

SIMPOSIO

Digital Health nella pratica clinica: un esempio di sistema esperto per la gestione dello scompenso cardiaco in telemedicina

Digital Health in clinical practice: an example of an expert system for heart failure management

Annamaria Vianello¹, Rita Zilich², Martina Olivelli³, Massimiliano Donati³, Annalisa Giancaterini⁴

¹Dipartimento di Cure Primarie, ASL Toscana Nord-Ovest. ²Partner Mix-x. ³Dipartimento di Ingegneria dell'Informazione, Università di Pisa. ⁴Coordinatore board AMD Digital Health, Consigliere CdA Fondazione AMD.

Corresponding author: annalisa.giancaterini@gmail.com



OPEN
ACCESS



PEER-
REVIEWED

Citation Vianello A, Zilich R, Olivelli M, Donati M, Giancaterini A. Digital Health nella pratica clinica: un esempio di sistema esperto per la gestione dello scompenso cardiaco in telemedicina. *JAMD* 28:91-101, 2025.

DOI 10.36171/jamd.25.28.1-2.9

Editor Luca Monge, Associazione Medici Diabetologi, Italy

Received April, 2025

Accepted June, 2025

Published June, 2025

Copyright © 2025 Giancaterini A. This is an open access article edited by [AMD](#), published by [Idelson Gnocchi](#), distributed under the terms of the [Creative Commons Attribution License](#), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original author and source are credited.

Data Availability Statement All relevant data are within the paper and its supporting Information files.

Funding The Authors received no specific funding for this work.

Competing interest The Author declares no competing interests.

Abstract

Clinical Decision Support Systems (CDSS) are fundamental tools for assisting physicians in the decision-making process, thanks to their ability to analyze clinical data and provide diagnostic or therapeutic recommendations. The literature classifies them mainly as knowledge-based systems, which employ IF-THEN rules grounded in expert clinical experience, and machine learning systems, which use statistical models to identify data patterns.

Despite their potential, CDSS face limitations hindering their effectiveness and adoption. Many focus solely on single pathologies, overlooking the complexity of comorbidities and the patient's multidimensional nature. Moreover, a lack of interoperability often necessitates manual data entry, risking errors and incomplete information, which negatively impacts performance. Physician diffidence, stemming from technical issues and perceived limited control, further impedes their uptake.

Addressing Digital Health (DH) needs requires evolving CDSS toward greater interoperability, telemedicine integration, multidisciplinary management, and personalized care.

Of particular interest is the ongoing challenge of automatically and dynamically calculating individual patient risk for complications or worsening of clinical conditions. This relies on processing real-time data from vital signs, health records, and questionnaires. Integrating this information into a Medical Expert System (MES) could significantly enhance clinical decision support. This article focuses MES characteristics and their role in DH, showing a telemedicine application for managing complex chronic heart failure patients.

KEY WORDS clinical decision support systems (CDSS); medical expert system (MES); digital health (DH); artificial intelligence (AI); digital twins (DT).

Riassunto

I Sistemi di Supporto alla Decisione Clinica (Clinical Decision Support Systems, CDSS) sono strumenti fondamentali per assistere i medici nel processo decisionale, grazie alla loro capacità di analizzare dati clinici e fornire raccomandazioni diagnostiche o terapeutiche. In letteratura, questi sistemi sono classificati principalmente in due categorie: quelli *basati sulla conoscenza*, che utilizzano regole logiche di tipo IF-THEN fondate sull'esperienza clinica degli esperti, e quelli *basati sull'apprendimento automatico* (Machine Learning, ML), che sfruttano modelli statistici per identificare pattern nei dati.

Nonostante il loro potenziale, i CDSS presentano alcune criticità: spesso si concentrano sulla singola patologia, trascurando la complessità delle comorbidità e la multidimensionalità del paziente; inoltre la mancata interoperabilità richiede l'inserimento manuale dei dati, con rischio di errori e informazioni incomplete. In aggiunta, problema non secondario, da parte dei medici sembra esistere una certa diffidenza.

Per rispondere alle esigenze della Digital Health (DH), i CDSS devono evolvere verso una maggiore interoperabilità mediante l'integrazione con la telemedicina, che permetta una corretta gestione multidisciplinare e quindi una migliore personalizzazione delle cure.

Di particolare interesse è il calcolo automatico e dinamico del rischio di complicanze per ogni paziente, basato sull'elaborazione di dati in tempo reale (parametri vitali, record sanitari, questionari clinici). La confluenza di queste informazioni in un Sistema Medico Esperto (Medical Expert System - MES) potrebbe rappresentare un importante supporto alla decisione clinica. Questo articolo analizza il ruolo dei MES nello sviluppo della DH, presentando un'applicazione in telemedicina per la gestione di pazienti complessi con insufficienza cardiaca cronica.

PAROLE CHIAVE sistemi di supporto alla decisione clinica (CDSS); sistema medico esperto (MES); medicina digitale (DH); intelligenza artificiale (IA); gemelli digitali.

Il posizionamento dei sistemi esperti nella Digital Health

La Digital Health (DH) rappresenta un ecosistema che integra tecnologie digitali per migliorare la prevenzione, la diagnosi, il trattamento e la gestione

delle malattie. Tra le numerose tecnologie che compongono questo panorama, i MES costituiscono una delle prime applicazioni di intelligenza artificiale (IA) in ambito sanitario. Sebbene non rappresentino ad oggi le soluzioni più avanzate disponibili, i MES mantengono un ruolo significativo come strumenti di supporto decisionale e gestione clinica, ponendosi come precursori delle tecnologie più sofisticate attualmente sviluppate^(1,2).

Cosa sono i sistemi esperti?

I MES sono *programmi informatici progettati per simulare il processo decisionale umano* in contesti specifici. Basati su regole predefinite e conoscenze codificate da esperti, questi sistemi possono migliorare significativamente la capacità di:

- valutare variabili associate alla progressione di una malattia, all'insorgenza di complicanze o alla terapia;
- suggerire strategie di intervento, monitorando i risultati nel tempo;
- prevedere e identificare aree di *incertezza clinica*.

Nel contesto della DH, i MES si distinguono per:

- *Automazione del ragionamento clinico*: utilizzo di regole logiche per analizzare dati strutturati.
- *Personalizzazione delle cure*: offerta di suggerimenti basati sulle caratteristiche specifiche del paziente.
- *Integrazione con piattaforme digitali*: implementazione in soluzioni di telemedicina per il monitoraggio da remoto.

I MES occupano una posizione intermedia nel panorama della DH tra gli Algoritmi statici e le flow chart decisionali, già da tempo noti ed utilizzati, e gli strumenti della AI avanzata, nella quale l'autoapprendimento continuo e dinamico rappresenta un potente strumento di implementazione. Inoltre sono:

- *Precursori dell'AI avanzata*: hanno introdotto l'automazione del ragionamento clinico basato su regole.
- *Strumenti complementari*: continuano a essere utilizzati in contesti dove la conoscenza codificata è sufficiente per supportare decisioni cliniche affidabili.

Tuttavia, rispetto a tecnologie più recenti come il Machine Learning (ML) o i Digital Twins (DT), rappresentazioni virtuali di un oggetto o un sistema, ag-

giornato in tempo reale dai dati acquisiti dall'oggetto o dal sistema stesso, i sistemi esperti presentano alcune limitazioni:

1. Dipendono da regole predefinite e non sono in grado di apprendere autonomamente dai dati.
2. Richiedono aggiornamenti manuali per adattarsi a nuove evidenze cliniche o linee guida.

Nonostante ciò, soprattutto quando integrati con altre tecnologie digitali, rappresentano una soluzione efficace in contesti specifici.

Sfide e potenziali di sviluppo

In letteratura sono già presenti da anni numerosi lavori scientifici che descrivono diversi CDSS, basati sulla conoscenza e sull'esperienza clinica di medici esperti (regole IF-THEN), e sull'apprendimento automatico (*machine learning*) o sul riconoscimento di modelli statistici⁽³⁾.

I principali punti critici di questi sistemi sono rappresentati dal fatto che spesso sono focalizzati sul monitoraggio e sulla gestione di una singola patologia⁽⁴⁾, dalla necessità di inserire manualmente i dati di ogni singolo paziente a causa di una mancata integrazione di questi sistemi con le principali piattaforme digitali adottate nella pratica clinica e dalla conseguente frequente incompletezza dei dati di ingresso. Questi fattori possono compromettere il rendimento dei sistemi, riducendone l'efficacia e alimentando la già preesistente diffidenza tra i clinici.

Attualmente rimane ancora una grande sfida: riuscire ad integrare i CDSS nelle piattaforme di Telemedicina e di Telemonitoraggio e, soprattutto, riuscire ad applicarli alla gestione sul territorio del paziente complesso pluripatologico^(4,5).

I metodi di apprendimento automatico (ML) hanno dimostrato di poter migliorare l'accuratezza diagnostica rispetto ai metodi statistici tradizionali. In letteratura sono riportate esperienze di applicazione del ML nella previsione del rischio di complicanze nelle malattie croniche a maggiore impatto epidemiologico (inerenti ai sistemi cardio-nefro-metabolico), ma la limitazione fino ad oggi è legata al fatto che non vi sia uno scambio costante di dati con il sistema. La telemedicina, e in particolare i servizi di telemonitoraggio basati su dati inviati da sensori indossabili o dalla domotica, sfruttano le potenzialità dell'Internet of Things (IoT) per estrarre e registrare informazioni fisiologiche dei pazienti, supportando il clinico nel processo decisionale e nella gestione della malattia da remoto⁽⁶⁾.

Per affrontare queste sfide, l'integrazione del ML e dei MES può offrire soluzioni promettenti, a patto che essi, come tutti i sistemi che si basano sull'IA, soprattutto nell'ambito sanitario, siano *comprensibili, interpretabili* e facilmente *utilizzabili* nella pratica clinica.

Infatti, negli ultimi anni, i progressi della IA hanno ampliato il campo di applicazione dei CDSS, generando al contempo un dibattito sulla loro utilità e, soprattutto, affidabilità.

Classificazione dei CDSS

I CDSS possono essere suddivisi in due categorie principali.

1. Sistemi basati sulla conoscenza (con regole pre-definite)

Sono costruiti su regole (IF-THEN) che il sistema utilizza per analizzare i dati e per produrre un risultato. Le regole possono essere definite sulla base di evidenze scientifiche, Linee Guida, Raccomandazioni, esperienza clinica. Questo tipo di CDSS è costituito da quattro componenti: una base di conoscenza, un motore inferenziale, un meccanismo di comunicazione e un'interfaccia di visualizzazione dei risultati, anche in modo interoperabile con eventuali cartelle cliniche in uso dai professionisti. Possono essere aggiornati manualmente per adattarsi a nuove scoperte scientifiche o per integrare automaticamente informazioni da altre banche dati interoperabili.

2. Sistemi non basati sulla conoscenza (senza regole pre-definite)

Si affidano a strumenti di IA come il ML, non si basano su regole predefinite, ma apprendono dai dati clinici storici e migliorano la loro accuratezza nel tempo; sono in grado di individuare pattern da grandi banche dati.

Un problema di questa categoria di sistemi è legato al modello di ML utilizzato, poiché, se si tratta di un modello di tipo *black box*, non è possibile verificare il processo che ha portato ai risultati suggeriti, in quanto il modello non esplicita le ragioni che hanno generato quelle conclusioni. Questa criticità rende il loro uso piuttosto controverso.

Componenti fondamentali dei CDSS

I CDSS si basano su tre componenti fondamentali.

- *Motore inferenziale*: è il "cervello" del sistema, analizza i dati clinici e genera suggerimenti basati su regole o modelli appresi.

- *Base di conoscenza*: contiene le informazioni mediche codificate (Linee Guida, raccomandazioni, studi clinici) o pattern appresi automaticamente.
- *Interfaccia utente*: permette ai medici di inserire dati, ricevere raccomandazioni e interagire con il sistema.

Ipotesi di applicazione di un CDSS in diabetologia

Un esempio di CDSS applicato alla gestione del percorso della persona affetta da diabete mellito potrebbe orientarsi allo sviluppo di tre macro-aree.

1. *Area diagnostico-terapeutica*, caratterizzata dalla possibilità dinamica e simultanea di:

- Osservare in tempo reale i valori glicemici tramite dispositivi di monitoraggio continuo della glicemia (CGM).
- Integrare i dati della cartella clinica elettronica per avere un quadro complessivo sempre aggiornato.
- Analizzare le tendenze glicemiche (con il confronto dei dati con linee guida/raccomandazioni cliniche) e generare indicazioni personalizzate in base ai dati del paziente e suggerimenti per le modifiche delle dosi di insulina.

2. *Area di Intervento* immediato, con costruzione di allarmi/alert in caso di rischio di ipoglicemia o iperglicemia grave, quindi con il coinvolgimento diretto dell'utente.

3. *Area di Previsione* del rischio di complicanze a lungo termine, con relativo suggerimento di interventi preventivi.

Creazione della base di conoscenza

La creazione della base di conoscenza richiede un procedimento di sintesi e trasformazione delle evidenze scientifiche in “regole”, elaborate con algoritmi di IA e con il contributo di esperti clinici. Dopo aver identificato i criteri clinici di inclusione (cioè i casi in cui la regola è applicabile) si devono definire i contenuti che, in presenza di determinate condizioni, il sistema segnalerà al medico. Inoltre, devono essere inseriti nel sistema tutte le evidenze scientifiche alla base della regola e le priorità dei contenuti.

Il processo di selezione e sintesi della conoscenza scientifica può essere svolto anche tramite l'IA con strumenti di Natural Language Processing (NLP), che hanno la capacità di estrarre informazioni da testi digitali su linee guida, procedure, terapie, patologie, parametri bioumorali, antropometrici e vitali. Combinando l'NLP con il Deep Learning è possibile identificare i passaggi clinici più rilevanti.

Queste tecnologie consentono quindi l'automatizzazione di un processo che normalmente richiederebbe una revisione manuale lunga ed impegnativa. L'attendibilità della base di conoscenza è fondamentale per l'accuratezza del CDSS per cui c'è sempre la necessità di una validazione da parte di esperti clinici.

I CDSS supportano il processo diagnostico anche attraverso la diagnosi differenziale, con domande progressive necessarie ad escludere condizioni simili, fino a suggerire quale sia la patologia o condizione clinica del paziente. Possono inoltre supportare la scelta della terapia in base ad efficacia, sicurezza, interazioni, dosaggio e tipologia di parametri da monitorare anche per evitare eventuali effetti collaterali o reazioni avverse.

Esempio di applicazione: AIR-TelTeC-HF

In questo articolo viene presentato un esempio di costruzione e applicazione di un Sistema Esperto per il Telemonitoraggio Intelligente del Paziente Complesso Territoriale con Scompenso Cardiaco Cronico (CHF) denominato AIR-TelTeC-HF (Artificial Research Intelligence-Telemonitoring of Territorial Chronic patients with Heart Failure)⁽⁷⁾. Il sistema è stato implementato da un team multidisciplinare, costituito da clinici afferenti al Dipartimento di Medicina Interna dell'Università di Pisa e Bioingegneri della Conoscenza e dell'Informazione dell'Università di Pisa nella Piattaforma AIR (Artificial Intelligence Research)-TelTeCovid/AIR-TelTeC-HF.

AIR-TelTeC-HF

Lo scompenso cardiaco cronico (Heart Failure, HF) è una delle principali cause di ospedalizzazione in tutto il mondo. Una buona gestione dei pazienti dopo la dimissione ospedaliera è fondamentale per evitare il peggioramento e la fase vulnerabile ad alto rischio di riammissione e decesso. La cura del-

lo scompenso cardiaco richiede 1) un monitoraggio frequente del paziente al proprio domicilio, 2) un protocollo terapeutico più personalizzato basato sulle variazioni dei parametri vitali e 3) una riduzione del tempo di inizio del trattamento nella fase di rapida progressione dell'insufficienza cardiaca (Worsening Heart Failure, WHF).

Le attuali applicazioni dell'IA per la cura dello scompenso cardiaco sono diversificate in 1) sistemi di ML basati su Big Data che, dopo l'apprendimento, sono in grado di funzionare in modo autonomo e 2) sistemi esperti medici (MES) basati su regole, incapaci di procedere in modo indipendente, ma più spiegabili. Anche con i recenti progressi volti a indirizzare la spiegabilità del ML, esso è percepito, e spesso lo è, come un black box. Il ML, inoltre, richiede anche grandi quantità di dati per l'addestramento, mentre i MES si basano principalmente sulla conoscenza umana. L'obiettivo del MES è tradurre e organizzare in algoritmi la conoscenza degli esperti medici per imitare il loro pensiero critico. Il team multidisciplinare che ha creato questa applicazione aveva l'obiettivo di sviluppare un sistema

di telemedicina intelligente in grado di rilevare precocemente l'instabilità clinica dei pazienti con SCC e multimorbilità.

La creazione del sistema Artificial Intelligence Research-Telemonitoring of Territorial CHF (AIR-TelTeC-HF) MES si fonda su una base di conoscenza creata da clinici. Include 39 variabili (Figura 1A) che, combinate in 283 regole IF/THEN, ne guidano il processo decisionale (Figura 1B). Nella tabella 1 vengono riportate le variabili cliniche inserite nel sistema esperto. AIR-TelTeC-HF agisce come un classificatore a 4 classi: 3 classi rappresentano livelli crescenti di rischio per i pazienti stabili (basso, medio e alto), e 1 classe per i pazienti instabili. Lo studio è stato approvato dal Comitato Etico della Regione Toscana e i soggetti partecipanti hanno dato il loro consenso informato.

All'arruolamento, il sistema considera i sottorischii dovuti a fattori antropometrici/demografici, comorbidità, classe New York Heart Association (NYHA) e rischio basale, assegnando il corrispondente piano di monitoraggio. Successivamente, il motore inferenziale del MES analizza continuamente i parametri

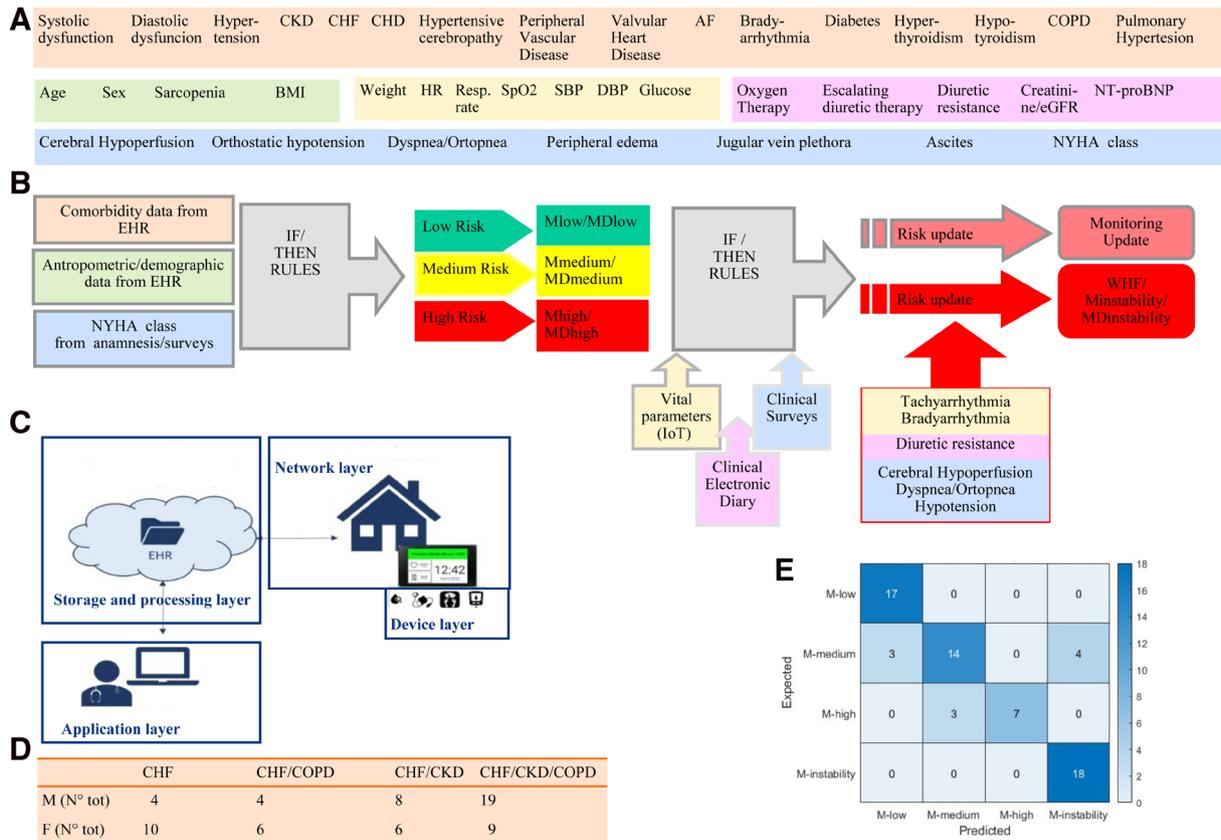


Figura 1 | Sistema esperto AIR-TelTeC-HF. Da: 7

Tabella 1 | Variabili cliniche inserite nel sistema esperto AIR-TelTeC-HF.

1. Dati anagrafici		
Sesso	Età	BMI
Peso		
2. Comorbidità		
Diabete	Ipertensione arteriosa	Malattia coronarica
Arteriopatia periferica	Cerebropatia vascolare	Patologia valvolare cardiaca
Insufficienza renale cronica	Fibrillazione atriale	Ipertiroidismo
Ipotiroidismo	Ipertensione polmonare	Scompeso cardiaco
Disfunzione sistolica	Disfunzione diastolica	Bradiaritmia
Malattia polmonare ostruttiva cronica	Sarcopenia	
3. Parametri da Device Connessi		
Peso	Frequenza cardiaca	Frequenza respiratoria
SpO2	Pressione arteriosa sistolica	Glicemia
4. Dati da Survey		
Ipoperfusione cerebrale	Turgore giugulare	Ipotensione ortostatica
Dispnea/ortopnea	Edema periferico	Ascite
Classe NYHA		
5. Dati da Cartella Clinica		
Creatinina/eGFR	NT-proBNP	TpO2
Modifiche della terapia diuretica	Resistenza a diuretico	

vitali rilevati dai dispositivi medici Internet-of-Things, i sintomi (dai dati forniti dal paziente) e i dati del diario clinico. Le auto-misurazioni domiciliari di parametri clinici quali pressione arteriosa, frequenza cardiaca, peso, glicemia, saturazione di ossigeno, temperatura corporea vengono effettuate mediante dispositivi tradizionali (bilancia pesa-persona, glucometro, saturimetro, termometro, sfigmomanometro) dotati di tecnologia Bluetooth e gestiti in autonomia dal paziente e/o dal caregiver. I dati rilevati sono trasmessi automaticamente a un tablet in dotazione al paziente e/o al caregiver, dove vengono registrati e successivamente inviati alla piattaforma di telemonitoraggio del sistema esperto (Figura 2). Tutti questi dati, una volta integrati, consentono al MES di aggiornare dinamicamente il rischio globale e, di conseguenza di riattribuire il corrispondente piano di monitoraggio (output del MES). MES ha 8 piani di monitoraggio: Mlow, Mmedium, Mhigh (pazienti stabili) e Minstability (WHF rilevata). Un insieme preciso di regole definisce la fase di instabilità clinica (WHF) e suggerisce un piano di monitoraggio per il paziente instabile in rapido peggioramento clinico (Figura 1 C). Per i pazienti diabetici, vengono implementati gli stessi 4 piani, includendo anche le misurazioni della glicemia. Se il MES non è in grado

di gestire in modo preciso un caso (es. situazione non prevista in base alle regole esistenti), il sistema assegna automaticamente il livello più alto di intensità di monitoraggio, ma senza segnalare il caso come WHF. MES include anche un modulo dedicato che rende il processo decisionale intelligibile all'utente finale.

**Figura 2 |** Flusso dati da device ad AIR-TelTeC-HF.

Il sistema individua in modo robusto e precocemente l'instabilità clinica e quindi si delineano percorsi specialistici/di pronto intervento precisi. Inoltre supporta il clinico nel definire quadri di sufficiente stabilità così da consentire la programmazione personalizzata di visite e monitoraggi periodici. Al tempo stesso individua e segnala i pazienti non ancora instabili ma con caratteristiche cliniche che necessitano di monitoraggio clinico più intensivo, teleconsulto specialistico e rivalutazione clinica (Figura 3). L'AIR-TelTeC-HF è stato sottoposto a un processo di validazione iniziale utilizzando 66 casi clinici di pazienti con HF e diverse comorbidità (Figura 1D), un'età media (anni) di $79,09 \pm 7,56$ SD, così classificati dal sistema: 18 casi con instabilità, 17 a basso rischio, 21 a rischio medio e 10 ad alto rischio. L'output del sistema, con il relativo piano di monitoraggio, è stato confrontato con un output definito da esperti clinici. Il MES ha assegnato correttamente tutti i 18 casi di instabilità e WHF al piano di monitoraggio intensivo più alto. Tra i 48 casi con CHF stabile, in 6 casi

il MES ha raccomandato un piano di monitoraggio meno intensivo. In 4 casi, il MES ha erroneamente suggerito il piano di monitoraggio dell'instabilità (Figura 1E). Tale errata classificazione si è verificata perché, a differenza degli esperti umani, il MES segue rigorosamente le regole senza consentire eccezioni. Nessun paziente è stato assegnato al livello di monitoraggio più alto a causa di lacune di classificazione. Nel complesso, le raccomandazioni del MES erano in accordo con quelle degli esperti umani in 56 dei 66 casi, la precisione raggiunta è risultata pertanto elevata (F1-score 84%).

I buoni risultati di validazione ottenuti dall'AIR-TelTeC-HF ne evidenziano il potenziale come importante strumento a supporto delle impostazioni del telemonitoraggio, in cui la tempestività dell'intervento risulta fondamentale. Nonostante sia ancora necessario effettuare un'implementazione della base di conoscenza e una più ampia validazione clinica per ampliare le tipologie di casi clinici gestibili, AIR-TelTeC-HF ha dimostrato che la telemedicina

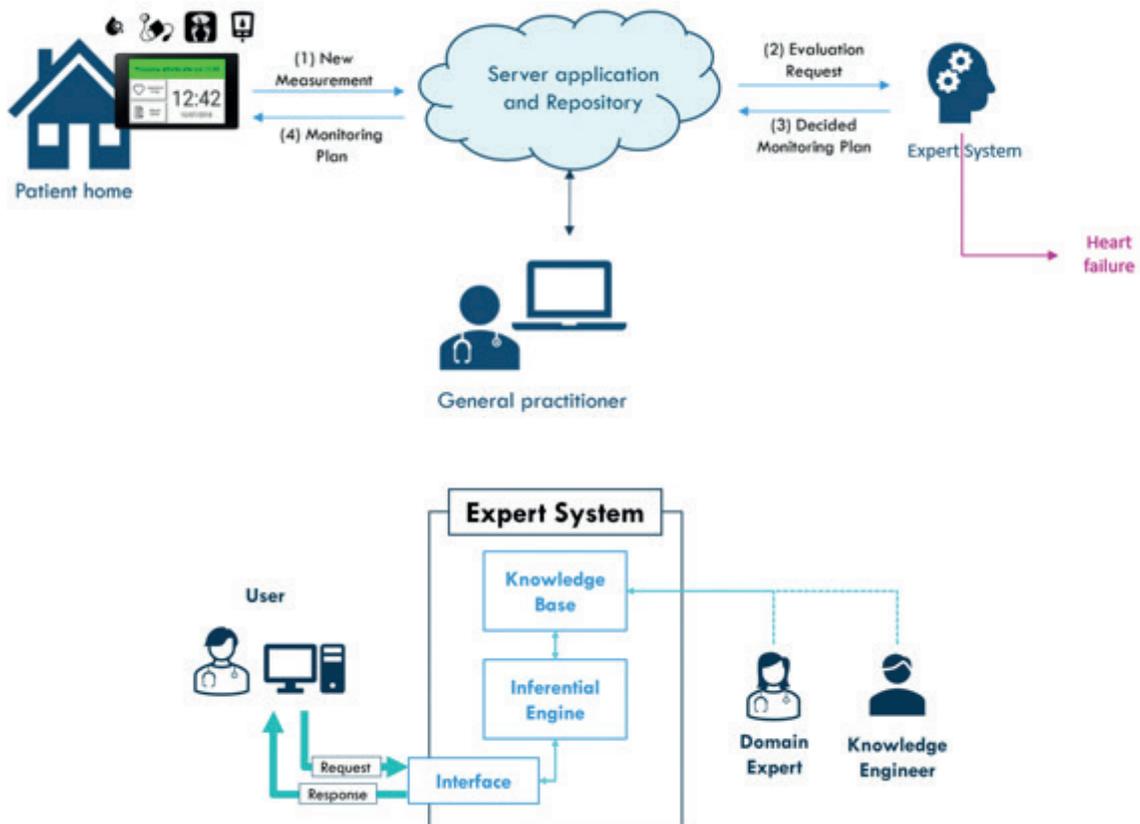


Figura 3 | Flusso delle informazioni nel sistema AIR-TelTeC-HF. Elaborazione di M. Olivelli.

intelligente potrebbe migliorare la cura di questi pazienti. La capacità del sistema di aggiornare i piani di monitoraggio in tempo reale garantisce la tempestività degli interventi, con una riduzione potenziale del rischio di ospedalizzazioni.

L'AIR-TelTeC-HF è stato progettato pensando alla facilità d'uso, così da consentire ai clinici di comprendere e implementare rapidamente le raccomandazioni del sistema, supportandoli nella gestione del paziente. Il MES potrebbe anche facilitare il confronto clinico multidisciplinare, in particolare nei casi complessi. Il sistema fornisce una chiara motivazione alla base delle raccomandazioni suggerite, di conseguenza può anche fungere da facilitatore per colmare il divario di competenze esistenti tra le diverse specialità, favorendo una maggior collaborazione.

Inoltre, il MES ha anche un potenziale valore educativo, in quanto mette a disposizione dei clinici una cartella clinica elettronica dettagliata su cui costruire la strategia terapeutica per ogni paziente.

Le precedenti esperienze di telemonitoraggio, TelTeC e TelTeCovid (Telemonitoring of Territorial Chronic patients/patients with Covid Syndrome)⁽⁸⁾ avevano messo in evidenza numerose difficoltà sia tecniche che gestionali nell'utilizzo della piattaforma di telemonitoraggio. Di fatto spettava ad ogni singolo medico la decisione di definire manualmente ciascun piano di monitoraggio e di aggiornarlo in base ai numerosissimi dati delle automisurazioni che arrivavano sulla cartella clinica elettronica.

Nell'ambito dello scompenso cardiaco i primi sistemi di previsione di malattia e supporto decisionale avevano già dimostrato di essere robusti nelle dimensioni di sensibilità, accuratezza, specificità^(9,10,11,12).

Attualmente rimane la grande sfida di riuscire ad integrare quanto conosciamo sui Sistemi di Supporto alla Decisione Diagnostica nelle più avanzate piattaforme di telemedicina e di telemonitoraggio e, soprattutto, di riuscire ad applicarlo nella gestione del paziente complesso, con multimorbilità, sul territorio.

In futuro l'AIR-TelTeC-HF potrebbe essere integrato con altri MES, cartelle cliniche elettroniche e sistemi informativi per facilitare lo scambio di dati e migliorarne le funzionalità. Poiché i sistemi sanitari stanno evolvendo verso l'adozione di soluzioni di telemedicina e strumenti di digital health, i sistemi come AIR-TelTeC-HF avranno un ruolo cruciale nel plasmare le modalità di gestione delle cure, in particolare per gli individui con condizioni croniche complesse.

Principali benefici del sistema AIR-TelTeC-HF per i pazienti

Il sistema AIR-TelTeC-HF offre una serie di importanti benefici per i pazienti con scompenso cardiaco, come evidenziato dagli studi clinici e dalle applicazioni pratiche:

1. Interventi tempestivi e personalizzati

Il sistema analizza 39 variabili cliniche (dati anamnestici, dati antropometrici, parametri vitali, sintomi) e applica 283 regole decisionali per adattare i piani di monitoraggio in tempo reale. Ciò permette di identificare precocemente i segnali di peggioramento, abilitando l'attuazione precoce di interventi mirati, prima che il quadro clinico si aggravi.

2. Riduzione delle ospedalizzazioni

Grazie alla gestione proattiva, AIR-TelTeC-HF contribuisce a prevenire ricoveri impropri riducendo il rischio di riacutizzazioni dello scompenso. Studi controllati hanno dimostrato un'elevata accuratezza (F1-score dell'82%) nelle raccomandazioni, allineate rispetto alle decisioni degli esperti umani.

3. Miglioramento della qualità della vita

L'approccio basato su dati integrati (clinici di tipo diagnostico-terapeutico, sintomi, parametri vitali) consente di ottimizzare i trattamenti e quindi di ridurre i sintomi e di migliorare l'aderenza del paziente al protocollo terapeutico. Questo è coerente con i risultati dello studio STRONG-HF, che evidenzia come il monitoraggio intensivo e l'adattamento terapeutico migliorino la qualità di vita.

4. Accessibilità e facilità d'uso

Progettato per la medicina territoriale, AIR-TelTeC-HF è accessibile ai medici di medicina generale, che si trovano a gestire meglio il paziente complesso senza che il carico di lavoro risulti aumentato. L'interfaccia intuitiva e la trasparenza delle regole decisionali favoriscono una collaborazione multidisciplinare.

5. Valore educativo e trasparenza

Il sistema fornisce un registro elettronico dettagliato che aiuta i professionisti a costruire piani terapeutici personalizzati e migliora la comprensione del paziente e la compliance alle terapie.

6. Integrazione con piattaforme esistenti

AIR-TelTeC-HF è pensato per essere integrato con sistemi di telemedicina e cartelle cliniche elettroniche, al fine di ampliare la sua applicabilità e di facilitare lo scambio di dati tra specialisti.

In sintesi, AIR-TelTeC-HF combina precisione tecnologica e flessibilità clinica rappresentando così un avanzamento nella telemedicina cardiologica, in grado di migliorare gli esiti dei pazienti con scompenso cardiaco.

Vantaggi del sistema AIR-TelTeC-HF rispetto ad altri dispositivi di telemonitoraggio

Il sistema AIR-TelTeC-HF si distingue da altri dispositivi di telemonitoraggio grazie a caratteristiche innovative che combinano IA, personalizzazione clinica e integrazione con processi decisionali medici (Tabella 2). Di seguito vengono sintetizzati i principali vantaggi rispetto alle soluzioni più tradizionali:

1. Approccio basato su regole esperte e trasparenza decisionale

AIR-TelTeC-HF replica il ragionamento deduttivo del medico esperto attraverso 283 regole IF/THEN e 39 variabili cliniche (dati anamnestici, dati antropometrici, parametri vitali, sintomi), garantendo spiegabilità delle raccomandazioni. A differenza di sistemi di ML “black box”, fornisce un modulo dedicato che rende comprensibile agli utenti il processo decisionale.

2. Adattamento dinamico dei piani di monitoraggio

Il sistema aggiorna in tempo reale i protocolli di monitoraggio in base a:

- parametri vitali (peso, pressione arteriosa sistolica, frequenza cardiaca, saturazione di ossigeno) rilevati da dispositivi IoT;
- sintomi riportati dai pazienti tramite questionari;
- dati clinici di tipo diagnostico-terapeutico registrati nel diario elettronico.

Questo permette interventi mirati e tempestivi, riducendo il rischio di riacutizzazioni.

3. Integrazione con piattaforme esistenti e interoperabilità

AIR-TelTeC-HF è progettato per essere incorporato in sistemi di telemonitoraggio già attivi, senza richiedere infrastrutture aggiuntive. La sua compatibilità con cartelle cliniche elettroniche e altri MES facilita lo scambio di dati tra specialisti, favorendo una collaborazione multidisciplinare.

4. Validazione clinica e accuratezza

Nello studio controllato con 31 pazienti, AIR-TelTeC-HF ha dimostrato un F1-score dell'82% nelle raccomandazioni, allineandosi alle decisioni degli esperti umani. La capacità di identificare precocemente segnali di instabilità (es. peggioramento dello scompenso cardiaco) riduce i ricoveri impropri.

5. Accessibilità per la medicina territoriale

Pensato per i medici di medicina generale, AIR-TelTeC-HF semplifica la gestione di pazienti complessi senza aumentare il carico di lavoro. L'interfaccia intuitiva e l'automazione dei processi decisionali lo rendono adatto a contesti ambulatoriali o domiciliari.

6. Valore educativo e continuità assistenziale

Il sistema fornisce un registro elettronico dettagliato che supporta i professionisti nella pianificazione terapeutica, migliorando la compliance del paziente e la qualità della cura.

AIR-TelTeC-HF rappresenta un avanzamento rispetto ai sistemi tradizionali, combinando precisione tecnologica con flessibilità clinica, per migliorare gli esiti dei pazienti con scompenso cardiaco cronico. Nella figura 4 viene riportata una swot analysis per favorire una valutazione completa e oggettiva delle potenzialità e degli ambiti di miglioramento dei sistemi esperti.

AIR-TelTeC-HF vs Digital twin

Per alcune sue caratteristiche, riportate di seguito, il sistema AIR-TelTeC-HF può essere considerato un “health digital twin”.

Tabella 2 | Vantaggi del sistema AIR-TelTeC-HF rispetto ad altri dispositivi di telemonitoraggio.

Caratteristica	HF-MES	Dispositivi tradizionali
Decision-making	Basato su regole esperte e IA spiegabile	Monitoraggio passivo senza logica predittiva
Personalizzazione	Piani dinamici per paziente e comorbidità	Protocolli standardizzati
Integrazione	Compatibile con piattaforme esistenti	Spesso isolati o non interoperabili
Validazione clinica	Studi con F1-score >80%	Limitata o assente
Accessibilità	Orientato alla medicina territoriale	Spesso riservato a strutture ospedaliere



Figura 4 | Swot analysis.

1. Rappresentazione digitale in tempo reale: il sistema analizza continuamente parametri vitali, sintomi e dati clinici, creando una rappresentazione digitale aggiornata dello stato del paziente.
2. Personalizzazione: utilizza 39 variabili e 283 regole IF/THEN per creare un modello personalizzato per ogni paziente.
3. Predittività: è in grado di prevedere potenziali peggioramenti e suggerire interventi preventivi.
4. Integrazione di dati da diverse fonti: combina dati da dispositivi IoT, questionari e cartelle cliniche elettroniche.
5. Supporto decisionale: fornisce raccomandazioni per piani di monitoraggio basati sull'analisi dei dati.

Anche se AIR-TelTeC-HF condivide alcune caratteristiche con i digital twin, è comunque un sistema

specializzato per la telemedicina, focalizzato su decisioni cliniche basate su regole esperte.

Nella tabella 3 sono indicate le peculiarità nella definizione e negli obiettivi dei digital twin vs AIR-TelTeC-HF.

Conclusione

I sistemi esperti rappresentano un esempio concreto di come l'intelligenza artificiale abbia iniziato a trasformare la sanità digitale. Nel caso della gestione dell'insufficienza cardiaca cronica tramite telemedicina, l'esempio riportato dimostra come sia possibile combinare automazione e personalizzazione delle cure per migliorare gli esiti clinici e ottimizzare le risorse sanitarie.

Il sistema AIR-TelTeC-HF ha dimostrato accuratezza attraverso una validazione preliminare su 66 casi clinici

Tabella 3 | Principali peculiarità nella definizione e negli obiettivi tra Digital twin e AIR-TelTeC-HF.

Aspetto	Digital Twin	AIR-TelTeC-HF
Definizione	Replica virtuale di un asset fisico (es. macchina, paziente) aggiornata in tempo reale tramite dati sensoriali	Sistema esperto medico per il monitoraggio clinico di pazienti con scompenso cardiaco
Scopo principale	Simulazione, ottimizzazione predittiva e manutenzione predittiva	Classificazione del rischio, raccomandazioni terapeutiche e prevenzione di ricoveri

di pazienti con scompenso cardiaco cronico (SCC) e comorbidità, concordando con le valutazioni di medici esperti in 56 casi (85,4%). Il sistema ha inoltre correttamente identificato tutti i 18 casi di instabilità assegnandoli al piano di monitoraggio più intensivo. L'errata segnalazione di 4 casi come instabili è legata verosimilmente alla rigidità delle regole predefinite.

Il futuro della Digital Health è orientato verso tecnologie più complesse ed avanzate, ma i sistemi esperti come AIR-Teltec-HF rappresentano la base di conoscenza ed il ponte tra passato e futuro nell'innovazione sanitaria.

Messaggi chiave

- I sistemi esperti sono progettati per simulare il processo decisionale umano in contesti specifici. Sono basati su regole predefinite e conoscenze codificate da esperti e possono migliorare la capacità di:
 - 1) valutare variabili associate alla progressione di una malattia, all'insorgenza di complicanze o alla terapia
 - 2) suggerire strategie di intervento
 - 3) monitorare i risultati nel tempo
 - 4) prevedere e identificare aree di incertezza clinica.
- La creazione del sistema Artificial Intelligence Research-Telemonitoring of Territorial CHF (AIR-TelTeC-HF) MES si fonda su una base di conoscenza creata da clinici. Include 39 variabili che, combinate in 283 regole IF/THEN, ne guidano il processo decisionale. Agisce come un classificatore a 4 classi: 3 classi per livelli crescenti di rischio per i pazienti stabili (basso, medio e alto) e 1 classe per i pazienti instabili.
- AIR-TelTeC-HF rappresenta un avanzamento rispetto ai sistemi tradizionali, combinando precisione tecnologica con flessibilità clinica, per migliorare gli esiti dei pazienti con scompenso cardiaco cronico.

Bibliografia

1. Greenhalgh T, Abimbola S. The NASSS Framework – A Synthesis of Multiple Theories of Technology Implementation. *Studies in Health Technology and Informatics*, IOS Press <https://doi.org/10.3233/SHTI190123>, 2019.
2. Hill A, Morrissey D, Marsh W. What characteristics of clinical decision support system implementations lead to adoption for re-

gular use? A scoping review. *BMJ Health Care Inform* 31:e101046. <https://doi.org/10.1136/bmjhci-2024-101046>, 2024.

3. Sutton RT, Pincock D, Baumgart DC, Sadowski DC, Fedorak RN, Kroeker KI. An overview of clinical decision support systems: benefits, risks, and strategies for success. *Npj Digit Med* 3:17. <https://doi.org/10.1038/s41746-020-0221-y>, 2020.

4. Albert L, Capel I, García-Sáez G, Martín-Redondo P, Hernando ME, Rigla M. Managing gestational diabetes mellitus using a smartphone application with artificial intelligence (SineDie) during the COVID-19 pandemic: much more than just telemedicine. *Diabetes Research and Clinical Practice* 169:108396. <https://doi.org/10.1016/j.diabres.2020.108396>, 2020.

5. Wiwatkunupakarn N, Aramrat C, Pliannuom S, Buawangpong N, Pinyopornpanish K, Nantsupawat N, et al. The Integration of Clinical Decision Support Systems Into Telemedicine for Patients With Multimorbidity in Primary Care Settings: Scoping Review. *J Med Internet Res* 25:e45944. <https://doi.org/10.2196/45944>, 2023.

6. Singh H, Schiff GD, Graber ML, Onakpoya I, Thompson MJ. The global burden of diagnostic errors in primary care. *BMJ Qual Saf* 26:484. <https://doi.org/10.1136/bmjqs-2016-005401>, 2017.

7. Vianello A, Olivelli M, Donati M, Fanucci L, Bechini A, Petrucci I, et al. Medical Expert System for Intelligent Telemonitoring of Patients With Chronic Heart Failure: Preliminary Validation and Perspectives. *Circ: Heart Failure* 18. <https://doi.org/10.1161/CIRCHEARTFAILURE.124.012478>, 2025.

8. Panicacci S, Donati M, Lubrano A, Vianello A, Ruiu A, Melani L, Tomei A, Fanucci L. Telemonitoring in the Covid-19 Era: The Tuscany Region Experience. *Healthcare (Basel)* 9(5):516. doi:10.3390/healthcare9050516, 2021.

9. Ali L, Khan SU, Golilarz NA, Yakubu I, Qasim I, Noor A, Nour R. A Feature-Driven Decision Support System for Heart Failure Prediction Based on χ^2 Statistical Model and Gaussian Naive Bayes. *Comput Math Methods Med* 2019:6314328. doi:10.1155/2019/6314328, 2019.

10. El-Rashidy N, El-Sappagh S, Islam SMR, M El-Bakry H, Abdelrazek S. Mobile Health in Remote Patient Monitoring for Chronic Diseases: Principles, Trends, and Challenges. *Diagnostics (Basel)* 11(4):607. doi: 10.3390/diagnostics11040607, 2021.

11. Charman SJ, Okwose NC, Groenewegen A, Del Franco A, Tafelmeier M, Preveden A, Garcia Sebastian C, Fuller AS, Sinclair D, Edwards D, Nelissen AP, Malitas P, Zisaki A, Darba J, Bosnic Z, Vracar P, Barlocco F, Fotiadis D, Banerjee P, MacGowan GA, Fernandez O, Zamorano J, Jiménez-Blanco Bravo M, Maier LS, Olivetto I, Rutten FH, Mant J, Velicki L, Seferović PM, Filipovic N, Jakovljevic DG. STRATIFYHF investigators. Clinical validation of an artificial intelligence-based decision support system for diagnosis and risk stratification of heart failure (STRATIFYHF): a protocol for a prospective, multicentre longitudinal study. *BMJ Open* 15(1):e091793. doi: 10.1136/bmjopen-2024-091793, 2025.

12. Brons M, Koudstaal S, Asselbergs FW. Algorithms used in telemonitoring programmes for patients with chronic heart failure: a systematic review. *Eur J Cardiovasc Nurs* 17(7):580-588. doi: 10.1177/1474515118786838, 2018.