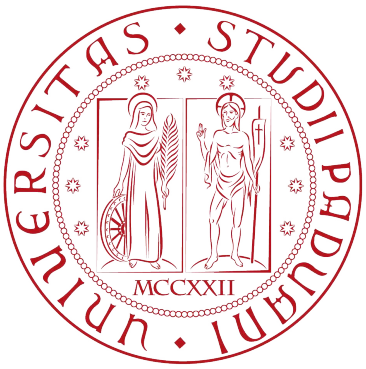

Università degli Studi di Padova

Dipartimento di Diritto pubblico, internazionale e comunitario

Dipartimento di Ingegneria dell'Informazione

Corso di Laurea in Diritto e Tecnologia

Smart healthcare: come il metaverso può trasformare il panorama della sanità

Relatrice:
Dott.ssa Sara Baldoni

Candidato:
Filippo Loro
2055830

Anno Accademico 2023-2024

Sommario

Il metaverso è un nuovo mondo digitale alimentato da tecnologie all'avanguardia e ha un potenziale enorme per la sanità. Grazie allo sviluppo di spazi virtuali immersivi, il metaverso si sta rapidamente affermando nel settore medico, con una crescente necessità di soluzioni digitali nel prossimo decennio. Questa ricerca offre la possibilità di scoprire come le combinazioni tra metaverso e smart healthcare possano rivoluzionare il sistema sanitario, con particolare attenzione all'applicazione delle varie tecnologie, soprattutto della realtà e spazi virtuali, con lo scopo di informare ed addestrare il personale medico. Per introdurre questi concetti, vengono prima esaminate le tecnologie chiave che supportano lo sviluppo e la diffusione della sanità digitale. Tra queste spiccano l'Internet of Medical Things (IoMT), i dispositivi indossabili e l'intelligenza artificiale, tutte tecnologie che stanno trasformando profondamente la gestione della salute pubblica. Successivamente, la ricerca analizza lo stato attuale della sanità digitale nei settori fondamentali, come nell'adozione di tecnologie immersive, chirurgia e telemedicina, evidenziando l'impatto di queste nel migliorare l'efficacia dei trattamenti, l'accesso alle cure e la formazione del personale sanitario. Attraverso l'analisi di casi studio e una revisione della letteratura vengono esplorati i benefici e le sfide dell'integrazione di queste tecnologie, concludendo che il futuro della sanità sarà sempre più digitale e interattivo, con potenziali miglioramenti significativi nella cura e nella formazione medica.

Indice

Sommario **III**

1 Introduzione **1**

2 Smart healthcare **3**

2.1 Definizione di *Smart healthcare* 3

2.2 Evoluzione della sanità 4

2.3 IoMT 6

2.3.1 Sistemi di Ambulanza Intelligente 8

3 Metaverso **11**

3.1 Metaverso 11

3.1.1 Realtà estesa 12

3.1.1.1 Realtà virtuale e Aumentata 14

3.2 Sfide per la protezione e la privacy nel metaverso 17

4 Interazione tra Metaverso e Sanità **19**

4.1 Integrazione del Metaverso sul Sistema sanitario 19

4.2 Applicazioni Pratiche sul Metaverso 21

4.2.1 Formazione medica e simulazione immersive 21

4.2.2 Telemedicina immersiva 23

4.3 IoMT nel Metaverso 25

5 Caso Studio sull'Uso di BCI-VR per la Riabilitazione Motoria di un Paziente con Ictus Cronico **27**

6 Conclusioni **33**

Acronimi **35**

Bibliografia **36**

Elenco delle figure

3.1 Oculus Quest 2: un visore per Realtà Virtuale 15
3.2 Microsoft HoloLens: un visore per Realtà Aumentata 16

5.1 Paziente con visore VR e dispositivo vibrotattile durante l'esecuzione dell'esercizio su NeuRow. 29
5.2 Dispositivo Enobio 8: un sensore EEG wireless mobile con 8 canali. 30

Capitolo 1

Introduzione

Il settore sanitario si sta muovendo nella direzione di un modello innovativo, guidato da un bisogno di migliorare i processi di prevenzione, cura, riabilitazione e amministrazione delle strutture sanitarie. L'ambito sanitario si sta quindi evolvendo includendo componenti di assistenza digitale, e dando vita allo *smart healthcare*. Quest'ultimo è emerso negli ultimi anni come una forza trainante significativa dietro i cambiamenti organizzativi nei dipartimenti sanitari. Le tecnologie emergenti che stanno influenzando e trasformando il panorama sanitario sono l'*Internet of Things* (IoT), il metaverso, l'intelligenza artificiale e l'analisi avanzata di gestione dei dati.

I dispositivi IoT e i *wearable device* possono essere integrati nel sistema sanitario permettendo di prevenire alcune patologie e di monitorare costantemente lo stato di salute dei pazienti. Inoltre, questo nuovo paradigma consente alle persone di essere più consapevoli e partecipative della propria condizione sanitaria.

Questa "rivoluzione della sanità" procede ulteriormente verso l'integrazione del sistema odierno con le nuovissime applicazioni del metaverso, fornendo numerose opportunità all'avanguardia per migliorare l'assistenza ai pazienti, la ricerca medica e l'istruzione.

Il metaverso è uno spazio tridimensionale che mira ad imitare la realtà sensoriale, tanto che le differenze tra le due sono quasi impercettibili. E' accessibile attraverso tecnologie come la realtà virtuale (VR) e la realtà aumentata (AR), che consentono l'interazione multisensoriale con gli ambienti virtuali, gli oggetti digitali e le persone. Sebbene il metaverso si stia ancora sviluppando, i mondi virtuali 3D vengono già utilizzati in sanità, istruzione e molti altri settori.

In questo elaborato andremo ad approfondire come le varie tecnologie del metaverso e le sue applicazioni pratiche vengono utilizzate in modi differenti nell'ambito sanitario, per poi andare ad analizzare un caso studio in cui vedremo un esempio di come tali tecnologie vengono

applicate alla realtà, a partire dalla formazione medica che sviluppa un approccio didattico per sviluppare delle abilità cliniche, per poi passare all'assistenza remota, che consente l'erogazione di cure in modo coinvolgente per i pazienti ,agevolando condizioni critiche come potrebbe essere la difficoltà di raggiungere strutture sanitarie, e illustrando come le la connessione tra tecnologie immersive e dispositivi intelligenti stanno rivoluzionando i trattamenti riabilitativi monitorando le condizione di persone e le loro risposte a questi trattamenti sempre più innovativi.

Capitolo 2

Smart healthcare

2.1 Definizione di *Smart healthcare*

Con l'avanzamento della tecnologia la medicina tradizionale si sta sempre più evolvendo e, in particolare negli ultimi anni, si sta sviluppando un nuovo modello di assistenza sanitaria. Si parla di un vero e proprio cambiamento radicale, che non si limita ad essere un progresso, ma è una vera e propria trasformazione che riguarda diversi aspetti della sanità, come per esempio, lo spostamento dell'attenzione da servizi incentrati sulla malattia a quelli incentrati sul paziente, il cambiamento nella costruzione dell'informatizzazione, coinvolgendo l'intero sistema sanitario e non più focalizzandosi su singole strutture cliniche e, per quanto riguarda il trattamento medico, la crescente importanza attribuita all'assistenza sanitaria preventiva e non solo al trattamento della malattia [50]. L'assistenza sanitaria intelligente è un sistema che sfrutta tecnologie emergenti come *Internet of Thing,cloud computing, Blockchain, Big data* e intelligenza artificiale, realizzando varie piattaforme intelligenti per connettere gli utenti ai sistemi medici, migliorando l'efficacia delle cure e contribuendo a mantenere stabile il controllo delle risorse sanitarie. I principali utenti coinvolti possono essere raggruppati in tre gruppi: il pubblico, i fornitori di servizi sanitari e i partecipanti terzi. Questi ultimi si riferiscono ai soggetti che non sono presenti nel rapporto medico-paziente, ma che forniscono indirettamente supporto, servizi o tecnologie. Grazie a questa integrazione, il sistema è in grado di ridurre i costi sanitari e offrire servizi medici tempestivi, mirati a fornire assistenza di qualità ai pazienti, dal momento che non comprende solamente il monitoraggio delle loro condizioni, ma include altri aspetti importanti dell'assistenza sanitaria, come ad esempio la gestione ospedaliera e la ricerca, con lo scopo di migliorare la salute e la qualità della vita delle persone[59]. Lo *Smart Healthcare* adotta vari strumenti interconnessi tra di loro che hanno la

capacità di connettere persone, oggetti e istituzioni legate all'assistenza sanitaria, così da creare una condizione ottimale per rispondere alle esigenze dell'ecosistema medico. Questo modello ha portato notevoli vantaggi per tutti soggetti coinvolti. Ad esempio, per quanto riguarda i pazienti, vengono utilizzati i dispositivi indossabili per tracciare i segnali biochimici e fisici, tracciando i cambiamenti della frequenza cardiaca e respiratoria, oppure la telemedicina con sistemi di monitoraggio domestico che assistono il paziente direttamente dalla propria casa, inviando dati con dispositivi tecnologici direttamente ai medici. I medici utilizzano lo *Smart Healthcare* in sistemi che supportano le decisioni cliniche migliorando la diagnosi, suggerendo piani personalizzati che aumentano l'efficacia delle cure, oppure negli ospedali in particolare la tecnologia di identificazione a radiofrequenza (*Radio Frequency IDentification* (RFID)) può essere utilizzata per gestire i materiali del personale e delle forniture, utilizzando piattaforme di gestione integrate per raccogliere informazioni e assistere il processo decisionale.

Un'altra innovazione tecnologica cruciale è il *Natural Language Processing* (NLP). Si tratta di un insieme di tecniche e algoritmi che permettono di analizzare il linguaggio umano naturale. L'NLP ha come obiettivo quello di gestire input e output di qualsiasi forma di comunicazione, non semplicemente come una sequenza di caratteri, ma in modo più complesso, rilevando aspetti sintattici e fonologici e permettendo di elaborare, da un concetto o significato, un risultato misurabile. Le sue applicazioni nel campo della medicina sono varie, ha dimostrato una particolare rilevanza per i pazienti del pronto soccorso, migliorando il processo di *tirage*, ossia la valutazione delle priorità assistenziali ai pazienti [47]. Anche in contesti diagnostici è in grado di analizzare i referti radiologici sviluppando una risposta appropriata, diminuendo l'operato di medici e personale sanitario grazie al lavoro automatizzato dei vari algoritmi. Inoltre, questa tecnica nel campo della sanità moderna viene utilizzata molto per migliorare l'utilizzo delle cartelle cliniche elettroniche non strutturate *(EHR)*, che raccolgono in modo sistematico documenti in formato digitale registrando informazioni sulla salute e sul benessere di un individuo [27].

2.2 Evoluzione della sanità

L'evoluzione della sanità è stata caratterizzata da significativi cambiamenti nelle modalità di interazione tra pazienti e medici, con un crescente spostamento da un modello tradizionale verso la digitalizzazione della comunicazione. I servizi sanitari intelligenti negli ultimi anni si sono così evoluti che oggi formano un sistema consolidato e continuano a progredire e a migliorare con l'introduzione di nuove tecnologie, fornendo molti servizi come prescrizione

remota, telemedicina e rilevamento delle malattie. Con l'avvento tecnologico istituzioni private e pubbliche si sono impegnate per coinvolgere e mettere al corrente i pazienti sulle loro condizioni in modo continuativo. Questa transizione ha reso possibile un accesso più facile e immediato alle informazioni cliniche, consentendo ai pazienti di gestire attivamente la propria salute, ottenendo risultati migliori in termini di assistenza anche a costi minori. Nonostante i molteplici vantaggi e benefici, l'introduzione di queste tecnologie ha incontrato e incontra diverse difficoltà. In un settore così delicato e orientato alla centralità della persona, infatti, emergono problemi legati alla comunicazione e alla comprensione della tecnologia. La mancanza di comunicazione verbale può portare a fraintendimenti e ad un uso inappropriato da parte del paziente della comunicazione digitale asincrona, rivolgendosi ad essa per questioni che potrebbero anche richiedere un'attenzione clinica immediata, con conseguenti ritardi nella risposta e un aumento significativo dei rischi per la salute, in quanto alcune problematiche urgenti potrebbero non essere gestite in modo tempestivo.

Inoltre, sebbene l'avvento di impianti e dispositivi tecnologici, come apparecchiature indossabili per il monitoraggio dei parametri vitali e i sensori intelligenti, stiano rivoluzionando la sanità offrendo notevoli benefici, essi non vengono sempre sfruttati a causa delle barriere legate alla mancanza di consapevolezza in ambito medico e alla mancata adozione della tecnologia. Le ricerche più recenti hanno dimostrato che i servizi sanitari intelligenti non sono sempre facilmente accettati, la popolazione anziana fatica ad adottarli pienamente a causa di una limitata alfabetizzazione tecnologica, abitudini di vita specifiche e capacità cognitive limitate e anche i giovani, che generalmente dimostrano maggiore dimestichezza con la tecnologia, incontrano delle difficoltà nell'utilizzo ottimale di questi dispositivi, soprattutto quando si tratta di interpretare correttamente i dati sanitari e di adottare comportamenti adatti basati su questi ultimi [26].

Per questo motivo è importante proporre l'applicazione di questi nuovi metodi enfatizzandone i vantaggi pratici, evitando così frustrazioni, che alimentano barriere spesso insormontabili, con delle azioni pratiche. Un esempio può essere l'adozione di un *design user-friendly* per superare le difficoltà tecniche. Tale *design* può riguardare l'uso di caratteri dalla dimensione adeguata, un giusto contrasto cromatico, soluzioni che privilegiano la semplicità all'estetica e l'uso parsimonioso di gesti che richiedono coordinazione motoria alimentano la fiducia nella possibilità di gestire la tecnologia[37].

Infine, nonostante il potenziale rivoluzionario della tecnologia nell'ambito sanitario, è essenziale non perdere di vista l'importanza della connessione umana nel processo di cura. Riconoscendo ciò, è emerso un ruolo cruciale: il *Care Navigator*. Questo individuo è un membro

dello staff clinico, che unisce una formazione medica ed esperienza clinica per aiutare i pazienti nell'uso delle tecnologie e nell'adozione di piani di cura personalizzati. I *Care Navigator* mantengono regolari interazioni remote con i pazienti, analizzano le tendenze dei dati e assicurano un'integrazione tra innovazione e cura personale [20]. È importante ricordare che senza una connessione umana autentica rischiamo di non sfruttare appieno i progressi raggiunti; infatti le interazioni umane nell'assistenza sanitaria alimentano relazioni solide, accelerano la creazione di fiducia, facilitano il coinvolgimento del paziente e ne migliorano l'esperienza complessiva, garantendo così un equilibrio tra innovazione tecnologica e cura personale [22].

2.3 IoMT

I recenti sforzi di ricerca hanno dato vita a numerosi progressi nel campo dell'IoT, che consiste in un'infrastruttura globale costituita da dispositivi fisici interconnessi. Questa nuova realtà può essere anche definita come una rete di oggetti fisici, tra cui dispositivi, strumenti, veicoli, edifici e altri elementi dotati di elettronica, circuiti, software, sensori e connettività di rete, che consente a questi di raccogliere e scambiare dati. L'IoT permette di controllare gli oggetti a distanza tramite infrastrutture di rete già esistenti, contribuendo a formare una maggiore integrazione diretta del mondo fisico nei sistemi informatici, con conseguenti miglioramenti in efficienza e precisione [17]. Nella progettazione dell'architettura dell'IoT è necessaria un'infrastruttura adattabile per consentire ai dispositivi di interagire dinamicamente e supportare la comunicazione tra di loro, in quanto in questo ambiente gli oggetti possono spostarsi e interagire con altri in tempo reale.

Il modello di architettura che consente a diversi componenti software di comunicare tra loro tramite una rete, fornendo servizi indipendenti e riutilizzabili, viene chiamato *Service-Oriented Architecture* (SoA). Questo offre notevoli vantaggi in termini di scalabilità e flessibilità: la SoA consente di aggiungere nuovi servizi, o di modificare quelli esistenti, senza interrompere il funzionamento dell'intero sistema. Questo approccio modulare comporta che le organizzazioni possono rispondere rapidamente ai requisiti mutevoli o incorporare nuove tecnologie man mano che emergono, rendendo le loro distribuzioni IoT più adattabili alle esigenze future [12]. Grazie a questi vantaggi, la SoA è stata ampiamente adottata come architettura principale dell'IoT, ed è composta da quattro livelli con funzionalità distinte: il primo livello viene chiamato "di rilevamento" ed è inserito su tutti gli oggetti disponibili (cose) per rilevare il loro stato; il secondo livello "di rete" rappresenta l'infrastruttura per supportare le connessioni tra gli oggetti, sia wireless sia cablate; il terzo livello "di servizi" crea e gestisce

i servizi richiesti dagli utenti o dalle applicazioni. Infine, l'ultimo livello "delle interfacce" è costituito dai metodi di interazione con utenti o applicazioni. [17]

L'*Internet of Medical Things* (IoMT) rappresenta un'applicazione specifica dell'IoT nell'ambito sanitario, sfruttando l'intersezione tra dispositivi medici e l'IoT. Gli IoMT costituiscono il futuro della sanità, in cui ogni dispositivo medico sarà connesso a Internet e monitorato in tempo reale. Questa tecnologia promette di rivoluzionare il modo in cui vengono erogate le cure sanitarie, permettendo un monitoraggio continuo e una gestione più efficiente dei dati relativi ai pazienti. Le informazioni raccolte da questi dispositivi possono aiutare gli operatori sanitari a monitorare i dati biometrici in tempo reale, il che può aiutarli a eseguire diagnosi accurate e prevenire le malattie[10]. L'IoMT sta trovando applicazione anche presso il domicilio dei pazienti, offrendo strumenti con il fine di migliorare sia la loro salute che l'efficienza dei sistemi sanitari, attraverso il monitoraggio da remoto con appositi dispositivi come lo smartwatch, il glucometro o saturimetri per le persone con problemi respiratori. In questo modo viene permesso il monitoraggio in tempo reale dei parametri vitali [11].

Secondo diversi studi dell'Ufficio statistico dell'Unione Europea, l'IoMT ha il potenziale per riformare il settore sanitario. Infatti, molti di questi hanno analizzato come l'adozione di tali tecnologie non solo rivoluzioni l'accesso di cure, ma possa ridurre il numero di decessi. Infatti, è stato stimato che oltre un milione di persone di età inferiore a 75 anni avrebbe potuto essere salvata se fossero stati implementati servizi efficienti di sanità pubblica e trattamenti primarianche grazie all'introduzione delle nuove tecnologie [2]. Parallelamente, queste carenze nelle pratiche mediche sono state la terza causa di morte negli Stati Uniti, mettendo in risalto l'urgente necessità di migliorare la qualità dei trattamenti riducendo la percentuale di errori evitabili. L'IoMT ha il potenziale per affrontare queste problematiche, permettendo agli operatori sanitari di gestire e analizzare i dati in modo più efficiente, integrando dispositivi che monitorano parametri vitali a sistemi di supporto decisionale (DSS), migliorando la qualità delle cure e la sicurezza dei pazienti riducendo anche gli errori umani, poiché i dati sono costantemente verificabili e possono essere analizzati in modo più sistematico [2].

Questa evoluzione del campo medico è stata sostenuta da un un mercato in rapida crescita: si stima che il mercato globale dell' IoMT aumenterà da 72.5 miliardi di USD nel 2020 a 188,2 miliardi di USD entro il 2025. La regione con il tasso di crescita annuale composto (CARG) sarà l'area APAC, che comprende Asia orientale, Asia sudorientale, Oceania e, in alcuni casi, anche l'Asia meridionale, grazie al grosso avanzamento delle politiche governative ispirate alla globalizzazione e dell'espansione della digitalizzazione che le ha caratterizzate nell'ultimo decennio [46] .

Un elemento chiave di questa trasformazione è rappresentato dai dispositivi IoMT, progettati per trasmettere dati medici in modo efficiente e sicuro. Questi dispositivi interconnessi possono facilmente trasmettere dati medici a qualsiasi operatore sanitario o a chiunque ne abbia bisogno per monitorare la storia clinica di un paziente e altre informazioni correlate. I dispositivi come i sistemi di monitoraggio remoto dei pazienti funzionano tramite sensori per misurare parametri fisiologici per poi trasmetterli tramite la rete verso il Cloud, da dove vengono successivamente memorizzati, elaborati e utilizzati da medici o altri operatori sanitari. Lo scambio di dati sanitari tra due piattaforme diverse può essere realizzato grazie all'interoperabilità, che è una delle caratteristiche chiave dell'architettura IoT poiché consiste nella capacità di due o più componenti software di cooperare nonostante le differenze in linguaggio, interfaccia e piattaforma di esecuzione [56]. Questo aspetto è cruciale nel contesto medico, in cui diversi dispositivi *medical-grade*, ossia quelli conformi agli standard per l'uso medico, devono essere in grado di trasferire e ricevere i dati, consentendo ai dispositivi stessi di interagire e fornire servizi reciproci. Questo scambio di dati e informazioni permette di ottimizzare l'operatività dei dispositivi, migliorando la qualità delle cure a costi ridotti. Tuttavia ci sono diverse sfide che l'interoperabilità deve affrontare. Ad esempio, i dati condivisi possono essere di diverso tipo, come le informazioni personali del paziente, i pareri medici e i referti di laboratorio, rendendo necessario un elevato livello di compatibilità e comprensione delle terminologie e delle ontologie usate nei vari sistemi. La tecnologia più recente deve affrontare anche il problema delle versioni più vecchie o dei sistemi *legacy* e questo è un problema ineludibile, poiché i sistemi *legacy* sono ancora utilizzati da alcune aziende. Tali tecnologie hanno spesso un sistema di gestione dei registri e software proprietario, che sono incompatibili con la tecnologia attuale.

Nonostante queste difficoltà, l'IoMT si sta affermando come supporto in contesti critici. Un esempio è rappresentato dalle *Smart Ambulance System* (SAS), come descritto di seguito.

2.3.1 Sistemi di Ambulanza Intelligente

Una possibile applicazione dell'IoMT all'interno della sanità consiste nel monitoraggio delle condizioni mediche dei pazienti sul luogo dell'incidente, prima ancora del trasporto in ambulanza. Gli operatori sanitari valutano rapidamente le condizioni del paziente per determinare quale intervento fare e, successivamente, intervengono utilizzando strumenti quali, ad esempio, dispositivi portatili, come i pulsossimetri o i monitor ECG, che possono essere collegati sul dito o sul petto del paziente, rilevando parametri vitali come la saturazione dell'ossige-

no o la frequenza cardiaca. Grazie all'impiego dell'IoMT, questi dati possono essere inviati immediatamente alle strutture mediche [4].

Inoltre, i dispositivi IoMT possono raccogliere e trasmettere in tempo reale i dati clinici dei pazienti all'interno dell'ambulanza, consentendo ai medici e al personale sanitario di essere informati in anticipo sulle condizioni del paziente prima dell'arrivo. Le ambulanze SAS, infatti, sono dotate di dispositivi che permettono di monitorare i segni vitali del paziente, quali battito cardiaco, saturazione dell'ossigeno e pressione sanguigna. Questa interconnessione permette di ottimizzare le tempistiche delle cure e di fornire risposte rapide alle emergenze, evidenziando il potenziale dell'IoMT nel migliorare la qualità delle cure e ridurre i tempi di intervento nelle situazioni critiche.

Al contempo, una volta identificato il paziente, i dati dai registri ospedalieri possono essere mandati ai paramedici che, quindi, possono ottenere informazioni sullo stato di salute generale del paziente o su allergie, o dispositivi impiantati garantendo un'assistenza più mirata e sicura. Tuttavia, una delle sfide principali di questo nuovo sistema consiste nel fornire ai paramedici tutte le informazioni necessarie senza compromettere la loro capacità di svolgere le missioni di soccorso in modo efficace, garantendo così un'assistenza tempestiva e informata [25].

Il processo decisionale nei servizi medici di emergenza è profondamente interconnesso: le decisioni nella fase iniziale possono influenzare ampiamente quelle delle fasi successive. In questo contesto il tempo è cruciale: ogni secondo di ritardo può ridurre drasticamente le possibilità di sopravvivenza di un paziente. I SAS più moderni utilizzano il GPS per individuare il percorso più rapido verso il luogo dell'incidente e, successivamente, la struttura sanitaria più appropriata. Questo sistema include anche la capacità di monitorare il traffico e di reindirizzare l'ambulanza per evitare congestioni, contribuendo a ridurre i tempi di arrivo.

Inoltre, l'implementazione di sistemi di semafori intelligenti, come il sistema *Cooperative Intelligent Transport Systems* (C-ITS), permette ai semafori di diventare verdi per le ambulanze in arrivo. Questo riduce i ritardi causati dalla congestione del traffico, ottimizzando ulteriormente il processo di emergenza [39].

Pertanto, gli *Smart Ambulance System* garantiscono continuità per la raccolta dei dati, riducono il tempo necessario per il trasporto dei pazienti verso le strutture sanitarie e consentono di fornire un trattamento adeguato durante il tragitto [14].

Una delle difficoltà cruciali nei SAS riguarda la conservazione dei dati, che deve avvenire nel rispetto della riservatezza del paziente. È essenziale garantire che la comunicazione tra il paziente e il centro di emergenza, nonché tra il personale di ambulanza e quello ospedaliero, avvenga in modo sicuro. Ciò implica l'implementazione di misure per proteggere le informa-

zioni sensibili durante la trasmissione, assicurando che la privacy del paziente sia mantenuta. In sintesi, il sistema SAS, attraverso l'uso dell'IoMT e delle tecnologie di comunicazione, non solo trasporta i pazienti, ma agisce come un nodo cruciale all'interno del sistema sanitario, contribuendo alla diagnosi precoce e alla continuità delle cure [5].

Capitolo 3

Metaverso

3.1 Metaverso

Le origini del concetto di metaverso risalgono a più di 20 anni fa, con il romanzo *Cyberpunk* del 1972, scritto dal romanziere americano Neal Stephenson, in cui descrive uno spazio tridimensionale a cui gli esseri umani potevano accedere attraverso *avatar* virtuali, interagendo in un mondo digitale che rifletteva la realtà. Nei decenni successivi, quest'idea ha continuato ad affermarsi, soprattutto nel contesto della fantascienza cinematografica, in film iconici come *Matrix, Ready Player One* e *Lucy*. Tuttavia, con l'evoluzione tecnologica degli ultimi anni, ha smesso di essere un'idea relegata alla fantascienza, iniziando ad emergere progressivamente nel mondo reale grazie allo sviluppo di dispositivi e tecnologie che ne rendono possibile l'implementazione.

Un momento chiave di questa trasformazione è stato il *rebranding* di Facebook in "Meta", che ha rappresentato il rendere concreto il concetto di metaverso, facendolo passare da un concetto futuristico a realtà concreta. L'idea alla base, come dichiarato da Mark Zuckerberg, è che il metaverso diventerà il successore dell'internet mobile, consentendo una presenza virtuale e immersiva, indipendentemente dalle distanze fisiche tra le persone [58].

Per capire il percorso di questa tecnologia, è importante fare un passo indietro sull'evoluzione del Web e osservare come le modalità con la quale le persone si interfacciano a Internet sono cambiate. Gli utenti sono diventati via via partecipanti sempre più attivi. Questo percorso parte dal Web 1.0 in cui l'utente era esclusivamente passivo, si interfacciava con dei contenuti statici e unidirezionali, limitandosi a leggere le informazioni della pagina web senza poter interagire. In questa epoca, il web veniva utilizzato prettamente come mezzo di pubblicazione di contenuti da parte dei *provider* senza partecipazione da parte dell'utente.

Nel Web 2.0 è emersa l'idea di un nuova modalità di utilizzo di Internet. Con l'avvento dei *social network* il concetto di comunicazione è cambiato verso l'idea di condivisione e interazione su varie piattaforme *social* come YouTube, Facebook e Spotify, sviluppando una nuova idea di base ovvero quella di scambio e diffusione dei contenuti. Quindi l'utente web è stato spinto a diventare non più un semplice lettore ma essere partecipe e protagonista nella ideazione di contenuti interagendo con altri utenti [35].

Ad oggi il metaverso è stato riconosciuto come la prossima generazione di connessione sociale, un mondo multiutente che fonde la realtà fisica con quella digitalizzata. Gli utenti si muovono in questo ecosistema attraverso *avatar* personalizzati, la rappresentazione digitale di se stessi, integrando con oggetti digitali, ambienti virtuali e altri elementi generati dal computer, sviluppando così un mondo che si basa sull'integrazione di tecnologie come realtà virtuale e la realtà aumentata, offrendo attività più immersive e coinvolgenti. I movimenti degli utenti nel mondo reale vengono proiettati nei mondi virtuali, consentendo di controllare completamente i propri *avatar* per interagire comodamente con altri oggetti nel metaverso. Inoltre, questi *avatar* possono interagire con numerose modalità adottate nel mondo reale, come espressioni facciali, emozioni, movimenti del corpo e interazioni fisiche [34]. Nella realtà odierna stanno aumentando sempre di più le applicazioni di questo nuovo ambiente. Innanzitutto occorre menzionare l'ambito dell'intrattenimento. Ci sono stati numerosi concerti compiuti nei mondi virtuali immersivi, tra cui ricordiamo quello di Travis Scott del 2020 e di Ariana Grande del 2021. Anche nei contesti professionali questa nuova piattaforma viene utilizzata sempre di più. Come abbiamo visto soprattutto durante la pandemia Covid- 19, numerose conferenze hanno utilizzato questo spazio affinché tutti i partecipanti potessero interagire anche da remoto. Anche nella formazione e nel *training* aziendale il metaverso sta acquisendo molta importanza in quanto permette di creare aule virtuali, attraverso strumenti 3D immersivi. Infine uno dei più importanti ambiti di applicazione consiste nella sanità, come verrà analizzato nel capitolo seguente [34].

3.1.1 Realtà estesa

Con la diffusione del concetto di metaverso, l'interesse per le tecnologie di interazione immersiva è aumentato, poiché queste permettono di realizzare esperienze virtuali sempre più realistiche e dinamiche, consentendo così alle persone di sperimentare meglio gli ambienti digitali. In questo contesto la Realtà Estesa (XR) ha un ruolo fondamentale: essa incorpora tecnologie, come la Realtà Virtuale (VR) e la Realtà Aumentata (AR), che ampliano la nostra

idea di realtà e colmano questo divario tra il fisico e virtuale, alterando il modo in cui le persone percepiscono il mondo. Queste tecnologie permettono di simulare la realtà creando repliche altamente simili di scenari di vita reale o in alternativa di aumentare la nostra esperienza della realtà fornendo informazioni preziose aggiuntive agli utenti. Per accedere al metaverso sono necessari dispositivi di visualizzazione come gli *Head-Mounted Display* (HMD) che permettono di visualizzare immagini attraverso un'unità montata sulla testa. Sono composti da un visore o un paio di occhiali formati da un display a cristalli liquidi (LCD), e ciò permette la creazione di una visione più ampia rispetto alle altre tecnologie simili, producendo uno schermo immaginario che sembra essere posizionato a diversi metri dall'utente con un ampio campo visivo che può estendersi fino a 360 gradi. La fedeltà rappresentativa di questi dispositivi è resa possibile da schermi stereoscopici in grado di trasmettere la percezione di profondità. Questo è possibile grazie a display separati che mostrano immagini leggermente diverse per ciascun occhio, replicando le condizioni visive degli ambienti fisici [57]. Questi sistemi offrono anche esperienze sonore superiori rispetto ai sistemi 2D. L'audio 3D, spaziale o binaurale consente la costruzione di paesaggi sonori che migliorano decisamente l'immersione dell'utente in ambienti di Realtà Aumentata e Realtà Virtuale. La distribuzione spaziale del suono consente agli utenti di orientarsi e identificare le direzioni dei segnali sonori, un potente mezzo per la navigazione, poiché amplifica la profondità del suono e la percezione della distanza. L'interazione negli ambienti XR non richiede agli utenti di rimanere fermi. Al contrario, gli utenti possono attivare l'intero corpo. Il movimento fisico viene trasferito negli ambienti XR tramite tracciamento posizionale e rotazionale. Il movimento può essere tracciato con telecamere esterne montate permanentemente (*outside-in*) o tramite sensori e telecamere incorporati nel visore che monitorano i cambiamenti di posizione in relazione all'ambiente fisico (*inside-out*) [34]. Oltre ai suddetti input sensoriali passivi, i sistemi XR consentono l'interazione attiva con gli elementi virtuali tramite l'uso di *controller* di movimento. Questi sono dispositivi di input portatili con impugnatura, pulsanti, grilletto e *joystick*. Utilizzando i *controller*, gli utenti possono toccare, afferrare, manipolare e operare oggetti virtuali. Questa capacità li rende agenti attivi in ogni esperienza educativa. In questo ambito, lo sviluppo del tracciamento completo delle mani migliorerà ulteriormente l'esperienza dell'utente verso un'interfaccia più naturale che include il tracciamento delle dita. Sebbene molti HMD siano già dotati di tracciamento delle mani integrato essi presentano alcune limitazioni: si deve tenere le mani in vista dell'HMD per un tracciamento accurato poiché se viene afferrato un oggetto e poi si distoglie lo sguardo, il sistema potrebbe perdere traccia delle mani. Inoltre, il tracciamento delle mani può comportare difficoltà in condizioni di scarsa illuminazione, motivo per cui alcuni dispositivi

utilizzano sensori a infrarossi per migliorare il tracciamento in tali ambienti. Si parla quindi di una tecnologia che è ancora in fase di sviluppo ma dal grandissimo potenziale, in quanto abbattere le barriere date dall'uso dei *controller* rende l'esperienza ancora più realistica [54]. Sono anche in corso ricerche su dispositivi indossabili come tute e guanti che rispondono forniscono stimoli tattili. Ad esempio lo studio descritto nel lavoro di Maereg [28] esplora come i dispositivi vibrotattili possano essere utilizzati per migliorare l'esperienza immersiva fornendo feedback tattili sulla rigidità degli oggetti durante le interazioni virtuali. Questi dispositivi utilizzano degli gli attuatori vibrotattili ERM (*Eccentric Rotating Mass*), in cui l'intensità delle vibrazioni generata può essere modulata per rappresentare diversi livelli di rigidità. L'innovazione di questo studio sta nell'analisi della variazione delle vibrazioni cutanee, per definire la percezione della rigidità. Ulteriori ricerche sensoriali si concentrano anche sulla simulazione del gusto come l'applicazione della tecnologia *Thermal Taste Machine*, con stimolazione termica sulla lingua senza l'uso di sostanze chimiche. Precedenti esperimenti in campo medico hanno indagato la sensibilità di specifici ricettori sensoriali nel corpo umano. Questi esperimenti hanno permesso di scoprire che l'aumento della temperatura sulla lingua in pochi secondi produce sensazioni dolci per un gruppo specifico di persone. I risultati hanno portato a concludere che la stimolazione termica attiva può indurre non solo sensazioni dolci ma anche la percezione di sapori complessi come il metallo e il piccante, rendendo questa tecnologia promettente per esperienze immersive in VR e potenzialmente applicabile a nuove forme di realtà multisensoriale [24].

3.1.1.1 Realtà virtuale e Aumentata

Come abbiamo accennato prima, la Realtà Estesa (XR) è un termine generico che comprende una serie di tecnologie immersive. Fondamentale importanza in questo contesto sono la Realtà Virtuale (VR) e la Realtà Aumentata (AR) [34]. La VR consiste in un'interfaccia avanzata uomo-computer, un ambiente realistico in cui gli utenti si immergono completamente, senza l'utilizzo di comandi e icone dello schermo tradizionale, ma muovendosi al suo interno, con la possibilità di interagirvi. Lo scopo principale di questo sistema è proprio quello di permettere al partecipante di vivere l'esperienza come se "fosse lì" e tutto ciò è permesso dal collegamento di sensi, percettivi e muscolari, che viene svolto attraverso l'ambiente virtuale su cui si basa questa tecnologia [32]. Oculus Quest 2 è un visore per la Realtà Virtuale, che ha rivoluzionato il mondo della realtà virtuale. Il suo *design* è simile all'Oculus Quest originale, ma sostituisce l'esterno nero rivestito in tessuto con plastica bianca e un cuscinetto facciale. Il visore è do-

tato di un display con risoluzione più alta rispetto al modello precedente con 1832x1920 pixel per occhio, rispetto ai 1440x1600 del Quest 1. Di conseguenza, con queste caratteristiche le immagini risultano più nitide, i modelli complessi e le esperienze si caricano in meno tempo.

Figura 3.1: Oculus Quest 2: un visore per Realtà Virtuale

Questo dispositivo contiene anche un motore specializzato per il tracciamento degli oggetti, che permette di gestire i movimenti mentre si è immersi nella VR. Questo sistema utilizza quattro videocamere, poste sul visore, che seguono i movimenti dell'utente interagendo con i controller Oculus Touch. Questi controller sono costituiti da una coppia di unità portatili, ciascuna dotata di uno stick analogico, tre pulsanti e due grilletti e dotate di un poggia-pollice dedicato. I *controller* presentano un sistema per rilevare i gesti delle dita che l'utente può fare mentre li tiene. L'anello in ogni controller contiene un set di LED a infrarossi, che consente loro di essere completamente tracciati nello spazio 3D da sensori (esterni o situati nella parte anteriore del visore nei modelli successivi), consentendo loro di essere rappresentati nell'ambiente virtuale [7].

La Realtà aumentata, invece, è un sistema che integra oggetti virtuali generati dal computer al mondo reale, facendoli coesistere nello stesso spazio e consentendo agli utenti di utilizzare oggetti e di collaborare con le altre persone contemporaneamente interagendo con informazioni virtuali. Questa realtà migliora la percezione e l'interazione dell'utente con il mondo reale, come una visione in tempo reale di un ambiente fisico del mondo reale che è stato "aumentato" aggiungendo informazioni virtuali generate dal computer. C'è anche da pren-

dere in considerazione applicazioni di realtà aumentata che richiedono la rimozione di oggetti reali dall'ambiente, che sono più comunemente chiamate realtà mediata o diminuita, oltre all'aggiunta di oggetti virtuali [6]. In effetti, rimuovere oggetti dal mondo reale corrisponde a coprire l'oggetto con informazioni virtuali che corrispondono allo sfondo per dare all'utente l'impressione che l'oggetto non ci sia. Essa differisce dalla Realtà virtuale, in cui l'utente viene immerso completamente in un ambiente sintetico, isolato dal mondo reale, come se si trovasse in un mondo digitalizzato. Al contrario, con l'uso di questi dispositivi si riesce a vedere il mondo reale, con oggetti virtuali che sono sovrapposti o combinati ad esso. Pertanto, si può dire che l'AR, a differenza della VR, integra la realtà al posto di sostituirla completamente.

Microsoft HoloLens è un esempio di dispostivo HMD per la realtà aumentata, la cui prima versione è stata sviluppata da Microsoft nel 2016. Si tratta di un dispositivo indossabile che consente agli utenti di interagire con l'ambiente utilizzando proiezioni virtuali stimolando al contempo i sensi nel loro insieme.

Figura 3.2: Microsoft HoloLens: un visore per Realtà Aumentata

HoloLens è costituito da un paio di occhiali olografici prospettici, ovvero permette di vedere oggetti tridimensionali virtuali sovrapposti nel mondo reale includono un'unità di elaborazione centrale, un'unità di elaborazione grafica, per generare e renderizzare immagini e animazioni degli ologrammi e un'unità di elaborazione olografica, in grado di gestire e riconoscere l'ambiente circostante e di collocare gli ologrammi rispetto al mondo reale . HoloLens è dotato di una vasta gamma di sensori ottici, con due su ciascun lato per rilevare l'ambiente periferico, una fotocamera principale rivolta verso il basso per rilevare i movimenti delle mani, e altoparlanti specializzati che simulano il suono proveniente da qualsiasi punto della stanza. HoloLens include anche diversi microfoni, una fotocamera HD, un sensore di luce ambientale e una "Unità di Elaborazione Olografica" progettata per gestire i dati che provengono dall'utente e quelli dei sensori calcolando la posizione e la rotazione del visore [31]. Tutti questi elementi lavorano insieme per percepire l'orientamento spaziale dell'unità nella stanza, rilevare pareti e oggetti, e integrare gli ologrammi nell'ambiente. I dispositivi HoloLens sanno come posi-

zionare ologrammi in modo stabile e preciso tracciando gli utenti in uno spazio. Senza un tracciamento appropriato, il dispositivo non comprende l'ambiente o l'utente al suo interno. Gli ologrammi possono apparire nei posti sbagliati, non apparire sempre nello stesso punto o non apparire affatto [8].

3.2 Sfide per la protezione e la privacy nel metaverso

Il Metaverso presenta numerose sfide per il controllo degli accessi, essendo un vasto spazio virtuale interconnesso che comprende diverse piattaforme, applicazioni e contenuti generati dagli utenti. Questo intricato panorama, che integra regni fisici e digitali, interazioni in tempo reale ed esperienze immersive, richiede un'attenta considerazione dei meccanismi di controllo degli accessi. Una di queste sfide riguarda la necessità di mantenere l'equilibrio tra collaborazione aperta e creatività con l'impegno di garantire la sicurezza e la privacy. Il Metaverso promuove un ambiente in cui gli utenti sono incoraggiati a generare e condividere le proprie esperienze virtuali e tutte queste operazioni non sarebbero possibili senza la raccolta e l'ulteriore trattamento dei dati personali degli utenti. Nel metaverso vengono infatti raccolte un'ampia varietà e quantità di informazioni relative agli utenti e tale circostanza può comportare notevoli rischi per i loro diritti e libertà. La privacy è una preoccupazione fondamentale all'interno del Metaverso, a causa della sua natura interconnessa e comunitaria. Gli utenti si impegnano in interazioni sociali, condividono informazioni personali e partecipano a comunità virtuali, il che richiede solidi meccanismi di controllo degli accessi per affrontare i rischi della riservatezza [52]. I meccanismi di controllo degli accessi devono garantire che le informazioni personali condivise all'interno del Metaverso rimangano accessibili esclusivamente a individui o entità autorizzati. Un rischio legato alla privacy riguarda la sicurezza, che in questo contesto può compromettere l'intera vita digitale, inclusi *avatar*, risorse digitali e relazioni sociali. La creazione di un *avatar* richiede infatti la raccolta di una grande quantità di dati dell'utente, tra cui espressioni facciali, movimenti degli occhi e delle mani e varie caratteristiche biometriche. Questi ultimi però permettono di aprire la porta alla generazione di modelli iper-individuali, basati sui dati raccolti dagli utenti costruiti su tratti e caratteristiche, di cui, probabilmente, loro stessi non sono consapevoli. A questa mole di dati, si aggiungono tutte quelle informazioni che l'utente stesso (o meglio il suo *avatar*) dissemina all'interno del metaverso, acquistando beni, effettuando transazioni e comunicando con altri utenti, che andranno ad arricchire e personalizzare ulteriormente il suo profilo [3]. La protezione degli utenti quindi, deve essere fondamentale nel mondo virtuale, proprio come nel mondo reale.

Tale protezione può assumere diverse forme, ma quella più importante consiste nel fornire agli utenti livelli adeguati di privacy e sicurezza. Per aiutare a sviluppare un adeguato livello di sicurezza nel Metaverso e migliorare le sue caratteristiche in generale, viene consentito agli altri utenti di fare reclami e di segnalare se un altro partecipante ha agito in modo inappropriato o preoccupante. Infatti, alcune aziende stanno sviluppando dei modi per proteggere gli utenti da comportamenti pericolosi che potrebbero turbare le persone. Un esempio di ciò è stata l'introduzione della funzione *Personal Boundary* in Horizon Worlds, un videogioco gratuito in cui gli utenti possono esplorare mondi creati da altri giocatori, in cui Meta è stata costretta, dopo numerose segnalazioni, soprattutto di donne i cui *avatar* hanno subito molestie durante l'utilizzo delle piattaforme, ad aggiungere dei "confini personali", impedendo così agli *avatar* di entrare in contatto ravvicinato tra loro [9].

Capitolo 4

Interazione tra Metaverso e Sanità

4.1 Integrazione del Metaverso sul Sistema sanitario

L'integrazione del metaverso nel sistema sanitario si prospetta come un potenziale strumento rivoluzionario per l'erogazione dei servizi sanitari, poiché offre un ambiente virtuale immersivo dove le persone possono interagire tramite avatar, abbattendo le barriere della realtà fisica e rendendo possibile l'interazione tra utenti e tecnologia in modo immersivo. Questa interazione potrebbe apportare numerosi benefici in ambito sanitario, come la riduzione dei costi, la possibilità di fornire assistenza a distanza e l'offerta di un'esperienza utente più coinvolgente e interattiva. Nel settore sanitario, la digitalizzazione attraverso il metaverso è già oggetto di investimenti e sperimentazioni. Esistono piattaforme di formazione medica virtuale che utilizzano modelli del corpo umano in VR per scopi di addestramento chirurgico, evitando così l'uso di pazienti reali o manichini. Inoltre, dispositivi VR vengono impiegati in programmi di riabilitazione cognitiva e fisica per pazienti con lesioni cerebrali e in percorsi di trattamento della salute mentale. Il metaverso viene inoltre considerato per applicazioni future in chirurgia, come la virtualizzazione dell'anatomia del paziente, che permette ai chirurghi di pianificare con precisione l'intervento e monitorare informazioni aggiuntive direttamente in loco. Queste applicazioni lasciano intravedere un futuro in cui il metaverso non solo faciliterà la telemedicina e l'assistenza sanitaria remota, ma sarà anche in grado di fornire un'esperienza immersiva per la diagnosi, il trattamento e la riabilitazione, migliorando l'accesso ai servizi e il livello di coinvolgimento dei pazienti [33]. Inoltre, il metaverso può facilitare la medicina di precisione e avanzare la ricerca attraverso i *digital twin*, ovvero repliche digitali dettagliate degli esseri umani nel mondo virtuale. Questi gemelli digitali, che riflettono caratteristiche fisiologiche, psicologiche e farmacologiche individuali, consentono esperimenti scientifici simulati nell'am-

bito della medicina predittiva per anticipare come i corpi possano reagire in diversi scenari futuri [48]. Sebbene l'adozione del metaverso in sanità sia ancora agli albori, alcune soluzioni già esistenti, come XRHealth, HoloAnatomy Software Suite e SnowWorld [38][51][55], dimostrano le sue applicazioni concrete. XRHealth, ad esempio, consente ai pazienti di usufruire di terapie in VR in modo interattivo e coinvolgente, mentre HoloAnatomy offre esperienze di apprendimento in realtà mista per gli studenti di medicina. SnowWorld, infine, utilizza la realtà virtuale per ridurre il dolore dei pazienti ustionati, sfruttando il potere di distrazione della VR per diminuire la percezione del dolore. Un altro progetto è Bravemind, della University of Southern California, che utilizza la VR per il trattamento dello stress post-traumatico. La terapia di esposizione alla realtà virtuale permette ai pazienti di affrontare traumi in ambienti virtuali controllati, facilitando il recupero attraverso la simulazione di scenari reali e rilevanti per la loro terapia [23]. Easy Heights, invece, impiega la VR per supportare le persone con acrofobia, permettendo un'esposizione graduale e sicura alle altezze, migliorando progressivamente la capacità di affrontare la paura. La gradualità e il controllo dell'ambiente simulato aiutano i pazienti a superare il disagio legato alla paura dell'altezza [30]. Un esempio di struttura ospedaliera nel metaverso è il Medcare Women and Children Hospital di Dubai, gestito da Aster DM Healthcare negli Emirati Arabi Uniti [19]. Questa struttura punta a ricreare un ospedale virtuale su larga scala, accessibile da qualsiasi luogo tramite un visore VR, per offrire esperienze di assistenza sanitaria a distanza. Nonostante l'idea sia ambiziosa e richieda modelli sanitari e di business nuovi e adattati, Medcare mira a diventare un punto di riferimento globale nel metaverso, con l'obiettivo di offrire esperienze sanitarie virtuali paragonabili, o addirittura superiori, a quelle fisiche [21].

A livello internazionale, l'adozione del metaverso in sanità è in fase avanzata, con molte applicazioni commerciali che, pur non rappresentando ancora il metaverso sanitario pienamente sviluppato, sfruttano VR e AR per migliorare l'esperienza medico-paziente. Anche se la vera essenza del metaverso in sanità richiederà forse ancora anni per affermarsi, le soluzioni e le tecnologie attuali offrono già un'assistenza sanitaria avanzata che permette a pazienti e professionisti di interagire in ambienti virtuali, abbattendo le distanze geografiche. In Italia invece, l'adozione del metaverso in sanità è prevalentemente sperimentale, ma esistono progetti e infrastrutture tecnologiche che potrebbero portare a risultati concreti in futuro. Nonostante le sfide in termini di protezione dei dati, le basi per un sistema sanitario digitale accessibile e avanzato sembrano già poste. Il progetto dell'Azienda ospedaliero-universitaria (AOU) di Cagliari prevede l'integrazione del metaverso all'interno del sistema sanitario, con l'obiettivo di creare un "ospedale nel metaverso" che superi le barriere fisiche e consenta l'erogazione di

servizi sanitari a distanza. Nella prima fase, l'iniziativa si focalizza sull'Ufficio Relazioni con il Pubblico (URP), offrendo ai cittadini la possibilità di accedervi virtualmente tramite PC, tablet, telefono o smart TV, per interagire con un operatore reale e ottenere informazioni e assistenza. Questo ambiente digitale consente non solo di interagire con l'URP, ma anche di prenotare visite, pagare servizi, ordinare farmaci e accedere ad altri servizi sanitari, tutto tramite piattaforme virtuali. La seconda fase del progetto mira a espandere l'uso del metaverso alle strutture sanitarie stesse, consentendo ai cittadini di effettuare alcuni tipi di visite ed esami a distanza, replicando l'esperienza di presenza fisica da remoto. L'adozione del metaverso nel contesto sanitario rappresenta un passo importante verso una sanità digitale più accessibile e diffusa, con il potenziale di migliorare sensibilmente l'efficienza e la qualità dei servizi offerti [45].

4.2 Applicazioni Pratiche sul Metaverso

Le applicazioni pratiche del metaverso in sanità si inseriscono in una nuova "Dimensione" digitale, orientata a ripensare i modelli di erogazione dell'assistenza sanitaria attraverso tecnologie innovative, piattaforme digitali e la gestione di dati in chiave multidisciplinare. L'obiettivo principale è permettere ai professionisti sanitari di andare oltre la semplice adozione di strumenti tecnologici isolati, sviluppando una comprensione integrata e sistemica che li abiliti a creare modelli assistenziali digitali avanzati. Questo approccio punta a evitare che la sanità digitale si riduca a un semplice aggiornamento della sanità elettronica tradizionale, dove spesso le tecnologie erano introdotte senza modificare significativamente i processi di assistenza. In questo contesto, le applicazioni pratiche del metaverso e delle altre tecnologie digitali fungono da ingredienti in grado di innovare profondamente la gestione e l'organizzazione dei servizi sanitari. Esse richiedono, infatti, che i professionisti possiedano competenze nei modelli di *delivery* sanitario (*Delivery models skills*) per progettare, gestire e organizzare i nuovi servizi sanitari digitali in modo efficace. In sintesi, l'utilizzo del metaverso e delle applicazioni digitali in sanità mira a fornire ai professionisti le conoscenze necessarie per un approccio sistemico, consentendo loro di combinare strategicamente vari elementi tecnologici e organizzativi per ottenere un servizio sanitario digitale trasformativo e realmente innovativo.

4.2.1 Formazione medica e simulazione immersive

La formazione medica attraverso simulazioni immersive è una metodologia educativa avanzata che mira a migliorare la qualità e l'efficacia dell'assistenza clinica, potenziando le competenze

professionali dei sanitari e promuovendo l'eccellenza nelle cure. Questa metodologia va oltre la mera tecnologia: non si limita a offrire strumenti, ma propone un approccio didattico completo per sviluppare abilità cliniche, lavoro di squadra e capacità di comunicazione.

Il metodo delle simulazioni viene applicato per standardizzare la formazione, seguire linee guida basate su evidenze e raggiungere obiettivi clinici specifici. Più che una novità tecnica, rappresenta un cambiamento culturale nel modo in cui si considera la formazione, in cui si passa dall'attenzione su ciò che la simulazione permette di fare a un focus su come sfruttarla per migliorare la cura della persona. Nonostante l'accesso a programmi di simulazione resti in parte limitato e dipendente dalle risorse delle istituzioni, il suo uso è in crescita, portando un contributo fondamentale allo sviluppo delle competenze sanitarie [13].

Questi programmi hanno lo scopo principale è ricreare ambienti di cura realistici che consentano ai professionisti sanitari di apprendere procedure diagnostiche e terapeutiche, ripetere processi, prendere decisioni, e migliorare la sicurezza delle pratiche cliniche, soprattutto in attività con elevati rischi di errore. Questa rappresentazione interattiva e virtuale di situazioni mediche reali si rivela uno strumento pedagogico efficace che supporta una vasta gamma di campi formativi, inclusa l'economia sanitaria, e risponde a esigenze di sicurezza e precisione. L'uso della simulazione come strategia formativa per sviluppare, mantenere e aggiornare le competenze del personale sanitario deriva dall'idea originaria dei primi simulatori di volo sviluppati per gestire situazioni di emergenza in aviazione. Oggi, molte istituzioni all'estero richiedono la documentazione di questo addestramento, mentre i programmi di simulazione infermieristica fanno parte integrante del curriculum in alcuni paesi e vengono gestiti da personale infermieristico, riconoscendo così il valore della simulazione come componente fondamentale della formazione sanitaria.

La simulazione chirurgica è stata utilizzata in modo iterativo dai tirocinanti per la formazione sulle competenze in più discipline grazie a un ambiente di apprendimento che mitiga i danni al paziente. Sebbene la formazione su cadaveri sia la modalità di simulazione standard consolidata da tempo, il suo utilizzo è limitato da costi elevati, scarsa accessibilità, stati non patologici e considerazioni etiche. I simulatori di Realtà Virtuale sono stati successivamente introdotti negli anni '90 e in poi come tentativo di ampliare l'interattività dell'utente e aumentare la fedeltà. Le metriche delle prestazioni VR hanno consentito ai tirocinanti di identificare i propri errori e individuare i punti deboli. Pertanto, i parametri di apprendimento VR potrebbero essere adattati alle esigenze dei tirocinanti, in modo che possano sviluppare competenze chiave e aumentare l'esposizione a un'ampia varietà di casi chirurgici comuni e a basso volume. Rispetto alla formazione tradizionale, la formazione VR ha migliorato le pre-

stazioni oggettive in sala operatoria, ridotto la durata dell'operazione e abbassato il numero di errori intraoperatori, consentendo l'immersione in un ambiente in grado di simulare gli stimoli sensoriali presenti in sala operatoria [29].

Secondo uno studio condotto dalla University of Central Florida College of Medicine, sono stati analizzati gli effetti delle tecniche di apprendimento attivo utilizzando la realtà virtuale per migliorare le conoscenze degli studenti di medicina con limitate esperienze operative pratiche confrontandolo agli strumenti di apprendimento più passivi come i video. Ad ogni studente è stato somministrato un sondaggio post-intervento per ottenere feedback e interpretazioni soggettive dell'esperienza di apprendimento. I risultati dello studio hanno mostrato che la VR ha prodotto una maggiore fiducia nella capacità di riprodurre i passaggi della procedura e ha avuto una maggiore utilità come strategia di apprendimento rispetto al metodo di apprendimento video. Tuttavia, i soggetti ritengono anche che il metodo di apprendimento video passivo sia più semplice da utilizzare e che l'integrazione di entrambi i metodi sia efficace per portare un miglioramento nell'apprendimento. In definitiva si può dire che la formazione medica sta attraversando una trasformazione significativa grazie all'integrazione di tecnologie immersive. Queste innovazioni offrono esperienze pratiche e coinvolgenti, migliorando l'apprendimento degli studenti e la preparazione dei professionisti sanitari. Le simulazioni immersive forniscono un ambiente sicuro per l'apprendimento, consentendo agli studenti di eseguire procedure mediche in un contesto protetto, il che riduce il rischio di errori potenzialmente dannosi per i pazienti reali. Inoltre, queste tecnologie offrono l'opportunità di affrontare una vasta gamma di casi clinici, compresi quelli rari o complessi, che potrebbero non essere facilmente accessibili nella formazione tradizionale, ampliando così le competenze e la preparazione degli studenti. Infine, le simulazioni permettono di ripetere le procedure più volte, offrendo feedback immediato, un aspetto cruciale per perfezionare le abilità pratiche e accrescere la fiducia degli studenti.

4.2.2 Telemedicina immersiva

L'interazione tra il metaverso e la sanità sta aprendo nuove frontiere nella telemedicina, trasformando la modalità di erogazione delle cure attraverso un'esperienza immersiva. Questa modalità può portare alla nascita della "telemedicina immersiva", ossia all'erogazione di cure a distanza in modo realistico e coinvolgente [1]. La telemedicina immersiva non si limita alla mera comunicazione tra medico e paziente, ma replica la presenza fisica all'interno di un ambiente virtuale condiviso. Per esempio, un paziente può interagire con l'avatar del medico e

discutere dettagli della propria condizione, con il supporto di immagini e video tridimensionali che rappresentano gli aspetti clinici rilevanti. Allo stesso modo, il medico può avvalersi di strumenti virtuali per simulare interventi diagnostici o per effettuare controlli a distanza, che uniscono visualizzazione grafica e dati in tempo reale. Ciò permette di creare simulazioni della situazione clinica offrendo un'esperienza sensoriale che riduce la distanza psicologica e migliora l'efficacia comunicativa rispetto alla telemedicina tradizionale [43]. Inoltre, l'integrazione del metaverso nell'ambito sanitario si rivela utile per lo sviluppo di programmi di riabilitazione fisica e mentale. Tramite l'utilizzo di *avatar* e ambienti virtuali, i pazienti possono esercitarsi in una "palestra virtuale", seguiti e supportati a distanza da un terapeuta che monitora i loro progressi in tempo reale. In situazioni di emergenza, è anche possibile effettuare teleconsulti di gruppo in un ambiente virtuale condiviso, dove gli specialisti lavorano insieme per prendere decisioni rapide e coordinate. Tuttavia, l'adozione di queste tecnologie richiede il superamento di alcune barriere, tra cui la necessità di sviluppare infrastrutture adeguate e standard di sicurezza per la tutela dei dati sensibili. Inoltre, la trasformazione digitale comporta la necessità di formare sia i professionisti sanitari sia i pazienti, affinché possano utilizzare queste nuove tecnologie in modo consapevole e sicuro. L'interazione tra metaverso e sanità rappresenta dunque un passaggio significativo verso una medicina sempre più personalizzata e accessibile, che sfrutta le potenzialità della tecnologia per migliorare la qualità delle cure e ridurre le disuguaglianze di accesso ai servizi sanitari [1].

Questo tipo di telemedicina è particolarmente utile per la gestione dei pazienti cronici, anziani o con mobilità limitata, che, tramite queste nuove tecnologie, possono accedere alle cure direttamente da casa. La telemedicina immersiva permette ai pazienti di partecipare attivamente a sessioni di riabilitazione, monitoraggio e assistenza sanitaria senza recarsi in strutture ospedaliere, come si può notare, ad esempio, nel caso del progetto di teleriabilitazione dedicato ai pazienti affetti da sclerosi multipla, un percorso di terapia e cura presso la clinica di Villa Adria di Ancona [44]. La sclerosi multipla è una malattia che causa la rottura della copertura protettiva dei nervi e può causare intorpidimento, debolezza, difficoltà a camminare, cambiamenti della vista e altri sintomi. Alcune persone affette da tale infermità perdono la capacità di camminare da sole o di muoversi del tutto. Non esiste una cura per la sclerosi multipla, tuttavia, esistono trattamenti per aiutare ad accelerare la ripresa dagli attacchi, rallentare il corso della malattia e gestire i sintomi. Questo programma di teleriabilitazione utilizza un dispositivo chiamato "ReaL bVR",basato sulla realtà virtuale. Questo può sembrare simile ai visori di realtà virtuale ma, diversamente da questi ultimi, è configurato con appositi software medicali che, affiancati a piattaforme dedicata alla creazione del piano di riabilitazione personalizzato

del paziente, riescono a raccogliere dati e feedback sull'efficacia delle sedute. ReLabVR consente di svolgere esercizi fisici terapeutici in modalità di intrattenimento, basandosi sul paradigma dei neuroni a specchio e dell'intelligenza artificiale, per favorire il recupero motorio e proponendo adattamenti in tempo reale aumentando o diminuendo i progressi in base alle capacità del paziente. Questo dispositivo è di gran supporto anche per persone affette da questa malattia offrendo la possibilità di svolgere a casa un percorso di riabilitazione personalizzabile, in integrazione a quello di ordinario in struttura. Questa combinazione si rivela quindi un'opportunità per rendere l'assistenza sanitaria più accessibile e inclusiva, con benefici evidenti in termini di personalizzazione delle cure, prevenzione, e riduzione delle disuguaglianze di accesso ai servizi sanitari.

4.3 IoMT nel Metaverso

Nel contesto del Metaverso, l'*Internet of Medical Things* rappresenta una componente chiave per trasformare l'assistenza sanitaria, grazie alla sua capacità di integrare dispositivi medici connessi in ambienti virtuali. Nel settore sanitario, il monitoraggio remoto dei pazienti è l'applicazione più diffusa dell'IoMT abilitato dal Metaverso. I pazienti che non sono fisicamente presenti in ospedale o in clinica possono avere i loro parametri vitali, come la frequenza cardiaca, la pressione sanguigna, la temperatura e altro, raccolti automaticamente dai dispositivi IoMT e visualizzati nell'ambiente 3D del Metaverso. Questo elimina la necessità per le persone di viaggiare per incontrare i loro professionisti sanitari o raccogliere i dati vitali della loro salute.

Con la possibilità di connettere dispositivi come wearable, pacemaker intelligenti o strumenti per il tracciamento dei farmaci, l'IoMT nel Metaverso può favorire un'assistenza sanitaria più efficiente e accessibile, riducendo tempi e costi. L'approccio strategico e il coinvolgimento attivo di pazienti e operatori sono fondamentali per massimizzare i benefici dell'IoMT, che promette di ridefinire il rapporto medico-paziente, rendendo quest'ultimo sempre più protagonista nella gestione della propria salute [42].

Un'ulteriore applicazione consiste nel supporto per il trattamento delle malattie croniche-come la terapia per il disturbo da stress post-traumatico (PTSD). La realtà virtuale, in questo contesto, facilita il coinvolgimento emotivo dei pazienti con PTSD durante le esposizioni ai molteplici stimoli sensoriali resi possibili dall'ambiente virtuale. Il senso di presenza fornito dall'ambiente virtuale, essendo ricco di stimoli sensoriali, facilita l'elaborazione emotiva dei ricordi legati al trauma. L'integrazione con dispositivi IoMT permette di raccogliere e ana-

lizzare i dati in tempo reale ottimizzando il trattamento. L'IoMT consente così una maggiore accuratezza procedurale negli studi clinici garantendo un tipo di esposizione personalizzata per tutti i pazienti [18].

Capitolo 5

Caso Studio sull'Uso di BCI-VR per la Riabilitazione Motoria di un Paziente con Ictus Cronico

Le interfacce cervello-computer (*Brain-Computer Interface* (BCI)) permettono oggi di inviare informazioni sulle onde cerebrali a dispositivi esterni, consentendo di attivare strumenti senza l'uso del movimento fisico. Questa tecnologia, in costante sviluppo da alcuni decenni, trova applicazione in molti settori come il supporto alla riabilitazione e il controllo di dispositivi per persone con difficoltà motorie. La ricerca e lo sviluppo nelle BCI stanno rapidamente trasformando il concetto, una volta fantascientifico, di fusione tra mente umana e macchina in una realtà tangibile. Attraverso software sofisticati, i segnali cerebrali vengono rilevati e tradotti in comandi per attivare apparecchi esterni, permettendo agli utenti di compiere azioni con il solo pensiero. Inoltre, offrono la possibilità di agire direttamente sull'attività cerebrale, modulandola per trattamenti specifici, come nel caso di patologie neurodegenerative, o per migliorare aspetti cognitivi, come la concentrazione e il rilassamento. La precisione di queste tecnologie aumenta con sistemi che interagiscono direttamente con il cervello, come la stimolazione intracranica profonda, che utilizza elettrodi impiantati e necessita di una procedura chirurgica per posizionarli all'interno del cranio, sulla superficie del cervello oppure all'interno del cervello, rilevando l'attività cerebrale senza interferenze esterne. Sebbene queste tecnologie siano nate per scopi clinici, il loro impiego si estende anche a settori non medici; si ipotizza, ad esempio, un loro utilizzo per fini educativi o per riabilitazione comportamentale [49]. Ad oggi, tuttavia, la ricerca sulle BCI punta a sviluppare soluzioni non invasive, come dispositivi dotati di elettrodi indossabili con un applicazione sul cuoio capelluto che ne incrementano la

facilità di utilizzo rispetto ai sistemi precedenti. L'evoluzione delle BCI porta a considerare il loro utilizzo come principale canale di accesso al Metaverso: grazie alla possibilità di interfacciarsi direttamente con il cervello, si prospetta un'esperienza totalmente immersiva in cui il corpo può "dissolversi" nella realtà virtuale. La fusione di BCI con la realtà Virtuale (BCI-VR) consente un'ampia gamma di esperienze in cui i partecipanti possono controllare vari aspetti del loro ambiente, in modo esplicito o implicito, utilizzando solo immagini mentali. Questo sistema si rivela utile non solo per trasmettere comandi, ma anche per ricevere impulsi che attivino percezioni tattili o sensoriali. Per esempio, le BCI potrebbero simulare la sensazione del contatto fisico con un oggetto virtuale o persino evocare stimoli olfattivi, come il profumo di un ambiente digitale. Sebbene molte delle applicazioni possano sembrare futuristiche, l'interesse commerciale e le opportunità di sviluppo indicano che il progresso in questo campo sarà rapido, con impatti significativi sia nell'intrattenimento che nell'assistenza sanitaria digitale [16].

Infatti, in alcuni approcci riabilitativi, vengono analizzati i comportamenti cognitivi dei pazienti con ictus impiegando realtà virtuale e aumentata per monitorare e controllare movimenti di *avatar*. Tali sistemi consentono di creare simulazioni che integrano arti lesionati e sani, promuovendo così la riabilitazione e la classificazione di immaginazione motoria (MI), una tecnica per "allenare" gli utenti ad immaginare un atto motorio volontario come il movimento di braccio, senza la sua reale esecuzione.

Il caso studio che verrà presentato esaminerà l'efficacia di un sistema BCI-VR basato su l'elettroencefalogramma (EEG), un esame strumentale non invasivo che si effettua ponendo gli elettrodi sulla testa in modo da indagare la funzionalità del cervello attraverso l'analisi e la registrazione della sua attività elettrica. Più nello specifico, il caso di studio presenta l'utilizzo della MI per la riabilitazione degli arti superiori post-ictus [53].

È stato reclutato un paziente maschio di 60 anni con ictus cronico a seguito di infarto cerebrale avvenuto 10 mesi prima. Nel momento del ricovero il paziente assumeva farmaci per il controllo della pressione sanguigna, per la glicemia e per il miglioramento del sonno, oltre a essere sottoposto a fisioterapia e terapia riabilitativa per supportare il recupero motorio. La terapia consisteva in un intervento di 3 settimane con NeuRow, un ambiente VR immersivo per l'allenamento di immagini motorie con l'uso di BCI. NeuRow è un gioco di canottaggio con l'obiettivo principale di colpire quante più bandiere possibili in un tempo fisso utilizzando una rappresentazione di un *avatar* incarnata delle braccia del paziente. Lo studio prevedeva 10 sessioni, ciascuno di 15 minuti di esposizione all'allenamento VR per sessione [36].

NeuRow può essere personalizzato con diverse impostazioni, a seconda della configura-

zione sperimentale e della modalità BCI. NeuRow ha due modalità operative: allenamento MI e il controllo *online*.

Figura 5.1: Paziente con visore VR e dispositivo vibrotattile durante l'esecuzione dell'esercizio su NeuRow.

Durante l'allenamento, la freccia di navigazione e i bersagli vengono rimossi per focalizzare l'attenzione dell'utente solo sull'attività. Durante la modalità *online* invece, il comportamento della barca può essere modificato impostando la velocità di rotta, la velocità di virata e l'angolo di taglio di 45°, riferendosi a quanto la barca può essere fuori rotta rispetto alla bandiera del bersaglio prima di fermarsi.

Per fornire un feedback visivo efficace, è stato utilizzato l'Oculus Rift DK1. Questo dispositivo è costituito da un display a cristalli liquidi LCD da 7 pollici (1280 × 800), con frequenza di aggiornamento da 60Hz, un campo visivo (FOV) di 110°. Per quanto riguarda il tracciamento è stato utilizzato un giroscopio in grado di misurare le variazioni della velocità angolare (gradi/s), un accelerometro utilizzato per misurare l'accelerazione (m/s) e infine il magnetometro sfruttato per capire l'orientamento del dispositivo basandosi sul campo magnetico della terra, con una frequenza di tracciamento di 1000 Hz.

Inoltre, viene aggiunto il feedback tattile poiché l'integrazione di questo tipo di feedback può rivelarsi efficace in termini di apprendimento motorio. Nello specifico in questo studio, sono stati utilizzati dispositivi vibrotattili in cui il motore vibrante è montato su tubi cilindrici con 12 cm di lunghezza e 3 cm di diametro che fungevano da oggetti di presa per indurre l'illusione di movimento durante l'attività BCI. Oltre a questo è stato integrato il feedback uditivo che ha coinvolto due tipi di suoni. I suoni di sottofondo e ambientali dell'acqua inclusi i movimenti di canottaggio per un maggiore realismo e suoni di eventi per quando il giocatore otteneva un punteggio catturando una bandiera.

Per l'acquisizione dei dati cerebrali è stato utilizzato il sistema Enobio 8. Enobio è un sensore wireless indossabile con 8 canali EEG per la registrazione e la visualizzazione dell'attività cerebrale tramite elettroencefalogramma. Il sistema EEG è stato collegato tramite bluetooth a un

computer desktop dedicato, responsabile dell'elaborazione e della classificazione del segnale EEG. I dati sono stati trasmessi tramite il protocollo UDP.

Figura 5.2: Dispositivo Enobio 8: un sensore EEG wireless mobile con 8 canali.

I risultati sono stati valutati utilizzando diverse scale cliniche per misurare e quantificare diversi aspetti della salute del paziente come la capacità cognitiva, la funzione motoria o il livello di dolore. Questi dati sono stati raccolti in tre periodi diversi: prima del trattamento, dopo il trattamento, e durante il *follow-up* dopo un mese.

Le scale cliniche considerate e i relativi risultati sono riportati di seguito:

- Scala Fugl-Meyer (FMA): è una scala di valutazione per l'ictus progettata per valutare il funzionamento motorio, l'equilibrio, la sensazione e il funzionamento articolare nei pazienti post-ictus [15]. Ha un punteggio massimo di 66 punti. Il paziente ha mostrato un miglioramento di 9 punti dopo l'intervento, con un ulteriore miglioramento di 4 dopo un mese .

- Modified Ashworth Scale (MAS): questa scala valuta la spasticità muscolare, ovvero l'irrigidimento della muscolatura. Il test viene eseguito estendendo prima l'arto del paziente da una posizione di massima flessione possibile alla massima estensione possibile [40]. Successivamente, la scala di Ashworth modificata viene valutata mentre si passa dall'estensione alla flessione. Questa scava la da 0 a 4 e il paziente ha mostrato un aumento temporaneo nel periodo post intervento. Tuttavia, nel mese successivo è tornato

allo stesso punteggio del periodo prima del trattamento, suggerendo una stabilizzazione muscolare nel tempo.

- Montreal Cognitive Assessment (MoCA): è uno strumento per valutare l'efficienza cognitiva, con un punteggio compreso tra 0 e 30 (un punteggio superiore a 26 è considerato normale) [41]. Misura le seguenti aree cognitive: abilità visive, funzioni esecutive, attenzione, concentrazione, calcolo, linguaggio, astrazione, memoria e orientamento. In questo caso, il paziente ha avuto un punteggio basso dovuto ai danni cerebrali che influenzano le sue funzioni cognitive, ma nonostante questo è stato in grado di completare il test e partecipare attivamente all'intervento con il sistema BCI-VR. Questo suggerisce che il sistema BCI-VR potrebbe essere adatto e utilizzabile anche da persone con compromissioni cognitive moderate, ampliando così il suo potenziale utilizzo clinico in popolazioni con problemi neurologici o deficit cognitivi.

- Vividness of Movement Imagery Questionnaire (VMIQ2): è uno strumento che valuta la capacità del partecipante di eseguire movimenti immaginati da una prospettiva esterna (EVI). In seguito al trattamento BCI il paziente ha mostrato un aumento del punteggio EVI. Questo ci suggerisce che ci sia stato un impatto positivo sulla capacità di immaginare se stesso mentre eseguiva i movimenti.

Tenendo conto di tali risultati si può concludere che la combinazione di MI-BCI con VR può rafforzare l'attivazione delle aree cerebrali motorie, promuovendo l'illusione del movimento fisico e il senso di incarnazione dato dal sistema di VR, e quindi coinvolgendo ulteriormente reti neurali specifiche e favorendo i cambiamenti neuroplastici desiderati, ovvero la capacità del cervello di modificarsi, dal punto di vista strutturale e funzionale, in risposta all'esperienza. In conclusione, si può dire che questi risultati mostrano miglioramenti e recuperi per quanto riguarda la funzione motoria. Nello specifico la Scala Fugl-Meyer (FMA) ha mostrato un aumento stabile della funzionalità motoria in tutte le valutazioni, suggerendo che il paziente coinvolto ha migliorato la capacità di pianificare il movimento. Si può dire che un allenamento BCI-VR immersivo multimodale possa aver migliorato gli effetti di riabilitazione che potrebbe eventualmente riflettersi in termini di miglioramento della funzionalità motoria.

Capitolo 6

Conclusioni

L'obiettivo di questo elaborato consiste nell'analizzare il tema del metaverso e il ruolo delle nuove tecnologie nel settore sanitario. La scelta di tale settore non è stata casuale, la motivazione di fondo risiede nella personale convinzione che stanno emergendo soluzioni promettenti, in grado di rivoluzionare il modo in cui viene erogata e percepita l'assistenza sanitaria. Si è partiti da un approfondimento generale del tema dello smart health care e da un'analisi della sua evoluzione, che ha portato all'adozione di tecnologie sempre più innovative, migliorando l'assistenza sanitaria con dispositivi immersivi di Realtà Virtuale e Aumentata, per consentire agli utenti di integrare spazi e ambienti digitalizzati anche nel settore sanitario. Il percorso dell'elaborato è stato arricchito con vari casi pratici sull'utilizzo del metaverso: XRHealth, HoloAnatomy Software Suite e SnowWorld, che dimostrano le applicazioni pratiche di questi dispositivi alla realtà odierna. A tal proposito ci siamo soffermati in particolare nell'ultimo capitolo, sull'utilizzo della Brain-Computer Interface con la Realtà Virtuale, evidenziando il suo contributo per la riabilitazione motoria dei pazienti. Nella tesi sono stati poi approfonditi metodi innovativi adottati nella sanità per offrire nuove strade e per migliorare l'assistenza ai pazienti potenziando l'accesso ai servizi sanitari. L'utilizzo di tecnologie, anche se ancora in piena fase di sviluppo, si è dimostrato un importantissima risorsa che permette di fornire un'aspettativa di vita migliore per le persone con problemi di salute, aumentando l'efficacia dei processi clinici e della gestione delle risorse. Tuttavia, il progresso sanitario non è esente da sfide. Problemi come la privacy, l'interoperabilità tra i vari dispositivi, la mancanza di comunicazione verbale e l'alfabetizzazione digitale possono portare ad incomprensioni rischiando di non sfruttare appieno i progressi raggiunti. In conclusione, l'adozione del metaverso all'interno del settore sanitario è in grado di facilitare il monitoraggio continuo e l'assistenza personalizzata. I dispositivi indossabili e i sensori raccolgono dati sanitari in tempo reale

consentendo di integrarli in piattaforme sanitarie virtuali. Questa integrazione consente agli operatori sanitari di monitorare i pazienti da remoto per tracciare la progressione della malattia e intervenire tempestivamente quando necessario. Per una sanità inclusiva, efficiente ed inquadrata sul paziente questa è una direzione molto importante che creerà nuove possibilità per una migliore assistenza sanitaria globale.

Acronimi

IoMT *Internet of Medical Things*

RFID *Radio Frequency IDentification*

NLP *Natural Language Processing*

IoT *Internet of Things*

SoA *Service-Oriented Architecture*

IoT *Internet of Things*

SAS *Smart Ambulance System*

C-ITS *Cooperative Intelligent Transport Systems*

XR Realtà Estesa

AR Realtà Aumentata

VR Realtà Virtuale

HMD *Head-Mounted Display*

MI immaginazione motoria

BCI *Brain-Computer Interface*

FOV campo visivo

Bibliografia

[1] AGENAS. Monitor, Telemedicina e Intelligenza Artificiale. *AGENAS*, 2021.

[2] Shams Forruque Ahmed, Md Sakib Bin Alam, Shaila Afrin, Sabiha Jannat Rafa, Nazifa Rafa, and Amir H Gandomi. Insights into internet of medical things (iomt): Data fusion, security issues and potential solutions. *Information Fusion*, 102:102060, 2024.

[3] Diritto al Digitale. Privacy e metaverso. *Diritto al Digitale*, 2022.

[4] Inas Al Khatib, Abdulrahim Shamayleh, and Malick Ndiaye. Healthcare and the internet of medical things: applications, trends, key challenges, and proposed resolutions. In *Informatics*, volume 11, page 47. MDPI, 2024.

[5] Rajkumar Buyya, Muhammad Imran Tariq, Valentina Emilia Balas, Guojun Wang, and Radu Prodan. *Security and Privacy Issues in Internet of Medical Things*. Academic Press, 2023.

[6] Julie Carmigniani, Borko Furht, Marco Anisetti, Paolo Ceravolo, Ernesto Damiani, and Misa Ivkovic. Augmented reality technologies, systems and applications. *Multimedia tools and applications*, 51:341–377, 2011.

[7] Android Central. What's new with the oculus quest 2 controllers. *Android Central*, 2024.

[8] Microsoft Docs. Environment considerations for hololens. *Microsoft*, 2024.

[9] Engadget. Meta quest's horizon worlds and horizon venues add personal boundary to curb harassment. *Engadget*, 2024.

[10] Eurostat. Are 570 000 deaths per year in the eu avoidable? *Eurostat Publications*, 2018. Accessed: 2024-10-09.

[11] FiberRoad. What is iomt? internet of medical things. *FiberRoad Resources*, 2024.

[12] Fiveable. Iot systems: Service-oriented architecture. 2024.

[13] FNOPI. LA FORMAZIONE IN SIMULAZIONE - “Raccomandazioni per una buona pratica”. *FNOPI Publications*, 2020.

[14] Bernard Fong, ACM Fong, and CK Li. Internet of things in smart ambulance and emergency medicine. *Internet of things A to Z: Technologies and applications*, pages 475–506, 2018.

[15] Axel R. Fugl-Meyer, Leif Jaasko, Ingrid Leyman, Sverker Olsson, and Sten Steglind. The post-stroke hemiplegic patient. 1. a method for evaluation of physical performance. *Scandinavian Journal of Rehabilitation Medicine*, 7(1):13–31, 1975.

[16] Stefano Fuselli. Metaverso e neurotecnologie: una ricognizione. *Journal of Ethics and Legal Technologies*, 5(2), 2023.

[17] Pradyumna Gokhale, Omkar Bhat, and Sagar Bhat. Introduction to iot. *International Advanced Research Journal in Science, Engineering and Technology*, 5(1):41–44, 2018.

[18] Raquel Gonçalves, Ana Lúcia Pedrozo, Evandro Silva Freire Coutinho, Ivan Figueira, and Paula Ventura. Efficacy of virtual reality exposure therapy in the treatment of ptsd: A systematic review. *PLOS ONE*, 7(12):1–7, 12 2012.

[19] Aster DM Healthcare. Medcare women & children hospital: Entering the metaverse in uae. *Aster DM Healthcare Official Website*, 2024.

[20] HealthSnap. Balancing digital innovation and human connection: The critical role of personal interaction in healthcare. *HealthSnap Blog*, 2023. Accessed: 2024-11-22.

[21] HealthTech360. Metaverso in sanità: software, applicazioni e soluzioni. *Digital Health*, 2022.

[22] Agnieszka Ignatowicz, Anne-Marie Slowther, Patrick Elder, Carol Bryce, Kathryn Hamilton, Caroline Huxley, Vera Forjaz, Jackie Sturt, and Frances Griffiths. Ethical implications of digital communication for the patient-clinician relationship: analysis of interviews with clinicians and young adults with long term conditions (the lync study). *BMC Medical Ethics*, 19:1–9, 2018.

[23] University of Southern California Institute for Creative Technologies. Bravemind vr exposure therapy: Virtual reality for trauma recovery. *ICT - USC Official Website*, 2024.

[24] Kasun Karunanayaka, Nurafiqah Johari, Surina Hariri, Hanis Camelia, Kevin Stanley Bielawski, and Adrian David Cheok. New thermal taste actuation technology for future multisensory virtual reality and internet. *IEEE transactions on visualization and computer graphics*, 24(4):1496–1505, 2018.

[25] Christos Kotronis, Ioannis Routis, Elena Politi, Mara Nikolaidou, George Dimitrakopoulos, Dimosthenis Anagnostopoulos, Abbes Amira, Faycal Bensaali, and Hamza Djelouat. Evaluating internet of medical things (iomt)-based systems from a human-centric perspective. *Internet of Things*, 8:100125, 2019.

[26] Yongming Li, Yiming Ma, Ying Wang, and Wenjia Hong. The adoption of smart health services by older adults in retirement communities: analysis with the technology acceptance model (tam). *Universal Access in the Information Society*, pages 1–17, 2024.

[27] Saskia Locke, Anthony Bashall, Sarah Al-Adely, John Moore, Anthony Wilson, and Gareth B Kitchen. Natural language processing in medicine: a review. *Trends in Anaesthesia and Critical Care*, 38:4–9, 2021.

[28] A.T. Maereg, A. Nagar, D. Reid, and E.L. Secco. Wearable vibrotactile haptic device for stiffness discrimination during virtual interactions. *Frontiers in Robotics and AI*, 4:42, 2017.

[29] Randi Q Mao, Lucy Lan, Jeffrey Kay, Ryan Lohre, Olufemi R Ayeni, Danny P Goel, et al. Immersive virtual reality for surgical training: a systematic review. *Journal of Surgical Research*, 268:40–58, 2021.

[30] Nature NPJ Digital Medicine. Easy heights: Using virtual reality for behavioral therapy. *NPJ Digital Medicine*, 2024.

[31] Microsoft. 7 things you should know about microsoft hololens. *Grand Valley State University*, 2024.

[32] Digital Mosaik. Oculus quest 2: La guida completa alla realtà virtuale. *Digital Mosaik Blog*, 2024.

[33] F. Muzj. Il metaverso quale nuova frontiera nell'erogazione dei servizi sanitari a distanza: quali interrogativi per la scienza giuridica? *Universi paralleli. I diritti costituzionali nel metaverso*, 2023.

[34] Stylianos Mystakidis. Metaverse. *Encyclopedia*, 2(1):486–497, 2022.

[35] Keshab Nath, Sourish Dhar, and Subhash Basishtha. Web 1.0 to web 3.0-evolution of the web and its various challenges. In *2014 International Conference on Reliability Optimization and Information Technology (ICROIT)*, pages 86–89. IEEE, 2014.

[36] NeuroRehabLab. Neurow online: Rowing vr for motor imagery training. *NeuroRehabLab Tools*, 2024.

[37] Polifarma Next. Anziani e digitale: Come e perché superare i limiti del digital divide. *Polifarma Next*, 2024.

[38] R&D World Online. Virtual snowworld helps burn victims cope with extreme pain. *R&D World Online*, 2024.

[39] Innovation Origins. Always a green light for ambulances thanks to smart traffic light system, n.d.

[40] Physio-Pedia. Modified ashworth scale. *Physio-Pedia*, n.d. Accessed: 2024-11-25.

[41] Physio-Pedia. Montreal cognitive assessment (moca). *Physio-Pedia*, n.d.

[42] Remo12. Sanità digitale, innovazione e intelligenza artificiale. che cosa è internet of medical things (iomt): come si fa e quali vantaggi porta alla sanità e ai cittadini. *Sanità Digitale*, 2022.

[43] Giuseppe Riva and Luciano Gamberini. Virtual reality in telemedicine. *Telemedicine Journal and e-Health*, 6(3):327–340, 2000.

[44] Stefano Rossi. Sclerosi multipla: una realtà virtuale immersiva per la teleriabilitazione. *IRCCS San Raffaele Roma - SSTefano*, 2021.

[45] C. Seazzu. AI e Metaverso. I progetti dell'Aou di Cagliari. *L'Intelligenza artificiale tra etica e applicazione*, 2024.

[46] Bharanidharan Shanmugam and Sami Azam. Risk assessment of heterogeneous iomt devices: A review. *Technologies*, 11(1):31, 2023.

[47] Jonathon Stewart, Juan Lu, Adrian Goudie, Glenn Arendts, Shiv Akarsh Meka, Sam Freeman, Katie Walker, Peter Sprivulis, Frank Sanfilippo, Mohammed Bennamoun, et al. Applications of natural language processing at emergency department triage: A narrative review. *PLoS One*, 18(12):e0279953, 2023.

[48] Fei Tao, Bin Xiao, Qinglin Qi, Jiangfeng Cheng, and Ping Ji. Digital twin modeling. *Journal of Manufacturing Systems*, 64:372–389, 2022.

[49] Tech4Future. Brain-computer interface e riabilitazione: Le applicazioni nel 2024. *Tech4Future*, 2024.

[50] Shuo Tian, Wenbo Yang, Jehane Michael Le Grange, Peng Wang, Wei Huang, and Zhewei Ye. Smart healthcare: making medical care more intelligent. *Global Health Journal*, 3(3):62–65, 2019.

[51] Case Western Reserve University. Holoanatomy software suite: Exploring human anatomy through mixed reality. *Case Western Reserve University*, 2024.

[52] Utsav Upadhyay, Alok Kumar, Gajanand Sharma, Ashok Kumar Saini, Varsha Arya, Akshat Gaurav, and Kwok Tai Chui. Mitigating risks in the cloud-based metaverse access control strategies and techniques. *International Journal of Cloud Applications and Computing (IJCAC)*, 14(1):1–30, 2024.

[53] Athanasios Vourvopoulos, Carolina Jorge, Rodolfo Abreu, Patrícia Figueiredo, Jean-Claude Fernandes, and Sergi Bermudez i Badia. Efficacy and brain imaging correlates of an immersive motor imagery bci-driven vr system for upper limb motor rehabilitation: A clinical case report. *Frontiers in human neuroscience*, 13:244, 2019.

[54] XRAILab. Hand tracking: The power in your hands. *XRAILab Blog*, 1(1):1–5, September 2024.

[55] XRHealth. Xrhealth: Virtual healthcare solutions in the metaverse. *XRHealth Official Website*, 2024.

[56] Gausiya Yasmeen, Nashra Javed, and Tasneem Ahmed. Interoperability: A challenge for iomt. *ECS Transactions*, 107(1):4459, 2022.

[57] Rui Zhang. Design of head mounted displays. *Retrieved at¡¿,(Dec. 12, 2007)*, 2007.

[58] Xinli Zhang, Yuchen Chen, Lailin Hu, and Youmei Wang. The metaverse in education: Definition, framework, features, potential applications, challenges, and future research topics. *Frontiers in Psychology*, 13:1016300, 2022.

[59] Binggui Zhou, Guanghua Yang, Zheng Shi, and Shaodan Ma. Natural language processing for smart healthcare. *IEEE Reviews in Biomedical Engineering*, 2022.