

POLITECNICO DI TORINO

Corso di laurea in Ingegneria Meccanica

Prova Finale

Progetto Preliminare di un Robot per la Sostituzione dei Tubi nei Condotti di Accesso al Reattore a Fusione Nucleare DTT



Relatori

Prof. Stefano Mauro
Dott. Giulia Calvo
Dott. Davide Sorli

Candidato

Lino Sartori

Marzo 2025

Abstract

La decarbonizzazione rappresenta una delle sfide più significative del nuovo millennio, guidando l'evoluzione tecnologica e industriale verso soluzioni innovative e sostenibili. Tra le iniziative più ambiziose in tale ambito vi è lo sviluppo della fusione nucleare come fonte di energia *Carbon Free* o *Low Carbon*. L'Unione Europea ha intrapreso iniziative significative in questa direzione, con l'obiettivo di iniziare la costruzione della prima centrale a fusione nucleare entro la metà del secolo. Un passo cruciale verso questo traguardo è rappresentato dal reattore sperimentale DTT (Divertor Tokamak Testing), destinato a testare materiali, tecnologie e sistemi di manutenzione da remoto per le future centrali ITER e DEMO.

Questa tesi si inserisce nell'ambito del progetto DTT e si focalizza sul design preliminare di un robot manipolatore per il *pipes handling* all'interno dei condotti del reattore. Sono state inizialmente analizzate diverse configurazioni del manipolatore, valutate in base a criteri quali workspace, destrezza e simulazioni delle traiettorie. È stata selezionata una configurazione ottimale, definiti i motoriduttori per i giunti e progettati i modelli CAD preliminari dei *link*. Infine, è stato progettato un end-effector per smontare i collari in cui si trovano i tubi e afferrarli.

I motoriduttori costituendo, all'interno del robot, le zone a maggiore densità devono avere un'elevata densità di potenza pur garantendo un'elevata precisione. Per soddisfare tali esigenze, sono stati scelti dei componenti non convenzionali. Questi, inoltre, permettono di ridurre sensibilmente gli ingombri dei giunti.

L'end-effector è dotato di due gripper in grado di afferrare le coppie di tubi e due avvitatori che permettono il fissaggio delle parti superiori e inferiori dei collari. Per ridurre al minimo il peso dell'end-effector è stato necessario intervenire sulla geometria dei collari, ottimizzandola per migliorare sia la semplicità del sistema di fissaggio che il centraggio preciso dei tubi. Questo approccio ha permesso di ottenere un bilanciamento tra leggerezza e precisione, garantendo un funzionamento efficiente del sistema.

Sommario

INDICE DELLE FIGURE	VIII
INDICE DELLE TABELLE	XII
INTRODUZIONE	1
CAPITOLO 1 IMPIANTO DTT	5
1.1 Panoramica del Progetto.....	5
1.2 Struttura del Reattore	8
1.3 Collari.....	15
CAPITOLO 2 PROGETTO PRELIMINARE DEL REMOTE HANDLING	20
2.1 Progetto Preliminare.....	21
CAPITOLO 3 CONFIGURAZIONI DEL MANIPOLATORE	25
3.1 Generazione Configurazioni	26
3.2 Presentazione Configurazioni	28
CAPITOLO 4 VALUTAZIONE DELLE CONFIGURAZIONI	41
4.1 Workspace.....	43
4.1.1 Metodo di Calcolo	44
4.1.2 Workspace delle Configurazioni.....	44
4.1.3 Conclusioni Workspace.....	56
4.2 Destrezza	57
4.2.1 Metodo di Calcolo	58
4.2.2 Indice di Condizionamento delle Configurazioni	58
4.2.3 Conclusioni Indice di Condizionamento	65
4.3 Studio delle Traiettorie.....	67

4.3.1	Traiettorie delle Configurazioni	68
4.4	Scelta Configurazione	88
CAPITOLO 5 MODELLAZIONE DEL ROBOT E VERIFICA TRAIETTORIE		91
5.1	Scelta dei Motori e dei Riduttori	91
5.2	Modifiche Configurazione Finale	100
CAPITOLO 6 MODELLAZIONE DELL'END-EFFECTOR		104
6.1	Modello del Gripper	104
6.2	Modello dell'Avvitatore	106
6.3	Modello del telaio.....	107
6.4	Sequenza di funzionamento	109
CAPITOLO 7 RISULTATI OTTENUTI		111
CAPITOLO 8 CONCLUSIONI E LAVORI FUTURI		115
APPENDICE A CODICI MATLAB E SIMULINK		117
A.1	Definizione lunghezze link.....	117
A.2	Simulink Rigid Body Tree	119
A.3	Salvataggio modello robot	120
A.4	Calcolo del workspace	120
A.5	Calcolo indice di condizionamento	123
A.6	Generatore di traiettorie	125
A.7	Simulink Cinematica inversa	127
APPENDICE B CENNI TEORICI		128
B.1	Trasformata Omogenea	130
B.2	Cinematica Diretta.....	131
B.3	Convenzione Denavit – Hartenberg	132

B.4	Cinematica inversa	134
B.5	Jacobiana geometrica	134
BIBLIOGRAFIA		136

INDICE DELLE FIGURE

Figura 1: Roadmap dei progetti ITER e DEMO [2].....	1
Figura 2: Sezione del reattore con andamento flusso di calore [5]	6
Figura 3: Layout del sito ENEA di Frascati.....	9
Figura 4: Vista di un modulo standard del VV con rappresentazione dei magneti e del divertore	10
Figura 5: Numero e dimensioni condotti.....	11
Figura 6: Sezione del condotto 2.....	13
Figura 7: Sezione condotto 3.....	14
Figura 8: Sezione condotto 4.....	14
Figura 9: Design iniziale dei collari	15
Figura 10: Geometria finale tubi + collari.....	17
Figura 11: Dettaglio Pin di centraggio	18
Figura 12: Dettaglio tubi con parte superiore collare.....	18
Figura 13: Schema generico delle direzioni di rotazione robot	21
Figura 14: Struttura configurazione iniziale.....	22
Figura 15: Spazio di lavoro e singolarità confrontati con il condotto 4.....	23
Figura 16: CAD del manipolatore nella fase preliminare della progettazione.....	24
Figura 17: Simulink Rigid_body_tree_1	27
Figura 18: Subsystem 1	28
Figura 19: Grandezze I Configurazione	29
Figura 20: I Configurazione	30
Figura 21: Grandezze II Configurazione.....	31
Figura 22: II Configurazione.....	32
Figura 23: Grandezze III Configurazione	32
Figura 24: III Configurazione	34
Figura 25: Grandezze IV Configurazione.	34
Figura 26: IV Configurazione	35
Figura 27: Grandezze V Configurazione	36
Figura 28: V Configurazione.....	37
Figura 29: Grandezze VI Configurazione	38
Figura 30: VI configurazione	39

Figura 31: Grandezze VII Configurazione.....	39
Figura 32: VII configurazione.....	40
Figura 33: Workspace Condotta 2 e Configurazione 1.....	45
Figura 34: Workspace Condotta 3 e Configurazione 1.....	45
Figura 35: Workspace Condotta 4 e Configurazione 1.....	46
Figura 36: Prospettiva Workspace Condotta 4 e Configurazione 1.....	47
Figura 37: Workspace Condotta 2 e Configurazione 2.....	47
Figura 38: Workspace Condotta 3 e Configurazione 2.....	48
Figura 39: Workspace Condotta 4 e Configurazione 2.....	48
Figura 40: Workspace Condotta 2 e Configurazione 3.....	49
Figura 41: Workspace Condotta 3 e Configurazione 3.....	49
Figura 42: Workspace Condotta 4 e Configurazione 3.....	50
Figura 43: Workspace Condotta 2 e Configurazione 4.....	50
Figura 44: Workspace Condotta 3 e Configurazione 4.....	51
Figura 45: Workspace Condotta 4 e Configurazione 4.....	51
Figura 46: Workspace Condotta 2 e Configurazione 5.....	52
Figura 47: Workspace Condotta 3 e Configurazione 5.....	52
Figura 48: Workspace Condotta 4 e Configurazione 5.....	53
Figura 49: Workspace Condotta 2 e Configurazione 6.....	53
Figura 50: Workspace Condotta 2 e Configurazione 6.....	54
Figura 51: Workspace Condotta 2 e Configurazione 6.....	54
Figura 52: Workspace Condotta 2 e Configurazione 7.....	55
Figura 53: Workspace Condotta 3 e Configurazione 7.....	55
Figura 54: Workspace Condotta 4 e Configurazione 7.....	56
Figura 55: Indice di condizionamento della I configurazione.....	59
Figura 56: Indice di condizionamento della II configurazione.....	60
Figura 57: Indice di condizionamento della III configurazione.....	61
Figura 58: Indice di condizionamento della IV configurazione.....	62
Figura 59: Indice di condizionamento della V configurazione.....	63
Figura 60: Indice di condizionamento della VI configurazione.....	64
Figura 61: Indice di condizionamento della VII configurazione.....	65
Figura 62: Traiettoria Condotta 4, tubi bassi, I Configurazione.....	69
Figura 63: Simulazione condotta 4, tubi laterali, I Configurazione.....	70
Figura 64: Simulazione condotta 4, tubi laterali, II Configurazione.....	71

Figura 65: Simulazione condotto 4, tubi laterali, III Configurazione	71
Figura 66: Simulazione condotto 4, tubi laterali, IV Configurazione	72
Figura 67: Traiettoria Condotto 4, tubi laterali, IV Configurazione	72
Figura 68: Traiettoria Condotto 4, tubi bassi, IV Configurazione	73
Figura 69: Traiettoria Condotto 3, tubi bassi a destra, IV Configurazione	74
Figura 70: Traiettoria Condotto 3, tubi bassi centrali, IV Configurazione	75
Figura 71: Traiettoria Condotto 3, tubi laterali alti, IV Configurazione	75
Figura 72: Simulazione condotto 3, tubi laterali alti, IV Configurazione	76
Figura 73: Traiettoria Condotto 3, tubi laterali bassi, IV Configurazione	77
Figura 74: Traiettoria Condotto 4, tubi laterali, V Configurazione	78
Figura 75: Traiettoria Condotto 4, tubi bassi, V Configurazione.....	79
Figura 76: Traiettoria Condotto 3, tubi bassi a destra, V Configurazione	80
Figura 77: Traiettoria Condotto 3, tubi bassi centrali, V Configurazione.....	80
Figura 78: Traiettoria Condotto 3, tubi laterali in alto, V Configurazione	81
Figura 79: Traiettoria Condotto 3, tubi laterali in basso, V Configurazione	82
Figura 80: Simulazione condotto 4, tubi laterali alti, VI Configurazione	83
Figura 81: Traiettoria Condotto 4, tubi laterali, VII Configurazione.....	84
Figura 82: Traiettoria Condotto 4, tubi bassi, VII Configurazione	84
Figura 83: Traiettoria Condotto 3, tubi bassi a destra, VII Configurazione.....	85
Figura 84: Traiettoria Condotto 3, tubi bassi centrali, VII Configurazione.....	86
Figura 85: Traiettoria Condotto 3, tubi laterali in alto, VII Configurazione.....	86
Figura 86: Traiettoria Condotto 3, tubi laterali bassi, VII Configurazione.....	87
Figura 87: Esploso di un riduttore armonico.....	96
Figura 88: Esploso del giunto 1.....	99
Figura 89: Rendering struttura della VII Configurazione	99
Figura 90: Traiettoria con dimensioni reali VII configurazione	100
Figura 91: Simulazione ingombro VII Configurazione modificata	101
Figura 92: struttura VII Configurazione modificata	101
Figura 93: Indice di condizionamento VII Configurazione modificata	102
Figura 94: Vista Gripper	105
Figura 95: Vista avvitatore.....	106
Figura 96: Telaio end-effector.....	107
Figura 97: Vista in prospettiva dell'End Fffector montato	108
Figura 98: Vista frontale dell'end-effector.....	109

Figura 99: Traiettoria Condotta 4, tubi laterali, Configurazione finale	111
Figura 100: Traiettoria Condotta 4, tubi bassi, Configurazione finale	112
Figura 101: Traiettoria Condotta 3, tubi bassi centrali, Configurazione finale	112
Figura 102: Traiettoria Condotta 3, tubi bassi a destra, Configurazione finale.....	113
Figura 103: Traiettoria Condotta 3, tubi laterali alti, Configurazione finale	113
Figura 104: Traiettoria Condotta 3, tubi laterali bassi, Configurazione finale	114
Figura 105: Posizione e orientamento di un corpo.....	128
Figura 106: Vettori posizione di un punto generico.....	129
Figura 107: Definizione di un punto da 2 sistemi di riferimento diversi	130
Figura 108: Cinematica diretta.....	131
Figura 109: parametri cinematici Denavit – Hartenberg.....	132

INDICE DELLE TABELLE

Tabella 1: Parametri DH	22
Tabella 2: DH I configurazione.....	29
Tabella 3: Limiti joint I configurazione	29
Tabella 4: DH II configurazione	31
Tabella 5: Limiti joint II configurazione.....	31
Tabella 6: DH III configurazione	33
Tabella 7: Limiti joint III configurazione	33
Tabella 8: DH IV configurazione.....	35
Tabella 9: Limiti joint IV configurazione	35
Tabella 10: DH V configurazione	36
Tabella 11: Limiti joint V configurazione.....	37
Tabella 12: DH VI configurazione.....	38
Tabella 13: Limiti joint VI configurazione	38
Tabella 14: DH VII configurazione.....	40
Tabella 15: Limiti joint VII configurazione.....	40
Tabella 16: Confronto indici di condizionamento massimi nel workspace	66
Tabella 17: Indice di condizionamento medio all'interno del workspace	66
Tabella 18: Indici Condotta 4, tubi bassi I Configurazione	69
Tabella 19: Indici Condotta 4, tubi laterali IV Configurazione	73
Tabella 20: Indici Condotta 4, tubi bassi IV Configurazione	73
Tabella 21: Indici Condotta 3, tubi bassi a destra, IV Configurazione.....	74
Tabella 22: Indici Condotta 3, tubi bassi centrali, IV Configurazione	74
Tabella 23: Indici Condotta 3, tubi laterali alti, IV Configurazione	76
Tabella 24: Indici Condotta 3, tubi laterali bassi, IV Configurazione	76
Tabella 25: Indici Condotta 4, tubi laterali, V Configurazione	78
Tabella 26: Indici Condotta 4, tubi bassi, V Configurazione.....	79
Tabella 27: Indici Condotta 3, tubi bassi a destra, V Configurazione	79
Tabella 28: Indici Condotta 3, tubi bassi centrali, V Configurazione.....	81
Tabella 29: Indici Condotta 3, tubi laterali in alto, V Configurazione	81
Tabella 30: Indici Condotta 3, tubi laterali in basso, V Configurazione	82
Tabella 31: Indici Condotta 4, tubi laterali, VII Configurazione.....	83

Tabella 32: Indici Condotta 4, tubi bassi, VII Configurazione	85
Tabella 33: Indici Condotta 3, tubi bassi a destra, VII Configurazione.....	85
Tabella 34: Indici Condotta 3, tubi bassi centrali, VII Configurazione	85
Tabella 35: Indici Condotta 3, tubi laterali in alto, VII Configurazione.....	87
Tabella 36: Indici Condotta 3, tubi laterali bassi, VII Configurazione.....	87
Tabella 37: Confronto indice di condizionamento delle traiettorie per le configurazioni idonee	89
Tabella 38: Masse ipotetiche.....	92
Tabella 39: Masse ipotetiche Joint	92
Tabella 40: Grandezze risultanti condotta 4, tubi bassi centrali	92
Tabella 41: Grandezze risultanti condotta 4, tubi laterali	93
Tabella 42: Grandezze risultanti condotta 3, tubi bassi centrali	93
Tabella 43: Grandezze risultanti condotta 3, tubi bassi laterali	93
Tabella 44: Grandezze risultanti condotta 3, tubi laterali più alti	94
Tabella 45: Grandezze risultanti condotta 4, tubi laterali più bassi	94
Tabella 46: Massimi valori per ogni giunto	94
Tabella 47: Dati riduttori armonici.....	97
Tabella 48: Dati motori frameless	98
Tabella 49: Dati servoattuatore ultimo joint	98
Tabella 50: DH Configurazione finale	103

INTRODUZIONE

L'aumento del fabbisogno di energia elettrica unito ad una maggiore attenzione all'ambiente hanno spinto gli stati dell'UE e la Svizzera a fondare EUROfusion: commissione europea per lo sviluppo delle tecnologie per la produzione di energia attraverso la fusione [1]. Fondata nel 2014, EUROfusion ha stabilito una *roadmap* di *test facility* volti alla produzione energia attraverso la Fusione nucleare. I progetti pilastri sul quale si basano la maggior parte dei test sono ITER e DEMO.

Il progetto ITER è a puro scopo sperimentale: ha come obiettivo principale lo studio del plasma all'interno del reattore, non è pensato per una produzione a livello commerciale. Il progetto DEMO ha come scopo ultimo quello di dimostrare la convenienza di produrre energia attraverso fusione nucleare, sia su un piano economico che di sostenibilità ambientale. Inoltre, con questo esperimento si vogliono testare i materiali e le tecnologie necessarie per corretto funzionamento di un futuro reattore a fusione nucleare che possa essere commercializzato. [2]

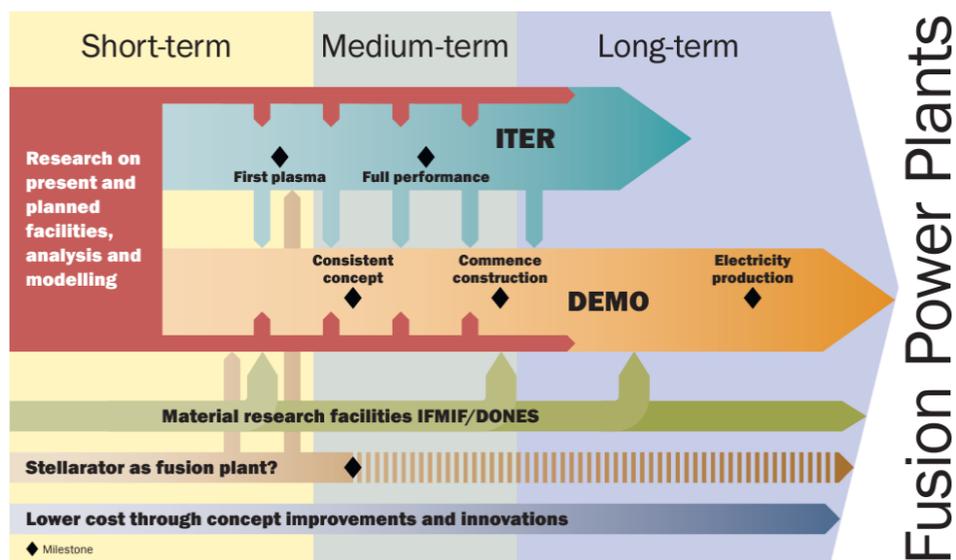


Figura 1: Roadmap dei progetti ITER e DEMO [2]

Lo studio della fusione nucleare inizia nel 1920, quando l'astrofisico Arthur Eddington suggerì che le stelle generassero la loro energia dal processo di fusione dell'idrogeno in elio. È "solo" negli anni '50 che gli studiosi intuiscono l'enorme potenziale di questa reazione ed iniziano così a valutare la possibilità di replicare il processo di fusione sulla terra. Proprio in quell'anno, gli scienziati sovietici Andrei Sakharov e Igor Tamm, progettarono un sistema di confinamento magnetico per la fusione: il Tokamak.

All'inizio degli anni '70 era ormai chiara la necessità di investire nella ricerca per la produzione di energia attraverso la fusione nucleare. Gli stati europei si fecero avanti e avviarono il progetto del JET (*Joint European Torus*): il più grande esperimento di confinamento magnetico del plasma. Il JET fu terminato nel 1983 e così iniziò lo studio di fattibilità per la produzione di questa nuova fonte di energia. Il metodo per stabilire l'efficienza della reazione viene calcolato il rapporto:

$$Q = \frac{\text{Energia prodotta}}{\text{Energia richiesta per la reazione}}$$

Il record è stato stabilito nel 1997 con un rapporto $Q = 0,67$, il *target* per il progetto ITER è quello di raggiungere $Q = 10$. [3]

Al fine di raggiungere gli obiettivi imposti per il reattore DEMO è necessario lo studio di alcuni componenti critici, tra i quali il divertore. L'ottimizzazione di questo elemento viene effettuata con il progetto DTT (*Divertor Tokamak Test facility*) gestito da ENEA. Il progetto, lo scopo e la struttura verranno analizzati nel primo capitolo della tesi. Come verrà evidenziato, il reattore necessita di una costante manutenzione, la quale non può essere effettuata manualmente a causa della radioattività indotta nei componenti del reattore. Questa tesi ha lo scopo di progettare un robot che compia operazioni di *pipes handling* all'interno dei condotti di manutenzione.

In particolare, il progetto verte sulla definizione della geometria e la ricerca della migliore configurazione dei giunti del robot in modo che questo operi in più condotti. Si

tratta di un processo iterativo in cui vengono valutati: il raggiungimento della posizione di prelievo (rilascio) tubi, la prevenzione di collisioni all'interno dei condotti e lo studio della destrezza del manipolatore. Per questo tipo di operazioni è richiesta un'ottima precisione di posizionamento ma non sono richieste particolari performance in termini di tempo.

Inizialmente, viene presentato il reattore, includendo una panoramica sulla sua storia, gli obiettivi e il funzionamento, con un'attenzione particolare alla struttura e ai condotti in cui il robot andrà a operare. Saranno inoltre illustrate le operazioni previste all'interno di questi condotti, nonché eventuali problematiche che emergeranno, le quali saranno approfondite nei capitoli successivi.

Nel secondo capitolo vengono introdotte le diverse configurazioni analizzate nell'ambito dell'elaborato, le quali saranno valutate nei capitoli successivi in base a criteri specifici.

Successivamente per ciascuna struttura, saranno analizzati il *workspace*, la destrezza e le traiettorie eseguite dal robot all'interno del condotto. Infine, i risultati ottenuti saranno confrontati al fine di individuare la configurazione ottimale per il robot.

Nel quarto capitolo vengono dimensionati i componenti meccanici della struttura robotica. Utilizzando i software *Simulink* e *Matlab*, sono calcolate le coppie necessarie ai giunti per eseguire i percorsi previsti. Questi dati vengono dati utilizzati per la selezione dei motori e dei riduttori. Si procede quindi con la progettazione dei *link* mediante modellazione CAD 3D. Il capitolo si conclude con la presentazione delle simulazioni del robot operante all'interno del condotto, mettendo in evidenza eventuali criticità riscontrate.

Conclusa l'analisi relativa alla struttura robotica, si procede con la progettazione dell'end-effector.

Come capitolo conclusivo si esegue un sunto di tutti i risultati ottenuti, comprese le simulazioni dei modelli finali di robot ed end-effector. In aggiunta, vengono presentati i lavori futuri che riguardano il progetto.

Prima di procedere con l'elaborato di tesi, è importante sottolineare che si tratta di uno studio preliminare, il cui obiettivo principale è la definizione della cinematica del robot e l'analisi dell'end-effector. Le scelte relative ai componenti meccanici e alla configurazione strutturale del robot non devono essere considerate definitive, ma servono a illustrare possibili soluzioni di assemblaggio. Inoltre, una progettazione preliminare di tali elementi è necessaria per fornire stime iniziali riguardo a peso e ingombro, fondamentali per le fasi successive dello sviluppo.

CAPITOLO 1

IMPIANTO DTT

Le pagine di questo capitolo saranno dedicate all'approfondimento del progetto DTT (*Divertor Tokamak Test facility*). In una prima parte viene fornita una panoramica del progetto: storia, obiettivi e funzionamento. Successivamente, si introduce la struttura del reattore, con particolare attenzione ai condotti in cui il robot è destinato a operare. In conclusione, vengono presentate le modifiche ai collari di fissaggio dei tubi.

1.1 Panoramica del Progetto

L'intento del Consorzio EUROfusion è di realizzare un impianto dimostrativo (DEMO) di una centrale a fusione nucleare in grado di fornire energia elettrica alla rete entro il 2050. Con il progetto francese (ITER) già avviato che sfrutta un divertore basato sulle condizioni di completo distacco del plasma si è deciso, a causa di problemi tecnologici, di portare avanti un progetto parallelo: il DTT. [4]

Il divertore, in un impianto a fusione nucleare, è il sistema dove energia e particelle sono trasportate all'esterno del plasma attraverso canali non neutronici.

In un plasma di fusione, confinato magneticamente e in condizioni stazionarie, per ricavare energia è necessario estrarre l'energia sia introdotta attraverso i sistemi di riscaldamento ausiliari sia quella prodotta dalle reazioni di fusione. L'energia nei canali neutronici è raccolta isotropicamente all'interno del mantello. Di questa, in parte viene convertita in energia elettrica e in parte è utilizzata per l'autofertilizzazione del trizio.

Invece, l'energia associata alle particelle cariche che sfuggono al campo magnetico di confinamento viene esausta nel divertore, il quale deve essere progettato per resistere a elevati carichi energetici. Analizzando l'immagine di Figura 2 possiamo notare come il calore generato dalle reazioni di fusione (freccette arancioni) attraversa il bordo del plasma (linea arancione) e fluisce lungo uno stretto strato (freccette gialle) verso il divertore (componente in basso, in prossimità dell'intersezione delle linee) da cui viene estratto.

[5]

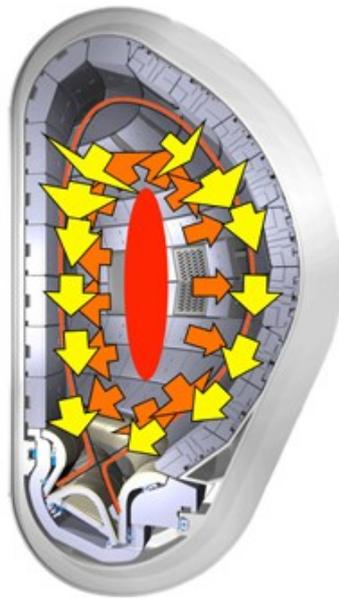


Figura 2: Sezione del reattore con andamento flusso di calore [5]

In aggiunta, bisogna considerare che la superficie esposta a questo elevato carico di energia è molto piccola, questo fatto esalta la criticità del divertore. Scalando le condizioni riscontrate in ITER nello scenario di progettazione del DEMO per il quale si avrà un $Q=10$, con 500MW netti di potenza della fusione, dei quali 80% trasportati dai neutroni e il restante perso per via di radiazioni e particelle. Sul divertore ci si aspettano 90 MW di potenza in un caso di bassa radiazione, Seguendo l'ordine di grandezza di

questi dati ci si aspetterebbe un flusso di calore nell'intorno di 50 MW/m^2 , valore molto al di sopra dei limiti dei materiali presi in considerazione fino ad ora.

Il rischio che la strategia utilizzata in ITER, basata sull'utilizzo di divertori standard di medio/grandi dimensioni possa non funzionare per un impianto a fusione nucleare è concreta. Ecco, appunto, da dove nasce la necessità di un progetto intermedio come il DTT: colmare le lacune tecniche e tecnologiche tra un impianto a scopo di ricerca e un impianto che possa essere commercializzato. I tre principali obiettivi del progetto sono:

- Sviluppo dei componenti vicini al plasma. Questi devono avere elevata resistenza a flussi termici, inclusa la dimostrazione che un sistema di riduzione del calore attraverso in circuito chiuso di metallo liquido possa funzionare in un tokamak.
- Comprensione fisica del processo di scarico finalizzata all'ottimizzazione del design del divertore. In particolare, si cerca di modificare la topologia del componente in modo da aumentare la superficie "bagnata" e di conseguenza ridurre il flusso termico. Si prende in considerazione l'utilizzo di metalli liquidi per i componenti vicini al plasma anche in questo caso.
- Modificare il plasma "drogandolo" in modo da aumentare la componente di radiazione e avere una minore potenza termica sui componenti vicini a questo, pur mantenendo elevate prestazioni del plasma.

Il reattore per il progetto DTT è un tokamak superconduttore con un vacuum vessel a doppio strato di acciaio inossidabile con un raggio maggiore $R = 2,11 \text{ m}$ e un raggio minore $a = 0,64 \text{ m}$. Il campo toroidale massimo è $B_T = 6 \text{ T}$ e la durata massima della scarica consentita dagli alimentatori e dalle bobine superconduttrici è di 100 s . La corrente massima del plasma negli scenari di riferimento è $I_p = 5,5 \text{ MA}$, con una potenza ausiliaria aggiuntiva $P_{\text{Tot}} = 45 \text{ MW}$.

Al tempo della pubblicazione del *Interim Design Report* [6], l'inizio della costruzione era previsto per la fine del 2025, assumendo che il design del primo divertore fosse concluso entro il 2022. Le tempistiche richieste per la costruzione dell'impianto sono state ipotizzate attorno ai 7 anni per il compimento dell'opera. L'attività di lavoro pervista per il progetto DTT copre un periodo previsto di circa 25 anni fino alle fasi iniziali del progetto DEMO.

Il luogo stabilito dalla commissione per la costruzione del reattore è il sito ENEA di Frascati. Questa zona è una delle più grandi aree di ricerca d'Europa, infatti, oltre ad ENEA, sono presenti molti istituti di ricerca, come: the *European Space Observatory*, l'Istituto Nazionale per la Fisica Nucleare (INFN), il Centro Nazionale della Ricerca (CNR), l'Istituto Nazionale di Astrofisica (INAF) e il campus dell'università di Tor Vergata.

Il DTT è un investimento in diversi settori chiave dell'innovazione e della ricerca, in particolare nel settore dell'energia. Il progetto include una forte collaborazione con diverse università italiane ed europee. [6]

1.2 Struttura del Reattore

Come citato precedentemente, è stato scelto come sito ospitante l'impianto il centro di ricerca ENEA di Frascati. Essendo un centro già esistente e funzionante dovrà essere ampliato per ospitare componenti fondamentali per il funzionamento del reattore, come ad esempio:

- Strutture per i sistemi di riscaldamento ausiliari del plasma;
- L'impianto criogenico;
- Zona dei trasformatori dell'alta tensione (150 kV);

- Area dei convertitori AC/DC
- Stazione per il sistema di raffreddamento dell'acqua secondario;
- Reattore Tokamak.

Nella Figura 3 le strutture evidenziate sono quelle che verranno aggiunte per il reattore.

L'edificio cerchiato in blu è quello che ospiterà il reattore.

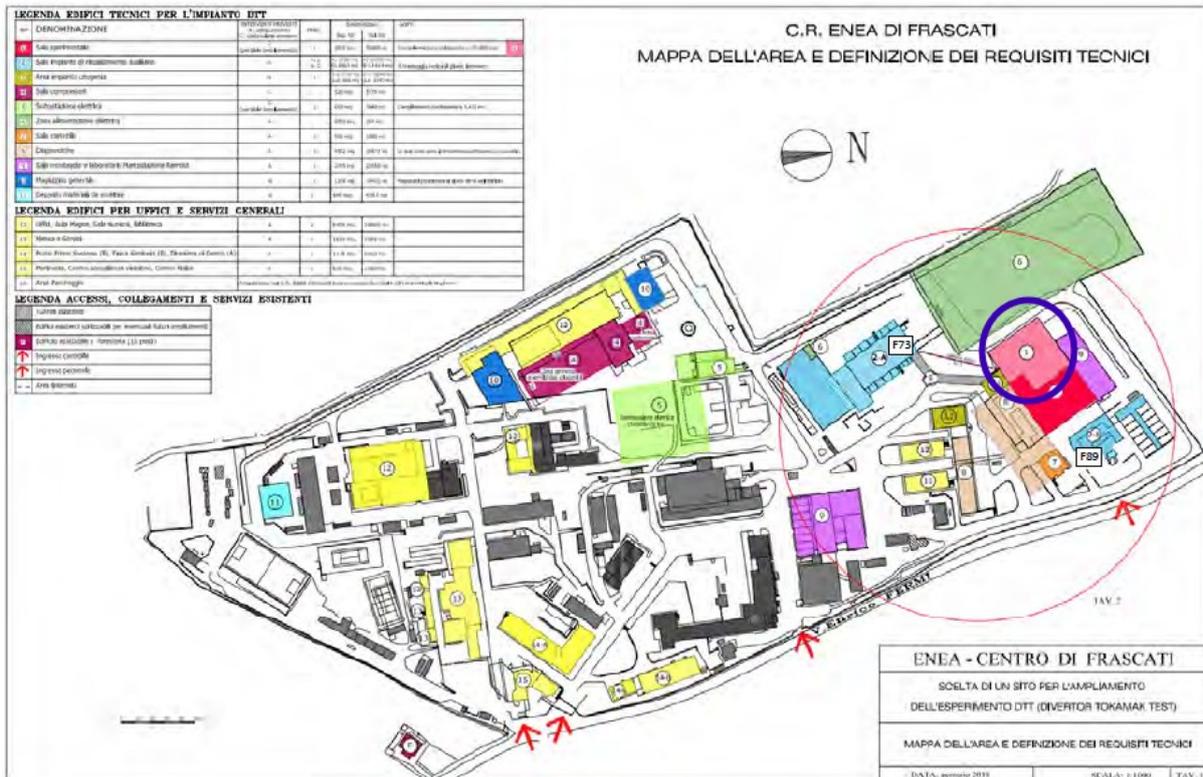


Figura 3: Layout del sito ENEA di Frascati.

Il reattore è costituito principalmente da due camere: *Vacuum Vessel* (VV) e *Cryostat Vessel* (CV), rispettivamente camera a vuoto e camera criostatica.

Il VV è situato all'interno del sistema magnetico. Questo costituisce un ambiente chiuso e sottovuoto dove circola il plasma. La camera è un toroide con sezione a forma di D a doppia parete di acciaio inossidabile. Sia il guscio interno che quello esterno sono di spessore 15 mm. La struttura è divisa in 14 moduli di 20° saldati assieme. Ognuno con

cinque condotti, orientati radialmente e distribuiti sulla circonferenza, per operazioni di: diagnostica, rimozione calore e Remote Handling (RH). Per concludere la “ciambella” è saldato assieme agli altri un modulo di 80° che oltre ai condotti ausiliari ospita, a livello equatoriale, 2 iniettori di raggi neutronici.

Il materiale utilizzato per il VV influisce considerevolmente su performance, metodi di fabbricazione, costo, proprietà chimiche e resistenza alle temperature di esercizio. Per questo è stato scelto di utilizzare l'acciaio inossidabile AISI 316L.

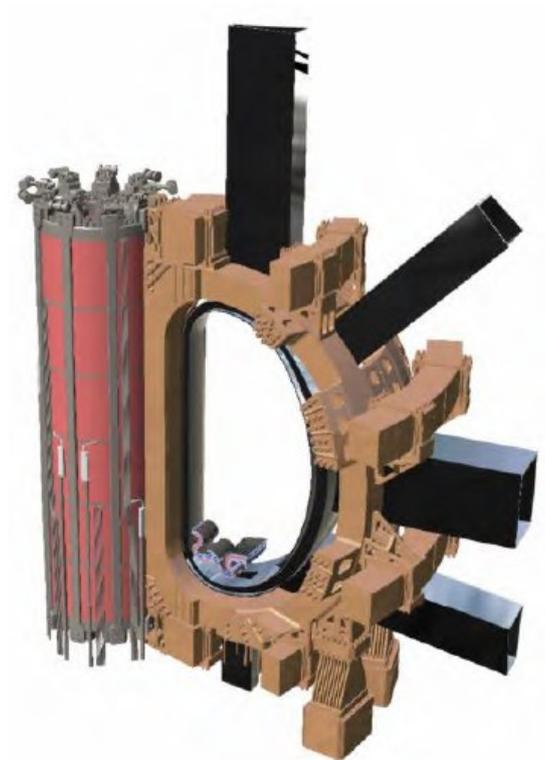


Figura 4: Vista di un modulo standard del VV con rappresentazione dei magneti e del divertore

I 5 condotti di accesso dei moduli standard sono saldati alla camera principale. Anche questi sono in acciaio inossidabile ed hanno uno spessore previsto di 25 mm. I condotti sono identificati secondo un numero da 1 a 5 e disposti in senso orario. In Figura 5 sono riportati i numeri e le rispettive dimensioni principali delle sezioni dei condotti.

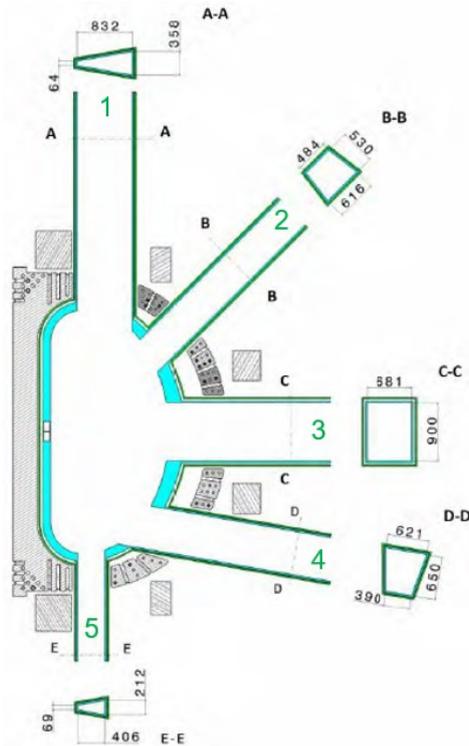


Figura 5: Numero e dimensioni condotti

Rispettivamente i condotti hanno la funzione principale di:

- Condotto N.1: RH dei segmenti del primo guscio e dei tubi del sistema di raffreddamento che opera tra il primo e il secondo guscio
- Condotto N.2: è allineato con il centro del plasma. Viene utilizzato principalmente per sistemi di diagnostica.
- Condotto N.3 (porta equatoriale): dedicato principalmente a funzioni di diagnostica, è utilizzato anche per eseguire RH di segmenti del primo guscio. Nel modulo non standard questo condotto è diverso poiché a livello equatoriale sono collocati anche gli iniettori di raggi neutronici.
- Condotto N.4: viene utilizzato per operazioni sul divertore, come manutenzione o *(de)commissioning*.
- Condotto N5: utilizzato per diagnostica, pompaggio e rifornimento. [6]

Questa tesi ha lo scopo di studiare il *Remote Handling System* dei tubi che passano all'interno dei condotti 2,3 e 4. Di seguito si vanno a vedere le sezioni effettive dei condotti in esame e la posizione dei tubi al loro interno, evidenziando caratteristiche e criticità per ogni caso.

Poiché le dimensioni finali di tutti i tubi non sono ancora state decise, si è scelto per semplicità di considerarle tutte come quelle del condotto 3, che a differenza delle altre sono definitive. Inoltre, secondo una prima progettazione si tratta dei tubi di maggiore dimensione e quindi i più pesanti. I tubi e i collari utilizzati per l'analisi sono illustrati nel prossimo capitolo. La dimensione finale dei tubi non influisce di molto sui risultati della scelta della configurazione poiché le dimensioni dei tubi sicuramente non variano di molto e quindi non influenzano significativamente le traiettorie del robot. Oltre a questo, come punto per la definizione dei collari viene considerato il punto centrale tra i 2 tubi dato che sarà utilizzato come punto target per le simulazioni.

Il condotto 2 risulta essere il più critico a causa delle dimensioni ridotte, che ne limitano l'adattabilità e l'uso nei condotti 3 e 4, dove è necessario un manipolatore di dimensioni maggiori per garantire prestazioni ottimali.

Dal momento che un primo studio è stato effettuato anche su questo condotto, per completezza si riporta la geometria. Nella Figura 6 vengono raffigurati la sezione del condotto, in grigio, e i collari, in marrone.

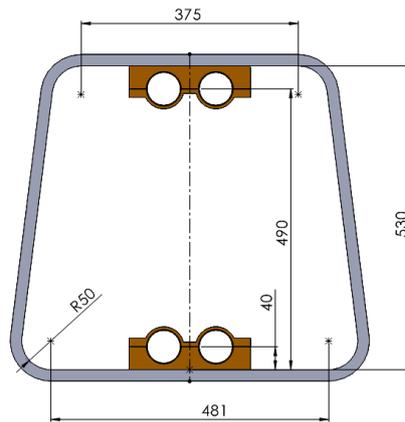


Figura 6: Sezione del condotto 2

Il condotto 3 è il più spazioso, le criticità in questo condotto sorgono quando si maneggiano i tubi laterali, essendo che il centro del condotto è occupato dalla struttura del robot lo spazio di manovra dell'end-effector è ridotto, per questo il manipolatore dovrà essere il più disteso possibile. Considerando che i tubi laterali presentano, in una prima analisi, un diametro pari a circa la metà di quello dei tubi considerati nello studio, si è optato per mantenerli nella configurazione originale, evitando la sostituzione con quelli utilizzati nel condotto 4. In alternativa, si è deciso di utilizzare il centro dei collari progettati nella configurazione iniziale. Le posizioni specifiche sono illustrate nella Figura 7.

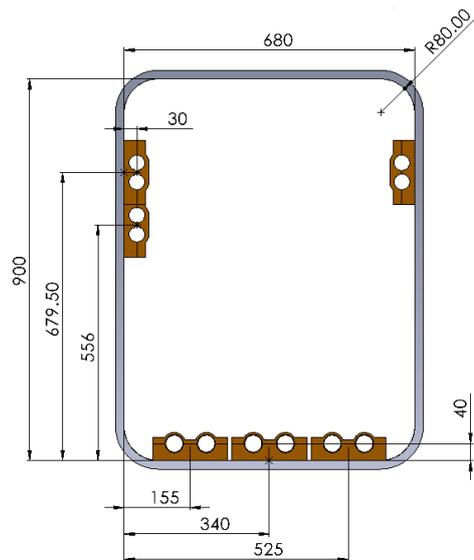


Figura 7: Sezione condotto 3

Al contrario dei precedenti il condotto 4 risulta completamente definito. Infatti, oltre alla geometria ed alla posizione dei tubi vengono raffigurate anche le rotaie del carrello che si muove lungo l'asse del condotto, nella Figura 8 rappresentate in blu.

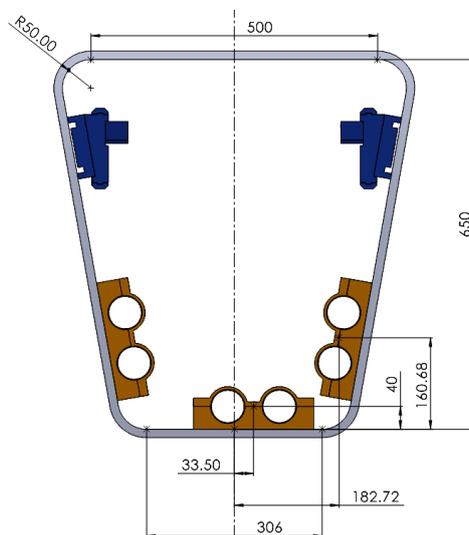


Figura 8: Sezione condotto 4

La posizione delle rotaie risulta non rilevante per l'analisi, in quanto è possibile montare una piastra di interfaccia in testa al carrello. Questa soluzione consentirà di montare il robot nella posizione ottimale lungo l'asse Z.

1.3 Collari

Lo studio di questa tesi è finalizzato al prelievo (posizionamento) dei tubi che, successivamente, con un altro sistema, vengono saldati ai due lati. Il taglio (saldatura) delle due estremità del tubo avviene a metà del collare. In questo modo il collare ha la funzione, oltre che di sostegno, di schermo protettivo poiché le due operazioni saranno effettuate con tecnologia laser.

L'idea iniziale dei collari era quella di avere la parte bassa fissata al condotto mentre la parte superiore fissata ai tubi che si devono sostituire. I collari erano costituiti da tre fori per viti: 2 ai lati per fissare la parte superiore con la parte inferiore (cerchiato in blu) e 1 centrale per prelevare il collare (cerchiato in giallo), come si può vedere nell'immagine di Figura 9.

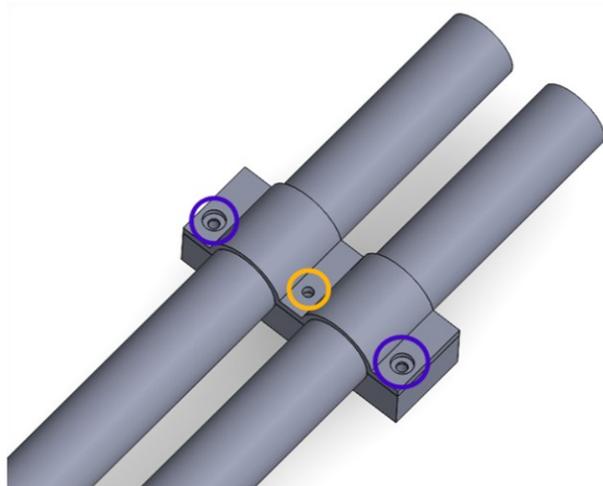


Figura 9: Design iniziale dei collari

La sequenza delle operazioni, una volta che il reattore è spento ed è possibile eseguire la manutenzione, è la seguente:

- 1) il robot manipolatore entra nel condotto
- 2) Attraverso l'end-effector si avvita la vite centrale che fissa i tubi al robot
- 3) Svita le due viti ai lati
- 4) Porta al di fuori del condotto il tubo con la parte superiore dei 2 collari

Durante la progettazione del tool, è emersa una problematica significativa legata alla configurazione dei collari, caratterizzati dalla presenza di tre viti disposte in modo allineato o comunque in uno spazio ridotto. Questa configurazione ha reso complessa l'integrazione degli avvitatori nell'end-effector, poiché il montaggio ravvicinato di tre unità risulta difficilmente realizzabile dal punto di vista tecnico. Inoltre, tale disposizione comporta una concentrazione eccessiva di peso alle estremità del tool, compromettendo sia il bilanciamento che l'efficienza complessiva del sistema. Questo aumenta la freccia e quindi un calo della precisione di posizionamento, oltre che ad un sovradimensionamento di tutti i componenti. In prima battuta si è optato per rimuovere la vite centrale e addossare la parte di sostegno dei tubi a dei gripper mentre con 2 avvitatori si avvita la parte superiore del collare a quella inferiore. Anche in questo caso il peso risultava eccessivo e il centraggio dei tubi, parametro estremamente critico, era affidato alla sola precisione del robot [7].

La geometria finale dei collari è stata studiata quindi durante la fase di progettazione dell'end-effector, uno degli ultimi capitoli della tesi, ma viene trattata in questa fase iniziale perché rientra nella parte strutturale del reattore e per comodità esplicativa poiché è utilizzata nei prossimi capitoli.

In conclusione, le caratteristiche che dovrebbe avere il sistema sono leggerezza, in particolare agli estremi, semplicità e un sistema di centraggio previsto sul collare. Per

ottenere questo si è optato per mantenere il gripper come organo di presa e come fissaggio tra le due parti del collare utilizzare una sola vite M6. Così facendo si monta solo un avvitatore per lato riducendo il peso all'estremità. L'utilizzo di una sola vite per lato è sufficiente dal momento che ha il compito di tenere fissati i tubi solo nel tempo che intercorre tra il posizionamento e la saldatura oltre che a quello tra il taglio e il prelievo. Le viti, quindi, non sono caricate durante la fase di esercizio. Per garantire le tolleranze di posizionamento e di parallelismo delle estremità dei tubi che dovranno essere saldate assieme si è deciso di inserire 2 Pin di centraggio per lato.



Figura 10: Geometria finale tubi + collari

Nella Figura 10 si possono vedere a sinistra i componenti montati mentre a destra è evidenziato l'esplosivo. Colorati in verde sono le parti che si andranno a maneggiare, in arancione sono i componenti fissi mentre piccolo in blu si è evidenziato un pin di centraggio.

I Pin sono costituiti da una parte cilindrica in tolleranza che si centerà con l'apposito foro nella parte superiore del collare dove sarà fissato con una vite, in fase di montaggio al di fuori del condotto, e una parte troncoconica, sempre in tolleranza che ha lo scopo di collocare in maniera precisa le estremità dei tubi durante la fase di *approching*.

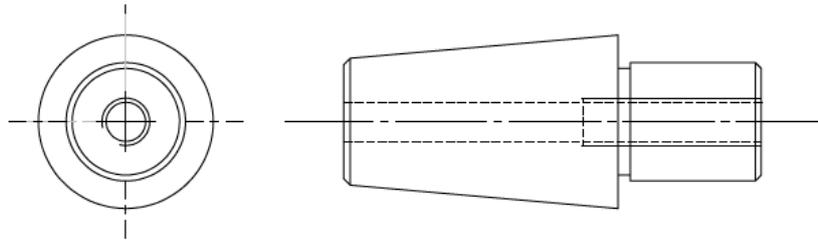


Figura 11: Dettaglio Pin di centraggio

Il collare superiore a sua volta è progettato in modo tale da ospitare la parte cilindrica del pin con un foro di centraggio con tolleranza ristretta e un foro passante per la vite. Al centro, nella zona dove avverrà il taglio (saldatura), è presente una scanalatura per evitare che il laser tagli il collare o che il materiale adiacente all'estremità del tubo sia di intralcio al corretto posizionamento. L'idea è quella di realizzare il "pieno" del collare, saldarlo al tubo e successivamente posizionarlo in macchina per effettuare i fori di centraggio in modo tale che garantiscano il parallelismo delle estremità dei tubi. Allo stesso modo dovrà essere fatto per la lavorazione conica del collare inferiore.

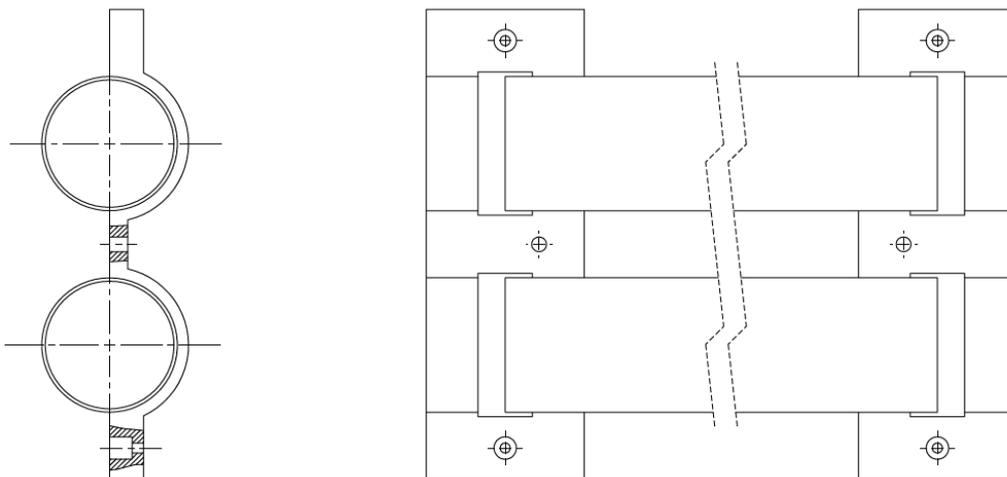


Figura 12: Dettaglio tubi con parte superiore collare

Questa è stata scelta come configurazione finale dei collari e viene utilizzata per tutte le simulazioni che vedremo nei prossimi capitoli. su questa idea si basa anche la progettazione dell'end-effector per la manipolazione e il fissaggio dei tubi all'interno del condotto.

CAPITOLO 2

PROGETTO PRELIMINARE DEL REMOTE HANDLING

L'introduzione di un sistema di *Remote Handling* (manipolazione a distanza) per i componenti all'interno del reattore nucleare risulta indispensabile poiché, dopo l'arresto del reattore, questi componenti mantengono un livello residuo di radiazioni. Ad esempio, per i componenti più vicini al plasma, si registrano valori di circa $100 \mu\text{Sv/h}^1$ (il valore medio di radioattività naturale è di $0,2 \mu\text{Sv/h}$). [6]

I materiali provenienti da una centrale nucleare, per essere smaltiti come rifiuti non radioattivi, devono essere decontaminati fino a raggiungere un livello di radiazioni pari a $0,1 \mu\text{Sv/h}$ [8]. I condotti in cui si opererà e, in particolare, i tubi che verranno manipolati non sono direttamente esposti al plasma. Tuttavia, ci si aspetta che i livelli di radioattività siano abbastanza elevati da impedire l'intervento umano.

Oltre a questo fondamentale motivo di sicurezza, le dimensioni dei condotti non permettono l'ingresso di personale per effettuare la manutenzione

Nel precedente lavoro [9], i cui punti salienti sono illustrati nella prima parte di questo capitolo, è stato proposto il progetto preliminare dello stesso manipolatore. Inizialmente si era optato per un robot a 7 assi. Di questo, erano stati stabiliti i diversi componenti: *link*, motoriduttori, struttura e parametri dei *Joint*.

Prima di procedere con la fase di analisi, per garantire che la configurazione selezionata sia quella migliore, si è deciso di eseguire un confronto tra diverse strutture

¹ Unità di misura della radioattività, micro Sievert ogni ora.

di manipolatori, confrontando: *workspace*, destrezza e traiettorie durante l'esecuzione del task. Nella seconda parte di questo capitolo sono illustrate le 7 configurazioni ipotizzate.

2.1 Progetto Preliminare

In origine, il sistema proposto prevedeva un meccanismo a 7 assi di rivoluzione, montato su un carrello mobile lungo la direzione dell'asse principale del condotto. La rotazione dei vari giunti avviene attorno all'asse z del sistema di riferimento locale associato a ciascun giunto, come illustrato nella figura sottostante.

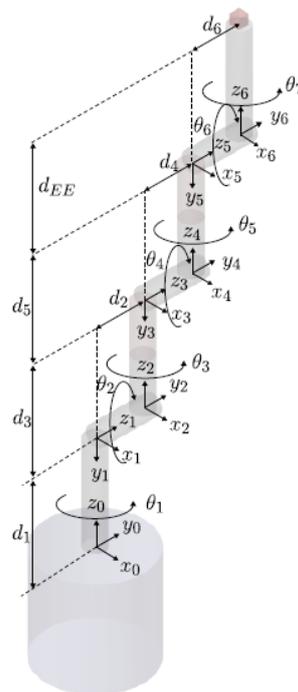


Figura 13: Schema generico delle direzioni di rotazione robot

Questo schema è stato costruito secondo la convenzione di Denavit-Hartenberg. I parametri di DH stabiliti per la struttura sono elencati in Tabella 1.

Link [\]	a_i [mm]	α_i [deg]	d_i [mm]	θ_i [deg]
1	0	-90	400	θ_1
2	0	90	0	θ_2
3	0	-90	175	θ_3
4	0	90	0	θ_4
5	0	-90	160	θ_5
6	0	90	0	θ_6
7	0	0	240	θ_7

Tabella 1: Parametri DH

Di conseguenza, considerando i parametri in tabella e le rotazioni iniziali $q_2 = 15^\circ$, $q_4 = -15^\circ$ e $q_6 = 90^\circ$, la struttura del robot diventa quella in Figura 14.

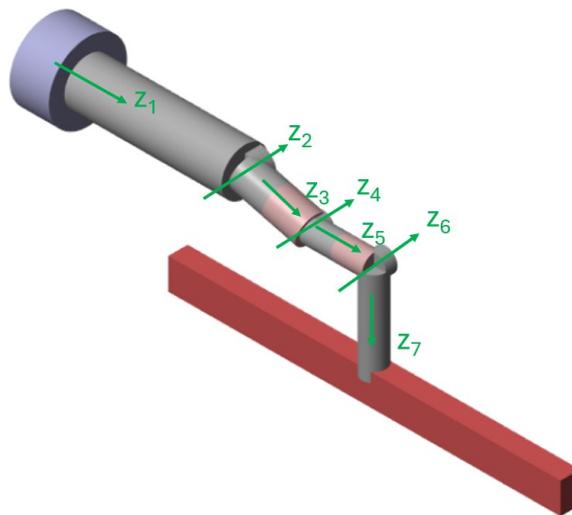


Figura 14: Struttura configurazione iniziale

Il rispettivo spazio di lavoro confrontato con il condotto 4 risulta:

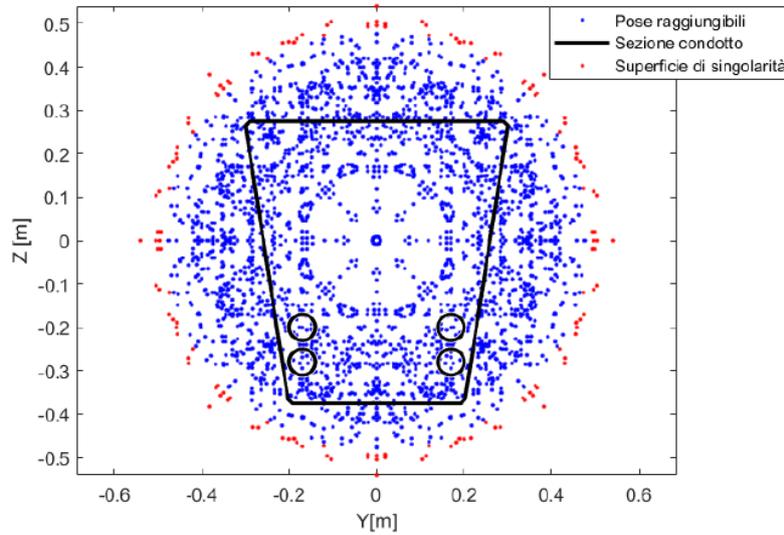


Figura 15: Spazio di lavoro e singolarità confrontati con il condotto 4

Dopo aver definito tutti i parametri del sistema, è stata sviluppata una struttura CAD per determinare pesi e ingombri. Successivamente, sono state condotte simulazioni al fine di calcolare le coppie risultanti, sulla base delle quali è stato selezionato un sistema motoriduttore appropriato per ciascun giunto. Il modello CAD generato è stato utilizzato per definire le dimensioni necessarie alla sede dei motoriduttori. Tali dimensioni hanno poi fornito il riferimento per stimare le lunghezze minime di ciascun *link* durante la fase di studio delle configurazioni. Nella Figura 16 seguente viene presentata la struttura ideata nel precedente elaborato, che costituisce la base per le configurazioni successive analizzate in questa tesi. [9]

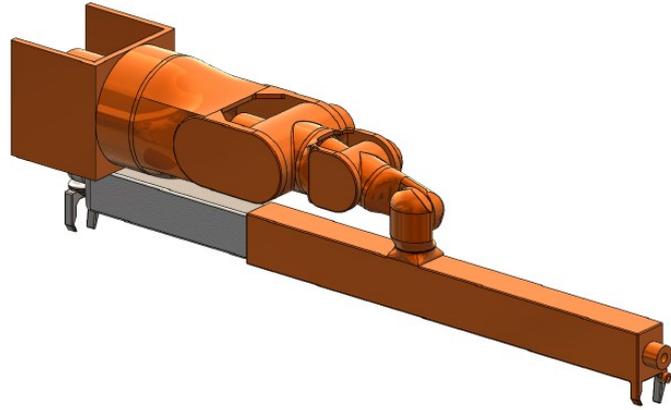


Figura 16: CAD del manipolatore nella fase preliminare della progettazione

CAPITOLO 3

CONFIGURAZIONI DEL MANIPOLATORE

Nelle pagine successive vengono esposte le diverse configurazioni di robot che sono valutate nel terzo capitolo. Le prime 4 configurazioni trattate sono robot a 7 assi di rivoluzione. Essendo lo spazio a 6 gradi di libertà le equazioni cinematiche del robot non sono identicamente definite ma per i punti all'interno del workspace hanno un determinato numero di possibili soluzioni, questo tipo di robot è chiamato ridondante. I vantaggi di utilizzare questi manipolatori sono quelli di minimizzare l'energia utilizzata nel movimento, capacità di evitare singolarità e ostacoli. Sono stati inoltre sviluppati dei metodi di controllo che sfruttano la ridondanza per massimizzare i rapporti di velocità o forza lungo la direzione della traiettoria [10].

L'integrazione di un *joint* rotativo aggiuntivo in una struttura robotica presenta vari svantaggi tecnici e progettuali. Innanzitutto, l'installazione di un ulteriore motoriduttore comporta un aumento della massa complessiva. Di conseguenza, a parità di lunghezza totale del robot, un braccio con ridondanza risulterà più pesante, richiedendo motoriduttori di dimensioni maggiori nei a monte. Inoltre, l'aggiunta di un giunto supplementare inevitabilmente prolunga la lunghezza complessiva della struttura, incrementando l'ingombro. In contesti operativi con spazio limitato, come quelli considerati, questo aumento dell'ingombro rappresenta una caratteristica critica.

Un ulteriore svantaggio è rappresentato dal potenziale incremento dell'errore complessivo nel posizionamento dell'end-effector. Questo fenomeno è attribuibile sia alla deformazione data da un *link* supplementare, sia alla maggiore complessità del sistema di movimentazione, che amplifica errore finale. Questi aspetti rendono l'integrazione di giunti addizionali una scelta progettuale che richiede un'accurata valutazione in relazione

ai vincoli dimensionali, di peso e di precisione richiesti dall'applicazione specifica. Oltre a questi fattori concreti ed evidenti, si deve prendere in considerazione la complessità dei metodi di calcolo della cinematica inversa e del controllore del robot che richiedono potenze di calcolo superiori rispetto a manipolatori non ridondanti [11]. Per questo motivo nella tesi sono stati presi in considerazione sia robot ridondanti a 7 assi che robot non ridondanti a 6 assi.

Le diverse configurazioni, alla base delle analisi del terzo capitolo, sono raffigurate graficamente da blocchi cilindrici grigi di diametro 50 mm, rappresentanti i link, e cilindri arancioni di diametro 70 mm e lunghi 100 mm per i *joint*. Quest'ultimi avranno l'asse orientato secondo l'asse di rotazione del giunto. In rosso viene evidenziato l'ingombro previsto del EE, mentre la base sulla quale verrà fissato il robot è in azzurro.

Le diverse lunghezze dei *link*, per ogni configurazione, sono frutto di un processo iterativo basato sui risultati delle analisi sul workspace, sulle simulazioni delle traiettorie e su un CAD preliminare.

3.1 Generazione Configurazioni

Come esempio, viene presentata la creazione della prima configurazione, mentre le altre configurazioni sono state generate seguendo un processo analogo.

Per definire il robot nell'ambiente *Matlab/Simulink* è necessario generare il file *.URDF*² del robot. Si è scelto di creare un *Simulink* parametrico in cui le dimensioni dei

² URDF (Unified Robot Description Format) è un linguaggio XML utilizzato per descrivere un robot in termini di sue parti (come *link* e giunti) e le relazioni tra di loro. Questo formato consente di modellare l'aspetto fisico del robot, le proprietà meccaniche, i sensori, e molto altro.

link e le rotazioni iniziali dei giunti vengono importate dallo script *Dimensioni_#.m* di *Matlab* (Appendice A.1). Al termine della compilazione, viene salvato un file *Dimensioni_#.mat*. Successivamente, si è passati all'ambiente *Simulink*, dove è avvenuta la costruzione della struttura del robot (Appendice A.2). Il modello *Simulink* completo, presentato in Figura 17, è suddiviso in tre sottosistemi, ciascuno con una funzione specifica. Il primo, evidenziato in rosa, si occupa della definizione dell'ambiente di simulazione. In questa sezione, vengono configurati il sistema di riferimento generale, la direzione e il verso della gravità, e i parametri del solver utilizzato per la simulazione.

Il secondo, contrassegnato in verde, è dedicato alla modellazione della struttura robotica, includendo i dettagli relativi alla sua configurazione e dinamica.

Infine, il terzo sottosistema, evidenziato in blu, è responsabile della generazione dei segnali di ingresso (posizione, velocità e accelerazione) per i blocchi *Revolute Joint*.

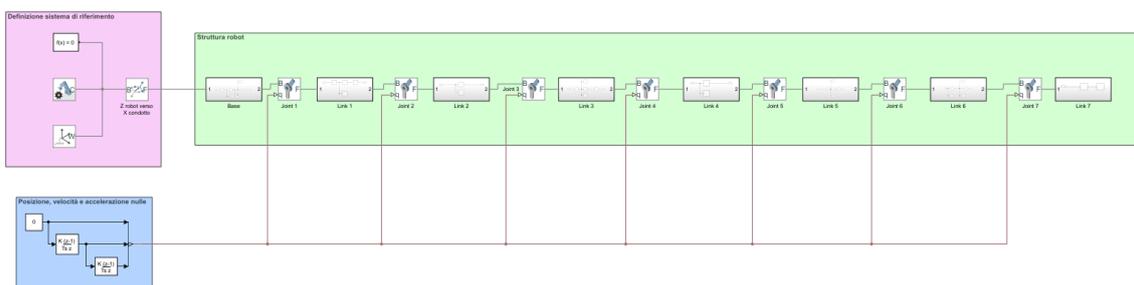


Figura 17: Simulink Rigid_body_tree_1

Nella parte dedicata alla struttura del robot si può notare come si alternino i blocchi *subsystem* a quelli dei giunti di rivoluzione. Il blocco *Revolute Joint* non fa altro che inserire 2 *frame* nella struttura: uno fisso e uno che ruota in base al segnale di input che gli viene imposto. In questo caso si impone spostamento nullo perché vogliamo salvare il modello nella posizione di partenza. Nei blocchi *subsystem*, invece, vengono creati i corpi della struttura e con le rispettive distanze tra centro del corpo e successivo asse di rivoluzione. Nella Figura 18 è rappresentato il blocco corrispondente al *link* 1.

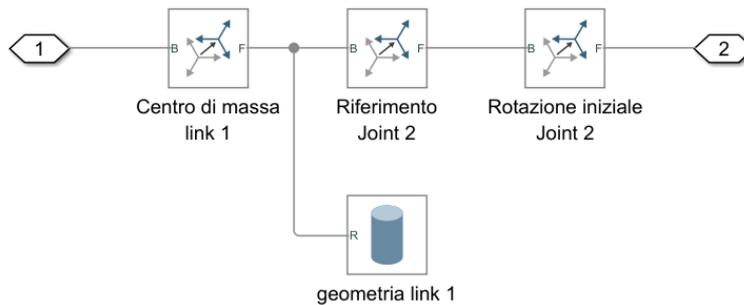


Figura 18: Subsystem 1

Eseguendo il modello *Simulink*, il software genera, all'interno dell'ambiente *Mechanics Explorer*, una rappresentazione della struttura robotica caratterizzata da una modellazione a cilindri. Una volta che sono state stabilite le dimensioni finali del modello è necessario salvare il modello, per fare questo si torna in ambiente *Matlab* e si esegue lo script *Salvataggio.m* (Appendice A.3).

3.2 Presentazione Configurazioni

Qui di seguito sono presentate le diverse configurazioni.

I Configurazione

La prima struttura analizzata è analoga a quella del precedente elaborato, per quanto riguarda l'orientamento dell'asse di rotazione dei vari *joint*, ma si differenzia per la lunghezza dei *link*. Di seguito vengono riportate le tabelle con la definizione della struttura secondo la convenzione di Denavit-Hartenberg e limiti di giunto. Per quest'ultimi viene posto $\theta = 0^\circ$ quando il robot è completamente disteso.

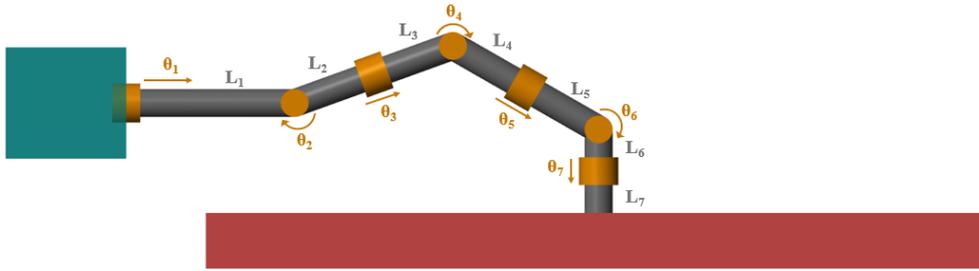


Figura 19: Grandezze I Configurazione

Link [\]	a_i [mm]	α_i [deg]	d_i [mm]	θ_i [deg]
1	0	90	300	θ_1
2	0	-90	0	θ_2
3	0	90	300	θ_3
4	0	-90	0	θ_4
5	0	90	300	θ_5
6	0	-90	0	θ_6
7	0	0	250	θ_7

Tabella 2: DH I configurazione

	θ_{\min}	θ_{\max}	θ_{iniziale}
1	-200°	200°	0°
Joint 2	-90°	90°	-20°
Joint 3	-180°	180°	0°
Joint 4	-90°	90°	50°
Joint 5	-180°	180°	0°
Joint 6	-90°	90°	60°
Joint 7	-180°	180°	0°

Tabella 3: Limiti joint I configurazione

Nonostante si sia già trattato ampiamente questa struttura nella precedente tesi si è deciso riproporla sia come metro di paragone sia per completezza poiché non erano state trattate né le simulazioni di prelievo (rilascio) dei tubi all'interno dei condotti, né la parte riguardante la destrezza.

Come evidenziato precedentemente, si tratta di un robot ridondante a 7 assi di rivoluzione con polso sferico. Per polso sferico s'intende che gli assi degli ultimi 3 giunti di rotazione si intersecano in un unico punto. È una struttura molto comune nei robot commerciali poiché il calcolo della cinematica inversa è in forma chiusa ed è molto semplice. Questo è possibile grazie al fatto che si può scomporre la struttura in 2 sottosistemi: essendo che gli assi di rotazione del polso coincidono in un unico punto si può stabilire la posizione finale del *End Effector* studiando la cinematica dei primi 4 giunti, in questo caso, mentre nei robot non ridondanti si considerano i primi 3. Contemporaneamente, per definire l'orientazione del EE si lavora sugli ultimi 3 assi di rotazione, ovvero il polso [12].

Nella Figura 20 è mostrata la prospettiva di questa configurazione.

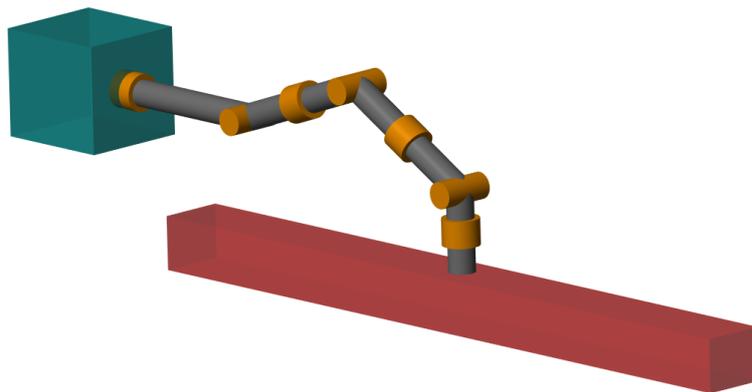


Figura 20: I Configurazione

II Configurazione

Basandoci sugli studi effettuati da Mayorga e colleghi per HERA (Hermes Robot Arm), un braccio studiato per effettuare operazioni nello spazio, si è cercato di adattare dei bracci ridondanti alla nostra applicazione. Lo studio aveva come scopo la valutazione della struttura sulla base della destrezza di robot ridondanti. In particolare, la seconda configurazione che si vuole analizzare è la medesima di HERA 1. I punti di forza di questa

struttura sono la facilità di costruzione meccanica poiché i giunti nella spalla non sono nello stesso punto e la capacità di evitare le singolarità interne, quindi ottimizzare il workspace. Purtroppo, la soluzione della cinematica inversa può risultare complessa. [13]

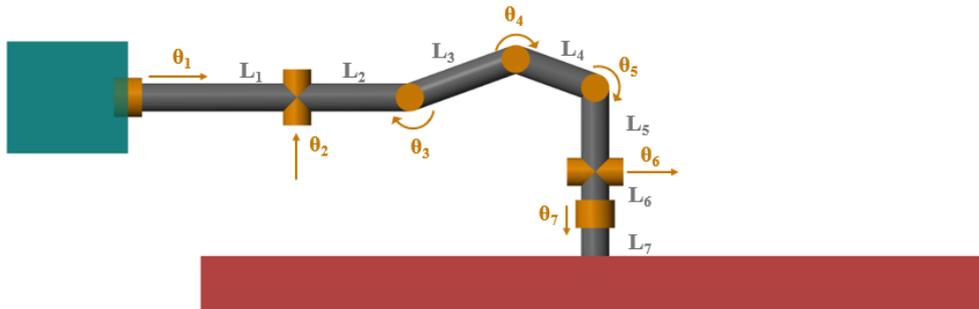


Figura 21: Grandezze II Configurazione

Di seguito sono elencate le grandezze fondamentali della configurazione

Link [\]	a_i [mm]	α_i [deg]	d_i [mm]	θ_i [deg]
1	0	-90	300	θ_1
2	200	-90	0	θ_2
3	200	0	0	θ_3
4	150	0	0	θ_4
5	150	90	0	θ_5
6	0	90	0	θ_6
7	0	0	250	θ_7

Tabella 4: DH II configurazione

	θ_{\min}	θ_{\max}	θ_{iniziale}
Joint 1	-200°	200°	0°
Joint 2	-90°	90°	0°
Joint 3	-90°	90°	-20°
Joint 4	-90°	90°	40°
Joint 5	-90°	90°	0°
Joint 6	-90°	90°	70°
Joint 7	-180°	180°	0°

Tabella 5: Limiti joint II configurazione

La figura seguente mostra la prospettiva della struttura.

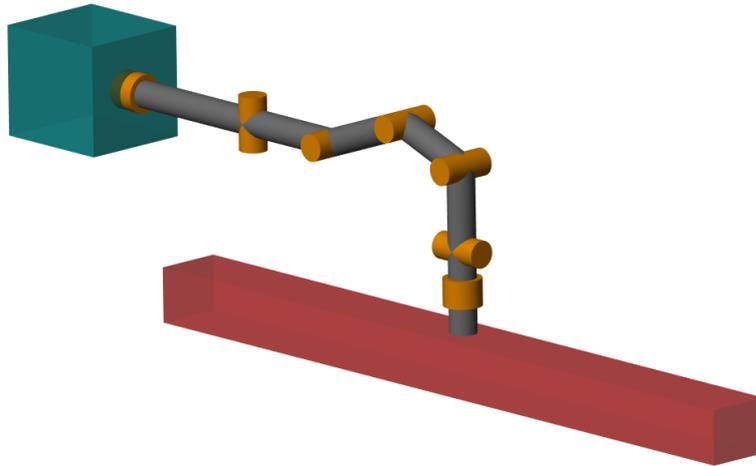


Figura 22: II Configurazione

III Configurazione

Come per la configurazione precedente, anche per questa ci siamo basati su [13]. Questa struttura è la medesima di quella proposta per HERA 2 nell'articolo. Si tratta di un braccio a 7 assi, quindi ridondante, che presenta gli stessi vantaggi della configurazione 2 con l'aggiunta che il calcolo della cinematica inversa risulta semplificato dal momento che la spalla è costituita da un giunto sferico: i primi tre assi di rotazione si intersecano in un unico punto.

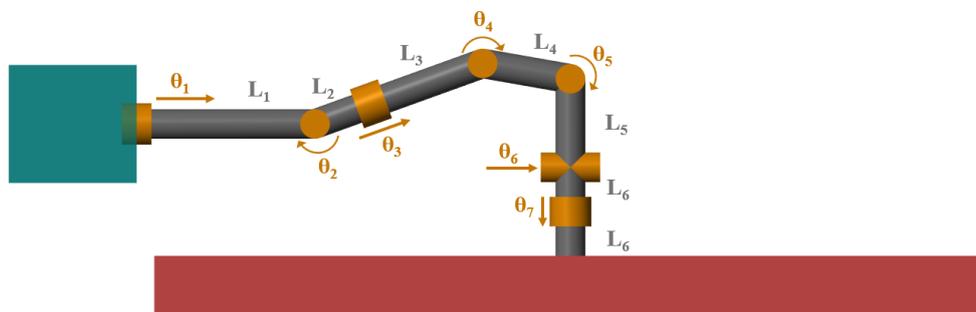


Figura 23: Grandezze III Configurazione

Le dimensioni della struttura sono

Link [\]	a_i [mm]	α_i [deg]	d_i [mm]	θ_i [deg]
1	0	90	300	θ_1
2	0	-90	0	θ_2
3	0	90	300	θ_3
4	150	0	0	θ_4
5	150	90	0	θ_5
6	0	90	0	θ_6
7	0	0	250	θ_7

Tabella 6: DH III configurazione

	θ_{\min}	θ_{\max}	θ_{iniziale}
Joint 1	-200°	200°	0°
Joint 2	-90°	90°	-20°
Joint 3	-180°	180°	0°
Joint 4	-90°	90°	40°
Joint 5	-90°	90°	0°
Joint 6	-90°	90°	70°
Joint 7	-180°	180°	0°

Tabella 7: Limiti joint III configurazione

La II e la III configurazione hanno la caratteristica comune di non avere polso sferico. Questo, aggiunge dei gradi di complessità nel calcolo della cinematica inversa della struttura. Il vantaggio di questa configurazione risiede in una maggiore destrezza. Inoltre, la posizione delle singularità è differente; in particolare, le singularità del polso sono eliminate. [12]

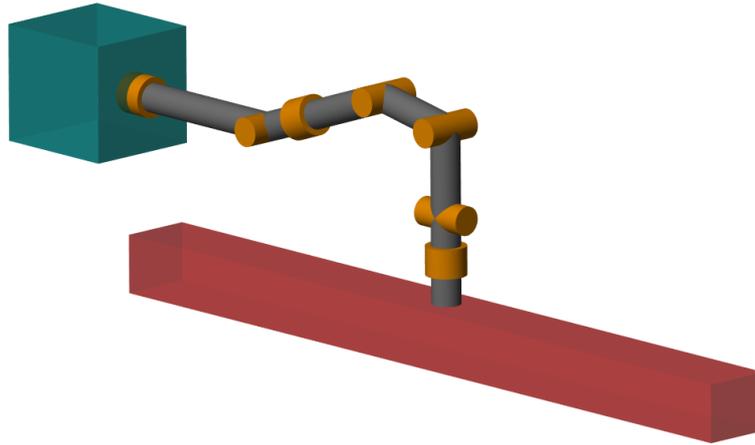


Figura 24: III Configurazione

IV Configurazione

Questa configurazione è progettata per ottimizzare la struttura del polso, riducendone l'ingombro. A differenza delle configurazioni precedenti, il braccio robotico presenta l'asse di rotazione dell'ultimo giunto parallelo all'asse del condotto. Tale disposizione consente al robot di mantenere la posizione desiderata in modo ottimale lungo tutte le traiettorie previste dal progetto.

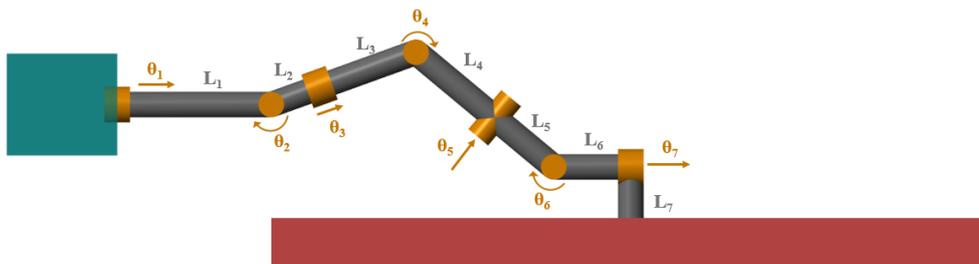


Figura 25: Grandezze IV Configurazione.

Le grandezze della struttura sono

Link [\]	a_i [mm]	α_i [deg]	d_i [mm]	θ_i [deg]
1	0	90	300	θ_1
2	0	-90	0	θ_2
3	0	90	300	θ_3
4	200	90	0	θ_4
5	150	-90	0	θ_5
6	0	-90	0	θ_6
7	125	90	125	θ_7

Tabella 8: DH IV configurazione

	θ_{\min}	θ_{\max}	θ_{iniziale}
Joint 1	-200°	200°	0°
Joint 2	-90°	90°	-20°
Joint 3	-180°	180°	0°
Joint 4	-90°	90°	60°
Joint 5	-90°	90°	0°
Joint 6	-90°	90°	-40°
Joint 7	-180°	180°	0°

Tabella 9: Limiti joint IV configurazione

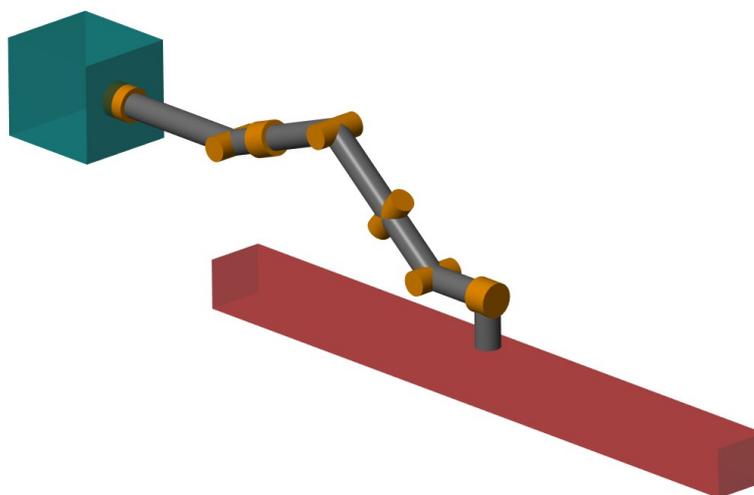


Figura 26: IV Configurazione

V Configurazione

Le ultime tre configurazioni, a differenza delle prime, sono a 6 assi, quindi non ridondanti. Si è voluto analizzare anche delle strutture di questo tipo perché, come esposto precedentemente, c'è la possibilità di ridurre le lunghezze complessive del robot e di conseguenza renderlo più compatto sfruttando al massimo il workspace all'interno del condotto. In questo modo si sacrificherà leggermente la destrezza.

La prima di queste tre configurazioni è costituita da una spalla antropomorfa e polso sferico. Anche in questo caso, come il precedente, l'ultimo asse di rotazione lavora parallelo a quello del condotto.

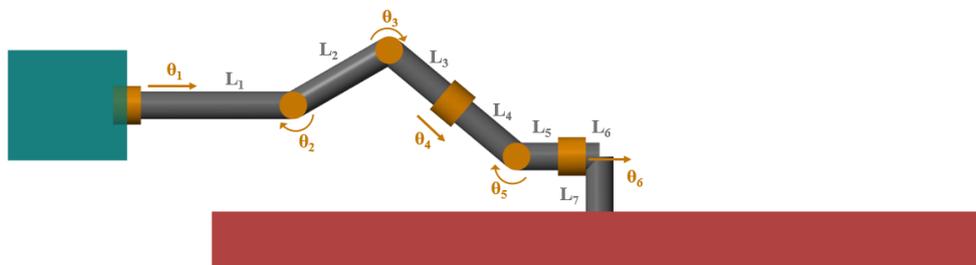


Figura 27: Grandezze V Configurazione

Le dimensioni sono

Link [\]	a_i [mm]	α_i [deg]	d_i [mm]	θ_i [deg]
1	0	-90	300	θ_1
2	200	0	0	θ_2
3	0	90	0	θ_3
4	0	90	300	θ_4
5	0	-90	0	θ_5
6	150	90	150	θ_6

Tabella 10: DH V configurazione

	θ_{\min}	θ_{MAX}	θ_{iniziale}
<i>Joint 1</i>	-200°	200°	0°
<i>Joint 2</i>	-90°	90°	-30°
<i>Joint 3</i>	-90°	90°	70°
<i>Joint 4</i>	-180°	180°	0°
<i>Joint 5</i>	-90°	90°	-40°
<i>Joint 6</i>	-180°	180°	0°

Tabella 11: Limiti joint V configurazione

La lunghezza complessiva finale è sensibilmente minore rispetto alle configurazioni precedenti. Questo fattore comporta sostanziali benefici. Per esempio, aumenta la percentuale del workspace all'interno del condotto quindi si ha una struttura non sovradimensionata per lo spazio di lavoro. Inoltre, un minore braccio delle forze unito ad una struttura complessivamente più leggera porta ad una riduzione delle taglie dei motoriduttori e di conseguenza una struttura più snella a sua volta, che occupa un minor ingombro all'interno del condotto.

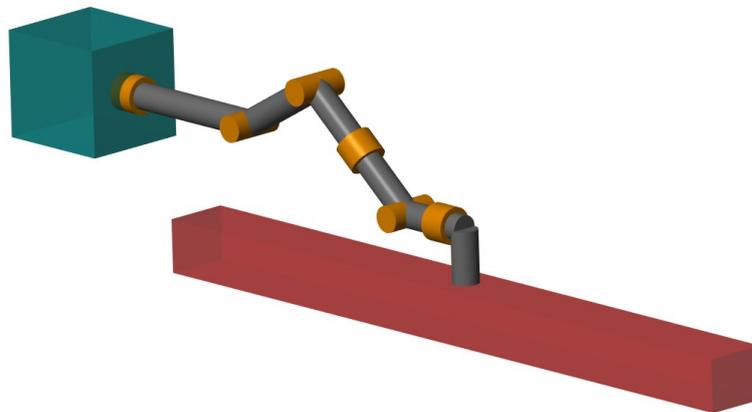


Figura 28: V Configurazione

VI Configurazione

La struttura è simile alla precedente ma ha un polso non sferico. Le grandezze sono:

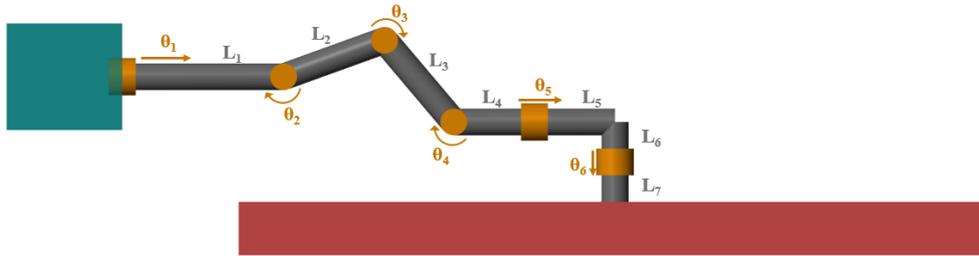


Figura 29: Grandezze VI Configurazione

Link [\]	a_i [mm]	α_i [deg]	d_i [mm]	θ_i [deg]
1	0	90	300	θ_1
2	200	0	0	θ_2
3	200	0	0	θ_3
4	0	-90	0	θ_4
5	0	90	300	θ_5
6	0	0	250	θ_6

Tabella 12: DH VI configurazione

	θ_{\min}	θ_{\max}	θ_{iniziale}
Joint 1	-200°	200°	0°
Joint 2	-90°	90°	-20°
Joint 3	-90°	90°	70°
Joint 4	-180°	180°	-50°
Joint 5	-90°	90°	0°
Joint 6	-180°	180°	0°

Tabella 13: Limiti joint VI configurazione

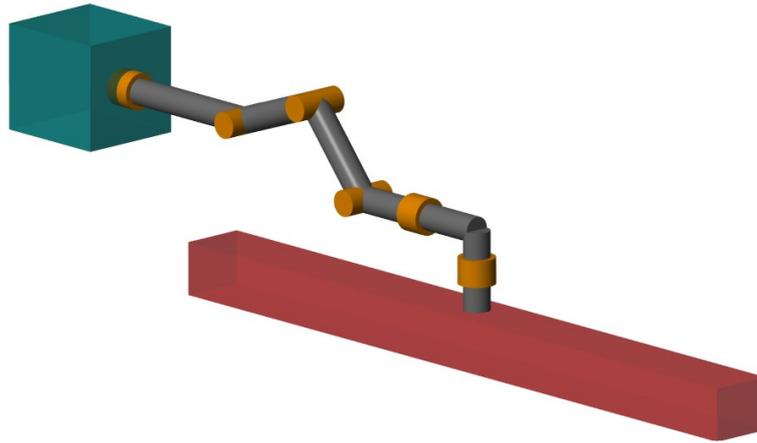


Figura 30: VI configurazione

VII Configurazione

L'ultima struttura che viene analizzata è molto simile alla V dato che i *joint* sono orientati tutti nel medesimo verso. La differenza sta nella posizione dell'end-effector: l'ultimo asse non lavora più parallelamente all'asse del condotto ma perpendicolarmente. Questo comporta un maggiore ingombro del polso dato che 2 giunti sono coassiali. Nella V configurazione è presente un *link* a sbalzo per fissare l'EE, questo induce un momento *tiltante* sull'ultimo giunto di rivoluzione che può provocare un aumento di taglia del motoriduttore. Mentre, in questo caso, lo sforzo che si ottiene è puramente assiale, quando si lavora verticalmente (praticamente in tutta la traiettoria). Le dimensioni sono:

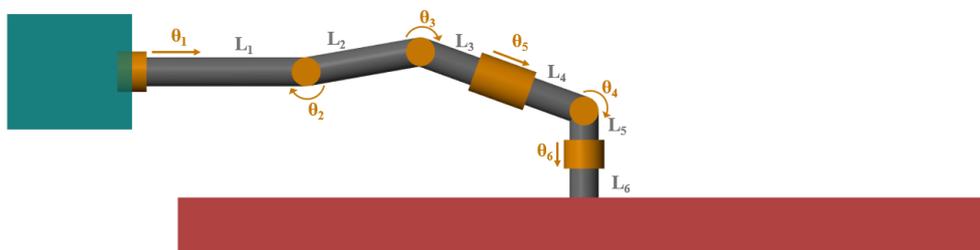


Figura 31: Grandezze VII Configurazione

Link [\]	a_i [mm]	α_i [deg]	d_i [mm]	θ_i [deg]
1	0	90	300	θ_1
2	200	0	0	θ_2
3	0	-90	0	θ_3
4	0	90	300	θ_4
5	0	-90	0	θ_5
6	0	0	250	θ_6

Tabella 14: DH VII configurazione

	θ_{\min}	θ_{\max}	θ_{iniziale}
Joint 1	-200°	200°	0°
Joint 2	-90°	90°	-10°
Joint 3	-90°	90°	30°
Joint 4	-180°	180°	0°
Joint 5	-90°	90°	70°
Joint 6	-180°	180°	0°

Tabella 15: Limiti joint VII configurazione

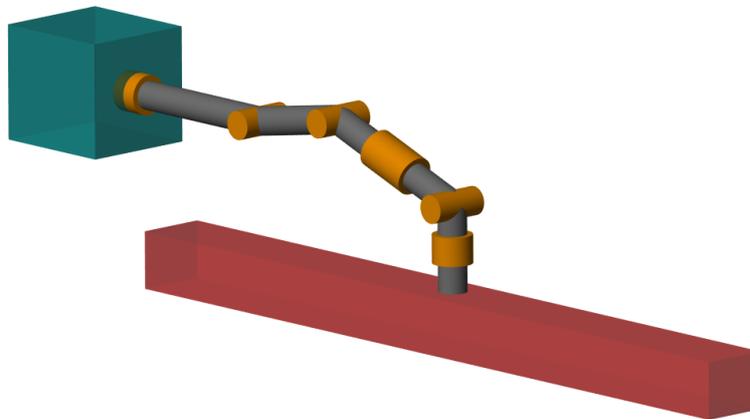


Figura 32: VII configurazione

CAPITOLO 4

VALUTAZIONE DELLE CONFIGURAZIONI

Il presente capitolo si propone di identificare la configurazione robotica più adatta per l'esecuzione dei task previsti dal progetto. La scelta della configurazione ottimale riveste un'importanza cruciale per assicurare che il robot possa eseguire le operazioni richieste in modo efficiente, preciso e conforme ai requisiti stabiliti. La selezione è effettuata mediante un'analisi comparativa delle caratteristiche di ciascuna struttura, considerando fattori quali il *workspace*, la destrezza e le traiettorie.

Il primo studio, tra i tre analizzati, si concentra sul confronto tra lo spazio di lavoro del robot e la dimensione dei condotti. Poiché il *workspace* di tutte le configurazioni copre l'intera superficie di ciascun condotto, l'obiettivo è selezionare la configurazione che massimizza la porzione di workspace effettivamente contenuta all'interno del condotto di lavoro. L'esclusione di uno (o più) dei condotti dalle analisi successive è da considerarsi plausibile considerando che le dimensioni dei condotti 2 e 4 sono significativamente più piccole rispetto a quelle del condotto 3.

Il secondo metodo di valutazione si basa sulla destrezza del robot, intesa come la capacità del manipolatore di raggiungere diversi orientamenti per ciascun punto dello spazio di lavoro. La destrezza di un robot può essere quantificata mediante vari indici [14]. In questa tesi, è stato scelto come parametro di riferimento l'inverso del numero di condizionamento della matrice Jacobiana. Tale indice è stato preferito in quanto risulta indipendente dalla scala del manipolatore, evitando quindi che le dimensioni della struttura influenzino i risultati. L'indice di condizionamento misura simultaneamente sia la vicinanza a configurazioni di singolarità, sia l'accuratezza cinematica del sistema [15].

L'ultima analisi si concentra sulle traiettorie percorse dal robot per passare dalla posizione iniziale (ossia quella con cui il robot entra nel condotto) alla posizione di deposito (prelievo) dei tubi. In primo luogo, è stato adottato un approccio iterativo per determinare la posizione ottimale della base del robot, sia lungo l'asse del condotto che trasversalmente. Una volta identificata tale posizione, sono state studiate le traiettorie più appropriate, al fine di garantire il raggiungimento dell'obiettivo senza collisioni, né con la struttura del robot né con quella del condotto. Contestualmente, è stato calcolato l'inverso dell'indice di condizionamento per un numero elevato di punti della traiettoria, al fine di valutare la distanza dalle condizioni di singolarità.

Il capitolo è strutturato con il seguente schema: per ogni fattore di valutazione viene illustrato il metodo e le ipotesi. Successivamente, vengono presentati i risultati relativi a ciascuna configurazione e, infine, effettuato un confronto tra le diverse strutture, accompagnato dalle considerazioni finali.

Al termine del capitolo, vengono analizzati complessivamente tutti i risultati ottenuti, al fine di determinare la configurazione ottimale, intesa come quella che offre il miglior compromesso tra i vari fattori di valutazione.

La disamina della teoria di robotica sottesa alle formule adottate nel presente capitolo verrà trattata nell'Appendice B, al fine di non appesantire la trattazione principale del capitolo.

4.1 Workspace

Lo spazio di lavoro di un manipolatore è definito come il volume occupato dai punti che l'end-effector (EE) può raggiungere durante l'esecuzione di tutti i movimenti consentiti al robot. Il workspace si suddivide in due parti: lo spazio raggiungibile e lo spazio di destrezza. Quest'ultimo comprende tutti i punti che l'end-effector può raggiungere con qualsiasi orientazione, mentre lo spazio raggiungibile include tutti i punti che l'EE può raggiungere, indipendentemente dall'orientazione. È evidente che lo spazio di destrezza rappresenta un sottospazio dello spazio raggiungibile [14].

In questo paragrafo viene studiato lo spazio raggiungibile di ogni struttura: si vuole valutare la porzione di workspace che rimane all'interno della sezione dei condotti. La posizione della base del robot sulla perpendicolare verticale dell'asse del condotto, all'interno dei condotti 2 e 4, è la stessa per tutte le configurazioni. Mentre, nel condotto 3, è stata ottimizzata, iterativamente, per ogni configurazione.

Oltre a questo, si vuole stabilire se è possibile utilizzare lo stesso robot per tutti e tre i condotti. Non è possibile stabilirlo solamente dalla sezione di quest'ultimi poiché dipende anche dalla posizione del robot all'interno di essi. Sicuramente i condotti più critici saranno il 2 e il 4, in particolare nel condotto 2 (Figura 6) dato che la posizione centrale è obbligatoria poiché i tubi da manovrare si trovano centralmente ai 2 lati del condotto. Mentre, nel condotto 4 (Figura 8), essendo tutti i tubi disposti in basso, è possibile decentrare la base del robot verso l'alto.

4.1.1 Metodo di Calcolo

Per trovare i punti del *workspace* si è programmato un algoritmo numerico di cinematica diretta (Vedere Appendice B per definizione di cinematica diretta) che, impostando come input gli angoli dei giunti del robot, ricava la posizione nello spazio di lavoro dell'end-effector. Lo script *Matlab* (Appendice A.4) utilizzato per questa operazione è organizzato nel seguente modo:

- 1) Si importano i file *.mat* della configurazione che si vuole analizzare, contenenti le dimensioni e il *rigidbodytree* della struttura.
- 2) Si generano un numero di vettori, pari al numero di *joint* del robot, contenenti i 15 angoli equamente distanti tra il limite inferiore e quello superiore di rotazione del giunto.
- 3) Un processo iterativo calcola posizione e orientamento nello spazio dell'*End Effector* per tutte le combinazioni di angoli presenti nei vettori. Questo è stato possibile grazie all'utilizzo della funzione *getTransform*, che esegue la trasformata dalla base al punto finale dell'*EE*. (La formulazione teorica del metodo è esplicitata nell'appendice B).
- 4) In conclusione, vengono plottati 3 grafici, uno per condotto, nel quale sono rappresentati: la nuvola di punti che raffigura il *workspace*, il punto della base del condotto (X rossa) e il condotto.

4.1.2 Workspace delle Configurazioni

Di seguito si presentano i risultati delle diverse configurazioni prese in esame.

I Configurazione

I risultati relativi al *workspace* di questa configurazione sono i seguenti.

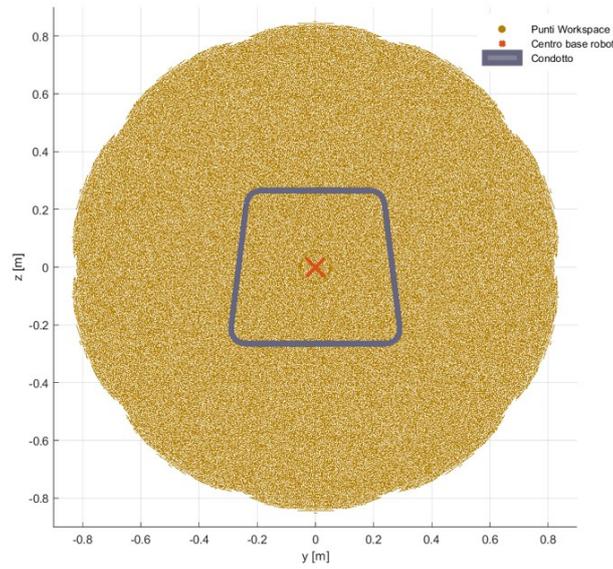


Figura 33: *Workspace Condotto 2 e Configurazione 1*

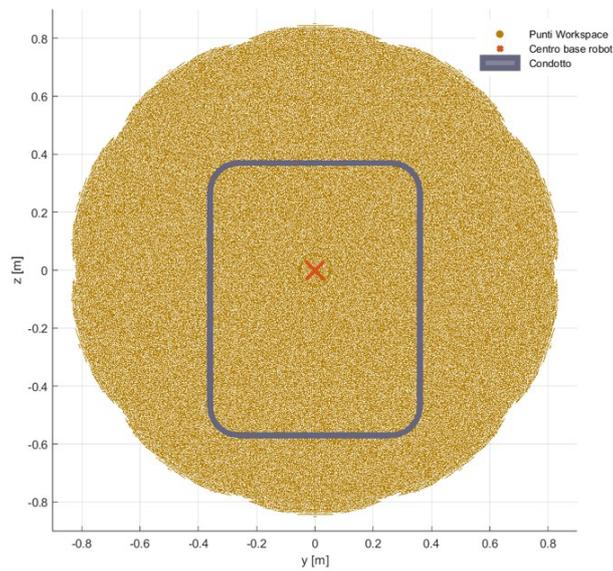


Figura 34: *Workspace Condotto 3 e Configurazione 1*

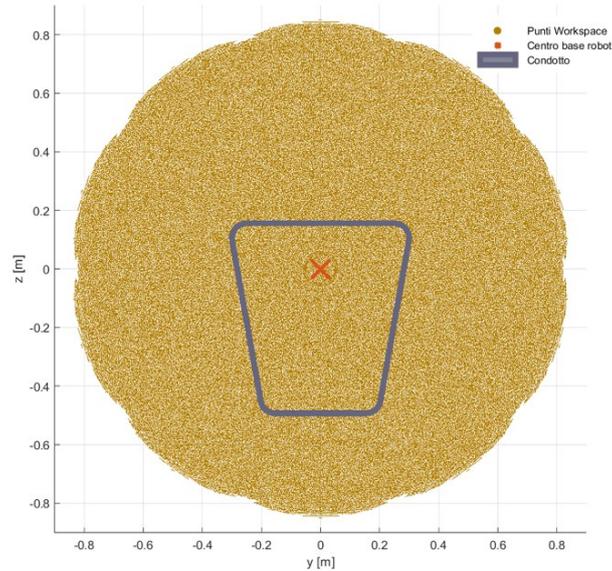


Figura 35: Workspace Condotto 4 e Configurazione 1

Come si evidenzia dalla Figura 36 la forma del volume dello spazio di lavoro è data da una geometria, diversa a seconda della struttura, che si rivoluziona attorno all'asse del primo giunto.

La configurazione 1 è adatta solo al condotto 3 poiché una buona parte di workspace è all'interno della sezione del condotto, specialmente nelle direzioni nella quale sono posizionati i tubi. Per il 4 è sovradimensionata ma considerando che i tubi si trovano nella parte bassa del condotto e considerando il decentramento del robot, la struttura di quest'ultimo può essere considerata idonea. Per il condotto 2, invece, il *workspace* è nettamente sovradimensionato.

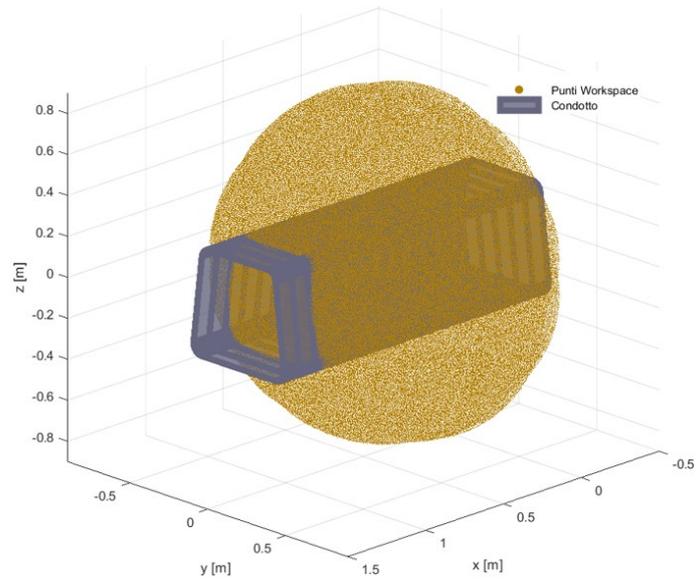


Figura 36: Prospettiva Workspace Condotto 4 e Configurazione 1

II Configurazione

La seconda configurazione presenta il seguente *workspace*.

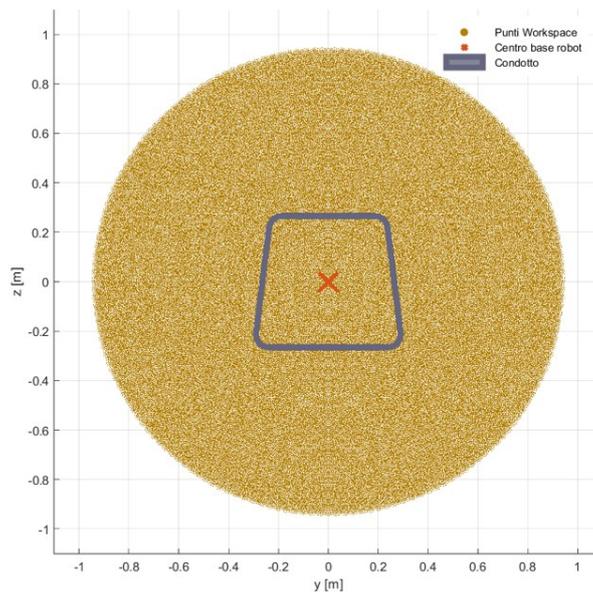


Figura 37: Workspace Condotto 2 e Configurazione 2

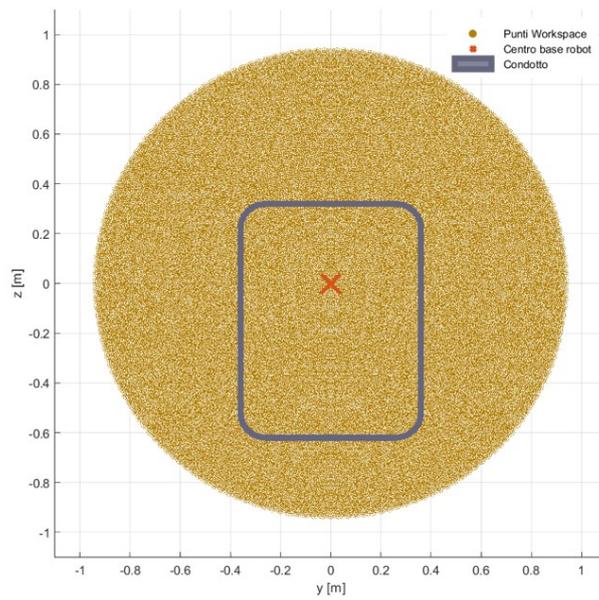


Figura 38: Workspace Condotto 3 e Configurazione 2

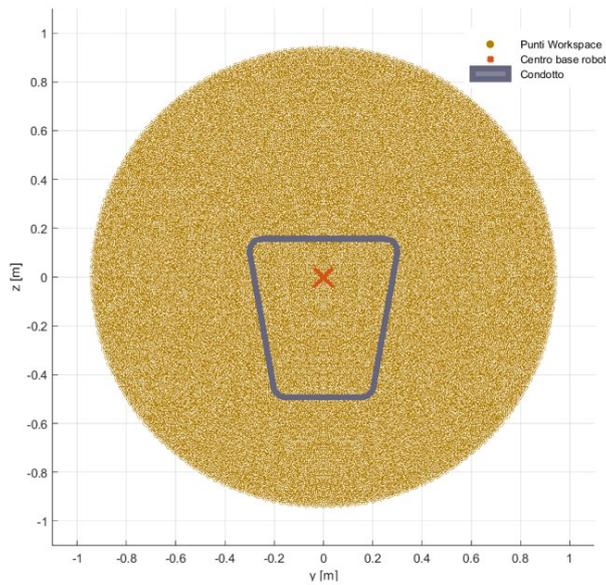


Figura 39: Workspace Condotto 4 e Configurazione 2

Per questa struttura i problemi presentati nella precedente configurazione persistono e sono leggermente rafforzati dal momento che il volume della seconda configurazione si espande maggiormente nelle direzioni perpendicolari all'asse del condotto.

III Configurazione

Il *workspace* della terza configurazione risulta essere molto simile a quello della prima.

Perciò è possibile trarre le medesime conclusioni.

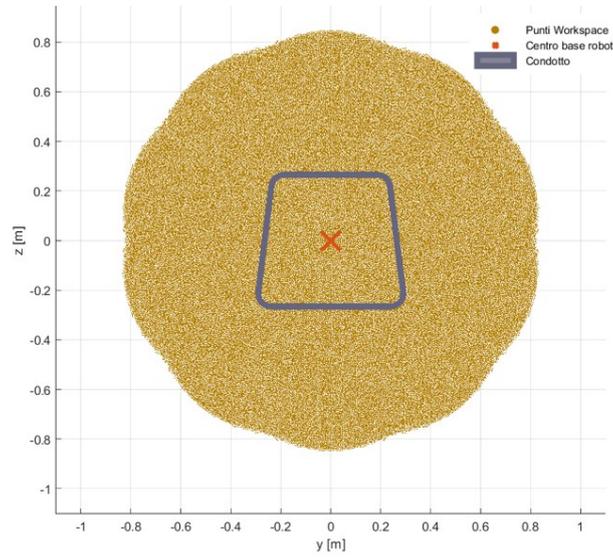


Figura 40: *Workspace* Condotto 2 e Configurazione 3

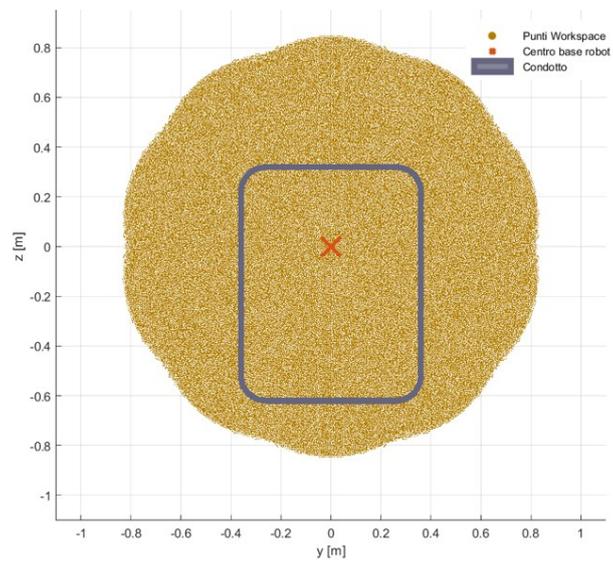


Figura 41: *Workspace* Condotto 3 e Configurazione 3

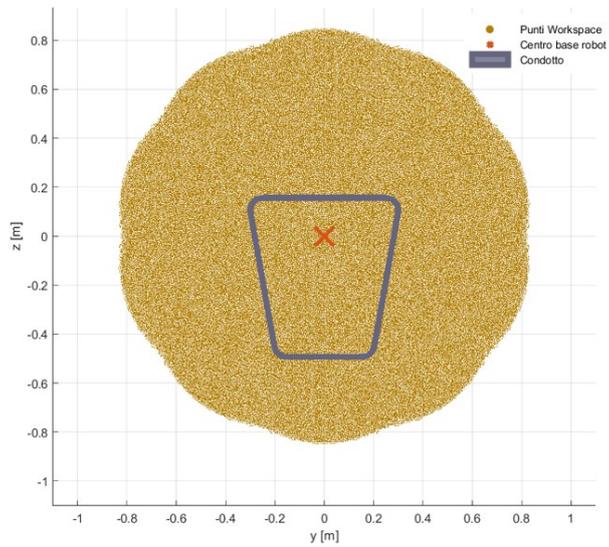


Figura 42: Workspace Condotto 4 e Configurazione 3

IV Configurazione

Si può dire lo stesso per la IV configurazione

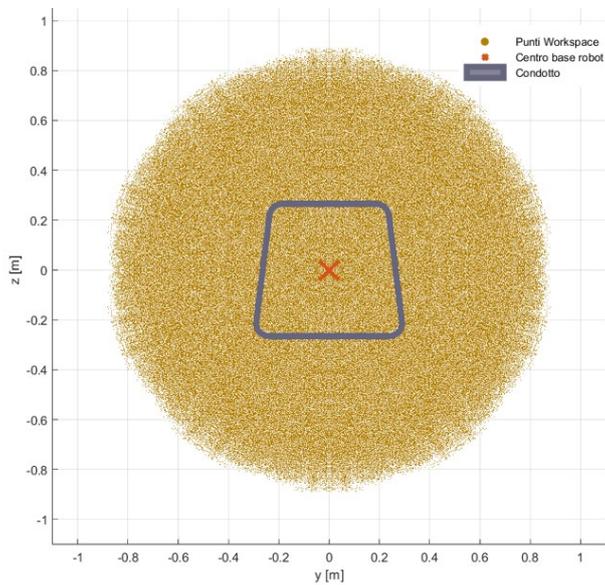


Figura 43: Workspace Condotto 2 e Configurazione 4

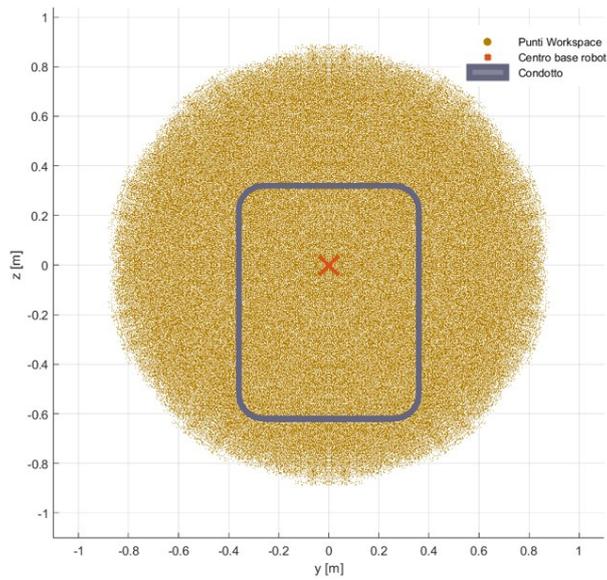


Figura 44: Workspace Condotto 3 e Configurazione 4

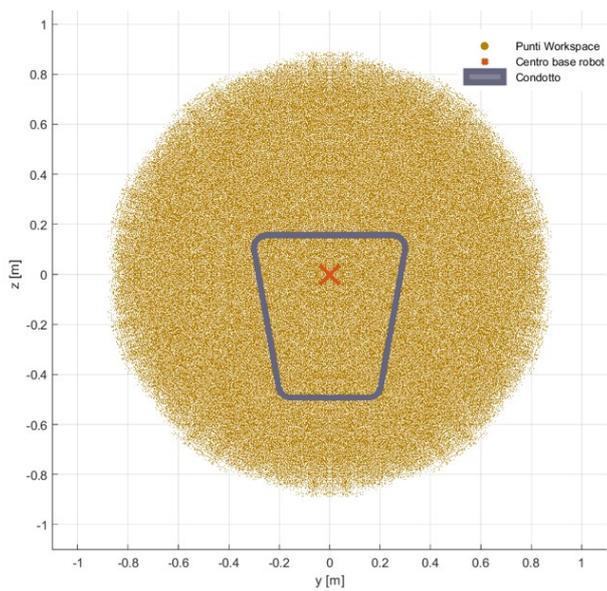


Figura 45: Workspace Condotto 4 e Configurazione 4

V Configurazione

Fino ad ora si sono trattate strutture di robot a 7 assi dove le lunghezze sono maggiori a causa di un *joint* addizionale. Le ultime 3 configurazioni trattano robot a 6 assi e possono avere una lunghezza complessiva fino a 300mm più corta rispetto ai “cugini” a 7 assi.

In base a quanto espresso nel secondo capitolo, quella in esame è la struttura più corta tra quelle analizzate nell'elaborato.

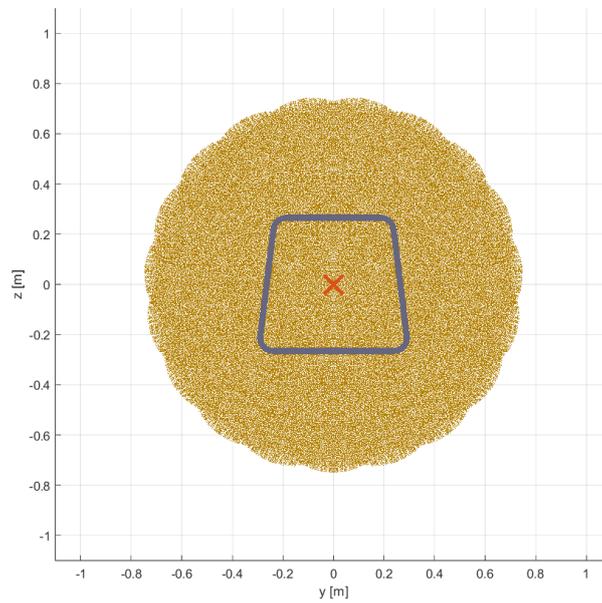


Figura 46: Workspace Condotta 2 e Configurazione 5

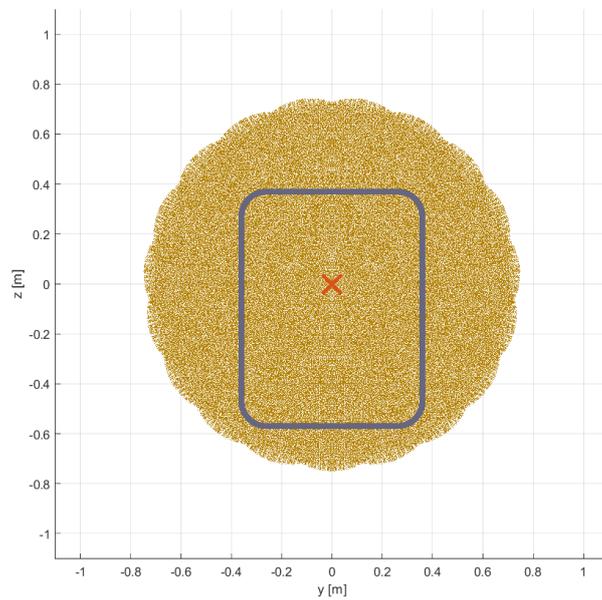


Figura 47: Workspace Condotta 3 e Configurazione 5

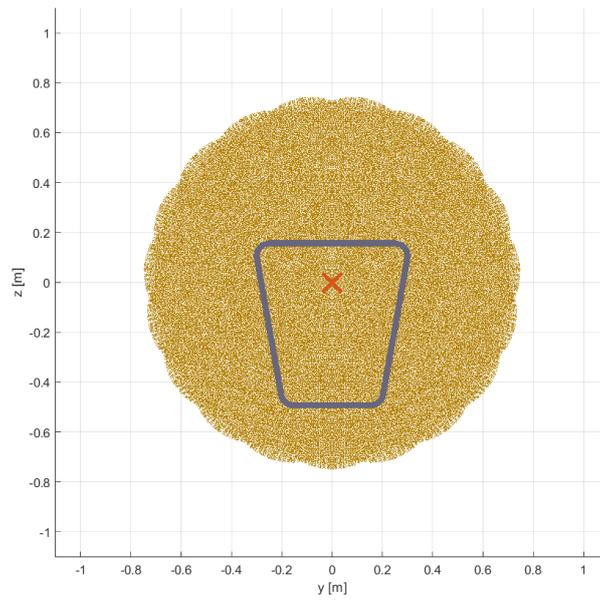


Figura 48: Workspace Condotta 4 e Configurazione 5

In questo caso la struttura è adatta ai condotti 3 e 4 mentre per il 2 continua ad essere sovradimensionata.

VI Configurazione

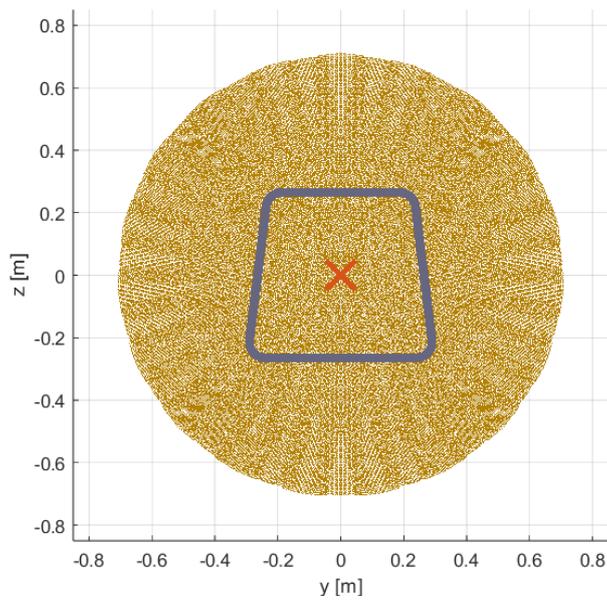


Figura 49: Workspace Condotta 2 e Configurazione 6

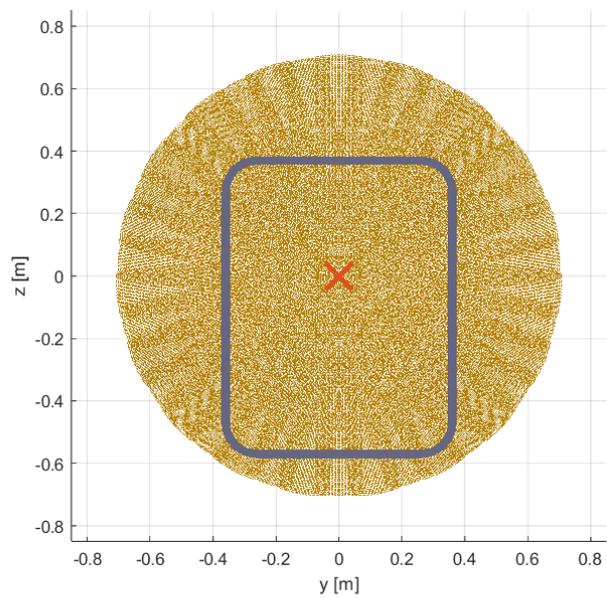


Figura 50: Workspace Condotta 2 e Configurazione 6

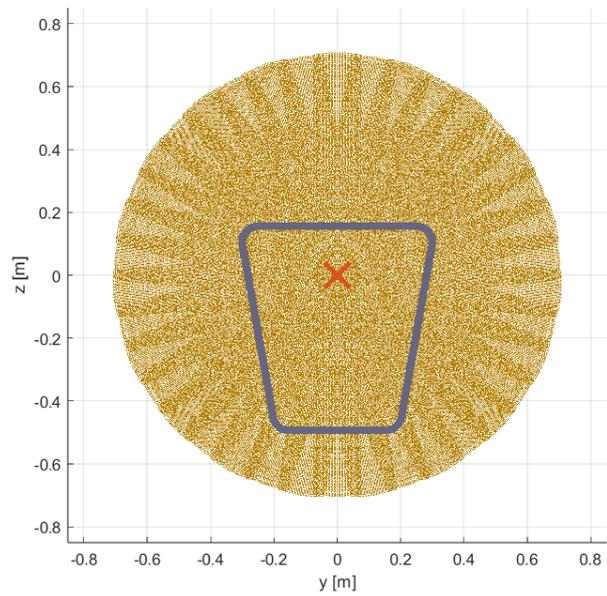


Figura 51: Workspace Condotta 2 e Configurazione 6

VII Configurazione

Ora viene presentata l'ultima configurazione.

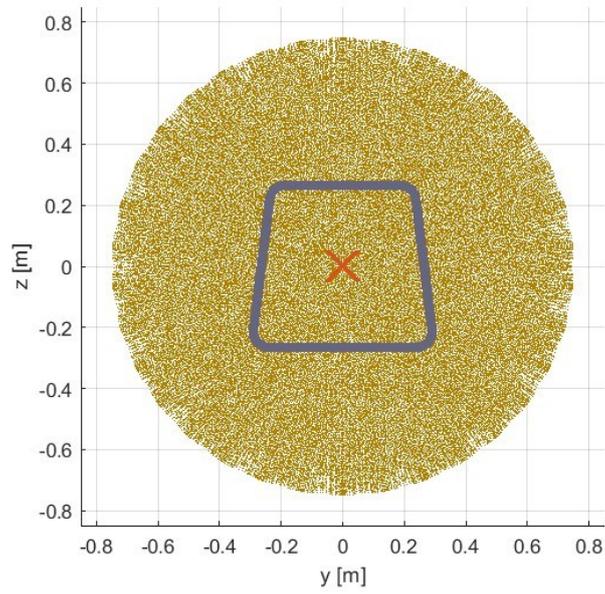


Figura 52: Workspace Condotto 2 e Configurazione 7

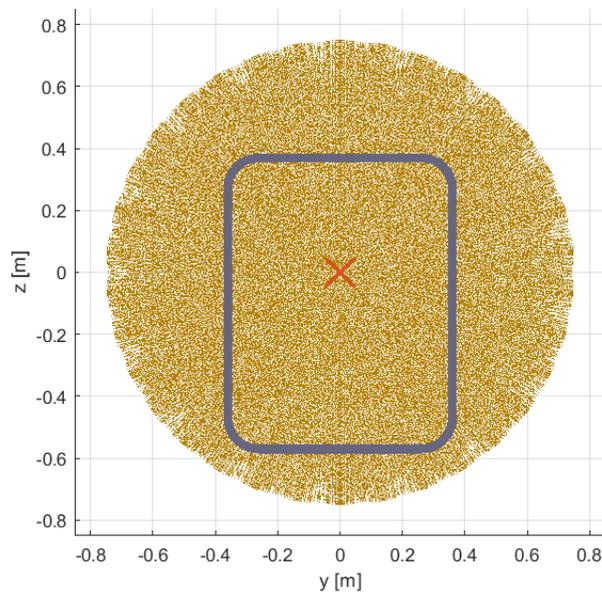


Figura 53: Workspace Condotto 3 e Configurazione 7

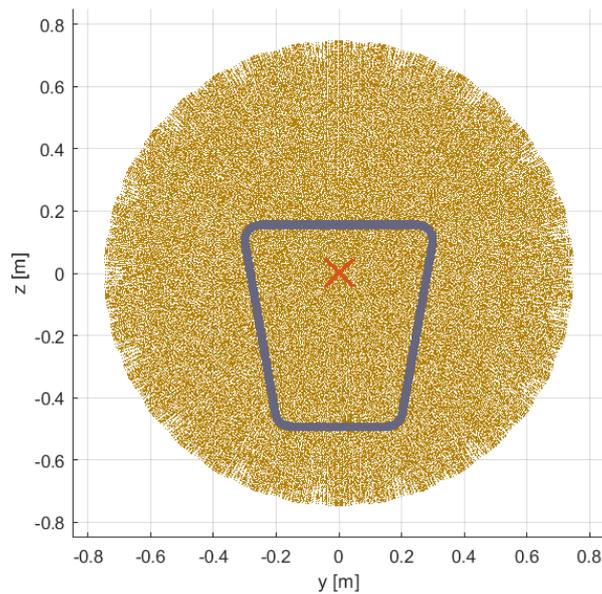


Figura 54: Workspace Condotto 4 e Configurazione 7

4.1.3 Conclusioni Workspace

Questo tipo di analisi presenta una limitata efficacia nel determinare la configurazione ottimale, poiché i risultati si suddividono principalmente in due categorie, differenziate principalmente dal numero di giunti della struttura. Complessivamente, dallo studio emerge che il workspace di tutte le configurazioni analizzate risulta sovradimensionato rispetto ai requisiti del condotto 2. Di conseguenza, il condotto 2 viene escluso dalle analisi successive, richiedendo una struttura dedicata che esula dall'ambito di questo lavoro. A partire da questo punto, l'analisi si concentra esclusivamente sui condotti 3 e 4. I risultati preliminari evidenziano chiaramente che le configurazioni a 6 assi rappresentano la scelta ottimale per soddisfare i requisiti operativi, in quanto offrono una maggiore percentuale di workspace contenuto all'interno dei condotti considerati.

4.2 Destrezza

Destrezza, manipolabilità e accuratezza sono i principali indici che determinano le performance cinematiche di manipolatori. Tutti gli indici di interesse sono basati sullo studio della matrice Jacobiana del manipolatore (illustrata nell'appendice B).

La manipolabilità è l'abilità del' EE di muoversi in un arbitraria direzione [14]. Inoltre, è in grado di fornire una stima del fattore di amplificazione della velocità per passare dallo spazio dei *joint* allo spazio cartesiano. Yoshikawa ha proposto come indice di manipolabilità la radice quadrata del prodotto dei determinanti della Jacobiana e della rispettiva trasposta [16].

$$m = \sqrt{|J J^T|}$$

Un buon indice di manipolabilità indica un punto “distante” dalla singolarità [17].

La manipolabilità può essere espressa anche nel seguente modo

$$m = \sqrt{\lambda_1 \lambda_2 \lambda_3 \dots \lambda_m} = \sigma_1 \sigma_2 \sigma_3 \dots \sigma_m$$

dove λ sono gli autovalori della matrice $J J^T$, mentre σ sono i valori singolari della matrice Jacobiana. Esposta in questa forma, è intuibile che la manipolabilità è proporzionale al volume dell'ellissoide di manipolabilità, in quanto gli assi principali sono pari ai valori singolari.

L'indice di manipolabilità presenta 2 principali problemi in fase di progettazione: esso è dipendente dall'ordine (gradi di libertà) e dalla scala. [15]

Per questo motivo si è deciso di confrontare le diverse strutture secondo l'indice di condizionamento, inteso come misura della destrezza. Infatti, questo indice adimensionale è indipendente dalle dimensioni del robot.

Il numero di condizionamento è definito come:

$$r_{\text{cond}} = \frac{\sigma_{\text{MAX}}}{\sigma_{\text{min}}}$$

Per comodità è di norma utilizzare il reciproco di questo numero, ovvero, l'indice di condizionamento.

$$i_{\text{cond}} = \frac{\sigma_{\text{min}}}{\sigma_{\text{MAX}}}$$

I punti in cui questo fattore è prossimo allo zero sono punti di singolarità. [18]

4.2.1 Metodo di Calcolo

L'algoritmo studiato per il calcolo dell'indice di condizionamento delle diverse strutture è il medesimo del calcolo del *workspace*. La differenza è presente nel ciclo più interno nel quale oltre alle coordinate XYZ, del punto in cui si trova l'end-effector, viene calcolato anche il rispettivo indice di condizionamento. Infine, si plotta uno spicchio del *workspace* per osservare come varia l'indice all'interno del volume. Come è facile intuire, il guscio esterno sarà caratterizzato da soli punti di singolarità. Lo script *Matlab* della I configurazione è esposto all'appendice A.5.

4.2.2 Indice di Condizionamento delle Configurazioni

Nelle prossime pagine vengono presentati i risultati relativi all'indice di condizionamento delle diverse strutture analizzate. Per ciascun caso, viene visualizzato un segmento del volume del *workspace*. Ogni punto del *workspace* è rappresentato da un colore che varia dal blu al giallo. Il blu rappresenta un basso indice di condizionamento, mentre il giallo un valore alto. In ogni grafico è inoltre presente una *X* rossa, che indica l'origine della struttura del robot.

I Configurazione

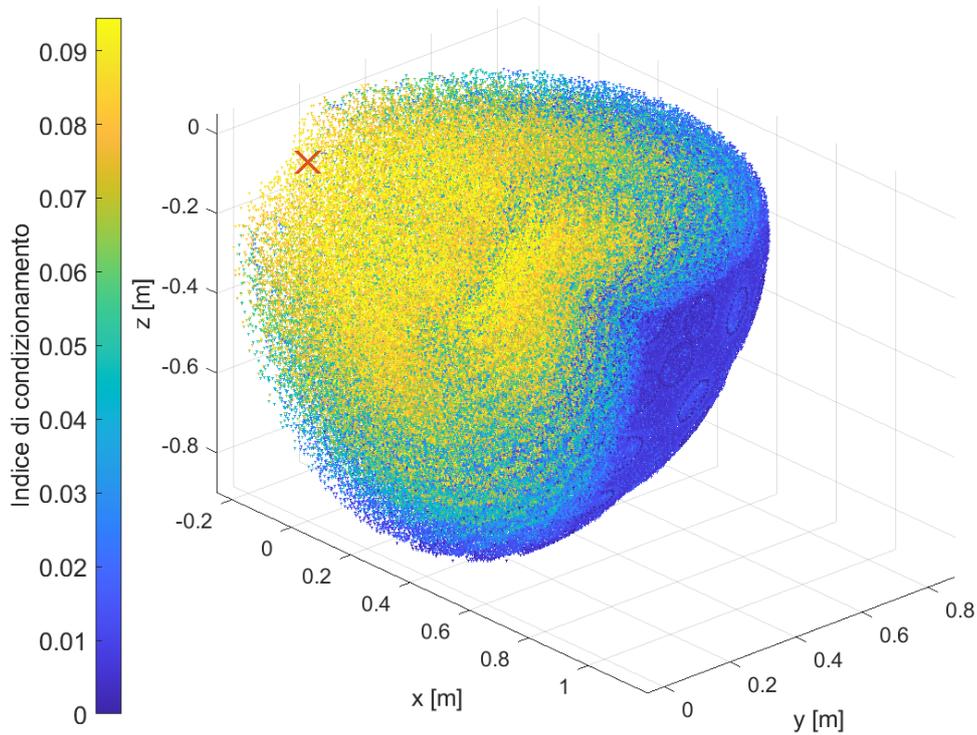


Figura 55: Indice di condizionamento della I configurazione

Questa configurazione presenta un indice di condizionamento massimo di 0,0945.

Come anticipato precedentemente, nella Figura 55 si nota che il guscio esterno presenta un basso indice di condizionamento. Mentre nella zona più interna si trovano i punti con il valore maggiore dell'indice. In particolare, questa configurazione si caratterizza per una netta separazione tra le aree ad "alto" e "basso" valore dell'indice, delimitate da un leggero strato di transizione con valori intermedi. Di conseguenza, è preferibile che il robot operi principalmente nelle zone centrali del workspace, compatibilmente con l'eventuale interferenza della propria struttura.

II Configurazione

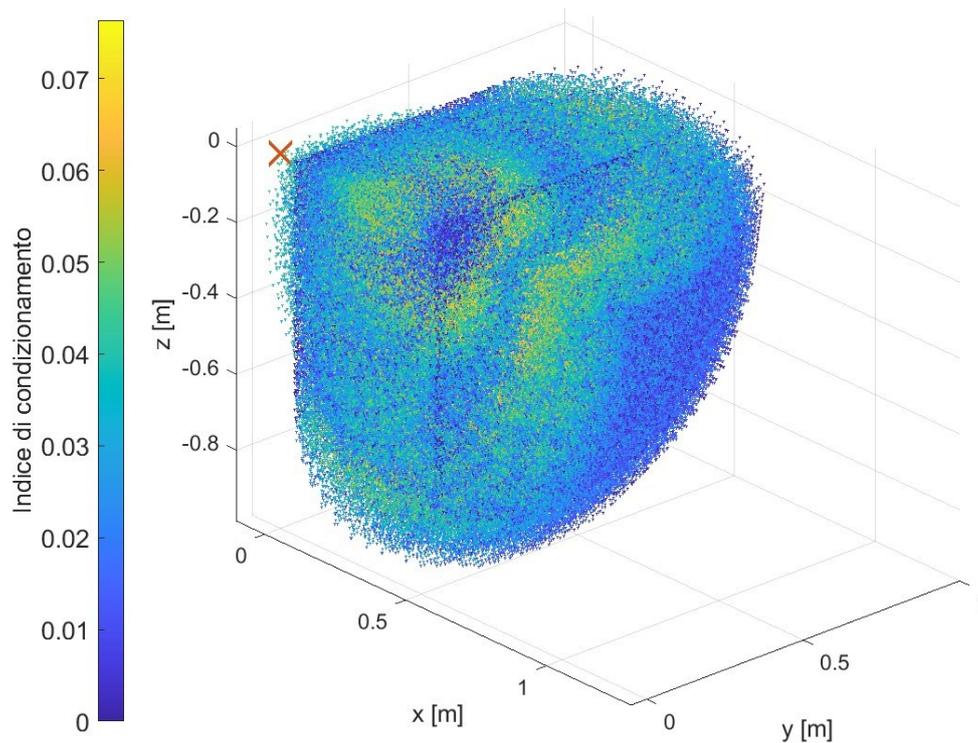


Figura 56: Indice di condizionamento della II configurazione

Il valore massimo dell'indice di condizionamento è 0,0763.

In questo caso il *workspace* è dominato da valori bassi dell'indice. I valori più alti sono distribuiti eterogeneamente. Questo è un aspetto negativo poiché se si ipotizza di tracciare una traiettoria retta, come nella maggior parte delle operazioni analizzate, si attraversano punti sia di alto che di basso indice di condizionamento. È impossibile stabilire a priori un punto di lavoro ottimale per questa configurazione.

III Configurazione

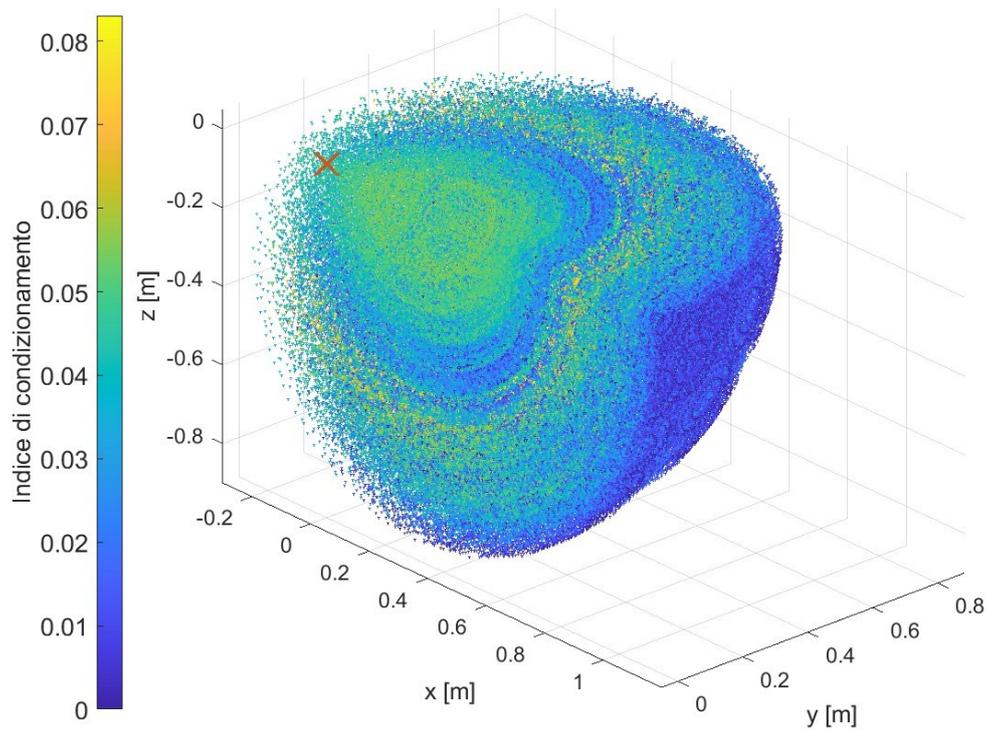


Figura 57: Indice di condizionamento della III configurazione

Il massimo dell'indice di condizionamento è di 0,0831

I valori medio-alti sono dominanti all'interno di questo *workspace*, in particolare nel nocciolo. Nella fascia intermedia, invece, c'è un'alternanza di valori medio-bassi con valori alti dell'indice. Si possono trarre le medesime conclusioni della configurazione 2 seppur, complessivamente, la media dell'indice è più alta.

IV Configurazione

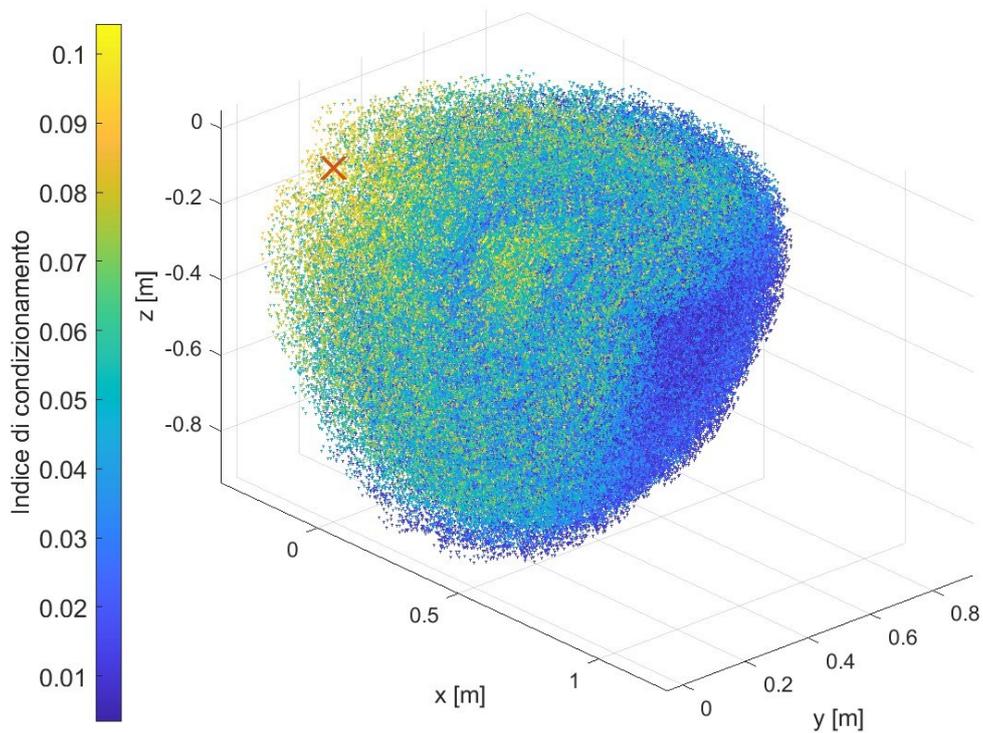


Figura 58: Indice di condizionamento della IV configurazione

Il valore massimo dell'indice è 0,1043.

La regione con l'indice di condizionamento più elevato è localizzata nelle vicinanze dell'origine del robot. Tuttavia, in questa applicazione, tale area non può essere considerata come parte dello spazio di lavoro effettivo. Nel complesso, escludendo il guscio esterno, il *workspace* risulta caratterizzato prevalentemente da valori medio-alti dell'indice di condizionamento. Considerando che tali valori rappresentano i massimi ottenibili nella configurazione 2, questa struttura può essere considerata una valida soluzione per l'applicazione analizzata.

V Configurazione

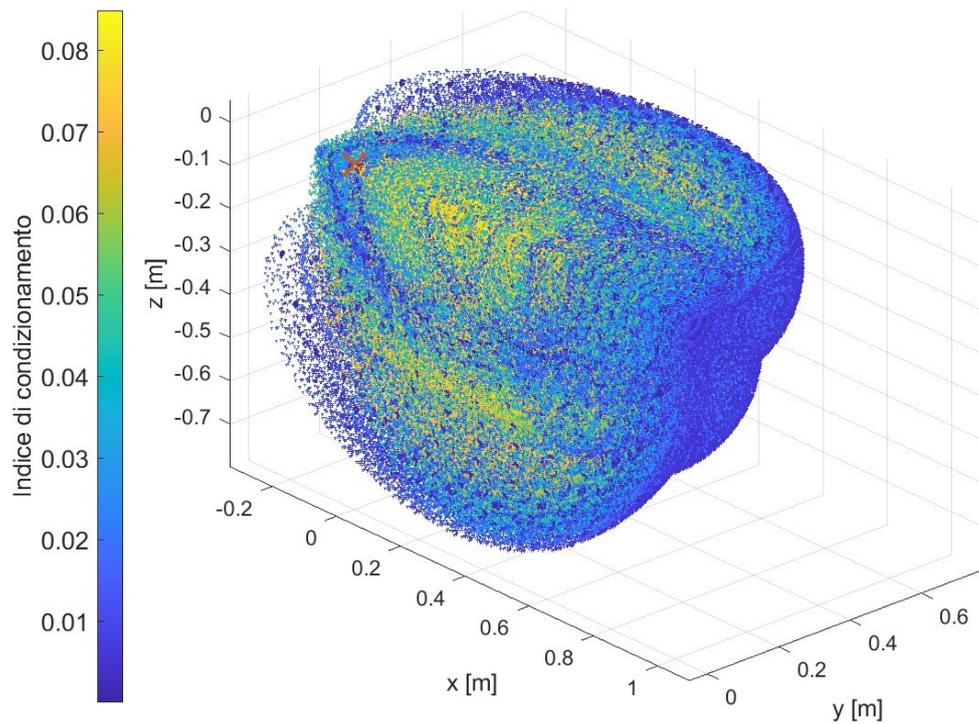


Figura 59: Indice di condizionamento della V configurazione

Si passa ora allo studio dei robot non ridondanti a 6 assi, il primo di questi presenta un indice di condizionamento massimo di 0,0849.

Dal grafico qui sopra è visibile l'alternanza di punti con alto indice di condizionamento con punti a indice di condizionamento molto basso. Quest'ultimi, rispetto alle configurazioni precedenti, sono in numero significativamente maggiore nelle zone interne al *workspace*. Comunque, nella fascia interna al guscio e nel nocciolo, c'è una maggioranza di valori relativamente medio-alti.

VI Configurazione

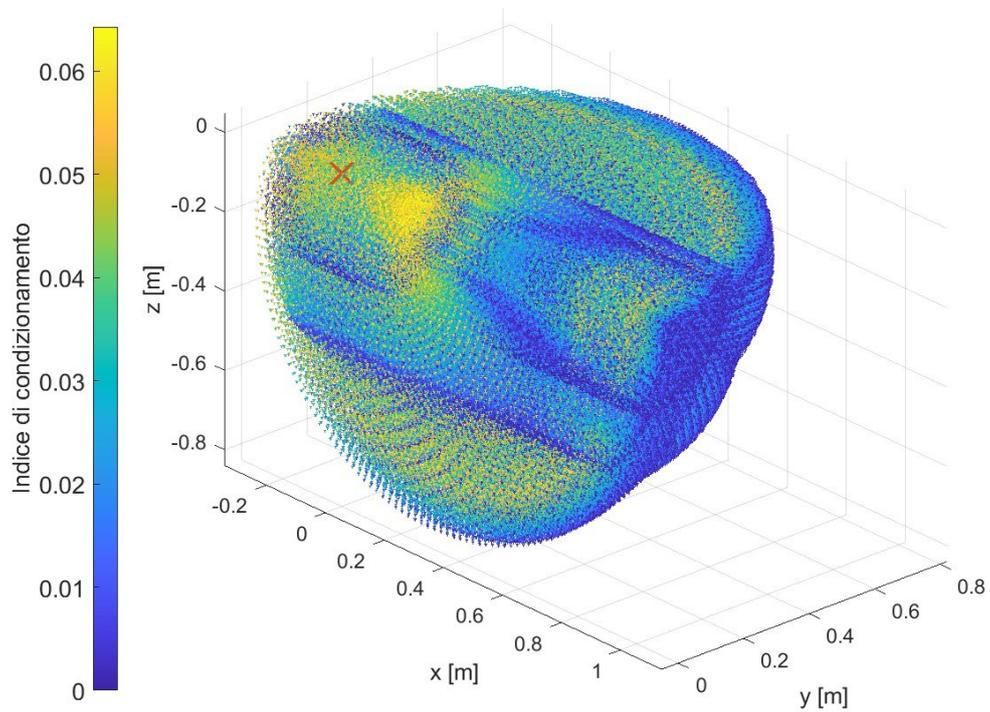


Figura 60: Indice di condizionamento della VI configurazione

Questa è la configurazione con il valore massimo dell'indice di configurazione più basso tra le strutture analizzate, infatti è di 0,0643.

La fascia intermedia è caratterizzata da valori medio-alti. Caratteristica che nella parte di analisi delle traiettorie risulta di significativa importanza.

VII Configurazione

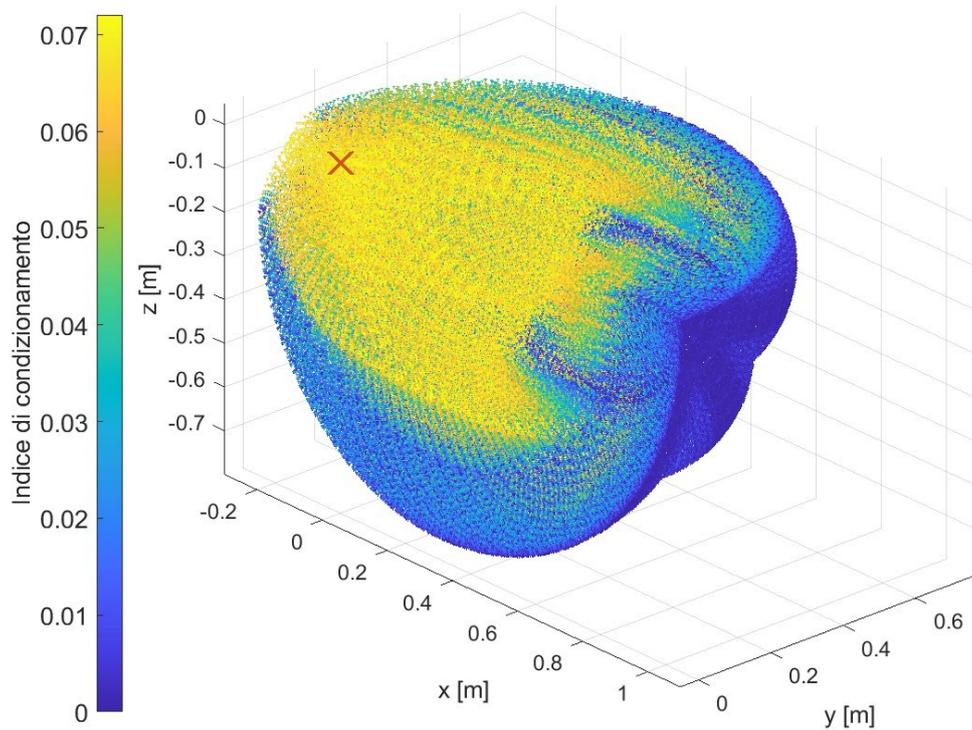


Figura 61: Indice di condizionamento della VII configurazione

Il valore massimo dell'indice di condizionamento dell'ultima configurazione è di 0,0720.

Anche in questo caso (Figura 61), come nel primo (Figura 55), si hanno 2 zone ben distinte: quella centrale dove è presente una gran quantità di punti ad elevato indice di condizionamento. Mentre, la zona più esterna, presenta punti "vicini" alla condizione di singolarità.

4.2.3 Conclusioni Indice di Condizionamento

In questo sottocapitolo è stato analizzato l'indice di condizionamento all'interno del *workspace* per le diverse configurazioni. È emerso che, variando la struttura, non solo i

valori dell'indice subiscono modifiche, ma anche la distribuzione di tali valori nel *workspace* cambia significativamente. In alcune configurazioni, infatti, sono state osservate zone con una netta separazione dei valori, mentre in altri casi l'indice mostrava una distribuzione eterogenea sull'intero volume del *workspace*.

Nella Tabella 16 vengono confrontati i valori massimi per le diverse configurazioni.

Configurazione	Indice di condizionamento _{MAX}
I	0,0945
II	0,0763
III	0,0831
IV	0,1043
V	0,0849
VI	0,0643
VII	0,0720

Tabella 16: Confronto indici di condizionamento massimi nel *workspace*

Come da letteratura, i manipolatori ridondanti a 7 assi hanno una destrezza maggiore rispetto a quelli a sei assi. Infatti, in media hanno un valore massimo di indice di condizionamento maggiore. Questa caratteristica è evidenziata anche dallo studio del valore medio, infatti:

Configurazione	Indice di condizionamento _{Medio}
I	0,0387
II	0,0299
III	0,0325
IV	0,0457
V	0,0294
VI	0,0212
VII	0,0230

Tabella 17: Indice di condizionamento medio all'interno del *workspace*

Le configurazioni che danno i migliori risultati in questa analisi sono: I, III, IV, VII. La prima e la settima configurazione presentano una zona con punti ad elevato indice di

condizionamento. Quindi è possibile impostare le traiettorie all'interno di questa zona. Le configurazioni 3 e 4, nonostante presentino una distribuzione più eterogenea di valori, non scendono mai sotto una soglia limite all'interno di quasi tutto il volume, per cui è possibile sfruttare una buona percentuale del workspace per studiare le traiettorie. Tutto sommato, non è possibile escludere a priori le restanti strutture, poiché è da verificare il raggiungimento dei punti target.

4.3 Studio delle Traiettorie

Per verificare l'efficacia delle strutture nell'eseguire i task previsti, si conduce uno studio approfondito delle traiettorie percorse dall'end-effector. L'obiettivo dell'analisi è definire una traiettoria che consenta al robot di raggiungere i punti target senza entrare in collisione con le pareti del condotto o con i collari. Per ogni punto della traiettoria si calcola l'indice di condizionamento e, tramite un processo iterativo di ottimizzazione della posizione della base del robot, si migliora la traiettoria per ottenere i valori massimi dell'indice di condizionamento, incrementando così le prestazioni e l'affidabilità complessiva del sistema.

Per la realizzazione delle simulazioni, è stata adottata la seguente metodologia: inizialmente, è stato sviluppato uno script in *Matlab* per generare la traiettoria desiderata dell'end-effector. Successivamente, tramite l'utilizzo di *Simulink*, è stata implementata la cinematica inversa necessaria per calcolare i movimenti articolari corrispondenti. Infine, attraverso *Mechanics Explorer*, sono stati visualizzati e analizzati i movimenti del robot durante l'esecuzione dei task assegnate.

Per generare la traiettoria, lo script *Matlab*, in Appendice A.6, utilizza la funzione “*quinticpolytraj*”. A partire dalla posizione e dall'orientamento dell'End-Effector nei

punti chiave (ad esempio, partenza e arrivo), dai rispettivi tempi di passaggio e da un set di tempi di campionamento, la funzione restituisce posizione, velocità e accelerazione per ogni intervallo di tempo di campionamento, seguendo la forma di un polinomio di quinto ordine [19].

4.3.1 Traiettorie delle Configurazioni

Di seguito vengono visualizzati i risultati dell'analisi delle traiettorie per i diversi task: tubi bassi e tubi laterali per il condotto 4; tubi bassi centrali, tubi bassi laterali, tubi laterali bassi e tubi laterali alti per il condotto 3. In tutte le configurazioni viene studiato prima il condotto 4 poiché i tubi sono raggiungibili più facilmente. Di conseguenza se il robot non riesce ad eseguire i task per il condotto 4 non viene effettuata l'analisi per il condotto 3 e la configurazione viene scartata. Le diverse strutture sono valutate sia sulla base del raggiungimento dei luoghi di prelievo (rilascio) che dell'indice di condizionamento nei punti della traiettoria, particolarmente quelli in prossimità dei tubi.

I Configurazione

- Condotto 4, tubi bassi

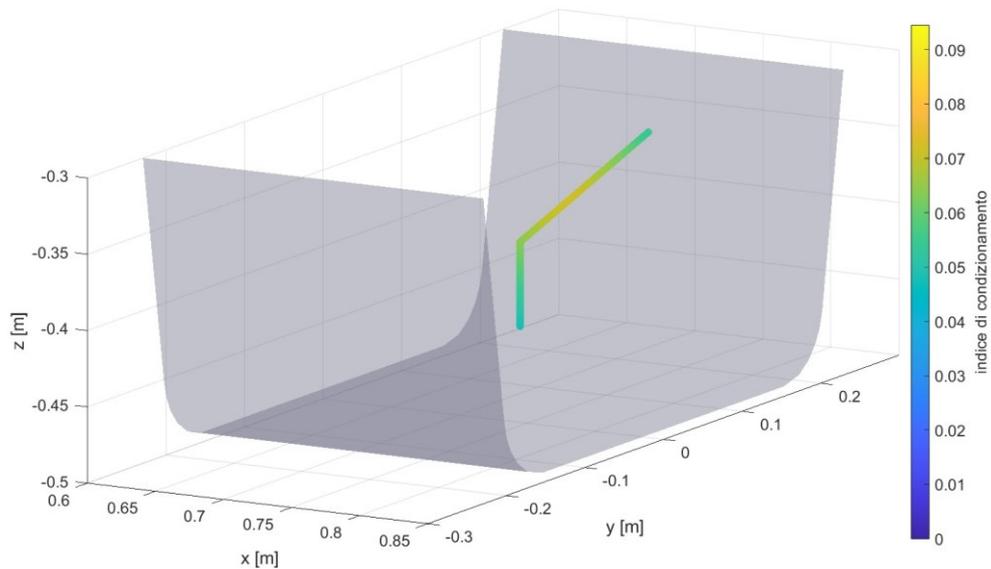


Figura 62: Traiettoria Condotto 4, tubi bassi, I Configurazione

Indice di condizionamento minimo	0,0475
Indice di condizionamento massimo	0,0716
Indice di condizionamento punto finale	0,0475

Tabella 18: Indici Condotto 4, tubi bassi I Configurazione

- Condotto 4, tubi laterali

In questo caso si osserva come il giunto numero 6 sia troppo vicino ai tubi posizionati sulla faccia opposta del condotto (vedi cerchio evidenziato in rosso).

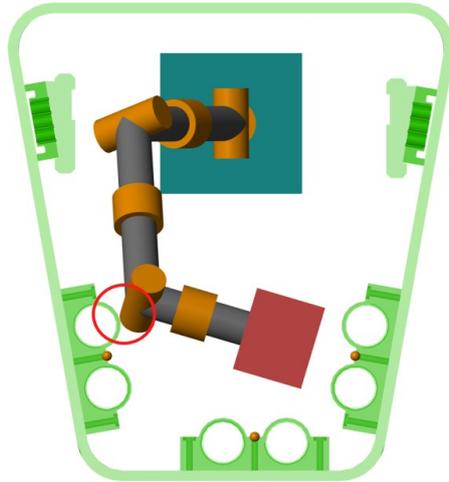


Figura 63: Simulazione condotto 4, tubi laterali, I Configurazione

Per questo motivo si considera la struttura non idonea all'esecuzione di queste operazioni.

II Configurazione

Dal momento che risulta più complesso raggiungere i tubi laterali che quelli in basso da questo momento si analizza prima la simulazione più critica.

- Condotta 4, tubi laterali

Nel cercare di raggiungere la posizione di avvicinamento l'end-effector va a urtare la struttura del condotto, di conseguenza anche questa configurazione risulta inadeguata.

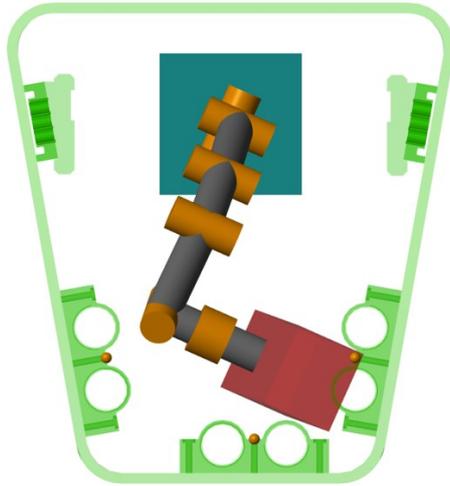


Figura 64: Simulazione condotto 4, tubi laterali, II Configurazione

III Configurazione

- Condotta 4, tubi laterali

Anche per questo robot valgono le medesime considerazioni fatte nei casi precedenti.

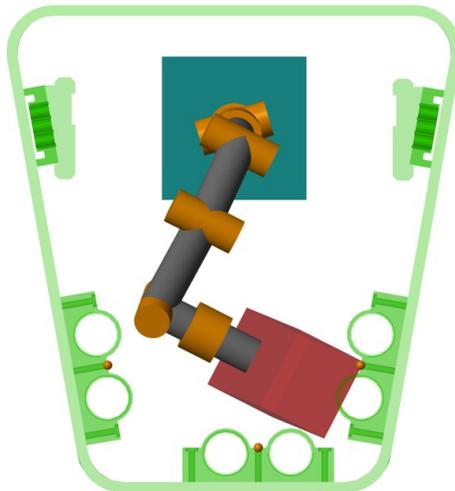


Figura 65: Simulazione condotto 4, tubi laterali, III Configurazione

IV Configurazione

- Condotto 4, tubi laterali

In questo caso si vede come la struttura si posiziona correttamente.

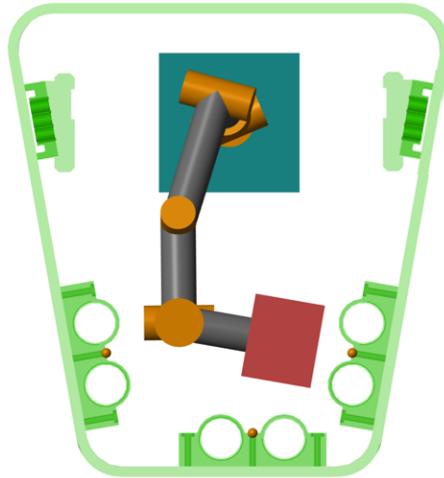


Figura 66: Simulazione condotto 4, tubi laterali, IV Configurazione

L'andamento dell'indice di condizionamento della traiettoria risulta:

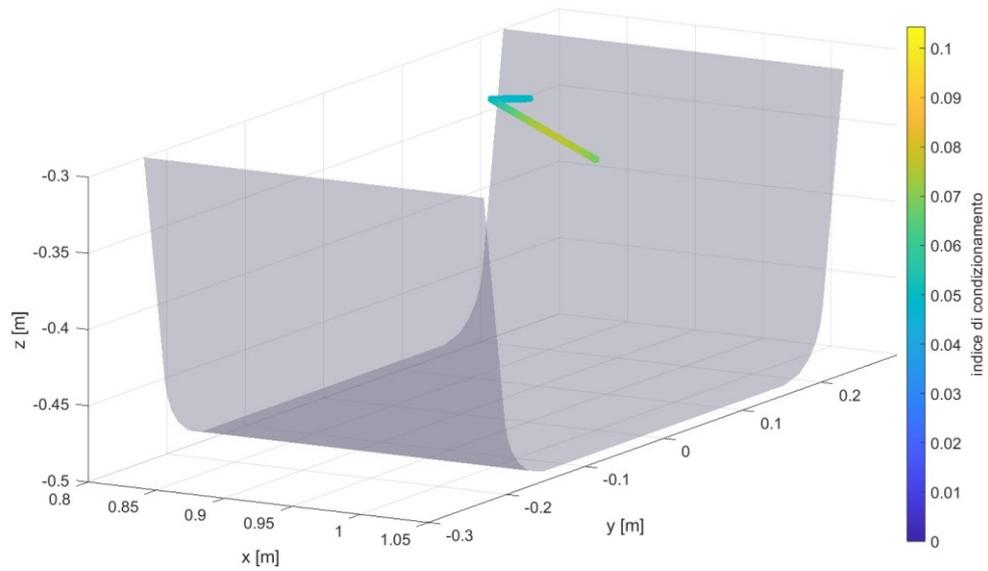


Figura 67: Traiettoria Condotto 4, tubi laterali, IV Configurazione

Indice di condizionamento minimo	0,0766
Indice di condizionamento massimo	0,0468
Indice di condizionamento punto finale	0,0498

Tabella 19: Indici Condotto 4, tubi laterali IV Configurazione

- Condotto 4, tubi bassi

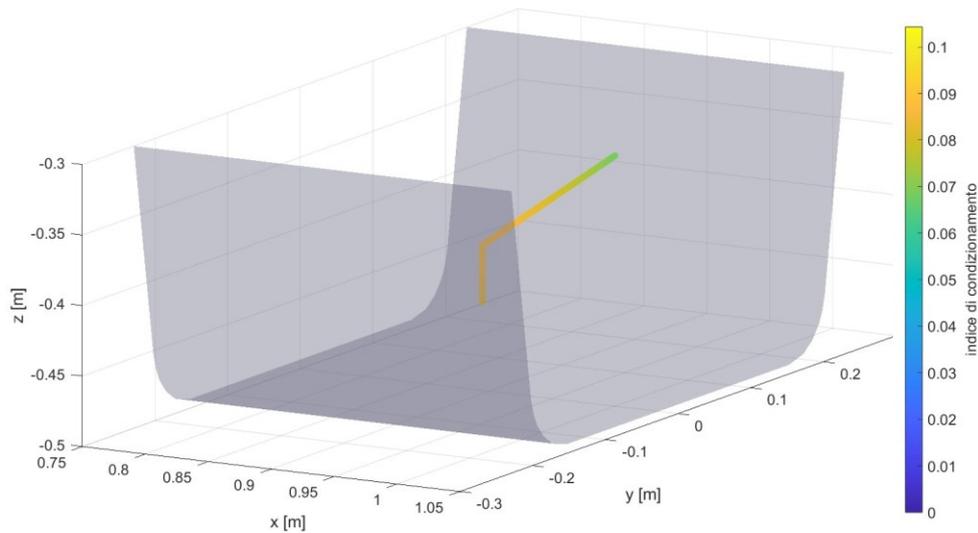


Figura 68: Traiettoria Condotto 4, tubi bassi, IV Configurazione

Indice di condizionamento minimo	0,0687
Indice di condizionamento massimo	0,0870
Indice di condizionamento punto finale	0,0833

Tabella 20: Indici Condotto 4, tubi bassi IV Configurazione

- Condotto 3, tubi bassi a destra

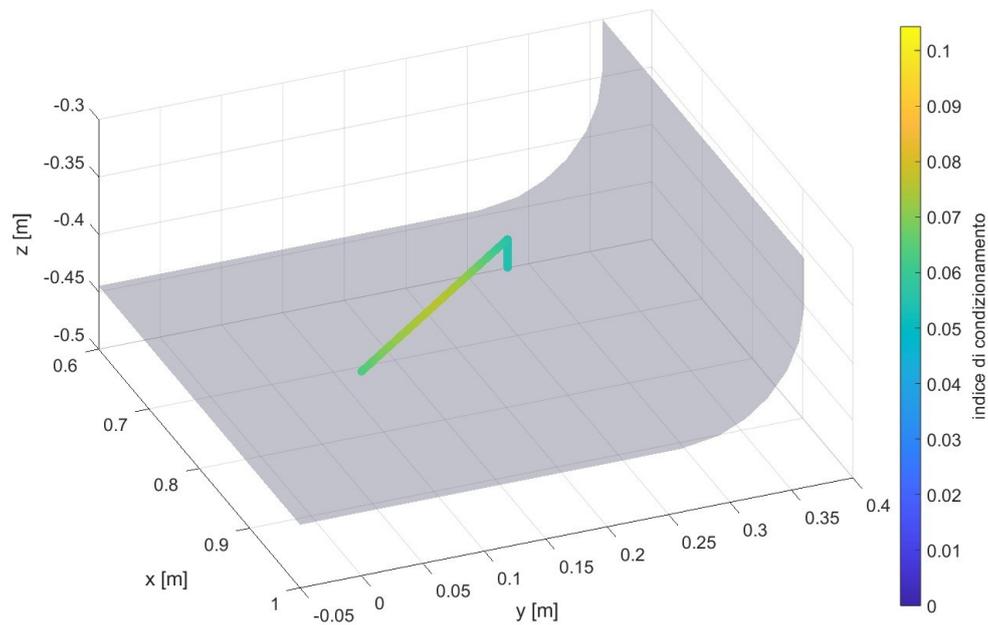


Figura 69: Traiettoria Condotto 3, tubi bassi a destra, IV Configurazione

Indice di condizionamento minimo	0,0542
Indice di condizionamento massimo	0,0759
Indice di condizionamento punto finale	0,0542

Tabella 21: Indici Condotto 3, tubi bassi a destra, IV Configurazione

- Condotto 3, tubi bassi a centrali

Indice di condizionamento minimo	0,0638
Indice di condizionamento massimo	0,0797
Indice di condizionamento punto finale	0,0765

Tabella 22: Indici Condotto 3, tubi bassi centrali, IV Configurazione

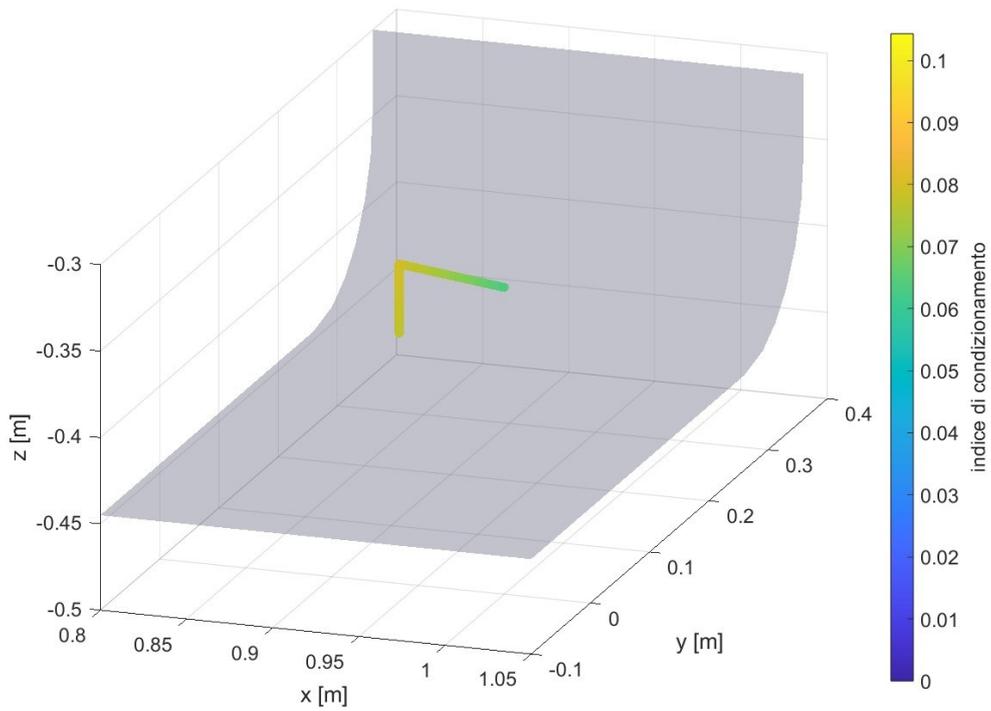


Figura 70: Traiettorie Condotta 3, tubi bassi centrali, IV Configurazione

- Condotta 3, tubi laterali alti

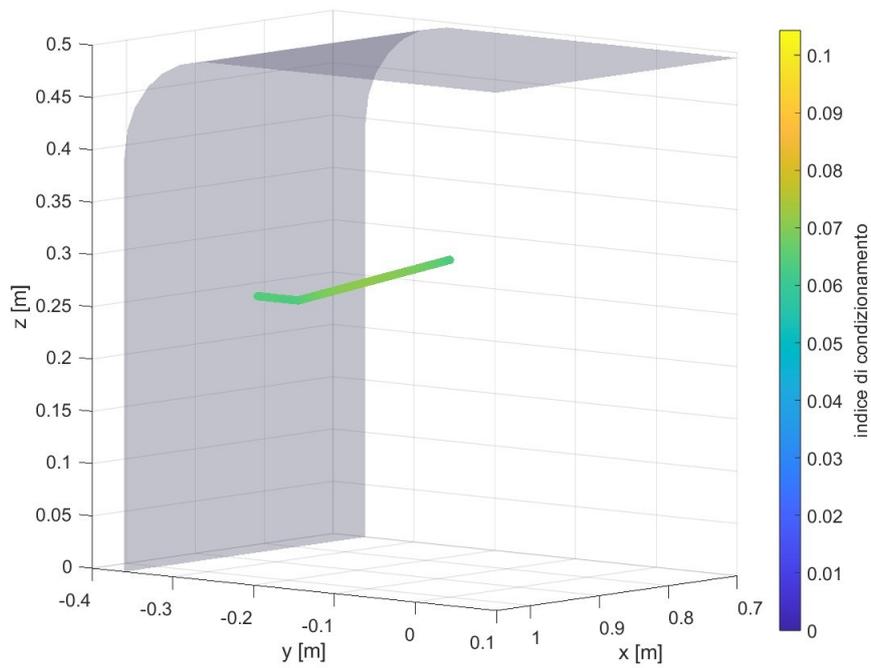


Figura 71: Traiettorie Condotta 3, tubi laterali alti, IV Configurazione

Indice di condizionamento minimo	0,0634
Indice di condizionamento massimo	0,0710
Indice di condizionamento punto finale	0,0642

Tabella 23: Indici Condotto 3, tubi laterali alti, IV Configurazione

In questo caso è stato scelto di far entrare il robot ruotato di 180° rispetto alla posizione di ingresso nel caso di rilascio (prelievo) dei tubi bassi in modo da riuscire ad eseguire una traiettoria migliore per l'approccio ai tubi laterali.

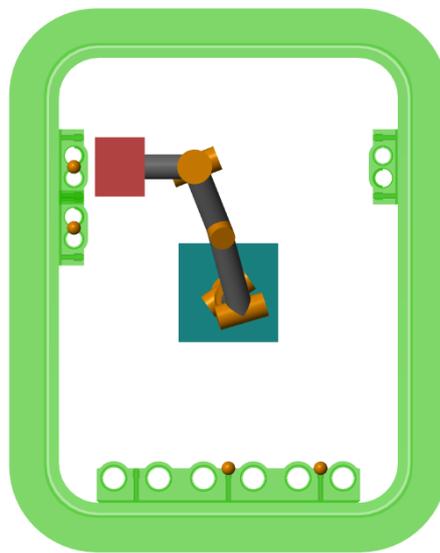


Figura 72: Simulazione condotto 3, tubi laterali alti, IV Configurazione

- Condotto 3, tubi laterali bassi

Indice di condizionamento minimo	0,0506
Indice di condizionamento massimo	0,0769
Indice di condizionamento punto finale	0,0531

Tabella 24: Indici Condotto 3, tubi laterali bassi, IV Configurazione

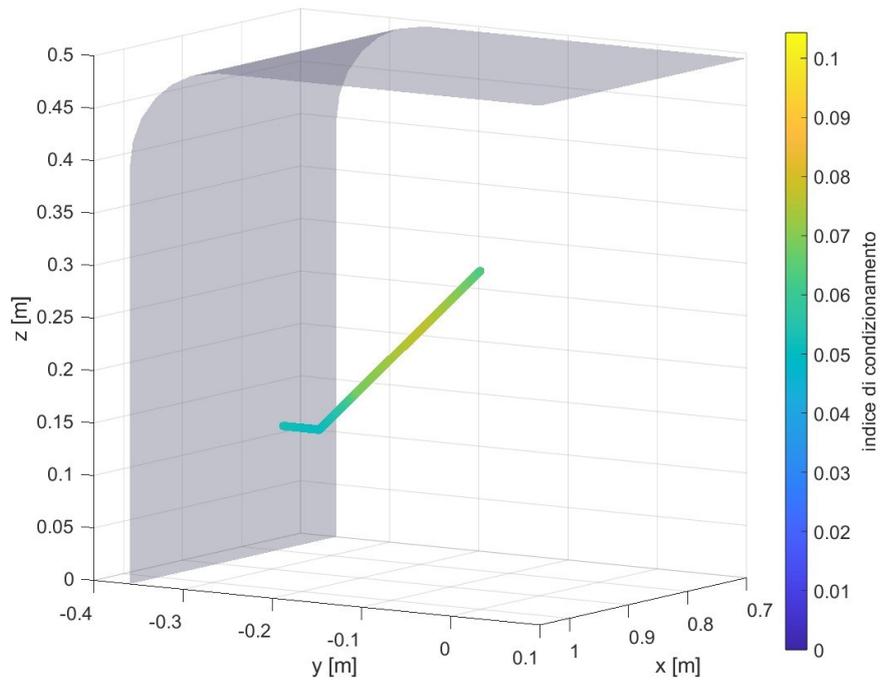


Figura 73: Traiettorie Condotta 3, tubi laterali bassi, IV Configurazione

Questa configurazione è in grado di raggiungere tutti i target con un discreto indice di condizionamento.

V Configurazione

Si analizzano ora i risultati per i robot non ridondanti.

- Condotto 4, tubi laterali

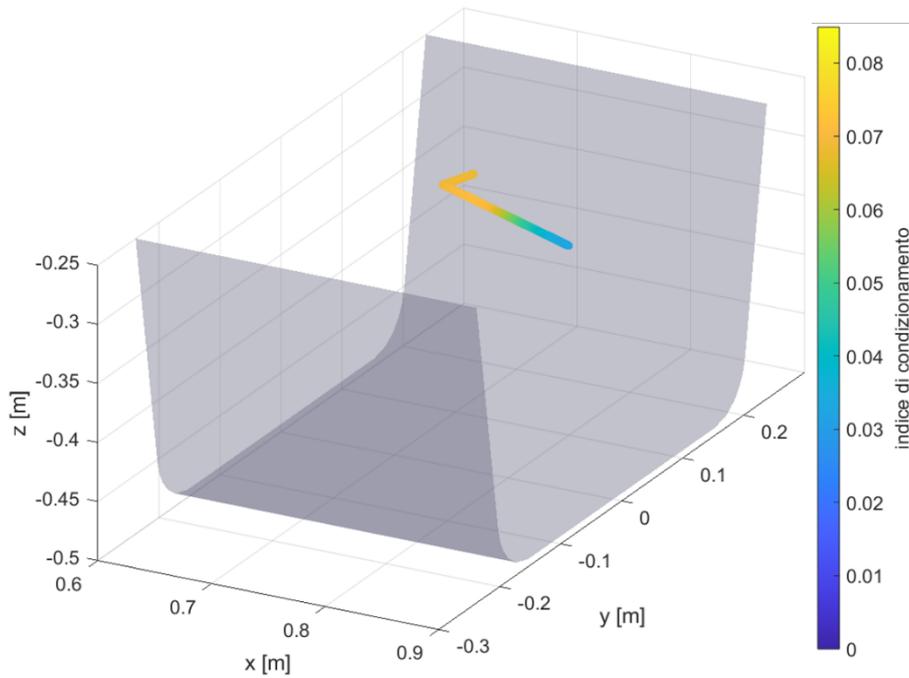


Figura 74: Traiettorie Condotto 4, tubi laterali, V Configurazione

Indice di condizionamento minimo	0,0326
Indice di condizionamento massimo	0,0710
Indice di condizionamento punto finale	0,0683

Tabella 25: Indici Condotto 4, tubi laterali, V Configurazione

- Condotto 4, tubi bassi

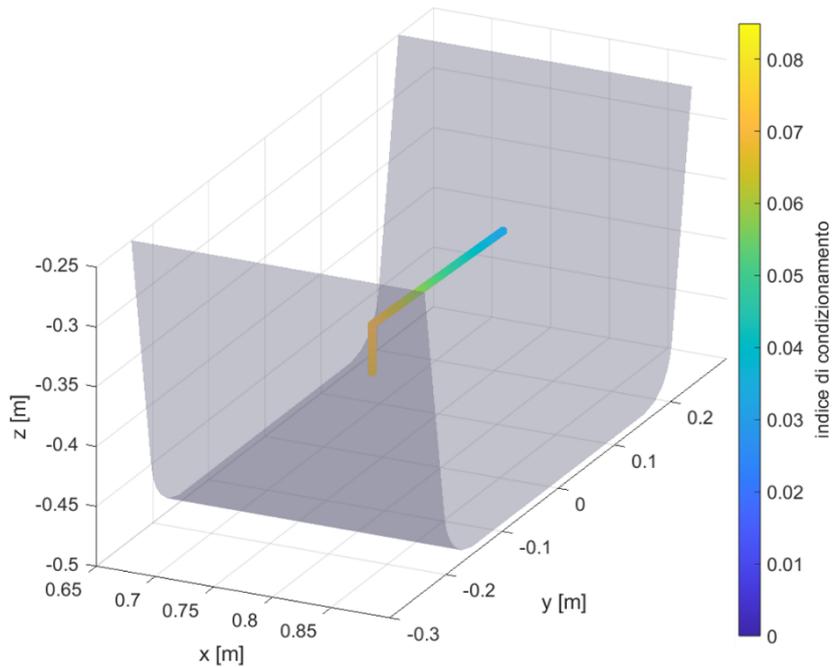


Figura 75: Traiettorie Condotto 4, tubi bassi, V Configurazione

Indice di condizionamento minimo	0,0326
Indice di condizionamento massimo	0,0711
Indice di condizionamento punto finale	0,0670

Tabella 26: Indici Condotto 4, tubi bassi, V Configurazione

- Condotto 3, tubi bassi a destra

Indice di condizionamento minimo	0,0326
Indice di condizionamento massimo	0,0748
Indice di condizionamento punto finale	0,0748

Tabella 27: Indici Condotto 3, tubi bassi a destra, V Configurazione

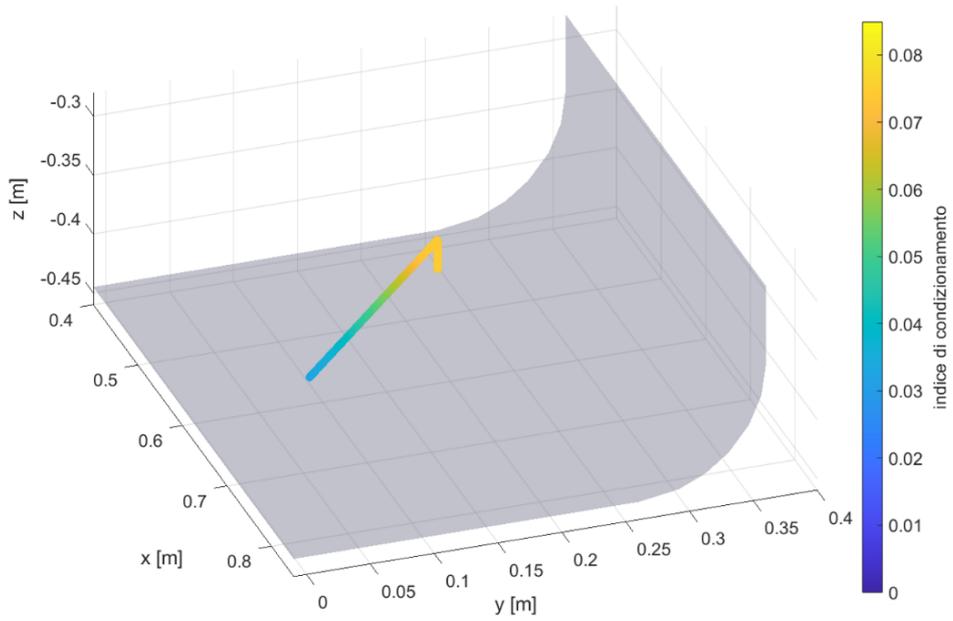


Figura 76: Traiettorie Condotta 3, tubi bassi a destra, V Configurazione

- Condotta 3, tubi bassi a centrali

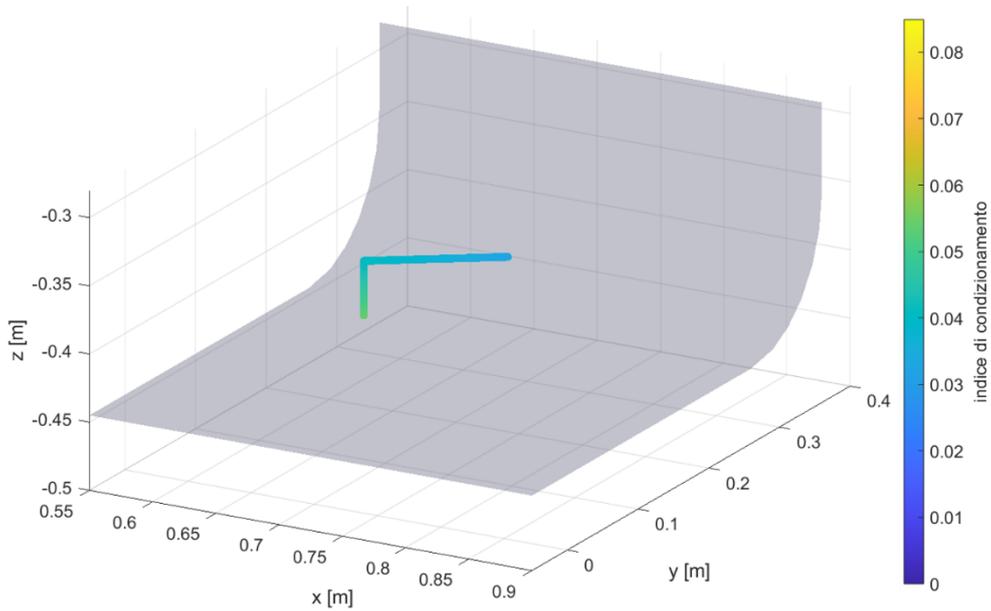


Figura 77: Traiettorie Condotta 3, tubi bassi centrali, V Configurazione

Indice di condizionamento minimo	0,0326
Indice di condizionamento massimo	0,0547
Indice di condizionamento punto finale	0,0547

Tabella 28: Indici Condotto 3, tubi bassi centrali, V Configurazione

- Condotto 3, tubi laterali in alto

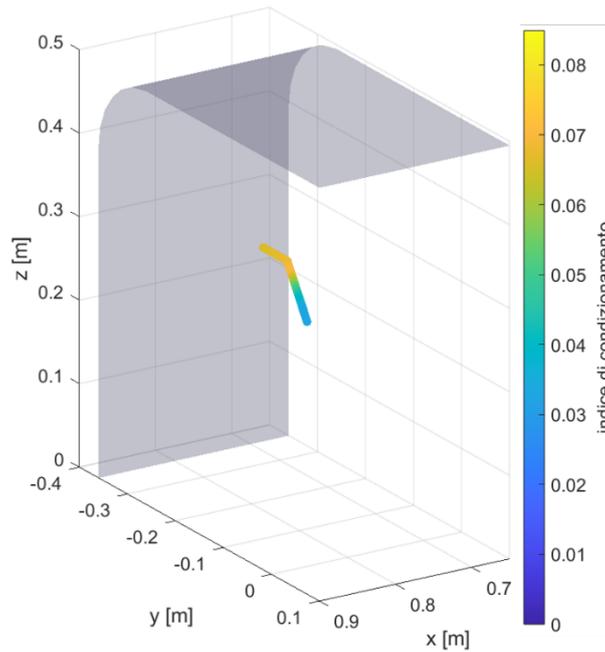


Figura 78: Traiettorie Condotto 3, tubi laterali in alto, V Configurazione

Indice di condizionamento minimo	0,0322
Indice di condizionamento massimo	0,0700
Indice di condizionamento punto finale	0,0653

Tabella 29: Indici Condotto 3, tubi laterali in alto, V Configurazione

- Condotto 3, tubi laterali in basso

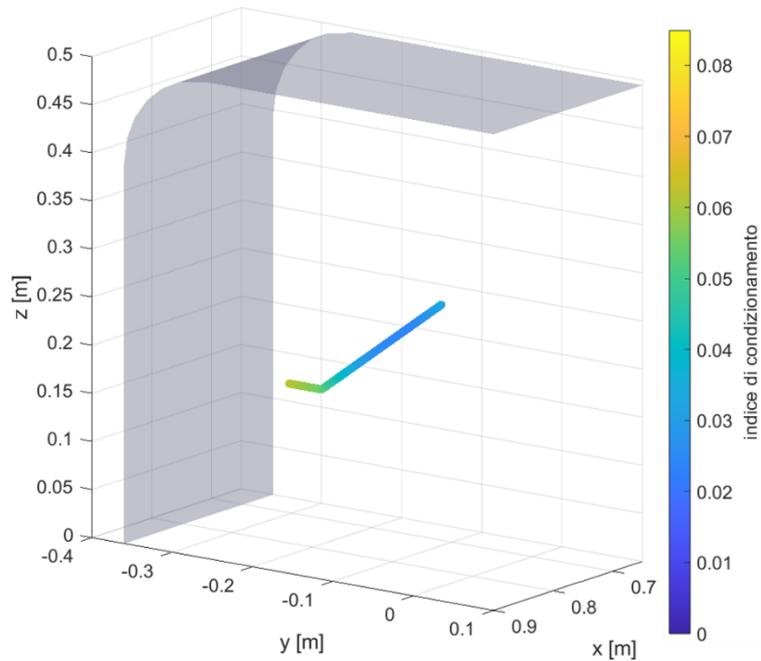


Figura 79: Traiettorie Condotto 3, tubi laterali in basso, V Configurazione

Indice di condizionamento minimo	0,0241
Indice di condizionamento massimo	0,0626
Indice di condizionamento punto finale	0,0626

Tabella 30: Indici Condotto 3, tubi laterali in basso, V Configurazione

Anche con questa configurazione è possibile raggiungere tutti i punti di prelievo (rilascio) dei tubi. Il grande vantaggio di questa struttura è la capacità di avere un buon indice di condizionamento lungo tutta la traiettoria. In particolare, queste 6 simulazioni, mostrano come il massimo dell'indice sia sempre nel punto finale. Questo fatto è di grande rilevanza poiché l'indice di condizionamento è anche considerato una misura dell'accuratezza cinematica. [15]

VI Configurazione

- Condotto 4, tubi laterali

Anche in questo caso, nonostante si sia cercata la posizione ottimale, il giunto 4 va ad urtare i tubi nel lato opposto: la struttura non è accettata.

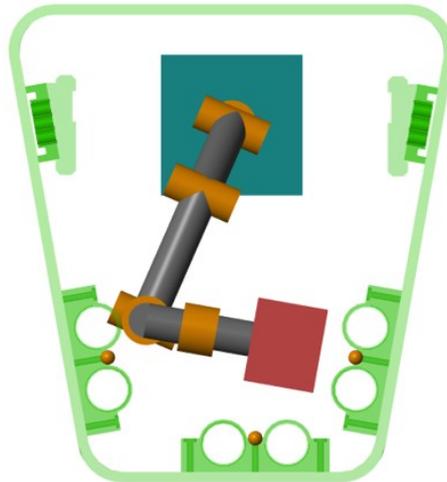


Figura 80: Simulazione condotto 4, tubi laterali alti, VI Configurazione

VII Configurazione

- Condotto 4, tubi laterali

Indice di condizionamento minimo	0,0231
Indice di condizionamento massimo	0,0637
Indice di condizionamento punto finale	0,0627

Tabella 31: Indici Condotto 4, tubi laterali, VII Configurazione

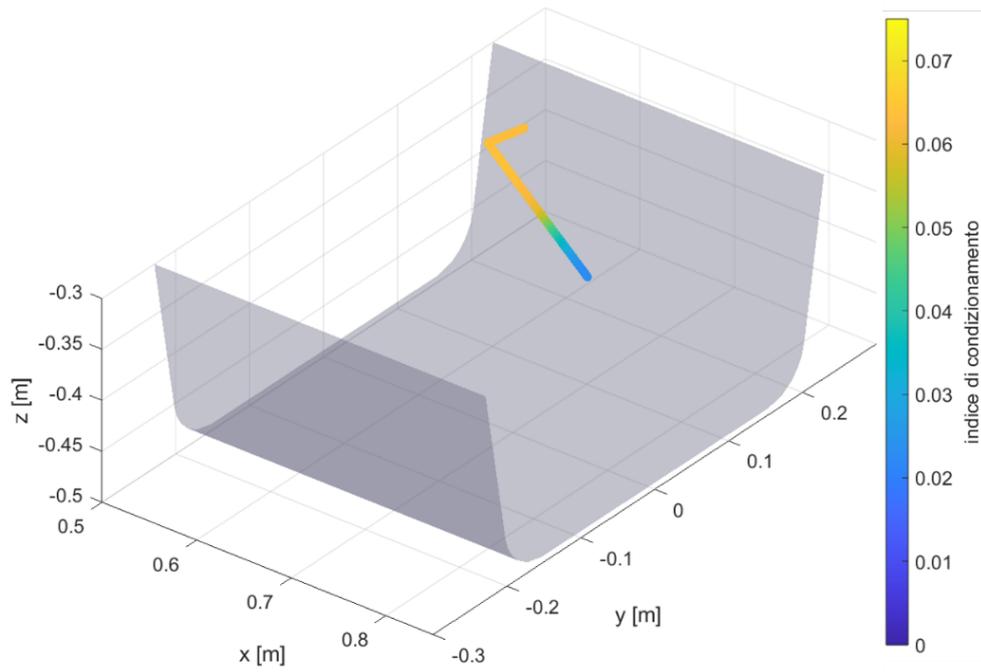


Figura 81: Traiettorie Condotto 4, tubi laterali, VII Configurazione

- Condotto 4, tubi bassi

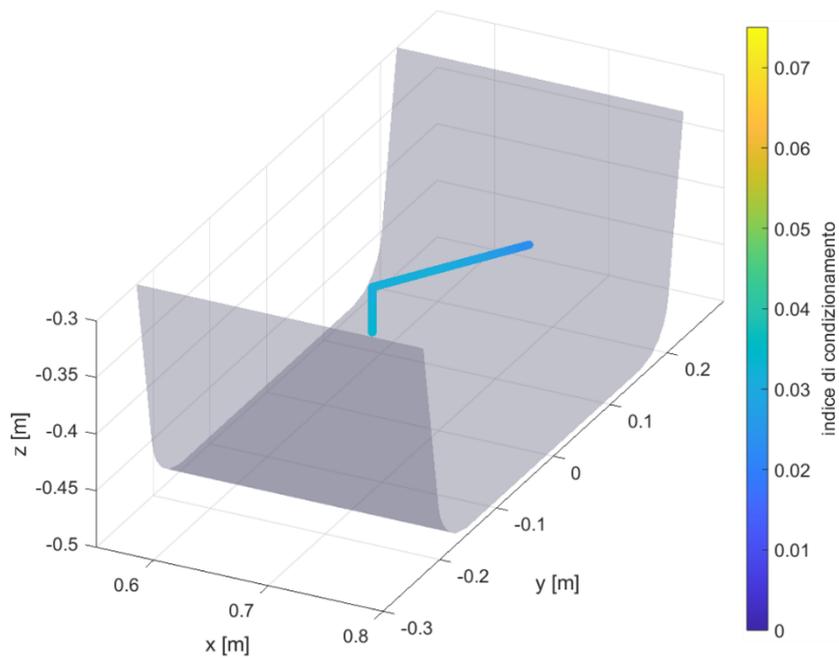


Figura 82: Traiettorie Condotto 4, tubi bassi, VII Configurazione

Indice di condizionamento minimo	0,0232
Indice di condizionamento massimo	0,0338
Indice di condizionamento punto finale	0,0338

Tabella 32: Indici Condotto 4, tubi bassi, VII Configurazione

- Condotto 3, tubi bassi a destra

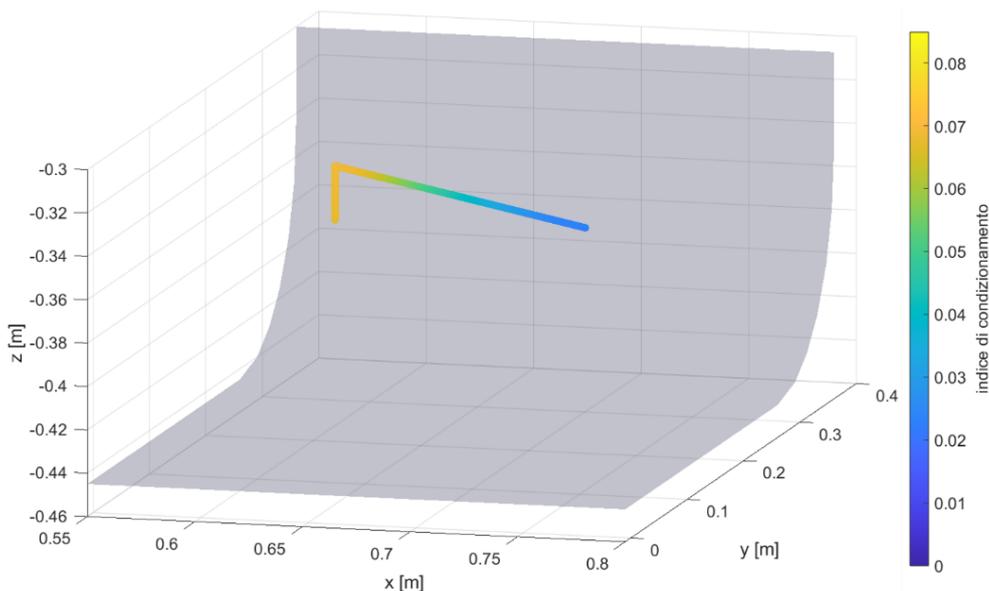


Figura 83: Traiettorie Condotto 3, tubi bassi a destra, VII Configurazione

Indice di condizionamento minimo	0,0231
Indice di condizionamento massimo	0,0690
Indice di condizionamento punto finale	0,0674

Tabella 33: Indici Condotto 3, tubi bassi a destra, VII Configurazione

- Condotto 3, tubi bassi centrali

Indice di condizionamento minimo	0,0204
Indice di condizionamento massimo	0,0313
Indice di condizionamento punto finale	0,0313

Tabella 34: Indici Condotto 3, tubi bassi centrali, VII Configurazione

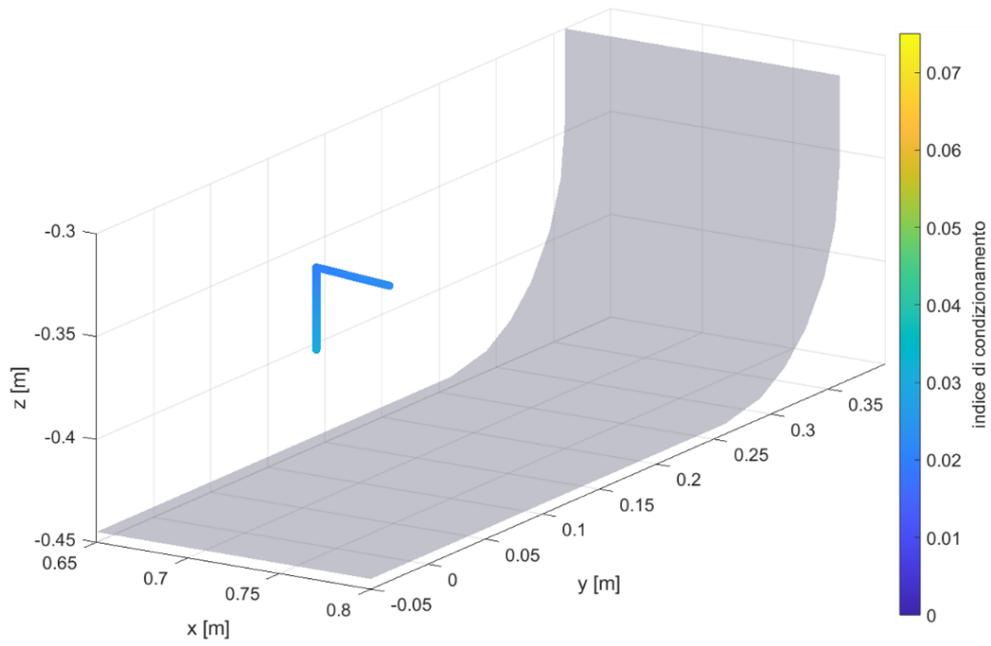


Figura 84: Traiettorie Condotto 3, tubi bassi centrali, VII Configurazione

- Condotto 3, tubi laterali alti

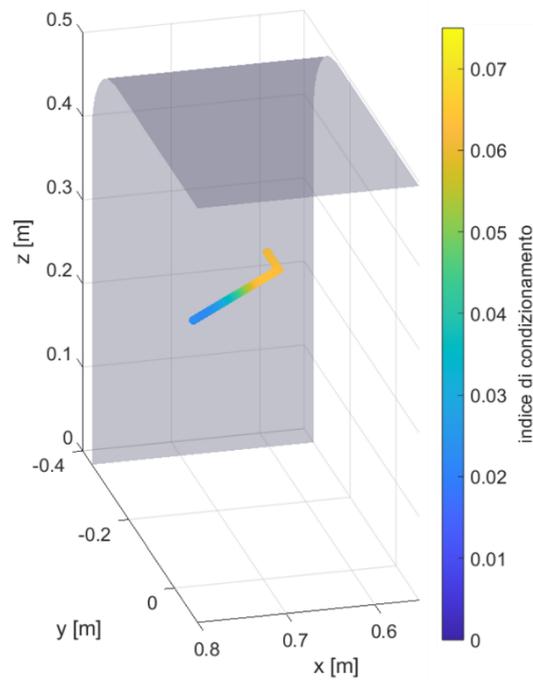


Figura 85: Traiettorie Condotto 3, tubi laterali in alto, VII Configurazione

Indice di condizionamento minimo	0,0221
Indice di condizionamento massimo	0,0639
Indice di condizionamento punto finale	0,0605

Tabella 35: Indici Condotto 3, tubi laterali in alto, VII Configurazione

- Condotto 3, tubi laterali bassi

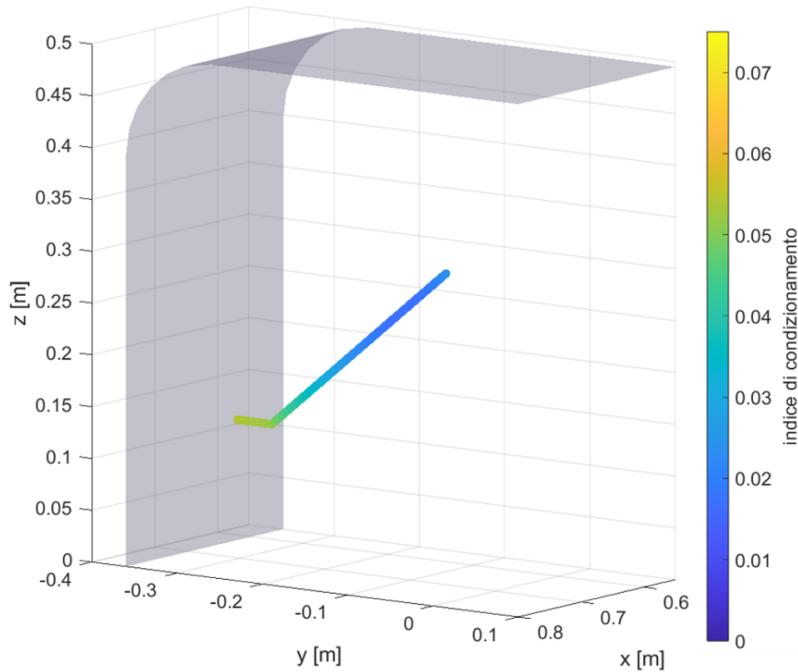


Figura 86: Traiettorie Condotto 3, tubi laterali bassi, VII Configurazione

Indice di condizionamento minimo	0,0171
Indice di condizionamento massimo	0,0544
Indice di condizionamento punto finale	0,0544

Tabella 36: Indici Condotto 3, tubi laterali bassi, VII Configurazione

I valori dell'indice di condizionamento per questa configurazione sono discreti, leggermente inferiori rispetto ai precedenti. Ciononostante, anche in questo caso i valori massimi dell'indice sono nei pressi del punto finale della traiettoria.

4.4 Scelta Configurazione

Dai risultati dei diversi fattori di valutazione si traggono le seguenti conclusioni:

- Dallo studio del workspace si sceglie di operare solamente nei condotti 3 e 4 con lo stesso robot. Mentre il condotto 2 necessita di studi più approfonditi a causa delle sue piccole dimensioni e della posizione obbligata della base del robot.
- Dallo studio dell'indice di condizionamento all'interno si nota che i robot ridondanti hanno una destrezza maggiore rispetto a quelli a 6 assi. Tuttavia, la differenza non è eccessivamente marcata. Si potrebbero escludere le strutture 2 e 6, cosa che effettivamente viene confermata nell'analisi successiva.
- Attraverso lo studio delle traiettorie emerge che non tutte le configurazioni sono in grado di eseguire i task previste. Per questo vengono considerate idonee solamente i robot 4, 5 e 7.

Di seguito verranno confrontati i risultati degli indici di condizionamento nei punti finali delle traiettorie per le 3 configurazioni considerate idonee ad eseguire i task richieste da progetto.

Task	Configurazione	Indice di condizionamento
Condotto 4, Tubi Laterali	IV	0,0498
	V	0,0683
	VII	0,0627
Condotto 4, Tubi Bassi	IV	0,0687
	V	0,0670
	VII	0,0338
Condotto 3, Tubi Bassi a destra	IV	0,0542
	V	0,0748
	VII	0,0674
Condotto 3, Tubi Bassi centrali	IV	0,0765
	V	0,0547
	VII	0,0313
Condotto 3, Tubi Laterali in alto	IV	0,0642
	V	0,0653
	VII	0,0605
Condotto 3, Tubi Laterali bassi	IV	0,0531
	V	0,0626
	VII	0,0544

Tabella 37: Confronto indice di condizionamento delle traiettorie per le configurazioni idonee

Si nota come l'indice di condizionamento non vari di molto tra le configurazioni per cui, sulla base di questi risultati, si opta per una soluzione non ridondante anche per questioni di semplicità costruttive, economiche e di ingombri.

Per ragioni costruttive, tra le due configurazioni rimanenti, si è preferita la settima. Sebbene entrambe le strutture presentino gli stessi orientamenti dei giunti, la differenza risiede nel fissaggio dell'end-effector. La configurazione numero 5 utilizza un montaggio a sbalzo, il che implica che, durante la rotazione dell'ultimo giunto, la coppia richiesta è maggiore, con il rischio di un sovradimensionamento del motoriduttore finale. Al contrario, la configurazione numero 7 prevede un fissaggio frontale, il che comporta che, ruotando il penultimo giunto, si generi un momento di inclinazione più contenuto sull'ultimo motoriduttore. È importante notare che l'ultimo giunto sia progettato per essere più snello, poiché è la parte del robot che presenta il maggior rischio di urti, sia con altri

oggetti che con la stessa struttura del robot. Alla luce di queste considerazioni, è stata selezionata la settima configurazione.

CAPITOLO 5

MODELLAZIONE DEL ROBOT E VERIFICA TRAIETTORIE

Stabilita la configurazione finale è ora necessario effettuare la modellazione CAD del robot al fine di verificare che il robot non urti degli oggetti all'interno del condotto attraverso ulteriori simulazioni.

Il processo di modellazione si articola in tre fasi principali. In primo luogo, si procede con la selezione dei motoriduttori appropriati per ciascun giunto del robot. Successivamente, viene sviluppato un modello dettagliato del robot utilizzando il software *CAD SolidWorks*, che consente di rappresentare accuratamente le dimensioni e le caratteristiche meccaniche dei *link* e dei giunti. Infine, il modello viene validato mediante una simulazione eseguita su *Simulink*, replicando le condizioni delle analisi precedenti ma integrando le dimensioni reali dei componenti.

5.1 Scelta dei Motori e dei Riduttori

In questo paragrafo si espone il metodo di selezione dei servoattuatori. Vengono presentate le diverse stime e ipotesi iniziali utili per conseguire una corretta progettazione degli organi meccanici.

La scelta dei componenti meccanici è stata effettuata supponendo, da una bozza della struttura meccanica, la massa di *link* e *joint*.

Link	Masse ipotetiche [kg]
1	20
2	9
3	7,8
4	3
5	7
end-effector	15

Tabella 38: Masse ipotetiche

La massa del *link* 6 è compresa in quella del *joint* 6.

Joint	Masse ipotetiche [kg]
1	9
2	5
3	5
4	5
5	5
6	5

Tabella 39: Masse ipotetiche Joint

Si sono aggiunti al modello *Simulink* utilizzato per lo studio delle traiettorie dei sensori di coppia, momento *tiltante* e velocità ad ogni *joint*. In questo modo si è potuto ricavare i valori ipotetici delle diverse grandezze necessari ai motoriduttori. Di seguito sono esposti i risultati per le diverse simulazioni.

Condotto 4, tubi bassi centrali			
Joint	Momento tiltante massimo [Nm]	Coppia [Nm]	Velocità [rpm]
1	250,01	10,00	0,36
2	26,21	183,60	1,09
3	15,79	89,20	1,33
4	38,00	0	0,45
5	0	0	1,04
6	0	0	0,42

Tabella 40: Grandezze risultanti condotto 4, tubi bassi centrali

Condotto 4, tubi laterali			
Joint	Momento tiltante massimo [Nm]	Coppia [Nm]	Velocità [rpm]
1	251,00	18,3	1,83
2	71,33	183,7	1,28
3	34,79	89,2	2,06
4	38,00	12	4,06
5	12,40	27	2,32
6	15	0	2,67

Tabella 41: Grandezze risultanti condotto 4, tubi laterali

Mentre per il condotto 3 si ottiene:

Condotto 3, tubi bassi centrali			
Joint	Momento tiltante massimo [Nm]	Coppia [Nm]	Velocità [rpm]
1	250,10	0	0
2	0	183,6	0,86
3	0	89,2	1,59
4	38,00	0	0
5	0	0	0,81
6	0	0	0

Tabella 42: Grandezze risultanti condotto 3, tubi bassi centrali

Condotto 3, tubi bassi laterali			
Joint	Momento tiltante massimo [Nm]	Coppia [Nm]	Velocità [rpm]
1	251,20	53,8	2,34
2	121,61	183,8	0,76
3	79,36	89,1	1,82
4	38,00	0,1	2,81
5	0	0,1	0,61
6	0	0	1,99

Tabella 43: Grandezze risultanti condotto 3, tubi bassi laterali

Condotto 3, tubi laterali più alti			
<i>Joint</i>	Momento tiltante massimo [Nm]	Coppia [Nm]	Velocità [rpm]
1	251,00	59,3	1,15
2	76,26	183,7	1,21
3	59,59	89,2	1,67
4	43,30	16,8	3,30
5	18,00	25,3	0,94
6	25	0	1,91

Tabella 44: Grandezze risultanti condotto 3, tubi laterali più alti

Condotto 3, tubi laterali più bassi			
<i>Joint</i>	Momento tiltante massimo [Nm]	Coppia [Nm]	Velocità [rpm]
1	213,60	41,20	2,40
2	62,99	183,70	1,09
3	57,94	89,20	1,63
4	43,57	20,00	3,85
5	21,60	21,60	0,60
6	25	0,00	1,71

Tabella 45: Grandezze risultanti condotto 4, tubi laterali più bassi

La Tabella 46 riassume i valori massimi di ogni casella, in modo da poter selezionare il sistema motore + riduttore.

<i>Joint</i>	Momento tiltante massimo [Nm]	Coppia [Nm]	Velocità [rpm]
1	251,20	59,30	2,40
2	121,61	183,80	1,21
3	79,36	89,20	1,82
4	59,59	20,00	3,30
5	21,60	25,30	0,94
6	25	0	1,99

Tabella 46: Massimi valori per ogni giunto

Come elementi attivi dei giunti sono stati selezionati motori *frameless* accoppiati a riduttori armonici per i giunti dal 1 al 5 mentre per l'ultimo si è scelta una soluzione già montata di motore brushless più riduttore armonico.

I riduttori armonici sono utilizzati in robotica poiché possiedono elevati rapporti di trasmissione e ottime precisioni in uno spazio ridotto rispetto ai tradizionali metodi di riduzione delle velocità.

La struttura di un riduttore armonico si basa principalmente su 3 elementi fondamentali:

- *Flex Spline*: “tazza” in acciaio cilindrica e deformabile con una dentatura sul lato esterno.
- *Circular Spline*: anello rigido con denti interni. Ha un numero di denti leggermente maggiore a quello della *Flex Spline*
- *Wave Generator*: disco in acciaio ellittico nel cuore del riduttore, dotato di un mozzo centrale e di un sottile cuscinetto a sfere speciale deformabile ellitticamente.

Il principio di funzionamento del sistema è basato sulla rotazione del generatore d'onda (*Wave Generator*). La sua rotazione provoca una deformazione nella *Flex Spline*, la quale ingranandosi con i denti della *Circular Spline*, genera la riduzione di velocità, determinata dalla differenza del numero di denti tra i due componenti. In genere, il carico in uscita è fissato a uno dei due elementi: *Flex Spline* o *Circular Spline*. Il componente non collegato al carico deve essere fissato al telaio [20]. L'immagine mostra l'esplosione del riduttore.

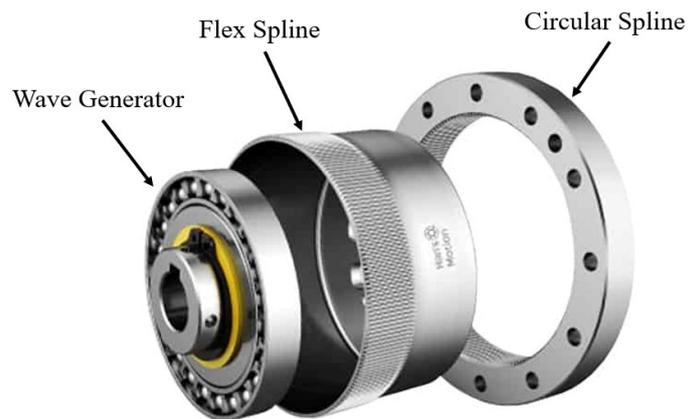


Figura 87: Esploso di un riduttore armonico

Per questa applicazione si sono presi come riferimento i riduttori armonici prodotti dall'azienda *Harmonic Drive*. In particolare, è stata scelta la serie SHG-2SH perché presenta un cuscinetto di uscita con elevate caratteristiche di rigidità e precisione. Si tratta di una serie molto leggera e compatta assialmente che si presta ad essere integrata direttamente nella struttura a seconda dell'applicazione. Questi riduttori presentano un albero cavo che permette il cablaggio dei cavi internamente al robot.

Fissati al riduttore si sono selezionati dei motori *frameless*. A differenza dei servomotori tradizionali, i motori *frameless* sono composti esclusivamente da uno statore con avvolgimenti in rame e un rotore con magneti in terre rare montato su un mozzo. Questa configurazione corrisponde a quella di un motore convenzionale privato dell'alloggiamento, dell'albero, dei cuscinetti, del sistema di retroazione e dei connettori dei cavi, mantenendo solo lo statore e il rotore, che sono direttamente responsabili della generazione del movimento rotatorio. I motori *frameless* si caratterizzano per un'elevata densità di potenza e per la possibilità di integrare l'alloggiamento del motore direttamente nella struttura del robot, eliminando i pesi e gli ingombri associati a un servomotore tradizionale con carcassa. Per questa applicazione, sono stati presi come riferimento i motori *frameless* prodotti dalla ditta *Kollmorgen* [21]

In questa fase progettuale, si è scelto di adottare un criterio conservativo nel dimensionamento di riduttori e motori, selezionando accoppiamenti che garantissero una coppia continua superiore al valore massimo di picco richiesto. Questa strategia è stata implementata per evitare potenziali limitazioni operative nelle fasi avanzate del progetto dovute ad ingombri eccessivi del robot.

Il sovradimensionamento iniziale offre diversi vantaggi: da un lato, consente di verificare l'esecuzione corretta delle traiettorie anche con configurazioni che potrebbero risultare critiche; dall'altro, permette di compensare le coppie di picco indotte dal controllore, migliorando così la dinamica complessiva del sistema. Se le traiettorie risultano eseguibili con questa configurazione iniziale, è ragionevole assumere che non si verificheranno problematiche in fasi successive del progetto, garantendo al contempo prestazioni affidabili e una maggiore robustezza del sistema.

Nel giunto 6 si è considerato un servoattuatore, prodotto da *Harmonic drive*, composto da motore *brushless* + riduttore con cuscinetto di uscita. Questo tipo di sistema offre un buon momento *tiltante* ed estrema compattezza, fattori cruciali per l'ultimo giunto del braccio robotico.

I riduttori utilizzati presentano le seguenti caratteristiche:

<i>Joint</i>	Codice	Momento tiltante massimo [Nm]	Rapporto di trasmissione	Max Coppia continuativa [Nm]	Max velocità input[rpm]
1	SHG32502SHMHC	580	51	140	4800
2	SHG32802SHMHC	580	81	217	4800
3	SHG25802SHMHC	258	81	133	5600
4	SHG17802SHMHC	74	81	34	8500
5	SHG17802SHMHC	124	81	34	7300

Tabella 47: Dati riduttori armonici

Mentre per i motori:

<i>Joint</i>	Codice	Velocità massima [rpm]	Max Coppia continuativa [Nm]
1	TBM2G-09408A-AHNA-00	8000	1,2
2	TBM2G-08526A-AHNA-00	8000	2,6
3	TBM2G-08508A-AHNA-00	8000	1,21
4	TBM2G-05008A-AHNA-00	8000	0,27
5	TBM2G-06008A-AHNA-00	8000	0,44

Tabella 48: Dati motori *frameless*

Il servoattuatore utilizzato per l'ultimo giunto presenta le seguenti caratteristiche.

<i>Joint</i>	Codice	Velocità massima [rpm]	Max Coppia continuativa [Nm]	Momento tiltante massimo [Nm]
6	FHA-11-C-50-D200- KM1	3000	2,9	40

Tabella 49: Dati servoattuatore ultimo joint

Per i giunti che presentano l'accoppiamento motore *framless* + riduttore armonico è stato necessario studiare un sistema di collegamento ad hoc per ogni accoppiamento. Per fare questo ci si è basati sull'articolo qui proposto [22]. In Figura 88 è proposto un esploso del giunto 1.

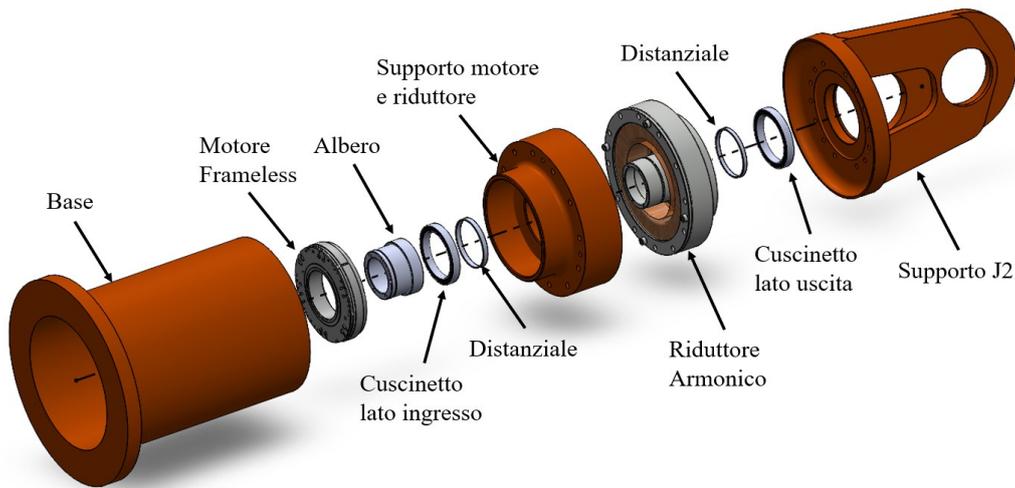


Figura 88: Esploso del giunto 1

Dopo aver studiato una possibile struttura di sostegno per ogni giunto, basandoci su facilità di montaggio e funzionalità del sistema, si sono potuti modellare anche i di collegamento e quindi disegnare l'intera struttura. Nella Figura 89 viene raffigurato il modello del robot della settima configurazione: in arancione sono rappresentati i componenti strutturali (*link* e supporti dei servoattuatori) ipotizzati in acciaio, mentre di colore verde sono i coperchi per chiudere la struttura che, non avendo nessuna funzione strutturale, saranno in materiale plastico.

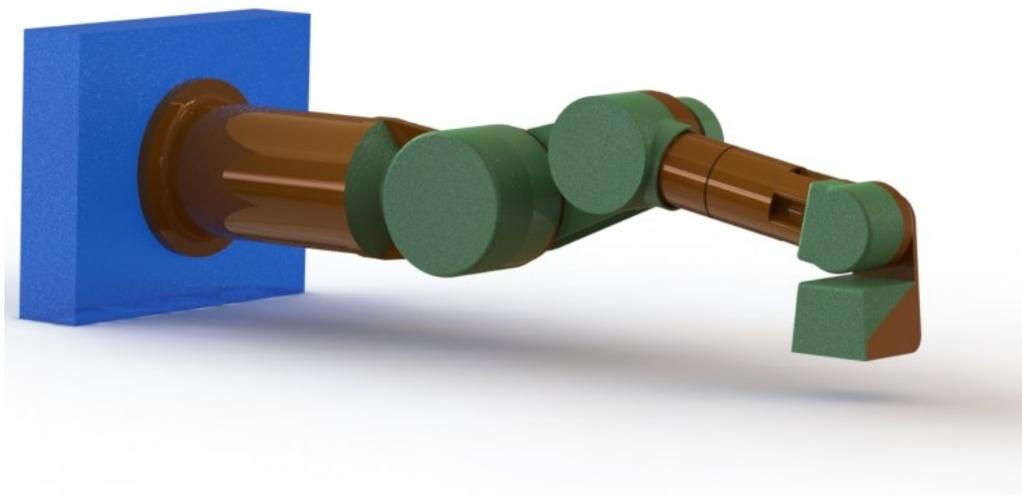


Figura 89: Rendering struttura della VII Configurazione

Durante la modellazione è stato possibile ridurre la lunghezza dei *link* 2,3 e 4 riducendo ulteriormente l'ingombro della struttura.

Si va ora a verificare che il robot non urti altri componenti durante l'esecuzione delle traiettorie. Per far ciò si modifica il file dimensioni inserendo le dimensioni dei cilindri effettivi della struttura e successivamente si eseguono tutte le traiettorie studiate precedentemente, partendo dai tubi laterali del condotto 4.

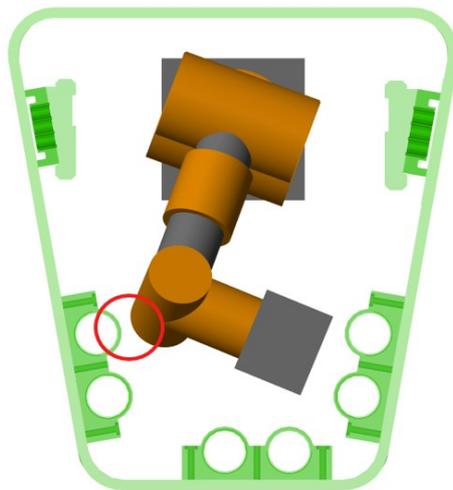


Figura 90: Traiettoria con dimensioni reali VII configurazione

In Figura 90 evidenziato nel cerchio rosso si nota come il giunto 5 passa molto vicino ai tubi del lato opposto. È un aspetto da non sottovalutare e che richiede delle modifiche all'ultimo giunto.

5.2 Modifiche Configurazione Finale

Per risolvere questo problema si è pensato spostare l'asse dell'ultimo giunto in avanti, quindi, uscendo dalla configurazione di polso sferico. In questo modo, è stato possibile guadagnare spazio trasversalmente all'asse del condotto, come è evidenziato nella Figura 91.

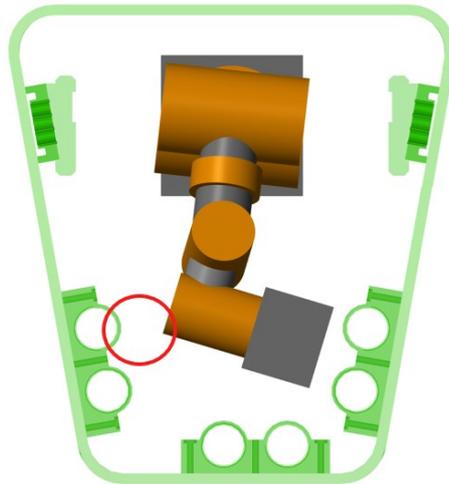


Figura 91: Simulazione ingombro VII Configurazione modificata

Per modellare la struttura è stato sufficiente modificare solamente l'ultimo *link*. Si è ottenuta la struttura:

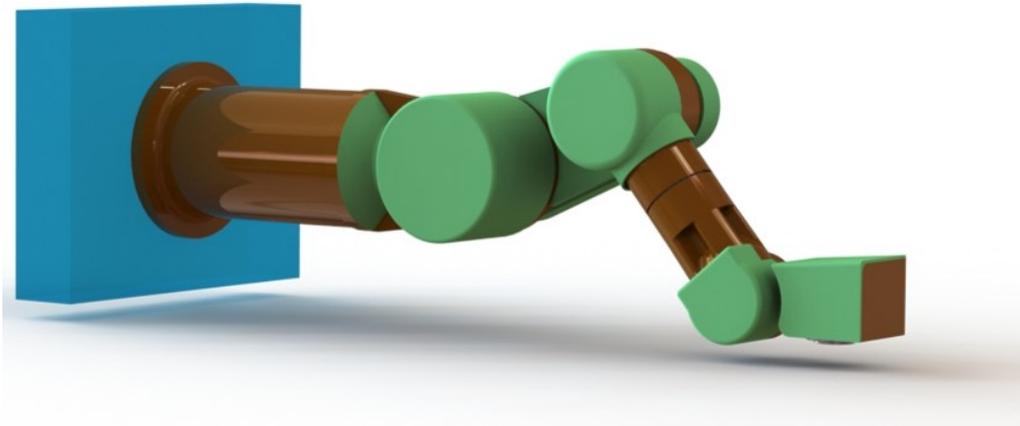


Figura 92: struttura VII Configurazione modificata

Questa configurazione è stata verificata correttamente per tutte le traiettorie. Presenta il seguente indice di condizionamento all'interno del *workspace*.

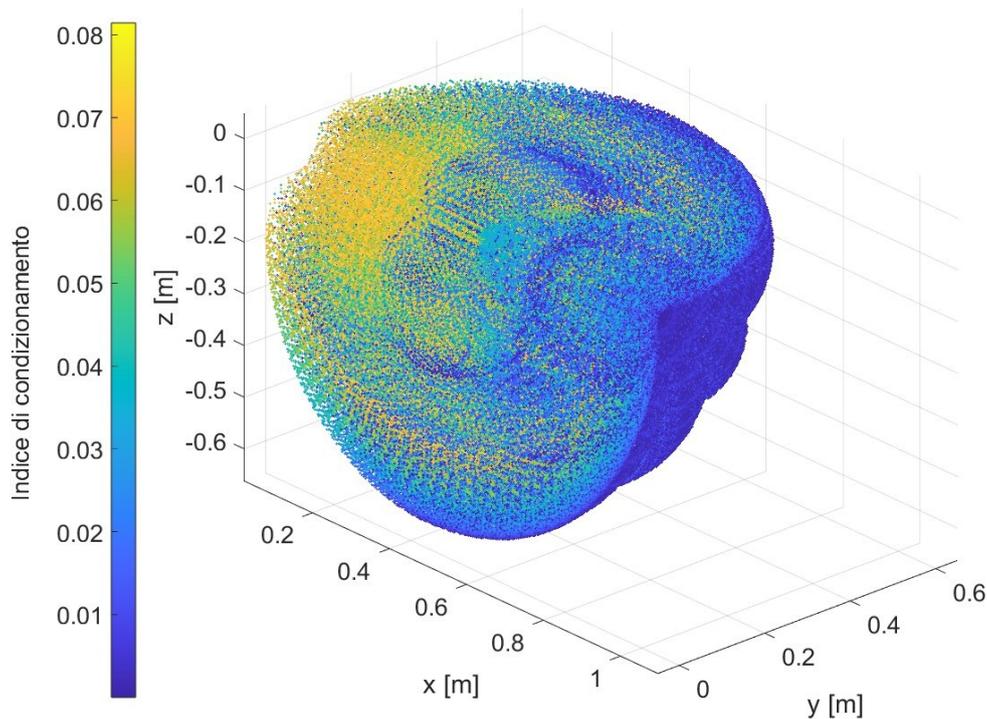


Figura 93: *Indice di condizionamento VII Configurazione modificata*

Questa struttura presenta un indice di condizionamento massimo di 0,0814, maggiore rispetto alla configurazione di partenza. L'indice è distribuito più eterogeneamente rispetto alla configurazione 7. Tuttavia, non si osserva una netta differenziazione nei valori, mostrando anche nelle regioni più esterne una distribuzione prevalentemente uniforme.

Questa è considerata la configurazione di robot ottimale per l'esecuzione dei task richiesti dal progetto.

Di seguito vengono presentati i parametri secondo la convenzione Denavit-Hartenberg di questa struttura robotica.

Link [\]	a_i [mm]	α_i [deg]	d_i [mm]	θ_i [deg]
1	0	90	300	θ ₁
2	200	0	0	θ ₂
3	0	-90	0	θ ₃
4	0	90	242,5	θ ₄
5	100	-90	0	θ ₅
6	0	0	137,5	θ ₆

Tabella 50: DH Configurazione finale

CAPITOLO 6

MODELLAZIONE DELL'END-EFFECTOR

Riportando le conclusioni del primo capitolo, dove sono stati progettati i collari, le operazioni che deve compiere l'end-effector sono essenzialmente 2:

- Afferrare i tubi
- Avvitare le viti dei collari

Per compiere queste operazioni si è impostata la struttura in questo modo: un tubolare in alluminio che funge da telaio per i *tools*, per ogni lato di tubolare sono montati un gripper e un avvitatore con le rispettive strutture sostegno in alluminio.

6.1 Modello del Gripper

Il gripper è composto da un servoattuatore (motore *brushless* DC + riduttore planetario) che aziona un sistema di pignone e cremagliere. Le pinze, incernierate al supporto, sono collegate alle cremagliere, le quali, attraverso un movimento lineare, aprono e chiudono le pinze a seconda del verso di rotazione del motore. Oltre a questi componenti di movimento sono presenti una piastra di interfacci in alluminio, che avrà la doppia funzione di collegamento al telaio e supporto del motoriduttore, e un coperchio che si serve anche come supporto per il centraggio dell'avvitatore. La vista del *gripper*, con il coperchio in trasparenza è mostrata in Figura 94.

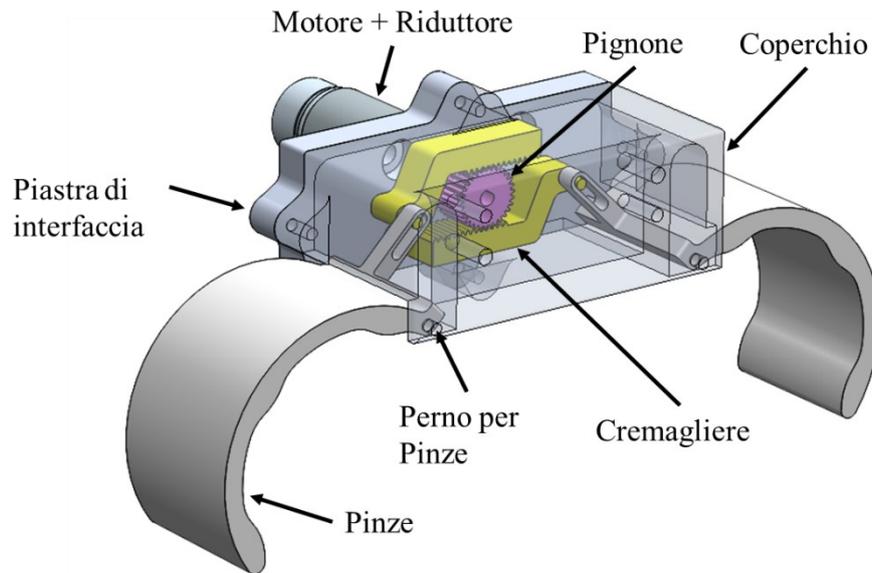


Figura 94: Vista Gripper

Come motore è stato scelto un motore della ditta *Maxon* con la particolarità di essere molto compatto (21mm di diametro, 14 mm di lunghezza) e con un peso estremamente ridotto, solo 22g. il motore in questione è in grado di emettere una coppia massima costante di 7.59 mNm alla velocità di 4780 rpm.

Il motore è collegato ad un riduttore planetario prodotto dalla stessa ditta. Questo presenta una riduzione di 53:1. Anche questo presenta un ingombro minimo (22mm x 39mm) e un peso di 55g.

6.2 Modello dell'Avvitatore

Lo scopo dell'avvitatore è quello di avvitare la vite che collega la parte superiore del collare a quella inferiore. La scelta di questo componente si è rivelata critica a causa delle sue dimensioni.

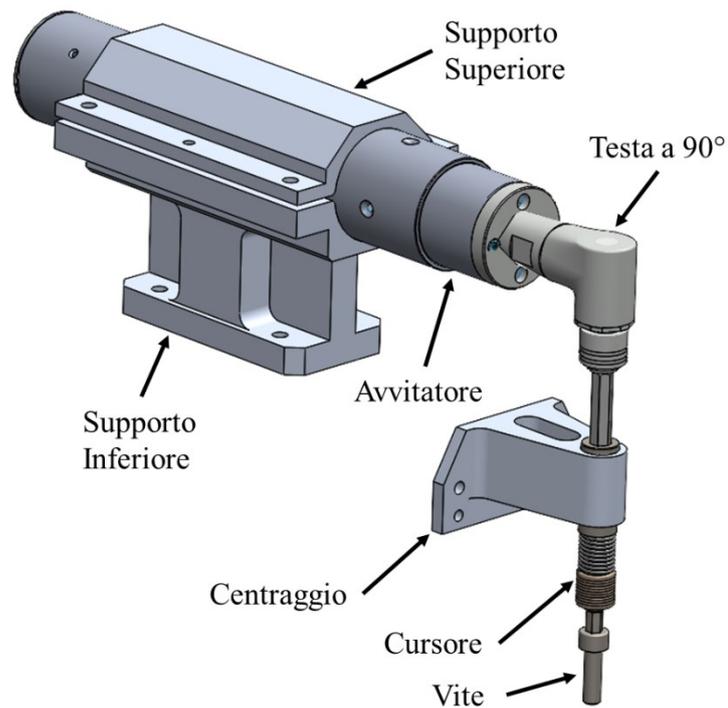


Figura 95: Vista avvitatore

Dopo attente ricerche e diversi tentativi di montaggio dei sistemi di avvitatura si è optato per un avvitatore a testa a 90° prodotto dall'azienda Kolver. L'avvitatore presenta le caratteristiche:

- Coppia fino a 9 Nm
- Velocità fino a 600 rpm
- Massa 0,7 kg

Il sistema è composto dal supporto inferiore che, assieme al supporto superiore, vincola l'avvitatore in posizione. Collegato all'avvitatore è presente un cursore, questo ha lo scopo di precaricare la vite e permette una corsa di 25 mm. L'elemento di centraggio è una staffa in alluminio che va fissata sul coperchio del *gripper*, questa ha lo scopo di mantenere coassiale il cursore al foro della vite presente sul collare. Inoltre, la staffetta di centraggio deve permettere la rotazione del cursore.

6.3 Modello del telaio

Il sostegno dei vari tools, montati sull'end-effector, è costituito da un profilato tubolare di sezione rettangolare in alluminio, al quale sono fissate le piastre di interfaccia e il cilindro di fissaggio al robot.

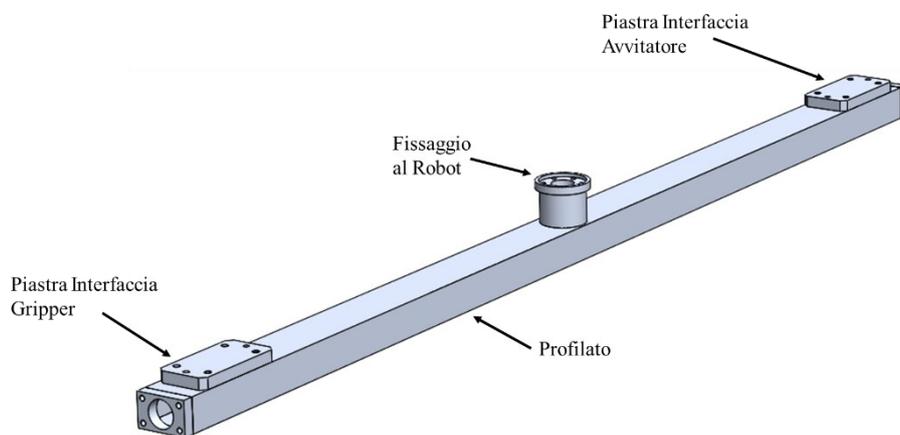


Figura 96: Telaio end-effector

La piastra di interfaccia dell'avvitatore presenta 4 fori filettati, in prossimità dei vertici del rettangolo, ai quali viene fissato il sostegno inferiore. Mentre, centralmente alla piastra, ci sono 2 fori per delle spine di centraggio. In questo modo è garantita la precisione di orientamento e posizionamento.

L'elemento di fissaggio dell'end-effector all'ultimo riduttore è composto da un cilindro con un grande foro di scarico centrale per ridurre il peso complessivo. Nella parte superiore è presente uno spallamento con uno scarico centrale, questo serve per accoppiare con precisione il telaio al robot.

In testa al profilato, sono fissate 2 piastre sulle quali vengono montati i 2 *gripper*. Il motore e il riduttore andranno a scomparsa all'interno del tubolare.

Il peso complessivo dell'end effector con i tubi è di 12,94 kg.

Per concludere viene mostrato, Figura 97, l'end-effector montato mentre sorregge i tubi.

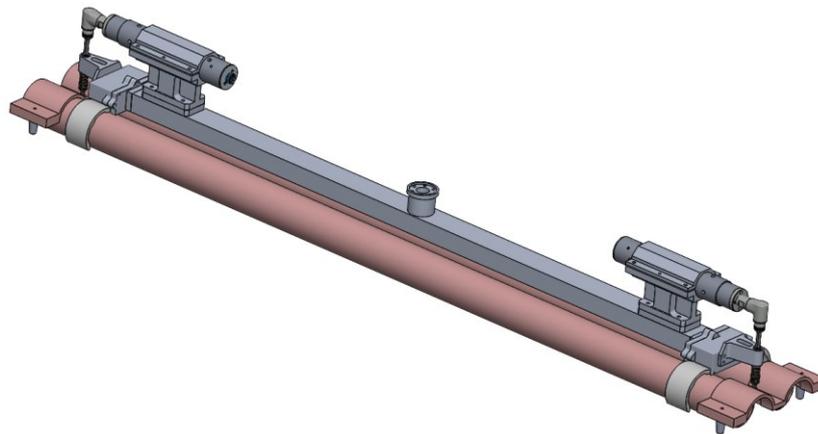


Figura 97: Vista in prospettiva dell'End Effector montato

In Figura 98 è presentata la vista frontale.

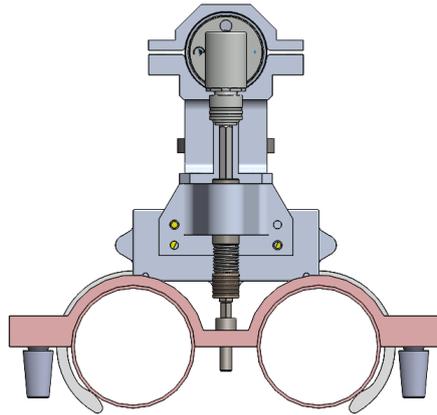


Figura 98: Vista frontale dell'end-effector

6.4 Sequenza di funzionamento

Di seguito viene presentata la logica di montaggio del tubo all'interno del condotto.

Nel caso di prelievo all'interno del condotto la procedura sarà analoga.

Inizialmente, il tubo è fissato a un apposito supporto di prelievo situato all'esterno del condotto. Il robot avanza fino a raggiungere la posizione predefinita, corrispondente all'inizio della compressione del compensatore. Raggiunta questa configurazione, il sistema si arresta e gli avvitatori ruotano lentamente in senso antiorario fino alla rilevazione di un picco di coppia su entrambi i dispositivi, indicativo dell'ingranamento della chiave esagonale con la testa della vite. Successivamente, il robot completa l'avvicinamento, i gripper si chiudono afferrando i tubi e gli avvitatori procedono all'estrazione completa delle viti dal supporto, lasciando i tubi sorretti esclusivamente dall'end-effector.

Il manipolatore si sposta quindi, tramite il carrello, nella posizione prestabilita all'interno del condotto e avvia la fase di avvicinamento al target di rilascio, seguendo una traiettoria il cui tratto finale risulta perpendicolare alla superficie del condotto.

Durante l'approccio, le sezioni coniche dei pin si inseriscono nei fori conici del collare inferiore, consentendo la compensazione di eventuali errori di posizionamento del robot. Il filetto delle viti, inizialmente fermo, entra in contatto con il filetto dei fori, inducendo la compressione del compensatore fino al completo accoppiamento delle due sezioni del collare. Completato questo accoppiamento, gli avvitatori eseguono il serraggio delle viti. L'applicazione di una coppia di serraggio elevata non risulta necessaria, poiché, una volta che i tubi risultano solidali ai collari, un ulteriore sistema robotico, non trattato nel presente elaborato, esegue la saldatura degli estremi dei tubi.

CAPITOLO 7

RISULTATI OTTENUTI

Definiti i modelli CAD di robot ed end-effector sono state analizzate nuovamente tutte le traiettorie per verificare che non ci fosse la presenza di urti durante il movimento del robot. Tutte le simulazioni si sono concluse senza riscontrare criticità. La fase di progettazione preliminare del robot è quindi considerata terminata.

Di seguito vengono presentati i valori dell'indice di condizionamento nei punti della traiettoria.

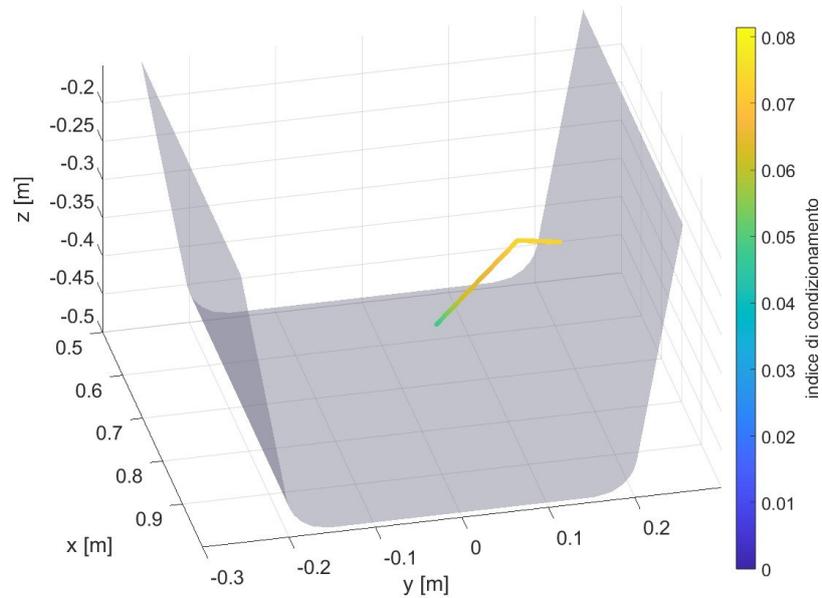


Figura 99: Traiettoria Condotto 4, tubi laterali, Configurazione finale

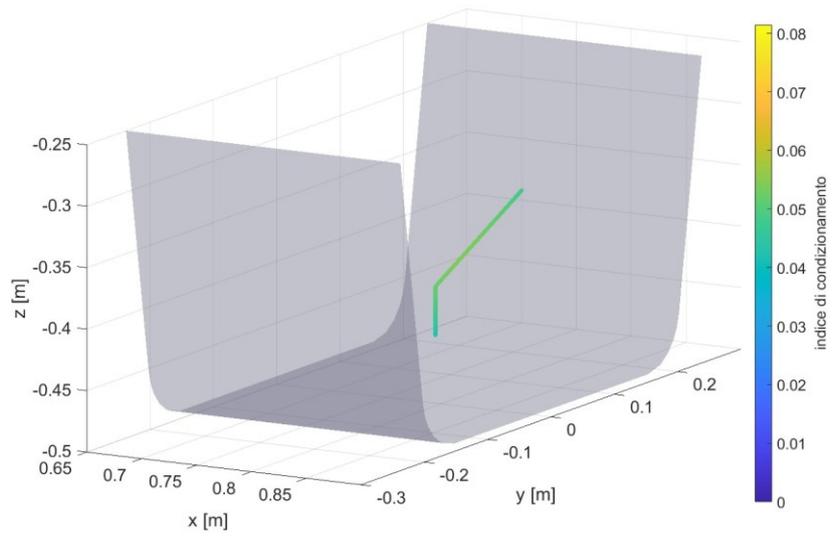


Figura 100: Traiettorie Condotta 4, tubi bassi, Configurazione finale

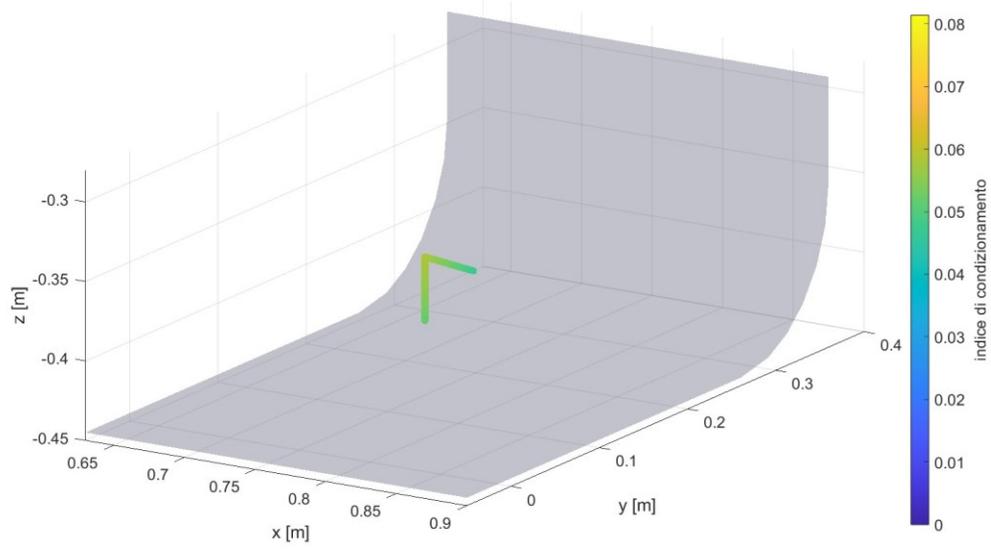


Figura 101: Traiettorie Condotta 3, tubi bassi centrali, Configurazione finale

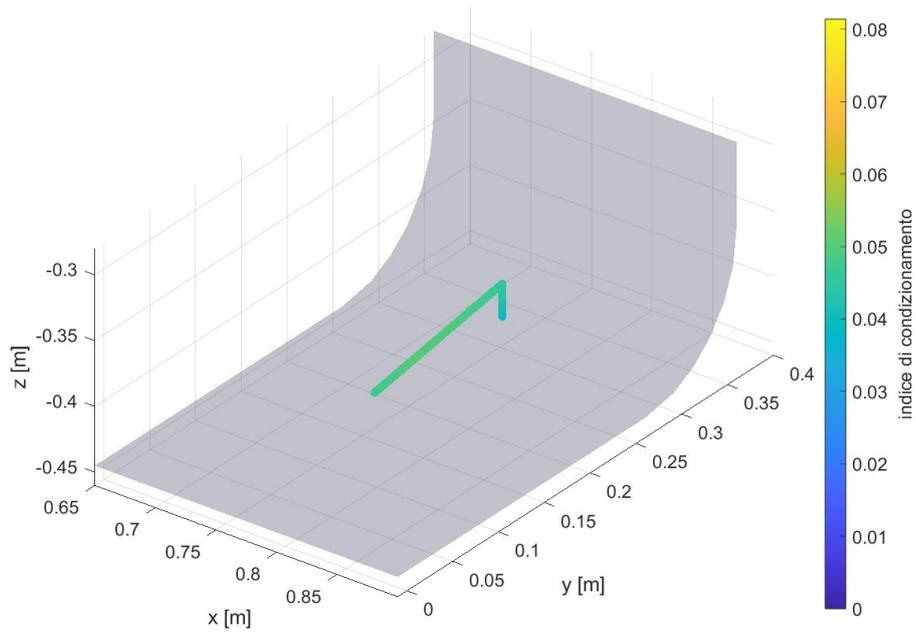


Figura 102: Traiettorie Condotta 3, tubi bassi a destra, Configurazione finale

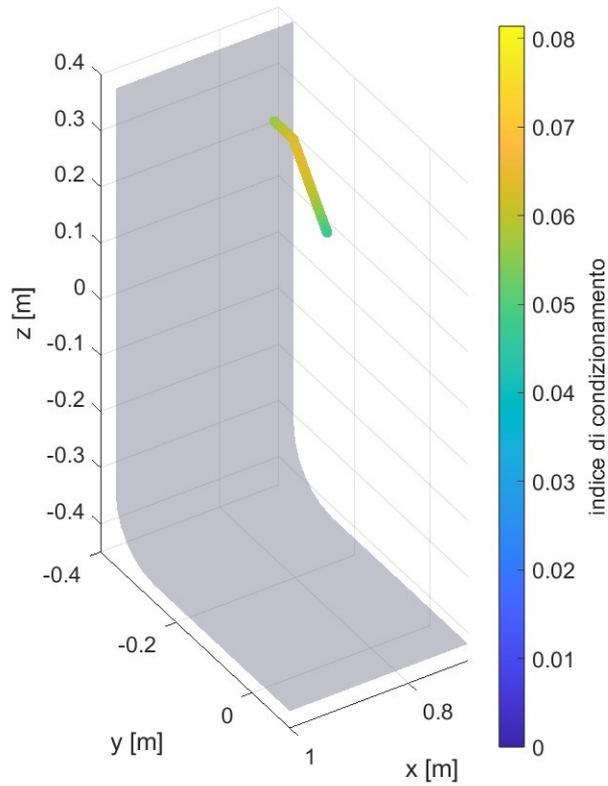


Figura 103: Traiettorie Condotta 3, tubi laterali alti, Configurazione finale

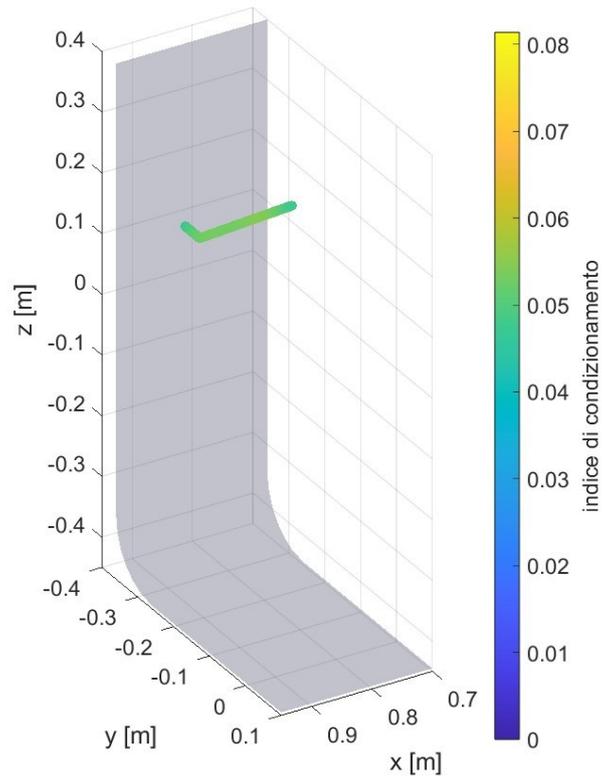


Figura 104: Traiettoria Condotto 3, tubi laterali bassi, Configurazione finale

Come si può notare in tutte le traiettorie si ottiene un valore medio-alto dell'indice di condizionamento, valutato nel range compreso tra 0 e il valore massimo per questa struttura.

Per lo spostamento del robot lungo l'asse del condotto è previsto un carrello che 7 dalla porta di ingresso del condotto si inserisce per 1,8m. è un profondi più che sufficiente per i punti in cui il manipolatore in oggetto deve andare a lavorare.

Il robot risulta idoneo sotto tutti i punti previsti da progetto.

CAPITOLO 8

CONCLUSIONI E LAVORI FUTURI

Partendo dal disegno CAD del reattore DTT si sono ricavate le dimensioni sia dei diversi condotti nel quale il robot va a lavorare, sia quelle dei tubi che l'end-effector deve maneggiare. In primo luogo, sono stati modificati i collari di sostegno dei tubi in modo da rendere l'end-effector più leggero e con delle geometrie meno complesse e ingombranti.

Una volta definiti i componenti della struttura del reattore si è passati alla progettazione della catena cinematica del robot. In questa fase si sono presentate 7 configurazioni di struttura robotica diverse che differiscono per numero di giunti, distanza tra di essi e orientazione. Successivamente si è eseguito un confronto tra le 7 configurazioni basato sostanzialmente su 4 principali fattori: *workspace*, indice di condizionamento nel *workspace*, traiettorie compiute dall'end-effector e ingombri e considerazioni sulla struttura. Al termine di questo confronto si è optato per la 7^a configurazione.

Eseguendo la simulazione delle diverse traiettorie in ambiente *Matlab/Simulink* si sono ricavati i valori delle coppie e dei momenti risultanti su ogni giunti. Dai questi, si è potuta scegliere la migliore combinazione tra motore *frameless* e riduttore armonico per ogni giunto.

Una volta stabiliti i sistemi di attuazione si è disegnata la struttura del robot attraverso i software CAD *SolidWorks*. Dall'analisi delle simulazioni delle traiettorie, questa volta con le dimensioni reali, si è notato che la struttura del polso era troppo ingombrante per cui si è compiuta una piccola ma efficace modifica alla struttura. In questo modo tutti i target del progetto sono stati rispettati dalla struttura robotica finale.

L'ultimo studio effettuato nell'elaborato è quello dell'end-effector. Questo, dopo le modifiche del primo capitolo, deve poter serrare i tubi e avvitare i collari nell'apposito sostegno. Per compiere questi task si è pensato ad un sistema di 2 gripper e 2 avvitatori, 1 per lato, che compiono i task previsti da progetto.

Si vuole ulteriormente evidenziare che gli studi effettuati in questo elaborato trattano degli argomenti fondamentali del progetto che, tuttavia, rappresentano solo una parte iniziale. Si può considerare questo lavoro come un buon punto di partenza per l'ottimizzazione di tutta la struttura attraverso analisi FEM con lo scopo di alleggerire e valutare la rigidità del robot. Si tratta di un lavoro che parte dall'end-effector e, a ritroso, si cerca di ottimizzare sia i *link* che i servoattuatori. La tipologia dei servoattuatori (motori *frameless* + riduttori armonici) è da considerarsi ottimale, poiché utilizzata anche da molte ditte costruttrici di cobot; tuttavia, è necessario uno studio più approfondito della scelta dei componenti oltre che degli elementi del montaggio: supporti volventi, freni e alloggiamento nella struttura.

Una volta terminata la parte dedicata alla progettazione della struttura e dell'end-effector è necessario effettuare uno studio sul controllore. Va selezionato il metodo di controllo più adatto a questo tipo di task. Inoltre, è utile eseguire processo di ottimizzazione delle traiettorie compiute dall'end-effector all'interno dei condotti.

APPENDICE A

CODICI MATLAB E SIMULINK

A.1 Definizione lunghezze link

```
clear all
clc
close

%DIMENSIONI LINK
lx_base=200;
ly_base=200;
lz_base=215;
r_1=25;
l_1=400;
rJ_1=35;
lJ_1=50;
r_2=25;
l_2=100;
r_3=25;
l_3=200;
rJ_3=35;
lJ_3=50;
r_4=25;
l_4=100;
r_5=25;
l_5=150;
rJ_5=35;
lJ_5=50;
r_6=25;
l_6=100;
rJ_7=35;
lJ_7=50;
l_7x=1400;
l_7y=120;
l_7z=100;

%ROTAZIONI INIZIALEI JOINT
startJ2=5;
startJ4=5;
startJ6=80;

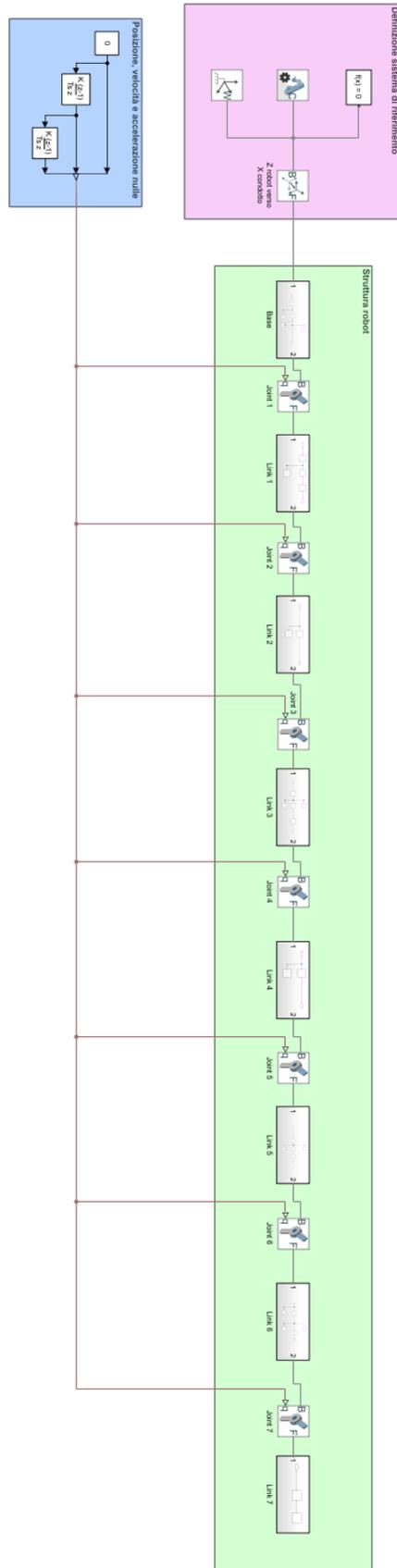
%LIMITI JOINT
J1=[-200,200];
J2=[-90-startJ2,90-startJ2];
J3=[-180,180];
J4=[-90-startJ4,90-startJ4];
J5=[-180,180];
J6=[-90-startJ6,90-startJ6];
```

```
J7=[-180,180];
```

```
%SALVO IN FILE I PARAMETRI
```

```
save("Definizione manipolatore\Robot 1\Dimensioni_1.mat" );
```

A.2 Simulink Rigid Body Tree



A.3 Salvataggio modello robot

```
IMPORTO E SALVO IL MODELLO .urdf DEL ROBOT
clear
clc
robot=importrobot('Rigid_body_tree_robot_1');
save("Matlab\Definizione manipolatore\Robot 1\Robot_1.mat","robot");
```

A.4 Calcolo del workspace

```
%% ROBOT 1
% definizione robot a 7 assi
clear
clc
dim=load ("Dimensioni_1.mat");
load('Robot_1.mat');
robot.DataFormat='column';
i=11;
j=16;
% definisco gli intervalli per i giunti
q1=linspace(deg2rad(-180),deg2rad(180),i);
q2=linspace(deg2rad(dim.J2(1)),deg2rad(dim.J2(2)),j-1);
q3=linspace(deg2rad(dim.J3(1)),deg2rad(dim.J3(2)),j);
q4=linspace(deg2rad(dim.J4(1)),deg2rad(dim.J4(2)),j-1);
q5=linspace(deg2rad(dim.J5(1)),deg2rad(dim.J5(2)),j);
q6=linspace(deg2rad(dim.J6(1)),deg2rad(dim.J6(2)),j-1);
f8=0;
for f1=1:i-1
    for f2=1:j-1
        for f3=1:j-1
            for f4=1:j-1
                for f5=1:j-1
                    for f6=1:j-1
                        f8=f8+1;

                        %calcolo trasformatata e salvo i punti dell'end-effector
                        trasf=getTransform(robot,[q1(f1);q2(f2);q3(f3);q4(f4);q5(f5);...
                            q6(f6);0], "Body7");
                        X(f8)=trasf(1,4);
                        Y(f8)=trasf(2,4);
                        Z(f8)=trasf(3,4);
                    end
                end
            end
        end
    end
end
end
```

```

%PLOTTO I RISULTATI DEI DIVERSI CONDOTTI
%% CONDOTTO 4
Z_cond4=ones(20,25).*[266.32 275 292 307.14 319 325 325 319 307.14 292 275
...
    266.32 -283.68 -295 -304 -313.30 -321 -325 -325 -321 -313.30 -304 ...
    -295 -283.68 266.32];
Y_cond4=ones(20,25).*[-299.27 -300.02 -297.05 -288.33 -273.77 -250.02 250.02
...
    273.77 288.33 297.05 300.02 299.27 202.29 198.87 193.78 185.18 ...
    172.64 153.05 -153.05 -172.64 -185.18 -193.78 -198.87 -202.29 -299.27];
X_cond4=-ones(20,25)*200;
for i=2:18
    X_cond4(i,:)=X_cond4(i-1,)+100;
end
%Posizione relativa tra centro condotto e centro base robot
offset_z=168.5;           %distanza su z tra centro condotto e centro rotaie
Z_cond4=Z_cond4-offset_z;
offset_x=200;
X_cond4=X_cond4-offset_x;
%PLOT CONDOTTO 4 CON WORKSPACE ROBOT
fig1=figure(1);
hold on
title({'Condotto 4 con Workspace robot',''},'FontSize',16);
set(fig1,'Color',"white");
scatter3(X,Y,Z,0.35,'MarkerEdgeColor',[.7 .5 .0],'MarkerFaceColor', ...
    [.7 .5 .0],'DisplayName','Punti Workspace');
scatter3(1.5,0,0,500,'Marker',"x",'MarkerFaceColor', ...
    [0.8500 0.3250 0.0980],'LineWidth',3,'DisplayName', ...
    'Centro base robot');
surf(X_cond4/1000,Y_cond4/1000,Z_cond4/1000,'FaceAlpha',0.8, ...
    'FaceColor',[.4 .4 .5],'EdgeColor',[.4 .4 .5],'LineWidth',5, ...
    'DisplayName','Condotto');           %Plot condotto
grid on
axis equal
xlabel('x [m]');
ylabel('y [m]');
zlabel('z [m]');
zlim([-0.9 0.9]);
ylim([-0.9 0.9]);
view(135,20);
legend
legend('boxoff','Location','northeastoutside')
hold off

%% CONDOTTO 3
Z_cond3=ones(20,29).*[370 397 420 440.71 455 465 470 470 465 455 440.71...
    420 397 370 -370 -397 -420 -440.71 -455 -465 -470 -470 -465 -455 ...
    -440.71 -420 -397 -370 370];
Y_cond3=ones(20,29).*[-360 -356.29 -346.6 -330.71 -312.68 -291.22 -260 260
...
    291.22 312.68 330.71 346.6 356.29 360 360 356.29 346.6 330.71 ...
    312.68 291.22 260 -260 -291.22 -312.68 -330.71 -346.6 -356.29 -360 ...
    -360];
X_cond3=-ones(20,29)*200;
for i=2:18
    X_cond3(i,:)=X_cond3(i-1,)+100;
end

```

```

%Posizione relativa tra centro condotto e centro base robot
offset_z=100;           %distanza su z tra centro condotto e centro rotaie
Z_cond3=Z_cond3-offset_z;
offset_x=200;
X_cond3=X_cond3-offset_x;

%PLOT CONDOTTO 3 CON WORKSPACE ROBOT
fig2=figure(2);
hold on
title({'Condotto 3 con Workspace robot', ''}, 'FontSize',16);
set(fig2, 'Color', "white");
scatter3(X,Y,Z,0.35, 'MarkerEdgeColor', [.7 .5 .0], 'MarkerFaceColor', ...
    [.7 .5 .0], 'DisplayName', 'Punti Workspace');
scatter3(1.5,0,0,500, 'Marker', "x", 'MarkerFaceColor', ...
    [0.8500 0.3250 0.0980], 'LineWidth', 3, 'DisplayName', ...
    'Centro base robot');
s1=surf(X_cond3/1000,Y_cond3/1000,Z_cond3/1000, 'FaceAlpha',0.8, ...
    'FaceColor', [.4 .4 .5], 'EdgeColor', [.4 .4 .5], 'LineWidth', 5, ...
    'DisplayName', 'Condotto');
grid on
axis equal
xlabel('x [m]');
ylabel('y [m]');
zlabel('z [m]');
zlim([-0.9 0.9]);
ylim([-0.9 0.9]);
view(135,20);
legend
legend('boxoff', 'Location', 'northeastoutside')
hold off

%% CONDOTTO 2
Z_cond2=ones(20,29).*[221.09 234 245 252.45 259 264 265 265 264 259 252.45...
245 234 221.09 -208.91 -221 -236 -248.13 -257 -263 -265 -265 -263...
-257 -248.13 -236 -221 -208.91 221.09];
Y_cond2=ones(20,29).*[-237.14 -233.76 -227.52 -220.65 -211.26 -197.46 -187.52
...
187.52 197.46 211.26 220.65 227.52 233.76 237.14 289.94 289.95 285.69...
277.76 267.44 254.31 240.31 -240.31 -254.31 -267.44 -277.76 -285.69 ...
-289.95 -289.94 -237.14];
X_cond2=-ones(20,29)*200;
for i=2:18
    X_cond2(i,:)=X_cond2(i-1,:)+100;
end
offset_x=200;
X_cond2=X_cond2-offset_x;

fig3=figure(3);
hold on
title({'Condotto 2 con Workspace robot', ''}, 'FontSize',16);
set(fig3, 'Color', "white");
scatter3(X,Y,Z,0.35, 'MarkerEdgeColor', [.7 .5 .0], 'MarkerFaceColor', ...
    [.7 .5 .0], 'DisplayName', 'Punti Workspace');
scatter3(1.5,0,0,500, 'Marker', "x", 'MarkerFaceColor', ...
    [0.8500 0.3250 0.0980], 'LineWidth', 3, 'DisplayName', ...
    'Centro base robot');
s1=surf(X_cond2/1000,Y_cond2/1000,Z_cond2/1000, 'FaceAlpha',0.8, ...
    'FaceColor', [.4 .4 .5], 'EdgeColor', [.4 .4 .5], 'LineWidth', 5, ...
    'DisplayName', 'Condotto'); %Plot condotto

```

```

grid on
axis equal
xlabel('x [m]');
ylabel('y [m]');
zlabel('z [m]');
zlim([-0.9 0.9]);
ylim([-0.9 0.9]);
view(135,20);
legend
legend('boxoff','Location','northeastoutside')
hold off

```

A.5 Calcolo indice di condizionamento

```

%% ROBOT 1
% definizione robot a 7 assi
clear
clc
dim=load("Dimensioni_1.mat");
load('Robot_1.mat');
robot.DataFormat='column';
i=11;
j=16;
q1=linspace(deg2rad(-180),deg2rad(180),i);
q2=linspace(deg2rad(dim.J2(1)),deg2rad(dim.J2(2)),j-1);
q3=linspace(deg2rad(dim.J3(1)),deg2rad(dim.J3(2)),j);
q4=linspace(deg2rad(dim.J4(1)),deg2rad(dim.J4(2)),j-1);
q5=linspace(deg2rad(dim.J5(1)),deg2rad(dim.J5(2)),j);
q6=linspace(deg2rad(dim.J6(1)),deg2rad(dim.J6(2)),j-1);
f8=0;
    for f1=1:i-1
        for f2=1:j-1
            for f3=1:j-1
                for f4=1:j-1
                    for f5=1:j-1
                        for f6=1:j-1

                            f8=f8+1;
                            J=geometricJacobian(robot,[q1(f1);q2(f2);q3(f3);q4(f4);q5(f5);...
                                q6(f6);0],"Body7");
                            S=svd(J);
                            cond_index(f8)=min(S)/max(S);
                            trasf=getTransform(robot,[q1(f1);q2(f2);q3(f3);q4(f4);q5(f5);...
                                q6(f6);0],"Body7");
                            X(f8)=trasf(1,4);
                            Y(f8)=trasf(2,4);
                            Z(f8)=trasf(3,4);
                        end
                    end
                end
            end
        end
    end
end
end
end

```

```

    end
end
save('Analisi
Destrezza\Robot_1\Valori_robot_1.mat', "Z", "Y", "X", "cond_index");

%% PLOT
clear a b c;
a=Z<=0;
b=Y>=0;
c=a&b;
fig1=figure(1);
set(fig1, 'Color', "white", 'WindowState', 'maximized');
hold on
scatter3(X(c),Y(c),Z(c),0.5,cond_index(c),'*');
scatter3(0,0,0,500,'Marker','x','MarkerFaceColor', ...
    [0.8500 0.3250 0.0980],'LineWidth',1);
title("Indice di condizionamento");
c=colorbar;
c.Label.String = 'Indice di condizionamento';
c.Location="westoutside";
axis equal
grid on
zlim([min(Z)-0.05,0.05]);
ylim([-0.05,max(Y)+0.05]);
xlim([min(X),max(X)+0.05]);
view(48,25);
xlabel('x [m]');
ylabel('y [m]');
zlabel('z [m]');
hold off

savefig(1,'Analisi Destrezza\Robot_1\Risultati destrezza.fig')

max_index=max(cond_index)

```

A.6 Generatore di traiettorie

```
% CARICO RIGID BODY TREE
clear
clc
load("Dimensioni_1.mat");
load("Definizione manipolatore\Robot 1\Robot_1.mat");
OffsetX=100;
%% POSIZIONE INIZIALE E FINALE EE
q0=zeros(7,1);
transform = getTransform(robot,robot.homeConfiguration,"Base","Body7");
matrot=transform(1:3,1:3);
eul=rotm2eul(matrot,"XYZ");
X=transform(1,4);
Y=transform(2,4);
Z=transform(3,4);

%% DEFINIZIONE TRAIETTORIA
TargetX=(825.5-OffsetX)/1000;
TargetY=33.25/1000;
TargetZ=-445.3/1000;
PosizioniCartesiane=[X Y Z;
                    TargetX TargetY -0.390;
                    TargetX TargetY TargetZ];
PosizioniEulero=[eul;
                 eul;
                 eul];
Posizioni=[PosizioniCartesiane, PosizioniEulero].';
Pesi=[1 1 1 1 1 1];
Tempo=[0 9 13];
Intervallo=0:0.005:Tempo(end);
[xe, ve, ae, pp] = quinticpolytraj(Posizioni,Tempo,Intervallo);
Traiettorie=timetable(seconds(Intervallo.'),xe.');
```

```
sim=sim("Analisi Destrezza\Robot_1\Cinematica_robot_1");

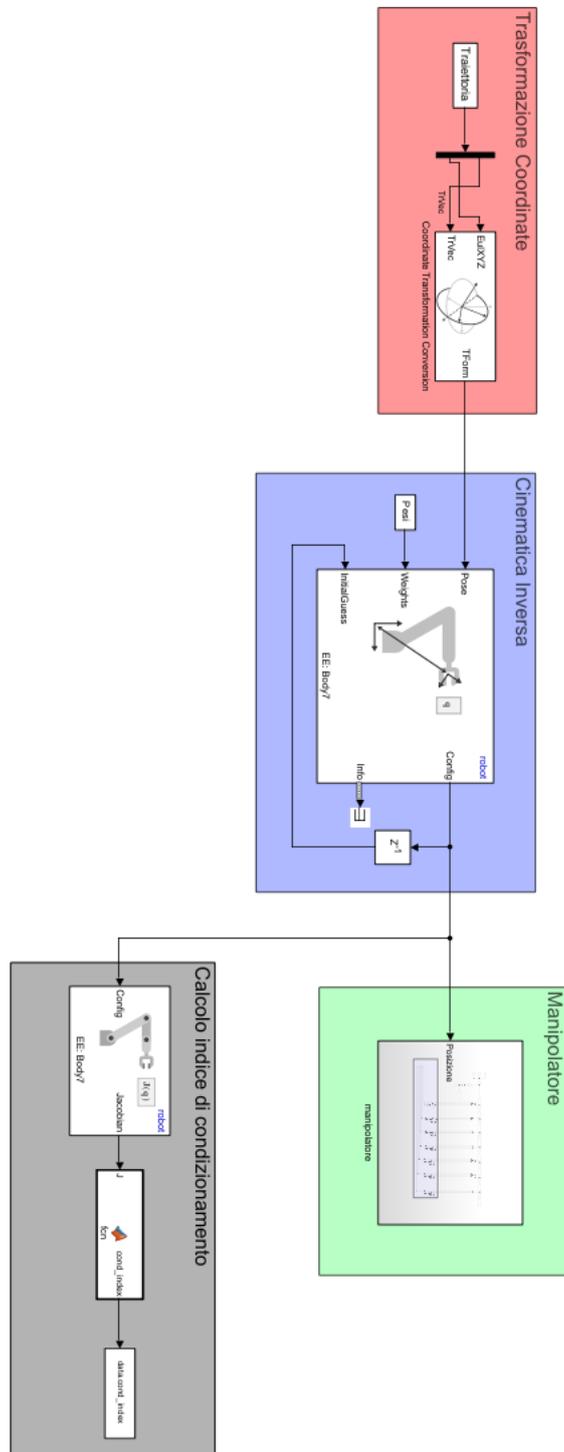
%% PLOT
fig1=figure(1);
set(fig1,'Color','white','WindowState','maximized');
hold on
scatter3(Traiettorie.Var1(:,1),Traiettorie.Var1(:,2),...
        Traiettorie.Var1(:,3),15,sim.cond_index,'filled');
txt1 = 't = 0';
text(Traiettorie.Var1(1,1),Traiettorie.Var1(1,2),...
     Traiettorie.Var1(1,3),txt1,'Position',[Traiettorie.Var1(1,1), ...
     Traiettorie.Var1(1,2)-0.05,Traiettorie.Var1(1,3)+0.05])
txt2 = 't = T_{end}';
text(Traiettorie.Var1(end,1),Traiettorie.Var1(end,2),...
     Traiettorie.Var1(end,3),txt2,'Position', ...
     [Traiettorie.Var1(end,1)+0.05,Traiettorie.Var1(end,2)-0.05, ...
     Traiettorie.Var1(end,3)])
str=["indice di condizionamento";"minimo= "
    +num2str(min(sim.cond_index),3)];
dim = [.4 .5 .6 .15];
annotation('textbox',dim,'String',str,'FitBoxToText','on', ...
          'BackgroundColor',[0.9290 0.6940 0.1250],'FaceAlpha',0.4);
title(["indice di condizionamento traiettoria per tubi dx";""])
c=colorbar;
```

```

c.LimitsMode="manual";
c.Limits=[0 0.0945];
clim([0 0.0945]);
c.Label.String = 'indice di condizionamento';
axis equal
xlim([0.5 1]);
xlabel('x [m]');
ylim([-0.3 0.3]);
ylabel('y [m]');
zlim([-0.5 0]);
zlabel('z [m]');
Z_cond4=ones(20,25).*[266.32 275 292 307.14 319 325 325 319 307.14 292
    275 266.32 -283.68 -295 -304 -313.30 -321 -325 -325 -321 -313.30
    -304 -295 -283.68 266.32];
Y_cond4=ones(20,25).*[-299.27 -300.02 -297.05 -288.33 -273.77 -250.02
    250.02 273.77 288.33 297.05 300.02 299.27 202.29 198.87 193.78 ...
    185.18 172.64 153.05 -153.05 -172.64 -185.18 -193.78 -198.87 ...
    -202.29 -299.27];
X_cond4=-ones(20,25)*200;
for i=2:18
    X_cond4(i,:)=X_cond4(i-1,)+100;
end
offset_z=168.5;
Z_cond4=Z_cond4-offset_z;
surf(X_cond4/1000,Y_cond4/1000,Z_cond4/1000,'FaceAlpha',0.4, ...
    'FaceColor',[.4 .4 .5],'EdgeColor',[.4 .4 .5],'LineStyle','none');
grid on
view(30,12)
hold off

```

A.7 Simulink Cinematica inversa



APPENDICE B CENNI TEORICI

Un manipolatore può essere rappresentato schematicamente, dal punto di vista meccanico, come una catena cinematica di corpi rigidi (*link*) collegati mediante giunti rotoidali o prismatici. Un'estremità della catena è vincolata a una base, mentre all'altra estremità è montato un end-effector. Il moto risultante della struttura si ottiene componendo i movimenti elementari di ciascun *link* rispetto al precedente. Pertanto, per manipolare un oggetto nello spazio, è necessario descrivere la posizione e l'orientamento dell'end-effector.

Il movimento del robot può essere rappresentato mediante due principali tecniche: attraverso la cinematica diretta, che permette di ricavare la posizione finale dell'end-effector tramite la combinazione degli spostamenti di ogni giunto, e attraverso la cinematica inversa ovvero definita la posizione successiva dell'end-effector si ricavano gli spostamenti di ogni giunto della catena cinematica. Dal punto di vista computazionale quest'ultimo metodo risulta più complicato ma allo stesso tempo è quello più funzionale.

Un corpo rigido si può dire completamente definito nello spazio quando sono dati posizione e rotazione rispetto ad un sistema di riferimento. Per cui è utile determinare 2 elementi: matrice di rotazione e vettore posizione.

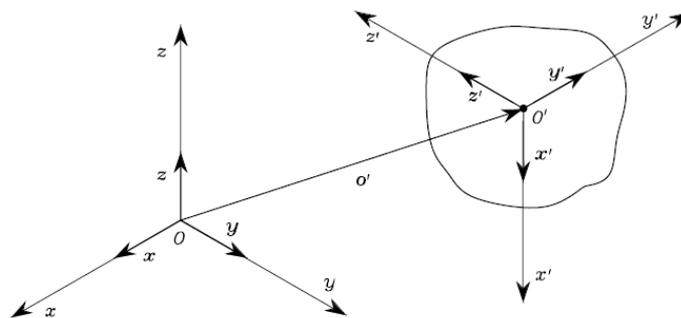


Figura 105: Posizione e orientamento di un corpo

Si possono ricavare i seguenti valori

$$x' = x'_x \mathbf{x} + x'_y \mathbf{y} + x'_z \mathbf{z}$$

$$y' = y'_x \mathbf{x} + y'_y \mathbf{y} + y'_z \mathbf{z}$$

$$z' = z'_x \mathbf{x} + z'_y \mathbf{y} + z'_z \mathbf{z}$$

La matrice di rotazione è definita come:

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} x'_x & y'_x & z'_x \\ x'_y & y'_y & z'_y \\ x'_z & y'_z & z'_z \end{bmatrix}$$

Mentre la posizione di un punto generico rispetto a 2 sistemi di riferimento diversi è:

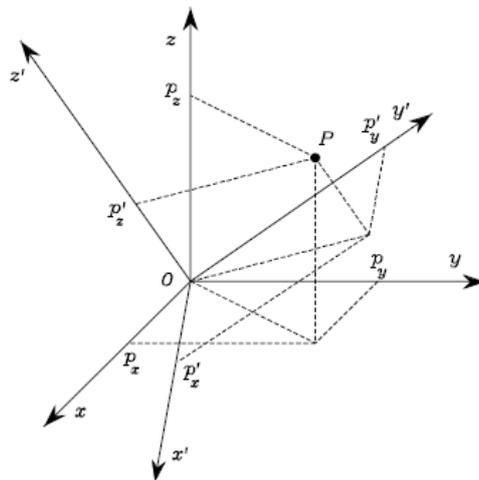


Figura 106: Vettori posizione di un punto generico

$$\mathbf{p} = \begin{bmatrix} p_x \\ p_y \\ p_z \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{p}' = \begin{bmatrix} p'_x \\ p'_y \\ p'_z \end{bmatrix}$$

B.1 Trasformata Omogenea

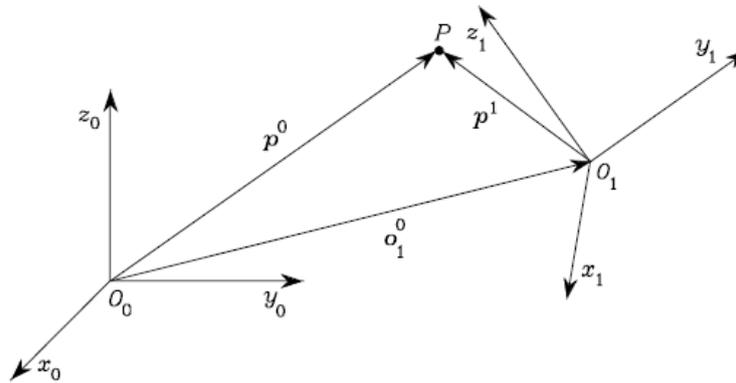


Figura 107: Definizione di un punto da 2 sistemi di riferimento diversi

Considerando la definizione di un punto partendo da 2 sistemi di riferimento con posizione e orientamento diversi si può dire che

$$p^0 = o_1^0 + R_1^0 p^1$$

Dove con R_1^0 si indica la matrice di rotazione del sistema di riferimento 1 rispetto al 0.

Eseguendo alcuni semplici passaggi algebrici si ottiene:

$$p^1 = -R_0^1 o_1^0 + R_0^1 p^0$$

Per ottenere una rappresentazione compatta è utile considerare il vettore posizione come

$$p = \begin{bmatrix} p_x \\ p_y \\ p_z \\ 1 \end{bmatrix}$$

In questo modo si ottiene la trasformata omogenea

$$A_1^0 = \begin{bmatrix} R_0^1 & o_1^0 \\ 0^T & 1 \end{bmatrix}$$

Quindi

$$p^1 = A_1^0 p^0$$

B.2 Cinematica Diretta

L'intera struttura, composta da giunti (*joint*) e corpi rigidi (), forma una catena cinematica dove un capo è fissato ad una base mentre l'altro a un end-effector. Lo scopo della cinematica diretta è quello di determinare la posizione dell'end-effector in funzione delle variabili di giunto.

Rispetto a un sistema di riferimento la cinematica diretta è espressa attraverso la matrice trasformata omogenea. Per esempio

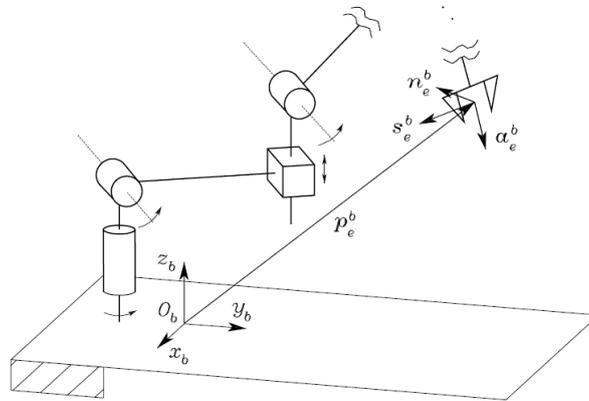


Figura 108: Cinematica diretta

Il sistema di riferimento con pedice b è il sistema di riferimento della base, mentre quello con pedice e è quello dell'end effector. Di conseguenza la matrice della trasformata omogenea diventa

$$T_e^b(\mathbf{q}) = \begin{bmatrix} n_e^b(\mathbf{q}) & s_e^b(\mathbf{q}) & a_e^b(\mathbf{q}) & p_e^b(\mathbf{q}) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Dove con \mathbf{q} si indica il vettore ($n \times 1$) di variabili di giunto.

Considerando un sistema cinematico a catena aperta, composto da $n+1$ connessi tra di loro tramite n *joint* e ipotizzando che ogni *joint* aggiunga un singolo DOF alla struttura meccanica. È inoltre utile definire un sistema di coordinate fissato da ogni i (da 0 a n).

Di conseguenza, la trasformata omogenea del sistema di riferimento n rispetto a quello 0 è dato da

$$T_n^0(\mathbf{q}) = A_1^0(\mathbf{q}_1) A_2^1(\mathbf{q}_2) \dots A_n^{n-1}(\mathbf{q}_n)$$

La cinematica diretta è ottenuta semplicemente come moltiplicazione delle trasformate omogenee tra un *link* ed il successivo.

B.3 Convenzione Denavit – Hartenberg

Per poter calcolare la cinematica diretta è utile definire un sistema generale per definire posizione e orientamento relativi tra due consecutivi.

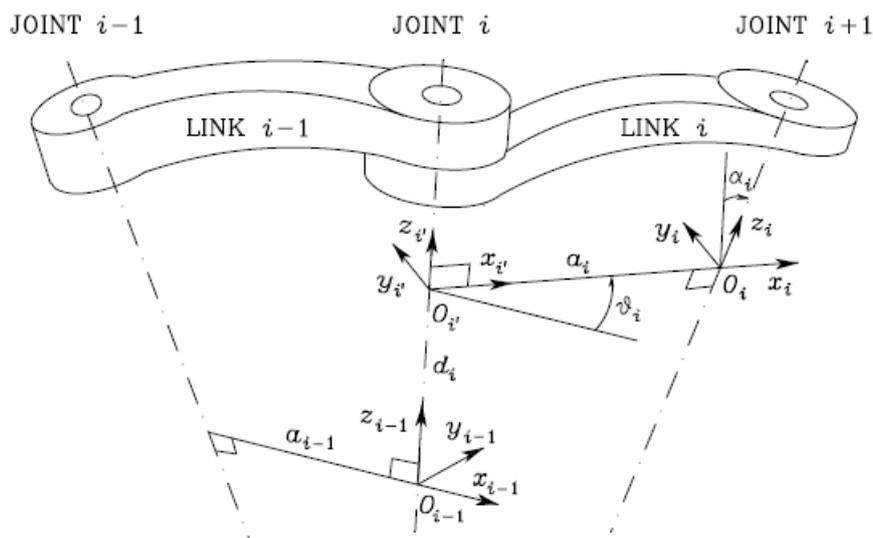


Figura 109: parametri cinematici Denavit – Hartenberg

L'asse i definisce l'asse del giunto i che collega il $i-1$ al i . Detto ciò, si esprimono le regole della convenzione DH.

- Si sceglie l'asse z_i lungo l'asse del joint $i+1$.

- Si posiziona l'origine O_i all'intersezione dell'asse z_i con il segmento di distanza minima tra l'asse z_i e l'asse z_{i-1} .
- Si sceglie l'asse x_i lungo la direzione del segmento di distanza minima, con verso positivo nella direzione *joint i – joint i+1*.
- Si sceglie l'asse y_i nella direzione e verso definiti dalla regola della mano destra.

La posizione e l'orientamento tra due *link* adiacenti è specificata univocamente attraverso i seguenti parametri:

- a_i : distanza tra O_i e O_{i+1}
- d_i : coordinata di O_i lungo z_{i-1}
- α_i : angolo tra z_{i-1} e z_i rispetto all'asse x_i (positivo quando è in verso antiorario)
- θ_i : angolo tra x_{i-1} e x_i rispetto all'asse z_i (positivo quando è in verso antiorario)

I parametri α_i e a_i sono sempre costanti e dipendono solamente dalla geometria del collegamento tra due *joint* consecutivi. Mentre, per i due parametri che rimangono, uno è variabile e l'altro è costante a seconda del tipo di giunto che unisce i due *link*:

- se il giunto è di rivoluzione θ_i è variabile
- se il giunto è prismatico d_i è variabile.

La matrice di trasformazione tra i sistemi di riferimento i e $i-1$ risulta.

$$A_i^{i-1}(q_i) = \begin{bmatrix} \cos \theta_i & -\sin \theta_i \cos \alpha_i & \sin \theta_i \sin \alpha_i & a_i \cos \theta_i \\ \sin \theta_i & \cos \theta_i \cos \alpha_i & -\cos \theta_i \sin \alpha_i & a_i \sin \theta_i \\ 0 & \sin \alpha_i & \cos \alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Si nota come la matrice di trasformazione è funzione solamente di \mathbf{q} (che rappresenta la variabile nella convenzione DH, θ_i o d_i , a seconda del tipo di giunto). Moltiplicando ogni matrice di trasformazione, che definisce ciascuna delle coppie di *link* adiacenti, si ricava la trasformata omogenea di tutta la catena cinematica.

B.4 Cinematica inversa

La cinematica inversa consiste nel determinare le variabili di giunto che corrispondono delle indicazioni di posizione e orientamento dell'end effector. Il problema della cinematica inversa è molto più complesso rispetto a quello della cinematica diretta a causa delle seguenti ragioni:

- Le equazioni da risolvere sono generalmente non lineari e quindi non sempre è possibile trovare una forma chiusa
- Possono esistere più soluzioni per un unico problema
- Possono esistere infinite soluzioni per un unico problema, nel caso di manipolatori ridondanti.
- Alcune soluzioni non sono ammissibili a causa della catena cinematica del robot

B.5 Jacobiana geometrica

La Jacobiana costituisce un importante elemento per la valutazione delle caratteristiche di una struttura robotica; infatti, essa è utilizzata per trovare i punti di singolarità, analizzare la ridondanza, è alla base di molti algoritmi di cinematica inversa.

Lo scopo della cinematica differenziale è quello di trovare la relazione tra le velocità dei giunti (\dot{q}) e le velocità lineari (\dot{p}_e) e angolari (ω_e) dell'end effector. In questo compito la Jacobiana gioca un ruolo fondamentale, infatti:

$$v_e = \begin{bmatrix} \dot{p}_e \\ \omega_e \end{bmatrix} = J(q) \dot{q}$$

rappresenta l'equazione della cinematica differenziale, J è la matrice Jacobiana geometrica del manipolator. Può essere scritta anche nella forma

$$J = \begin{bmatrix} J_P \\ J_O \end{bmatrix}$$

Si nota come la Jacobiana dipende dalla configurazione (q) del robot. Le configurazioni che rendono J non a rango pieno vengono dette **singolarità cinematiche**.

Questi punti sono di estrema importanza dal momento che:

- Rappresentano punti dove la mobilità del manipolatore è ridotta.
- Possono esistere infinite soluzioni al problema della cinematica inversa.
- In prossimità di punti di singolarità piccole velocità nello spazio operativo possono indurre elevate velocità nello spazio dei giunti.

Le singolarità possono essere:

- Di bordo: si manifestano quando il robot è completamente disteso. Sono facilmente evitabili, infatti, basta evitare che il robot lavori completamente disteso.
- Interne: sono singolarità che si trovano all'interno del workspace. Nascono dall'allineamento di due o più assi. Questo tipo di singolarità necessita di uno studio più approfondito in fase di progetto poiché il robot le può incontrare durante una traiettoria all'interno del workspace. [23]

BIBLIOGRAFIA

- [1] EUROfusion, «About EUROfusion,» [Online]. Available: <https://eurofusion.org/eurofusion/>.
- [2] EUROfusion, «European Research Roadmap to the Realisation of Fusion Energy,» 2018.
- [3] EUROfusion, «Fusion History Timeline,» [Online]. Available: <https://eurofusion.org/fusion/history-of-fusion/>.
- [4] A.Pizzuto, «DTT Divertor Tokamak Test facility – Project Proposal Report.,» 2015.
- [5] R. Francesco, «Il progetto DTT».
- [6] M. Raffaele, A. Raffaele, C. Flavio, M. Piero e P. Aldo, «Divertor Tokamak Test facility – Interim Design Report,» Frascati, 2019.
- [7] G. Calvo, D. Sorli, S. Mauro, R. Andrea e P. Palmeri, «Robotic Arm Design and Simulation for Remote Maintenance in the DTT Fusion Reactor».
- [8] Comitato Nucleare e Ragione, «Radiazioni e radioprotezione,» [Online]. Available: <https://nucleareeragione.org/radiazioni-e-radioprotezione-2/>.

- [9] D. Ardizzoni, S. Mauro, G. Calvo, M. Melchiorre e M. Troise, «Studio di un braccio robotico per la manutenzione di tubazioni nel reattore DTT,» Politecnico di Torino, 2023.
- [10] S. L. Chiu, «Task Compatibility of Manipulator Postures,» *The International Journal of Robotics Research*, 1988.
- [11] S.H.H. Zargarbashi, Waseem Khan, Jorge Angeles, «Robotics and Computer-Integrated Manufacturing,» *Science Direct*, vol. 28, pp. 694-699, 2012.
- [12] C. Trinh, D. Zlatanov, M. Zoppi e R. Molfino, «A Geometrical Approach to the Inverse Kinematics of 6R Serial Robots With Offset Wrists.,» in *International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference*, Boston, Massachusetts, USA, 2015.
- [13] R. V. Mayorga, B. Ressa e A. K. C. Wong, «A dexterity measure for robot manipulators,» in *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Cincinnati, OH, USA, 1990.
- [14] Mohammed Mohammed, Ayssam Elkady e Tarek Sobh, «A New Algorithm for Measuring and Optimizing the Manipulability Index,» *Advanced robotic system*, vol. 6, n. 2, pp. 145-150, 2009.
- [15] Jin-Oh Kim e Pradeep K. Khosla, «Dexterity Measure for Design and Control of Manipulator,» in *IEEE International Workshop on Intelligent Robots and Systems*, Osaka, Japan, 1991.
- [16] J. P. Merlet, «Jacobian, Manipulability, Condition number and Accuracy of Parallel Robots,» *Journal of Mechanical Design*, vol. 128, pp. 199-106, 2006.

- [17] S.H.H. Zargarbashi et al., «The Jacobian condition number as a dexterity index in 6R machining robots,» *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, vol. 28, pp. 694-699, 2012.
- [18] Tanio Tanev, Bogdan Stoyanov, «On the Performance Indexes for Robot Manipulators,» BULGARIAN ACADEMY OF SCIENCES, Sofia, 2000.
- [19] The MathWorks, Inc., «quinticpolytraj, Generate fifth-order trajectories,» [Online]. Available: <https://it.mathworks.com/help/robotics/ref/quinticpolytraj.html>.
- [20] Harmonic Drive, «Riduttore armonico Harmonic Drive®,» [Online]. Available: <https://harmonicdrive.de/it/glossario/riduttore-armonico-harmonic-driver#:~:text=Il%20riduttore%20armonico%20Harmonic%20Drive,a%20sfere%20speciale%20deformabile%20ellitticamente..>
- [21] Kollmorgen, «Come funziona un motore frameless?,» [Online]. Available: <https://www.kollmorgen.com/it-it/products/motors/technologies-explained/what-is-a-frameless-motor>.
- [22] Kollmorgen, «Integrazione dei motori frameless TBM2G nei sistemi di attuatori di precisione e cardanici,» 203A West Rock Road, Radford, VA 24141 USA.
- [23] B. Siciliano, L. Sciavicco, L. Villani e G. Oriolo, *Robotics Modelling, Planning and Control*, Springer, 2010.