare si è evoluto verso soluzioni più semplici, economiche e



a basso consumo. Con la progressiva dismissione delle reti 2G/3G e le limitazioni regionali imposte a LTE-M/NB-IoT, LTE Cat 1bis si afferma come la scelta ideale per dispositivi IoT a medio throughput e a basso consumo.

Introdotta con la Release 14 del 3GPP, Cat 1bis migliora LTE Cat 1 eliminando la necessità di una doppia antenna, risultando perfetto per dispositivi compatti e alimentati a batteria, senza compromettere la latenza o le prestazioni in tempo reale.

PERCHÉ CAT 1BIS RISPETTO A NB-IOT/LTE-M?

Con la progressiva dismissione delle reti legacy, LTE Cat 1bis offre agli OEM una soluzione globale ed economicamente vantaggiosa grazie anche alla semplificazione progettuale della singola antenna, bilanciando copertura, costi e prestazioni permettendo di realizzare dispositivi IoT già pronti per le reti future (vedere Tabella 2).

YEAR	MILESTONE
2014	LTE Cat 1 standardized (3GPP Rel. 8)
2016	NB-IoT / LTE-M introduced (Rel. 13)
2017	Cat 1bis launched (3GPP Rel. 14)
2020	Global adoption began
2023	C-Series Cat 1bis modules deployed globally

Tabella 1: Evoluzione del Cat 1bis

FEATURES	NB-IoT	LTE-M	CAT 1BIS
Bandwidth	200KHz	1.4MHz	1.4MHz
Downlink Peak Speed	127Kbps	1Mbps	10Mbps
Uplink Peak Speed	158.5Kbps	1Mbps	5Mbps
Duplex Mode	Half Duplex	Full or Half Duplex	Full Duplex
Frequency Deployment	In-band, guard-band, standalone	In-band	In-band
Number of Antennae	1 (SISO)	1 (SISO)	1 (SISO)
Cells Capacity	50,000-100,000 devices per cell	1,000 devices per cell	1,000 device per cell
Data and Voice	Data only	Data and Voice <i>Capable of voice if there is a VoLTE license.</i>	Data and Voice <i>Capable of voice if there is a VoLTE license. Data also supports video.</i>
Mobility	Limited	Full mobility and handover	Full mobility and handover
Module Cost	Relatively lower cost	Relatively higher cost	Relatively moderate cost
Coverage/Penetration	Great coverage and indoor penetration	Moderate coverage and indoor penetration	Moderate coverage and indoor penetration
Roaming Capability	Technically possible, but non-existent in reality	Good roaming availability	Good roaming availability
Use Cases	Fits in static monitoring applications where a low data throughput is required	Best for tracking and mobility applications with moderate data transmission requirements	Best for tracking and mobility applications with higher data transmission requirements

Tabella 2: Vantaggi del Cat 1bis rispetto a NB-IoT e LTE-M

FEATURES	CQ16	C16QS	C17QS
			
Processor	ARM Cortex M3 @ 204MHz	ARM Cortex M3 @ 204MHz	ARM Cortex M3 @ 306MHz
Memory	1.25MB RAM + 4MB Flash	1.25MB RAM + 4MB Flash	2MB RAM + 8MB Flash
Operating System	FreeRTOS	FreeRTOS	FreeRTOS with SDK Support
Form Factor (LGA)	17.7x15.8x2.5mm	26.5x22.5x2.3mm	26.5x22.5x2.3mm
GNSS	-	L1 (Independent GNSS)	L1/L1+L5 (Dual band GNSS)
Constellation Support	-	GPS, BDS	GPS, GLO, GAL, BDU, QZSS, SBAS, NavIC
eSIM / iSIM	eSIM	eSIM	iSIM capable
Wi-Fi Scanning	-	available	available

Tabella 3: Panoramica del prodotto della serie C

ALIMENTAZIONE DELL'IOT GLOBALE: CAVLI SERIE C

La serie C di CAVLI riunisce un solido insieme di moduli LTE progettati per implementazioni IoT scalabili in diversi settori, con particolare attenzione alle prestazioni, al basso consumo, all'operatività globale e alla perfetta integrazione con il cloud.

Questa serie semplifica lo sviluppo del prodotto e accelera il time-to-market per gli OEM in ogni area geografica. Grazie al GNSS integrato, al supporto delle eSIM e alle funzionalità di elaborazione edge, i moduli della serie C di CAVLI sono progettati per garantire resilienza in condizioni reali e una lunga durata operativa sul campo.

CQ16: CONNETTIVITÀ LTE COMPATTA PER IMPLEMENTAZIONI DI MASSA

Il CQ16 di CAVLI è un modulo LTE Cat 1bis compatto ed economico, ideale per applicazioni IoT di elevati volumi. Grazie alle contenute dimensioni di 17,7 x 15,8 mm e al supporto eSIM integrato, il CQ16 semplifica la progettazione di prodotti per applicazioni quali smart meters, tracker e terminali POS.

Il basso consumo e il design LTE ad antenna singola lo rendono ideale nei progetti di migrazione dalle vecchie reti 2G/3G alle prestazioni di livello LTE.

C16QS: VERSATILITÀ IN OGNI FORMATO

Disponibile nelle varianti LGA, mini-PCIE e dongle USB, C16QS combina flessibilità e prestazioni. Basato sul chipset Qualcomm QCX216 con GNSS integrato e connettività tramite eSIM alla piattaforma CAVLI Hubble™ per la gestione remota, è progettato per applicazioni quali localizzazione e controllo di flotte, smart utilities e sistemi di monitoraggio portatili, consentendo una rapida implementazione globale e un basso consumo.

C17QS: UNIONE DI LTE A BASSO CONSUMO CON FUNZIONALITÀ SDK

Il CAVLI C17QS va oltre la connettività IoT con GNSS dual-band integrato e compatibilità iSIM. Grazie all'SDK di supporto disponibile, gli sviluppatori possono eseguire applicazioni personalizzate direttamente sul modulo basato su FreeRTOS, consentendo il tracciamento della catena del freddo, la manutenzione predittiva e il monitoraggio remoto senza un controller host esterno. È ideale per avere in un modulo compatto l'analisi in tempo reale di sensori e la connettività LTE globale.

Basato sul chipset Qualcomm QCX217, offre prestazioni di elaborazione superiori del 50%, il 60% di RAM in più e il doppio della memoria flash rispetto al modulo gemello. Il supporto dell'SDK è la caratteristica principale della piattaforma FreeRTOS, che consente agli OEM di sviluppare applicazioni personalizzate direttamente sul modulo, offrendo una soluzione completa ed economica.

La scansione Wi-Fi integrata funge da backup per il GNSS in situazioni con segnale debole, garantendo una localizzazione più affidabile. Il supporto multi-I/O (UART, SPI, I2C, USB) e la compatibilità con il cloud Hubble™ di CAVLI, permette ai progettisti che utilizzano C17QS di realizzare dispositivi intelligenti e connessi su larga scala, più velocemente che mai. I moduli CAVLI sono pre-integrati con CAVLI Hubble™ per la gestione della connettività, la diagnostica e la configurazione da remoto.

CAT 1BIS IN AZIONE: ALIMENTARE IL FUTURO DELLA CONNETTIVITÀ LTE A BASSO CONSUMO

L'insieme dei moduli Cat 1bis di CAVLI è progettato non solo per le applicazioni odierne, ma anche per il mondo connesso di domani. Dall'alimentazione di monopattini elettrici di nuova generazione e tracker logistici compatti con il versatile C16QS, all'abilitazione di contatori intelligenti always-on e applicazioni

di monitoraggio remoto tramite CQ16, le soluzioni CAVLI rispondono alla crescente domanda di connettività a basso consumo e ad alta affidabilità.

Il C17QS unisce connettività e supporto SDK, consentendo ai dispositivi di eseguire logica personalizzata ed elaborare autonomamente i dati dei sensori. Questa convergenza di diversi fattori di forma, consumo ottimizzato e intelligenza integrata posiziona i moduli Cat 1bis di CAVLI come elemento fondamentale per implementazioni IoT pronte per il futuro nei settori dell'energia, delle infrastrutture e della mobilità.

PERCHÉ SCEGLIERE CAVLI WIRELESS?

- Progettazione e produzione interne
- Moduli basati su Qualcomm e certificati a livello globale
- Roaming senza problemi grazie ai moduli eSIM/iSIM integrati e alle numerose partnership con gli operatori di telecomunicazioni
- Piattaforma CAVLI Hubble™ per una connettività e una gestione del modem impeccabili
- Scelto dagli OEM in oltre 30 paesi

codico.com

Figura 1: Diagramma a blocchi di C17QS

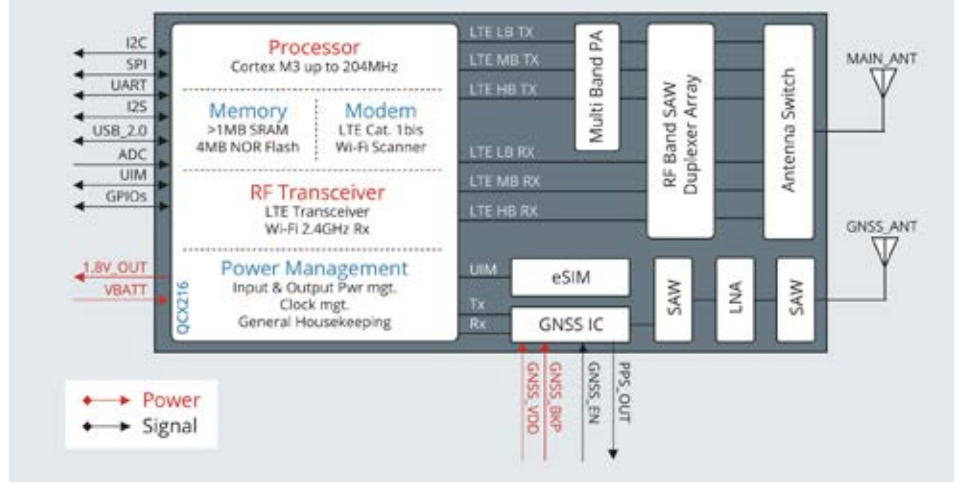


Figura 1: Diagramma a blocchi di C16QS

