

16_Componenti Hardware per la Realizzazione di Eco3D

Trasduttori ecografici miniaturizzati (priorità assoluta)

Tipologie e tecnologie: I trasduttori ultrasuoni miniaturizzati possono basarsi su diverse tecnologie:

- **Trasduttori piezoelettrici tradizionali:** utilizzano cristalli o compositi PZT; sono lo standard attuale per imaging medicale per l'elevata costante dielettrica e accoppiamento elettromeccanico [vermon.com](#). Anche in formato miniaturizzato (es. sonde lineari piccole, microconvex) offrono buona sensibilità. Aziende specializzate (es. Blatek, Vernon, Sonotec) forniscono array piezoelettrici personalizzati "nudi" senza case, pronti per l'integrazione OEM [blatek.com](#). Ad esempio, esistono array lineari di **128 elementi a 7.5 MHz** con pitch ~0,315 mm (larghezza totale ~4 cm) e banda passante ~79% [ndk.com](#) – performance simili a sonde standard, ma disponibili come moduli OEM. Anche array ancora più compatti ad alta frequenza sono prodotti (es. moduli **192 elementi a 15 MHz** con apertura trasversale di soli 2,5 mm) per imaging ad altissima risoluzione su distretti superficiali [ndk.com](#). Questi trasduttori piezo "nudi" richiedono poi l'assemblaggio in un housing ergonomico, ma permettono la massima flessibilità progettuale.
- **Trasduttori MEMS (CMUT e PMUT):** nuove tecnologie **MUT** (Micromachined Ultrasound Transducers) consentono miniaturizzazione spinta grazie a processi di microfabbricazione. I **CMUT** (capacitive MUT) utilizzano membrane conduttive vibranti per effetti elettrostatici, mentre i **PMUT** (piezoelectric MUT) impiegano sottili film piezoelettrici attuati in modo flessionale [vermon.com](#). Queste microstrutture offrono **ampia banda** e migliore accoppiamento acustico ai tessuti (minor impedenza meccanica, meno strati di matching necessari) [vermon.com](#). Inoltre eliminano molti costosi passaggi di assemblaggio richiesti dai trasduttori tradizionali [vermon.com](#). In pratica, i MUT permettono di integrare migliaia di elementi su chip di silicio insieme all'elettronica di controllo. Un esempio emblematico è la sonda **Butterfly IQ**, che integra **9000 elementi CMUT** in un singolo chip MEMS-CMOS coprendo da ~1 a 12 MHz con un unico trasduttore [butterflynetwork.com](#) [marcroftmedical.com](#). Ciò consente sonde portatili a banda larga senza cristalli piezoelettrici, mantenendo qualità d'immagine comparabile ai sistemi carrellati tradizionali [butterflynetwork.com](#) [butterflynetwork.com](#). Anche altre startup (es. **Exo Imaging**) stanno sviluppando probe su chip con tecnologia PMUT multi-strato per ottenere alta potenza trasmessa e buona sensibilità. Sebbene ad oggi le soluzioni CMUT/pMUT commerciali siano poche, alcuni fornitori (ad es. **Vernon**) offrono partnership OEM su progetti MEMS custom [vermon.com](#), supportando lo sviluppo dal concept fino alla produzione industriale di array MUT miniaturizzati.
- **Array phased-array, convex, microconvex:** Oltre alla tecnologia di elemento, è rilevante la **geometria**. Per Eco3D sono possibili sonde di vari formati (lineari per applicazioni superficiali, convex per addome, phased-array per cardiologia, microconvex per pediatria ecc.). La piattaforma è concepita per accettare array di **forma e dimensione diverse** file-cvczt73dst2uoppzdic53f. In tutti i casi, l'obiettivo è minimizzare l'ingombro fisico della testa della sonda. Ad esempio, un **phased-array miniaturizzato** (tipicamente ~64-128 elementi su apertura di ~20 mm) potrebbe servire imaging settoriale con campo ampio; sonde **microconvex** con faccia acustica di diametro ~10-15 mm esistono per applicazioni come imaging neonatale o endocavitarie. Fornitori specializzati (es. **NDK**, **Imasonic/Vernon**, **Blatek**) possono realizzare array custom di queste forme. Blatek ad esempio menziona la capacità di produrre array per **cateteri intravascolari, sonde laparoscopiche e endocavitarie** – tutti contesti che richiedono elementi di dimensioni millimetriche e robustezza (anche sterilizzabili) [blatek.com](#). Tali sonde miniaturizzate spesso utilizzano compositi piezoelettrici ad alte prestazioni (PZT con cariche d'aria) per mantenere banda larga nonostante le piccole dimensioni.
- **Versioni "nude" (senza guscio):** Per scopi di progettazione Eco3D, è preferibile acquistare i soli **sensori nudi** – ovvero il blocco trasduttore (array di elementi con backing e cablaggio/PCB) privo di case esterno – in modo da integrarli nel design custom delle sonde intelligenti. Diversi produttori OEM forniscono tale opzione. Ad esempio, **NDK** (Nihon Dempa) documenta moduli array standard in formato nudo pronti per integrazione, con connettore o pad saldabili [ndk.com](#) [ndk.com](#). **Shenzhen GenoSound** e altri OEM cinesi offrono array compatibili con sonde di grandi marche (GE, Philips) ma venduti come ricambi nudi, il che indica la possibilità di acquisire componenti piezo ad alte prestazioni senza guscio. L'acquisto di trasduttori nudi consente di progettare un housing personalizzato ottimizzato (forma ergonomica, materiali biocompatibili) e incorporare l'elettronica on-probe come da necessità Eco3D.

Prestazioni e compatibilità: Nella scelta dei trasduttori, vanno valutati:

- **Frequenze operative:** le sonde miniaturizzate disponibili coprono tipicamente bande dai ~2-5 MHz (convex profondità) fino a 10-15 MHz (lineari alta risoluzione) [ndk.com](#) [ndk.com](#). Alcune soluzioni MEMS multi-frequenza possono coprire l'intero spettro con un singolo array (es. 1-12 MHz per Butterfly [butterflynetwork.com](#)). È importante che i trasduttori selezionati siano compatibili con gli scopi clinici previsti (ad esempio 3-5 MHz per addome profondo, 7-10 MHz per parti superficiali). Eco3D, essendo multi-sonda, potrebbe impiegare **sonde diverse in parallelo** (es. una convex bassa frequenza e una lineare alta frequenza) – quindi vanno identificate opzioni in ciascuna categoria.
- **Dimensioni fisiche:** il footprint dev'essere compatto per poter posizionare più sonde ravvicinate. Array lineari da 128 elementi con lunghezza ~40 mm sono abbastanza piccoli da manovrare a mano [ndk.com](#); esistono microconvex con diametro ~20 mm o meno. I trasduttori MEMS su chip sono estremamente piccoli (l'intero die del Butterfly è pochi cm²). Inoltre, va considerato lo **spazio per l'elettronica on-board**: se il trasduttore è nudo, occorre integrarlo su un PCB flessibile o rigido che ospiti multiplexer, preamplificatori e ADC. Alcuni fornitori offrono **moduli integrati** (ad es. Vernon ha progetti di "OEM USB probe" dove l'array è abbinato a un ASIC di trasmissione/ricezione, pronto da connettere via digitale [vermon.com](#)). Valutare quindi la compatibilità con i front-end di trasmissione (pulsar) e ricezione (impedenza, capacità per canale) dichiarati: ad esempio un array 128ch a 7.5 MHz può avere ~200 pF di capacità per elemento [ndk.com](#), richiedendo driver adeguati.
- **Opzioni OEM/ODM:** Identificare produttori disposti a fornire piccoli lotti per prototipi è cruciale. **Vernon (Francia)** e **Blatek (USA)** sono noti per collaborazioni su misura in ambito medica, inclusa fornitura di **elementi piezo-compositi** e array custom [blatek.com](#) [blatek.com](#). In Asia, aziende come **GenoSound**, **Shenzhen Suntem**, **O&H** producono array compatibili con sonde di varie marche: sebbene focalizzati sul mercato replacement/repair, potrebbero fornire componenti per nuovi dispositivi. Anche **Imasonic** (ora parte di Vernon Group) ha esperienza in matrici 2D e array custom. L'alternativa è valutare partnership con startup come **Butterfly Network** o **Exo** per accedere alla loro tecnologia MEMS in licenza/OEM, ma ciò potrebbe essere complesso dato che sono soluzioni proprietarie brevettate. Infine, per prototipi iniziali "lean" a basso costo, si potrebbe persino considerare l'uso di piccoli trasduttori singolo elemento (ad es. pastiglie piezo da 5-10 mm) per prove di concetto di imaging, ma per raggiungere prestazioni 2D real-time adeguate l'uso di **array phased** è fortemente preferibile.

Moduli di tracking posizionale (IMU, ToF e fusione dati)

Inerziale (IMU): Ogni sonda Eco3D integra un **IMU triassiale** per tracciare orientamento e movimento file-cvczt73dst2uoppzdic53f. Un IMU tipicamente combina **accelerometro, giroscopio e magnetometro** su 3 assi, spesso con fusione sensoriale a bordo per dare direttamente l'assetto (quaternioni) senza gravare sulla CPU. Ad esempio, il **Bosch BNO055** è un SiP che include un accel 14-bit, giro 16-bit e magnetometro, più un microcontrollore interno che esegue la fusione BSX3.0, fornendo un'uscita di orientamento assoluto a 9 assi pronta all'uso [bosch-sensortec.com](#). Questo riduce la complessità di integrazione e le derive tra sensori. Altri moduli noti: **Xsens MTi-1** (IMU professionale calibrata, con dati 3D di velocità angolare, accelerazione e campo magnetico già compensati da bias e temperatura [movella.com](#)), oppure soluzioni MEMS discrete come i chip **TDK InvenSense** (MPU-9250, ICM-20948 etc.) associati a un micro per la sensor fusion. L'importante è avere **uscite a bassa latenza** (<10 ms) dell'orientamento della sonda e misure stabili (drift giroscopio compensato da magnetometro/inclinometro). Considerare anche la **frequenza di aggiornamento**: idealmente 100-200 Hz per seguire movimenti rapidi della mano. Moduli come **Bosch BHI260/BNO086** possono fare fusion a 1000 Hz internamente, ma 100 Hz effettivi sono in genere sufficienti, visto che la calibrazione eco spaziale avviene ogni 50 ms (~20 Hz) secondo il brevetto file-cvczt73dst2uoppzdic53f.

Time-of-Flight (ToF) e misure di distanza: Una caratteristica innovativa di Eco3D è la **misura del tempo di volo acustico reciproco** tra sonde, per calcolare la distanza e posizione relativa istantanea file-cvczt73dst2uoppzdic53f file-cvczt73dst2uoppzdic53f. Questo richiede un modulo in grado di emettere e ricevere **"ping" ultrasuoni tra le sonde** sincronizzati. Si possono adottare due approcci:

- **Uso diretto dei trasduttori ecografici principali:** Le sonde, oltre a eseguire gli impulsi per imaging, potrebbero periodicamente inviare un impulso ultrasonoro dedicato (a bassa frequenza, es. 40 kHz o nell'intervallo medicale 1-5 MHz) rilevato dagli altri trasduttori. Misurando i tempi di arrivo e applicando triangolazione con l'orientamento noto via IMU, è possibile risalire alle distanze inter-sonda file-cvczt73dst2uoppzdic53f. Ciò richiede un'accurata sincronizzazione temporale tra sonde (errore di pochi

microsecondi per precisione millimetrica). L'elettronica di front-end deve avere un modo di registrare il tempo di arrivo del ping (ad es. un timer hardware avviato all'emissione e stoppato alla ricezione). Un **modulo ToF acustico** dedicato potrebbe essere incorporato: ad esempio, **TDK Chirp** produce sensori ultrasonici ToF compatti (CH-101) usati in rangefinder che integrano trasduttore MEMS e timer internoproduct.tdk.com. Tali sensori operano però tipicamente a 100 kHz in aria; per Eco3D servirebbe un adattamento per propagazione nei tessuti o attraverso il gel tra sonde. In letteratura, l'uso di misure di distanza ToF abbinate a IMU ha mostrato di migliorare nettamente la stima di posizione ed orientamento: ad esempio, combinando distanze ToF e dati inerziali in un filtro di Kalman esteso si può ottenere stima accurata dell'attitudine e posizione in tempo realemdpi.com. La nostra architettura utilizzerà principio analogo: l'**algoritmo di auto-calibrazione (modulo 51)** fonde dati IMU e tempi di volo per localizzare continuamente le sonde nello spazio con precisione sub-centimetricafile-cvczt73dst2uoppzdic53f, quindi è preferibile.

- **Tecnologie alternative (UWB, ottico):** In aggiunta o in alternativa al ping acustico, si potrebbe valutare l'uso di moduli **UWB (Ultra-WideBand)** radio per misure di distanza tra sonde. Chip UWB come **Decawave DW1000** consentono di misurare distanze con precisione ~10 cm e update rate > 10 Hz tra nodi wireless, con tempi di volo radio (la velocità della luce rende necessaria elettronica molto veloce, ma esistono implementazioni integrate). Vantaggio: funziona indipendentemente dall'orientamento o occlusione da parte del corpo (i segnali RF a 6-8 GHz attraversano alcuni ostacoli meglio degli ultrasuoni). Tuttavia, l'acqua corporea smorza i segnali UWB, e la precisione attualmente è un po' inferiore (cm) rispetto a ping ultrasonici diretti (potenzialmente mm). Un'altra opzione potrebbe essere un **tracking ottico** (es. piccoli marker IR sulle sonde e una telecamera di profondità esterna tipo Kinect/Realsense), ma ciò complicherebbe il setup e ridurrebbe la portabilità, quindi l'approccio intrapreso nel brevetto (sensori a bordo, nessun dispositivo esterno) è preferibile.
- **Modulo IMU multiplo per drift compensation:** Ogni sonda ha la propria IMU, ma si potrebbe pensare di aggiungere una IMU anche sull'**unità centrale** o utilizzare i dati di gravità comune per evitare derive relative. In pratica, però, usando magnetometri calibrati e i ping ToF come ancoraggio spaziale reciproco, il sistema può funzionare senza un riferimento assoluto esterno. L'algoritmo di fusione continua corregge costantemente la posa di ogni sonda entro 50 msfile-cvczt73dst2uoppzdic53f, azzerando gli accumuli di errore inerziale (drift) con le misure di distanza. Studi su fusione sensori in navigazione indoor mostrano che una distanza ToF intermittente può limitare enormemente la deriva di una doppia-IMU: "utilizzando misure di range ToF e dati inerziali, si è ottenuta una stima altamente precisa di posizione e orientamento"mdpi.com.
- **Esempio implementativo:** Un possibile hardware è combinare un **IMU a 9 assi** come il BNO055 su ogni sonda (fornisce orientamento assoluto già filtratobosch-sensortec.com) con un microcontrollore dedicato alla gestione ping. Il micro può sincronizzarsi via cavo o wireless con gli altri (es. segnale di trigger comune) per inviare ciclicamente un impulso ultrasonoro da una sonda alla volta, in una sequenza round-robin. Misurando il ToF (differenza di timestamp tra emissione locale e ricezione remota, compensato eventuale offset di clock), e conoscendo l'orientamento delle sonde dal IMU, il modulo di calibrazione può risolvere la geometria 3D. Questa **"rete di localizzazione reciproca"** è simile a un mini-sistema di **GPS indoor**, dove le sonde fungono sia da satelliti che da ricevitori l'un l'altra. Un vantaggio è che non servono infrastrutture esterne e la **linea di vista acustica** attraverso il corpo può sfruttare frequenze relativamente basse (i tessuti trasmettono bene ultrasuoni a 100 kHz–1 MHz). Inoltre, l'uso dei trasduttori stessi per i ping rende minima la componentistica aggiuntiva (forse solo un driver dedicato). In alternativa, piccole capsule piezo a 40 kHz (tipo sensori parking sonar) potrebbero essere incastonate nei gusci sonda solo per i ping; però riutilizzare l'array principale con segnali dedicati appare più elegante.

Fusione e calcolo posizionale: I dati grezzi di IMU e ToF vanno combinati:

- L'**IMU** fornisce orientamento (roll/pitch/yaw) e accelerazioni locali; il **ToF** fornisce distanze relative tra coppie di sonde. Un filtro (Kalman esteso) può stimare lo stato completo (posizione 3D e orientamento di ogni sonda). Esempi in letteratura di fusione pedestre mostrano proprio approcci EKF con IMU + range sensor che correggono errore di velocità e posizionemdpi.commdpi.com. Nel nostro caso, noto un punto di partenza (posizione iniziale sonde quando toccano il paziente, assumibile a contatto), i ping calibrano continuamente ogni spostamento.
- La frequenza del ping potrebbe essere qualche decina al secondo per ogni sonda, in modo da garantire almeno 10-20 Hz di aggiornamento posizione. Il modulo **auto-calibrazione (51)** nel design Eco3D effettua questi calcoli <50 msfile-cvczt73dst2uoppzdic53f, quindi è plausibile un refresh 20 Hz.
- Va prevista una fase di **calibrazione iniziale** quando si attivano le sonde: tipicamente si potrebbero appaiare posizionando le sonde vicine, così da inizializzare distanze e allineare i riferimenti magnetici. Dopodiché l'algoritmo entra in tracking continuo, mantenendo la **coerenza spaziale** anche con movimento su organi ampi o mobili (fegato, seno ecc.)file-cvczt73dst2uoppzdic53f.

In sintesi, per i moduli di tracking posizionale di Eco3D:

- **IMU 9 assi su ciascuna sonda** – es. BNO055 o Xsens MTi – per ottenere orientamento in tempo realemovella.com.
- **Modulo ToF acustico** – implementato via trasduttori stessi o sensori dedicati – per misurare distanze relative con precisione millimetrica.
- **Microcontrollore di sincronizzazione** – per gestire ping e time-stamping (potrebbe essere lo stesso MCU che legge l'IMU).
- **Filtro di fusione** – algoritmo su SoC centrale (o micro distribuito) per calcolare pose istantanee di tutte le sonde, compensando derive.
- **Possibile estensione:** se richiesto, un modulo **UWB o BLE angle-of-arrival** potrebbe integrare i dati (ad es. Nordic nRF52840 BLE5.1 can do angle-of-arrival to estimate direction, ma è una granularità grossolana ~5°). Nel complesso però, l'approccio interno IMU+Ultrasuoni è autosufficiente e privo di setup esterno, ideale per un dispositivo portatile all-in-one.

SoC di elaborazione e AI edge computing

Requisiti di elaborazione: L'unità di elaborazione portatile (indicata col modulo 50 nel brevetto) deve gestire:

- Ricezione in parallelo di flussi di eco B-scan da **più sonde** (idealmente 2 o più).
- **Beamforming e processamento ultrasonoro** di base se non tutto viene fatto "on-probe". Nel brevetto si cita "digitalizzazione on-probe"file-cvczt73dst2uoppzdic53f, quindi forse ogni sonda invia frame digitali pre-formatati. Ma potrebbe comunque essere necessario fare combinazione o post-process sulle immagini.
- **Fusion volumetrica in tempo reale (≥ 5 volumi/s)**file-cvczt73dst2uoppzdic53f: ossia prendere i vari B-scan da sonde diverse, inserirli nella griglia voxel comune e interpolare/ricostruire il volume 3D. Questo implica algoritmi intensivi (ricostruzione tipo Voxel Carving o Volume Rendering).
- **AI 3D-CNN per speckle reduction, super-resolution, filling**file-cvczt73dst2uoppzdic53f : ovvero applicare reti neurali convolutive 3D sul volume in tempo quasi reale per migliorare la qualità dell'immagine.
- **Rendering 3D e interfaccia grafica** per la navigazione del volume e AR (streaming a un visore o visualizzazione locale su display).
- Il tutto con latenza <200 msfile-cvczt73dst2uoppzdic53f e in un form factor portatile (<3 kg con batterie)file-cvczt73dst2uoppzdic53f.

Ciò richiede un **hardware di calcolo edge molto potente e ottimizzato per AI**. Alcune opzioni allo stato dell'arte:

- **NVIDIA Jetson Orin Nano:** Una soluzione SoC moderna con CPU ARM e GPU integrata con tensor cores. Il Jetson Orin Nano (8 GB) offre fino a **40 TOPS (trillion operations/s) di performance AI** in un modulo compatto (70x45 mm) con consumo configurabile tra **7W e 15Wopenzeka.com**. Include una GPU Ampere 512-core + 16 Tensor Cores e CPU 6-core ARM, ideale per inferenze di reti neurali pesanti. Inoltre, il Jetson ha stack software maturo (CUDA, TensorRT) semplificando lo sviluppo di reti 3D CNN accelerate. Con 40 TOPS, si possono teoricamente eseguire più modelli CNN 3D in parallelo (speckle reduction, super-resolution) in tempo reale. Un Jetson Orin NX (superiore) arriverebbe a 70-100 TOPS se servisse più potenzaadocs.turingpi.comdocs.turingpi.com. Il vantaggio Jetson è la flessibilità: oltre all'AI, la stessa GPU può gestire rendering 3D (volume ray casting per l'interfaccia) e la CPU ARM può occuparsi di I/O e controllo. La dissipazione termica di 15W è gestibile con un piccolo heatsink e ventola se necessario. Dunque Orin Nano è un candidato eccellente come "cervello" di Eco3D, con un buon equilibrio prestazioni/consumi.
- **Google Edge TPU (Coral):** Coprocessore AI specializzato in inferenza quantizzata (INT8). Un singolo Edge TPU offre **4 TOPS** con consumo di circa **2 W** (2 TOPS/W)coral.ai. Può dunque eseguire reti neurali a velocità elevate con minima potenza, ma con alcune limitazioni: la memoria on-chip è limitata (ciò impone reti compatte) e supporta

principalmente modelli feed-forward CNN con operazioni supportate dalla TPU. Per Eco3D potrebbe essere utile per reti specifiche (es. un modello di denoising 3D ridotto) da affiancare ad una CPU/GPU per il resto. Google fornisce moduli M.2 o USB acceleratori EdgeTPU facilmente integrabili. Ad esempio, un modulo dual EdgeTPU (Murata) fornirebbe 8 TOPS a ~4 W [murata.com](http://www.murata.com). Vantaggi: design molto compatto, basso calore, integrazione con TensorFlow Lite. Svantaggi: meno flessibilità rispetto a una GPU (non adatto per rendering o elaborazioni personalizzate non CNN). Potrebbe essere considerato in una **configurazione lean/entry-level**: ad esempio usare un SoC ARM base (NXP i.MX8) per gestire acquisizione e volume, delegando l'inferenza a un EdgeTPU. In tal modo si contiene molto il consumo totale (forse <10 W complessivi). Di fatto, l'EdgeTPU è pensato per edge inferencing efficiente e potrebbe gestire 1-2 modelli 3D in tempo reale se ottimizzati.

- **FPGA / SoC eterogenei (Xilinx):** Storicamente, molti sistemi ultrasonici portatili impiegano **FPGA o SoC programmabili** per il beamforming e processing real-time, grazie alla loro parallelizzazione deterministica. Xilinx (ora AMD) offre ad esempio le famiglie **Zynq UltraScale+ MPSoC** e la nuova **Versal ACAP**: questi integrano core ARM + logica FPGA + talvolta **AI Engine DSP**. Un Versal ACAP può raggiungere altissime performance su elaborazioni streaming ed è stato proposto per imaging ultrasonoro ultra-veloce [IEEE explore. IEEE.org](https://www.explore.ieee.org). Il vantaggio di un FPGA è la latenza ultrabassa e la possibilità di pipeline completamente custom (ad esempio implementare in hardware il posizionamento del B-scan nella griglia voxel in parallelo). Si può anche implementare reti CNN in logica o usare blocchi DSP per filtri avanzati. Tuttavia, lo sviluppo è molto più complesso (richiede progettazione VHDL/Verilog o High-Level Synthesis) e la potenza computazionale grezza in TOPS equivalenti può essere inferiore a soluzioni GPU/TPU a parità di watt (a meno di usare grossi FPGA molto costosi). Per un prototipo, si potrebbe valutare un board come **Avnet Ultra96 (Zynq UltraScale+ ZU3EG)** o una scheda con **Zynq ZU7/ZU11** se serve più grande: queste offrono GPU Mali modesta + FPGA, ma consumi <10W tipici. Un approccio più accessibile è usare FPGA per i compiti deterministici (es. beamforming delle linee RF in B-scan, conversione polar-to-cartesian delle immagini) e affiancare un acceleratore AI (Jetson o EdgeTPU) per le reti neurali. Va notato che per mantenere **bassa latenza**, un FPGA può elaborare dati "on the fly" mentre arrivano, riducendo buffering. Alcuni white paper Xilinx notano come i SoC programmabili siano ideali per ultrasuoni portatili per l'equilibrio potenza/flessibilità [researchgate.net](https://www.researchgate.net). Ad esempio, un **Zynq-7000** fu usato in prototipi di ecografi portatili per gestire beamforming con consumo contenuto (avendo FPGA + CPU integrati su un chip).
- **Altre soluzioni Edge:** Meritano menzione anche i nuovi acceleratori AI dedicati come **Hailo-8** (chip da 26 TOPS @ <5W), gli **Intel Movidius Myriad X** (più datati, ~1 TOPS @ 1-2W, usati in Clarius per esempio), o SoC mobili con NPU integrato (ad es. **Qualcomm Snapdragon** serie QRB, oppure **Mediatek AioT** con APU). Questi possono offrire alternative se si vuole integrare tutto in uno. Ad esempio, un **Snapdragon 865** ha CPU, GPU e DSP/NPU in un package e potrebbe eseguire sia grafica che AI, con consumo ~5-7W sotto carico. Il supporto software però è meno aperto rispetto a Jetson.
- **Sistemi multi-board:** In una configurazione ad alte prestazioni, si potrebbe combinare più componenti: es. un Jetson Orin per il grosso dell'AI e rendering, più un FPGA per gestire l'interfaccia ad alta velocità con le sonde (acquisizione dati grezzi, pre-processing). La connettività potrebbe avvenire via PCIe o SPI ad alta velocità tra FPGA e Jetson. Ciò ovviamente aumenta costi e complessità, ma potrebbe ottimizzare il flusso end-to-end.

Consumo, calore e footprint: Questi SoC devono essere selezionati non solo per potenza computazionale ma anche per **efficienza energetica** e integrabilità:

- Un Jetson Orin Nano a 15W necessiterà di batteria adeguata e dissipazione. Ha un form-factor SOM (System on Module) 260 pin SO-DIMM, dimensioni ~70x45 mm, facilmente alloggiabile in un case portatile [32*page 2] . La dissipazione da 15W richiede un dissipatore (magari in alluminio 60x60 mm con alette) e possibilmente una ventolina silenziosa. In ambienti clinici il rumore deve essere minimo, quindi sarebbe preferibile farlo funzionare su profilo 10W con dissipazione passiva (fattibile con un buon heatsink e magari il case in metallo come massa termica).
- L'Edge TPU invece genera pochissimo calore (2W, spesso può essere saldato direttamente su PCB o montato su M.2 senza alcuna ventola). Occupa pochi cm². Potrebbe essere messo direttamente vicino al modulo radio per inferenze "al volo" dei dati prima di trasmetterli (ma nel nostro caso è più logico tenerlo sull'unità centrale).
- Gli FPGA/Zynq variano: uno Zynq UltraScale di media gamma consumato a 5-6W può spesso essere dissipato passivamente. L'area dipende dal package (spesso BGA ~20-30 mm lato). Se integrato su una SOM (es. Ultra96 board è 90x55 mm completa), facilita l'adozione.
- **Gestione termica attiva vs passiva:** alcuni sistemi medicali portatili usano ventole, altri design fanless con grandi superfici metalliche. Considerato che Eco3D mira a <3 kg totali, si potrebbe avere l'unità di elaborazione in una sorta di **box portatile** (da tenere magari a tracolla o vicino al paziente) con griglie di ventilazione. Se possibile, adottare architetture a **bassa dissipazione**: e.g. usare inferenza INT8 su EdgeTPU invece che FP16 su GPU per ridurre consumo quando non necessario, oppure scalare la frequenza GPU in base al carico (NVIDIA Jetson supporta DVFS). L'esperienza di sistemi ultrasuoni handheld (Butterfly, Clarius) dimostra che è fattibile avere elaborazione integrata e autonomia di un paio d'ore, quindi con una buona scelta SoC (Orin Nano) siamo nella giusta direzione.

In conclusione, **due configurazioni tipo** emergono:

- **High-end: Jetson Orin Nano 8GB** come core (40 TOPS, 6 CPU, GPU Ampere) accompagnato eventualmente da un piccolo FPGA per I/O, offre massime prestazioni AI con consumo gestibile 10-15W [openzeppelin.com](https://www.openzeppelin.com). Ciò consentirebbe i 5 volumi/s con AI avanzata e visualizzazione AR senza compromessi.
- **Lean prototyping: SoC ARM + Edge TPU**, ad esempio un **NXP i.MX 8M Plus** (quad ARM Cortex-A53 con piccola NPU 2.3 TOPS integrata) più magari un modulo Google Coral aggiuntivo via PCIe. Questo potrebbe limitare un po' le funzionalità AI (si dovrebbe ridurre la complessità delle reti) ma consumerebbe forse 5-7W totali, ideale per un primo prototipo a batteria più duratura. Anche schede come Raspberry Pi 4 + Coral TPU sono un esempio low-cost di tale combinazione.

Va evidenziato che i sistemi **ASIC dedicati** (come fu Butterfly con il suo chip custom CMOS) possono raggiungere efficienze migliori, ma per sviluppo è molto più realistico affidarsi a **SoC commerciali programmabili**. Una nota da letteratura: *"I sistemi ecografici portatili richiedono forte miniaturizzazione e lunga durata a batteria; di conseguenza l'uso di ASIC/SoC dedicati è fortemente indicato"* [researchgate.net](https://www.researchgate.net). Nel nostro caso scegliamo componenti programmabili di mercato che soddisfino tali requisiti.

Interfacce di visualizzazione (AR/VR, display)

Eco3D prevede un'interfaccia utente multisorgente sofisticata, inclusa la **proiezione su visori di Realtà Aumentata (AR)** [file-cvct73dst2uoppzdc53f](https://www.file-cvct73dst2uoppzdc53f) per visualizzare il volume 3D registrato direttamente sul paziente o nell'ambiente. Si devono quindi valutare:

- **Visori AR di fascia alta (HoloLens 2, Magic Leap 2):** Questi dispositivi stand-alone forniscono un'esperienza AR immersiva con tracking preciso e capacità di rendering 3D integrato.
 - **Microsoft HoloLens 2:** È uno dei visori AR più collaudati in ambito enterprise/medicale. Ha un campo visivo di circa **52° diagonali** e risoluzione **2048x1080 px per occhio** blogs.expandreality.io. Offre pieno tracking 6DOF della testa e mani (gesture), ed è un sistema all-in-one (CPU Snapdragon 850, non richiede PC). Punti di forza: integrazione nativa con ecosistema Microsoft (Dynamics 365, Remote Assist, Azure etc.) blogs.expandreality.io, quindi facile implementare ad es. streaming del volume su HoloLens con app UWP. È confortevole per sessioni moderate, anche se il peso ~566 g sul capo è significativo blogs.expandreality.io blogs.expandreality.io. Molti progetti di imaging (es. ologrammi TAC intraoperatori) hanno già usato HoloLens, confermando la validità clinica. Prezzo ~3500\$.
 - **Magic Leap 2:** Nuova generazione di visore AR orientato enterprise. Presenta un FoV molto più ampio, **70° diagonale** blogs.expandreality.io blogs.expandreality.io, e alta risoluzione **1440x1760 px per occhio** blogs.expandreality.io, permettendo visualizzazioni più coinvolgenti del volume ecografico flottante. Ha un design a **moduli**: il visore stesso pesa solo 260 g sulla testa, collegato a un piccolo computer "compute pack" da cintura blogs.expandreality.io. Ciò migliora comfort per uso prolungato. Magic Leap 2 supporta ambient occlusion avanzato e *dimming* dello sfondo (utile per vedere chiaramente gli ologrammi anche in sale luminose) blogs.expandreality.io. Il sistema operativo è open (based on Android) con supporto a OpenXR e SDK dedicati, e può integrarsi in flussi Linux enterprise blogs.expandreality.io. Prezzo allineato (circa 3299\$) blogs.expandreality.io. Per Eco3D, Magic Leap 2 potrebbe offrire la migliore resa visiva per proiettare il volume ecografico in 3D nello spazio reale, grazie al grande FOV e ottima qualità display.
 - **Confronto:** ML2 ha vantaggio di display e comfort, HL2 di ecosistema software. Entrambi potrebbero visualizzare il volume Eco3D: es. un'app che mostra un ologramma del volume registrato nella posizione anatomica corretta (fondendo tracking visore con coordinate paziente). HL2 essendo Windows-based potrebbe più facilmente interagire con formati DICOM o HL7 integrabile [file-cvct73dst2uoppzdc53f](https://www.file-cvct73dst2uoppzdc53f); ML2 dal canto suo è più orientato a grafica spinta. La latenza di streaming (via Wi-Fi) va ottimizzata, ma con Wi-Fi 6 e compressione adeguata si può tenere <50 ms, sufficiente per visual feedback in AR.

- **Visori VR o Mixed Reality alternativi:** Ad esempio, un **Meta Quest 2/Pro** (visore VR standalone) potrebbe essere usato in modalità pass-through (il Quest Pro ha pass-through a colori) per visualizzare il volume sovrapposto al paziente. Tuttavia, l'ingombro VR è maggiore e il dispositivo non è trasparente come un HoloLens/MagicLeap, quindi meno naturale in ambiente clinico. Un vantaggio è il costo inferiore (Quest 2 ~400\$) e community ampia. Ma la **AR ottica see-through** di HoloLens/ML2 è generalmente preferita in chirurgia e imaging perché consente il contatto visivo col paziente e l'ambiente reale.
- **Occhiali AR leggeri (Nreal, etc.):** Menzionati NReal (ora XREAL) come opzione minimale. **Nreal Light** è un esempio di occhiali AR tethered allo smartphone: fornisce un display see-through con **FOV ~52°** e risoluzione **1080p per occhio** [lucidrealitylabs.com](https://www.lucidrealitylabs.com), in un form factor occhiale di soli ~88 g [gskarredghost.com](https://www.gskarredghost.com). Usano lo smartphone per tracking e rendering, quindi come puro display. Potrebbero essere impiegati per mostrare un'immagine flottante del volume (ad esempio come schermo virtuale 2D/3D) con un cablaggio semplice. Vantaggi: leggerezza, costo basso (~600€), facilità d'uso; Svantaggi: tracking ambientale meno robusto (dipende dalla cam del telefono), interattività ridotta (no hand-tracking avanzato, si userebbe smartphone come controller). Per dimostrazioni o un utilizzo in cui il medico vuole vedere semplicemente un monitor virtuale senza distogliere lo sguardo dal campo, occhiali come Nreal possono essere un'opzione. Un altro prodotto simile sono gli **Xreal Air**, ancora più leggeri ma con FOV 46° e focalizzati su fruizione di schermi giganti virtuali più che AR interattiva [eddit.com](https://www.eddit.com).
- **Tablet o display integrato:** Come opzione più tradizionale, Eco3D potrebbe utilizzare un **tablet** (es. un tablet rugged Android/iPad) o uno schermo integrato sul corpo dell'unità centrale per visualizzare il volume ricostruito. Questa è la soluzione più semplice per prototipi: ad esempio un tablet 10" collegato via cavo o wireless che mostri la ricostruzione 3D in una GUI touch. In ambito clinico, un tablet può essere montato su un braccio o tenuto dall'operatore. Certo, si perde l'aspetto AR (il volume sarebbe visualizzato sullo schermo e non nello spazio reale), però è utile per **scopi dimostrativi o fallback**. Molti ultrasuoni handheld oggi usano smartphone/tablet come display (Butterfly si collega allo smartphone, ad esempio). Anche Eco3D potrebbe in modalità base funzionare con un semplice schermo 2D mostrando sezioni o una rendering 3D manipolabile con touch.
- **Display integrato nel dispositivo:** Data la dimensione prevista dell'unità (<3 kg), si potrebbe pensare di incorporare un piccolo monitor LCD (ad es. 7-8" ad alta luminosità) direttamente sul dispositivo, magari inclinabile. Ciò renderebbe Eco3D più simile a un tradizionale ecografo portatile all-in-one, utile in contesti dove il visore AR non è disponibile. Tuttavia questo aggiunge peso e consumo (un LCD da 7" può consumare 3-5W). Forse meglio mantenere l'unità elaborativa separata e libera da display e appoggiarsi a dispositivi esterni (visori, tablet).
- **Considerazioni video/output:** L'interfaccia utente (modulo 60) deve supportare varie modalità: navigazione interattiva del volume, annotazioni, proiezione ARfile-cvczt73dst2uoppzdic53f. È utile che il sistema possa anche **emettere video standard** per documentazione o collegamento a monitor esterni. Ad esempio, un'uscita **HDMI o SDI** potrebbe permettere di mostrare l'immagine 3D su grandi schermi in sala operatoria. Oppure la possibilità di esportare il volume in DICOM per archiviarlo (il brevetto cita supporto DICOM-RT, HL7-FHIR per integrazione nei sistemi ospedalieri) file-cvczt73dst2uoppzdic53f. Quindi, dal punto di vista hardware, avere un'interfaccia video (porta HDMI 1.4/2.0, oppure una USB-C DisplayPort alt-mode) sarebbe utile. I SoC come Jetson già hanno output display. In caso di soluzioni headless, si potrebbe includere un **modulo wireless display** (es. Miracast) o server web per visualizzare su qualunque device collegato.

In sintesi, **soluzioni AR/VR consigliate:**

- Per la **migliore esperienza: HoloLens 2 o Magic Leap 2**, che permettono al medico di vedere un ologramma 3D del volume direttamente sul paziente. Magic Leap 2 offre FOV maggiore e minor affaticamento blogs.expandreality.io blogs.expandreality.io, HoloLens 2 offre integrabilità immediata con sistemi Microsoft e già diffusione in alcune chirurgie.
- Come **opzione leggera/economica: Nreal Light (Xreal)** con un'app mobile dedicata, per avere un display AR base.
- Come **backup/tradizionale: un tablet touchscreen** oppure un piccolo **monitor integrato**, per quando i visori non sono pratici (ad esempio in pronto soccorso potrebbe essere più rapido guardare un tablet).

Va tenuto conto anche della **formazione e accettazione:** introdurre AR in clinica è innovativo ma richiede training; disporre comunque di un'interfaccia classica (schermo 2D con sezioni navigabili) è importante per l'adozione graduale. Il bello di Eco3D è che può offrire entrambi contemporaneamente: un utente può osservare il volume in AR mentre un altro collega lo vede su monitor standard, dato che il motore di rendering può gestire uscite multiple.

Batterie e moduli di alimentazione

Esigenze energetiche: Eco3D, essendo portatile, deve funzionare a batteria per almeno **2 ore** continue file-cvczt73dst2uoppzdic53f. Considerando i consumi stimati:

- SoC elaborazione (es. Jetson Orin Nano) ~10-15 W sotto carico.
- 2-3 sonde ecografiche con elettronica on-board: ogni sonda forse 2-3 W (ADC, preampli, IMU, trasmissioni ultrasoniche). Diciamo ~5-6 W totali se sono 2 sonde attive simultaneamente.
- Visore AR esterno ha la propria batteria, non carica sul nostro sistema, quindi non conta.
- Altri circuiti: modulo wireless, eventuale display, MCU ausiliari: forse 2-3 W.
- Totale worst-case ~20-25 W.

Per 2 ore di autonomia a 20 W servono ~40 Wh utilizzabili. Con celle Li-ion commerciali (densità ~180 Wh/kg), servirebbe una batteria da circa 0,25 kg. Ad esempio, 3-4 celle 18650 (3.6V nominale, 3400 mAh ciascuna) in configurazione 4S (14.4 V, ~50 Wh) darebbero tale energia. Molti ecografi portatili usano infatti batterie simili: il **Butterfly iQ** (che però è solo una sonda) ha una batteria 2.2 Ah integrata per ~2 ore di scansione butterflynetwork.com. Sistemi portatili laptop-like (Esaote, Chison) spesso includono pacchi ~60 Wh per 1.5-2h.

Tipo di batteria: la scelta più ovvia è **agli ioni di litio (Li-ion)**, per l'alta densità energetica. Formati possibili:

- **Celle cilindriche (18650/21700):** robuste, facile gestione termica, possono erogare correnti alte. Un pacco ad esempio 4×18650 in serie (14.4 V) con 2 paralleli (6.8 Ah) fornirebbe ~98 Wh, sufficiente per ~4 ore. Peso stimato ~0.5 kg. Con BMS integrato per sicurezza.
- **Pacchi Li-ion polimeri (LiPo) sagomati:** come quelli di laptop o tablet, possono ottimizzare lo spazio. Ad esempio un pack 11.1 V (3 celle in serie) 9000 mAh darebbe ~100 Wh. LiPo richiedono attenzione a gonfiaggio/robustezza, ma molti dispositivi medicali li usano (con involucro rigido protettivo).
- **Opzioni alternative:** Batterie **LiFePO4** (litio ferro fosfato) offrono maggiore sicurezza e cicli, ma densità più bassa ~100 Wh/kg – probabilmente non necessario qui.

Alimentazione e conversione: Probabilmente l'elettronica funzionerà a vari livelli di tensione: il pulser ultrasuono può richiedere decine di Volt per eccitare i cristalli, la logica digitale tipicamente 5V, 3.3V, 1.8V. Quindi ci sarà uno stadio di **power management** che converte la tensione batteria (es. 14.4 V nominale) nei vari rali:

- Un **DC-DC step-down** principale per 5V o 12V per SoC/board.
- Convertitori point-of-load switching/regolatori LDO per le tensioni più basse.
- Driver HV per trasduttori (potrebbero generare ±50-100 V brevi per lanciare impulsi – questi potrebbero usare booster capacitivi o trasformatori step-up, come nei sistemi ultrasound convenzionali).

Il design dovrà includere un **Battery Management System (BMS)** per Li-ion: protezione da sovraccarico, bilanciamento celle, indicatore di carica. Molti sistemi portatili implementano batterie smart con comunicazione SMBus (indicazione % residua, etc). Nei prototipi iniziali si può usare moduli BMS prefabbricati.

Ricarica: Idealmente la batteria sarà ricaricabile sia durante l'uso (alimentazione da rete) sia off-line. Un alimentatore esterno (ad es. 19V DC standard laptop) potrebbe alimentare il sistema e contemporaneamente caricare la batteria (circuito di charging). In ambito medicale, avere la possibilità di swap rapido sarebbe un plus: alcuni ecografi

portatili hanno **batterie estraibili a caldo**. E.g., Clarius e altri handheld forniscono batteria intercambiabile per estendere l'uso continuo. Per Eco3D, magari per versioni successive, si può prevedere un modulo batteria removibile, in modo da dockare il dispositivo e cambiare pacco in pochi secondi se necessario. In fase prototipale, però, una batteria fissa interna semplifica (come da brevetto che cita "batteria interna >2h" file-cvczt73dst2uoppzdic53f).

Efficienza e runtime: Con i consumi stimati, 2 ore sono realistiche. Per sicurezza, si potrebbe dimensionare la batteria per ~3 ore nominali, garantendo 2 ore anche con degrado col tempo. Ad esempio puntare a ~60-70 Wh. Se il consumo effettivo medio è minore (non sempre 100% di carico AI), la durata può aumentare. Spesso i datasheet di portatili POCUS dicono "fino a 2 ore di scansione continua" perché in pratica l'uso non è a pieno regime costante (ci sono pause, freeze immagini, ecc.). Ad esempio, un dispositivo citato "range 1.5-12 MHz con due ore di durata batteria, supporta sessioni diagnostiche prolungate" ultrasoundfanatic.com – quindi due ore è un po' uno standard per handheld.

Distribuzione peso e fattore di forma: La batteria da qualche decina di Wh sarà probabilmente il componente più pesante. Conviene posizionarla in modo da bilanciare il dispositivo (ad esempio sul fondo del case centrale), e magari usare celle piatte per mantenere un profilo sottile. Si dovrà assicurare la conformità a normative elettriche medicali (IEC 60601-1) per parti alimentate a batteria, soprattutto riguardo a perdite di corrente, isolamento, ecc., ma intrinsecamente a batteria è più facile rispettare limiti di sicurezza elettrica.

Alimentazione delle sonde: Se le sonde comunicano via cavo, probabilmente l'unità centrale fornirà loro alimentazione DC (es. 5V) sul cavo stesso. Bisogna tener conto di cadute di tensione su cavi sottili: potenzialmente usare 12V e poi regolare a bordo sonda per ridurre perdite. Se invece le sonde fossero wireless, avrebbero micro-batterie integrate – scenario possibile in futuro – ma allora servirebbe ricarica frequente o batterie a bottone, non ideale per ora. Presumiamo sonde cablate o almeno collegate a un modulo tethered.

Case study batterie in ecografi esistenti:

- **Butterfly iQ:** 2 ore con batteria 2.2 Ah integrata, ricarica rapida ~1.5h butterflynetwork.com.
- **Clarius:** batterie intercambiabili, ciascuna ~45 min di scanning (ma sonde piccole, alveoli).
- **Laptop ultrasound (Chison ECO3):** ~2h con batteria Li-ion integrata cardiacdirect.com.
- Questo conferma che puntare a 2+ ore è lo standard. Eco3D potrebbe differenziarsi offrendo magari 3-4h con un pacco più generoso se il peso lo consente.

In breve, per alimentazione si implementerà:

- **Pacco batteria Li-ion ricaricabile** (es. 4S2P 18650 o LiPo equivalente, ~14.4 V, 50-70 Wh).
- **BMS e circuito di carica** (possibilmente con supporto carica rapida 1-2 ore).
- **Convertitori DC-DC** interni per le tensioni necessarie (regolati per efficienza >90%).
- **Connettore di alimentazione esterna** per rete, e magari un indicatore LED della carica.

Componentistica accessoria e ausiliaria

Oltre ai componenti principali, vi sono vari elementi secondari ma fondamentali per completare il dispositivo Eco3D:

- **Materiali del corpo sonda e interfacce paziente:** Le sonde devono essere costituite da materiali **biocompatibili e robusti**. Tipicamente, la faccia a contatto (finestra acustica) è in **elastomero siliconico medicale** o **uretano**: questi materiali trasmettono bene gli ultrasuoni e sono morbidi per garantire accoppiamento con la pelle accessdata.fda.gov. Inoltre resistono ai disinfettanti e all'usura. Il guscio della sonda (maniglia) di solito è in plastica rigida (es. **policarbonato, PBT** o altre termoplastiche classificate USP Class VI) spesso con rivestimento superficiale per resistere ai disinfettanti ospedalieri senza creparsi. Possono essere previsti inserti di gomma (TPU) per migliorare la presa e proteggere dagli urti – esistono brevetti su "superfici di grip in materiale elastomero biocompatibile ad alta resistenza a strappo" patents.google.com, il che suggerisce l'uso di silicone speciale o elastomeri tipo Santoprene. Dovendo magari sterilizzare o almeno sanificare le sonde multiuso, i materiali devono reggere processi come pulizia con soluzioni alcoliche, ecc. In alcuni casi, si possono usare **cover monouso** in film plastico (CIVCO produce coperture per sonde per evitare contaminazione civco.com) – Eco3D potrebbe prevedere cover dedicate specie se le sonde hanno forme particolari.
- **Sistema di erogazione gel:** Un'ecografia 3D multi-sonda richiederà mantenere buon accoppiamento acustico. Muovendo liberamente due sonde, l'operatore deve tenere area ben gelificata. Si può integrare un piccolo **dispenser di gel** nel dispositivo. Esistono idee brevettuali di *ultrasound scanner con dispenser di gel integrato nella sonda* patents.google.com. Una possibilità: un **micro-pompa peristaltica** o a siringa collegata a un serbatoio di gel nel corpo della sonda o nell'unità centrale, con un tubicino che porta il gel vicino alla faccia trasduttore. Premendo un pulsante, l'operatore potrebbe far fuoriuscire una goccia di gel addizionale sul trasduttore senza interrompere l'esame. Per prototipo, questo può essere complicato, ma è fattibile usare micropompe medicali (come quelle delle pompe infusione, opportunamente adattate per gel viscoso). In alternativa, un **sistema manuale** tipo serbatoio squeezable con valvola controllata. Se integrato nell'unità centrale, si potrebbe avere un tubetto flessibile che corre lungo il cavo della sonda fino alla testa. In ogni caso, va usato gel standard (acqua + glicole) e garantito che il sistema sia ricaricabile e pulibile (per evitare crescita batterica). Un'idea futuribile: sensori che rilevino se il contatto è perso (gel finito) e attivino automaticamente il dispenser – qualcosa del genere è stato sperimentato in prototipi robotici arxiv.org.
- **Raffreddamento passivo/attivo:** Come accennato, la dissipazione termica deve evitare punti caldi sia sull'unità centrale che sulle sonde. Per l'**unità centrale**, si può implementare raffreddamento ibrido: un dissipatore interno e, se necessario, una **ventolina silenziosa** (magari attivata solo oltre certa temperatura). Bisogna assicurare ventilazione ma evitando ingressi di liquidi (norme IP). Opzioni: griglie con filtro o progettare il case in alluminio che funga da aletta. Per le **sonde**, generalmente il calore viene dai circuiti e dall'assorbimento acustico nel backing. Le sonde standard a volte si scaldano durante uso prolungato (ci sono limiti FDA sull'energia che possono emettere prima di surriscaldare la pelle). Se Eco3D prevede uso intensivo, potrebbe essere utile un raffreddamento attivo: ad esempio alcune sonde speciali (HIFU, o TEE transesofagee) usano **circolazione di liquido** per raffreddare hesse-mechatronics.combiotecitalia.com. Nel nostro caso probabilmente non necessario, ma potremmo garantire che il guscio della sonda abbia un **elevata conducibilità termica** (magari inserendo un'anima metallica) così da diffondere uniformemente il calore. Una piccola sonda non deve superare ~41°C in superficie per sicurezza. In scenario estremo, si potrebbe considerare micro-ventole integrate nelle sonde (improbabile per rumore), oppure stazioni di riposo in cui riporre la sonda per raffreddarla a intervalli. In generale, puntiamo su design a **bassa potenza per sonda** (quindi elettronica efficiente) e dissipazione passiva attraverso materiali e superfici.
- **Connettività wireless:** Eco3D idealmente supporta comunicazioni wireless per streaming e controllo. Due principali: **Bluetooth Low Energy (BLE)** e **Wi-Fi 6**.
 - **BLE:** utile per pairing iniziale, invio di comandi a basso bitrate (ad es. controllo remoto via app smartphone, o trasmissione di piccoli dataset come parametri, identificazione sonda). BLE 5 offre anche funzionalità come AoA (Angle of Arrival) che, come detto, potrebbe dare un hint grossolano di direzione tra dispositivi. Potremmo includere un modulo BLE (ad es. Nordic nRF52840) nel sistema per questi scopi e per interoperabilità con accessori (p. es. un pedale wireless per freeze/cattura immagini, etc.). Il BLE ha consumo molto ridotto, impatto minimo.
 - **Wi-Fi 6 (802.11ax):** per trasmettere immagini e volumi ad alta velocità. Wi-Fi 6 garantisce throughput elevati (oltre 1 Gbps reali) e bassa latenza grazie ad OFDMA e miglior gestione del canale (riduzione latenza fino al 75% rispetto Wi-Fi 5) en.wikipedia.org. Ciò è importante se vogliamo streammare il rendering 3D verso un visore AR untethered (es. HoloLens) o inviare i dati volumetrici a un server. Un modulo Wi-Fi 6 (o 6E su 6 GHz per meno interferenze) potrebbe essere integrato via M.2 o SDIO. Alternativamente, se l'unità elab. è un Jetson, questo supporta già moduli come Intel AX210. In modalità locale, il Wi-Fi potrebbe creare una rete dedicata tra Eco3D e il visore AR per minimizzare lag. Oltre a Wi-Fi, considerare una **porta Gigabit Ethernet** (utile in ospedale per collegare a rete PACS e inviare DICOM).
- **Interfacce di output dati:** Per integrarsi in flussi clinici occorre supportare standard medici. L'hardware dovrà consentire:
 - **USB:** ad esempio una porta USB 3.0 per scaricare dati, o per funzionare in modalità tethered a un PC. Si potrebbe implementare una modalità "Mass Storage" per far vedere la memoria interna con i volumi salvati, oppure addirittura emulare una webcam UVC (mostrando l'eco in 2D in tempo reale su PC se collegato).

- **HDMI/Video (SDI)**: come detto, un'uscita video per sale operatorie o registrazione. Se non integrata sul SoC, esistono moduli convertitori (es. da USB-C DisplayPort a HDMI, o mini moduli HD-SDI).
- **DICOM**: a livello software, generare oggetti DICOM (ad es. DICOM US volume stacks) che poi possono uscire tramite Wi-Fi/Ethernet. L'hardware deve garantire storage locale sufficiente (un volume 3D cine può essere grande, es. 256×256×256 voxels per 5 vol/s). Probabilmente includeremo una **memoria SSD** (64-128 GB) per caching dei dati e successiva esportazione. Il supporto **HL7-FHIR** menzionato file-cvczt73dst2uoppzdic53f implica connettività rete per mandare dati al RIS/PACS ospedaliero.
- **Audio**: se necessario per qualche motivo (es. doppler audio, o notifiche), un piccolo buzzer o output audio potrebbe essere considerato, ma non prioritario.
- **Pulsanti e controlli**: Accessori includono magari controlli sull'impugnatura sonda (come pulsanti programabili, es. freeze, capture). Molte sonde hanno 1-2 pulsanti integrati per comodità. Questi andranno collegati a microcontrollore e configurati. Anche un eventuale **foot-switch wireless** (pedale Bluetooth) può essere utile durante procedure interventistiche per congelare l'immagine senza usare le mani.
- **Illuminazione/Indicatori**: LED di stato su sonde (ad es. LED che indica sonda attiva o sincronizzazione) e sull'unità (stato batteria, connessione). Sono dettagli ma migliorano l'UX.

Riassumendo, la componentistica accessoria include: gusci sonde in **silicone/plastica biocompatibile**, eventuali **cover sterile monouso**, un meccanismo per **gel** integrato (opzionale ma innovativo), **sistemi di raffreddamento** adeguati (preferibilmente passivi), moduli **wireless BLE & Wi-Fi6** per connettività, una serie di **interfacce I/O** standard (USB, HDMI, Ethernet) e supporto ai protocolli medicali (DICOM, HL7) a livello software file-cvczt73dst2uoppzdic53f. Tutti questi elementi garantiscono che Eco3D sia non solo funzionalmente completo, ma anche pronto all'integrazione nel contesto clinico reale (dove deve dialogare con infrastrutture esistenti e rispettare requisiti di sicurezza e usabilità).

Packaging modulare e soluzioni di docking multi-sonda

Eco3D, essendo un sistema multi-sonda, deve prevedere un design meccanico e di packaging che consenta modularità e facilità d'uso:

- **Sistema multi-sonda modulare**: Si dovrà poter collegare un numero **arbitrario di sonde** (entro limiti pratici) all'unità centrale file-cvczt73dst2uoppzdic53f. Ciò implica che l'unità abbia più porte (ad es. 2 o 3 connettori dedicati) oppure un unico connettore modulare a cui agganciare un **dock multi-sonda**. In fase iniziale, supportare almeno 2 sonde contemporanee, con possibilità di espandere a 3 o 4. Ogni sonda potrebbe avere identificazione univoca (per calibrazione e riconoscimento).
- **Connettori sonda resistenti e smart**: I connettori dovrebbero essere medicali (robusti, magari con grado IP67 quando scollegati, e con chiusura a scatto). Opzioni: connettori Lemo push-pull, ODU, o custom multi-pin. Valutare quelli usati su ecografi tradizionali (a decine di pin) – ma dato che digitalizziamo on-probe, il pin count può essere ridotto (es. un connettore USB-C rugged potrebbe bastare per dati e alimentazione di una sonda!). In effetti, se ogni sonda manda dati digitali ad alta velocità, potremmo usare protocolli seriali (MIPI, USB 3.0, Ethernet) per semplificare cablaggio. **USB-C** robusto con sleeve di protezione potrebbe consentire hot-swap di sonde. In caso, implementare nel firmware il rilevamento di sonde plug-and-play e la loro registrazione calibrata in tempo reale.
- **Docking station di ricarica/sincronizzazione**: Se in futuri sviluppi le sonde diventassero wireless, una docking station sarebbe necessaria per ricarica e sincronizzazione dei dati. Anche nel caso cablato, può essere utile avere un **alloggiamento** per riporre le sonde quando non in uso, che funga anche da base di ricarica o semplicemente da supporto (e magari avere riscaldamento controllato per tenere il gel a temperatura confortevole – molti ecografi hanno “gel warmer”). Una docking station potrebbe collegarsi all'unità centrale e permettere di “agganciare” fino a 4 sonde attorno come petali, caricandole e tenendole pulite.
- **Configurazioni robotiche o fisse**: Il sistema modulare dovrebbe prevedere anche la possibilità di fissare le sonde su supporti esterni (ad es. braccetti meccanici per esami hands-free). Il brevetto cita “interfacce per guida robotica” file-cvczt73dst2uoppzdic53f, quindi potrebbe esserci un accessorio dove la sonda si inserisce in un attuatore. In tal caso, la modularità significa poter sganciare la sonda dal manipolo manuale e attaccarla al robot in modo semplice. Un design di housing sonda standardizzato (es. con punti di aggancio universali) aiuterebbe.
- **Trasporto e ingombro**: Idealmente l'intero sistema (unità + 2 sonde) dovrebbe essere trasportabile facilmente. Si potrebbe prevedere una **valigetta** o zaino custom con comparti per le sonde, l'unità centrale e il caricabatterie, simile ai kit di ecografi portatili attuali. Il packaging interno deve proteggere le sonde (componenti delicati) da urti e vibrazioni. Una volta in uso, l'unità potrebbe avere una **cinghia/tracolla** o essere montabile su un supporto (es. aggancio VESA per fissarla a un braccio articolato o carrellino).
- **Scalabilità future**: L'architettura modulare deve consentire di aggiungere nuove tipologie di sonde senza modificare il core. Ad esempio, oggi lineare e convex, domani potrebbe essere aggiunta una sonda laparoscopica Eco3D. Quindi il docking/meccanica deve essere adattabile. Un'idea è utilizzare **moduli adattatori**: l'unità centrale potrebbe avere slot generici e a seconda del tipo di sonda inserita si riconfigura (p.es. un modulo per sonda phased array vs modulo per sonda convex volumetrica).
- **Ergonomia multi-sonda**: Se l'operatore usa due sonde contemporaneamente (una per mano), è utile che i cavi siano disposti e lunghi in modo da non intralciare. Potenzialmente, un design con **cavi sottili e flessibili** (magari plettina o cavo spirale) aiuta. Il packaging potrebbe includere una sorta di **hub a Y** vicino al paziente per unire due cavi in uno verso l'unità, riducendo ingombro di fili. Oppure adottare tecniche wireless per almeno la seconda sonda.
- **Indicatori e feedback sulle sonde**: Ogni sonda modulare potrebbe avere un piccolo LED multicolore indicando stato (connessa, calibrata, attiva). Questo è parte del packaging/usabilità: l'operatore vede subito quale sonda è riconosciuta e se ad esempio la calibrazione posizionale è ok (potrebbe lampeggiare durante sync).
- **Manutenzione e sterilizzazione**: Packaging modulare significa rendere facile pulire o sterilizzare le parti a contatto col paziente. Le sonde dovrebbero essere almeno IPx7 (immersibili breve termine per disinfezione). L'unità centrale potrebbe essere IPx4 (resistente a spruzzi). Il docking deve tenere conto di coprire i connettori quando non in uso (per evitare contaminazione).
- **Esempi analoghi**: Non esistono oggi molti ecografi multi-sonda simultanei; i sistemi ABUS usano matrici fisse su supporti. Un concetto vagamente simile è la combinazione di due sonde in ecografia bifocale (non comune). Tuttavia, sistemi **multi-camera 3D** (vision) offrono docking per più moduli. Possiamo ispirarci a kit di telecamere stereo modulari.

In pratica, proporremo:

- **Unità centrale** con 2-4 porte universali per sonde.
- **Sonde intelligenti** rimovibili, ognuna autonoma e riconoscibile.
- **Dock/stand** per riporle che magari si attacca all'unità (magnetico o con clip) quando si trasporta.
- **Possibilità di upgrade**: se servisse aggiungere una terza sonda, magari via modulo esterno collegato in cascata (in brevetto si parla di numero arbitrario di sonde scalabile file-cvczt73dst2uoppzdic53f, quindi la topologia potrebbe essere a stella su centralina o addirittura a rete peer-to-peer tra sonde).

Con un design modulare ben congegnato, Eco3D potrà essere configurato dall'utente in base all'esame (es: usa 2 sonde convex per un grande volume, oppure 1 convex + 1 lineare per diverso scopo), e passare facilmente da configurazioni **lean** (anche con una sola sonda come ecografo tradizionale 2D) a configurazioni **high-end** (più sonde per 3D in tempo reale). Questo fornisce flessibilità sia in prototipazione (magari inizialmente test con singola sonda) sia in produzione (diversi bundle di sonde per differenti specialità).

Conclusione: Abbiamo passato in rassegna tutte le componenti hardware chiave per Eco3D – dai trasduttori miniaturizzati (il “cuore” del sistema) ai sensori di tracking e all'elaborazione edge, fino a display AR, alimentazione e dettagli costruttivi. Per ciascun blocco funzionale abbiamo identificato le migliori tecnologie attuali: trasduttori MEMS vs piezo, moduli IMU+ToF, SoC GPU vs TPU vs FPGA, visori AR vs schermi convenzionali, batterie Li-Ion ottimizzate, materiali medicali e integrazione standard. Queste informazioni tecniche forniscono una solida base per selezionare componenti e configurazioni, e permettono di bilanciare **soluzioni ad alte prestazioni** (per massimizzare qualità e velocità)

con **opzioni lean** (per contenere costi e complessità in fase iniziale). Il passo successivo sarà confrontare concretamente le alternative (anche in termini di costo) e passare alla progettazione dettagliata di questo innovativo sistema ecografico volumetrico portatile.

Citazioni

Innovative CMUT & PMUT Technologies | Vermon<https://vermon.com/cmut-pmut-technologies/>

Blatek Industries, Inc.<https://www.blatek.com/>

Linear type Array Module Sample Data | Ultrasound Probe (Transducer) | Ultrasound Probe Details | Products | NDK - NIHON DEMPA KOGYO CO., LTD.<https://www.ndk.com/en/products/ultrasound/probe/linear/>

Linear type Array Module Sample Data | Ultrasound Probe (Transducer) | Ultrasound Probe Details | Products | NDK - NIHON DEMPA KOGYO CO., LTD.<https://www.ndk.com/en/products/ultrasound/probe/linear/>

Innovative CMUT & PMUT Technologies | Vermon<https://vermon.com/cmut-pmut-technologies/>

Innovative CMUT & PMUT Technologies | Vermon<https://vermon.com/cmut-pmut-technologies/>

Innovative CMUT & PMUT Technologies | Vermon<https://vermon.com/cmut-pmut-technologies/>

Ultrasound-on-Chip™ Technology<https://www.butterflynetwork.com/technology?srsitid=AfmBOop5fej5jbueTXypGA4ge1d7udoUFroKA2Yh9L1PmuDfKUY8fvyj>

Butterfly iQ+ Handheld Portable Ultrasound - New | Marcroft Medical<https://marcroftmedical.com/product/iq-plus/>

Ultrasound-on-Chip™ Technology<https://www.butterflynetwork.com/technology?srsitid=AfmBOop5fej5jbueTXypGA4ge1d7udoUFroKA2Yh9L1PmuDfKUY8fvyj>

Ultrasound-on-Chip™ Technology<https://www.butterflynetwork.com/technology?srsitid=AfmBOop5fej5jbueTXypGA4ge1d7udoUFroKA2Yh9L1PmuDfKUY8fvyj>

Innovative CMUT & PMUT Technologies | Vermon<https://vermon.com/cmut-pmut-technologies/>

Bozza Brevetto Eco3D o 4D a questo punto? 9-05-25.pdf[file://file-CvCzt73dst2uopPZDiC53f](file-CvCzt73dst2uopPZDiC53f)

Linear type Array Module Sample Data | Ultrasound Probe (Transducer) | Ultrasound Probe Details | Products | NDK - NIHON DEMPA KOGYO CO., LTD.<https://www.ndk.com/en/products/ultrasound/probe/linear/>

Linear type Array Module Sample Data | Ultrasound Probe (Transducer) | Ultrasound Probe Details | Products | NDK - NIHON DEMPA KOGYO CO., LTD.<https://www.ndk.com/en/products/ultrasound/probe/linear/>

Linear type Array Module Sample Data | Ultrasound Probe (Transducer) | Ultrasound Probe Details | Products | NDK - NIHON DEMPA KOGYO CO., LTD.<https://www.ndk.com/en/products/ultrasound/probe/linear/>

Ultrasound-on-Chip™ Technology<https://www.butterflynetwork.com/technology?srsitid=AfmBOop5fej5jbueTXypGA4ge1d7udoUFroKA2Yh9L1PmuDfKUY8fvyj>

Linear type Array Module Sample Data | Ultrasound Probe (Transducer) | Ultrasound Probe Details | Products | NDK - NIHON DEMPA KOGYO CO., LTD.<https://www.ndk.com/en/products/ultrasound/probe/linear/>

Innovative CMUT & PMUT Technologies | Vermon<https://vermon.com/cmut-pmut-technologies/>

Linear type Array Module Sample Data | Ultrasound Probe (Transducer) | Ultrasound Probe Details | Products | NDK - NIHON DEMPA KOGYO CO., LTD.<https://www.ndk.com/en/products/ultrasound/probe/linear/>

Blatek Industries, Inc.<https://www.blatek.com/>

Blatek Industries, Inc.<https://www.blatek.com/>

Bozza Brevetto Eco3D o 4D a questo punto? 9-05-25.pdf[file://file-CvCzt73dst2uopPZDiC53f](file-CvCzt73dst2uopPZDiC53f)

Smart Sensor BNO055 | Bosch Sensortec<https://www.bosch-sensortec.com/products/smart-sensor-systems/bno055/>

Xsens MTI-1 IMU | Movella.com<https://www.movella.com/products/sensor-modules/xsens-mti-1-imu>

Bozza Brevetto Eco3D o 4D a questo punto? 9-05-25.pdf[file://file-CvCzt73dst2uopPZDiC53f](file-CvCzt73dst2uopPZDiC53f)

Bozza Brevetto Eco3D o 4D a questo punto? 9-05-25.pdf[file://file-CvCzt73dst2uopPZDiC53f](file-CvCzt73dst2uopPZDiC53f)

Bozza Brevetto Eco3D o 4D a questo punto? 9-05-25.pdf[file://file-CvCzt73dst2uopPZDiC53f](file-CvCzt73dst2uopPZDiC53f)

Ultrasonic ToF (Time-of-Flight) Sensors - TDK Product Center<https://product.tdk.com/en/products/sensor/ultrasonic/tof/index.html>

Applying a ToF/IMU-Based Multi-Sensor Fusion Architecture in Pedestrian Indoor Navigation Methods<https://www.mdpi.com/1424-8220/21/11/3615>

Applying a ToF/IMU-Based Multi-Sensor Fusion Architecture in Pedestrian Indoor Navigation Methods<https://www.mdpi.com/1424-8220/21/11/3615>

Applying a ToF/IMU-Based Multi-Sensor Fusion Architecture in Pedestrian Indoor Navigation Methods<https://www.mdpi.com/1424-8220/21/11/3615>

Bozza Brevetto Eco3D o 4D a questo punto? 9-05-25.pdf[file://file-CvCzt73dst2uopPZDiC53f](file-CvCzt73dst2uopPZDiC53f)

Bozza Brevetto Eco3D o 4D a questo punto? 9-05-25.pdf[file://file-CvCzt73dst2uopPZDiC53f](file-CvCzt73dst2uopPZDiC53f)

Bozza Brevetto Eco3D o 4D a questo punto? 9-05-25.pdf[file://file-CvCzt73dst2uopPZDiC53f](file-CvCzt73dst2uopPZDiC53f)

Bozza Brevetto Eco3D o 4D a questo punto? 9-05-25.pdf[file://file-CvCzt73dst2uopPZDiC53f](file-CvCzt73dst2uopPZDiC53f)

[PDF] jetson-orin-nano-datasheet-r4-web.pdf - Open Zekahttps://openzeka.com/wp-content/uploads/2023/03/jetson-orin-nano-datasheet-r4-web.pdf?srltId=AfmBQopc_ac2EQHqI-zuElub3y-L7LUbUoSgpVGLJS7JJ1qz-szzGfoQ

Intro & Specs<https://docs.turingpi.com/docs/nvidia-jetson-orin-nx-intro-specs>

Intro & Specs<https://docs.turingpi.com/docs/nvidia-jetson-orin-nx-intro-specs>

Edge TPU performance benchmarks - Coral<https://coral.ai/docs/edgetpu/benchmarks/>

AI Accelerator Module (featuring the Coral Edge TPU™ from Google)<https://www.murata.com/en-us/products/connectivitymodule/edge-ai/overview/lineup/type1wv>

Real Time Synthetic Aperture and Plane Wave Ultrasound Imaging ...<https://ieeexplore.ieee.org/document/9251749/>

Functional block diagram of the mid and back-end processing for...https://www.researchgate.net/figure/Functional-block-diagram-of-the-mid-and-back-end-processing-for-real-time-ultrasound_fig5_230565117

Bozza Brevetto Eco3D o 4D a questo punto? 9-05-25.pdf[file://file-CvCzt73dst2uopPZDiC53f](file-CvCzt73dst2uopPZDiC53f)

Magic Leap 2 V HoloLens 2<https://blogs.expandreality.io/magic-leap-2-v-hololens-2>

Magic Leap 2 V HoloLens 2<https://blogs.expandreality.io/magic-leap-2-v-hololens-2>

Magic Leap 2 V HoloLens 2<https://blogs.expandreality.io/magic-leap-2-v-hololens-2>

Magic Leap 2 V HoloLens 2<https://blogs.expandreality.io/magic-leap-2-v-hololens-2>

Magic Leap 2 V HoloLens 2<https://blogs.expandreality.io/magic-leap-2-v-hololens-2>

Magic Leap 2 V HoloLens 2<https://blogs.expandreality.io/magic-leap-2-v-hololens-2>

Magic Leap 2 V HoloLens 2<https://blogs.expandreality.io/magic-leap-2-v-hololens-2>

Magic Leap 2 V HoloLens 2<https://blogs.expandreality.io/magic-leap-2-v-hololens-2>

Magic Leap 2 V HoloLens 2<https://blogs.expandreality.io/magic-leap-2-v-hololens-2>

Bozza Brevetto Eco3D o 4D a questo punto? 9-05-25.pdf[file://file-CvCzt73dst2uopPZDiC53f](file-CvCzt73dst2uopPZDiC53f)

Top 10 AR & MR Headsets of 2023 - Lucid Reality Labs<https://lucidrealitylabs.com/blog/ar-enabled-headsets-you-need-to-know-about-in-2021>

Nreal Light devkit review: an interesting entry point for AR<https://skarredghost.com/2020/06/11/nreal-light-devkit-review/>

For those concerned with the Air's FOV : r/nreal - Reddithttps://www.reddit.com/r/nreal/comments/11r0h4j/for_those_concerned_with_the_airs_fov/

Bozza Brevetto Eco3D o 4D a questo punto? 9-05-25.pdf[file://file-CvCzt73dst2uopPZDiC53f](file-CvCzt73dst2uopPZDiC53f)

iQ3 Specs | Technical Details - Butterfly Network<https://www.butterflynetwork.com/iq3-specs?srltId=AfmBOopicKVI05jWj7DQta-OpkoKMCtBNQhCxYGEHFB7LFM2dYW8m355>

Best Portable Ultrasound Machine 2025 | Top Handheld Picks<https://ultrasoundfanatic.com/best-portable-ultrasound/>

Chison ECO 3 Portable Ultrasound System - CardiacDirect<https://www.cardiacdirect.com/product/chison-eco-3-portable-ultrasound-system/?srltId=AfmBOopw74e-pl6gpapGQAIj6b4PYFu9mcBQCQPtkKvplQXMvoDyAHEi>

[PDF] civco - accessdata.fda.govhttps://www.accessdata.fda.gov/cdrh_docs/pdf/k992152.pdf

Ultrasound transducer probe having case handle grip surfaces<https://patents.google.com/patent/US5897503A/en>

Ultrasound Probe Covers - CIVCO Medical Solutions<https://www.civco.com/products/ultrasound-probe-covers/>

Ultrasound scanner with gel dispenser device attached to or ...<https://patents.google.com/patent/US20110190635A1/en>

UltraGelBot: Autonomous Gel Dispenser for Robotic Ultrasound - arXiv<https://arxiv.org/html/2406.19678v1>

[PDF] Controlled Cooling of Ultrasound Transducers - Hesse GmbH<https://www.hesse-mechatronics.com/wp-content/uploads/2022/09/Controlled-Cooling-of-Ultrasound-Transducers-Hesse-Mechatronics-White-Paper.pdf>

CFU-Èlife HIGH INTENSITY FOCUSED ULTRASOUND - Biotec Italia<https://www.biotecitalia.com/medical/en/cfu-elife/cfu-elife-high-intensity-focused-ultrasound-2/>

Wi-Fi 6 - Wikipediahttps://en.wikipedia.org/wiki/Wi-Fi_6



Tutte le fonti

[vermonplatekndkbutterflynetworkmarcroftmedicalBozza Br...05-25.pdf](#)[bosch-sensortecmovellaproduct.tdkmdpiopenzekadocs.turingpicoralmurataieeexplore.ieeeresearchgateblogs.expandrealitylucidrealitylabsskarredghostredditultrasoundfanaticcardiacmechatronicsbiotecitaliaen.wikipedia](#)

