



ELETTROFISIOLOGIA · INTELLIGENZA ARTIFICIALE

Defibrillatori intelligenti

AI nella discriminazione delle aritmie e nell'erogazione delle terapie

A che punto siamo?

Il problema: morte cardiaca improvvisa e sovraccarico del monitoraggio



~50%

delle morti cardiovascolari sono morte cardiaca improvvisa (MCI)



5–10%

sopravvivenza all'arresto extra-ospedaliero, stabile da decenni



FE

la stratificazione resta legata alla frazione d'eiezione, con bassa sensibilità/specificità



73–90%

delle trasmissioni in monitoraggio remoto sono non-azionabili



La sfida aritmica

Circa metà delle MCI è dovuta a **TV/FV** potenzialmente trattabili con ICD. Ma la maggior parte degli eventi avviene in pazienti con FE conservata, fuori dai criteri attuali.



Il carico organizzativo

>650.000 impianti/anno in Europa. Il monitoraggio remoto migliora la sicurezza ma genera un volume di trasmissioni da gestire.

Due ruoli dell'AI nel mondo del defibrillatore



1 • Discriminazione delle aritmie

- ✓ Distinguere aritmie vere da rumore e oversensing sugli elettrogrammi intracardiaci
- ✓ Ridurre falsi positivi
- ✓ Filtrare gli episodi (AHRE, NSVT) prima della revisione umana

Obiettivo: alleggerire il monitoraggio remoto



2 • Predizione del rischio aritmico

- ✓ Predire MCI / TV-FV maligne dall'ECG in ritmo sinusale
- ✓ Andare oltre la sola frazione d'eiezione
- ✓ Identificare il substrato aritmogeno invisibile all'occhio umano

Obiettivo: selezionare meglio i candidati a ICD

INPUT:



EGM intracardiaci



ECG 12 derivazioni

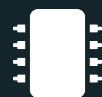


ECG ambulatoriale



+ dati clinici / imaging

ResNet multicentrico per la classificazione degli episodi atriali ad alta frequenza (AHRE)



Studio & coorte

- 5 centri · dispositivi Biotronik (PM/ICD)
- Rete residuale 1D (ResNet) + ensemble (soft-voting), cross-validation a livello di centro
- Test esterno: Saint-Etienne, 4271 episodi

Sensibilità per classe — ensemble, soglia >95%

MODELLO

1D-ResNet10

Ensemble

Grad-CAM++



L'AI individua il 92% degli AHRE mantenendo sensibilità del 100% per la fibrillazione atriale e un tasso di errore <0,1%

100%

sensibilità per AT/AF

91,9%

episodi auto-classificati

<0,1%

errori (2 su 3925)



van Krimpen L, et al. Sensors 2026;26:2241. doi.org/10.3390/s26072241

AI per distinguere oversensing ventricolare dal rumore negli episodi NSVT



Popolazione & disegno

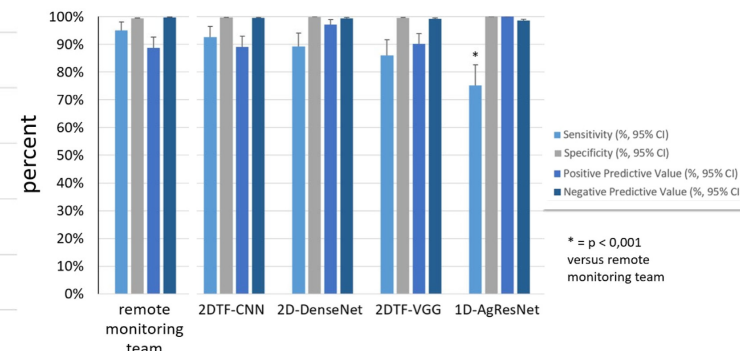
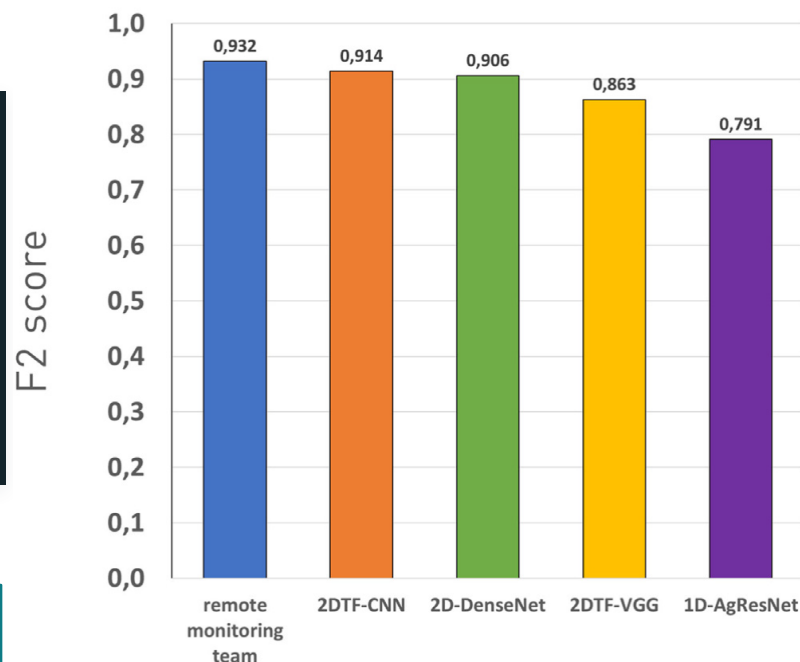
- Episodi NSVT trasmessi da PM e ICD (Biotronik)
- Modello convoluzionale 2D su EGM intracardiaci
- Discrimina TV non-sostenuta vs rumore/oversensing
- Primo lavoro AI del gruppo sul monitoraggio CIED

MODELLO

CNN 2D

EGM intracardiaci

Filtro falsi positivi



Discriminazione accurata di TV non-sostenute dal rumore: meno revisioni inutili, senza perdere le TV reali.

TV vere

sensibilità preservata per le aritmie reali

Rumore

falsi allarmi riconosciuti e filtrati

PM + ICD

applicabile a entrambe le piattaforme



Strik M, et al. Heart Rhythm 2023;20:1378–1384. doi.org/10.1016/j.hrthm.2023.06.019

AI-ECG per la predizione di MCI: lo stato dell'arte in 20 studi



Sintesi della letteratura

- 5 database (MEDLINE, Embase, WoS, Scopus, IEEE) · 139 record → 20 studi
- ML convenzionale (10) e Deep Learning (12)
- Input: ECG 12-derivazioni, monoderivazione, HRV
- Valutazione del rischio di bias con PROBAST

Discriminazione (AUROC) per orizzonte di predizione

LIMITI RICORRENTI



Campioni ridotti



Sbilanciamento delle classi



Validazione esterna 5/20



Calibrazione 3/20



Mrak Z, Naji FH, Dinevski D. J Cardiovasc Dev Dis 2026;13:206. doi.org/10.3390/jcdd13050206

Deep Learning per la predizione di arresto cardiaco entro 24 ore dall'ECG



Popolazione & disegno

- Multicentrico (2 ospedali) · pazienti ricoverati
- 24.600 pazienti · ~47.000 ECG 12-derivazioni
- Outcome: arresto cardiaco entro 24 h
- Validazione interna + esterna

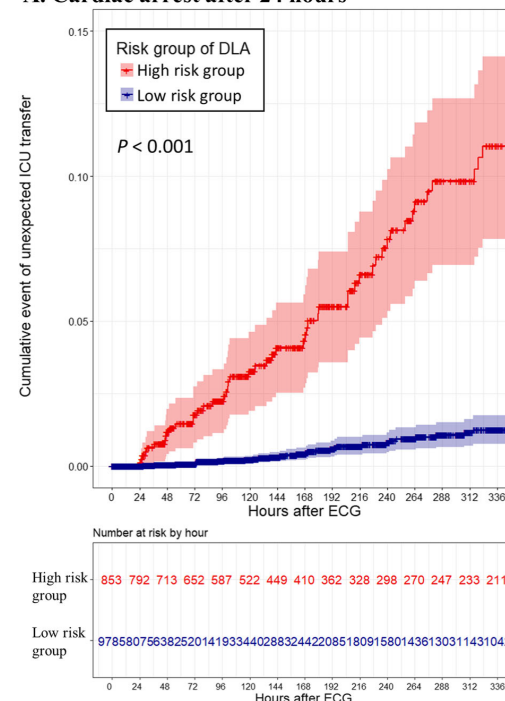
MODELLO

CNN

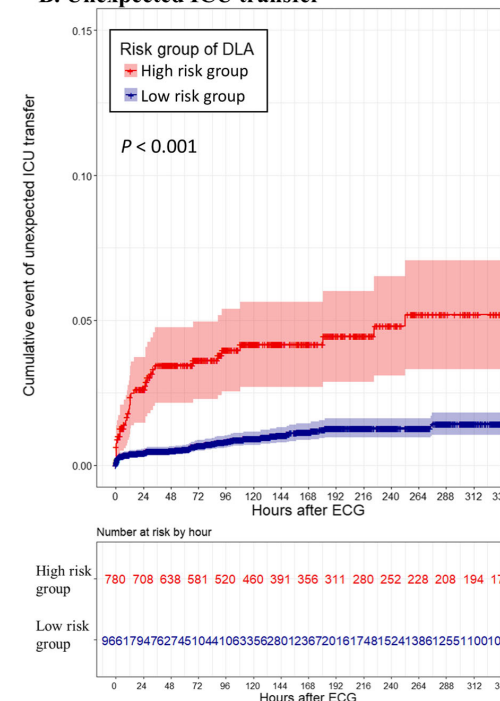
ECG waveform

Saliency map

A. Cardiac arrest after 24 hours



B. Unexpected ICU transfer



Rischio cumulativo di evento di deterioramento nei pazienti che non hanno subito arresto cardiaco entro 24 ore. DLA indica un evento artificiale basato sul deep learning, ECG elettrocardiografia, e ICU unità di terapia intensiva. Il punto di soglia utilizzato per suddividere i gruppi di rischio è stato selezionato quando la sensibilità complessiva era del 90% nel dataset di sviluppo



Su grandi dataset multicentrici l'AI-ECG generalizza: AUROC >0.90 anche in validazione esterna.

0.91 → 0.95

AUROC interna → esterna

5,7% vs 0,3%

rischio CA a 2 sett.: alto vs basso

99,8%

valore predittivo negativo (NPV)



AI su ECG ambulatoriale monoderivazione per predire TV sostenuta



Popolazione & disegno

- Ampio dataset ambulatoriale internazionale
- ~250.000 registrazioni (Holter 14 giorni)
- Outcome: TV sostenuta entro 13 giorni
- Validazione interna + esterna

AUROC — TV sostenuta (la discriminazione cresce a orizzonti brevi)

MODELLO

CNN

Holter mono-lead

Heart-rate data



Un singolo lead ambulatoriale predice la TV imminente:
utile per allerta precoce nei monitoraggi prolungati.

0.96

AUROC (13 giorni)

97,7%

specificità

NPV 99,9%

valore predittivo negativo



Fiorina L, et al. Eur Heart J 2025;46:1998–2008. doi.org/10.1093/eurheartj/ehaf073

Modello AI-ECG per la MCI in coorti di comunità (Oregon SUDS + Ventura PRESTO)



Popolazione & disegno

- Multicentrico · coorti di comunità
- 3835 pazienti (2510 con MCI) — dataset bilanciato
- ECG 12-derivazioni in ritmo sinusale
- Outcome: MCI a follow-up mediano 20 mesi

MODELLO



AUROC — confronto modelli per la predizione di MCI



Con dato bilanciato e validazione esterna, l'AI-ECG batte i punteggi di rischio convenzionali.

0.89

AUROC AI-ECG (interna)

0.92

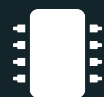
AI-ECG + variabili cliniche

> 0.712

supera il risk score elettrico



Predizione dinamica delle aritmie ventricolari maligne nei portatori di ICD



Popolazione & disegno

- Multicentrico · coorte ICD
- ~2942 pazienti · 32.129 registrazioni ECG seriate
- Modello dinamico (RF-SLAM) su ECG longitudinali
- Outcome: TV/FV sostenuta entro 3 mesi

AUROC — il modello dinamico supera quello statico

MODELLO

RF-SLAM (dinamico)

Variational autoencoder

DL



Sfruttare gli ECG ripetuti nel tempo migliora la predizione:
il rischio aritmico è dinamico, non statico.

0.74

AUROC modello dinamico

+0.10

guadagno vs statico

ECG seriat

il rischio aritmico è tempo-variabile



Kolk MZH, et al. EBioMedicine 2023;99:104937. doi.org/10.1016/j.ebiom.2023.104937

AI multimodale (ECG + RMN + clinica) per identificare i pazienti NICM ad alto rischio



Popolazione & disegno

- Multicentrico · cardiomiopatia non-ischemica con ICD
- 289 pazienti (26 con TV/FV sostenuta)
- RMN-LGE + ECG + caratteristiche cliniche
- Outcome: TV/FV o terapia ICD appropriata a 12 mesi

AUROC — il modello multimodale supera il solo ECG-AI

MODELLO

ML multimodale

DL (ECG)

LGE-MRI

Validazione esterna



Integrare ECG, imaging e clinica spinge la performance: il futuro della stratificazione è multimodale.

0.84

AUROC modello multimodale

Sens. 98%

sensibilità per TV/FV

AUPRC 0.31

metrica robusta su dato sbilanciato



Kolk MZH, et al. Sci Rep 2024;14:14889. doi.org/10.1038/s41598-024-65357-x

A che punto siamo?



La discriminazione è pronta

Sugli EGM intracardiaci l'AI archivia gli AHRE/NSVT non-azionabili con sensibilità ~100% per le aritmie vere: riduzione del carico fino al 92%.



La predizione è promettente

AUROC 0.77–0.96 (breve termine) e 0.66–0.94 (lungo termine), spesso superiore ai criteri basati sulla sola frazione d'eiezione.



Multimodale e dinamico vincono

Integrare ECG seriati, imaging (RMN-LGE) e dati clinici migliora costantemente la performance rispetto al solo ECG.



Restano nodi metodologici

Validazione esterna (5/20) e calibrazione (3/20) ancora rare; sbilanciamento delle classi e coorti ad alto rischio limitano la generalizzabilità.



Il clinico resta responsabile

Modelli cloud, trasparenti e validati; soglie di probabilità per filtrare; revisione umana sempre garantita sulle predizioni a bassa probabilità.