

Treball final de grau

Estudi: Grau en Enginyeria Biomèdica

Títol: Sistema de control per veu per a la manipulació d'un instrument quirúrgic auxiliar en cirurgia mínimament invasiva

Document: Memòria

Alumne: Gerard Torras Canela

Tutor: Xavier Cufí Solé

Departament: Arquitectura i Tecnologia de Computadors

Àrea de coneixement: Arquitectura i Tecnologia de Computadors

Convocatòria (mes/any): Juny 2025

AGRAÏMENTS

Arribar fins aquí ha estat un camí ple d'esforç, aprenentatges i creixement personal. Aquest treball no hauria estat possible sense el suport i l'acompanyament de moltes persones que vull agrair de tot cor.

En primer lloc, al professor Xavier Cufí, tutor del treball, per la seva implicació constant, la seva paciència i les orientacions encertades que m'han ajudat a enfocar el projecte amb rigor i claredat. Gràcies per confiar en mi des del primer moment i per guiar-me amb tanta professionalitat.

També vull agrair molt sincerament al professor Esteve-Amadeu Hernández, pel seu suport i la seva proximitat al llarg del procés. La seva disponibilitat i els seus consells han estat un gran ajut per tirar endavant aquest repte amb seguretat.

A la meva família, gràcies per ser-hi sempre. Per donar-me ànims quan més ho necessitava, per entendre'm en els moments de més estrès i per fer-me sentir que mai estic sol.

Als meus amics, per la vostra companyia, l'escolta i les bones estones que han equilibrat tot aquest esforç. I especialment al Pau, que ha estat amb mi en tot aquest viatge i m'ha acompanyat des del primer dia amb suport i amistat incondicionals.

A la meva parella, gràcies per la paciència infinita, pel teu suport constant i per creure en mi fins i tot quan jo dubtava. Has estat un pilar fonamental en aquest procés i t'ho agraeixo profundament.

I molt especialment, vull dedicar aquest treball al meu avi, que ens va deixar aquest any. No ha pogut veure'm graduar-me, però sé que estaria molt orgullós i feliç per aquest pas. Aquest assoliment també és seu.

A tots vosaltres: gràcies de tot cor.

ÍNDEX

1. INTRODUCCIÓ	8
1.1. Antecedents	8
1.2. Objectius	9
1.2.1. Objectiu principal	9
1.2.2. Objectius específics	9
1.3. Especificacions i abast	10
1.3.1. Especificacions tècniques	10
1.3.2. Especificacions funcionals	10
1.3.3. Abast del projecte	11
2. CONCEPTES PREVIS	11
2.1. Introducció.....	11
2.2. Cirurgia mínimament invasiva (CMI).....	12
2.2.1. Definició i característiques principals	12
2.2.2. Diferències amb la cirurgia oberta tradicional.....	12
2.3. Robòtica en cirurgia mínimament invasiva	13
2.3.1. Sistemes robòtics en cirurgia laparoscòpica	13
2.4. Control per veu en robòtica mèdica	14
2.4.1. Funcionament del reconeixement de veu en aplicacions robòtiques	14
2.4.2. Avantatges i desavantatges del control per veu	15
2.4.3. Aplicacions en l'àmbit mèdic	15
2.5. El robot Staubli TX60.....	16
2.6. Moviments robòtics en entorns quirúrgics.....	17
2.7. Resum i connexió amb els següents capítols	18
3. ESTUDI DE MERCAT	19
3.1. Definició de mercat.....	19
3.2. Anàlisi de l'oferta i la demanda.....	20
3.3. Preus i canals de distribució	21
3.4. Anàlisi de la competència	22
3.5. Necessitats dels usuaris.....	23
3.6. Components i materials necessaris	24
3.6.1. Braç robòtic.....	24
3.6.2. Sistema de captació i reconeixement de veu	25
3.6.3. Interfície de control i comunicació	25
3.6.4. Estructura i entorn de simulació	26

4. NORMATIVA I ASPECTES LEGALS	27
4.1. Normativa sobre dispositius mèdics	27
4.2. Protecció de dades i reconeixement de veu	27
4.3. Consideracions ètiques	28
5. CONCEPTE D'ENGINYERIA.....	28
5.1. Conceptes tècnics específics	29
5.2. Estructura general i estratègia de control	30
5.3. Modes de funcionament	30
5.3.1. Mode manual (<i>verbose = false</i>).....	30
5.3.2. Mode control remot (<i>verbose = true</i>).....	31
5.4. Variables i configuració del sistema.....	31
5.4.1. Posicions i trajectòries	31
5.4.2. Velocitats	31
5.4.3. Paràmetres de moviment	32
5.4.4. Eines i referències	32
5.4.5. Comunicació i flux de dades	32
5.4.6. Altres variables i recursos del sistema	32
5.5. Funcionament detallat del bucle de control (VAL3).....	33
6. IMPLEMENTACIÓ I RESULTATS	36
6.1. Prova inicial de reconeixement de veu	37
6.2. Prova de comunicació entre dos ordinadors.....	37
6.3. Enviament d'ordres estructurades per consola	38
6.4. Control per veu amb enviament d'ordres estructurades.....	39
6.5. Prova de control del robot mitjançant botons.....	40
6.5.1. Primera versió: prova de pivotació sobre eixos	40
6.5.2. Segona versió: prova de translació i rotació integrada	41
6.5.3. Versió millorada i definitiva del pivotatge dinàmic	42
6.6. Prova de recepció de comandes numèriques per socket.....	42
6.7. Validació final amb codi integrat	44
6.8. Prova final amb reconeixement de veu.....	44
7. CONCLUSIONS	46
7.1. Acompliment dels objectius	46
7.2. Contribució als Objectius de Desenvolupament Sostenible (ODS)	46
7.3. Línies de millora i treball futur	47
ANNEXOS	52

A. PLANIFICACIÓ	52
A.1. Taula de planificació detallada	52
A.2. Recursos i equipament utilitzat	53
A.3. Diagrama de Gantt.....	53
A.4. Desviacions respecte a la planificació inicial	53
B. CODI	54
C. PRESSUPOST	54
C.1. Preus unitaris.....	54
C.2. Pressupostos parcials.....	56
C.3. Pressupost total	56
C.4. Comentari final.....	56
D. CÀLCULS I JUSTIFICACIONS.....	57
D.1. Introducció	57
D.2. Declaració de punts i sistemes de coordenades	57
D.2.1. Punts de referència (joints).....	57
D.2.2. Definició del punt d'inserció i del frame del pacient.....	59
D.3. Declaració de les Tools.....	63
D.4. Paràmetres de moviment i control.....	69
D.5. Conclusió i aplicació final	69

ÍNDEX FIGURES

Figura 2.1. Robot Staubli TX-60.....	16
Figura 2.2. Representació esquemàtica del moviment Remote Center of Motion (RCM).	17
Figura 2.3. Esquema funcional del sistema de control per veu implementat.	18
Figura 3.1. Evolució estimada del mercat global de sistemes robòtics mèdics per tipus (2020–2030).	19
Figura 5.1. Comunicació en temps real entre el client Python amb reconeixement de veu i el robot Stäubli.	35
Figura 6.1. Resultat de la prova de reconeixement de veu: extracció d'acció i distància a partir d'una comanda vocal.	37
Figura 6.2. Missatge del servidor indicant connexió establerta i recepció de dades.....	38

Figura 6.3. Missatge del client confirmant l'enviament del dígit 1.....	38
Figura 6.4. Missatge del client on es veu que s'envia la comanda "I;10".....	39
Figura 6.5. Missatge del servidor indicant que ha rebut correctament la comanda "I;10" i realitza l'acció corresponent.....	39
Figura 6.6. Missatge del client on es reconeix una ordre per veu i s'envia al servidor.....	39
Figura 6.7. Missatge del servidor indicant que ha rebut correctament l'ordre d'entrar.....	40
Figura 6.8. Seqüència de moviment del braç robòtic Stäubli TX60 durant la prova de pivotació al voltant del trocar, mitjançant comandes generades per botons físics.	41
Figura 6.9. Pantalla del Teach Pendant mostrant les comandes numèriques rebudes per socket i interpretades pel robot.	43
Figura A.1. Diagrama de Gantt amb la planificació temporal del projecte.	53
Figura D.1. Robot a la posició jHome definida.	58
Figura D.2. Robot a la posició jWork ja definida.	58
Figura D.3. Sistema de coordenades del frame world (predeterminat del robot).	59
Figura D.4. Robot a col·locat a pInsercio[0].	60
Figura D.5. Robot en posició pCalFrame[1].	60
Figura D.6. Aplicació de la regla de la mà dreta per determinar el sentit dels eixos X, Y i Z en un sistema de coordenades cartesià ortonormal.	61
Figura D.7. Sentit i direcció dels eixos X i Y del frame fPacient definit.	61
Figura D.8. Ubicació exacte del punt pCalFrame[2].	62
Figura D.9. Resultat final dels tres eixos del frame fPacient.....	62
Figura D.10. Situació de tPunxa i tPivot en l'instrument utilitzat i la distància entre elles.	63
Figura D.11. Vista dels eixos del flange respecte de la direcció de l'agulla.	64
Figura D.12. Mesura de la distància de 14,5 cm entre el centre del flange i la posició real de l'agulla, en la direcció de l'eix Z.	65
Figura D.13. Comparativa entre el robot Stäubli TX60 estàndard i el muntatge real del laboratori amb la pinça d'aire a pressió.....	66
Figura D.14. Representació geomètrica de la direcció de l'agulla com a hipotenusa d'un triangle rectangle definit pels eixos X i Y del flange.	67
Figura D.15. Mesura de les distàncies des del centre del flange fins a la punta de l'agulla (26 cm) i fins al punt de pivot (20 cm).	67

ÍNDIX TAULES

Taula 3.1. Comparativa de sistemes robòtics quirúrgics.	23
Taula 5.1. Correspondència entre ordres rebudes pel robot i moviments executats per aquest	34
Taula 6.1. Taula amb les ordres vocals reconegudes i les comandes corresponents enviades al robot	45
Taula A.1. Planificació temporal del projecte i activitats principals realitzades.	52
Taula C.1. Estimació de preus unitaris.....	55
Taula C.2. Pressupost final estimat.....	56

1. INTRODUCCIÓ

1.1. Antecedents

En els darrers anys, la robòtica s'ha consolidat com una eina fonamental en el camp de la medicina, especialment en la cirurgia mínimament invasiva. La introducció de sistemes robòtics ha permès als cirurgians realitzar operacions amb més precisió, menor invasivitat i un millor control dels instruments quirúrgics. Un exemple destacat és el sistema quirúrgic *Da Vinci*, que proporciona als cirurgians una visió en alta definició 3D i instruments amb una major articulació, millorant així la precisió i la seguretat de les intervencions.

A més dels avantatges per als professionals, la cirurgia assistida per robots també suposa beneficis significatius per als pacients. La major precisió en els moviments permet reduir el dany als teixits, cosa que es tradueix en una recuperació més ràpida, menys dolor postoperatori i una reducció del risc d'infeccions. Diversos estudis han demostrat que els pacients intervinguts amb sistemes robòtics experimenten menys complicacions i un menor temps d'hospitalització. Per exemple, segons un informe de l'Agència de Qualitat i Avaluació Sanitàries de Catalunya (AQuAS), la cirurgia robòtica aporta beneficis per al cirurgià i avantatges per al pacient, com ara una recuperació més ràpida i menys complicacions postoperatories. A més, aquesta reducció del temps d'hospitalització contribueix a una menor saturació hospitalària i una optimització dels recursos sanitaris, generant un benefici per al sistema de salut.

Un dels principals desafiaments en aquest tipus de procediments és la manipulació de la càmera endoscòpica, que habitualment és controlada per un assistent humà. Aquesta dependència pot generar variacions en la posició i el moviment de la càmera, afectant la visibilitat del cirurgià i la fluïdesa de la intervenció. Per abordar aquesta problemàtica, s'han desenvolupat sistemes robòtics capaços d'automatitzar el control de la càmera, permetent que el cirurgià l'ajusti directament sense necessitat d'un operador addicional.

Aquesta necessitat d'un control més precís i estable de la càmera, que alhora permeti al mateix cirurgià gestionar-ne el moviment, ha impulsat el desenvolupament de solucions robòtiques avançades. Diversos estudis, com el de Paul et al. (2024) sobre sistemes de control de càmera activats per veu en el robot quirúrgic *da Vinci* i el treball de Gruijthuisen et al. (2021) en seguiment autònom d'instruments per al control de càmera, han explorat la possibilitat d'integrar el reconeixement de veu com a interfície de control per millorar la interacció entre el cirurgià i el sistema robòtic, oferint així un control més intuïtiu i eficient. Aquesta tecnologia permet al cirurgià donar ordres verbals directament al robot per ajustar la posició i orientació de la càmera en temps real, optimitzant la precisió i la rapidesa del procediment.

1.2. Objectius

1.2.1. Objectiu principal

El principal objectiu d'aquest treball és el desenvolupament d'un sistema robòtic capaç de controlar una càmera endoscòpica mitjançant ordres de veu del cirurgià. Aquest sistema actuarà com un assistent quirúrgic autònom, facilitant la manipulació de la càmera sense necessitat d'un operador humà, millorant així la precisió i la fluïdesa de la intervenció en cirurgia mínimament invasiva.

El sistema es basarà en una simulació d'un robot quirúrgic utilitzant el robot industrial TX60 de Stäubli Robots. Es procedirà començant des d'una posició inicial de referència (posició HOME), situada just a sobre del trocar, des d'on es realitzaran els ajustos necessaris per garantir una correcta visibilitat. Per aconseguir aquest objectiu, s'ha contemplat que el robot pugui fer uns moviments específics que consistiran en el següent:

- Moviments verticals: pujada i baixada de la càmera per ajustar l'angle de visió segons les necessitats del cirurgià.
- Moviments de pivot: petits moviments de pivot on la punta de l'instrument quirúrgic es mou, mantenint fix el punt del trocar, que actua com a centre de pivotació.

Aquest enfocament permet modificar l'orientació de la càmera sense desplaçar el punt d'entrada de l'instrument, assegurant estabilitat i evitant tensions innecessàries en els teixits del pacient.

1.2.2. Objectius específics

Per assolir l'objectiu general, es defineixen els següents objectius específics:

1. Dissenyar i implementar un sistema de reconeixement de veu capaç d'interpretar ordres en català i traduir-les en accions robòtiques precises.
2. Integrar el sistema de reconeixement de veu amb el control del braç robòtic, permetent una comunicació fluida i en temps real.
3. Desenvolupar un model de moviment basat en una posició inicial HOME, que assegurï estabilitat i precisió en els ajustos de la càmera.
4. Implementar i provar diferents estratègies de moviment per garantir que els desplaçaments siguin suaus i segurs en l'entorn quirúrgic simulat.

5. Realitzar proves experimentals per avaluar la precisió, temps de resposta i robustesa del sistema en diverses condicions operatives.
6. Analitzar els resultats obtinguts i comparar-los amb sistemes existents, valorant la viabilitat i les millores potencials del control per veu en cirurgia mínimament invasiva.

1.3. Especificacions i abast

1.3.1. Especificacions tècniques

El sistema a desenvolupar ha de complir els següents requisits tècnics:

- Ha de ser capaç d'interpretar ordres en català en temps real, permetent la interacció sense contacte físic.
- Ha de poder executar moviments de pujada, baixada i rotació mantenint fix el punt del trocar com a centre de pivotació.
- El sistema ha de començar des d'una posició de referència situada just a sobre del trocar per garantir moviments predictibles i segurs.
- Els moviments han de ser fluides i sense vibracions per evitar errors en la visualització de la càmera.
- La resposta del sistema a les ordres de veu ha de ser el més immediata possible per garantir una experiència d'ús òptima.
- Ha de permetre una integració eficient entre el reconeixement de veu i el sistema de control del robot.

1.3.2. Especificacions funcionals

El sistema ha de permetre al cirurgià realitzar ajustos en la posició de la càmera sense necessitat d'un assistent, millorant la seva autonomia durant la intervenció. Per tant, ha de complir els següents criteris funcionals:

- El sistema ha de ser capaç d'entendre un conjunt reduït d'ordres simples per modificar la posició de la càmera, com ara "avança", "ves enrere", "para", "pivota cap a l'esquerra" o "pivota cap a la dreta".
- Els desplaçaments han de ser controlats i previsibles, evitant moviments sobtats.
- La càmera ha de poder girar sobre l'eix de l'instrument sense desplaçar-se del punt del trocar.

- El sistema ha de permetre calibracions, com per exemple la calibració del punt de pivot en el trocar o el calibratge de la punta de l'eina, i ajustaments segons les necessitats específiques del procediment quirúrgic.

1.3.3. Abast del projecte

Tenint en compte les característiques que s'han descrit del prototip que es desenvoluparà en aquest treball, els aspectes que es consideraran dins de l'abast són:

- Implementació del reconeixement de veu i la seva integració amb el sistema robòtic.
- Control de moviments bàsics de la càmera (pujada, baixada i rotació sobre el trocar).
- Validació del sistema mitjançant proves en un entorn simulat o amb un prototip físic.
- Avaluació de la precisió, temps de resposta i usabilitat del sistema.

2. CONCEPTES PREVIS

2.1. Introducció

Abans d'endinsar-nos en el desenvolupament d'aquest Treball de Fi de Grau, és essencial comprendre una sèrie de conceptes clau que proporcionaran el context necessari per entendre les decisions de disseny i implementació del sistema.

Aquest capítol té com a objectiu introduir els fonaments teòrics i tecnològics relacionats amb aquest projecte, començant per una explicació de la cirurgia mínimament invasiva (CMI), on es parlarà de la seva importància i els avantatges que ofereix en comparació amb la cirurgia oberta tradicional. A continuació, s'analitzarà el paper de la robòtica en l'àmbit quirúrgic, destacant com aquesta tecnologia ha permès millorar la precisió i seguretat de les intervencions.

Un altre concepte fonamental d'aquest treball és el control per veu, una tecnologia emergent que està adquirint una rellevància creixent en el camp de la interacció home-màquina i que en aquest projecte s'aplicarà per facilitar la manipulació d'un instrument quirúrgic auxiliar (Paul et al., 2024; Rogowski, 2022). També es detallarà el funcionament i característiques del braç robòtic Staubli TX-60, el dispositiu utilitzat per aquest estudi, i es descriuran els tipus de moviments robòtics en entorns quirúrgics, fent especial èmfasi en la pivotació al voltant del trocar, un dispositiu ubicat en el punt d'entrada d'un instrument quirúrgic al cos del pacient

(Lee et al., 2023; Simaan et al., 2015). Aquesta pivotació, és un aspecte essencial per garantir la seguretat i eficàcia del sistema.

Aquesta secció proporcionarà, per tant, la base teòrica necessària per entendre els següents capítols, on es detallarà la implementació i desenvolupament del sistema proposat.

2.2. Cirurgia mínimament invasiva (CMI)

2.2.1. Definició i característiques principals

La cirurgia mínimament invasiva (CMI) utilitza tècniques que redueixen la mida de les incisions, minimitzant el trauma quirúrgic, el dolor i el risc d'infecció, i afavorint una recuperació més ràpida (Rosen & Ponsky, 2001; AQuAS, 2018).

A diferència de la cirurgia oberta, la CMI fa servir incisions petites (normalment <2 cm) o fins i tot orificis naturals. Aquestes tècniques es basen en instruments especialitzats com laparoscopis i artroscopis, que inclouen càmeres d'alta definició i sistemes d'il·luminació per facilitar una visualització clara de l'interior del cos (Broderick et al., 2004).

Els instruments dissenyats per a la CMI permeten moviments precisos dins d'espais reduïts, tot exigint gran destresa quirúrgica (Paul et al., 2024). A més, la incorporació de tecnologies d'imatge avançades, com la fluoroscòpia o la imatge per ressonància, permet guiar els procediments en temps real (Gruijthuijsen et al., 2021).

Sistemes robòtics com el Da Vinci, amb visió 3D d'alta resolució, milloren encara més la precisió, seguretat i control dels moviments quirúrgics (Paul et al., 2024; Rogowski, 2022).

En conjunt, la CMI representa una alternativa segura i eficaç a la cirurgia oberta, amb millors resultats per al pacient i avantatges per al cirurgià (AQuAS, 2018; Rosen & Ponsky, 2001).

2.2.2. Diferències amb la cirurgia oberta tradicional

La cirurgia oberta i la cirurgia mínimament invasiva (CMI) són enfocaments quirúrgics amb característiques i impactes clínics diferenciats.

La cirurgia oberta requereix grans incisions que ofereixen accés directe als òrgans, facilitant el maneig anatòmic i el tacte del cirurgià. Tot i això, aquest mètode implica més trauma, risc

d'infecció, cicatrització lenta i estades hospitalàries més llargues (Rosen & Ponsky, 2001; AQuAS, 2018).

En canvi, la CMI utilitza incisions petites i tecnologia com càmeres d'alta definició i instruments especialitzats, reduint el dany als teixits i accelerant la recuperació. La incorporació de sistemes robòtics i laparoscòpics aporta precisió i estabilitat, tot i requerir un període d'adaptació per part del personal mèdic (Paul et al., 2024; Rogowski, 2022; AQuAS, 2018).

A nivell estètic, les cicatrius de la CMI són més petites i menys visibles, amb menys impacte funcional i psicològic per al pacient. Malgrat que la cirurgia oberta pot semblar més econòmica en equipament, la CMI redueix complicacions i temps d'hospitalització, compensant així la inversió inicial (AQuAS, 2018).

En última instància, l'elecció entre ambdues tècniques dependrà de factors com la complexitat del cas, la tecnologia disponible i l'experiència del cirurgià.

2.3. Robòtica en cirurgia mínimament invasiva

La incorporació de la robòtica en la cirurgia mínimament invasiva (CMI) ha suposat una revolució en les tècniques quirúrgiques, oferint avantatges significatius respecte a les metodologies tradicionals. Aquesta tecnologia ha permès superar algunes de les limitacions inherents a la cirurgia laparoscòpica convencional, com ara la precisió limitada dels moviments manuals i la dependència d'un assistent per manipular la càmera (Broderick et al., 2004; Paul et al., 2024; Rogowski, 2022).

2.3.1. Sistemes robòtics en cirurgia laparoscòpica

La cirurgia laparoscòpica tradicional utilitza càmeres i instruments introduïts per petites incisions, evitant grans obertures abdominals. Tot i així, presenta limitacions com el camp visual restringit, la rigidesa dels instruments i la dependència d'un assistent per moure la càmera (Rosen & Ponsky, 2001; Kim et al., 2002).

La robòtica quirúrgica ha permès superar aquests reptes, oferint manipulació precisa i estable de càmeres i eines (Paul et al., 2024; Broderick et al., 2004). El sistema Da Vinci n'és l'exemple més consolidat, amb visió 3D d'alta definició, braços articulats i filtres antitremolor, millorant

tant la precisió com l'ergonomia del cirurgia (Advanced Urology Institute, s.d.; Simaan et al., 2015; Lee et al., 2023; Rogowski, 2022).

Altres plataformes emergents inclouen el Versius (CMR Surgical), el Hugo RAS (Medtronic) i el Bitrack (RobSurgical), aquest darrer destacat per la seva flexibilitat i disseny compacte, ideal per espais quirúrgics reduïts (CMR Surgical, 2023; Medtronic, 2025; RobSurgical, 2024).

En conjunt, la tendència és cap a sistemes més modulars, automatitzats i intuïtius (Attanasio et al., 2023; Gruijthuisen et al., 2021), tot i que la seva adopció comporta reptes com el cost i la integració en entorns clínics reals (AQuAS, 2018; Cadena SER, 2025).

2.4. Control per veu en robòtica mèdica

El control per veu en sistemes robòtics consisteix en la interpretació de comandos verbals per part del sistema, mitjançant tecnologies de reconeixement de veu. Aquest tipus d'interacció ha guanyat popularitat en el camp mèdic, especialment en entorns quirúrgics, on permet al cirurgià mantenir la concentració en l'acte operatori mentre controla elements com la càmera laparoscòpica o altres dispositius auxiliars a partir del control per veu (Broderick et al., 2004; Rogowski, 2022).

2.4.1. Funcionament del reconeixement de veu en aplicacions robòtiques

Els sistemes de reconeixement de veu converteixen la veu humana en senyals digitals que poden ser interpretats per un programari. Aquest procés generalment es divideix en diverses fases: captura de l'àudio, processament acústic, reconeixement fonètic i, finalment, interpretació semàntica per convertir la veu en comandes concretes (Jurafsky & Martin, 2023).

En l'àmbit mèdic, aquestes comandes solen estar limitades a ordres específiques, com ara "gira la càmera a l'esquerra" o "acosta la imatge". Aquesta simplicitat afavoreix una major fiabilitat, ja que es redueixen els errors de reconeixement (Zhou et al., 2018). A més, alguns sistemes incorporen funcionalitats d'aprenentatge automàtic per adaptar-se a la veu específica de l'usuari (Hinton et al., 2012).

2.4.2. Avantatges i desavantatges del control per veu

L'ús del control per veu en entorns quirúrgics presenta diversos avantatges que poden millorar significativament l'eficiència i la comoditat del procediment. Un dels beneficis més destacats és la possibilitat de controlar el sistema sense necessitat d'utilitzar les mans, fet que permet al cirurgià mantenir-se completament concentrat en l'acte operatori. Aquesta característica resulta especialment útil durant les intervencions laparoscòpiques, on la precisió i l'estabilitat són fonamentals. A més, el control per veu pot reduir la necessitat de personal auxiliar, ja que elimina la dependència d'un assistent encarregat de manipular la càmera, simplificant així la dinàmica dins del quiròfan i contribuint a una fluïdesa més gran del procediment quirúrgic (Broderick et al., 2004).

D'altra banda, l'aplicació d'aquesta tecnologia també comporta alguns inconvenients. Un dels principals reptes és la possibilitat d'errors de reconeixement, provocats per factors com el soroll ambiental del quiròfan, la variabilitat d'accents entre professionals o la fatiga vocal del cirurgià. A més, en alguns casos pot aparèixer una lleugera latència entre l'emissió de la comanda verbal i la seva execució efectiva per part del sistema, fet que pot afectar la immediatesa del control. Finalment, per garantir una interpretació fiable de les ordres, els sistemes de control per veu acostumen a restringir el nombre de comandes disponibles, la qual cosa pot limitar la flexibilitat i adaptabilitat del sistema durant intervencions complexes (Rogowski, 2022).

2.4.3. Aplicacions en l'àmbit mèdic

El control per veu s'ha utilitzat en sistemes com el AESOP (Automated Endoscopic System for Optimal Positioning), un braç robòtic desenvolupat als anys 90 per l'empresa Computer Motion, que permetia controlar la càmera laparoscòpica amb la veu (Wang & Roe, 2004). Tot i ser un sistema relativament bàsic, va marcar el camí per a futurs desenvolupaments.

Avui dia, alguns sistemes quirúrgics continuen incorporant aquesta funcionalitat, especialment en aplicacions on la precisió del moviment no és tan crítica com la seva estabilitat o posició (Kim & Lee, 2024). També s'explora el seu ús combinat amb interfícies multimodals (veu, gestos i comandaments manuals) per millorar l'eficiència i adaptabilitat dels sistemes robòtics mèdics (Yang et al., 2017).

2.5. El robot Staubli TX60

El Staubli TX60, mostrat a la Figura 2.1., és un robot industrial de sis graus de llibertat, compacte i de gran precisió, àmpliament utilitzat en entorns d'automatització i investigació (RoboDK, s.d.; Robots Done Right, s.d.). Aquest robot destaca per la seva capacitat de realitzar moviments fluids i precisos, amb una estructura de braç articulat que li permet assolir posicions complexes en espais reduïts, fet que el fa especialment adequat per a simulacions de cirurgia mínimament invasiva.

Té una càrrega útil de fins a 3,5 kg i un abast de 670 mm, característiques suficients per a tasques que impliquin la manipulació d'una càmera laparoscòpica durant una intervenció quirúrgica simulada (RoboDK, s.d.; Robots Done Right, s.d.). El robot ofereix un alt grau de repetibilitat (fins a $\pm 0,02$ mm), un aspecte clau per a la precisió exigida en entorns mèdics.

Tot i no estar dissenyat específicament per a ús mèdic, el TX60 és algunes vegades emprat en entorns de recerca en robòtica mèdica, ja que la seva arquitectura permet el desenvolupament de prototips i proves de control avançat, com el control per veu o l'automatització de moviments quirúrgics repetitius (Eurobots, s.d.). A més, és compatible amb sistemes de control que poden ser integrats amb interfícies de reconeixement de veu, fet que obre la porta a explorar nous paradigmes d'interacció en entorns mèdics.



Figura 2.1. Robot Staubli TX-60.

Font: Stäubli Robotics. (s.d.). TX2-60 industrial robot. Recuperat de <https://www.staubli.com/es/es/robotics/productos/robots-industriales/tx2-60.html>

2.6. Moviments robòtics en entorns quirúrgics

En l'àmbit de la cirurgia mínimament invasiva, els moviments del robot han d'adaptar-se a les particularitats de l'entorn quirúrgic. A diferència d'altres aplicacions industrials, en aquest context els moviments han de ser extremadament precisos, fluids i predictibles, ja que es duen a terme dins del cos humà i en proximitat a òrgans vitals (Simaan et al., 2015).

Els tipus de moviments principals inclouen translacions i rotacions que permeten col·locar i orientar correctament la càmera o els instruments quirúrgics dins de la cavitat abdominal. Aquests moviments es veuen condicionats per diverses restriccions físiques i mecàniques, com ara l'espai reduït, la presència d'altres eines quirúrgiques i la necessitat de mantenir la integritat dels teixits (Lee et al., 2023).

Un concepte clau en aquest tipus d'intervencions és el punt de pivot en el trocar. El trocar és l'accés físic a través del qual s'introdueix la càmera laparoscòpica, i el punt de pivot representa el centre de rotació sobre el qual el robot ha de moure l'instrument sense aplicar forces laterals que podrien danyar el pacient. Aquest tipus de moviment, conegut com a "Remote Center of Motion" (RCM), és essencial per garantir la seguretat i l'estabilitat de la intervenció (Simaan et al., 2015; Lee et al., 2023).

Per il·lustrar millor aquest concepte, la Figura 2.2. mostra gràficament el moviment de pivotatge en el trocar.

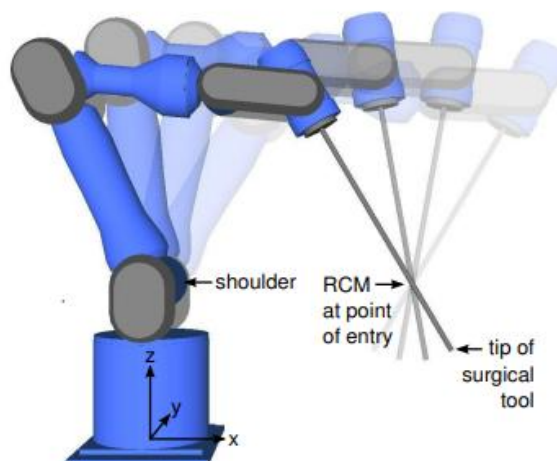


Figura 2.2. Representació esquemàtica del moviment Remote Center of Motion (RCM).

Font: Adaptat de Sun, J., Yan, Z., & Du, Z. (2017). Optimal design of a novel remote center-of-motion mechanism for minimally invasive surgical robot. Recuperat de

https://www.researchgate.net/figure/Remote-Center-of-Motion-RCM_fig1_317554192

2.7. Resum i connexió amb els següents capítols

En aquest capítol s'ha proporcionat els conceptes clau necessaris per entendre el context i els fonaments tecnològics del projecte. S'han exposat els principis bàsics de la cirurgia mínimament invasiva, les diferències respecte a la cirurgia oberta, i la importància de la robòtica en aquest tipus de procediments. També s'ha introduït el model de robot que s'utilitzarà i s'han detallat els moviments específics requerits en entorns quirúrgics, especialment en laparoscòpia.

Aquest coneixement servirà de base per als capítols següents, on es descriurà el desenvolupament del sistema de control, la integració amb el robot i les proves realitzades per validar la solució proposada. Entendre aquests conceptes permetrà al lector seguir amb claredat les decisions de disseny i les implementacions tècniques que configuren el projecte. Per a una visió global del funcionament del sistema desenvolupat, es pot consultar la Figura 2.3, que mostra l'esquema conceptual de funcionament del sistema de control per veu implementat.

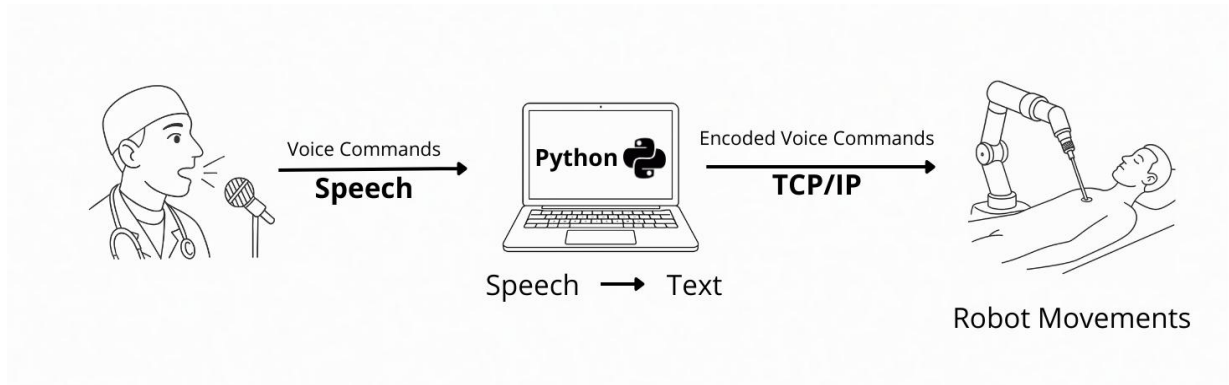


Figura 2.3. Esquema funcional del sistema de control per veu implementat.

El cirurgià dicta ordres que són transcrites a text mitjançant un programa Python (Speech-to-Text) executat en un ordinador. Aquest processa la comanda i l'envia al braç robòtic a través d'una connexió TCP/IP, permetent així controlar els moviments d'un instrument laparoscòpic.

3. ESTUDI DE MERCAT

3.1. Definició de mercat

En les darreres dècades, la robòtica mèdica ha esdevingut un sector clau dins la tecnologia sanitària per la seva capacitat de millorar la precisió quirúrgica, reduir la invasivitat i optimitzar resultats clínics. Aquest creixement respon a factors com l'envelliment poblacional, l'augment de malalties cròniques i la necessitat d'eficiència sanitària (AQuAS, 2018).

Segons MarketsandMarkets (2024), el mercat global (valorat en 13.800 milions de dòlars el 2023) podria assolir els 33.800 milions el 2029, amb un creixement anual del 16,1%. Aquestes dades evidencien que la tecnologia robòtica ja no és un suport addicional, sinó una peça central de la pràctica quirúrgica. A la Figura 3.1 podeu veure una representació visual de l'evolució projectada del mercat de robòtica mèdica.

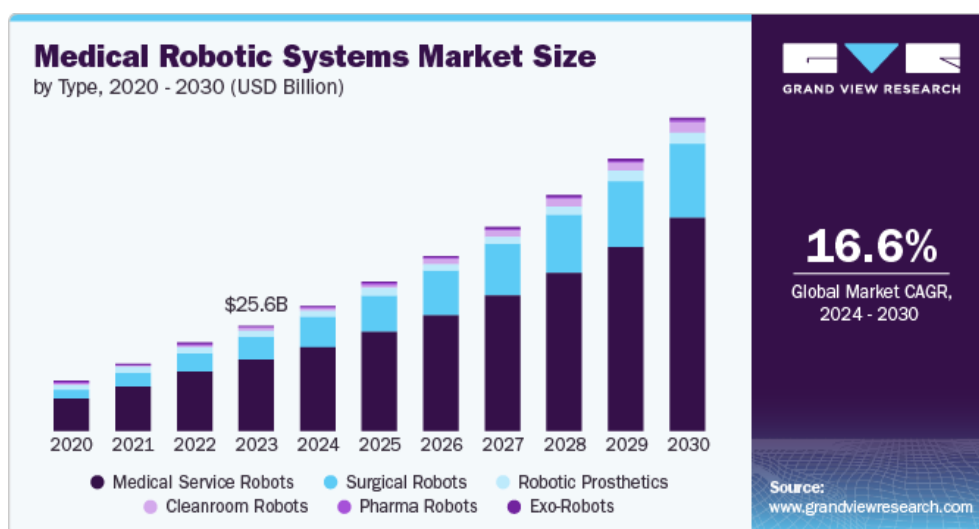


Figura 3.1. Evolució estimada del mercat global de sistemes robòtics mèdics per tipus (2020–2030).

Font: Grand View Research. (2023). *Medical Robotic Systems Market Size & Share Report, 2030*.

Recuperat de <https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/medical-robotic-systems-market>.

Dins d'aquest context, una de les línies d'innovació amb més potencial és la integració d'interfícies naturals com el control per veu. Aquesta tecnologia permet als professionals dirigir determinades funcions del sistema robòtic mitjançant ordres verbals, millorant així l'ergonomia i reduint la necessitat de personal assistent (Rogowski, 2022; Gruijthuisen et al., 2021). L'objectiu no és només facilitar el control directe del cirurgià, sinó també avançar cap a sistemes més autònoms i adaptatius.

A escala de recerca, molts projectes exploren l'ús de robots industrials per simular entorns quirúrgics. Dispositius com el Stäubli TX60, tot i no estar dissenyats específicament per a ús clínic, ofereixen característiques tècniques (com la precisió, la repetibilitat i la compatibilitat amb controladors personalitzat) que els fan especialment adequats per a la fase de desenvolupament i validació de solucions quirúrgiques experimentals (RoboDK, s.d.; Eurobots, s.d.).

Així doncs, el projecte que es presenta en aquest treball se situa en la confluència de tres vectors estratègics: la robòtica industrial de precisió, la incorporació d'interfícies de reconeixement de veu, i la simulació de contextos clínics. Aquest enfocament no només respon a una necessitat tècnica, sinó que s'alinea amb les tendències actuals del mercat mèdic cap a una cirurgia més intel·ligent, àgil i eficient.

3.2. Anàlisi de l'oferta i la demanda

El mercat de la robòtica quirúrgica ha experimentat un creixement significatiu en els darrers anys, amb un augment tant en l'oferta de sistemes com en la demanda per part dels centres sanitaris.

En termes d'oferta, el sistema Da Vinci d'Intuitive Surgical continua liderant el mercat, amb una base instal·lada de 10.189 sistemes a nivell mundial al primer trimestre de 2025, representant un increment del 14,65% respecte a l'any anterior (Intuitive Surgical Inc., 2025). Aquest creixement reflecteix la confiança continuada dels professionals mèdics en la tecnologia robòtica per millorar la precisió i l'eficiència dels procediments quirúrgics.

Altres empreses també han ampliat la seva presència en el mercat. CMR Surgical, per exemple, ha augmentat la seva base instal·lada del sistema Versius en més d'un 50% durant el 2023, superant les 140 instal·lacions a nivell mundial (CMR Surgical, 2024a). Aquest creixement s'ha vist impulsat per una expansió en nous mercats i una adopció creixent en diverses especialitats quirúrgiques.

Una de les iniciatives destacades a nivell local és RobSurgical, una empresa catalana de robòtica mèdica fundada per la Dra. Àlicia Casals i el Dr. Josep Amat, vinculats a la Universitat Politècnica de Catalunya (UPC). RobSurgical ha desenvolupat el sistema Bitrack, un robot quirúrgic dissenyat per oferir una alternativa més accessible i modular a les plataformes existents com Da Vinci. El sistema Bitrack destaca per la seva precisió, adaptabilitat i per ser compatible amb els estàndards de la cirurgia mínimament invasiva. A més, representa un

projecte estratègic dins l'ecosistema tecnològic català, combinant recerca acadèmica amb transferència industrial (RobSurgical, 2024).

Pel que fa a la demanda, factors com l'envelliment de la població, l'augment de les malalties cròniques i la necessitat de procediments menys invasius han contribuït a una major adopció de la cirurgia robòtica. A més, la pandèmia de la COVID-19 ha accelerat la implementació de tecnologies que permeten reduir el contacte físic, com els sistemes de control per veu, que ofereixen als cirurgians una major autonomia i minimitzen la dependència d'assistents per al control de la càmera durant les intervencions (Medtronic, 2021).

Aquest projecte es posiciona en la confluència d'aquestes tendències, proposant un sistema que integra el control per veu amb un braç robòtic industrial per simular un assistent quirúrgic autònom. Aquesta solució respon a la demanda creixent de tecnologies que millorin l'ergonomia i l'eficiència en l'entorn quirúrgic, alhora que aprofita l'oferta existent de robots industrials adaptats a aplicacions mèdiques.

3.3. Preus i canals de distribució

El cost d'un sistema robòtic quirúrgic pot variar considerablement en funció del fabricant, la configuració i els serveis associats. Per exemple, el sistema Da Vinci d'Intuitive Surgical presenta un preu d'adquisició que oscil·la entre 1 i 2,5 milions de dòlars, a més d'un cost anual de manteniment que pot superar els 100.000 dòlars (Baylor College of Medicine, 2024). A aquestes despeses s'hi ha de sumar el cost per intervenció, que inclou instruments d'un sol ús i accessoris, amb una mitjana estimada de 1.866 dòlars per procediment (JAMA, 2018).

Aquestes xifres suposen una barrera important per a la implementació d'aquests sistemes en centres hospitalaris amb recursos limitats, especialment en sistemes de salut públics. Davant d'aquest escenari, han sorgit alternatives més assequibles, com l'ús de braços robòtics industrials que, tot i no estar homologats per a ús clínic, resulten útils en contextos de simulació, desenvolupament i entrenament. Segons Grand View Research (2023), l'interès pel desenvolupament de solucions mèdiques més accessibles ha impulsat l'adaptació de tecnologia robòtica industrial en entorns mèdics de recerca i formació.

Pel que fa als canals de distribució, els fabricants de sistemes robòtics mèdics solen operar amb vendes directes a hospitals o institucions, complementades amb opcions de lloguer o finançament. Paral·lelament, distribuïdors especialitzats, tant a nivell nacional com internacional, faciliten l'accés a equips reconcondicionats o modulars, especialment en mercats emergents o amb infraestructures limitades.

En aquest context, el sistema desenvolupat en aquest projecte representa una alternativa tècnica viable i econòmica. Aquesta solució esdevé especialment útil per a entorns de recerca, simulació quirúrgica i docència, on l'objectiu és validar interfícies d'interacció i fluxos de control abans d'un eventual trasllat clínic.

3.4. Anàlisi de la competència

El mercat de la robòtica quirúrgica continua liderat per Intuitive Surgical, que manté una quota global propera al 60%. La seva plataforma da Vinci, amb més de 8.000 sistemes instal·lats i més de 14 milions de procediments realitzats, és actualment el sistema més estès en cirurgia mínimament invasiva (Intuitive Surgical, 2025a). Aquesta empresa ha diversificat la seva oferta amb sistemes com el da Vinci Xi, que ofereix accés anatòmic ampliat i major flexibilitat, el da Vinci X, més assequible i modular, i el da Vinci SP, dissenyat per a cirurgia per un sol port. També ha desenvolupat la plataforma Ion, destinada a biòpsies pulmonars robotitzades (Intuitive Surgical, 2025b; Intuitive Surgical, 2025c; Intuitive Surgical, 2025d).

Un altre actor destacat és Medtronic, que ha desenvolupat el sistema Hugo RAS, un robot quirúrgic modular i obert que va rebre l'aprovació de la FDA l'any 2024 per a procediments urològics. Aquesta plataforma busca competir directament amb da Vinci oferint una opció més flexible i competitiva econòmicament (Medtronic, 2025). A més, la seva adquisició de Mazor Robotics ha reforçat la seva posició en cirurgia espinal assistida per robot.

També destaca CMR Surgical, una empresa britànica que ha desenvolupat el sistema Versius, caracteritzat per la seva modularitat, portabilitat i una interfície d'usuari senzilla. Versius ha estat autoritzat per la FDA per a múltiples procediments i ja acumula més de 27.000 intervencions a nivell mundial (CMR Surgical, 2024b).

Altres competidors en fase de desenvolupament inclouen Johnson & Johnson, amb el sistema Ottava (amb llançament previst el 2026), així com empreses com Stryker, Globus Medical i Karl Storz, que ofereixen solucions robòtiques adaptades a especialitats com la cirurgia ortopèdica, l'espinal i l'endoscòpica (GU Oncology Now, 2023).

A escala local, destaca RobSurgical, una spin-off catalana sorgida de la Universitat Politècnica de Catalunya (UPC) que ha desenvolupat el robot quirúrgic Bitrack. Aquesta plataforma aposta per una arquitectura oberta i compacta que facilita la integració en quiròfans moderns i redueix la barrera d'accés a la cirurgia robòtica. Amb un enfocament en la precisió i l'eficiència, Bitrack busca competir oferint una alternativa més assequible i flexible per a hospitals que no poden assumir el cost de plataformes consolidades com Da Vinci

(RobSurgical, 2024). A la Taula 3.1. podeu veure una taula comparativa amb tota la competència que s'ha comentat durant el capítol.

Aquest escenari posa de manifest una clara tendència cap a la diversificació tecnològica: sistemes més modulars, enfocats a reduir costos, i cada cop més orientats a integrar tecnologies avançades com la intel·ligència artificial o el reconeixement de veu. El sistema proposat en aquest projecte se situa dins d'aquestes línies d'innovació, com a alternativa econòmica i adaptable en entorns de recerca i simulació quirúrgica.

Sistema	Empresa	Modularitat	Any llançament	Cost aproximat	Homologació (FDA/CE)	Notes destacades
Da Vinci Xi	Intuitive Surgical	No (config. tancada)	2014	1–2,5 M USD + manteniment	Sí (FDA i CE)	Sistema líder amb més de 8.000 unitats
Versius	CMR Surgical	Sí (modular i portàtil)	2019	<1,5 M USD (estimació)	Sí (FDA des de 2024)	Enfocat a flexibilitat i fàcil adopció
Hugo RAS	Medtronic	Sí (modular)	2021	No públic (inferior a Da Vinci)	Sí (FDA per urologia 2024)	Integració amb sistemes d'imatge
Bitrack	RobSurgical (UPC)	Sí (arquitectura oberta)	En desenvolupament avançat	No públic (cost més assequible)	En procés de regulació (CE)	Desenvolupat a Catalunya per la UPC

Taula 3.1. Comparativa de sistemes robòtics quirúrgics.

Font: Intuitive Surgical (2025b), CMR Surgical (2024c), Medtronic (2025), RobSurgical (2024).

3.5. Necessitats dels usuaris

Amb la creixent adopció de sistemes robòtics en cirurgia, també ha augmentat la necessitat de programes de formació eficaços per garantir una adquisició de competències tècniques segures i eficients. Una de les eines més rellevants en aquest camp és la simulació quirúrgica. En un estudi clínic aleatoritzat publicat a *European Urology*, Aydin et al. (2022) van demostrar que la formació basada en simuladors robòtics millora significativament les habilitats tècniques

dels cirurgians i pot contribuir a una reducció de les complicacions quirúrgiques en pacients reals.

A banda de les necessitats formatives, els professionals també expressen la demanda de sistemes més intuïtius i eficients durant les intervencions. Com exposa Rogowski (2022) en un article publicat a *Sensors*, que ja s'ha mencionat algun cop en aquest treball, les interfícies de control per veu poden reduir la dependència d'assistents en tasques auxiliars, com ara el moviment de la càmera laparoscòpica, fet que contribueix a millorar l'ergonomia del procediment i la fluïdesa del treball quirúrgic.

Aquest projecte respon a aquestes dues necessitats integrant un braç robòtic industrial amb una interfície vocal senzilla, flexible i assequible. Aquesta proposta permet implementar un entorn de pràctica controlat, adequat tant per a formació com per a simulació de nous paradigmes d'interacció home-robot en cirurgia.

3.6. Components i materials necessaris

Per al desenvolupament d'aquest projecte, s'han seleccionat components tant de tipus industrial com de programari, amb l'objectiu de construir una plataforma funcional, assequible i adaptable a entorns de recerca i simulació mèdica.

3.6.1. Braç robòtic

Per a aquest projecte s'ha utilitzat el Stäubli TX60, un braç robòtic industrial ja descrit en apartats anteriors. En aquest cas, el robot s'utilitza per simular el comportament d'un assistent quirúrgic, concretament el moviment d'una càmera laparoscòpica durant una intervenció. La seva precisió i flexibilitat de moviment el fan especialment adequat per executar ordres simples de posicionament en un entorn de simulació. A més, l'elecció d'aquest model també respon a criteris de disponibilitat, ja que es tracta d'un dels robots que es troben físicament al laboratori de robòtica del centre, fet que n'ha facilitat la integració i les proves experimentals.

A través de la programació en llenguatge VAL3, el robot pot respondre en temps real a instruccions enviades des del sistema de reconeixement de veu, reproduint així accions com elevar, baixar o centrar el camp visual. Tot i que el TX60 no està dissenyat per a ús clínic directe, la seva arquitectura facilita el desenvolupament i testatge d'interfícies d'interacció com la implementada en aquest projecte (Eurobots, s.d.).

3.6.2. Sistema de captació i reconeixement de veu

La interacció entre l'usuari i el sistema es realitza mitjançant comandes verbals, que es capturen a través d'un micròfon connectat a un ordinador. Aquest micròfon recull la veu del cirurgià o usuari i l'envia al programari encarregat del reconeixement de veu.

Per al processament de l'àudio s'ha utilitzat un script desenvolupat en Python, que fa ús de la biblioteca "speech_recognition". Aquesta eina permet capturar l'àudio i convertir-lo a text mitjançant l'API de Google Speech-to-Text, un servei en línia que ofereix una transcripció precisa i ràpida de la veu humana.

Quan l'usuari pronuncia una ordre com "entra" o "surt", el sistema reconeix la frase i la converteix automàticament en una cadena de text. A continuació, aquest text es compara amb una llista d'instruccions predefinides i, si coincideix amb una comanda vàlida, s'activa el mecanisme de comunicació amb el robot.

Aquest sistema permet un reconeixement vocal senzill però efectiu, adaptat a entorns de simulació controlats, on no hi ha soroll quirúrgic real ni interferències ambientals que puguin comprometre l'eficàcia de la transcripció.

3.6.3. Interfície de control i comunicació

Un cop l'ordre verbal ha estat reconeguda i convertida a text, el sistema ha de transmetre aquesta informació al robot perquè aquest pugui executar el moviment corresponent. Aquesta transmissió es realitza mitjançant una connexió per sockets TCP/IP, que permet l'intercanvi de dades entre l'ordinador (on s'executa el reconeixement de veu) i el controlador del braç robòtic.

La comunicació TCP/IP segueix un esquema client-servidor. L'ordinador actua com a client, encarregat d'establir la connexió i enviar els missatges; mentre que el robot, mitjançant un programa escrit en llenguatge VAL3, actua com a servidor, preparat per rebre i interpretar les comandes.

Cada vegada que l'usuari pronuncia una ordre vàlida (per exemple, "entra"), el programa en Python envia aquesta comanda codificada al robot. En aquest cas, "entra" es transmet com "I" (de l'anglès *IN*), segons el sistema d'abreviacions establert. El robot, que es manté en

espera contínua de noves instruccions a través de la connexió oberta, rep aquest text i el compara amb una taula de comandes predefinides.

Un cop reconeguda la instrucció, s'executa el moviment associat: aquest pot ser una acció d'entrada o sortida, o bé un moviment de pivotació. Aquesta lògica de control, implementada en VAL3, permet una resposta ràpida, fiable i adaptada a les necessitats d'un entorn de simulació.

Aquest sistema de comunicació permet una interacció en temps real entre l'usuari i el robot, basada en ordres senzilles i fàcilment ampliables. A més, el disseny modular del protocol facilita la seva adaptació a futurs escenaris quirúrgics amb major complexitat.

3.6.4. Estructura i entorn de simulació

Tot i que el sistema no s'ha integrat en un entorn quirúrgic real, s'ha dissenyat una simulació funcional que reproduïx de manera acurada les condicions bàsiques d'una intervenció laparoscòpica. L'objectiu és validar el funcionament del sistema de control per veu i observar com respon el braç robòtic davant d'ordres orals senzilles.

Per fer-ho, es va preparar una estructura física on el robot actua sobre una àrea de treball que simula el moviment d'una càmera endoscòpica. La base de l'escenari inclou un punt fix que representa el Remote Center of Motion (RCM), un concepte fonamental en cirurgia mínimament invasiva que assegura que els moviments de la càmera es facin pivotant des d'un únic punt d'entrada, com seria un trocar.

L'usuari pot pronunciar ordres i el robot respon de manera immediata, executant el moviment associat. A més, el sistema permet observar la precisió del braç i validar el flux complet de reconeixement de veu, comunicació i acció robòtica en un entorn controlat.

Aquest tipus de simulació no només permet provar el sistema de manera segura i eficient, sinó que també facilita futures ampliacions, com la integració de nous sensors, ordres addicionals o interfícies de feedback visual. En definitiva, l'entorn de simulació serveix com a banc de proves per a validar el concepte i assentar les bases per a aplicacions més avançades en l'àmbit mèdic i educatiu.

Per a una visió global del funcionament del sistema desenvolupat, es pot consultar l'esquema conceptual presentat a la Figura 2.3, on es mostra el flux d'interacció entre el cirurgià, el sistema de reconeixement de veu i el braç robòtic.

4. NORMATIVA I ASPECTES LEGALS

Tot i que aquest projecte no s'ha desenvolupat en un entorn clínic real ni implica el tractament amb pacients, és important tenir en compte algunes normatives i aspectes legals que serien aplicables si en un futur es volgués portar aquest sistema a un ús sanitari.

4.1. Normativa sobre dispositius mèdics

Els aparells que s'utilitzen en l'àmbit mèdic estan regulats pel *Reglament (UE) 2017/745 del Parlament Europeu i del Consell*, relatiu als productes sanitaris. Aquesta normativa estableix els requisits que han de complir els dispositius pel que fa a seguretat, qualitat i documentació per poder-se comercialitzar dins la Unió Europea. En aquest sentit, els robots quirúrgics com el Da Vinci es consideren dispositius complexos, de classe IIb o III, i han de passar controls molt estrictes.

En el cas d'aquest projecte, però, no s'utilitza un robot dissenyat per a ús mèdic, sinó un robot industrial (Stäubli TX60), i el seu ús es limita a una simulació en un entorn de recerca. Per tant, no li és aplicable aquesta normativa. Ara bé, si aquest sistema es volgués fer servir en un quiròfan real, caldria adaptar-lo a la regulació, aconseguir el marcatge CE i passar les proves necessàries per garantir-ne la seguretat.

4.2. Protecció de dades i reconeixement de veu

El sistema fa servir comandes de veu que són reconegudes mitjançant l'API de Google. Tot i que en aquest cas no es recull informació personal ni es guarda cap dada, el reconeixement de veu podria comportar el tractament de dades personals si s'utilitzés en un entorn mèdic real.

Segons el *Reglament general de protecció de dades (RGPD)* —Reglament (UE) 2016/679— i la *Llei orgànica 3/2018, de protecció de dades personals i garantia dels drets digitals (LOPDGDD)*, qualsevol informació que permeti identificar una persona (com la veu) ha de ser tractada amb garanties de seguretat. En aquest cas, si el sistema s'utilitzés amb professionals mèdics o pacients, caldria informar-los, demanar el seu consentiment i assegurar que les dades es tracten de forma segura.

Per minimitzar riscos, en un escenari real seria més segur utilitzar sistemes de reconeixement local (que no enviïn la veu a servidors externs) o protegir la connexió mitjançant encriptació.

4.3. Consideracions ètiques

Aquest projecte s'ha desenvolupat íntegrament en un entorn simulat, sense la participació de persones ni l'ús de dades mèdiques reals. Per aquest motiu, no ha estat necessari demanar autorització a cap comitè d'ètica.

Ara bé, si en un futur es vol fer alguna prova amb professionals sanitaris o pacients, caldria tramitar l'aprovació del comitè d'ètica corresponent i garantir que es respecten tots els drets de les persones participants, inclòs el consentiment informat.

En definitiva, encara que aquest projecte es desenvolupa en un entorn segur i simulat, s'han tingut en compte els marcs legals i normatius que serien aplicables en un context real, assegurant així la viabilitat futura del sistema dins del sector mèdic.

5. CONCEPTE D'ENGINYERIA

Aquest capítol descriu la solució d'enginyeria implementada per controlar els moviments d'un braç robòtic de manera segura i precisa a partir d'ordres externes. Es detalla el funcionament del sistema, l'estructura del codi, les variables utilitzades i la lògica de decisió que permet executar translacions i pivotacions entorn d'un punt fixat al trocar. El sistema ha estat dissenyat per operar tant en mode manual (botons físics) com en mode automatitzat (control remot via socket), integrant funcionalitats com el càlcul dinàmic de trajectòries i l'adaptació a l'espai quirúrgic mitjançant marcs de referència locals.

Les decisions tècniques s'han basat en criteris de seguretat, modularitat i adaptabilitat, i es detallen a continuació juntament amb els elements fonamentals que en permeten el funcionament. Els càlculs geomètrics i justificacions associades es poden consultar a l'Annex F.

5.1. Conceptes tècnics específics

Abans de descriure la lògica funcional del sistema i el codi font implementat, es presenten alguns conceptes tècnics propis de la robòtica industrial i del llenguatge de programació VAL3 que són essencials per entendre el desenvolupament d'aquest projecte.

- Tool (eina): una tool defineix la posició i orientació relativa de l'eina física respecte al flange del robot. Aquesta definició permet que el robot pugui calcular amb precisió els moviments de l'extrem del braç. En aquest projecte, s'han utilitzat dues eines:
 - *tPunxa*: una eina genèrica.
 - *tPivot*: una eina definida específicament per pivotar sobre el trocar, amb el seu origen situat en el punt d'inserció quirúrgic.
- Flange: és la part final del braç robòtic, també anomenada brida de muntatge, on s'acobla l'eina (end-effector). És el punt de referència final per als moviments del robot i s'utilitza com a base per definir la tool.
- Frames de referència: els frames o marcs de coordenades defineixen sistemes de referència locals dins de l'espai de treball. Permeten al robot interpretar posicions i orientacions en relació amb diferents entorns. En aquest projecte s'utilitzen:
 - *world*: sistema de coordenades global del robot.
 - *fPacient*: sistema local definit per simular l'espai quirúrgic del pacient, facilitant els moviments en relació amb la cavitat abdominal.
- Remote Center of Motion (RCM): concepte fonamental en cirurgia mínimament invasiva. Representa un punt fix a l'espai (el trocar) al voltant del qual ha de pivotar l'eina quirúrgica. El robot ha de mantenir aquest punt fixat mentre canvia l'orientació, evitant així aplicar forces laterals o causar danys als teixits. En aquest projecte, la implementació del RCM s'ha realitzat mitjançant actualitzacions dinàmiques de la tool i càlculs de pivotatge actiu.
- Socket TCP/IP: el sistema de comunicació entre l'ordinador que reconeix la veu i el robot es basa en sockets TCP/IP. L'ordinador client envia comandes codificades com cadenes de text al robot, que actua com a servidor i les interpreta per executar moviments.

El concepte de Remote Center of Motion (RCM), fonamental per garantir la seguretat en cirurgia mínimament invasiva, es pot visualitzar esquemàticament a la Figura 2.2.

Per altra banda, l'esquema general del sistema de control, amb les connexions entre veu, client Python i robot, s'aprecia a la Figura 2.3.

Aquest conjunt de conceptes proporciona la base per entendre les estratègies de control i programació que es descriuen a continuació, així com les decisions de disseny adoptades per garantir la seguretat, la precisió i l'eficiència del sistema.

5.2. Estructura general i estratègia de control

Un cop repassats els conceptes bàsics, anem a parlar del sistema utilitzat en aquest projecte. Aquest sistema es basa en una arquitectura modular formada per diferents fitxers en llenguatge VAL3 que s'encarreguen de les fases de configuració inicial, execució del bucle de control, i retorn a l'estat segur. La seva execució està condicionada per una variable *verbose*, que determina si el sistema utilitza entrades locals (botons físics) o entrades remotes (via socket des d'un client Python).

Els principals fitxers que componen l'aplicació són:

- `start.pgx`: configuració inicial del robot, incloent velocitats, eines i posicions de treball.
- `mainApp.pgx`: lògica de control principal amb recepció de comandes per socket.
- `ButtonsApp.pgx`: versió alternativa per control manual mitjançant botons físics.
- `stop.pgx`: rutina de finalització amb retorn a posició inicial i tancament de processos.

El robot executa moviments de translació o rotació a partir de comandes simples interpretades en temps real, garantint en tot moment que la punta de l'instrument es manté centrada al punt d'inserció (pivotatge actiu sobre el trocar).

5.3. Modes de funcionament

5.3.1. Mode manual (*verbose = false*)

En aquest mode, el robot reacciona a l'estat de quatre botons físics connectats a les entrades digitals `dPB[0–3]`. Cada botó activa una acció diferent:

- Botó 0: entrar (translació cap a dins)
- Botó 1: sortir (translació cap a fora)
- Botó 2: pivotar a l'esquerra
- Botó 3: tornar a home

Com podeu veure, només tenim 4 botons i volem fer 5 moviments (entrar, sortir, pivotar als dos costats i tornar a home), per això en el codi he deixat un condicional on només entraria en rebre una comanda per socket degut a aquesta falta d'un cinquè botó. Així doncs, en cas que es vulguessin canviar entre quins moviments es volen provar només s'ha de fer una petita adaptació al codi per arreglar-ho.

Els LEDS associats (*dLed[0–3]*) s'activen mentre el moviment és en curs. Aquesta versió del sistema és útil per a proves locals i verificació del moviment bàsic.

5.3.2. Mode control remot (*verbose = true*)

En mode remot, el robot actua com a servidor TCP/IP i espera rebre comandes numèriques (entre "0" i "4") enviades des d'un ordinador connectat a la xarxa local. Aquesta comunicació s'ha implementat mitjançant un script en Python que integra reconeixement de veu amb la biblioteca *speech_recognition*.

El funcionament detallat d'aquest script es descriu a l'últim apartat del capítol 6, ja que correspon a la prova final integrada del sistema.

El codi client, escrit en Python, pot estar basat en entrada per teclat o bé en reconeixement de veu (versió definitiva del sistema), mitjançant la biblioteca *speech_recognition*. Un cop reconeguda l'ordre vocal (ex. "entra", "sur"), aquesta es mapeja a una comanda numèrica equivalent i s'envia per socket al robot.

5.4. Variables i configuració del sistema

5.4.1. Posicions i trajectòries

- *jHome*: posició de seguretat inicial i final.
- *jWork*: punt intermedi a prop del trocar.
- *pInsercio[0]*: posició fixada com a centre del trocar.
- *pInsercio[1]*: posició actualitzada en temps real amb *here(...)*.

5.4.2. Velocitats

- *velRapida*: per a desplaçaments entre punts generals.

- *vellenta*: per a accions quirúrgiques de precisió.

5.4.3. Paràmetres de moviment

- *nMilimetres* = 3.54: distància de translació per comanda.
- *nGraus* = 5: increment angular per pivotatge.

5.4.4. Eines i referències

- *tPunxa*: eina general.
- *tPivot*: eina amb origen sobre el trocar, utilitzada per pivotar.
- *fPacient*: frame de treball definit per simular el context quirúrgic.
- *world*: sistema global.

5.4.5. Comunicació i flux de dades

- *socketVoice*: canal de comunicació TCP/IP.
- *command*: variable de cadena on es desa la comanda rebuda.
- *buffer*: vector per reconstruir la comanda byte a byte.

5.4.6. Altres variables i recursos del sistema

A continuació es recullen altres variables i recursos utilitzats pel sistema de control. Aquestes variables no formen part directa de la definició de trajectòries ni eines, però són imprescindibles per al control del flux de dades, l'interfície d'usuari i la gestió de la comunicació entre dispositius:

- *voice_send* i *voice_server*: sockets declarats a la biblioteca io, que s'utilitzen per establir la comunicació TCP/IP entre el robot (servidor) i el client Python (usuari o sistema de reconeixement de veu).

Aquestes variables s'han de declarar manualment des de la consola del robot mitjançant l'explorador de cel·la (Cell Browser).

- *voice_send* s'utilitza com a client per enviar dades, i requereix definir l'adreça IP i el port del dispositiu de destí.

- *voice_server* actua com a servidor d'escolta, i només necessita el port local pel qual rebrà les connexions entrants.
- *verbose*: variable booleana que determina el mode de funcionament del sistema. Si és false, el robot espera comandes dels botons físics; si és true, activa la recepció de comandes remotes via socket.
- *dPB[0–3]*: vector de variables que conté l'estat dels botons físics connectats a les entrades digitals del robot. S'utilitzen en mode manual per iniciar translacions o rotacions.
- *dLed[0–3]*: vector de sortides digitals associades als LEDS indicadors. Aquests s'activen durant l'execució de cada moviment com a feedback visual.
- *idx* i *nData*: variables temporals utilitzades per llegir i reconstruir la comanda rebuda via socket byte a byte. *nData* representa la longitud del buffer i *idx* l'índex actual de lectura.
- *pCalFrame*: posició auxiliar emprada durant l'etapa de calibratge per definir la relació entre el robot i el sistema de coordenades del pacient (*fPacient*).

5.5. Funcionament detallat del bucle de control (VAL3)

Després d'inicialitzar el sistema i posicionar el robot sobre el trocar (*pInsercio[0]*), s'inicia un bucle de control que s'executa mentre no es rebí una comanda de finalització. Aquest bucle és comú tant en el mode manual (botons físics) com en el mode remot (control per socket) i permet controlar el robot en temps real segons les comandes rebudes.

La seqüència de funcionament és la següent:

1. Entrada a la zona quirúrgica: el robot es desplaça primer a una posició elevada per sobre del punt d'inserció (*jWork*), després baixa verticalment fins a *pInsercio[0]*, i finalment s'ajusta la tool *tPivot[1]* per iniciar el pivotatge sobre el trocar.
2. Inicialització de la posició activa: es copia la transformació de *pInsercio[0]* a *pInsercio[1]*, que serà la posició que s'actualitzarà dinàmicament durant l'execució del bucle.
3. Lectura i reconstrucció de comandes: es llegeixen els bytes rebuts via socket o es consulta l'estat dels botons físics. Les comandes es representen com a cadenes de text (command) que s'interpreten per decidir l'acció del robot.
4. Interpretació i execució de la comanda:

- "0": translació cap a dins (entrada).
 - "1": translació cap a fora (sortida).
 - "2": rotació positiva sobre l'eix Y (pivotatge cap a l'esquerra del pacient).
 - "3": rotació negativa sobre l'eix Y (pivotatge cap a la dreta del pacient).
 - "4": finalització del bucle i retorn a la posició *HOME*.
5. Les translacions simulen l'avanç o retrocés de l'instrument pel trocar, modificant les coordenades X i Y per mantenir una trajectòria recta. Les pivotacions es fan sobre l'eix Y del frame del pacient(*fPacient*) mantenint fix el punt d'inserció mitjançant l'actualització de la posició *here(...)* i l'ajust únic de l'angle *ry*.
6. Execució sincronitzada: cada moviment s'executa amb *move(...)* i s'espera la seva finalització amb *waitEndMove()* abans de processar noves ordres.
7. Retorn a l'estat segur: en finalitzar el bucle, el robot retorna a la posició d'origen sobre el trocar i es desplaça cap enrere a una posició elevada(*jWork*) per finalitzar el cicle amb seguretat.

Aquest bucle constitueix el nucli del control del sistema, adaptable tant per proves locals amb botons com per control remot mitjançant veu o teclat.

Comanda/Ordre	Resposta del robot
<i>command</i> ="0" o primer botó (<i>dPB[0]=true</i>)	Translació cap a dins del pacient (entrada)
<i>command</i> ="1" o segon botó (<i>dPB[1]=true</i>)	Translació cap a fora del pacient (sortida)
<i>command</i> ="2" o tercer botó (<i>dPB[2]=true</i>)	Rotació cap a l'esquerra del pacient
<i>command</i> ="3"	Rotació cap a la dreta del pacient
<i>command</i> ="4" o quart botó (<i>dPB[3]=true</i>)	Tornada a la posició <i>HOME</i>

Taula 5.1. Correspondència entre ordres rebudes pel robot i moviments executats per aquest

Per tal de mostrar el funcionament complet del sistema de control per veu, s'ha enregistrat un vídeo demostratiu disponible al repositori del projecte. Aquest vídeo mostra com l'usuari dona

ordres verbals que són interpretades pel sistema, i com el robot les executa de forma immediata i coherent.

Vídeo: Funcionament del bucle de control amb comandes de veu
Disponible a: https://github.com/gerardtorrasc/TFG_Voice_Robot/tree/main/media

D'altra banda, a la Figura 5.1 es pot observar una captura del sistema en funcionament, on es mostra la comunicació entre el client Python (a l'ordinador) i el robot, mitjançant comandes verbals. L'usuari emet ordres de veu com “entra”, “dreta” o “surt”, que el client tradueix en comandes numèriques que s'envien per socket al robot. Aquest, al seu torn, les interpreta i executa, mostrant el moviment per pantalla en temps real (ex. *Entrant, Pivotant a la dreta del pacient*, etc.).

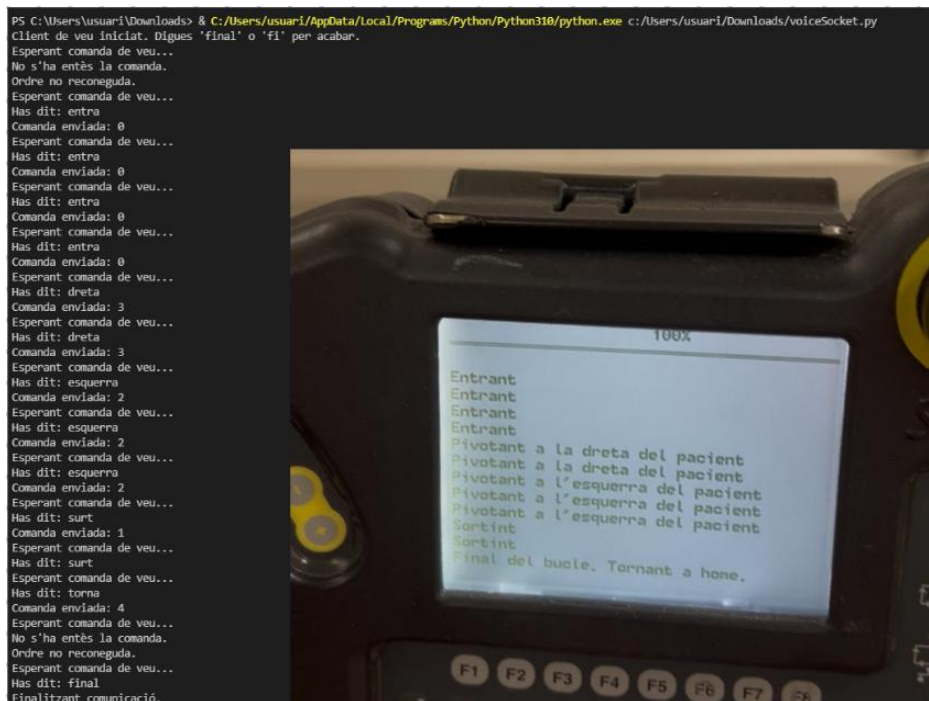


Figura 5.1. Comunicació en temps real entre el client Python amb reconeixement de veu i el robot Stäubli.

A l'esquerra, el terminal de l'ordinador que interpreta i envia comandes per socket; a la dreta, la pantalla del robot mostra l'execució de les ordres en temps real

Aquest capítol ha presentat de manera clara i ordenada la solució tècnica implementada per al control robòtic d'un instrument quirúrgic auxiliar mitjançant ordres de veu. S'han descrit tots

els components essencials del sistema: concepte tècnic, estructura de programació, modes de funcionament, flux de dades i control dinàmic.

Tota la informació exposada permet que qualsevol professional amb coneixements en programació robòtica i control de sistemes pugui reproduir el funcionament del prototip.

Els càlculs detallats, els esquemes de posicionament i els codis complets es poden consultar als annexos F i B respectivament.

Pel que fa al codi Python del client TCP/IP amb reconeixement de veu, com s'ha comentat durant aquest capítol, s'ha optat per no repetir-ne la descripció aquí, ja que es tracta del mateix codi utilitzat en la prova final del sistema. Aquest s'explica detalladament a l'últim apartat del capítol 6.

6. IMPLEMENTACIÓ I RESULTATS

Aquest capítol descriu el procés d'implementació progressiva i validació funcional del sistema desenvolupat per al control d'un instrument quirúrgic auxiliar mitjançant comandes de veu. L'objectiu principal ha estat verificar la viabilitat tècnica de cada component (reconeixement de veu, transmissió de dades, control robòtic i integració final) en un entorn de simulació quirúrgica.

Les proves es presenten de forma estructurada i cronològica, començant per la conversió d'ordres vocals a text, la comunicació per sockets TCP/IP i la transmissió d'ordres estructurades, fins a la resposta del robot industrial Stäubli TX60 mitjançant moviments precisos. També s'han dut a terme proves mitjançant botons físics i pivotatge dinàmic per simular condicions reals en laparoscòpia, culminant en una versió funcional integrada del sistema.

Els resultats obtinguts mostren una resposta fiable i coherent en cada etapa, validant tant la precisió dels moviments com la robustesa de la comunicació. El sistema queda així preparat per a futurs entorns d'assaig més complexos o clínics, un cop finalitzada la validació en simulació.

6.1. Prova inicial de reconeixement de veu

La primera validació del sistema va consistir en captar una ordre vocal en català, convertir-la a text mitjançant l'API de Google Speech-to-Text i extreure'n l'acció i la quantitat de moviment. L'objectiu era comprovar que frases com “*baixa cinc centímetres*” es podien interpretar correctament i traduir a accions processables.

Per fer-ho, es va implementar l'script “ProvaVeuAText.py”, que incorpora:

- Un diccionari per convertir paraules numèriques (ex. “cinc”) a valors enters.
- Una expressió regular per identificar patrons d'ordre: acció + quantitat [+ unitat].

A la Figura 6.1 es mostra una execució típica, on es reconeix l'ordre de veu i es transforma automàticament a text numèric interpretat per l'algoritme.

```
Escoltant (en català)...
Ordre reconeguda: baixa cinc centímetres
Text convertit: baixa 5 centímetres
Acció detectada: baixa
Distància detectada: 5 centímetres
```

Figura 6.1. Resultat de la prova de reconeixement de veu: extracció d'acció i distància a partir d'una comanda vocal.

El sistema va funcionar correctament amb ordres simples i clares. Es van detectar alguns límits en la reconeixença de paraules en presència de soroll ambiental, però es va considerar una base sòlida per a la integració vocal amb el sistema de control.

6.2. Prova de comunicació entre dos ordinadors

Un cop validat el reconeixement de veu, es va realitzar una prova de comunicació per sockets TCP/IP entre dos ordinadors, amb l'objectiu de garantir una transmissió fiable de dades.

Els scripts utilitzats van ser “ProvaSocketServer.py” i “ProvaSocketClient.py”, escrits en Python. El servidor escoltava connexions a la IP local 192.168.1.147, obtinguda mitjançant l'ordre ipconfig a la consola de Windows, i al port 65432, triat dins del rang lliure (>1024) per evitar conflictes amb serveis reservats.

El client enviava el dígit "1" com a byte, i el servidor confirmava la recepció. A les figures 6.2 i 6.3 es mostra la sortida per consola de tots dos dispositius durant la prova.

```
Servidor escoltant a 192.168.1.147:65432...
Connectat per ('192.168.1.139', 54012)
Rebut: 1
```

Figura 6.2. Missatge del servidor indicant connexió establerta i recepció de dades.

```
Dígit enviat: 1
```

Figura 6.3. Missatge del client confirmant l'enviament del dígit 1.

Aquesta prova va confirmar el funcionament estable del canal TCP/IP, establint una base sòlida per a l'enviament d'ordres estructurades.

6.3. Enviament d'ordres estructurades per consola

Després de validar la comunicació bàsica, es va implementar un sistema per enviar ordres estructurades des de consola, amb l'objectiu de simular accions que posteriorment executaria el robot. Aquestes ordres segueixen un format prefixat: una lletra que indica l'acció (I, O, L, R), seguida d'un valor numèric i finalitzada amb un punt i coma (;), com per exemple I;10; (entrar 10 cm) o L;15; (pivotar 15° a l'esquerra).

Els scripts "ProvaSocketClientComandes.py" i "ProvaSocketServerComandes.py" gestionen l'enviament i recepció d'aquestes comandes. El servidor interpreta cada missatge rebut i imprimeix l'acció corresponent. També es van fer proves prèvies amb un format reduït (S, E, A20) utilitzant els scripts "ProvaSocketClient2.py" i "ProvaSocketServer2.py", per validar el tractament de missatges simples.

A les figures 6.4. i 6.5. es mostra un exemple d'entrada d'una comanda per consola i la seva interpretació pel servidor.

```
Connectat al servidor!

Introdueix una comanda:
- I;<distància>; per entrar
- O;<distància>; per sortir
- L;<graus>; per pivotar a l'esquerra
- R;<graus>; per pivotar a la dreta
(Exemple: I;10;)
>>> I;10
```

Figura 6.4. Missatge del client on es veu que s'envia la comanda "l;10".

```
Servidor escoltant a 192.168.1.147:5000...
Connectat per ('192.168.1.139', 54192)
Entrant 10 cm.
```

Figura 6.5. Missatge del servidor indicant que ha rebut correctament la comanda "l;10" i realitza l'acció corresponent.

Aquest sistema de comandes estructurades es va considerar adequat per controlar el robot de forma flexible, i va servir com a pont entre la interfície de veu i l'execució real.

6.4. Control per veu amb enviament d'ordres estructurades

Un cop validat el reconeixement de veu i el sistema d'ordres estructurades per consola, es va implementar una prova d'integració per generar automàticament aquestes comandes a partir de la veu. L'objectiu era permetre que ordres com "entra", "sortir", "pivotar a l'esquerra" o "pivotar a la dreta" es convertissin en comandes del tipus l;10;, O;10;, L;15;, R;15;, i es transmetessin per socket al servidor receptor.

El script "ProvaVeuToTextClient.py" fa servir la biblioteca speech_recognition per captar l'ordre vocal i traduir-la a text mitjançant Google Speech-to-Text. Segons les paraules clau detectades, s'assigna una comanda prefixada i es transmet mitjançant socket. El servidor, definit a "ProvaVeuToTextServer.py", rep la comanda, n'extreu el mode i valor, i imprimeix el resultat.

A les figures 6.6. i 6.7. es mostra un exemple de reconeixement d'una ordre vocal i la seva conversió automàtica a una comanda estructurada.

```
Connectat al servidor!
Escoltant...
Ordre reconeguda: entra
```

Figura 6.6. Missatge del client on es reconeix una ordre per veu i s'envia al servidor

```
Servidor escoltant a 192.168.1.139:5000...
Connectat per ('192.168.1.147', 57822)
Entrant 10 cm.
```

Figura 6.7. Missatge del servidor indicant que ha rebut correctament l'ordre d'entrar

Aquesta prova va confirmar la viabilitat del control per veu com a mètode d'entrada intuïtiu i directe per a l'operació del robot.

6.5. Prova de control del robot mitjançant botons

En aquesta prova es va validar el comportament del robot Stäubli TX60 executant moviments controlats mitjançant botons físics connectats a entrades digitals. Aquesta validació, prèvia a la integració amb el control per veu, tenia com a objectiu comprovar la fiabilitat i precisió dels moviments de pivotació i translació al voltant del punt d'inserció (trocar), utilitzant ordres simples generades manualment.

6.5.1. Primera versió: prova de pivotació sobre eixos

El primer codi desenvolupat, anomenat “ProvaPivotatgeBotons”, es pot consultar al repositori de GitHub indicat a l'Annex B, juntament amb la resta de codis del projecte. Aquest programa permetia realitzar rotacions sobre els eixos X, Y i Z del robot a partir de la posició actual, capturada mitjançant la funció `here`. Les transformacions es construïen manualment sumant 5 graus a l'eix corresponent, i s'executava un moviment lineal (`moveL`) cap al nou punt calculat. El sistema utilitzava tres botons, cadascun assignat a un eix de rotació, i un quart botó per finalitzar l'execució. Els LEDs associats s'activaven mentre es realitzava cada moviment, funcionant com a indicador visual d'activitat.

Els botons es van connectar a les entrades digitals `bln4` a `bln7`, i es van identificar manualment activant-los un a un i observant la resposta per consola, fet que va permetre assignar-los a les diferents rotacions (X, Y i Z) i la parada general del bucle. Els LEDs connectats a les sortides `bOut4` a `bOut7` s'activaven mentre es realitzava el moviment corresponent.

Aquest enfocament va permetre validar:

- El càlcul correcte de les noves transformacions
- El manteniment de la posició del trocar com a referència
- La resposta fiable del robot a cada pulsació

Els resultats van ser satisfactoris, i es va confirmar la coherència dels moviments i la fiabilitat del sistema. A la figura 6.8 es mostra el resultat d'apretar el mateix botó dos cops durant la prova de la seqüència de pivotació al voltant del trocar.



Figura 6.8. Seqüència de moviment del braç robòtic Staubli TX60 durant la prova de pivotació al voltant del trocar, mitjançant comandes generades per botons físics.

6.5.2. Segona versió: prova de translació i rotació integrada

Amb l'objectiu d'aproximar-se al comportament funcional del sistema final, es va crear una segona versió del programa. En aquest cas, es van mantenir els mateixos botons, però se'ls va assignar una funcionalitat més representativa:

- Botó 0: desplaçament cap a dins (direcció -Z)
- Botó 1: desplaçament cap a fora (direcció +Z)
- Botó 2: pivotació sobre l'eix Y mantenint la punta fixa

Aquesta versió utilitza la funció `appro` per aplicar desplaçaments o rotacions relatives a la posició actual, i posteriorment es corregeixen les coordenades X, Y, Z per mantenir la punta de l'instrument fixada al trocar. Aquest mètode imita el comportament real que es busca durant una operació amb càmera o instrument quirúrgic.

Els moviments es van executar amb suavitat i precisió, i el robot va respondre correctament a totes les ordres. No es van detectar errors, i el sistema es va considerar adequat com a versió de prova funcional.

6.5.3. Versió millorada i definitiva del pivotatge dinàmic

Després de validar la versió inicial, es va desenvolupar una versió millorada del control de moviments per abordar una limitació important: el pivotatge utilitzava sempre el mateix punt fix de referència, cosa que generava errors en la trajectòria real.

En aquesta nova versió, es va implementar una actualització contínua del punt de la punta de l'instrument, de manera que el moviment de pivotatge es realitza mantenint el punt d'inserció (trocar) com a centre real de rotació. Aquesta modificació s'alinea amb el comportament anatòmic desitjat en entorns quirúrgics mínimament invasius, on és essencial evitar tensions innecessàries als teixits.

Concretament:

- El sistema actualitza la tool `tPivot[1]` abans de cada moviment, ajustant-ne les coordenades segons el punt `plnsercio[1]`, que es recalcula amb `here()`.
- En cada iteració del bucle, la nova posició o rotació es construeix a partir de la posició més recent del robot, assegurant així continuïtat i precisió.
- Aquesta estratègia permet pivotar amb més naturalitat i realisme sobre l'eix Y del flange del pacient, mantenint el punt d'inserció fixat a l'espai.

Aquesta millora es va validar amb èxit, mostrant trajectòries més estables i coherents amb la realitat quirúrgica. La precisió i la suavitat dels moviments van augmentar notablement i així l'agulla no tocava mai les parets del trocar a l'hora de pivotar. El codi complet d'aquesta versió millorada es pot consultar a l'Annex B amb el nom de `buttonsApp` (repositori GitHub).

6.6. Prova de recepció de comandes numèriques per socket

Per validar la comunicació entre el robot i l'ordinador de control mitjançant sockets TCP/IP, es va desenvolupar una prova funcional basada en l'enviament de comandes numèriques senzilles.

El codi Python "`ProvaSocketsNumeros.py`" permet enviar valors entre 0 i 4 al robot a través de la xarxa local. Aquestes comandes representen accions com:

- 0: Entrar
- 1: Sortir
- 2: Pivotar cap a un costat

- 3: Pivotar cap a l'altre
- 4: Tornar a la posició inicial

El robot executa un codi VAL3 (provaSockets) que rep les dades per socket, reconstrueix la comanda llegint el buffer i imprimeix per pantalla el valor rebut. A cada recepció, es mostra:

- El valor ASCII de la comanda rebuda (buffer[idx])
- La comanda reconstruïda com a cadena (command)
- Un missatge confirmant la interpretació (per exemple, "Rebut 2")

A la Figura 6.10 es pot veure el resultat d'aquesta prova directament a la pantalla del Teach Pendant, amb diversos valors rebuts i identificats correctament. Aquesta prova confirma que la comunicació bidireccional funciona correctament, i que el robot pot rebre i interpretar ordres en format textual, un pas clau abans de l'execució de moviments reals.

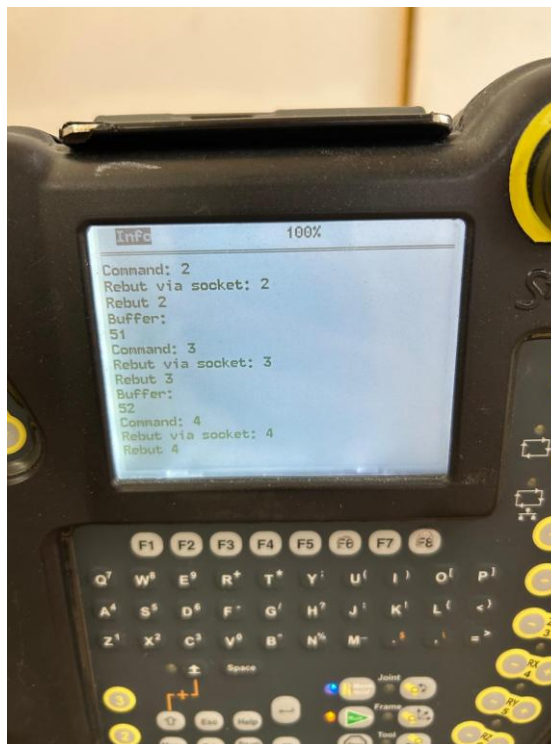


Figura 6.9. Pantalla del Teach Pendant mostrant les comandes numèriques rebudes per socket i interpretades pel robot.

6.7. Validació final amb codi integrat

La darrera versió del sistema va consistir en la integració completa del control del robot Stäubli TX60 mitjançant comandes numèriques rebudes per socket TCP/IP, enviades des d'un ordinador client.

El codi definitiu en llenguatge VAL3 (disponible a l'Annex B) incorpora:

- Inicialització del sistema i connexió amb el socket voice_server.
- Definició de velocitats i configuració de les eines (tPivot) i punts d'inserció (plnsercio).
- Moviment inicial del robot a la posició de treball.
- Bucle d'escolta de comandes on es reben valors entre 0 i 4:
 - 0: entrada (moviment cap a dins en l'eix de la càmera)
 - 1: sortida
 - 2: pivotació cap a l'esquerra del pacient
 - 3: pivotació cap a la dreta del pacient
 - 4: sortida del bucle
- Actualització dinàmica del punt de pivotatge (plnsercio[1]) per garantir que es manté el Remote Center of Motion (RCM) durant les rotacions.
- Finalització ordenada retornant a la posició HOME.

Aquest codi es va provar utilitzant el programa ProvaSocketsNumeros.py al laboratori, amb èxit en totes les comandes testejades. El robot va executar els moviments de forma precisa i coherent, i es va validar el flux complet de comunicació entre dispositius.

Aquesta versió queda pendent d'incorporar les ordres de veu de forma definitiva, però ja representa una implementació funcional completa del sistema de control per veu en cirurgia mínimament invasiva.

6.8. Prova final amb reconeixement de veu

Un cop validat el sistema complet de control robòtic mitjançant comandes numèriques transmeses per socket TCP/IP, es va desenvolupar una última prova amb l'objectiu d'incorporar el reconeixement de veu en català com a interfície d'entrada directa per al cirurgià.

Per dur-la a terme, es va crear un script Python (fitxer ProvaSocketsVeuANum.py) que combina:

- La biblioteca `speech_recognition` per captar ordres vocals a través del micròfon.
- Una funció de conversió (`veu_a_ordre`) que interpreta les ordres reconegudes i les transforma en un dígit de control entre 0 i 5.
- Un sistema de transmissió via socket que envia aquestes comandes al robot Stäubli TX60, ja preparat per interpretar-les.

Les ordres de veu reconegudes i la seva equivalència són les que es poden veure a la taula 6.1.

Ordre vocal	Comanda enviada
"Entra"	0 (entrar)
"Surt"	1 (sortir)
"Esquerra"	2 (pivotar a l'esquerra del pacient)
"Dreta"	3 (pivotar a la dreta del pacient)
"Casa" / "Torna"	4 (Tornar a home)
"Fi" / "Final"	5 (Talla la comunicació amb el robot)

Taula 6.1. Taula amb les ordres vocals reconegudes i les comandes corresponents enviades al robot

L'script funciona en bucle, escoltant contínuament l'usuari i enviant la comanda immediatament després d'haver estat reconeguda. Es va validar amb èxit la connexió entre el client Python i el robot, mostrant en pantalla la comanda enviada i confirmant-ne la recepció per part del sistema.

Aquesta prova representa la consolidació de la interfície per veu com a eina de control intuïtiva, sense contacte físic, i fàcilment adaptable a l'entorn quirúrgic. El sistema queda així completament operatiu, a falta només d'una validació més àmplia en escenaris reals de simulació.

7. CONCLUSIONS

Aquest capítol té com a objectiu presentar, de manera clara i sintètica, les principals conclusions derivades del desenvolupament del projecte. S'avalua fins a quin punt s'han assolit els objectius definits a la introducció, es reflexiona sobre la contribució del treball als Objectius de Desenvolupament Sostenible (ODS) de les Nacions Unides, i es proposen possibles línies de millora i ampliació futures.

L'exposició es fa sense repetir detalladament els continguts ja presentats a la memòria, sinó destacant-ne els resultats globals, la seva significació i la projecció del sistema desenvolupat en contextos reals o futurs escenaris d'investigació.

7.1. Acompliment dels objectius

El treball ha assolit plenament l'objectiu principal: desenvolupar un sistema de control robòtic per veu orientat a la manipulació d'un instrument quirúrgic auxiliar en cirurgia mínimament invasiva. El sistema dissenyat permet controlar els moviments d'un braç robòtic (Stäubli TX60) mitjançant ordres vocals simples, traduint-les en comandes numèriques que es transmeten per socket TCP/IP. Aquestes comandes han estat interpretades correctament pel robot, que ha executat moviments de translació i pivotatge al voltant del trocar de manera precisa i coherent amb els requisits quirúrgics.

També s'han complert els objectius específics:

- Implementar reconeixement de veu en català amb `speech_recognition`.
- Integrar aquesta entrada vocal amb el sistema de control robòtic.
- Assegurar el manteniment del punt fix (RCM) durant els moviments.
- Validar el sistema en un entorn simulat amb proves reals de funcionament.

Aquests resultats confirmen que la metodologia escollida i l'arquitectura modular implementada han estat adequades i efectives.

7.2. Contribució als Objectius de Desenvolupament Sostenible (ODS)

Aquest TFG contribueix principalment a dos Objectius de Desenvolupament Sostenible (ODS) de les Nacions Unides:

- ODS 3 – Salut i benestar: El sistema proposat millora la precisió i l'autonomia del cirurgià, redueix la dependència de personal auxiliar per a la manipulació de la càmera, i permet mantenir una posició estable del trocar. Això pot traduir-se, en aplicacions futures, en una millor qualitat assistencial, reducció d'errors i menor temps quirúrgic.
- ODS 9 – Indústria, innovació i infraestructures: Aquest treball fomenta la innovació tecnològica en el camp mèdic, tot aprofitant recursos industrials (com el robot TX60) per desenvolupar solucions avançades, assequibles i adaptables a entorns de simulació o recerca.

Aquests objectius es reforcen amb la perspectiva d'ampliació i integració del sistema en escenaris reals d'assaig clínic o docència quirúrgica.

7.3. Línies de millora i treball futur

Tot i els bons resultats obtinguts, el projecte ha posat en relleu possibles actuacions complementàries que poden contribuir a millorar el sistema o a ampliar-ne les funcionalitats:

- Millorar la precisió del sistema de reconeixement de veu, especialment en entorns amb soroll o amb veus diferents, mitjançant entrenament específic o l'ús d'algoritmes més robustos.
- Implementar reconeixement de veu local (offline) per garantir la privacitat de les dades i eliminar la dependència de serveis externs.
- Ampliar la gamma de comandes disponibles, incorporant més ordres i funcions de control per oferir al cirurgià una interacció més completa.
- Desenvolupar una interfície gràfica de monitoratge, que permeti visualitzar en temps real l'estat del sistema, les comandes rebudes i els moviments del robot.
- Realitzar assaigs amb professionals mèdics en entorns clínics simulats, amb l'objectiu de validar l'ergonomia, la utilitat i la seguretat del sistema en condicions reals d'ús.

Aquestes millores permetrien augmentar la robustesa, la usabilitat i el grau de maduresa tecnològica del sistema, i podrien conduir a una futura implementació en contextos reals de formació o pràctica quirúrgica assistida.

REFERÈNCIES

- [1] Broderick TJ, et al. Voice-activated surgical robotics and the operating room of the future. Arch Surg. 2004;139(1):32–39. Disponible a: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/9337163/>
- [2] Agència de Qualitat i Avaluació Sanitàries de Catalunya (AQuAS). La cirurgia robòtica: examen de l'evidència i l'activitat a Catalunya 2010–2015. Departament de Salut, Generalitat de Catalunya; 2018. Disponible a: https://aquas.gencat.cat/ca/detall/article/cirurgia_robotica
- [3] Paul S, Lee D, Heredia J, et al. Evaluation of a Voice-Enabled Autonomous Camera Control System for the da Vinci Surgical Robot. Sensors. 2024;13(1):10. Disponible a: <https://www.mdpi.com/2218-6581/13/1/10>
- [4] Gruijthuijsen C, Garcia-Peraza-Herrera LC, et al. Robotic endoscope control via autonomous instrument tracking. arXiv. 2021. Disponible a: <https://arxiv.org/abs/2107.02317>
- [5] Rogowski A. Scenario-based programming of voice-controlled medical robotic systems. Sensors. 2022;22(23):9520. Disponible a: <https://doi.org/10.3390/s22239520>
- [6] Lee D, et al. Estimation of optimal pivot point for remote center of motion alignment in surgery. ResearchGate. 2023. Disponible a: <https://www.researchgate.net/publication/262381633>
- [7] Simaan N, et al. Remote Center of Motion (RCM) mechanisms for surgical operations. ResearchGate. 2015. Disponible a: <https://www.researchgate.net/publication/279247863>
- [8] Rosen M, Ponsky J. Minimally invasive surgery. N Engl J Med. 2001;344(15):1111–1117. Disponible a: <https://www.nejm.org/doi/pdf/10.1056/NEJMp1006602>
- [9] Kim JA, et al. Long-term gastrointestinal symptoms after laparoscopic and open procedures. Surg Laparosc Endosc Percutan Tech. 2002;12(5):289–294. Disponible a: https://journals.lww.com/surgical-laparoscopy/abstract/2002/10000/long_term_gastrointestinal_symptoms_after.2.aspx
- [10] Advanced Urology Institute. The benefits of da Vinci robotic surgery. Disponible a: <https://www.advancedurologyinstitute.com/the-benefits-of-da-vinci-robotic-surgery/>
- [11] CMR Surgical. Versius Surgical Robotic System. 2023. Disponible a: <https://www.globenewswire.com/news-release/2024/01/04/2803719/0/en/Versius-customer-reach-increases-as-CMR-Surgical-closes-2023-with-strongest-quarter-on-record.html>

- [12] Medtronic. Robotic-Assisted Surgery (RAS). 2025. Disponible a: <https://www.medtronic.com/en-us/healthcare-professionals/specialties/surgical-robotics/robotic-assisted-surgery.html>
- [13] RobSurgical. Bitrack Surgical Robot. 2024. Disponible a: <https://www.robsurgical.com/bitrack-the-surgical-robot-that-universalizes-high-precision-surgery/>
- [14] Ballesteró R. En la pròxima dècada hi haurà robots quirúrgics per a cada especialitat i patologia. El País. 2025 febr 3. Disponible a: <https://elpais.com/salud-y-bienestar/2025-02-03/roberto-ballesterro-diego-urologo-en-la-proxima-decada-habra-robots-quirurgicos-para-cada-especialidad-y-patologia.html>
- [15] Attanasio A, et al. Intelligent robotic surgery in clinical practice. Int J Med Robot Comput Assist Surg. 2023. Disponible a: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/rcs.2392>
- [16] Cadena SER. L'Hospital de Sant Pau incorpora el robot quirúrgic més avançat de la sanitat pública espanyola. SER Catalunya. 2025 març 20. Disponible a: <https://cadenaser.com/cataluna/2025/03/20/lhospital-de-sant-pau-incorpora-el-robot-quirurgic-mes-avancat-de-la-sanitat-publica-espanyola-sercat/>
- [17] Jurafsky D, Martin JH. Speech and Language Processing. 3a ed. 2025. Disponible a: <https://web.stanford.edu/~jurafsky/slp3>
- [18] Zhou L, et al. Analysis of Errors in Dictated Clinical Documents Assisted by Speech Recognition Software. JAMA Netw Open. 2018;1(3):e180530. Disponible a: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/30370424/>
- [19] Hinton GE, et al. Deep Neural Networks for Acoustic Modeling in Speech Recognition. IEEE Signal Process Mag. 2012;29(6):82–97. Disponible a: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6296526>
- [20] Wang Y, Roe D. Robots in the Operating Room—The History. Semin Laparosc Surg. 2004;11(2):63–71. Disponible a: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/15254644/>
- [21] Kim J, Lee D. Speech-mediated manipulation of da Vinci surgical system for endoscope control. Int J Syst Assur Eng Manag. 2024. Disponible a: <https://link.springer.com/article/10.1007/s13534-024-00429-5>

- [22] Yang GZ, et al. Medical robotics—Regulatory, ethical, and legal considerations for increasing levels of autonomy. *Sci Robot*. 2017;2(4):eaam8638. Disponible a: <https://www.science.org/doi/10.1126/scirobotics.aam8638>
- [23] RoboDK. Staubli TX60 robotic arm. Disponible a: <https://robodk.com/robot/Staubli/TX60>
- [24] Robots Done Right. Staubli TX60. Disponible a: <https://robotsdoneright.com/Staubli/staubli-TX60.html>
- [25] Eurobots. Staubli TX60 – control CS8C. Disponible a: <https://www.eurobots.net/Other-Robots-robots-Staubli-TX60--control-CS8C-p67-en.html>
- [26] Sun J, Yan Z, Du Z. Optimal design of a novel remote center-of-motion mechanism. *IEEE*. 2017. Disponible a: <https://ieeexplore.ieee.org/document/4209363>
- [27] MarketsandMarkets. Medical Robots Market – Global Forecasts to 2029. 2024. Disponible a: <https://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/medical-robotic-systems-market-2916860.html>
- [28] Intuitive Surgical Inc. Da Vinci Systems Installed Base. 2025. Disponible a: https://ycharts.com/indicators/intuitive_surgical_inc_isrg_da_vinci_systems_installed_base
- [29] CMR Surgical. CMR Surgical reports record robot installations in 2023. 2024a. Disponible a: <https://www.therobotreport.com/cmr-surgical-reports-record-robot-installations-2023-plans-2024-product-launches/>
- [30] Medtronic. First Procedure in the World with Hugo™ Robotic-Assisted Surgery System. 2021. Disponible a: <https://news.medtronic.com/2021-06-22-First-Procedure-in-the-World-with-Medtronic-Hugo-TM-Robotic-Assisted-Surgery-System-Performed-at-Clinica-Santa-Maria-in-Chile>
- [31] Baylor College of Medicine. The financial realities of robotic surgery programs. 2024. Disponible a: <https://blogs.bcm.edu/2024/07/19/the-financial-realities-of-robotic-surgery-programs-insights-from-recent-research/>
- [32] JAMA. Estimation of the Acquisition and Operating Costs for Robotic Surgery. 2018. Disponible a: <https://jamanetwork.com/journals/jama/fullarticle/2698476>
- [33] Grand View Research. Medical Robotic Systems Market Size & Share Report, 2030. 2023. Disponible a: <https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/medical-robotic-systems-market>

- [34] Intuitive Surgical. Da Vinci Surgical Systems Overview. 2025a. Disponible a: <https://www.intuitive.com/en-us/products-and-services/da-vinci>
- [35] Intuitive Surgical. Da Vinci Xi Surgical System. 2025b. Disponible a: <https://www.intuitive.com/en-us/products-and-services/da-vinci/xi>
- [36] Intuitive Surgical. Da Vinci SP platform. 2025c. Disponible a: <https://www.intuitive.com/en-us/products-and-services/da-vinci/sp>
- [37] Intuitive Surgical. Da Vinci Ion platform. 2025d. Disponible a: <https://www.intuitive.com/en-us/products-and-services/ion>
- [38] Medtronic. Hugo RAS system receives FDA approval. 2025. Disponible a: <https://www.medtechdive.com/news/Medtronic-Hugo-FDA-submission-urology/746489/>
- [39] CMR Surgical. FDA authorizes next-generation Versius Surgical System. 2024b. Disponible a: <https://cmrsurgical.com/news/cmr-surgical-receives-u-s-fda-marketing-authorization-for-next-generation-versius-surgical-system>
- [40] GU Oncology Now. Emerging Robotics Platforms Foster Competition and Innovation. 2023. Disponible a: <https://www.guoncologynow.com/post/emerging-robotic-platforms-foster-competition-encourage-innovation>
- [41] Machine Controller. Standard Reference Point for Motion Controller [Internet]. Machine-controller.org; [consultat el 29 maig 2025]. Disponible a: <https://www.machine-controller.org/info/standard-reference-point-for-motion-controller-77742648.html>
- [42] Université de Strasbourg. *Examen de robotique 2007–2008: Stäubli* [Internet]. Strasbourg: ICube Laboratory; [consultat el 29 maig 2025]. Disponible a: https://avr.icube.unistra.fr/img_auth_namespace.php/0/00/Exam_robotique0708_staubli.pdf

ANNEXOS

A. PLANIFICACIÓ

Aquest annex mostra la planificació temporal del projecte, des de la seva proposta inicial fins a la redacció final de la memòria. A la taula A.1, s'hi detallen les fases realitzades, agrupades segons els períodes aproximats en què s'han dut a terme, i les activitats principals associades a cada etapa. Aquesta planificació ha servit de guia per estructurar el treball i assolir els objectius proposats dins del termini establert.

A.1. Taula de planificació detallada

Tasca	Inici	Fi	Durada estimada	Recursos emprats
Proposta inicial	15/11/2024	30/11/2024	10h	Tutor, document de proposta, accés a intranet EPS
Estudi previ i definició d'objectius	01/12/2024	31/01/2025	30h	Ordinador personal, accés a articles, guies de projectes similars
Recerca de conceptes i primera prova de veu	01/02/2025	31/03/2025	40h	Ordinador personal, Python amb les llibreries corresponents
Desenvolupament i proves funcionals	01/04/2025	30/04/2025	60h	Ordinador, Robot Stäubli TX60, consola teach Pendant, Python, aplicació SRS19, suport tutor i docent addicional
Integració i redacció de la memòria	01/05/2025	02/06/2025	60h	Ordinador, Robot Stäubli TX60, consola teach Pendant, Python, aplicació SRS19, suport tutor i docent addicional

Taula A.1. Planificació temporal del projecte i activitats principals realitzades.

A.2. Recursos i equipament utilitzat

- Infraestructura: ordinador personal amb Windows, connexió a Internet, accés al laboratori de robòtica de la UdG.
- Equipament: micròfon, robot Stäubli TX60, consola MCP (consola de programació física del robot), simulador VAL3.
- Programari: Python 3, biblioteques *speech_recognition*, *pyaudio* i *socket*, sockets TCP/IP, VAL3, SRS 19, Visual Studio Code.
- Suport: supervisió i feedback del tutor assignat durant tot el procés, així com assessorament puntual del professor Esteve-Amadeu Hernandez Uptegrove en comunicació per sockets i manipulació del robot.

A.3. Diagrama de Gantt

A continuació es mostra la Figura A.1, on es representa el diagrama de Gantt corresponent a la planificació general del projecte, amb la divisió en fases i la durada prevista de cada tasca.

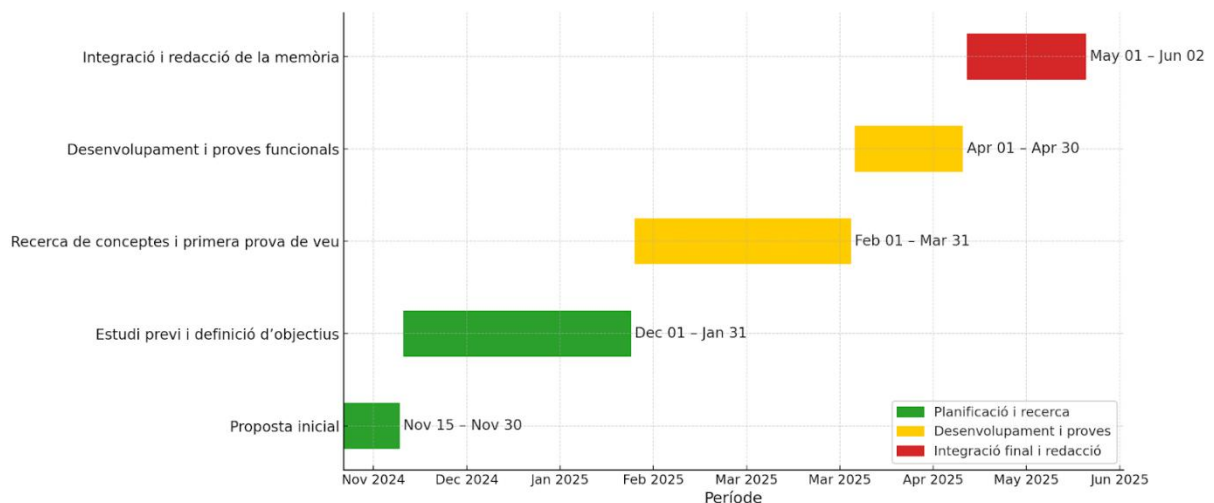


Figura A.1. Diagrama de Gantt amb la planificació temporal del projecte.

A.4. Desviacions respecte a la planificació inicial

Tot i que la planificació inicial es va seguir majoritàriament, algunes fases es van solapar parcialment per optimitzar temps, com ara la redacció de la memòria durant les darreres fases de proves. No obstant això, no hi va haver desviacions importants respecte a la distribució prevista de tasques.

B. CODI

Amb l'objectiu de posar a disposició de la comunitat científica el codi desenvolupat durant aquest Treball de Fi de Grau, s'ha creat un repositori públic al portal GitHub. Aquest repositori conté tot el programari necessari per a la implementació i execució del sistema de control robòtic per veu desenvolupat en aquest projecte.

Repositori del projecte: https://github.com/gerardtorrasc/TFG_Voice_Robot

A la carpeta arrel del repositori s'inclou un fitxer *README.md* que actua com a document de *LLEGEIXME*. Aquest fitxer conté:

- Una descripció del propòsit del codi i la seva estructura.
- Els requeriments d'instal·lació i configuració del sistema.
- Un exemple bàsic de funcionament i referències als manuals d'instal·lació i d'usuari.

El repositori també inclou els fitxers de programació en VAL3 corresponents a l'aplicació del robot (estructura modular amb *start.pgx*, *mainApp.pgx*, etc.), així com l'script Python per al reconeixement de veu i la comunicació via socket amb el robot.

Tots els arxius estan comentats i estructurats per facilitar-ne la reutilització i adaptació a nous entorns o aplicacions similars. Els fitxers manuals es troben dins la carpeta docs/, i contenen versions completes dels manuals d'instal·lació i d'usuari.

C. PRESSUPOST

Aquest annex recull l'estimació econòmica del sistema desenvolupat en el marc del Treball de Fi de Grau The Voice Robot. Es consideren els costos associats als recursos materials utilitzats, al desenvolupament del programari, i altres despeses generals associades al desplegament funcional del sistema.

C.1. Preus unitaris

A la Taula C.1. es presenta un quadre amb els preus unitaris dels principals components, materials i hores de mà d'obra emprades durant el desenvolupament del projecte.

Element	Unitat	Preu unitari (€)	Observacions
Robot Stäubli TX60 + controlador CS9	1 unitat	35.000 €	Equipament cedit pel laboratori de robòtica
Micròfon USB per entrada de veu	1 unitat	25 €	Element senzill per captació de comandes orals
Ordinador amb Windows 10	1 unitat	700 €	Equipament de treball per executar el client Python
Element terminal (agulla + maqueta pacient)	1 unitat	30 €	Prototip funcional no homologat per a simulació quirúrgica
Desenvolupament de codi VAL3 (robot)	50 hores	25 €/h	Control robòtic amb sockets
Desenvolupament de codi Python	40 hores	25 €/h	Client TCP/IP i reconeixement de veu
Redacció de la memòria i manuals	60 hores	25 €/h	Annexos, memòria, manuals d'usuari i instal·lació
Despeses generals	-	5% del subtotal	Llum, ús d'equipament, infraestructures
Benefici industrial i imprevistos	-	10% del subtotal	Estimació habitual segons criteris tècnics

Taula C.1. Estimació de preus unitaris

C.2. Pressupostos parcials

A continuació es presenta la valoració econòmica desglossada i agrupada per partides principals del projecte:

- Materials i equipament: 35.755 €
- Desenvolupament i documentació (150 h x 25 €/h): 3.750 €
- Despeses generals (5%): 1.975,25 €
- Benefici industrial i imprevistos (10%): 3.950,50 €

C.3. Pressupost total

El resum final del pressupost, incloent totes les partides valorades, és el mostrat a la Taula C.2.

Concepte	Import (€)
Total estimat	45.430,25

Taula C.2. Pressupost final estimat

C.4. Comentari final

Aquest pressupost és orientatiu i pretén mostrar l'escala econòmica real del projecte si s'hagués d'implementar en un entorn extern. L'equipament del robot i la infraestructura han estat facilitats pel laboratori de robòtica de la Universitat de Girona, però s'han valorat per aportar una estimació coherent amb el cost de reproducció del sistema.

Les hores de treball han estat ajustades segons la planificació real descrita a l'Annex A, i inclouen el desenvolupament de programari, integració, validació i redacció documental.

L'element terminal emprat per simular el comportament quirúrgic es compon d'una agulla i una maqueta de pacient fabricada amb materials genèrics de baix cost. No es tracta de material mèdic oficial, sinó d'un prototip funcional utilitzat exclusivament amb finalitats docents i de validació experimental.

Els preus han estat obtinguts de fonts públiques (catàlegs de proveïdors, botigues en línia i experiència en projectes similars) i s'han utilitzat com a referència estimativa. No constitueixen un pressupost comercial tancat ni una cotització formal.

D. CÀLCULS I JUSTIFICACIONS

D.1. Introducció

Aquest annex té com a objectiu descriure, justificar i detallar els càlculs i paràmetres utilitzats per definir correctament els punts i sistemes de coordenades del robot Stäubli TX60 en el context del projecte. Es documenta la metodologia seguida per declarar els punts de treball, orientar correctament l'eina (agulla), establir els valors del Tool Center Point (TCP) i determinar els desplaçaments i orientacions requerits. També s'expliquen les raons per les quals s'han escollit determinades magnituds de moviment, orientació i translació, sempre prioritzant la precisió i la seguretat del sistema.

D.2. Declaració de punts i sistemes de coordenades

D.2.1. Punts de referència (joints)

Per definir la posició *jHome*, s'ha aprofitat el punt de calibratge inicial del robot, ja que totes les articulacions es troben a zero. Aquesta configuració és fonamental per evitar moviments inesperats i garantir que el robot comenci sempre des d'una posició segura i coneguda.

Per declarar aquesta posició s'han de seguir les següents passes:

1. Accedir al menú *Calibration*.
2. Prémer la tecla *F6* per habilitar el moviment.
3. Mantenir premut el botó *Move Hold*.
4. Posicionar el robot al punt desitjat.
5. Seleccionar la variable *jHome* i utilitzar l'opció *Here (F1)* per assignar-hi la posició actual.

A la Figura D.1, es mostra el robot posicionat a *jHome*.



Figura D.1. Robot a la posició jHome definida.

La posició jWork s'ha definit de forma similar, però movent manualment el robot fins a una posició operativa sobre la zona de treball. Es va utilitzar el mode *Joint* i els controls del *teach pendant* per ajustar individualment cada articulació fins a assolir la posició desitjada. Aquesta posició es mostra a la Figura D.2.



Figura D.2. Robot a la posició jWork ja definida.

D.2.2. Definició del punt d'inserció i del frame del pacient

Al simulador SRS19, es va definir un vector de posicions *pInsercio* de mida 4, per poder modificar i afegir punts sense recórrer a variables auxiliars.

El punt *pInsercio[0]* (punt d'inserció inicial) es va definir utilitzant el mode *Frame* amb el sistema de coordenades *world* (predeterminat del robot), ja que aquest facilita moviments precisos seguint els eixos globals.

Quan es va posicionar el robot al punt d'inserció, es va utilitzar l'opció *Here* per assignar-lo a *pInsercio[0]*. Aquest punt també es va reutilitzar per inicialitzar *pCalFrame[0]*, el centre del frame auxiliar *fPacient*.

A la Figura D.3 es mostra el sistema de coordenades *world*, i a la Figura D.4 la posició *pInsercio[0]*.

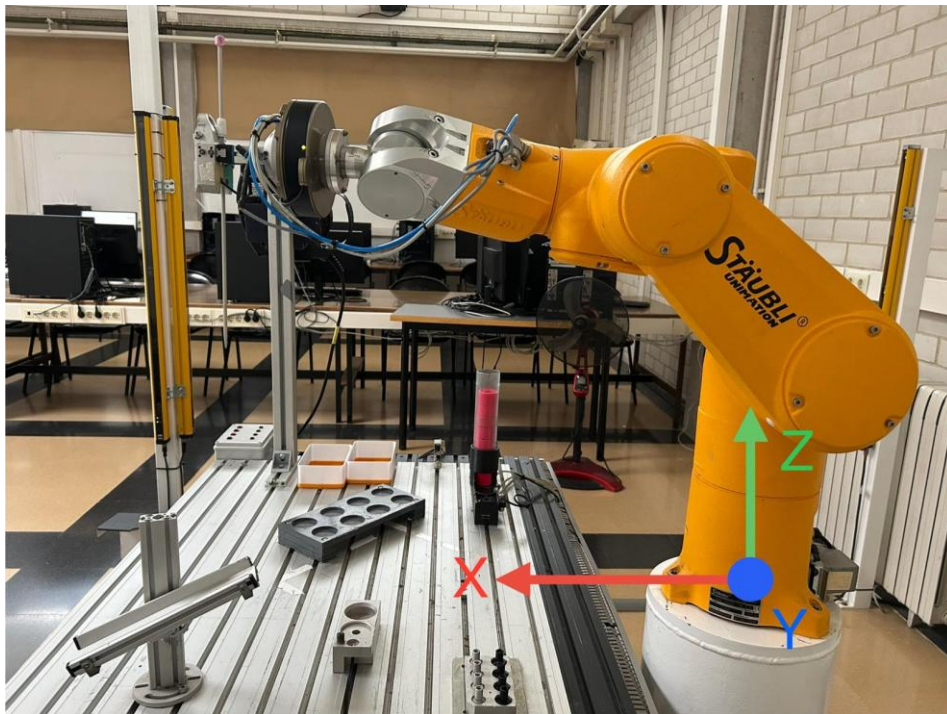


Figura D.3. Sistema de coordenades del frame *world* (predeterminat del robot).

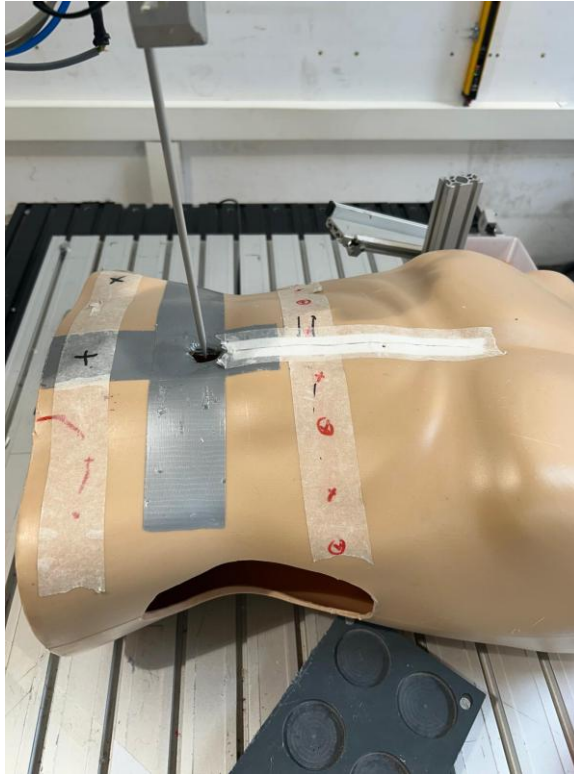


Figura D.4. Robot a col·locat a $pInsercio[0]$.

Per definir la direcció de l'eix X del frame $fPacient$, es va moure el robot només en l'eix Y del world, en la direcció desitjada, i es va guardar la posició resultant com a $pCalFrame[1]$. Aquest moviment assegura que l'eix X del frame $fPacient$ tingui el mateix sentit que l'eix Y del sistema world. Vegeu Figura D.5



Figura D.5. Robot en posició $pCalFrame[1]$. La fletxa vermella indica el moviment del robot des de $pCalFrame[0]$ (origen del frame) fins a $pCalFrame[1]$.

Finalment, per definir el pla XY, es va afegir un tercer punt $pCalFrame[2]$ en qualsevol lloc del pla generat per $pCalFrame[0]$ i $pCalFrame[1]$. Aquest punt es va situar de manera que el frame $fPacient$ tingués:

- L'eix Z apuntant cap amunt
- Una rotació de 90° respecte al frame *world*

Aquest ajust es va comprovar mitjançant la regla de la mà dreta, mostrada a la Figura D.6 i representada gràficament a la Figura D.7.

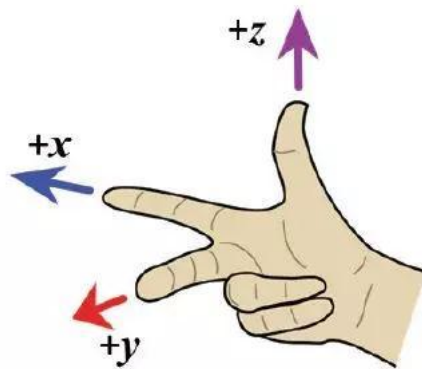


Figura D.6. Aplicació de la regla de la mà dreta per determinar el sentit dels eixos X, Y i Z en un sistema de coordenades cartesià ortonormal.

Font: Machine Controller [Internet]. Disponible a: <https://www.machine-controller.org/info/standard-reference-point-for-motion-controller-77742648.html>

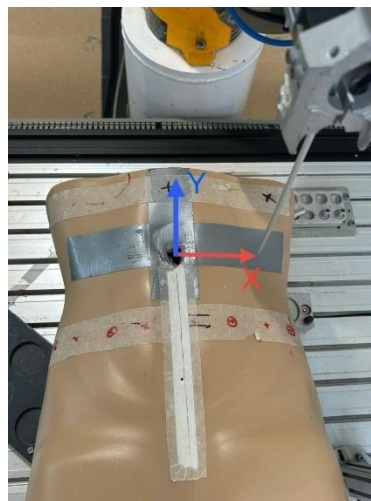


Figura D.7. Sentit i direcció dels eixos X i Y del frame $fPacient$ definit.

El punt final $pCalFrame[2]$ es mostra a la Figura D.8.

Per completar la definició del frame $fPacient$, s'accedeix al Application Manager del *teach pendant*, es selecciona el frame $fPacient$, i es fa *Teach* dels punts $pCalFrame[0]$, $pCalFrame[1]$ i $pCalFrame[2]$ com a *Origin*, *Axis X* i *Axis Y*, respectivament. El resultat final es pot veure a la Figura D.9.



Figura D.8. Ubicació exacte del punt $pCalFrame[2]$.

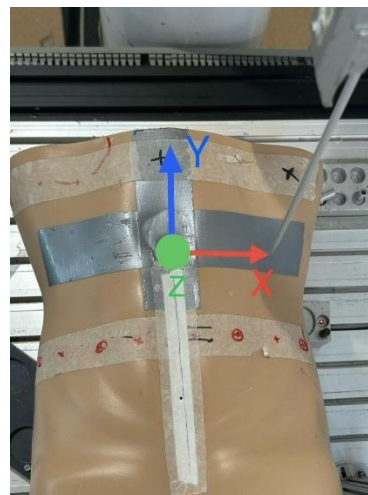


Figura D.9. Resultat final dels tres eixos del frame $fPacient$.

D.3. Declaració de les Tools.

Per definir les tools es van haver de fer càlculs. La primera tool, la tPunxa es va definir per poder ubicar el punt que es troba a la punta de l'agulla que s'ha utilitzat per fer les simulacions d'eina de laparoscòpia. L'altre tool, tPivot, es va definir per poder tenir el punt en el que es troba la zona de l'agulla que es manté fixa a l'hora de pivotar. El punt de pivot s'havia de col·locar en un punt una mica més elevat que la punta de l'agulla i es va decidir que estigués 5c per sobre de la punta de l'agulla perquè així i hagues marge de fer els moviments d'entrar i sortir de l'agulla en el trocar. Aquests dos punts de l'eina eren necessaris per poder fer els moviments que s'han hagut de fer en aquest projecte. A la Figura D.10. es veu l'agulla amb la ubicació de les dues Tools per poder-les ubicar i veure la distància entre els dos punts.

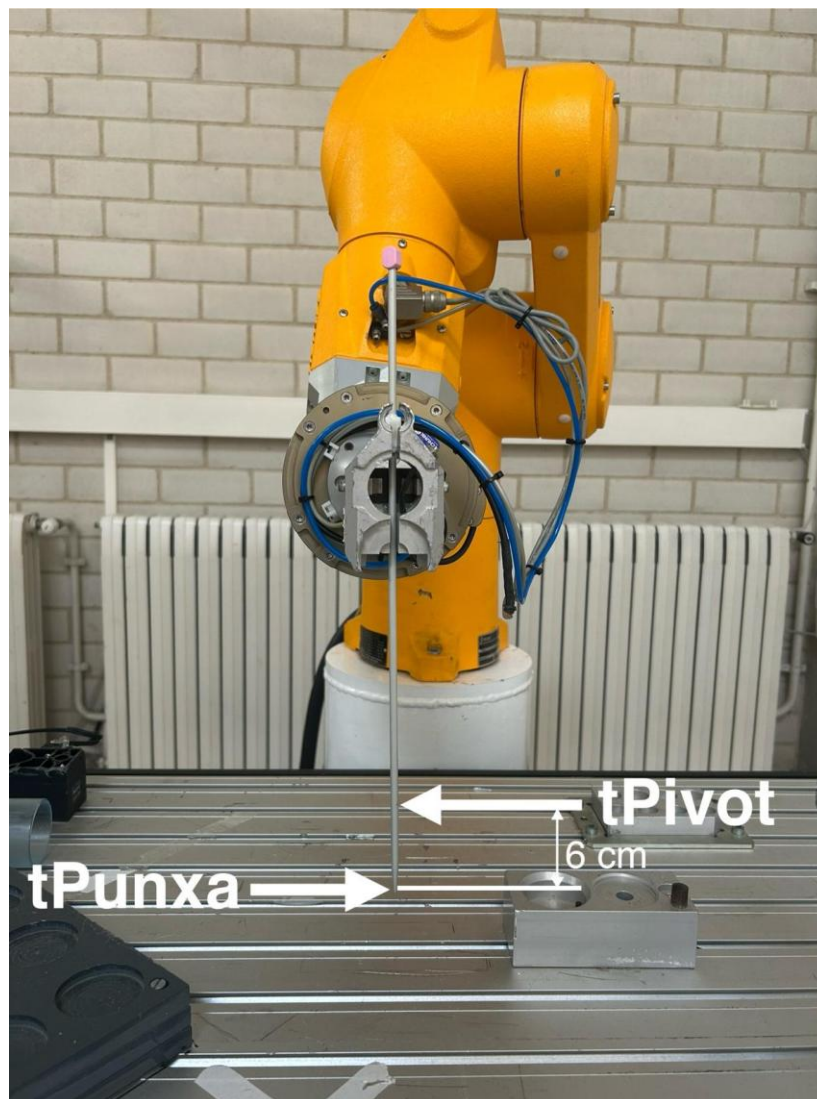


Figura D.10. Situació de tPunxa i tPivot en l'instrument utilitzat i la distància entre elles.

A continuació es va procedir a orientar correctament els eixos del sistema de coordenades de l'eina per tal de poder calcular amb precisió les translacions necessàries entre el flange i els punts *tPunxa* i *tPivot*. L'agulla està fixada amb una inclinació respecte als eixos del flange, de manera que l'eix Z original no segueix la seva direcció.

Seguint les indicacions del professor de suport, es va aplicar primer una rotació de 134 graus respecte a l'eix Y local. Un cop aplicada, es va analitzar com quedava orientada l'eina respecte als punts de treball, i es va observar que l'agulla estava desviada 90 graus respecte a l'eix Z resultant. Per corregir-ho, es va afegir una segona rotació de 90 graus respecte a l'eix X local, de manera que l'eix Z del nou sistema de coordenades acabés alineant-se amb l'agulla.

Aquesta combinació de rotacions ($R_y = 134^\circ$, $R_x = 90^\circ$) va permetre obtenir l'orientació desitjada, on l'eix Z del sistema de coordenades de l'eina apunta exactament en la direcció de l'agulla. Això és fonamental per garantir que les translacions definides sobre Z (com moviments d'inserció) es realitzin seguint la trajectòria real de l'agulla, i no respecte als eixos del flange.

Pel que fa a les distàncies dels punts respecte dels eixos del flange cal tenir en compte com queda l'agulla respecte dels eixos d'aquest. A la Figura D.11. es mostra aquesta disposició.

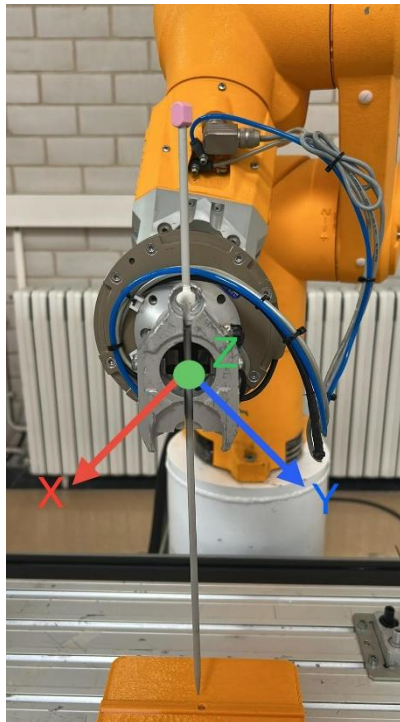


Figura D.11. Vista dels eixos del flange respecte de la direcció de l'agulla.

També és important destacar que l'agulla no es troba fixada directament sobre l'origen del sistema de coordenades del flange, sinó que es subjecta mitjançant una eina auxiliar: una pinça pneumàtica. Aquest element afegeix un desplaçament físic en la direcció de l'eix Z del flange, ja que l'agulla queda situada més endavant respecte al centre de coordenades de referència.

Per determinar aquest desplaçament, es van realitzar mesures manuals amb una cinta mètrica, obtenint una distància de 14,5 cm entre el centre del flange i l'eix de l'agulla. Aquesta mesura és fonamental per configurar correctament la translació del Tool Center Point (TCP) de l'eina virtual. La Figura D.12 mostra aquest desplaçament mesurat, i la Figura D.13 presenta una comparativa entre el model de robot Stäubli TX60 sense cap accessori i el muntatge real utilitzat al laboratori de la Universitat de Girona, on s'observa clarament l'espai que ocupa la pinça.

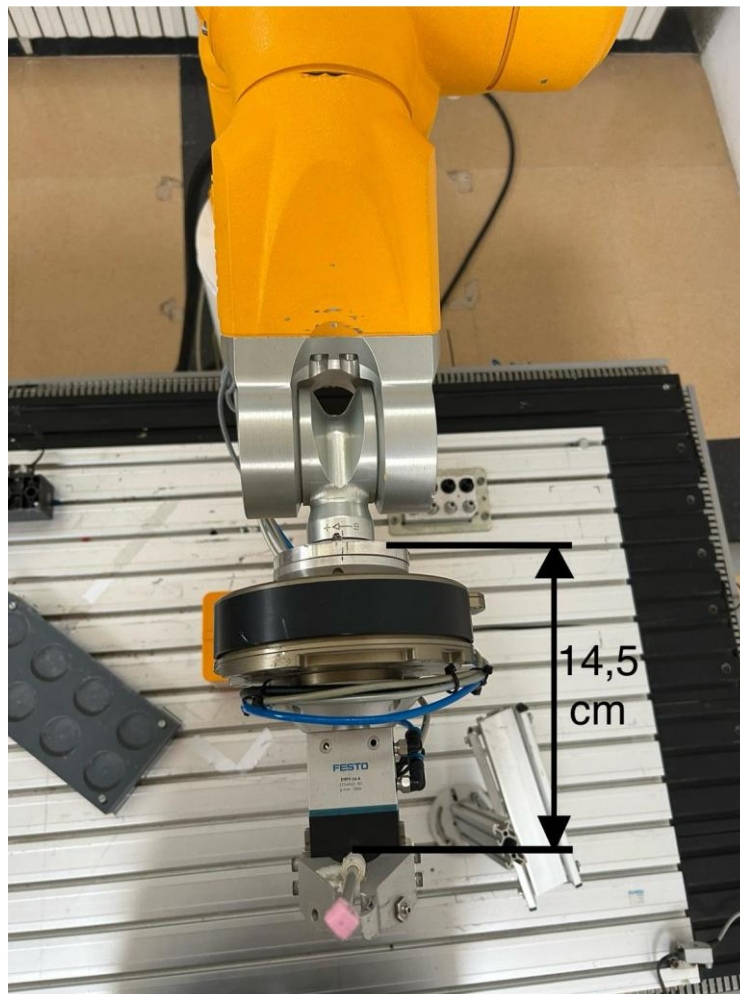


Figura D.12. Mesura de la distància de 14,5 cm entre el centre del flange i la posició real de l'agulla, en la direcció de l'eix Z.

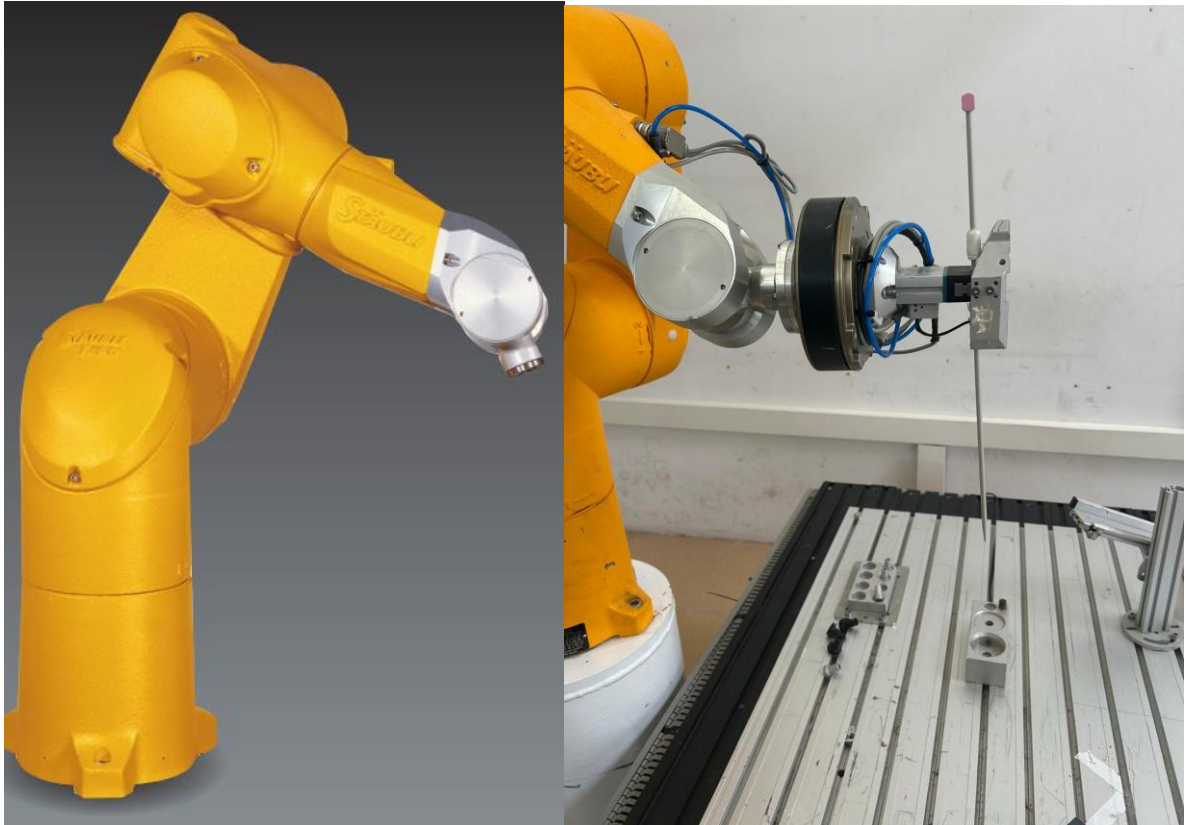


Figura D.13. Comparativa entre el robot Stäubli TX60 estàndard i el muntatge real del laboratori amb la pinça d'aire a pressió.

Font: Université de Strasbourg. Examen de robotique 2007–2008: Stäubli [Internet]. ICube Laboratory; [consultat el 29 maig 2025]. Disponible a:

https://avr.icube.unistra.fr/img_auth_namespace.php/0/00/Exam_robotique0708_staubli.pdf

Pel que fa a les translacions en X i Y , a la Figura D.11, es pot observar com l'agulla no queda alineada amb cap dels eixos principals del sistema de coordenades del flange. En lloc de seguir la direcció de l'eix X o de l'eix Y , la seva orientació es troba en una posició intermèdia, inclinada en diagonal respecte al pla XY del flange. Aquesta geometria evidencia que cap moviment pur sobre X o Y permetria seguir la direcció de l'agulla, cosa que fa necessari ajustar el sistema de coordenades de l'eina.

Per interpretar aquesta situació de manera més clara, a la Figura D.14. es presenta una representació esquemàtica de la relació entre els eixos X , Y i la direcció de l'agulla. En aquest esquema, es mostra com l'agulla es pot considerar la hipotenusa d'un triangle rectangle, amb els eixos X i Y actuant com a catets.

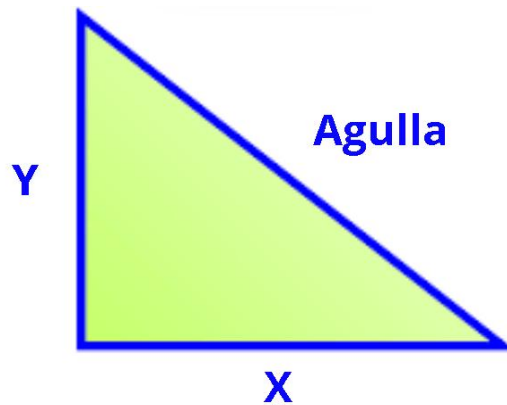


Figura D.14. Representació geomètrica de la direcció de l'agulla com a hipotenusa d'un triangle rectangle definit pels eixos X i Y del flange.

Per tal de definir correctament les posicions relatives de l'eina i els punts de treball, es van realitzar mesures directes sobre el sistema físic. En concret, es va mesurar la distància des del centre del flange del robot fins a la punta de l'agulla, obtenint un valor de 26 cm, i també la distància fins al punt de pivot, que es troba a 20 cm del flange (vegeu Figura D.15).

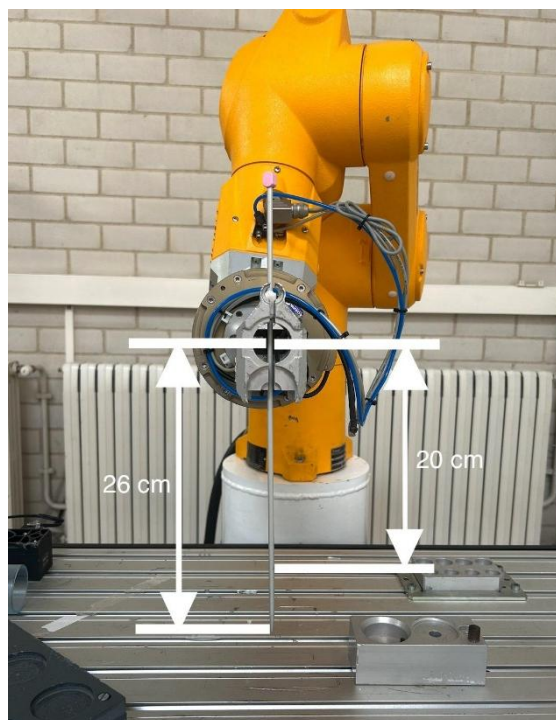


Figura D.15. Mesura de les distàncies des del centre del flange fins a la punta de l'agulla (26 cm) i fins al punt de pivot (20 cm).

Atès que l'agulla forma un angle aproximat de 45° respecte als eixos X i Y del flange, es pot considerar que aquests dos eixos formen els catets d'un triangle rectangle, i que la direcció de l'agulla correspon a la hipotenusa. En aquest cas, com que l'angle és de 45° , els dos catets tenen la mateixa longitud, i podem aplicar la fórmula clàssica del teorema de Pitàgores, mostrada a la Equació 1

$$h^2 = a^2 + b^2 \quad (\text{Eq. 1})$$

On h representa la longitud de la hipotenusa (la distància entre el flange i el punt de l'agulla que ens interressi), i a i b són els catets (desplaçaments en X i Y).

Com que $a = b$ (els catets tenen la mateixa longitud), es pot simplificar l'Equació 1 i obtenir l'Equació 2.

$$a = b = \frac{h}{\sqrt{2}} \quad (\text{Eq. 2})$$

A partir d'aquí, es van calcular les components X i Y per als dos casos reals observats:

- Per al punt *tPivot*, amb una hipotenusa de 20 cm, els valors dels catets són:

$$x = y = \frac{20}{\sqrt{2}} = 14,142 \text{ cm}$$

- Per al punt *tPunxa*, amb una hipotenusa de 26 cm, els valors dels catets són:

$$x = y = \frac{26}{\sqrt{2}} = 18,385 \text{ cm}$$

Finalment, Per establir correctament els punts *tPivot* i *tPunxa* com a posicions de treball amb l'eina orientada correctament, es van introduir els valors següents:

- *tPivot*:
 - $X = 141,42 \text{ mm}$, $Y = 141,42 \text{ mm}$, $Z = 145 \text{ mm}$
 - $R_x = 90^\circ$, $R_y = 134^\circ$, $R_z = 0^\circ$
- *tPunxa*:
 - $X = 183,85 \text{ mm}$, $Y = 183,85 \text{ mm}$, $Z = 145 \text{ mm}$
 - $R_x = 90^\circ$, $R_y = 134^\circ$, $R_z = 0^\circ$

D.4. Paràmetres de moviment i control

Per garantir una execució segura i precisa dels moviments del robot, es van definir increments de 5 mm per translacions i 5° per rotacions. Aquesta resolució permet controlar amb detall cada pas del moviment, evitant desplaçaments bruscos o desalineacions. A més, en contextos on es simula un entorn quirúrgic, aquests valors ofereixen un equilibri entre fluïdesa i seguretat, especialment rellevant si el sistema de parada per veu no s'activa immediatament. Aquesta estratègia també facilita les proves manuals, ja que els moviments petits són fàcilment visibles i mesurables.

Tanmateix, a partir dels càlculs de translació real segons la inclinació de l'agulla (amb un angle de 45° respecte als eixos X i Y), es va comprovar que un moviment de 5 mm sobre l'eix Z local de l'eina equival aproximadament a 3,54 mm de desplaçament real en X i Y, per calcular-ho es va utilitzar l'Equació 2 i el resultat va ser el següent:

$$x = y = \frac{5}{\sqrt{2}} = 3,54 \text{ mm}$$

Aquesta dada s'ha tingut en compte per calcular trajectòries amb precisió, ja que el moviment en Z implica components laterals quan l'eina està inclinada.

D.5. Conclusió i aplicació final

A través de la definició acurada dels punts *jHome*, *jWork*, *tPunxa*, *tPivot*, així com del frame auxiliar *fPacient*, s'ha configurat el robot perquè treballi amb una eina inclinada i desplaçada respecte al flange. L'alineació correcta de l'eix Z del sistema de coordenades de l'eina amb la direcció real de l'agulla, mitjançant les rotacions fetes, permet que qualsevol translació definida en Z es tradueixi en una inserció precisa. També s'han establert les distàncies exactes respecte al flange i els components X i Y mitjançant càlculs trigonomètrics, assegurant la posició real de l'agulla.

Finalment, l'ús de moviments incrementals petits (5 mm i 5°) ha estat clau per garantir seguretat, control i fiabilitat en l'execució de les trajectòries. Tot plegat conforma una base robusta per a la manipulació segura i precisa d'eines quirúrgiques simulades en entorns experimentals i docents.