ALMA MATER STUDIORUM
UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

DIPARTIMENTO DI SCIENZE MEDICHE E CHIRURGICHE (DIMEC)

CORSO DI LAUREA IN

TECNICHE DI RADIOLOGIA MEDICA, PER IMMAGINI E RADIOTERAPIA

SGRT NEL TRATTAMENTO RADIANTE DEGLI ARTI SUPERIORI E INFERIORI: STUDIO COMPARATIVO RETROSPETTIVO PRESSO L'U.O. DI RADIOTERAPIA DEL POLICLINICO S.ORSOLA-MALPIGHI

Relatore

Prof. Silvia Cammelli

Presentata da

Maria Vittoria Padrone

I Sessione, Ottobre 2026

Anno Accademico 2025/2026

INDICE:

INDICE: 1

GLOSSARIO DELLE ABBREVIAZIONI E DEGLI ACRONIMI 2

ABSTRACT: 4

INTRODUZIONE: 5

CAPITOLO 1: 6

1.1 Dalla Radioterapia Conformazionale Tridimensionale (3D-CRT) alla Radioterapia a Intensità Modulata (IMRT) e la Volumetric Modulated Arc Therapy (VMAT) 6
1.2 L'integrazione della Radioterapia Guidata dalle Immagini (IGRT) 7
1.3 L'importanza dei sistemi di immobilizzazione e il ruolo nella riduzione degli errori sistematici 8
1.4 L'evoluzione della radioterapia verso la SGRT 9
1.4.1 Il ruolo della SGRT nel posizionamento "skin marker-less" e i relativi vantaggi clinici 10
1.4.2 L'applicazione della radioterapia guidata dalla superficie (SGRT) degli arti superiori e inferiori 10
1.5 La dotazione tecnologica e i sistemi di immobilizzazione del reparto di Radioterapia del Policlinico di Sant'Orsola 11

CAPITOLO 2: MATERIALI E METODI 14

2.1 Criteri di selezione della coorte e disegno dello studio 14
2.2 Quantificazione degli errori geometrici e analisi delle immagini 17
2.3 Analisi statistica 24
2.3.1 Analisi dei tempi operativi di sala per seduta radioterapica 26

CAPITOLO 3: DISCUSSIONE E ANALISI DEI RISULTATI 28

3.1 Analisi dei dati 28
3.2 Analisi quantitativa dei tempi operativi e dell'efficienza di sala 31

CAPITOLO 4: CONCLUSIONI 32

4.1 Sintesi delle evidenze cliniche e limiti dello studio 32
4.2 Prospettive future: aspetti dosimetrici e radioprotezionistici 34
4.3 Dimensione umana, relazionale ed etica della cura radioterapica 35

LA BIBLIOGRAFIA 37

SITOGRAFIA 38

GLOSSARIO DELLE ABBREVIAZIONI E DEGLI ACRONIMI

3D-CRT (*Three-Dimensional Conformal Radiation Therapy*): Radioterapia Conformazionale Tridimensionale.

6 DoF (*Six Degrees of Freedom*): Sei Gradi di Libertà (tre traslazioni ortogonali e tre rotazioni angolari).

ALARA (*As Low As Reasonably Achievable*): Principio radioprotezionistico "Il più basso ragionevolmente ottenibile".

AP (*Antero-Posteriore*): Asse spaziale sagittale (verticale/profondità).

CBCT (*Cone Beam Computed Tomography*): Tomografia Computerizzata a Fascio Conico a bordo dell'acceleratore lineare.

CTV (*Clinical Target Volume*): Volume Bersaglio Clinico.

DIBH (*Deep Inspiration Breath Hold*): Tecnica di erogazione a trattenimento del respiro in inspirazione profonda.

GTV (*Gross Tumor Volume*): Volume Tumorale Macroscopico.

HTA (*Health Technology Assessment*): Valutazione delle Tecnologie Sanitarie / Economia Sanitaria.

IGRT (*Image Guided Radiotherapy*): Radioterapia Guidata dalle Immagini.

IMRT (*Intensity Modulated Radiation Therapy*): Radioterapia a Intensità Modulata.

LINAC (*Linear Accelerator*): Acceleratore Lineare per radioterapia.

LR (*Latero-Laterale*): Asse spaziale trasversale (sinistra-destra).

MLC (*Multi-Leaf Collimator*): Collimatore Multilamellare.

OAR (*Organs at Risk*): Organi a Rischio circostanti il bersaglio.

OBI (*On-Board Imager*): Sistema di imaging radiologico montato a bordo del LINAC.

OIS (*Oncology Information System*): Software informativo aziendale per la gestione clinica e il *Record & Verify*(es. MOSAIQ).

Pitch: Tangeggio (inclinazione angolare attorno all'asse trasversale Y).

PTV (*Planning Target Volume*): Volume di Target Pianificato (CTV + margini di incertezza posizionale).

ROI (*Region of Interest*): Regione di Interesse topografica sagomata per il tracciamento SGRT.

Roll: Rollio (inclinazione angolare attorno all'asse longitudinale X).

SGRT (*Surface Guided Radiation Therapy*): Radioterapia Guidata dalla Superficie.

SI (*Supero-Inferiore*): Asse spaziale cranio-caudale (longitudinale).

TPS (*Treatment Planning System*): Sistema informatico di calcolo ed elaborazione del piano dosimetrico.

TSRM: Tecnico Sanitario di Radiologia Medica.

Vac-Lok: Presidio di immobilizzazione pneumatico a sacco a vuoto con microsfere.

VMAT (*Volumetric Modulated Arc Therapy*): Radioterapia Volumetric ad Arco Modulato.

Yaw: Imbardata (rotazione/torsione angolare attorno all'asse verticale Z).

ABSTRACT:

Il presente elaborato, condotto presso la SC di Radioterapia dell'IRCCS AOU di Bologna (Policlinico Sant'Orsola-Malpighi), analizza l'impatto clinico e procedurale della Surface Guided Radiation Therapy (SGRT) nel posizionamento e monitoraggio dei pazienti con neoplasie degli arti superiori e inferiori.

L'evoluzione tecnologica (VMAT e IGRT) richiede un'elevata precisione geometrica per salvaguardare i tessuti sani. Sebbene la SGRT trovi ampio consenso nei distretti toraco-addominali, l'applicazione nelle estremità rappresenta una sfida clinica a causa della mobilità articolare e della deformabilità dei tessuti.

Lo studio retrospettivo e comparativo esamina 41 pazienti trattati tra gennaio 2024 e aprile 2026, suddivisi tra gruppo SGRT (N=12) e controllo convenzionale al laser (N=29), entrambi supportati da presidi in poliuretano. L'analisi delle dislocazioni inter-frazione (test di Mann-Whitney U) evidenzia un'equivalenza statistica tra i due bracci per gli spostamenti traslazionali e il vettore 3D ($p > 0,05$), confermando l'efficacia dei cuscini poliuretanici. L'analisi rotazionale mostra invece una maggiore sensibilità della SGRT nell'evidenziare le torsioni sull'asse Yaw, associate a un incremento temporaneo di riposizionamenti e tempi operativi.

Tali risultanze evidenziano una curva di apprendimento e bias di selezione iniziali. Superata la fase transitoria, la standardizzazione dei protocolli e la corretta sagomatura della ROI permetteranno di sfruttare i vantaggi della SGRT. Ciò consentirà di validare una riduzione dei margini di espansione dal CTV al PTV, limitando la tossicità e valorizzando il ruolo del TSRM nell'umanizzazione delle cure.

INTRODUZIONE:

Negli ultimi anni, i trattamenti radioterapici hanno vissuto un vero e proprio cambio di paradigma. Questo traguardo è stato raggiunto grazie a un'evoluzione tecnologica che oggi consente di controllare la malattia attraverso tecniche di irradiazione sofisticate e personalizzate sul paziente. L'avvento di metodiche avanzate come la Volumetric Modulated Arc Therapy (VMAT), combinato con l'impiego sistematico dell'imaging pretrattamento tramite Image Guided Radiotherapy (IGRT), ha permesso di incrementare notevolmente la dose somministrata ai tessuti patologici, riducendo drasticamente quella erogata agli organi sani circostanti.

In questo panorama, l'immobilizzazione del paziente riveste un ruolo fondamentale: deve infatti garantire la massima precisione e la perfetta riproducibilità della postura durante ogni singola seduta, azzerando il rischio di errori geometrici durante l'erogazione del fascio.

Proprio nella delicata fase di setup, la Surface Guided Radiotherapy (SGRT) sta trovando un impiego sempre più diffuso. Questa tecnologia, infatti, non si limita a ottimizzare il posizionamento iniziale del paziente, ma offre il vantaggio cruciale di monitorarne la superficie corporea in tempo reale e in modo non invasivo per l'intera durata della seduta radiante.

In ambito internazionale diversi studi (come quello di Jeremy D P Hoisak et al.) hanno dimostrato come l'utilizzo della SGRT non si limiti al solo monitoraggio del distretto toraco-addominale come da utilizzo consueto, ma possa essere impiegato per tutti i distretti corporei, inclusi gli arti superiori ed inferiori.

Altre ricerche, come quelli di Yamashita K. et al., si spingono ancora oltre proponendo un approccio completamente tattoo-less e che si affida esclusivamente alla SGRT per il posizionamento e il setup dei pazienti.

Attualmente, presso l'IRCCS Azienda Ospedaliero-Universitaria di Bologna (Policlinico Sant'Orsola-Malpighi), l'utilizzo della tecnologia guidata dalla superficie per coadiuvare il posizionamento degli arti ha ancora un carattere saltuario ed è limitato a casi selezionati.

Il presente elaborato si prefigge quindi lo scopo di verificare se l'introduzione sistematica della SGRT nel setup degli arti sia in linea con i trend e le evidenze del panorama internazionale. In particolare, lo studio si propone di analizzare l'esistenza di una reale differenza in termini di accuratezza geometrica tra i trattamenti eseguiti con o senza il supporto della SGRT.

Gli obiettivi secondari della ricerca mirano a valutare se tale approccio possa garantire:

- Un maggiore comfort per il paziente;
- Una riduzione delle difficoltà tecniche incontrate dal personale TSRM (Tecnico Sanitario di Radiologia Medica) durante la fase di posizionamento;
- Una riduzione dei tempi globali di occupazione della sala.

L'ottimizzazione di questi parametri si tradurrebbe, in ultima analisi, in un sensibile miglioramento della qualità complessiva e dell'efficienza del trattamento radiante. La radioterapia è una disciplina medica rivolta principalmente ai trattamenti oncologici che richiede un approccio multidisciplinare. Per affrontare il percorso terapeutico è fondamentale la collaborazione di numerose figure specialistiche, tra cui il TSRM, il cui ruolo è centrale dal posizionamento e immobilizzazione del paziente fino all'erogazione della terapia.

Per comprendere l'introduzione dei sistemi avanzati odierni, come la SGRT, occorre accennare all'evoluzione della diagnostica per immagini, che ha guidato il passaggio dalla radioterapia conformazionale tridimensionale (3D-CRT), alla radioterapia ad intensità modulata (IMRT), fino alla radioterapia guidata dalle immagini (IGRT).

Fino alla fine del 1980, la disciplina si basava su immagini bidimensionali e pianificazioni su radiografie con fasci geometrici quadrati o rettangolari; le schermature manuali con blocchi di piombo e l'uso di soli due fasci contrapposti non permettevano di seguire i contorni irregolari del tumore né di risparmiare i tessuti sani.

CAPITOLO 1:

1.1 Dalla Radioterapia Conformazionale Tridimensionale (3D-CRT) alla Radioterapia a Intensità Modulata (IMRT) e La Volumetric Modulated Arc Therapy (VMAT)

La radioterapia conformazionale tridimensionale (3D-CRT) ha rappresentato il primo storico cambio di paradigma nella radioterapia moderna grazie all'integrazione della tomografia computerizzata (TC) nel processo di pianificazione (Perez et al., 2019). Questa tecnica si basa sulla ricostruzione volumetrica dell'anatomia del paziente, consentendo di conformare i fasci di radiazione alla geometria tridimensionale del target tumorale (Gross Tumor Volume - GTV e Clinical Target Volume - CTV) tramite collimatori multilamellari (MLC) (Khan e Gibbons, 2014). Sebbene la 3D-CRT permetta una netta separazione spaziale tra la dose somministrata al tumore e quella assorbita dai tessuti sani rispetto alle tecniche bidimensionali, presenta un limite intrinseco: l'intensità del flusso di radiazioni all'interno di ciascun campo rimane

uniforme. Ciò rende complessa la protezione degli organi a rischio (Organs at Risk - OAR) situati in stretto rapporto di contiguità o concavità con la lesione (Bortfeld, 2006; Perez et al., 2019).

Per superare i limiti della 3D-CRT e ottimizzare il rapporto terapeutico è stata introdotta la radioterapia a intensità modulata (IMRT) (Bortfeld, 2006). A differenza della tecnica conformazionale, l'IMRT non si limita a sagomare il profilo esterno del fascio, ma ne modula il flusso energetico all'interno del campo stesso attraverso il movimento dinamico o statico (step-and-shoot) delle lamelle del collimatore MLC, segmentando la dose in centinaia di "micro-fasci" (beamlets) (Nutting e Dearnaley, 2002). Questa tecnologia si avvale di algoritmi di pianificazione inversa (inverse planning), nei quali il medico definisce a priori i vincoli di dose per il target e per gli OAR, lasciando al software il calcolo della mappa di fluenza ottimale (Nutting e Dearnaley, 2002; Perez et al., 2019). Il risultato è una distribution di dose altamente conforme con gradienti estremamente ripidi, che riduce la tossicità a lungo termine e permette l'escalation della dose sul tumore (Verellen et al., 2007).

La naturale evoluzione computazionale e meccanica dell'IMRT è rappresentata dalla Volumetric Modulated Arc Therapy (VMAT), introdotta per ovviare ai lunghi tempi di erogazione tipici dei campi fissi della IMRT standard (Otto, 2008). La VMAT distribuisce la dose radiante in modo continuo durante una o più rotazioni complete o parziali della testata dell'acceleratore lineare (gantry) attorno al paziente attraverso archi a 360° (Otto, 2008; Teoh et al., 2011). Durante la rotazione, il sistema modifica simultaneamente tre parametri fondamentali: la velocità angolare del gantry, la conformazione geometrica delle lamelle del collimatore MLC e il tasso di dose erogato (dose rate) (Teoh et al., 2011). Questo approccio garantisce una conformità della dose sovrapponibile o superiore all'IMRT statica e riduce il tempo di trattamento del 50-80%, minimizzando la probabilità di movimento intra-frazione del paziente e migliorando il comfort clinico (Otto, 2008; Yu e Tang, 2011).

1.2 L’integrazione della Radioterapia Guidata dalle Immagini (IGRT)

L’adozione di distribuzioni di dose con gradienti estremamente ripidi tipiche di IMRT e VMAT incrementa significativamente la criticità di eventuali deviazioni posturali durante l'erogazione: un minimo errore di posizionamento o lo spostamento fisiologico degli organi interni (come il riempimento vescicale o i movimenti respiratori) può causare il sotto-dosaggio del target o il sovra-dosaggio degli OAR limitrofi (Dawson e Sharpe, 2006). Per mitigare tale incertezza geometrica si è resa indispensabile la Radioterapia Guidata dalle Immagini (IGRT), che integra

sistemi di imaging a bordo dell'acceleratore — come la Cone Beam CT (CBCT), i sistemi ottici superficiali o i KV radiografici (Dawson e Sharpe, 2006; Jaffray, 2012). Il confronto in tempo reale tra le immagini del giorno (online imaging) e la TC di simulazione permette di calcolare e correggere istantaneamente i disallineamenti spaziali sui tre assi cartesiani e rotazionali, traducendo la precisione balistica in accuratezza clinica millimetrica (Jaffray, 2012).

1.3 L'importanza dei sistemi di immobilizzazione e il ruolo nella riduzione degli errori sistematici

Nell'ambito della radioterapia dei sarcomi dei tessuti molli (STS) degli arti, l'accuratezza geometrica è un prerequisito fondamentale data l'elevata mobilità intrinseca delle strutture coinvolte. In questo contesto, i sistemi di immobilizzazione personalizzati svolgono un ruolo cruciale; tuttavia, come evidenziato da Kim et al. (2019), le regioni anatomiche caratterizzate da articolazioni multiassiali (come la spalla o l'ascella) presentano una suscettibilità intrinseca ad ampi errori interfrazione, in particolare rotazionali, indipendentemente dalla complessità dei presidi utilizzati (quali culle a vuoto combinate con maschere termoplastiche).

Gli studi condotti mediante sistemi di localizzazione ottica e CBCT dimostrano che il movimento intrafrazione durante la singola seduta è generalmente contenuto sotto i 2 mm se si impiegano adeguati sistemi di bloccaggio (Dickie et al., 2010; Gierga et al., 2014). Al contrario, la variabilità inter-frazione rappresenta la sfida principale: l'utilizzo combinato di sistemi di immobilizzazione ad elevata rigidità ancorati in modo riproducibile al lettino di trattamento e di protocolli di correzione dell'immagine consente di ridurre la deviazione standard dell'errore sistematico (SE) al di sotto di 1.5 mm, contrastando la deformabilità dei tessuti molli e la flessibilità articolare che introdurrebbero macro-discrepanze quotidiane (Dickie et al., 2010; Giergaet al., 2014).

La quantificazione accurata degli errori sistematici e random è il presupposto matematico per il calcolo del margine del Volume di Target Pianificato (PTV). Storicamente, i trattamenti convenzionali degli arti richiedevano margini di espansione estremamente generosi; l'evoluzione guidata da IMRT e IGRT quotidiana ha permesso di ridefinire radicalmente questi parametri. Dickie et al. (2010) hanno dimostrato che l'applicazione giornaliera della CBCT online, associata a un'immobilizzazione efficace, consente di validare un margine di PTV uniforme di soli 5 mm per gli arti inferiori, riducendo l'esposizione del tessuto sano circostante. L'impatto clinico di tale contrazione limita l'insorgenza di complicanze severe quali fibrosi, rigidità articolare, linfedema e fratture ossee iatrogene (Gierga et al., 2014). Al contrario, come

calcolato da Gierga et al. (2014) tramite l'analisi dei profili di superficie (surface imaging) in regime di imaging settimanale, l'assenza di un monitoraggio quotidiano costringerebbe a utilizzare margini cautelativi compresi tra 1.0 cm (asse antero-posteriore), 1.2 cm (asse supero-inferiore) e 1.3 cm (asse latero-laterale) per evitare il geographic miss (mancato bersaglio) del tumore.

1.4 L'evoluzione della radioterapia verso la SGRT

L'efficacia clinica delle moderne distribuzioni di dose è intrinsecamente legata all'accuratezza della localizzazione del target durante l'intero ciclo terapeutico (Hoisak e Pawlicki, 2018). Le incertezze di posizionamento vengono classificate in variazioni interfraction (discrepanze posturali o mutamenti anatomo-fisiologici tra le sedute) e variazioni intrafraction (movimenti del paziente o processi fisiologici attivi durante l'erogazione, come la respirazione), storicamente compensate dall'espansione del volume tumorale nel PTV.

I sistemi IGRT convenzionali basati su kV o CBCT consentono di correggere efficacemente l'errore iniziale di allineamento; tuttavia, la verifica dell'anatomia rimane confinata alla fase che precede l'erogazione della dose, senza offrire un tracciamento dinamico durante la seduta. Monitorare il movimento intrafraction in tempo reale con sistemi radiografici (come fluoroscopia o cine-MV) comporta un inevitabile aumento della dose radiante aggiuntiva e dei tempi di occupazione della sala. In questo scenario si inserisce la radioterapia guidata dalla superficie (SGRT), una tecnologia non invasiva e non radiogena che permette una localizzazione continua del paziente, superando i limiti fisici e dosimetrici della guida d'immagine convenzionale (Hoisak e Pawlicki, 2018).

La Surface Guided Radiation Therapy (SGRT) si configura come un'estensione tridimensionale e non radiogena dei sistemi di tracciamento basati su marcatori fisici (marker-based). Il suo principio fondamentale risiede nella capacità di mappare e monitorare in tempo reale la topografia superficiale 3D del paziente, mettendola in relazione dinamica con una superficie di riferimento derivata dalla TC di simulazione o catturata sul lettino, sulla quale l'operatore definisce una specifica Regione di Interesse (ROI) (Hoisak e Pawlicki, 2018). Tecnologicamente, i dispositivi implementano sistemi ottici a soffitto con proiettori che emettono pattern di luce strutturata (es. trame a scacchiera o nel vicino violetto) sul corpo del paziente e telecamere ad alta definizione che ne catturano la deformazione geometrica. Il sistema confronta continuamente la superficie "live" con quella di riferimento calcolando le deviazioni spaziali in sei gradi di libertà (6 DOF): tre spostamenti traslazionali (verticale,

longitudinale, laterale), tre rotazioni (imbardata/yaw, rollio/roll, tangeggio/pitch) e il vettore di magnitudo RMS (Root Mean Square). Qualora vengano superate le soglie di tolleranza millimetriche o angolari, la SGRT invia un segnale visivo o, se interbloccata con l'acceleratore, interrompe istantaneamente l'erogazione del fascio (gating), garantendo elevati standard di sicurezza (Hoisak e Pawlicki, 2018).

1.4.1 Il ruolo della SGRT nel posizionamento "skin marker-less" e i relativi vantaggi clinici

Tradizionalmente, il set-up quotidiano si affida all'allineamento laser di tatuaggi o punti di repere impressi sulla cute, un approccio limitato dall'elasticità della pelle, dalla soggettività dell'operatore su informazioni bidimensionali e dal disagio psicofisico o reazioni allergiche per il paziente. In questo scenario, la SGRT offre la possibilità di implementare procedure completamente prive di marcatori (skin marker-less); come dimostrato da Yamashita et al. (2024), l'impiego del sistema AlignRT consente di sostituire i repere cutanei attraverso un matching oggettivo tridimensionale tra la ROI live e la TC di pianificazione, standardizzando il flusso di lavoro indipendentemente dall'esperienza dell'operatore.

I vantaggi clinici sono molteplici: sul profilo dell'accuratezza, lo studio ha documentato che la SGRT riduce gli errori interfrazione rispetto alle metodiche laser, evidenziando un vettore di spostamento 3D medio significativamente inferiore (0.5 mm contro 0.9 mm, $p<0.01$). Questo incremento di precisione consente di ridurre i margini di espansione per il PTV negli arti (formulazione di van Herk) a 2.7-3.8 mm, a fronte dei 7.2-8.7 mm della tecnica convenzionale. Inoltre, la SGRT ottimizza i tempi riducendo il tempo medio di set-up da 253 a 100 secondi ($p<0.001$) poiché permette di movimentare il lettino direttamente in posizione correggendo la postura in tempo reale; questo throughput clinico riduce la frequenza di verifiche radiologiche quotidiane (CBCT o kV), limitando la dose complessiva assorbita dai tessuti sani extra-bersaglio.

1.4.2 L'applicazione della radioterapia guidata dalla superficie (SGRT) degli arti superiori e inferiori

La gestione dei trattamenti delle estremità del corpo combina chirurgia conservativa e radioterapia per massimizzare il controllo locale e preservare la funzionalità dell'arto, ma il posizionamento quotidiano è sfidato da articolazioni multiassiali e dalla mancanza di sistemi di immobilizzazione uniformi che introducono errori interfrazione, specie rotazionali. Lo studio

clinico di Zhang et al. (2024) ha dimostrato che l'implementazione quotidiana della SGRT tramite AlignRT riduce drasticamente le deviazioni spaziali in entrambe le estremità rispetto al solo allineamento laser e immobilizzazione passiva.

Per gli arti superiori, i tassi di errore traslazionale inferiori o uguali a 3 mm sono passati rispettivamente dal 64.5% sull'asse latero-laterale (Left-Right - LR), 54.8% sull'asse supero-inferiore (SI) e 50.6% sull'asse antero-posteriore (AP) del gruppo di controllo all'85.0%, 83.6% e 88.6% del gruppo SGRT. Analogamente, negli arti inferiori il gruppo SGRT ha registrato contenimenti entro i 3 mm nettamente superiori rispetto al controllo, pari all'85.0% (LR), 83.4% (SI) e 77.9% (AP). Questo supporto consente di ridurre in sicurezza i margini CTV-PTV, che senza guida ottica supererebbero il centimetro sia per gli arti superiori (10.1 mm) sia per gli inferiori (11.4 mm), permettendo l'adozione di un margine uniforme e sicuro di circa 5 mm per tutte le estremità (con valori calcolati di 5.0, 3.8 e 4.1 mm per l'arto superiore e 4.2, 4.7 e 5.2 mm per l'inferiore).

Infine, l'integrazione della SGRT, pur richiedendo un'accurata delineazione della ROI prendendo in considerazione anche le grandi articolazioni limitrofe (gomiti o ginocchia), riduce il tempo medio di posizionamento da 10.5 a 9.3 minuti grazie alla minore necessità di ripetere sessioni di imaging volumetrico (CBCT) e successivi riposizionamenti per errori macroscopici iniziali.

1.5 La dotazione tecnologica e i sistemi di immobilizzazione del reparto di Radioterapia del Policlinico di Sant'Orsola

La Struttura Complessa di Radioterapia dell'IRCCS Azienda Ospedaliero-Universitaria di Bologna - Policlinico di Sant'Orsola è caratterizzata da un parco macchine di ultima generazione, configurato per rispondere ai più elevati standard di precisione radiologica e dosimetrica. La radioterapia viene erogata con tecniche tradizionali, conformazionale 3D e a modulazione di intensità (IMRT) e la radioterapia volumetrica ad arco (VMAT). Vengono utilizzate tecniche di radioterapia guidata dalle immagini (IGRT), 3D-CRT, IMRT, VMAT e stereobody, TBI con acceleratore di ultima generazione dotato di fotoni da 6, 10 e 15 MV, e 6 e 10 MV senza filtro di appiattimento ed elettroni da 6, 9, 12 e 18 MeV, avvalendosi anche di un lettino robotico 4D (Hexapod) a sei gradi libertà e tecniche stereotassiche con precisione submillimetrica per neoplasie addominali e toraciche con un sistema ottico di posizionamento e controllo del respiro (SGRT). Per le neoplasie prostatiche, inoltre, è disponibile un sistema di

immagini a guida ecografica (Clarity) che consente una più precisa valutazione del target e degli organi a rischio e quindi una terapia ancora più precisa. Implementazione di piani di trattamento con tecniche conformazionali 3D, e a modulazione di intensità con gantry fisso (IMRT) e con gantry rotante (VMAT).

La radioterapia viene erogata mediante l'utilizzo di 3 acceleratori lineari, sia in pazienti adulti che pediatrici, l'approccio terapeutico viene definito da gruppi multidisciplinari, nell'ambito di percorsi diagnostico-terapeutici Dipartimentali e Aziendali. Le modalità di esecuzione dei trattamenti prevedono l'utilizzo di sistemi di immobilizzazione personalizzati, di una TC spirale per la ricostruzione 3D e 4D dei volumi di interesse e di software dedicati per la fusione delle immagini RM e PET/TC per una più precisa definizione dei volumi bersaglio. In tutte le fasi della preparazione ed esecuzione del trattamento, il personale medico si avvale del supporto costante di uno staff dedicato della Fisica Sanitaria. Inoltre, la dotazione tecnologica, e l'expertise di tutti gli operatori consente di eseguire trattamenti di RT avanzati sia accurati che precisi in pazienti sia adulti che pediatrici.

La dotazione strumentale del reparto comprende:

3 acceleratori con imaging dedicato on board (OBI):

- **2** Elekta Versa, Elekta AB, Stockholm, Sweden per VMAT con SGRT, OBI, lettino 4D (6 gradi di libertà) Hexapod e sistemi di centratura e posizionamento ecografico;
- **1** Elekta Synergy, Elekta AB, Stockholm, Sweden per VMAT con OBI e lettino 4D (6 gradi di libertà) Hexapod;
- TC dedicata per studi 3D e 4D;
- Sistemi di immobilizzazione e posizionamento avanzati;
- Slot dedicati per il centraggio PET/CT in collaborazione con la Medicina Nucleare

Coerentemente con l'alto profilo tecnologico dell'IRCCS Azienda Ospedaliero-Universitaria di Bologna (Policlinico Sant'Orsola-Malpighi), la selezione e la realizzazione del sistema di immobilizzazione avvengono durante la fase di simulazione (TC di centratura), avvalendosi della collaborazione attiva del Tecnico Sanitario di Radiologia Medica (TSRM). Garantire una riproducibilità ottimale del posizionamento quotidiano e la contestuale riduzione dei movimenti intra- ed inter-frazione rappresenta un requisito cardine per preservare la precisione balistica nei trattamenti erogati ad alti gradienti di dose, quali la IMRT e la VMAT. Tale necessità diventa particolarmente critica nelle neoplasie e nei sarcomi dei tessuti molli delle estremità

dove, a causa dell'elevata mobilità e della flessibilità intrinseca delle articolazioni, il semplice allineamento laser non risulta sufficiente, rendendo indispensabile l'impiego di presidi di contornamento e bloccaggio dedicati e personalizzati (Kim et al., 2019).

I dispositivi di immobilizzazione adottati presso la struttura si suddividono in base al distretto anatomico e alle esigenze clinico-terapeutiche specifiche:

- Sistemi di fissaggio cranio-cervicali: Per le patologie del distretto testa-collo e dell'encefalo vengono impiegate maschere termoplastiche personalizzate a 3 punti (indicate per trattamenti stereotassici cerebrali in quanto vincolano la regione cranica e frontale) o a 5 punti (*Head, Neck & Shoulder*), le quali estendono il vincolo alle spalle e alla regione clavicolare per ridurre le rotazioni del collo (Cacici, 2024). Le maschere vengono fissate su telai rigidi in fibra di carbonio indicizzati al lettino tramite perni di bloccaggio rapido (*pin-lock*, tipo *Posifix*) (Cacici, 2024). Nei trattamenti pediatrici, il reparto integra inoltre progetti di umanizzazione delle cure mediante la decorazione personalizzata delle maschere con motivi grafici (es. supereroi), riducendo l'ansia del bambino e migliorandone la compliance operativa (Campagna, 2016).
- Sistemi per il distretto toraco-addominale e mammario: Per la stabilizzazione del torace, della mammella e dell'addome si ricorre a piani inclinati e supporti dedicati all'elevazione delle braccia (*Wing Board* / *Breast Board*) indicizzati al lettino, configurati per escludere gli arti superiori dal fascio radiante diretto.
- Sistemi specifici per gli arti superiori e inferiori: Il posizionamento dell'arto superiore richiede l'esclusione dal campo di irraggiamento del tronco e dell'arto controlaterale. A tal fine, oltre ai supporti per l'elevazione, la pratica clinica prevede l'impiego dei cuscini monouso a espansione poliuretanica. Tali presidi, basati sulla reazione chimica esotermica tra poliolo e isocianato, si espandono modellandosi sull'anatomia del paziente e solidificano in pochi minuti, creando un calco rigido estremamente fedele che stabilizza articolazioni complesse come spalla o gomito (Cacici, 2024). Per il distretto pelvico-femorale e le estremità inferiori, lo standard tecnologico combina i cuscini poliuretanici o i tradizionali sacchi a vuoto (*Vac-Lok*, costituiti da microsfere di polistirene compattate tramite cuscini sigillati a depressione pneumatica) con l'applicazione di maschere termoplastiche sagomate direttamente sull'arto previa immersione in bagnomaria termostato a 65−70∘C (Dickie et al., 2010; Cacici, 2024). Il raffreddamento della plastica sopra la struttura del calco crea un guscio rigido ad alta

stabilità che minimizza le traslazioni e le rotazioni sia articolari sia dei tessuti molli (Kim et al., 2019).

Per correggere attivamente i disallineamenti residui rilevati dai sistemi di immobilizzazione passiva o evidenziati dalle verifiche d'immagine (IGRT/SGRT), il parco macchine del Policlinico integra lettini robotizzati a sei gradi di libertà (6 DoF / *Hexapod*). Agendo su sei montanti a lunghezza variabile, questa piattaforma consente correzioni micrometriche non solo sui tre assi traslazionali standard (laterale, longitudinale, verticale), ma anche sulle componenti rotazionali di imbardata (*yaw*), rollio (*roll*) e tangeggio (*pitch*) (Cacici, 2024).

L'integrazione sinergica tra la selezione accurata dei presidi di immobilizzazione personalizzati, la piattaforma di correzione robotica Hexapod e il monitoraggio superficiale SGRT in tempo reale garantisce il massimo rispetto dei tessuti sani extra-bersaglio, consentendo una drastica riduzione dei margini di sicurezza e ottimizzando l'efficacia terapeutica sui volumi target.

CAPITOLO 2: MATERIALI E METODI

2.1 Criteri di selezione della coorte e disegno dello studio

Il presente studio monocentrico, di natura osservazionale retrospettiva e comparativa, è stato ideato e condotto presso la Struttura Complessa di Radioterapia dell'IRCCS Azienda Ospedaliero-Universitaria di Bologna (Policlinico Sant'Orsola-Malpighi). L'obiettivo primario dell'indagine consiste nel valutare in modo sistematico l'impatto dell'introduzione della tecnologia di radioterapia guidata dalla superficie (*Surface Guided Radiation Therapy*, SGRT), implementata in reparto mediante l'ausilio della piattaforma ottica tridimensionale SGRT (C-RAD), sull'accuratezza del posizionamento inter-frazione, sulla stabilità del setup e sul contenimento delle incertezze geometriche nei pazienti sottoposti a trattamento radioterapico per neoplasie del distretto anatomico degli arti superiori ed inferiori.

Per garantire la massima omogeneità metodologica del campione e contenere la variabilità legata ai criteri di contornamento dei volumi bersaglio (GTV, CTV, PTV), alle scelte di prescrizione della dose e alle strategie di immobilizzazione, la selezione dei casi ha contemplato esclusivamente i pazienti presi in carico dal medico radioterapista referente per il distretto degli arti.

La finestra temporale d'indagine ha incluso tutti i trattamenti erogati a partire da gennaio 2024 fino al 30 aprile 2026. L'analisi si è focalizzata sulle erogazioni effettuate su due acceleratori lineari di ultima generazione in dotazione al reparto, i sistemi Elekta Versa, Elekta AB, Stockholm, Sweden, entrambi equipaggiati con lettino robotico a sei gradi di libertà (*Hexapod EVO RT*) e sistema di imaging *On-Board Imager* (OBI/CBCT).

Attraverso tale filtraggio sistematico, la coorte di studio complessiva comprende 41 pazienti affetti da patologie oncologiche a carico delle estremità, suddivisi in due gruppi distinti che hanno utilizzato entrambi ovviamente il sistema di posizionamento tradizionale che prevede l'immobilizzazione degli arti attraverso i cuscini poliuretanici, in aggiunta la differenza che è stata osservata nel gruppo sperimentale prevede l'utilizzo del sistema SGRT durante il posizionamento del paziente.

1. **Gruppo di Controllo (SENZA MONITORAGGIO SGRT)**: composto da N=29 pazienti posizionati con la metodica convenzionale, avvalendosi dei cuscini monouso ad espansione poliuretanica (ed eventuali maschere o cuscini Vac-Lok) associati all'allineamento laser di centratura.
2. **Gruppo Sperimentale (CON MONITORAGGIO SGRT)**: composto da N=12 pazienti per i quali la procedura di allineamento e monitoraggio del setup convenzionale è stata coadiuvata in tempo reale dalla tecnologia SGRT in associazione ai presidi dei cuscini monouso ad espansione poliuretanica.

A seconda del sotto distretto anatomico è stata fatta un'ulteriore caratterizzazione, in particolare la distribuzione dei 41 pazienti inclusi nello studio riflette la casistica clinica delle neoplasie delle estremità trattate presso l'IRCCS Policlinico Sant'Orsola di Bologna. Come illustrato nella figura 1, la maggioranza della coorte presenta patologie a carico dell'arto inferiore (coscia, gamba, regione poplitea o piede), rappresentando 8 pazienti (66.7%) nel gruppo sperimentale e 21 pazienti (72.4%) nel gruppo di controllo. L'arto superiore (spalla, braccio, avambraccio o mano) comprende 4 pazienti (33.3 %) nel gruppo sperimentale e 8 pazienti (21.6%) nel gruppo di controllo. Questa suddivisione è fondamentale dal punto di vista biomeccanico perché per esempio l'arto superiore presenta un'articolazione prossimale (spalla) dotate di tre gradi di libertà cinemato-dinamici ad elevata escursione, rendendo il posizionamento estremamente suscettibile a rotazioni involontarie.

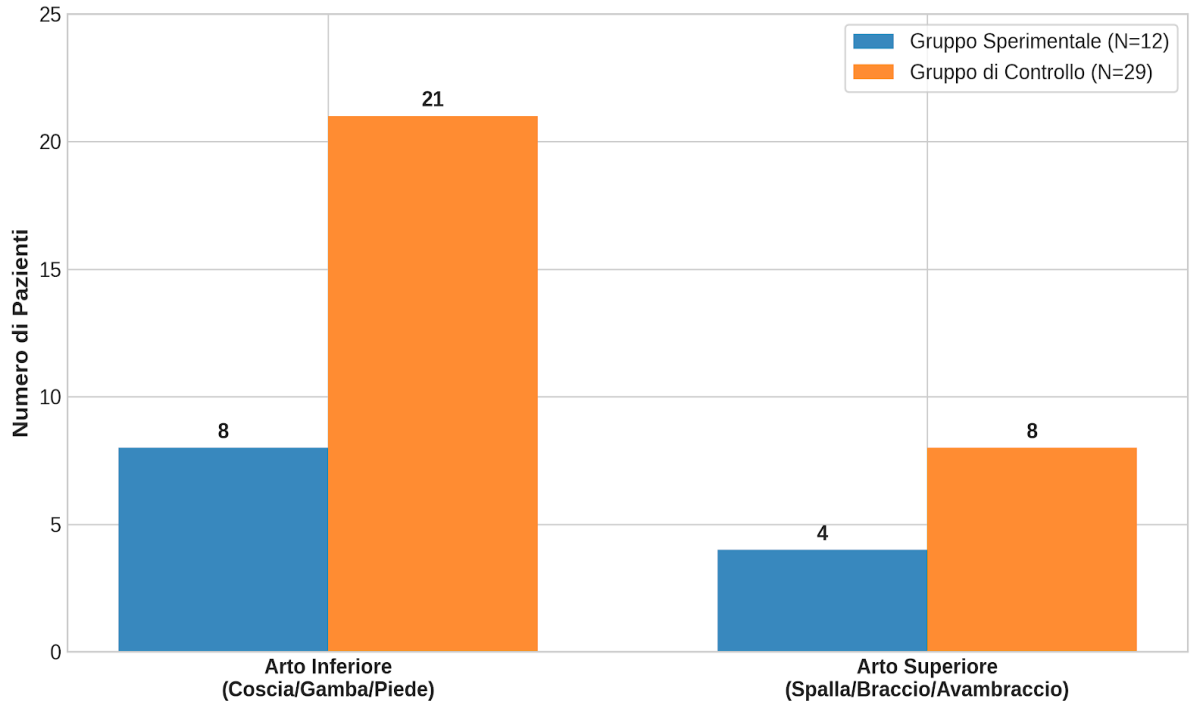


Figura 1- distribuzione anatomica della coorte per gruppo di studio

L'intero processo di estrazione e catalogazione delle variabili cliniche, tecniche e geometriche è stato eseguito interfacciandosi con la piattaforma aziendale di MOSAIQ, Elekta AB, Stockholm, Sweden di tipo Record & Verify (Oncology Information System, OIS). Per ciascun paziente rispondente ai criteri d'inclusione, l'operatore ha effettuato l'accesso al registro informatico selezionando la modalità di consultazione protetta Open Patient Chart Only, in modo da estrapolare lo storico terapeutico completo senza generare interferenze o blocchi sulla normale operatività delle sale di trattamento.

L'estrazione dei dati è stata condotta in modo sistematico analizzando tre sezioni principali della scheda clinica elettronica:

1. Sezione Setup e Dettagli Tecnico-Immobilizzativi

Attraverso la consultazione della scheda di Set up e delle relative note di simulazione, sono stati raccolti i parametri strutturali ed ergonomici della seduta:

- Tipologia di Setup e Allineamento: classificazione del paziente nel braccio CON *SGRT* oppure *SENZA SGRT*;
- Data della TC di Centratura: data di esecuzione della simulazione tomografica;

- Presenza e Tipologia di Bolus: eventuale applicazione di bolus sulla cute del paziente, specificandone la consistenza (rigido o morbido) e lo spessore (0,5 cm o 1,0 cm);
- Uso del Lettino Robotico Hexapod: registrazione dell'impiego del lettino a sei gradi di libertà per la correzione attiva dei disallineamenti rotazionali e traslazionali.

2. Sezione Diagnosis & Intent (D&I)

Dalla sezione D & I sono stati estrapolati i dettagli clinico-radioterapici fondamentali:

- Distretto Anatomico Specifico: localizzazione esatta della lesione sull'arto (braccio, avambraccio, coscia, gamba o piede);
- Prescrizione della Dose e Frazionamento: dose totale prescritta (Gy) e numero di sedute
- Tecnica di Trattamento: modalità di erogazione adottata (prevalente utilizzo di piani a modulazione d'intensità volumetrica ad arco *VMAT* o a campi fissi *IMRT Step-and-Shoot*).

2.2 Quantificazione degli errori geometrici e analisi delle immagini

La valutazione dell'accuratezza geometrica e dell'impatto clinico del sistema SGRT si è basata sull'analisi retrospettiva dei dati di imaging di verifica (CBCT/OBI) archiviati nella sezione Image del software *Record & Verify*. Per ciascuna seduta di trattamento di ogni paziente della coorte, sono stati estratti gli spostamenti registrati prima dell'erogazione del fascio rispetto all'isocentro definito durante la TC di simulazione.

I parametri geometrici registrati e catalogati comprendono:

- Spostamenti Traslazionali lungo i tre assi ortogonali: Supero-Inferiore (|SI|), Latero-Laterale (|LR|) e Antero-Posteriore (|AP|), espressi in centimetri (cm);
- Spostamento Vettoriale 3D Totale: ampiezza euclidea complessiva della traslazione spaziale (cm), definita dalla seguente formula:

$$D_{3D} = \sqrt{\Delta SI^2 + \Delta LR^2 + \Delta AP^2}$$

- Spostamenti Rotazionali attorno ai tre assi cartesiani:

- Beccheggio (Pitch): si parla di rotazione attorno all'asse trasversale (X), infatti l'asse x attraversa il corpo da destra a sinistra, ha un'inclinazione longitudinale.
- Rollio (|Roll|): si parla di rotazione attorno all'asse longitudinale (Y), infatti l'asse y attraversa il corpo dall'alto al basso, perpendicolare all'asse trasversale, ha un'inclinazione laterale.
- Imbardata (|Yaw|), espressi in gradi sessagesimali (∘): si parla di rotazione attorno all'asse verticale (Z), infatti l'asse z attraversa il corpo da davanti a dietro, perpendicolare al piano formato dagli assi x e y, è una rotazione sul piano orizzontale.

- Rotazione Vettoriale 3D Totale: ampiezza complessiva del disallineamento angolare (∘), calcolata come:

$$R_{3D} = \sqrt{\Delta Roll^2 + \Delta Pitch^2 + \Delta Yaw^2}$$

Inoltre, per ciascun paziente è stato annotato il numero di riposizionamenti manuali o di seconde verifiche d'immagine resesi necessarie da parte dei Tecnici Sanitari di Radiologia Medica (TSRM) prima di autorizzare l'erogazione della terapia, assumendo tale variabile come indicatore dell'efficienza e della stabilità iniziale del setup.

Tutti i dati estrapolati dal sistema *Record & Verify* sono stati organizzati in un database informatico dedicato strutturato nei due gruppi di confronto (*SGRT*, N=12 vs *SENZA SGRT*, N=29).

I valori di spostamento traslazionale e rotazionale misurati durante l'intero ciclo di trattamento sono stati mediati per ciascun paziente dei due gruppi di studio. Le tabelle 1 e 2 riportano i valori individuali calcolati per il gruppo sperimentale e per il gruppo di controllo.

N. PAZIENTE	N° Sess.	Media |SI| (cm)	Media |LR| (cm)	Media |AP| (cm)	Media 3D (cm)	Media |Roll| (°)	Media |Pitch| (°)	Media |Yaw| (°)	Media Rot 3D (°)
1	25	0,336	0,384	0,268	0,659	0	0	0	0
2	27	0,289	0,289	0,319	0,603	0,82	1,21	0,85	1,69
3	11	0,618	0,373	0,373	0,917	0,81	1,62	2,31	2,94
4	5	0,18	0,32	0,1	0,407	0,33	0,44	1,2	1,32
5	29	0,197	0,214	0,307	0,482	0,38	0,34	1,18	1,28
6	27	0,204	0,244	0,381	0,545	0,74	0,88	0,82	1,42
7	6	0,233	0,733	0,783	1,203	1,48	1,37	2,6	3,29
8	30	0,653	0,547	0,293	0,983	0,68	0,51	1,12	1,41
9	30	0,21	0,36	0,137	0,486	0,43	0,42	1,96	2,05
10	18	0,506	0,483	0,833	1,207	0	0	0	0
11	18	0,106	0,283	0,389	0,534	0,36	0,36	1,83	1,9
12	24	0,717	0,475	0,321	1,004	1,15	0,85	0,98	1,73

Tabella 1— Valori medi individuali degli spostamenti traslazionali (cm) e rotazionali (°) calcolati per i singoli pazienti del Gruppo di Controllo (CATALYST, N=12)

N. PAZIENTE	N° Sess.	Media |SI| (cm)	Media |LR|(cm)	Media |AP|(cm)	Media 3D (cm)	Media |Roll| (°)	Media |Pitch|(°)	Media |Yaw| (°)	Rotazione 3D (°)
13	10	0,29	0,5	0,29	0,717	0,4	0,2	1,25	1,4
14	25	0,133	0,558	0,296	0,682	0	0	0	0
15	6	0,62	0,6	0,56	1,119	0,8	0,24	0,74	1,116
16	26	0,208	0,171	0,192	0,378	0	0	0	0
17	25	0,088	0,268	0,412	0,544	0	0	0	0
18	12	0,358	0,4	0,625	0,879	0,223	0,248	0,332	0,471
19	5	0,68	0,94	0,72	1,54	0,32	0,32	0,64	0,784
20	29	0,141	0,193	0,376	0,489	0,01	0,101	0,042	0,11
21	18	0,183	0,244	0,15	0,39	1,219	0,437	0,93	1,594
22	24	0,271	0,183	0,467	0,641	1,62	1,324	1,424	2,531
23	12	0,217	0,25	0,367	0,544	1	0,74	0,24	1,267
24	25	0,116	0,192	0,232	0,36	0,9	1,252	1,416	2,093
25	17	0,271	0,612	0,429	0,887	1,1	0,933	1,307	1,946
26	23	0,174	0,47	0,9	1,078	0,644	1,557	1,117	2,022
27	22	0,132	0,473	0,218	0,606	1,313	1,529	1,111	2,301
28	17	0,171	0,324	0,429	0,614	0,635	1,419	1,332	2,047
29	20	0,165	0,14	0,225	0,348	1,2	0,435	0,605	1,413
30	19	0,332	0,174	0,179	0,459	1,056	0,921	0,847	1,637
31	25	0,264	0,392	0,436	0,738	1,62	1,328	0,652	2,194
32	23	0,239	0,287	0,317	0,579	1	0,632	0,536	1,299
33	25	0,268	0,152	0,416	0,572	0,116	0,112	1,636	1,644
34	14	0,28	0,42	0,51	0,71	1,132	0,558	0,652	1,421
35	30	0,63	0,233	0,093	0,712	1,5	1,634	0,853	2,376
36	6	0,31	0,45	0,35	0,65	1,6	1,5	1,34	2,57

37	24	0,546	0,508	0,458	0,968	1,036	1,116	0,556	1,621
38	31	0,339	0,161	0,403	0,629	0,602	0,437	0,825	1,111
39	35	0,25	0,26	0,41	0,55	0	0	0	0
40	13	0,21	0,31	0,62	0,72	1,508	0,6	0,108	1,627
41	25	0,336	0,772	0,396	0,974	1,045	1,152	1,342	2,054

Tabella 2— Valori medi individuali degli spostamenti traslazionali (cm) e rotazionali (°) calcolati per i singoli pazienti del Gruppo di Controllo (NO CATALYST, N=29).

Per valutare visivamente e quantitativamente il comportamento geometrico dei due gruppi di studio (*SGRT)*, N=12 vs *(SENZA SGRT*), N=29, sono stati generati grafici comparativi sulle medie e deviazioni standard dei singoli parametri. Ciascuna barra rappresenta il valore medio calcolato per i singoli parametri di spostamento, affiancata dalla relativa deviazione standard (rappresentata dalle barre d'errore verticali), che esprime il grado di dispersione e di variabilità individuale della coorte. Il grafico sottostante mostra la distribuzione degli spostamenti medi traslazionali lungo gli assi Supero-Inferiore (|SI|), Latero-Laterale (|LR|), Antero-Posteriore (|AP|) e il modulo traslazionale 3D complessivo:

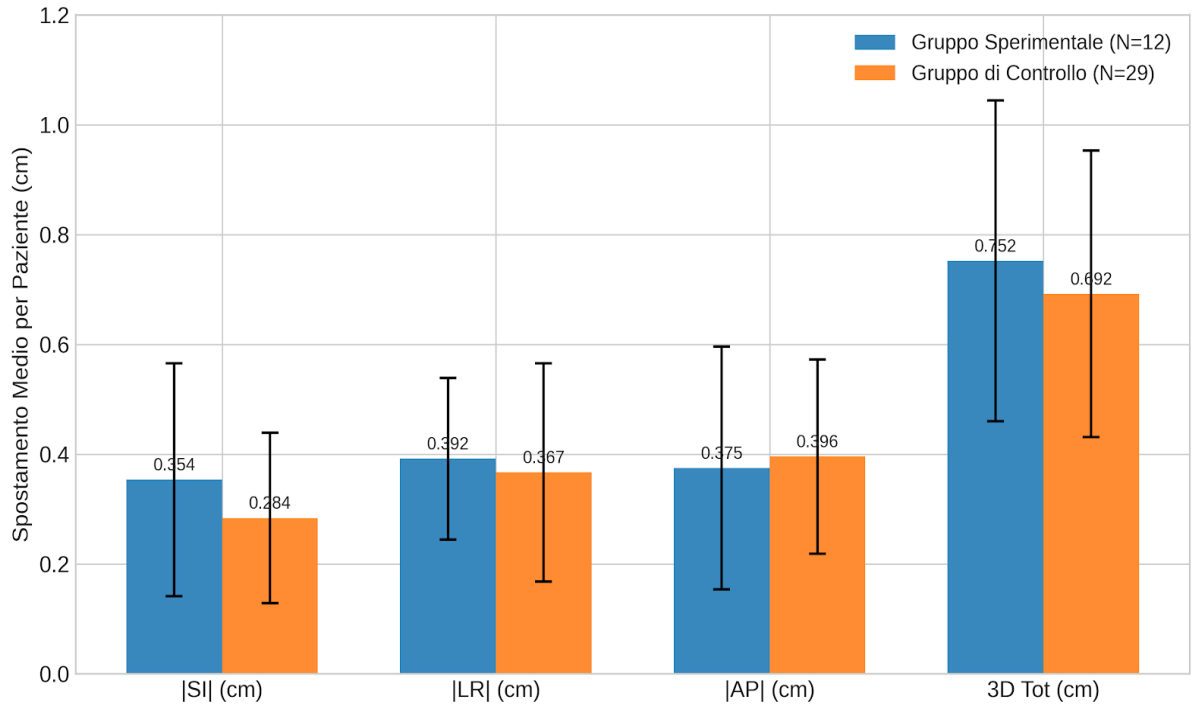


Figura 2— Spostamenti Traslazionali Inter-frazione (cm)

Come si evince dalla figura, le barre di errore (rappresentate dalla Deviazione Standard) mostrano un'ampia sovrapposizione tra i due bracci.

1. (|SI)|: per quanto riguarda il gruppo SGRT si osserva un valore medio di spostamento pari a 0,354±0,212 cm, a fronte di 0,284±0,155 cm registrato nel gruppo di controllo. La lieve ampiezza del gruppo sperimentale è accompagnata da una maggiore estensione della barra d'errore (Deviazione Standard 0,212 cm vs 0,155 cm).
2. (|LR|): l'asse trasversale mostra una sostanziale sovrapponibilità tra le due metodiche, con una media di 0,392±0,147 cm per il gruppo SGRT e di 0,367±0,199 cm per il gruppo di controllo. È interessante notare come nel gruppo SGRT la deviazione standard risulti contenuta (0,147 cm), a testimonianza di una maggiore omogeneità nell'allineamento laterale guidato dal tracciamento ottico.
3. (|AP|): sull'asse verticale/sagittale, il gruppo sperimentale riporta un errore medio di 0,375±0,221 cm, del tutto analogo a quanto riscontrato nel gruppo convenzionale (0,396±0,177 cm).
4. (3D Tot): il vettore euclideo tridimensionale, che sintetizza l'ampiezza dello spostamento spaziale complessivo, si attesta su 0,752±0,292 cm nel gruppo SGRT e 0,692±0,261 cm nel gruppo di controllo.

Le barre d'errore dei due gruppi di studio mostrano un'ampia e costante sovrapposizione in tutte e quattro le metriche. Questa sovrapposizione dimostra visivamente che l'impiego dei cuscini ad espansione poliuretanica monouso fornisce un'eccellente rigidità meccanica passiva. Il calco anatomico personalizzato è in grado, da solo, di bloccare efficacemente le macro-traslazioni rigide dell'arto, rendendo gli scostamenti traslazionali primari equivalenti indipendentemente dall'ausilio del monitoraggio di superficie in fase di setup iniziale.

Il grafico seguente illustra le deviazioni angolari medie per le componenti di Rollio (|Roll|), Tangeggio (|Pitch|), Imbardata (|Yaw|) e il modulo di rotazione 3D complessivo:

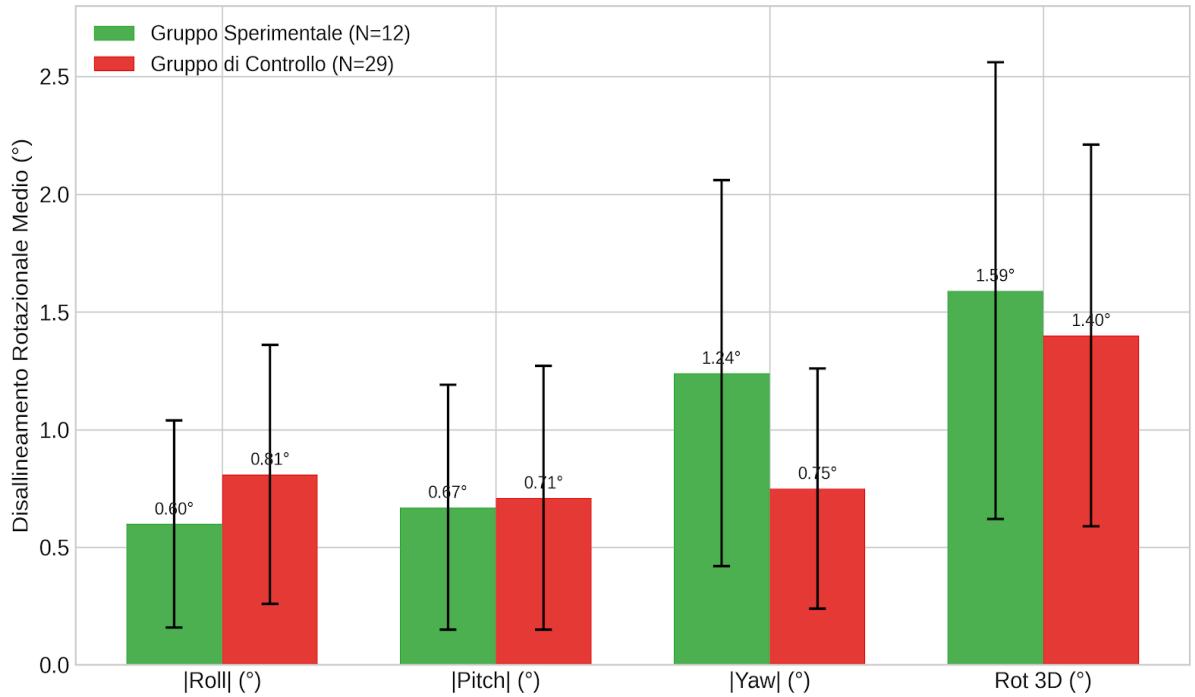


Figura 3— Disallineamenti Rotazionali Inter-frazione (Gradi °)

Ciò che si evince, invece, dalla precedente figura ci indica:

1. (|Roll|): il gruppo SGRT registra un valore medio di 0,60°±0,44°, inferiore rispetto al braccio convenzionale privo di guida ottica, il quale mostra una deviazione media di 0,81°±0,55°. La riduzione del Rollio nel gruppo SGRT indica come questo approccio faciliti l'identificazione di inclinazioni laterali o sbilanciamenti del bacino e della spalla.
2. (|Pitch)|: le due metodiche mostrano valori del tutto sovrapponibili e contenuti, pari a 0,67°±0,52° nel gruppo SGRT e 0,71°±0,56° nel gruppo convenzionale, confermando che l'appoggio piano del lettino e del cuscino limita bene i movimenti di flesso-estensione longitudinale.
3. (|Yaw|): questa componente evidenzia il comportamento più divergente tra i due gruppi. Il braccio SGRT riporta un valore medio di 1,24°±0,82°, mentre il gruppo di controllo senza SGRT registra 0,75°±0,51°.

4. (Rot 3D): Il modulo di rotazione tridimensionale globale riflette l'andamento dell'Imbardata, attestandosi su 1,59°±0,97° per il braccio sperimentale e 1,40°±0,81° per il braccio convenzionale.

2.3 Analisi statistica

Tutti i dati estratti dal sistema *Record & Verify* sono stati organizzati nei due gruppi di confronto (*SGRT*, N=12 e *SENZA SGRT*, N=29). Per sintetizzare la distribuzione complessiva dei gruppi di studio, sono state determinate la media generale ($\bar{x}$) e la deviazione standard (s) per ogni parametro.

Considerata la ridotta numerosità campionaria, la verifica delle ipotesi statistiche è stata condotta applicando il test non-parametrico di Mann-Whitney U (Wilcoxon rank-sum test) per campioni indipendenti.

Il procedimento analitico ha previsto la formulazione dell'ipotesi nulla (H0), definita come l'assenza di differenze nella distribuzione degli errori di posizionamento tra i due bracci, contrapposta all'ipotesi alternativa (H1). Tutti i 41 valori medi individuali (12+29) sono stati riuniti e ordinati in modo crescente, assegnando a ciascuno un rango progressivo da 1 a 41 (con calcolo del rango medio in caso di parità). La statistica U è stata ricavata a partire dalla somma dei ranghi R1ed R2 attraverso la relazione:

$$U_1 = n_1 + n_2 + \frac{n_1(n_1 + 1)}{2} - R_1$$

con n_1 =12 e n_2=29. Infine, il p-value esatto (due code) è stato quantificato per verificare la significatività rispetto alla soglia prefissata di $p<0,05$.

I nuovi risultati analitici del confronto statistico aggiornato sono sintetizzati nella Tabella 3, in cui è presente l'analisi statistica con test di mann-whitney U ($p < 0,05$).

COORDINATE	SGRT (N=12) Media ± Dev.Std	NO SGRT (N=29) Media ± Dev.Std	Statistica U	p-value	Significatività Statistica ($p < 0,05$)
Traslazione |SI| (cm)	0,354 ± 0,212	0,284 ± 0,155	199,0	0,4826	NO (n.s.)
Traslazione |LR| (cm)	0,392 ± 0,147	0,367 ± 0,199	202,5	0,4224	NO (n.s.)
Traslazione |AP| (cm)	0,375 ± 0,221	0,396 ± 0,177	140,0	0,3371	NO (n.s.)
Spostamento 3D Totale (cm)	0,752 ± 0,292	0,692 ± 0,261	187,0	0,7202	NO (n.s.)
Rotazione |Roll| (°)	0,598 ± 0,439	0,814 ± 0,551	132,0	0,2336	NO (n.s.)
Rotazione |Pitch| (°)	0,667 ± 0,523	0,715 ± 0,558	167,0	0,8520	NO (n.s.)
Rotazione |Yaw| (°)	1,238 ± 0,818	0,753 ± 0,512	234,0	0,0877	NO (n.s.)
Rotazione 3D Totale (°)	1,238 ± 0,818	1,402 ± 0,807	187,0	0,7198	NO (n.s.)

Tabella 3— Confronto statistico complessivo (Media ± Deviazione Standard, Statistica U e p-value del test di Mann-Whitney U) tra il gruppo di controllo (NO SGRT, N=29) e il gruppo di studio (SGRT, N=12).

2.3.1 Analisi dei tempi operativi di sala per seduta radioterapica

Per valutare l'impatto procedurale e l'efficienza organizzativa legati all'impiego della tecnologia *Surface Guided Radiation Therapy* (SGRT) nei trattamenti radioterapici degli arti, è stata condotta un'analisi quantitativa mirata a valutare la frequenza dei riposizionamenti manuali e l'impatto temporale cumulativo generato dalle manovre di correzione del setup. L'analisi dell'efficienza di sala è stata parametrizzata sul numero totale di frazioni radianti erogate alla coorte (41 pazienti complessivi per un totale di 836 sedute). Tale scelta metodologica permette di valutare l'impatto reale per singola seduta, eliminando la variabilità dovuta ai diversi schemi di trattamento prescritti. Il campione analizzato comprende il gruppo sperimentale (trattato con SGRT e cuscini poliuretanici), composto da 12 pazienti che hanno effettuato complessivamente 250 sedute e per i quali sono stati registrati 44 riposizionamenti totali. Il gruppo di controllo (trattato con metodica convenzionale tattoo-laser e cuscini poliuretanici) comprende invece 29 pazienti, per un totale di 586 sedute e 49 riposizionamenti registrati.

Per determinare la probabilità di dover riposizionare un paziente durante una generica seduta è stato calcolato il tasso medio di intervento dividendo il numero di riposizionamenti totali per il numero complessivo di sedute svolte. Nel gruppo SGRT, dividendo 44 riposizionamenti per 250 sedute, si ottiene un tasso medio di 0,18 interventi per seduta, pari a una frequenza del 17,6% (ovvero una necessità correttiva ogni 5,7 sedute circa). Nel gruppo di controllo, dividendo 49 riposizionamenti per 586 sedute, si registra un tasso di 0,08 interventi per seduta, corrispondente all'8,4% (ovvero un riposizionamento ogni 12,0 sedute). Se si osserva il dato distribuito sul singolo paziente lungo l'intero ciclo di cura, si registra una media di 3,67 interventi per paziente nel gruppo SGRT a fronte di 1,69 interventi per paziente nel gruppo convenzionale.

Nella pratica clinica, quando si rileva uno scostamento posizionale o rotazionale non tollerabile alla verifica tomografica (CBCT/OBI), il flusso di lavoro subisce un'interruzione: gli operatori TSRM devono rientrare all'interno del bunker, correggere manualmente la postura dell'arto nei presidi di immobilizzazione ed effettuare una seconda scansione radiologica di controllo (*re-imaging*). Per quantificare l'impatto di queste manovre sull'occupazione della sala, è stato considerato un tempo standard di 10 minuti per ogni procedura completa di riposizionamento e re-imaging.

Moltiplicando questo valore per il numero di interventi eseguiti, si ottiene il tempo totale perso nel corso dello studio: nel gruppo SGRT, i 44 riposizionamenti hanno generato un carico

temporale complessivo di 440 minuti, che divisi per le 250 sedute erogate si traducono in un'aggiunta media di 1,76 minuti per seduta. Nel gruppo di controllo, i 49 riposizionamenti hanno prodotto un tempo totale di 490 minuti, che distribuiti sulle 586 sedute erogate corrispondono a un'aggiunta media di 0,84 minuti per seduta.

Indicatore Operativo	**Gruppo SGRT (N=12)**	**Gruppo CONTROLLO (N=29)**	**Variazione Assoluta (Δ)**
Dimensione della coorte	12	29	−17
Frazioni totali erogate	250	586	−336
Frequenza totale riposizionamenti	44	49	−5
Media riposizionamenti per paziente	3,67	1,69	+1,98
Tasso di riposizionamento per seduta	0,18 (17,60%)	0,08 (8,36%)	+0,10 (+9,24%)
Tempo totale	440,0 min	490,0 min	−50,0 min
Tempo medio su ogni seduta	1,76 min/seduta	0,84 min/seduta	+0,92 min/seduta

Tabella 4 – Sintesi comparativa degli indici di riposizionamento e dell'impatto temporale sulle sedute di trattamento.

CAPITOLO 3: DISCUSSIONE E ANALISI DEI RISULTATI

3.1 Analisi dei dati

L'avvento e la progressiva standardizzazione della radioterapia guidata dalla superficie (*Surface Guided Radiation Therapy*, SGRT) nella pratica clinica contemporanea hanno segnato un radicale mutamento di paradigma nell'ambito delle metodiche ad alta precisione. La possibilità di mappare e tracciare in tempo reale la topografia tridimensionale della superficie corporea del paziente, mediante sistemi optoelettronici a luce strutturata non radiogeni e non invasivi, ha consentito di raggiungere livelli elevatissimi di accuratezza geometrica. Contestualmente, tale tecnologia ha permesso di ridurre l'esposizione legata alle procedure di verifica radiologica d'immagine (*Image Guided Radiotherapy*, IGRT).

Mentre l'efficacia e la sostenibilità dosimetrica della guida ottica risultano ampiamente consolidate per i distretti anatomici toraco-addominali e mammari, con particolare riferimento alle tecniche di *Deep Inspiration Breath Hold* destinate alla salvaguardia del tessuto cardiaco, la sua applicazione nel trattamento delle neoplasie degli arti superiori ed inferiori rappresenta tuttora una frontiera d'indagine complessa e di stringente attualità scientifica. Le estremità corporee costituiscono infatti un distretto anatomico caratterizzato da una spiccata incertezza posizionale interfrazione ed intrafrazione. Tale criticità è riconducibile alla presenza di articolazioni multiassiali ad ampiezza cinematica complessa, all'estrema deformabilità dei tessuti molli sottocutanei, alla potenziale insorgenza di edema post-operatorio o stravasi linfatici e alle progressive variazioni volumetriche della massa muscolare indotte dal trattamento radiante o dalle terapie steroidee concomitanti.

Il presente studio monocentrico, condotto presso la Struttura Complessa di Radioterapia dell'IRCCS Azienda Ospedaliero-Universitaria di Bologna, Policlinico Sant'Orsola-Malpighi, si è proposto di valutare in modo sistematico l'impatto dell'introduzione della tecnologia SGRT rispetto al protocollo convenzionale di allineamento guidato da puntatori laser cutanei, mantenendo costante l'impiego dei presidi di immobilizzazione ad espansione poliuretanica monouso per il distretto degli arti.

L'analisi quantitativa condotta sui dati estratti dalla piattaforma informatica aziendale di *Record & Verify* ha evidenziato una sostanziale stabilità ed equivalenza geometrica tra i due bracci di trattamento per quanto concerne le dislocazioni traslazionali lungo i tre assi ortogonali. Nel dettaglio, la verifica inferenziale eseguita mediante il test non parametrico di Mann-Whitney U

per campioni indipendenti non ha rilevato differenze statisticamente significative per alcuna delle componenti analizzate.

La traslazione media registrata lungo l'asse supero-inferiore si è attestata su un valore di 0,354 centimetri con deviazione standard di 0,212 centimetri nel gruppo sottoposto a guida SGRT, a fronte di una media di 0,284 centimetri con deviazione standard di 0,155 centimetri riscontrata nel gruppo di controllo posizionato con metodica convenzionale, evidenziando un valore di p pari a 0,4826. Analogamente, la componente latero-laterale ha riportato scostamenti medi pari a 0,392 centimetri nel braccio sperimentale e 0,367 centimetri nel braccio di controllo, associati a un valore di p pari a 0,4224, mentre sull'asse antero-posteriore si sono osservati errori medi rispettivamente pari a 0,375 centimetri e 0,396 centimetri, con un valore di p pari a 0,3371. Anche la sintesi spaziale rappresentata dal modulo di spostamento vettoriale tridimensionale totale ha confermato l'assenza di scostamenti rilevanti, registrando un valore medio per paziente di 0,752 centimetri nel gruppo dotato di supporto ottico e di 0,692 centimetri nel gruppo privo di tracciamento superficiale, con un valore di p pari a 0,7202.

L'interpretazione fisica ed ergonomica di questa equivalenza traslazionale risiede nell'elevata efficacia meccanica passiva garantita dai cuscini monouso ad espansione poliuretanica. La reazione chimica esotermica tra poliolo e isocianato, modellandosi tridimensionalmente sul profilo anatomico del paziente durante la simulazione tomografica, genera una struttura rigida personalizzata che agisce come un vincolo solido. Tale calco rigido è in grado di contenere autonomamente le macro-traslazioni dell'arto entro margini millimetrici ampiamente gestibili dalle verifiche radiologiche quotidiane, rendendo la stabilità posizionale di primo ordine del tutto indipendente dal sistema di guida ottica utilizzato in sala.

Al contrario, lo studio delle componenti rotazionali nei sei gradi di libertà ha manifestato la peculiare sensibilità della SGRT. Relativamente all'angolo di rollio, corrispondente all'inclinazione attorno all'asse longitudinale del corpo, il gruppo SGRT ha mostrato una deviazione angolare media di 0,598 gradi rispetto ai 0,814 gradi evidenziati dal braccio convenzionale, con un valore di p pari a 0,2336. Questo contenimento suggerisce che la proiezione della trama di luce strutturata sulla cute offra un fondamentale supporto visivo agli operatori, facilitando l'identificazione e l'eliminazione precoce delle inclinazioni asimmetriche a carico delle articolazioni prossimali a maggiore mobilità, quali il cingolo scapolare o la pelvi. La ragione per cui la rotazione attorno all'asse longitudinale (Rollio) risulta nettamente più evidente all'osservazione visiva mediante SGRT risiede nella natura stessa della tecnologia

ottica a proiezione di pattern. Mentre i laser tradizionali proiettano una semplice linea bidimensionale monocromatica sulla cute, il sistema SGRT proietta un'intera griglia tridimensionale di luce strutturata che avvolge la superficie anatomica. Quando un arto o un'articolazione ruota sul proprio asse longitudinale (modificando il Rollio), la griglia proiettata subisce una vistosa deformazione prospettica: la trama di luce si avvolge istantaneamente lungo la curvatura del segmento anatomico, rendendo immediatamente percepibile all'occhio del TSRM anche la minima inclinazione o torsione asimmetrica. Per comprendere intuitivamente l'impatto di questo movimento sull'allineamento dell'arto, si può considerare il piede come struttura anatomica di riferimento: un incremento del Rollio ne determina un'inclinazione/pendenza verso il lato destro (con una rotazione dell'arto su se stesso in senso orario), mentre una riduzione del Rollio provoca un'inclinazione verso il lato sinistro (con una rotazione in senso antiorario). La capacità della guida ottica di mappare visivamente l'intera superficie permette al TSRM di correggere prontamente queste inclinazioni basculanti prima dell'acquisizione radiologica.

Per quanto riguarda il beccheggio, ovvero l'inclinazione sull’asse trasversale, le due metodiche hanno mostrato valori del tutto sovrapponibili e contenuti, pari a 0,667 gradi nel braccio sperimentale e 0,715 gradi nel braccio di controllo, con un valore di p pari a 0,8520, confermando come il piano rigido del lettino e l'appoggio del cuscino limitino efficacemente i movimenti di flesso-estensione.

La divergenza computazionale più rilevante è emersa nell’analisi dell’imbardata, che rappresenta la rotazione o torsione attorno all’asse verticale e longitudinale dell’arto. Nel braccio guidato da SGRT è stato registrato un valore medio di imbardata pari a 1,238 gradi, laddove il gruppo di controllo senza guida ottica ha riportato un valore medio di 0,753 gradi, toccando una pendenza statistica prossima alla soglia di significatività con un valore di p pari a 0,0877. Tale riscontro non deve essere interpretato come un demerito o un peggioramento dell'accuratezza nel gruppo guidato dalla superficie. Al contrario, la spiegazione di questo fenomeno risiede nella dinamica operativa con cui viene eseguito il posizionamento e nella modalità di acquisizione dei dati di verifica, estratti dalle Cone Beam CT (CBCT) eseguite a valle dell'allineamento ottico. Nella pratica quotidiana, durante la fase di setup primario gestita mediante SGRT, l'operatore TSRM interagisce con l'interfaccia visiva (SGRT) correggendo in tempo reale gli scostamenti segnalati dal sistema, i quali vengono recepiti prevalentemente come vettori traslazionali. Nel tentativo di azzerare tali disallineamenti traslazionali lungo l'arto, la manovra correttiva manuale viene frequentemente applicata ad un singolo estremo del

presidio di immobilizzazione poliuretanico o del segmento anatomico, piuttosto che mediante una traslazione rigida e parallela dell'intero calco. Questo aggiustamento asimmetrico, pur ottimizzando l'allineamento traslazionale della porzione target guidata dalla SGRT, introduce una minima componente rotazionale residua, una vera e propria torsione sul piano orizzontale attorno all'asse verticale Z (imbardata), che viene successivamente registrata ed evidenziata dalla CBCT di controllo pretrattamento.

3.2 Analisi quantitativa dei tempi operativi e dell'efficienza di sala

Un altro elemento della discussione riguarda la razionalizzazione del flusso di lavoro e l'ottimizzazione dell'occupazione del bunker di terapia. L'analisi condotta sulla coorte del Policlinico Sant'Orsola (836 sedute complessive erogate su 41 pazienti), parametrizzata al numero totale di frazioni radianti e modellata assumendo un costo temporale standard di 10 minuti per ciascuna procedura di riposizionamento e re-imaging radiologico, offre un quadro realistico dell'impatto clinico della guida ottica sulla singola seduta.

Nel gruppo sperimentale, a fronte di 250 sedute totali erogate, sono stati registrati 44 riposizionamenti, pari a un tasso di 0,18 interventi per seduta (17,60%). Tali correzioni determinano un tempo che, distribuito sull'intero monte frazioni, corrisponde a un aggravio medio di 1,76 minuti per seduta. Nel gruppo di controllo, a fronte di 586 sedute totali, si registrano 49 riposizionamenti, pari a un tasso di 0,08 interventi per seduta (8,36%). Ciò genera un carico temporale equivalente a un aggravio medio di 0,84 minuti per seduta. I dati indicano un incremento netto di oltre il doppio del tasso di riposizionamento nel braccio SGRT (+9,24% in termini assoluti, 0,18 vs 0,08 interventi/seduta) e un aumento dei tempi operativi di +0,92 minuti per seduta (+109,5% rispetto al controllo).

In un'analisi strettamente quantitativa, la tecnologia SGRT non ha dimostrato di velocizzare la seduta radiante nel distretto degli arti. Le motivazioni di questa inefficienza cronometrica risiedono, in primo luogo nel bias di selezione della coorte al Policlinico Sant’Orsola; infatti, trattandosi di una tecnologia di recente introduzione ed ancora in fase di consolidamento per le estremità, è altamente verosimile che presso il Policlinico Sant'Orsola l'impiego del sistema SGRT sia stato riservato in via prioritaria ai pazienti con setup più complesso e/o scarsamente collaboranti. Casi caratterizzati da dolore, instabilità articolare severa o masse tumorali voluminose e deformabili richiedono fisiologicamente un numero maggiore di manovre correttive e tempi di assestamento più lunghi, fattore che potrebbe aver sovrastimato il tasso di riposizionamento nel braccio sperimentale rispetto a un gruppo di controllo rappresentativo di

una casistica standard. In secondo luogo, la segnalazione di disallineamenti superficiali e torsioni, dovuta alla spiccata sensibilità del sistema SGRT, spinge gli operatori TSRM a rientrare frequentemente nel bunker per correggere scostamenti superficiali. Tuttavia, come evidenziato dall'aumento dell'errore di imbardata/Yaw (p=0,0877), i tentativi manuali di azzerare le traslazioni indicate dal sistema SGRT agendo su un solo estremo del calco poliuretanico introducono torsioni indesiderate. Tali rotazioni vengono poi rilevate dalla CBCT di controllo, costringendo l'équipe a ripetere la manovra di posizionamento e l'acquisizione radiologica (*re-imaging*), con un inevitabile allungamento dei tempi di permanenza sul lettino.

In conclusione, sebbene la selezione clinica possa aver concentrato nel braccio SGRT i casi a maggiore criticità posizionale, in questo studio sperimentale della guida ottica nel distretto degli arti non sembra tradursi automaticamente in un risparmio di tempo o in una maggiore fluidità procedurale.

CAPITOLO 4: CONCLUSIONI

4.1 Sintesi delle evidenze cliniche e limiti dello studio

Lo studio condotto presso l'IRCCS Policlinico Sant'Orsola di Bologna ha fornito una valutazione concreta sull'impiego della *Surface Guided Radiation Therapy* (SGRT) nel posizionamento degli arti affetti da neoplasie.

I dati raccolti evidenziano in primo luogo un chiaro limite nell'attuale applicazione tecnologica del sistema SGRT per il distretto delle estremità. A differenza delle ampie superfici toraco-addominali o mammarie, l'impiego del sistema SGRT negli arti non ha mostrato una superiorità statisticamente significativa nel contenimento degli errori traslazionali rispetto alla metodica convenzionale al laser (D3D=0,752 cm SGRT vs 0,692 cm Controllo, p=0,7202). Questo risultato conferma la notevole efficacia passiva fornita dai cuscini monouso ad espansione poliuretanica, il cui calco anatomico rigido riesce a vincolare da solo le macro-dislocazioni dell'arto.

Inoltre, lo studio delle componenti rotazionali ha messo in luce una spiccata criticità nella gestione dell'asse di Imbardata/Yaw, dove il gruppo SGRT ha registrato un aumento dell'errore medio (1,238 gradi nel gruppo sperimentale vs 0,753 gradi nel gruppo di controllo, p=0,0877), associato a un maggior tasso di riposizionamento (17,60% vs 8,36%) e a tempi di sala più lunghi (1,76 min/seduta vs 0,84 min/seduta).

Tuttavia, il confronto con la letteratura scientifica internazionale (*Zhang et al., 2024*; *Yamashita et al., 2024*) rivela una chiara discrepanza: mentre gli studi esteri documentano una drastica riduzione degli errori di allineamento e un efficientamento dei tempi grazie al sistema SGRT, il presente studio evidenzia difficoltà operative legate a specifici limiti metodologici e procedurali:

1. Bias di selezione e stadio di adozione al Sant'Orsola: il gruppo sperimentale comprende solo 12 pazienti rispetto ai 29 del gruppo di controllo. Presso la nostra struttura, il sistema SGRT per gli arti è ancora in una fase di introduzione iniziale e selettiva. È del tutto verosimile che tale metodica sia stata destinata prioritariamente ai pazienti con un setup più complesso fragili, doloranti o con spiccata instabilità anatomica, fattore che ha inevitabilmente sovrastimato la necessità di interventi correttivi rispetto a un gruppo di controllo rappresentativo di una casistica più standardizzata.
2. Complessità nella definizione della ROI: la conformazione stretta e curva degli arti rende critica la sagomatura della *Region of Interest* (ROI). L'inclusione di articolazioni molto mobili (spalla, gomito, ginocchio) o la presenza di edemi indicono il software a segnalare falsi disallineamenti superficiali, spingendo gli operatori a rientrare nel bunker per riposizionare l'arto anche in presenza di un isocentro scheletrico corretto.
3. Manovre correttive manuali: nel tentativo di azzerare gli scostamenti traslazionali mostrati dall'interfaccia SGRT, l'operatore applica spesso la spinta manuale a un solo estremo del calco poliuretanico. Questa manovra asimmetrica, pur riducendo l'errore traslazionale locale, introduce involontariamente una torsione sull'asse verticale (Imbardata) che viene successivamente rilevata dalla CBCT di controllo, costringendo a ripetere la procedura. D'altra parte, questo studio ci ha fatto acquisire consapevolezza in merito alle le conseguenze della spinta manuale ad un solo estremo del calco poliuretanico. Questa consapevolezza potrà essere di grande utilità per ottimizzare, in futuro, le manovre di posizionamento del paziente.

La discrepanza con i dati internazionali non rispecchia quindi un'inefficacia intrinseca della tecnologia, ma dimostra la necessità di una curva di apprendimento procedurale ancora in corso nella gestione dei protocolli di posizionamento e nella sagomatura della ROI per questo specifico distretto.

4.2 Prospettive future: aspetti dosimetrici e radioprotezionistici

Superata la fase di apprendimento e standardizzate le linee guida aziendali, l'integrazione del sistema SGRT negli arti permetterà di sfruttare appieno il potenziale teorico ampiamente validato a livello internazionale (*Zhang et al., 2024*).

Nella radioterapia convenzionale guidata dai soli laser cutanei, la pronunciata mobilità articolare impone di adottare margini cautelativi molto ampi dal CTV al PTV (compresi tra 10 e 15 mm) per evitare il rischio di mancato bersaglio. L'uso ottimizzato del tracciamento superficiale continuo consentirà di validare in sicurezza una contrazione dei margini, garantendo una notevole riduzione del tessuto sano esposto ad alte dosi di radiazione.

Questa contrazione dei margini comporterebbe evidenti vantaggi in termini di riduzione di dose assorbita dai tessuti sani limitrofi al PTV, con conseguente riduzione degli effetti collaterali:

- Protezione delle strutture ossee: riduce l'esposizione non necessaria di femore, tibia o omero, prevenendo il rischio di fratture patologiche iatrogene.
- Preservazione delle articolazioni: limita l'irradiazione delle strutture capsulo-legamentose, prevenendo rigidità articolare e fibrosi.
- Prevenzione del linfedema: evita di irradiare la circonferenza completa dell'arto, risparmiando i vasi linfatici primari.

Inoltre, un allineamento iniziale più rigoroso ridurrà la necessità di ripetere scansioni tomografiche di controllo, minimizzando la dose di radiazioni aggiuntive erogata in linea con il principio ALARA. Nell'ottica dell'Health Technology Assessment (HTA), la prevenzione di tali tossicità tardive si tradurrà in un importante risparmio economico per il Servizio Sanitario Nazionale.

Punti di Forza	**Punti di Debolezza**
• Tracciamento 3D continuo non radiogeno (zero dose aggiuntiva) • Elevata sensibilità per le variazioni visive di superficie • Miglioramento del comfort e riduzione dell'ansia del paziente	• Elevato costo di acquisto dell'apparecchiatura • Complessità nella definizione della ROI su superfici strette/curve • Possibili artefatti da riflettanza con bolus o bordi del cuscino • Esigenza di addestramento specifico per l'équipe dei TSRM
Opportunità	**Sfide e Minacce**
• Sviluppo di percorsi clinici completamente Skin Marker-less • Riduzione dei margini PTV (3-5 mm) con risparmio degli OAR • Affinamento e standardizzazione dei protocolli di sala.	• Deformabilità dei tessuti molli, edemi e che porta a falsi disallineamenti superficiali • Necessità di linee guida aziendali per la sagomatura della ROI • Esigenza di validazione multicentrica su coorti più ampie

Tabella 5: Analisi SWOT

4.3 Dimensione umana, relazionale ed etica della cura radioterapica

Al di là dei riscontri geometrici e dei limiti procedurali, lo studio dimostra che la tecnologia SGRT mantiene un altissimo valore sul piano umano, relazionale ed etico. Il paziente affetto da una neoplasia agli arti affronta un percorso terapeutico gravato da forte impatto psicologico, legato al dolore post-operatorio e al timore dell'invalidità permanente.

In questo contesto, il passaggio alla guida ottica migliorerebbe sensibilmente l'esperienza di cura:

- Eliminazione dei tatuaggi: l'approccio *skin marker-less* evita i segni permanenti sulla pelle, affrancando il paziente da un doloroso memento visivo della malattia.
- Umanizzazione della sala: la proiezione della trama di luce rassicura l'assistito nel bunker, riducendo l'ansia e la comparsa di tremori involontari da sforzo.

In tutto questo processo, la figura del Tecnico Sanitario di Radiologia Medica (TSRM) si riconferma il perno centrale e insostituibile. Il TSRM non agisce come un mero esecutore della tecnologia, ma deve interpretarne criticamente i dati, distinguendo i reali disallineamenti dagli artefatti della cute e gestendo le manovre correttive in modo da evitare rotazioni parassite. La padronanza del sistema SGRT permette di convertire il tempo di sala in uno spazio di ascolto, accoglienza e supporto empatico, unendo il rigore della precisione radiologica con la dimensione più profonda dell'umanizzazione delle cure.

LA BIBLIOGRAFIA:

Bortfeld, T., 2006. IMRT: a review. *Physics in Medicine & Biology*, 51(13), pp. R363-R379.

Cacici, G., 2024. *Sistemi di immobilizzazione e di precisione in radioterapia: analisi dei dati e valutazioni operative*. Tesi di Laurea, Università di Bologna, AMS Laurea.

Dawson, L.A. e Sharpe, M.B., 2006. Image-guided radiation therapy: a review. *The Lancet Oncology*, 7(10), pp. 846-855.

Dickie, C.I., Parent, A.L., Chung, P.W., Catton, C.N., Craig, T., Griffin, A.M., Panzarella, T., Ferguson, P.C., Wunder, J.S., Bell, R.S., Sharpe, M.B. e O'Sullivan, B., 2010. Measuring interfractional and intrafractional motion with cone beam computed tomography and an optical localization system for lower extremity soft tissue sarcoma patients treated with preoperative intensity-modulated radiation therapy. *International Journal of Radiation Oncology*Biology*Physics*, 78(5), pp. 1437-1444.

Gierga, D.P., Turcotte, J.C., Tong, L.W., Chen, Y.L.E. e DeLaney, T.F., 2014. Analysis of setup uncertainties for extremity sarcoma patients using surface imaging. *Practical Radiation Oncology*, 4(4), pp. 261-266.

Hoisak, J.D. e Pawlicki, T., 2018. The Role of Optical Surface Imaging Systems in Radiation Therapy. *Seminars in Radiation Oncology*, 28(3), pp. 185-193.

Jaffray, D.A., 2012. Image-guided radiotherapy: from theory to practice. *Nature Reviews Clinical Oncology*, 9(12), pp. 688-699.

Khan, F.M. e Gibbons, J.P., 2014. *Khan's The Physics of Radiation Therapy*. 5ª ed. Philadelphia: Wolters Kluwer Health.

Kim, A., Kelly, V., Dickie, C., Catton, C. e Li, W., 2019. Impact of Immobilization on Interfractional Errors for Upper Extremity Soft Tissue Sarcoma Radiation Therapy. *Journal of Medical Imaging and Radiation Sciences*, 50(2), pp. 309-316.

Nutting, C.M. e Dearnaley, D.P., 2002. Intensity-modulated radiation therapy: a clinical review. *The British Journal of Radiology*, 75(894), pp. 481-488.

Otto, K., 2008. Volumetric modulated arc therapy: IMRT in a single gantry arc. *Medical Physics*, 35(1), pp. 310-317.

Perez, C.A., Brady, L.W., Halperin, E.C. e Schmidt-Ullrich, R.K., 2019. *Principles and Practice of Radiation Oncology*. 7ª ed. Philadelphia: Lippincott Williams & Wilkins.

Teoh, M., Clark, C.H., Wood, K., Whitaker, S. e Nisbet, A., 2011. Volumetric modulated arc therapy: a review of current literature and clinical use in practice. *The British Journal of Radiology*, 84(1007), pp. 967-996.

Verellen, D., De Ridder, M., Linthout, N., Tournel, K., Soete, G. e Storme, G., 2007. Innovations in radiation oncology. *Nature Reviews Cancer*, 7(12), pp. 949-960.

Yamashita, K., Shimizu, T., Miyabayashi, K., Iwase, T., Togasaki, G. e Hara, R., 2024. Utility of a skin marker-less setup procedure using surface-guided imaging: a comparison with the traditional laser-based setup in extremity irradiation. *Radiological Physics and Technology*, 17(2), pp. 569-577.

Yu, C.X. e Tang, G., 2011. Intensity-modulated arc therapy: principles, technologies and clinical implementation. *Physics in Medicine & Biology*, 56(5), pp. R31-R54.

Zhang, Y.X., Huan, F.K., Wan, B., Li, Z.H., Li, W., Zhu, G.Q., Wang, Z.W., Chen, H., Hou, L., Jing, H., Wang, S.L. e Lu, N.N., 2024. Optical Surface-guided Radiation Therapy for Upper and Lower Limb Sarcomas: An Analysis of Setup Errors and Clinical Target Volume-To-Planning Target Volume Margins. *Advances in Radiation Oncology*, 9(8), p. 101526.

SITOGRAFIA

Campagna, M.G. (2016). *Tumore: i bambini sorridono grazie ai supereroi*. Ultima Voce, [online] 8 agosto. Disponibile su: https://www.ultimavoce.it/tumore-maschere-di-supereroi/ [Consultato il: 12 luglio 2026].