



**REPRESENTACIÓ MECÀNICA D'UNA
MÀ HUMANA I SIMULACIÓ DEL SEU
MOVIMENT EN CAD 3D.**

GERARD PUIGORIOL ARNAUS

Treball final de Grau

Escola Politècnica Superior d'Enginyeria de Manresa (UPC)

Juny de 2013

Director del treball: Esteban Peña Pitarch.

Doctor per la Universitat Politècnica de Catalunya.

Professor del departament d'Enginyeria Mecànica.

Escola Politècnica Superior d'Enginyeria de Manresa.

REPRESENTACIÓ MECÀNICA D'UNA MÀ HUMANA I SIMULACIÓ DEL SEU MOVIMENT EN CAD 3D.

GERARD PUIGORIOL ARNAUS

RESUM

En el present treball es realitza un estudi mecànic de la mà humana. Aquest estudi analitza els diferents ossos que conformen l'estructura interna de la mà i els diferents rangs de moviment que aquests poden realitzar.

En base a aquest anàlisi s'avalua un model de mà virtual, prèviament definit, de 25 graus de llibertat, el qual suposa una complexitat considerable, però també una gran aproximació a l'estructura interna real de qualsevol mà humana.

Aquest model de mà descrit, que consta de 25 graus de llibertat, és representat virtualment i modelat en 3 dimensions amb el programari *Blender*, software lliure multi-plataforma de Disseny Assistit per Computador (CAD).

Finalment, amb aquest mateix programari es realitza una simulació del moviment de la mà. Per a la presa de dades s'ha utilitzat el guant *Cyberglove II* que consta de 18 sensors i ha permès determinar cadascun dels 25 graus de llibertat que determinen la posició de les diferents parts de la mà en cada instant del moviment.

D'aquesta manera el treball es pot dir que té tres grans blocs: l'anàlisi mecànic d'un model definit de la mà, el modelat de l'estructura de 25 graus de llibertat en CAD i la simulació del moviment d'aquest model.

MECHANICAL REPRESENTATION OF ONE HUMAN HAND AND SIMULATION OF ITS MOVEMENT IN CAD 3D.

GERARD PUIGORIOL ARNAUS

SUMMARY

This document contains a mechanical analysis of a human hand. The way to do this is based on analysis of the bones which support human internal structure of the hand and its ranges of movement.

One human hand model with 25 degrees of freedom is predefined and evaluated. The model has a high complexity, but it has a good and accurate approximation to the real human hand of any person.

This model described which has 25 degrees of freedom is virtually represented and drawn in 3 dimensions, too. The tool used for drawing is called *Blender*, which consists of free software of Computer Assisted Design (CAD).

Finally, I want to add that with the same software a movement simulation of the hand is done. To obtain data of movement I have used a glove called Cyberglove II. This glove has 18 sensors taking values and then we have converted this data to determine the degrees of freedom and hand position of each instant movement .

In this way, the work done has 3 principal themes: mechanical analysis of the human hand, the drawing of the structure of 25 degrees in Blender and the simulation of movement in CAD 3D too.

AGRAÏMENTS

Agrair el suport, comentaris i recomanacions aportats pel director del treball, el professor Esteban Peña Pitarch. Juntament amb les metgesses del Servei de Rehabilitació d'Althaia Montserrat Abenoza Guardiola i Neus Ticó Falguera.

Gràcies per dedicar-me part del vostre temps i estar disposats i disposades a ajudar-me.

CONTINGUT DEL TREBALL

Resum	v
Resum en anglès: <i>Summary</i>	vi
Agraïments	vii
Contingut del treball	1
1. Introducció	
1.1 Motivació personal.	3
1.2 Estudis previs.	4
1.3 Objectius del treball.	6
1.4 Presència en l'àmbit mèdic.	7
2. Anàlisi mecànic de la mà humana	
2.1 Estructura interna.	8
2.1.1 Estructura òssia.	9
2.1.2 Unions òssies.	10
2.1.3 Moviments.	13
2.2 Model proposat.	16
2.2.1 Mides dels ossos.	17
2.2.2 Representació amb paràmetres D-H.	20
2.3 Transformació a coordenades globals.	26
2.4 Cinemàtica.	29
2.4.1 Cinemàtica directe.	29
2.4.2 Cinemàtica indirecte.	29
3. Representació de la mà en CAD 3D	30
3.1 Plataforma Makehuman.	30
3.2 Software Blender.	32
3.3 Estructura base.	34
3.4 Estructura modelada.	36
3.4.1 Unions òssies.	37
3.4.2 Dimensions.	38

4. Presa de dades	40
4.1 ARA Test	40
4.2 Guant Cyberglove II.	44
4.3 Metodologia de recopilació de dades.	49
4.4 Conversió de dades.	53
5. Simulació del moviment en CAD 3D.	70
6. Conclusions.	72
7. Possibles aplicacions.	73
Referències.	75
Maquinari utilitzat en la realització del treball final de grau.	80
Annex A: model de <i>Action Research Arm Test</i> , ARA TEST.	81
Annex B: mostra de captura de dades i conversió a 25 G.LL..	83
Annex C: obtenció dels valors per a la posició de repòs.	97
Altres documents:	
Annex 1. Autorització de la matrícula del treball final de grau.	103
Annex 2. Lliurement del treball final de grau.	104

1. INTRODUCCIÓ

1.1 MOTIVACIÓ PERSONAL.

El perquè de l'elecció d'aquesta temàtica en el present treball final de grau recau en un simple aspecte emocional. Des d'un primer moment tenia clar que el treball em requeriria un seguit d'hores i esforç considerables i que només tindrien sentit si m'interessava realment i em motivava el tema a tractar.

En plantejar-se la possibilitat de realitzar aquest estudi mecànic d'una mà humana com a treball final hi vaig prestar un elevat interès. Malgrat tot la realització del treball consistia en introduir-me en la biomecànica, una branca de l'enginyeria desconeguda i nova per mi. Tot i això, a mesura que vaig començar a aprofundir i a informar-me, l'interès i les ganes de conèixer van vèncer el temor a endinsar-me en un nou àmbit.

Voldria afegir també que anteriorment havia realitzat diverses pràctiques laborals i estudiantils relacionades amb el modelatge i disseny assistit per computador i és un camp que m'ha agradat sempre. En aquestes pràctiques havia treballat amb diferents softwares i plataformes informàtiques de disseny, la majoria amb llicències d'alt cost econòmic, i en aquest treball sorgia la possibilitat de conèixer una eina nova, molt potent i lliure, el programari *Blender*.

Aquest va ser un altre dels motius que van fer que em decantés per aquesta temàtica. I així és com va sorgir la idea inicial i perquè vaig decidir tirar-la endavant i realitzar aquest treball final de grau que podeu consultar a continuació.

1.2 ESTUDIS PREVIS.

En l'actualitat s'han elaborat multituds d'estudis i recerques sobre la mà humana. Aquests estudis van des de la vessant mèdica, analitzant ossos, teixits, múscles, malalties, pèrdues de moviment o d'altres; fins a la vessant més tècnica i d'enginyeria, que implementa el modelatge, el prototipatge i l'anàlisi de la mà com a mecanisme, basant-se l'aplicació de conceptes matemàtics i de robòtica.

La majoria dels estudis daten del segle XIX i segle XX, degut a que ha estat l'època més prolífica de la medicina gràcies a l'ús de la tecnologia que ha permès grans avenços i descobriments.

El 1833 un cirurgià escocès anomenat Charles Bell [1], el qual era un dels anatomistes més destacats de l'època va publicar un dels estudis anatòmics de la mà més importants i reconeguts durant el transcurs del segle XIX fins l'actualitat, anomenat *The Hand, its mechanism and vital endowments as evincing design*. Destacar que aquest va servir de suport i va presagiar les posteriors publicacions de Darwin [2] i que l'any 2009 aquest llibre va ser reeditat per W. Pickering [3] en la universitat de Cambridge.

A Alemanya a principis del segle XX, el 1919, es varen realitzar ja alguns esbossos [4] per tal d'elaborar models de mà que permetessin fabricar extremitats artificials.

Durant el pas dels anys els estudis de la mà van decantar-se de l'anatomia i estructura cap a l'anàlisi dels moviments i la cinemàtica de la mà. El 1923 Stetson RH [5] va estudiar els moviments de la mà com a mecanisme o més endavant, el 1944, Dempster [6] va estudiar la relació dels moviments de la mà en base els múscles i en funció de la posició del canell. Al mateix any es presentava un estudi realitzat per la universitat de Califòrnia [7] que analitzava el moviment de la mà i el braç per tal de poder realitzar l'aplicació de pròtesis de manera satisfactòria.

Són ja més recents les publicacions d'anatomia *Anatomía del Aparato Locomotor* [8], en el qual s'expliquen detalladament les parts locomotores que conformen la mà humana, y *Anatomía humana* [9].

Referent als moviments del cos humà, és a dir la ciència anomenada biomecànica, s'han elaborat un gran nombre de publicacions molt recents de les quals se'n podrien destacar els títols *Bases biológicas y fisiológicas del movimiento humano* [10] i *Biomecánica funcional* [11], que presenta un recull d'anàlisis molt complet i amb un ventall de referències [12-24] molt divers i complet.

Aquest treball pretén analitzar i simular un model dissenyat amb 25 graus de llibertat que representa l'estructura interna i el moviment de la mà. Anteriorment s'han realitzat diversos dissenys però amb un nombre menor de graus de llibertat. Trobem, per exemple, un disseny d'una mà robòtica de l'any 1998 amb 16 graus de llibertat [25], la seva evolució a 18 graus al cap de quatre anys, el 2002 [32], o un model desenvolupat per la universitat de Keio del Japó l'any 2005 de 20 graus de llibertat [26]. Un altre estudi recent que es va portar a terme a la universitat de Ritsumeikan al Japó l'any 2006 consistia en la creació d'una mà robòtica elaborada per Inoue T. [27]. Com es pot apreciar durant el transcurs dels anys s'ha intentat augmentar la complexitat dels models afegint-hi més graus de llibertat.

1.3 OBJECTIUS DEL TREBALL.

La finalitat d'aquest treball en la seva etapa inicial no és altra que vetllar durant el transcurs de la seva elaboració per aconseguir el compliment de les tres metes o objectius que s'expliquen a continuació.

Com s'ha dit en el paràgraf anterior hi ha tres grans fites a assolir durant la realització del treball. Aquestes hipòtesis inicials són la realització d'un anàlisi mecànic de la mà, la representació en computador i la simulació del moviment.

El primer objectiu marcat, el de la realització de l'anàlisi mecànic permetrà aprofundir dins la biomecànica de la mà i per tal d'assolir-lo es requerirà la consulta d'una extensa bibliografia constituïda per estudis previs que han realitzat diferents científics. Aquest estudi se centrarà en un model de mà de 25 graus de llibertat, nombre que permet realitzar els moviments reals de la mà de manera satisfactòria. L'anàlisi mecànic analitzarà l'estructura òssia interna i caldrà consultar documents del camp de l'enginyeria mecànica i de la medicina. També hi està estretament relacionada una branca d'enginyeria en auge com és la robòtica, ja que no deixa de ser la representació mecànica del cos humà.

Pel compliment del segon objectiu marcat, que no és altre que la representació i el modelatge de la mà virtual caldrà aprofundir en el software *Blender* per tal d'elaborar un disseny i modelat el més proper a la realitat possible. Aquesta representació haurà de ser la posada en pràctica del model definit anteriorment.

Finalment el pas posterior a la representació és l'animació d'aquesta. Dit d'altre manera, la realització de la simulació del moviment real de la mà és l'últim dels objectius inicials establerts. Mitjançant les dades aportades per un guant equipat amb sensors angulars s'intentarà simular amb un alt grau de precisió el moviment real en la mà virtual modelada.

Apart d'aquests tres objectius es planteja un altre objectiu que no és de caràcter tècnic sinó personal, aquest no és altre que aprofundir en el món de la biomecànica i adquirir nous coneixements que prèviament eren desconeguts.

1.4 PRÈSÈNCIA EN L'ÀMBIT MÈDIC.

Inicialment, al començar el treball, només vaig apreciar la aplicació científica i analítica, però a mesura que em vaig introduir en la matèria em vaig adonar que no només consistia en un anàlisi mecànic del cos humà, sinó que també consistia en una introducció dins el camp d'aplicació de la medicina.

En contactar amb la doctora Neus Ticó per poder realitzar una sèrie de proves i tests amb el guant *CyberGlove II* vaig adonar-me de la presència i relació directa entre l'estudi científic i l'aplicació en l'àmbit mèdic. També he comprovat com la tecnologia determina el descobriment de noves tècniques i processos medicinals. És a dir, la tecnologia és molt present en l'àmbit mèdic i ha estat la clau en el seu desenvolupament.

Els camps mèdic que estan més relacionats amb el present treball són els de la rehabilitació i el dels malalts crònics afectats per ictus cerebrals. El motiu principal resta en que en aquests dos àmbits és habitual analitzar l'evolució de la capacitat de moviment de les mans dels pacients. En el cas de les persones que estan en procés de rehabilitació, per veure i comprovar com recuperen la mobilitat que tenien abans de patir la lesió o accident; i en el cas de les persones que han sofert un ictus cerebral és utilitzat per veure i catalogar els efectes de la malaltia i la seva evolució en els dies posteriors.

D'altra banda la simulació, que consta a la part final, permet veure visualment l'animació de la mà a través d'una pantalla i enregistrar els moviments realitzats. Això fa que sigui possible una avaluació per part del metge posterior a l'anàlisi que pot ser realitzat per un auxiliar mèdic.

Finalment com a resum destacar que la tecnologia és molt present en l'àmbit mèdic, que és la base de les últimes invencions i que el present treball pot tenir diverses aplicacions futures en el camp de la medicina.

2. ANÀLISI MECÀNIC DE LA MÀ HUMANA

La mà és un dels elements més fonamentals de la fisiologia humana, ja que habitualment és el mitjà que permet el contacte entre l'humà i el seu entorn. La mà humana que permet agafar i moure qualsevol tipus d'objecte serà analitzada a continuació per tal de poder descriure un model representatiu més endavant.

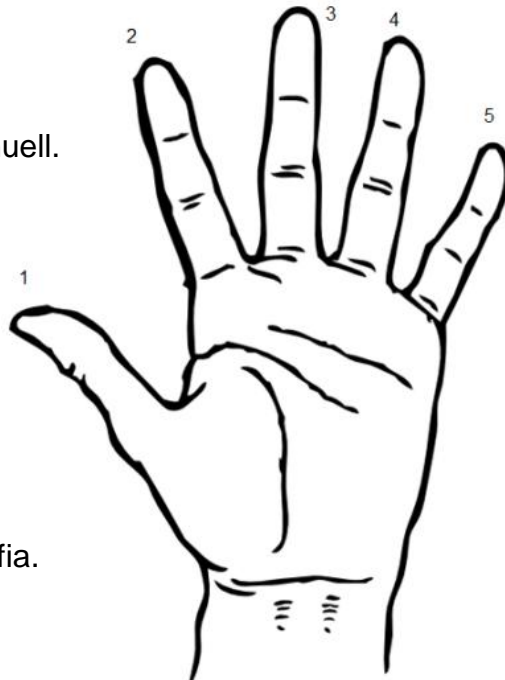
2.1 ESTRUCTURA INTERNA.

L'estructura interna de la mà que es procedeix a analitzar permetrà conèixer la mà des d'una vessant mèdica i així llavors poder elaborar el model de l'estructura mecànica de la mà.

Al llarg dels anys s'han realitzat una gran quantitat d'estudis i anàlisis de la mà humana, alguns divergeixen en determinats aspectes però tots coincideixen en que la mà està constituïda per el canell, el palmell, 4 dits i el dit polze.

Cadascun dels cinc dits de la mà es poden anomenar de diverses maneres:

1. Dit polze o dit gros.
2. Dit índex, assenyador, apuntador o mestre.
3. Dit del cor, dit del mig o llarg.
4. Dit anular i dit de l'anell.
5. Dit petit, dit xic, menovell o menuell.



La ubicació de cadascun d'aquests dits és la que es pot veure a la fotografia.

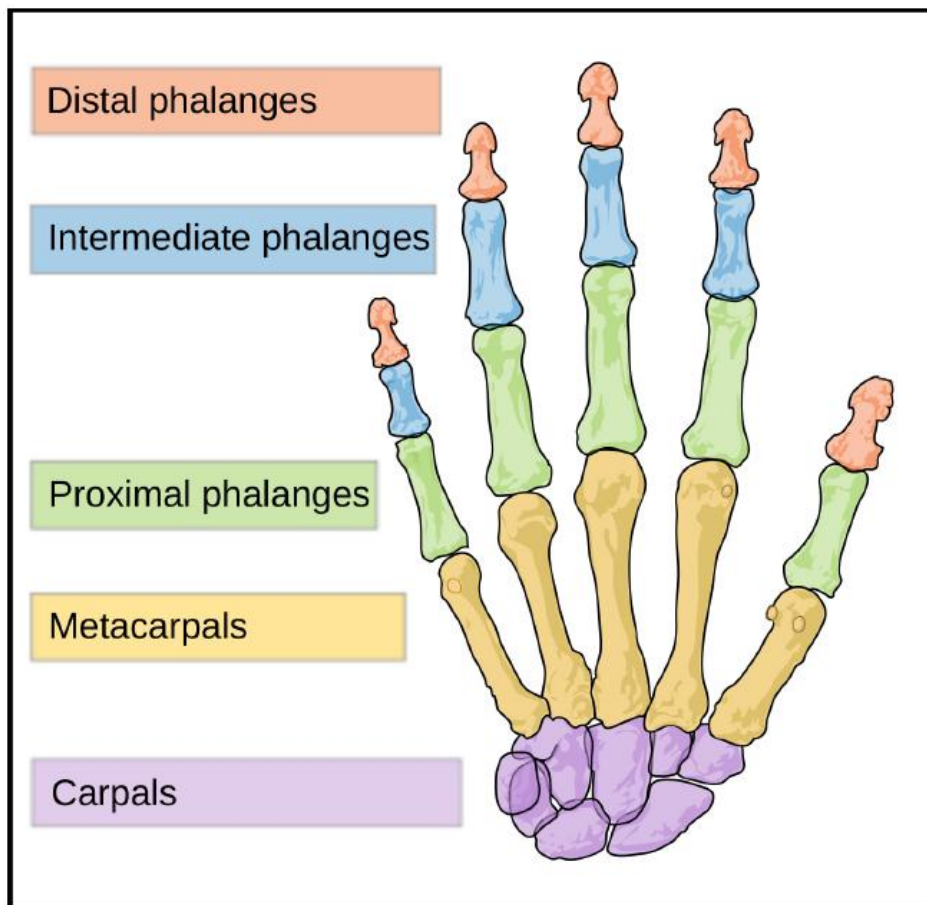
Imatge editada amb CorelDraw.

2.1.1 ESTRUCTURA ÒSSIA

L'estructura de la mà està constituïda internament per un total de 27 ossos que són els que aporten consistència a la mà i rigidesa per tal d'absorbir impactes i suportar càrregues elevades.

Els quatre dits tenen la mateixa estructura òssia, formats per tres falanges cadascun, mentre que el dit polze només en té dues. El palmell està format per cinc metacarpians, un per cada dit. Els vuit ossos restants es troben situats al canell en dues fileres de 4 ossos cadascuna.

A continuació podem apreciar gràficament la situació de cadascun dels ossos descrits anteriorment.



Font: Fadi J. Bejjani (1989) [28]

2.1.2 UNIONS ÒSSIES

Un cop analitzats els ossos es procedeix a l'anàlisi de les unions que són les que determinen els moviments que poden realitzar les diferents parts de la mà. Possiblement és una de les parts més complexes de l'anàlisi degut a que molts autors [29] tenen diferents punts de vista.

Les unions permeten la connexió de dos ossos i l'articulació d'aquests. Les dinou articulacions dels diferents ossos de la mà són:

- Cinc unions carpometacarpals (CMC):

Unió	Ossos
Carpometacarpal I	Metacarp del dit polze amb os del canell.
Carpometacarpal II	Metacarp del dit índex amb os del canell
Carpometacarpal III	Metacarp del dit del mig amb os del canell
Carpometacarpal IV	Metacarp del dit anular amb os del canell
Carpometacarpal V	Metacarp del dit petit amb os del canell

- Cinc unions metacarpofalangeals (MCP):

Unió	Ossos
Metacarpofalangeal I	Metacarp del dit polze amb falange proximal.
Metacarpofalangeal II	Metacarp del dit índex amb falange proximal.
Metacarpofalangeal III	Metacarp del dit del mig amb falange proximal.
Metacarpofalangeal IV	Metacarp del dit anular amb falange proximal.
Metacarpofalangeal V	Metacarp del dit petit amb falange proximal.

- Quatre unions interfalangeals proximals (PIP):

Unió	Ossos
Interfalangeal proximal II	Falange proximal del dit índex amb la intermèdia.
Interfalangeal proximal III	Falange proximal del dit del mig amb la intermèdia.
Interfalangeal proximal IV	Falange proximal del dit anular amb la intermèdia.
Interfalangeal proximal V	Falange proximal del dit petit amb la intermèdia.

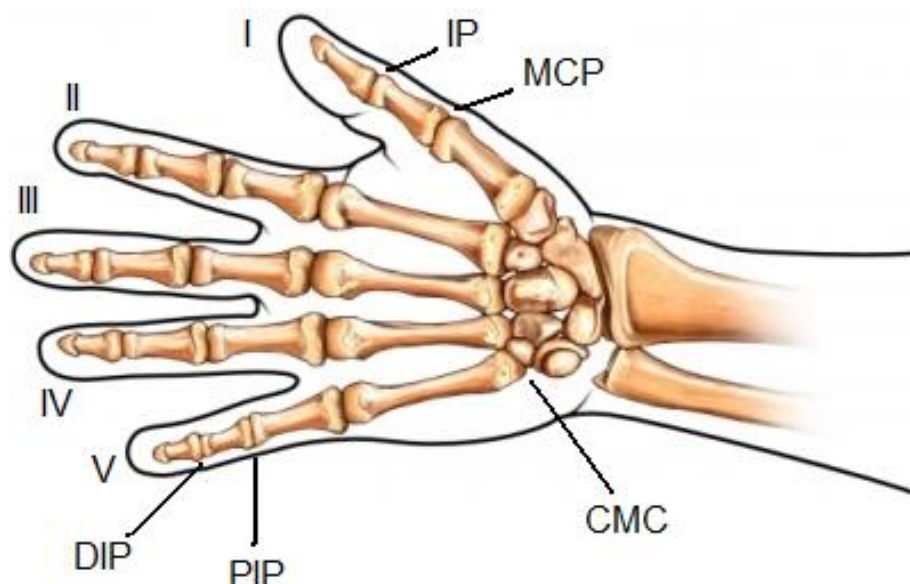
- Quatre unions interfalangeals distals (DIP):

Unió	Ossos
Interfalangeal distal II	Falange distal del dit índex amb la intermèdia.
Interfalangeal distal III	Falange distal del dit del mig amb la intermèdia.
Interfalangeal distal IV	Falange distal del dit anular amb la intermèdia.
Interfalangeal distal V	Falange distal del dit petit amb la intermèdia.

- Una unió interfalangeal (IP):

Unió	Ossos
Interfalangeal	Falange distal i proximal del dit polze.

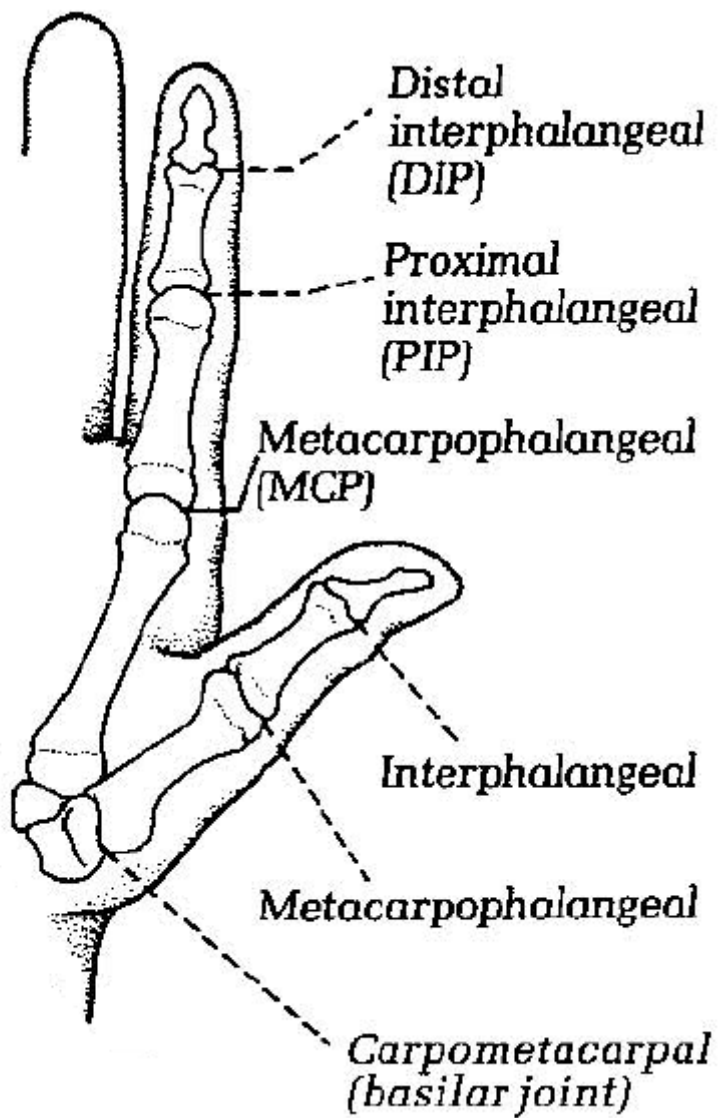
A continuació podem veure una representació de totes les unions mencionades, que conformen la mà humana, amb la nomenclatura corresponent.



Imatge editada amb CorelDraw.

Els nombres I, II, III, IV i V representen cadascun dels cinc dits de la mà, que corresponentment són el polze, l'índex, el del mig, l'anular i el petit.

En la imatge següent podem veure una altra representació de les diferents unions de la mà que es presenten entre els ossos descrits.

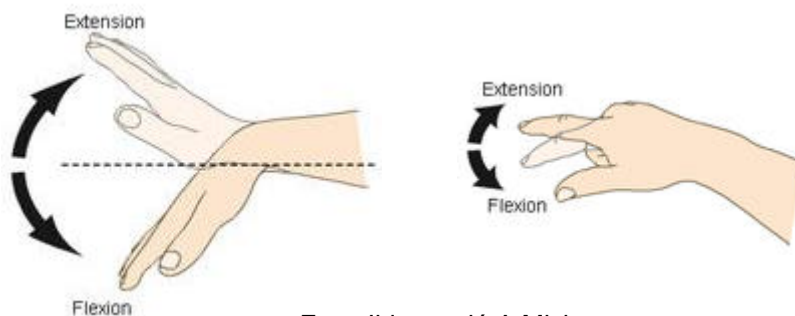


Font: American Society for Surgery of the Hand.

2.1.3 MOVIMENTS

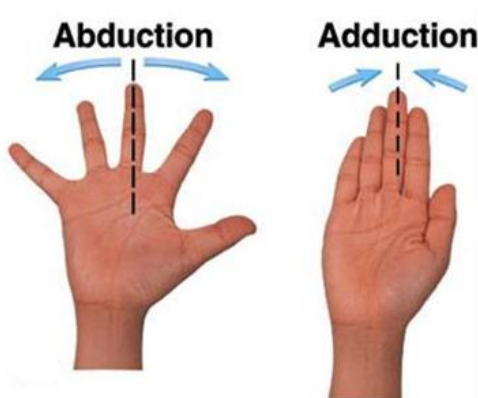
Els moviments que poden fer les unions són el moviment de flexió/extensió (F/E) i el moviment d'abducció/adducció (Ab/Ad). La flexió i l'extensió són el mateix moviment però en sentit contrari, a l'igual que l'abducció i l'adducció. Totes les articulacions poden realitzar el moviment de flexió/extensió, no obstant, no totes poden realitzar moviments d'abducció/adducció. A part d'aquests moviments hi ha un moviment que s'anomena hiperextensió (H) [30] vindria a ser una petita part del moviment d'extensió durant la qual el dit és estès per sobre el seu màxim natural d'extensió i el supera.

En les dues imatges que hi ha a continuació s'hi pot observar el moviment de flexió/extensió (F/E) del canell i d'un dit:



Font: Il·lustració A.Micheau.

En la imatge que hi ha a continuació s'hi pot observar el moviment d'abducció / adducció (Ab/Ad) dels dits de la mà:



Font: BaileyBio.

Un cop coneguts les diferents tipologies de moviments es procedeix a determinar quina tipologia de moviment té cadascuna de les dinou articulacions que abans s'han anomenat.

Les unions que poden realitzar moviments de flexió/extensió (F/E) són: totes quatre unions interfalangeals distals (DIP II, DIP III, DIP IV i DIP V), les quatre unions interfalangeals proximals (PIP II, PIP III, PIP IV i PIP V), la unió interfalangeal del dit polze (IP), les cinc unions carpometacarpals excepte la del dit polze (CMC II, CMC III, CMC IV i CMCV).

D'altra banda les unions que poden realitzar moviments de flexió/extensió (F/E) i d'adducció/abducció (Ab/Ad) són les següents: les cinc unions metacarpofalangeals (MCP I, MCP II, MCP III, MCP IV i MCP V), la unió carpometacarpal del dit polze (CMC I).

Seguidament un cop conegudes les articulacions i els moviments que poden realitzar caldrà saber quins rangs de moviments [30] poden efectuar, o dit d'altre manera, quants graus es pot articular cadascuna d'elles.

- Rangs de moviments de les articulacions del dit polze:

Unió	Moviment	Mínim angle	Màxim angle
CMC	Adducció/Abducció	0 (contacte)	60
CMC	Extensió/Flexió	25	35
MCP	Extensió/Flexió	10 H*	55
MCP	Adducció/Abducció	0	60
IP	Extensió/Flexió	15 H*	80

- Rangs de moviments de les articulacions de la resta de dits:

Unió Dit	MCP (E/F)	PIP (E/F)	DIP (E/F)	MCP (Ab/Ad)
Índex	0/80	0/100	10H/90	13/42
Del cor	0/80	0/100	10H/90	8/35
Anular	0/80	0/100	20H/90	14/20
Petit	0/80	0/100	30H/90	19/33

* Moviment d'hiperextensió.

Cal destacar que aquests rangs de moviment són estàndards definits per *Tubiana et. Al (1996)* [30], s'ha de seguir un criteri ja que els rangs de moviment poden variar en funció dels anys de la persona, degut a la pèrdua de flexibilitat de l'aparell motor. També depèn de la persona ja que n'hi ha que superen aquests valors estàndards i d'altres que no poden realitzar aquests moviments angulars.

Per la creació d'un model calia establir uns valors límits i s'han cregut que aquests [30] eren els oportuns, perquè són els més utilitzats en els estudis de l'actualitat i perquè han estat contrastats al llarg dels anys.

Afegir finalment que els moviments de flexió/extensió i abducció/adducció del dit polze són definits en un pla perpendicular a la resta de dits, caldrà tenir-ho en compte al definir el moviments en la simulació.

2.2 MODEL PROPOSAT.

El model consisteix en fer una representació de la realitat mitjançant una aproximació el més semblant possible. Per tal de portar-ho a terme en la mà humana s'ha de fer prèviament un estudi intern com hem vist anteriorment i definir seguidament el model. El model que es proposa per tal de ser representat i simulat en computador més endavant és un model que consta de 25 graus de llibertat [31].

Els graus de llibertat són tots els moviments de translació o rotació en cadascun dels tres eixos de l'espai de tres dimensions. Un grau de llibertat independent permet el moviment, però un cop és determinat com a paràmetre es pot definir la posició del mecanisme.

Un mecanisme amb un alt nombre de graus de llibertat com és el cas del model de mà, que en té 25, passa a ser un sistema complex i difícil de definir, però a la vegada més precís. Per aquest motiu la gran part dels estudis anteriors han definit models amb menys graus de llibertat: model de mà robòtica de 16 graus de llibertat [25], evolució del model anterior a mà amb 18 graus de llibertat [32] o model desenvolupat per la universitat de Keio del Japó amb 20 graus de llibertat [26]. Com podem veure la tendència és intentar definir models amb el major nombre de graus de llibertat, per tenir una bona similitud amb la realitat.

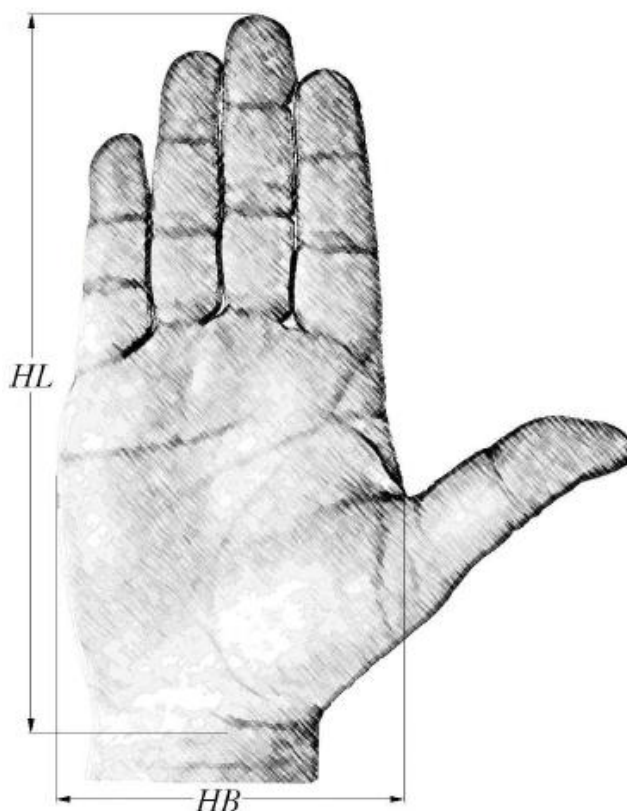
En base a aquests estudis realitzats i models proposats s'han creat diversos prototips de mans robòtiques, algunes de les quals s'han comercialitzat. En són exemples la mà NTU [33], la mà prostètica HIT/DLR [34] o una mà robòtica desenvolupada per la universitat Doshisha de Kyoto [35].

Afegir que el model es centra en els ossos i les unions d'aquests, és a dir, les articulacions; per tant, el múscles i teixits no són objectes d'estudi. Això és degut a la gran complexitat que presenta la mà humana i per tal de fer representacions s'han de realitzar algunes simplificacions com és el cas. També, afegir que tampoc comprèn els moviments i posicions del canell; únicament se centra amb el palmell i dits.

2.2.1 MIDES DELS OSSOS

Les dimensions dels ossos de la mà a l'igual que el rang de moviments, com hem s'ha explicat anteriorment, poden variar considerablement en funció de la persona. Per aquest motiu s'agafen valors estàndards o es fan aproximacions. En aquest treball la dimensió que s'avaluarà dels ossos serà únicament la longitud [28] i per determinar-la es farà mitjançant un seguit de fórmules [36] [37] que donen uns resultats molt exactes i propers al valor real de longitud.

Les fórmules emprades permeten calcular les longituds de forma acurada de tots els ossos de la mà. Per portar a terme aquests càlculs tan sols cal saber l'amplada (HB) i la llargada (HL) de la mà, magnituds a mesurar segons s'observa a la sota present fotografia.



Font: *Virtual Human Hand*, research article.

Els vuit ossos del canell tenen una geometria arrodonida i no són objecte d'estudi, en canvi, els altres dinous ossos que formen l'estructura de la mà i tenen una geometria allargada sí que es poden avaluar amb les fórmules.

Es presenta a continuació els procediments matemàtics de càlcul que cal seguir per conèixer les longitud dels dinous ossos següents:

Les fórmules que permeten calcular la longitud dels metacarps són:

Dit	Fórmula	Nomenclatura
Polze	$0.251 \cdot HL$	I_{I-1}
Índex	$\sqrt{(0.374 \cdot HL)^2 + (0.126 \cdot HB)^2}$	I_{II-1}
Del cor	$0.373 \cdot HL$	I_{III-1}
Anular	$\sqrt{(0.336 \cdot HL)^2 + (0.077 \cdot HB)^2}$	I_{IV-1}
Petit	$\sqrt{(0.295 \cdot HL)^2 + (0.179 \cdot HB)^2}$	I_{V-1}

Les fórmules que permeten calcular la longitud de les falanges són:

- Falange proximal:

Dit	Fórmula	Nomenclatura
Polze	$0.196 \cdot HL$	I_{I-2}
Índex	$0.265 \cdot HL$	I_{II-2}
Del cor	$0.277 \cdot HL$	I_{III-2}
Anular	$0.259 \cdot HL$	I_{IV-2}
Petit	$0.206 \cdot HL$	I_{V-2}

- Falange intermèdia:

Dit	Fórmula	Nomenclatura
Polze*	-	-
Índex	$0.143 \cdot HL$	I_{II-3}
Del cor	$0.170 \cdot HL$	I_{III-3}
Anular	$0.165 \cdot HL$	I_{IV-3}
Petit	$0.117 \cdot HL$	I_{V-3}

* El dit polze no presenta la falange intermèdia, està compost només per la proximal i la distal.

- Falange distal:

Dit	Fórmula	Nomenclatura
Polze	$0.158 \cdot HL$	I_{I-3}
Índex	$0.097 \cdot HL$	I_{II-4}
Del cor	$0.108 \cdot HL$	I_{III-4}
Anular	$0.107 \cdot HL$	I_{IV-4}
Petit	$0.093 \cdot HL$	I_{V-4}

La notació *I*, *II*, *III*, *IV* i *V* identifica cadascun dels cinc dits de la mà: polze, índex, del cor, anular i petit; en l'ordre corresponent.

2.2.2 REPRESENTACIÓ AMB PARÀMETRES D-H

Per portar a terme la representació del model cal definir les unions que poden ser de moltes tipologies diferents, però en el cas del modelatge d'una mà són aplicades sempre les unions de revolució. Aquestes unions de revolució es defineixen mitjançant els paràmetres de Denavit-Hartenberg [38], D-H, que s'utilitzen com a marcs de referència en sistemes articulats. Aquest mètode consisteix en realitzar una representació minimalista del mecanisme, procés clau en els últims anys per al desenvolupament de la robòtica.

Els paràmetres D-H permeten resoldre la cinemàtica directa a partir la translació i rotació dels eixos x i z .

Aplicació del mètode

S'han de col·locar dos sistemes de coordenades XYZ per cada grau de llibertat, un a la base i un altre a l'extrem de la barra, que s'utilitza per fer la representació. La relació existent entre els dos sistemes de coordenades XYZ es pot determinar mitjançant els quatre paràmetres següents:

- Θ : Angle girant al voltant de z entre els eixos x dels dos sistemes de coordenades.
- a : distància al llarg de la normal comú (entre la normal del primer sistema i l'origen del segon seguint la direcció seva normal), és el radi de rotació sobre z .
- d : distància al llarg de l'eix z des l'origen fins la normal comú de l'altre sistema de coordenades.
- α : rotació al voltant de la nova x per col·locar la nova z en la posició desitjada.

El procediment per l'obtenció de tots els paràmetres és el següent:

1. Enumerar les barres: S'anomenarà "0" el terra, o base fixa on s'ancora el mecanisme o robot, "1" a la primera barra mòbil, etc.
2. Enumerar les articulacions: La número "1" serà el primer grau de llibertat, "n" l'últim.

3. Localitzar l'eix de cada articulació: Pels parells de revolució serà l'eix de gir, pels prismàtics l'eix al llarg del qual es mou la barra.
4. Eixos Z: Comencem a col·locar els sistemes XYZ. Situem Z_{i-1} en els eixos de les articulacions i , amb $i=1, \dots, n$. És a dir, Z_0 va sobre l'eix de la 1a articulació, Z_2 va sobre l'eix del 2n grau de llibertat, etc.
5. Sistema de coordenades 0: Es situa el punt d'origen en qualsevol punt al llarg de Z_0 . La orientació de X_0 i Y_0 pot ser arbitrària, sempre que es respecti que XYZ siguin perpendiculars entre si.
6. Resta de sistemes: Per la resta de sistemes $i=1, \dots, N-1$, s'ha de col·locar l'origen en la intersecció de Z_i amb la normal comú a Z_i i Z_{i+1} . En cas de que es tallin aquests dos eixos, col·locar-ho en el punt de tall i en cas de que siguin paral·lels, col·locar-ho en algun punt de l'articulació $i+1$.
7. Eixos X: Cada X_i va en direcció de la normal comú Z_{i-1} , en la direcció de Z_{i-1} cap a Z_i .
8. Eixos Y: Un cop situats els eixos Z i X, els Y tenen la direcció determinada per la restricció de que XYZ han de ser perpendiculars.
9. Sistema de l'extrem del robot o mecanisme de barres: El n-èssim sistema XYZ es col·loca en l'extrem de la barra amb el seu eix Z paral·lel a Z_{n-1} i X i Y en qualsevol direcció vàlida.
10. Angles teta: Cada θ_i és l'angle des de X_{i-1} fins X_i girant al voltant de Z_i .
11. Distàncies d: Cada d_i és la distància des del sistema XYZ_{i-1} fins la intersecció de les normals comuns de Z_{i-1} fins Z_i , al llarg de Z_{i-1} .
12. Distàncies a: Cada a_i és la longitud de la normal comú.
13. Angles alfa: Angle que s'ha de girar Z_{i-1} per arribar a Z_i , girant al voltant de X_i .
14. Matrius individuals: Cada barra defineix una matriu de transformació:

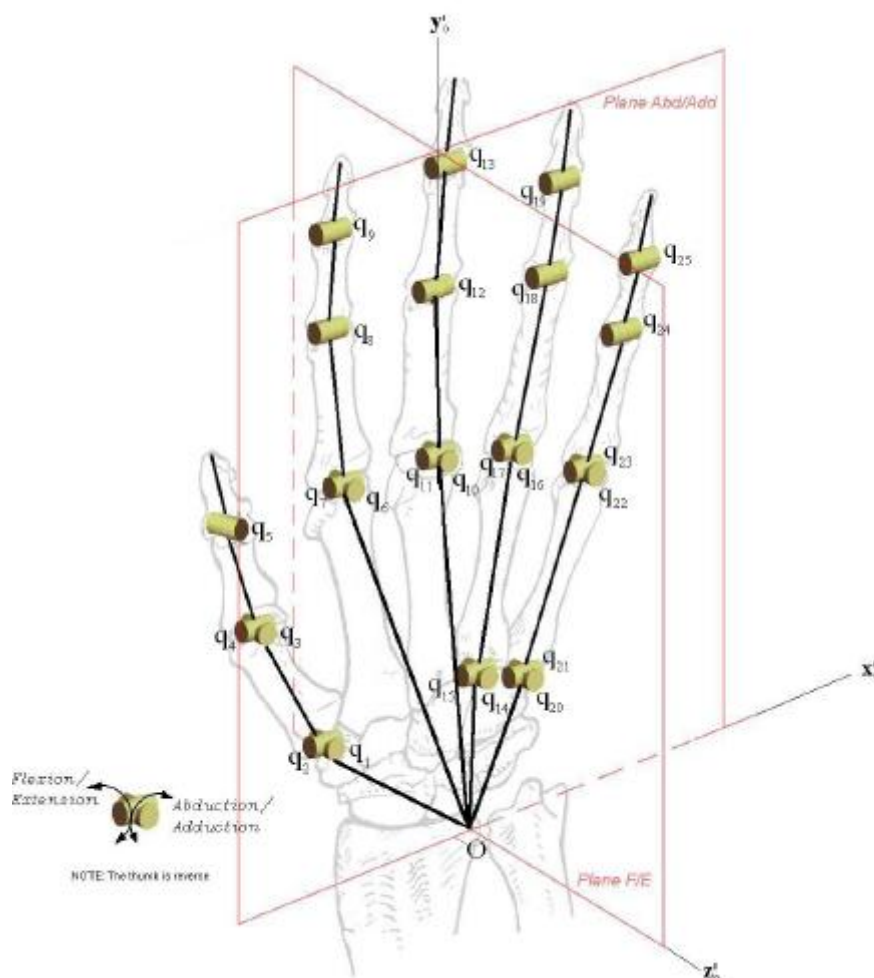
$${}^{i-1}A_i = \begin{pmatrix} \cos \theta_i & -\cos \alpha_i \sin \theta_i & \sin \alpha_i \sin \theta_i & a_i \cos \theta_i \\ \sin \theta_i & \cos \alpha_i \cos \theta_i & -\sin \alpha_i \cos \theta_i & a_i \sin \theta_i \\ 0 & \sin \alpha_i & \cos \alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

15. Transformació total: La matriu de transformació total que relaciona la base del robot o mecanisme amb la seva eina o extrem és la multiplicació de totes les matrius:

$$T = {}^0A_1 \cdot {}^1A_2 \cdot \dots \cdot {}^{n-1}A_n$$

Aquest procediment definit anteriorment, que s'ha de seguir per calcular la conversió D-H, s'aplicarà al següent mecanisme. Aquest mecanisme representa l'estructura de la mà i consta de 25 graus de llibertat situats en les diferents articulacions.

La conversió D-H com hem vist ens permetrà conèixer els quatre paràmetres (θ , d , a i α) de cada grau de llibertat que determinen la cinemàtica directa del mecanisme.



Font: *Virtual Human Hand*, research article.

El resultat del procediment anterior, de 15 passos, aplicat a l'estructura dels 25 graus es troba a continuació. Aquests resultats són els quatre paràmetres, que defineixen la cinemàtica directe del mecanisme, per cadascun dels 25 graus de llibertat.

Paràmetres dels cinc graus de llibertat del dit polze:

	θ_i	d_i	a_i	α_i
1	$q_1 + \frac{\pi}{2}$	0	0	$\frac{-\pi}{2}$
2	q_2	0	l_{I-1}	$\frac{\pi}{2}$
3	q_3	0	0	$\frac{-\pi}{2}$
4	q_4	0	l_{I-2}	$\frac{\pi}{2}$
5	q_5	0	l_{I-3}	$\frac{-\pi}{2}$

Paràmetres dels quatre graus de llibertat del dit índex:

	θ_i	d_i	a_i	α_i
6	$q_6 + \frac{\pi}{2}$	0	0	$\frac{-\pi}{2}$
7	q_7	0	l_{II-2}	0
8	q_8	0	l_{II-3}	0
9	q_9	0	l_{II-4}	0

Paràmetres dels quatre graus de llibertat del dit del cor:

	θ_i	d_i	a_i	α_i
10	$q_{10} + \frac{\pi}{2}$	0	0	$-\frac{\pi}{2}$
11	q_{11}	0	I III-2	0
12	q_{12}	0	I III-3	0
13	q_{13}	0	I III-4	0

Paràmetres dels sis graus de llibertat del dit anular:

	θ_i	d_i	a_i	α_i
14	$q_{14} + \frac{\pi}{2}$	0	0	$-\frac{\pi}{2}$
15	q_{15}	0	I IV-1	$\frac{\pi}{2}$
16	q_{16}	0	0	$-\frac{\pi}{2}$
17	q_{17}	0	I IV-2	0
18	q_{18}	0	I IV-3	0
19	q_{19}	0	I IV-4	0

Paràmetres dels sis graus de llibertat del dit petit:

	θ_i	d_i	a_i	α_i
20	$q_{20} + \frac{\pi}{2}$	0	0	$-\frac{\pi}{2}$
21	q_{21}	0	l_{V-1}	$\frac{\pi}{2}$
22	q_{22}	0	0	$-\frac{\pi}{2}$
23	q_{23}	0	l_{V-2}	0
24	q_{24}	0	l_{V-3}	0
25	q_{25}	0	l_{V-4}	0

En les taules anteriors q_1, q_2, \dots, q_n és l'angle de cadascun dels diferents graus de llibertat. En canvi, les $l_I, l_{II}, l_{III}, l_{IV}$ i l_V signifiquen les longituds dels ossos dels dits polze, índex, del mig, anular i petit, corresponentment. El segon subíndex indica quina barra del dit del model es refereix; començant per l'os més proper al canell i anant cap a la punta del dit

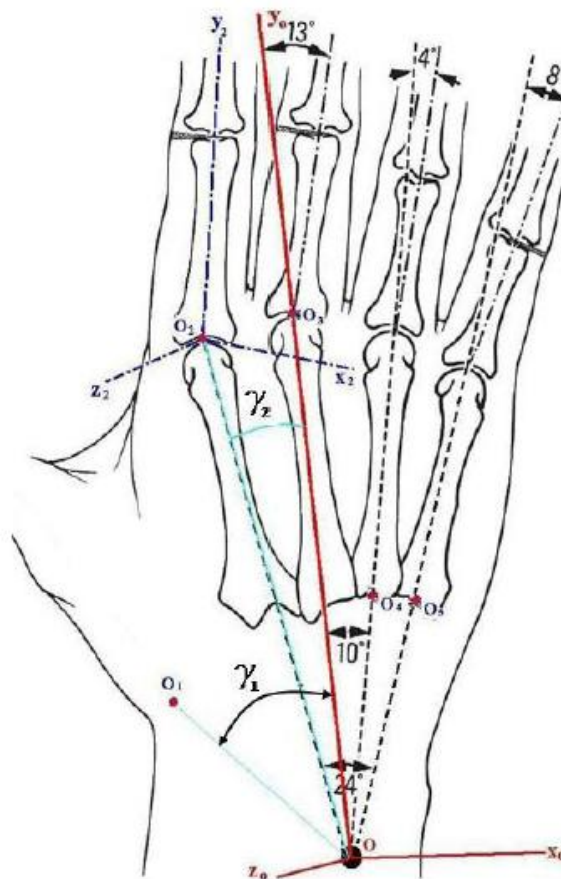
Amb les taules anteriors D-H de cada dit, podem saber els quatre paràmetres de cadascun dels graus de llibertat podem determinar la posició dels dits.

2.3 TRANSFORMACIÓ A COORDENADES GLOBAIS

En l'apartat anterior hem observat els paràmetres D-H per a cadascun dels cinc dits de la mà, els quals es tracten de coordenades locals basades en cada dit de manera independent. A continuació s'analitza com transformar les coordenades locals a coordenades globals amb la base situada al canell.

En les coordenades locals cada dit tenia el seu propi origen (O_1, O_2, O_3, O_4 i O_5) de coordenades XYZ ($x_1 y_1 z_1, x_2 y_2 z_2, x_3 y_3 z_3, x_4 y_4 z_4$ i $x_5 y_5 z_5$), en canvi en les coordenades globals, com s'ha vist, tots els dits tenen el mateix origen (O) de coordenades XYZ ($x_0 y_0 z_0$), situat al centre del canell.

En la següent imatge es poden veure els angles γ_j ($j = 1, 2, \dots, 5$) formats per la recta OO_j i l'eix y_0 .



Font: *Virtual Human Hand*, research article.

Els valors generals aproximats de γ_j són els següents: $\gamma_1 = 40^\circ$, $\gamma_2 = 7^\circ$, $\gamma_3 = 13^\circ$, $\gamma_4 = 14^\circ$ i $\gamma_5 = 25^\circ$.

El procediment de càlcul dels cinc valors angulars ha consistit primerament en col·locar la mà en la posició adequada i dibuixar l'eix y_0 en el dit del cor seguint la direcció del metacarp d'aquest dit. Llavors s'ha dibuixat els eixos x_0 i z_0 , perpendiculars a l'eix y_0 i perpendiculars entre si. A continuació s'han localitzat els cinc orígens de coordenades locals (O_1, O_2, O_3, O_4 i O_5) amb els seus eixos xyz i s'han mesurat els angles que hi havia entre l'eix y_0 i l'eix y_j de cada dit, que es trobava en la recta OO_j i que també formava un cert angle.

Exemples del càlcul d'alguns angles:

$$\gamma_3 = 0^\circ + 13^\circ = 13^\circ.$$

$$\gamma_4 = 10^\circ + 4^\circ = 14^\circ.$$

$$\gamma_5 = 17^\circ + 8^\circ = 25^\circ.$$

A continuació veurem com calcular la matriu de transformació [35] [36] per a cadascun dels 5 dits, que permet passar l'origen de coordenades del seu punt local al origen de coordenades global:

La matriu transformació és

$${}^0H_i = \begin{bmatrix} x_{iL} & y_{iL} & z_{iL} & l_{OOi} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Pel dit polze la projecció de l'eix x local en coordenades x globals, la projecció de l'eix y local en coordenades globals, la projecció del z en globals i la distància de l'origen de coordenades local a l'origen global són:

$$x_{1L} = \begin{bmatrix} \cos \gamma_1 \\ \sin \gamma_1 \\ 0 \end{bmatrix} ; \quad y_{1L} = \begin{bmatrix} -\sin \gamma_1 \\ \cos \gamma_1 \\ 0 \end{bmatrix} ; \quad z_{1L} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} ; \quad l_{OO1} = \begin{bmatrix} -l_{OO1} \sin \gamma_1 \\ l_{OO1} \cos \gamma_1 \\ 0 \end{bmatrix}$$

La unió de totes aquestes dóna la matriu transformació del dit polze:

$${}^0H_1 = \begin{bmatrix} \cos \gamma_1 & -\sin \gamma_1 & 0 & -l_{OO1} \sin \gamma_1 \\ \sin \gamma_1 & \cos \gamma_1 & 0 & l_{OO1} \cos \gamma_1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Pel dit índex la projecció de l'eix x local en coordenades x globals, la projecció de l'eix y local en coordenades globals, la projecció del z en globals i la distància de l'origen de coordenades local a l'origen global són:

$$x_{2L} = \begin{bmatrix} \cos \gamma_1 \\ -\sin \gamma_2 \\ 0 \end{bmatrix} ; \quad y_{2L} = \begin{bmatrix} \sin \gamma_2 \\ \cos \gamma_2 \\ 0 \end{bmatrix} ; \quad z_{2L} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} ; \quad l_{002} = \begin{bmatrix} -l_{002} \sin \gamma_2 \\ l_{002} \cos \gamma_2 \\ 0 \end{bmatrix}$$

La unió de totes aquestes dóna la matriu transformació del dit índex:

$${}^0H_2 = \begin{bmatrix} \cos \gamma_2 & \sin \gamma_2 & 0 & -l_{002} \sin \gamma_2 \\ -\sin \gamma_2 & \cos \gamma_2 & 0 & l_{002} \cos \gamma_2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

La matriu transformació del dit del mig serà:

$${}^0H_3 = \begin{bmatrix} \cos \gamma_3 & \sin \gamma_3 & 0 & 0 \\ -\sin \gamma_3 & \cos \gamma_3 & 0 & l_{003} \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

En aquest cas la diferència d'un origen a l'altre només hi és en direcció y.

La matriu transformació del dit del anular serà:

$${}^0H_4 = \begin{bmatrix} \cos \gamma_4 & \sin \gamma_4 & 0 & l_{004} \sin \gamma_4 \\ -\sin \gamma_4 & \cos \gamma_4 & 0 & l_{004} \cos \gamma_4 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

La matriu transformació del dit del petit serà:

$${}^0H_5 = \begin{bmatrix} \cos \gamma_5 & \sin \gamma_5 & 0 & l_{005} \sin \gamma_5 \\ -\sin \gamma_5 & \cos \gamma_5 & 0 & l_{005} \cos \gamma_5 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Hem observat la direcció de l'eix z és la mateixa que en locals, per tant la projecció és de valor 1.

2.4 CINEMÀTICA

Pel que fa a la cinemàtica del model trobem dues possibilitats d'estudi, la cinemàtica directe i la cinemàtica inversa, que es mostren seguidament.

2.4.1 CINEMÀTICA DIRECTE.

Aquesta cinemàtica ens permet calcular les posicions de les puntes dels dits a partir de l'amplada (HB) i la llargada (HL) de la mà i els angles dels vint-i-cinc graus de llibertat (q_1, q_2, \dots, q_{25}).

La solució per aquest tipus de cinemàtica és directe si s'utilitzen les taules D-H que s'han vist anteriorment en l'apartat 2.2.2. Sabent l'angle d'un grau de llibertat, mitjançant les taules D-H es poden trobar els quatre paràmetres (θ, α, d, a) que defineixen la matriu transformació de la barra analitzada.

Aquest és el tipus de cinemàtica que es podria aplicar a la simulació del moviment 3D del present treball, ja que es coneixen els angles dels graus de llibertat, obtinguts a partir de les mesures d'un guant amb sensors. Si fos requerit, coneixent aquests valors dels graus es podria calcular la posició de la punta de cadascun dels dits de la mà.

2.4.2 CINEMÀTICA INVERSA.

La cinemàtica inversa permet determinar els angles dels vint-i-cinc graus de llibertat (q_1, q_2, \dots, q_{25}) a partir de l'amplada (HB) i la llargada de la mà (HL), juntament amb les posicions de les puntes dels dits.

Per aquesta cinemàtica la solució no és directe de les taules D-H que d'hsn vist anteriorment, a l'apartat 2.2.2, i caldrà resoldre equacions no lineals. Aquest tipus de cinemàtica no s'utilitzarà en la simulació del moviment en 3D, perquè no es disposa de les posicions de les puntes dels dits, sinó que es disposa dels angles dels graus de llibertat.

3 REPRESENTACIÓ DE LA MÀ EN CAD 3D

3.1 PLATAFORMA MAKEHUMAN

El programa MakeHuman [39] és una eina de disseny que simplifica la creació de persones humanes virtuals usant una interfície gràfica d'usuari. Aquesta és una branca específica del camp general del modelatge en tres dimensions, 3D. L'objectiu d'aquesta plataforma és permetre crear humans virtuals amb una aparença molt propera a la realitat amb uns simples clics de ratolí i exportar-ho o renderitzar-ho en altres projectes.

Els humans són creats a partir de la manipulació de diferents controls i una sèrie de paràmetres que determinen l'aparença del subjecte creat. Aquests es classifiquen en macro paràmetres i detalls. Els primers són la base: sexe, edat, pes, alçada i ètnia; en canvi, els detalls són per definir ja aspectes amb més precisió, com podria ser la llargada dels dits, per exemple.

En aquest treball aquest programa permetrà crear una mà virtual base a partir de la qual es definirà l'estructura exacta amb què es vol treballar. Per tant el que permetrà és estalviar feina de modelatge amb el programa de disseny, ja que per assolir l'exactitud que proporciona el MakeHuman es requeriria una elevada quantitat d'hores de modelatge i possiblement no s'aconseguiria obtenir un model tant precís.

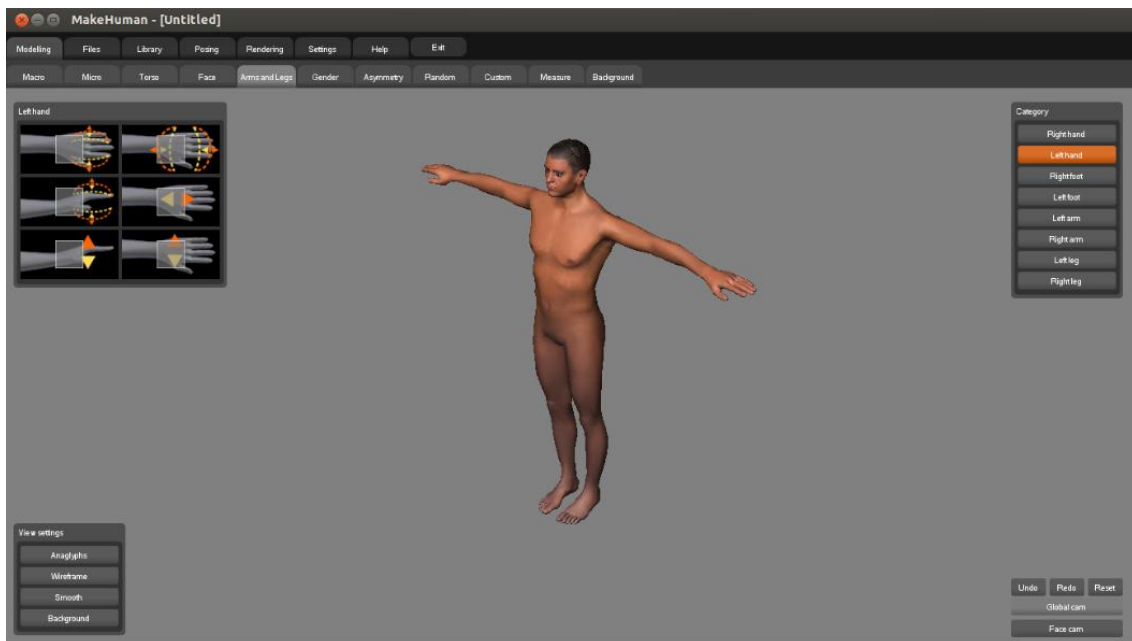
No servirà pel treball l'estructura òssia de la mà que proporciona, ja que és molt simplificada i poc exacte, es redefinirà des de zero. D'altra banda, sí que s'aprofita l'aspecte extern del cos creat amb aquest software.

A part de ser un software potent i complex, cal destacar que es troba sota llicència GPL, llicència pública general, és a dir, la còpia, distribució i obtenció del programari de manera lliure està permesa.

Aquest programari és compatible amb Linux, Windows i Mac OS.

En la pàgina següent del treball es pot observar una captura de pantalla on apreciar l'aparença de la interfície d'usuari del programa, que es caracteritza per ser molt orientativa i de fàcil ús.

Aparença de la interfície d'usuari del software MakeHuman:



Font: Captura de pantalla durant el modelat.

El programari MakeHuman té la virtut que permet elaborar i guardar els models en múltiples formats com *.bs*, *.dae* o *.obj*. En el cas del present treball s'ha elaborat el model en format *.obj* i s'ha importat al software de disseny Blender³⁰ que s'avalua a continuació.

3.2 SOFTWARE BLENDER

El software Blender [40] ha estat l'eina que s'ha utilitzat en aquest treball per portar a terme el modelatge i simulació del moviment. El Blender és un programa informàtic lliure de disseny assistit per computador en tres dimensions, CAD 3D, que permet l'edició i modelatge d'elements tridimensionals i la seva posterior animació.

En aquest treball s'ha emprat per importar un model de mà humana, creat amb el software MakeHuman, i posteriorment editar-lo i modelar-ne l'estructura interna amb la forma desitjada, que no era altre que el model de 25 graus de llibertat que s'ha definit anteriorment.

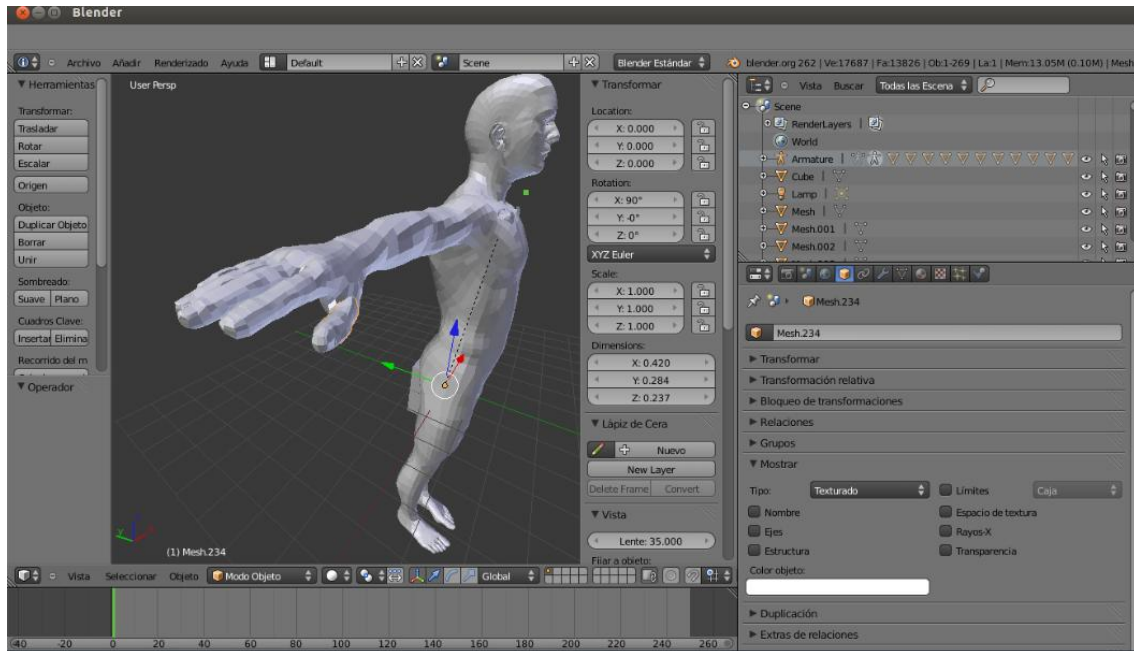
Per realitzar aquest procés de redissenyat de l'estructura interna de la mà i animació amb Blender s'ha requerit usar una gran varietat, de les moltes opcions d'ús que presenta aquest software. La seva interfície gràfica és molt complexa, ja que disposa de multitud d'opcions i barres d'eines, però és molt útil, perquè es permet adaptar-la a l'usuari del programa.

Les barres d'eines més utilitzades en el procés de modelatge han estat principalment la d'estructura òssia i la del mallatge. La primera barra mencionada ha permès eliminar l'estructura bàsica original provinent del Makehuman i modelar una estructura òssia com la d'una mà real, amb les corresponents falanges, metacarps i unions. En canvi la barra de mallatge ha estat utilitzada per lligar el volum o aparença externa de la mà a l'estructura òssia interna de tal manera han passat de ser dos elements independents a dos elements estretament relacionats.

En la simulació del moviment de la mà, les barres d'eines més utilitzades han estat la render, que permet realitzar fotogrames, i la d'animació, que permet observar el desenvolupament del moviment.

A part de ser un programa lliure, la seva potent capacitat de disseny i animació ha estat un factor determinant en el seu ús que ha estat en auge al llarg dels últims anys. Actualment és utilitzat per molts dissenyadors, enginyers i fins i tot creadors de pel·lícules virtuals animades.

En la imatge següent es pot veure la interfície d'usuari de Blender, la qual és considerablement complexa però permet determinar un gran nombre de paràmetres i diferents aspectes del modelatge i animació.



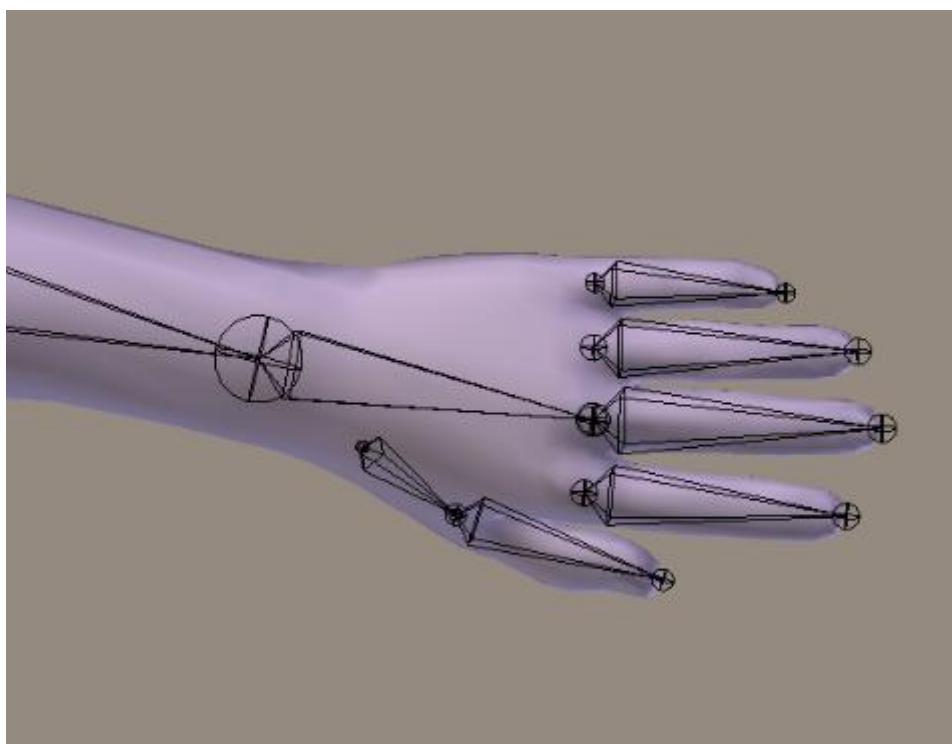
Font: Captura de pantalla durant el modelatge.

3.3 ESTRUCTURA BASE

L'estructura base de la representació és l'estructura inicial a partir de la qual es comença a treballar el modelatge. Aquesta estructura es podria haver realitzat des de zero, però s'ha aprofitat l'ús de l'eina MakeHuman que permet crear una representació humana molt ben definida.

El model bàsic de cos humà, o mà humana en aquest cas, creat en MakeHuman destaca per tenir una aparença externa molt bona i propera a la realitat; ara bé, l'estructura interna és molt bàsica i simple.

En la següent fotografia es pot veure una representació capturada per pantalla de l'estructura bàsica de la mà que ens aporta en MakeHuman a partir de la qual s'ha començat a treballar el modelat.



Font: Captura de pantalla prèvia al modelatge.

Com es pot veure l'estructura òssia és molt simple i llunyana a la realitat. Per aquest motiu s'ha eliminat aquesta estructura interna i s'ha modelat una estructura interna nova, que pot veure en el següent apartat 3.4, i que conté totes les falanges i metacarps de la mà amb les corresponents unions que determinen els 25 graus de llibertat que defineixen la mà.

En aquesta imatge que hi ha a continuació es pot apreciar l'aspecte extern del model a partir del qual s'ha començat el modelat. Com es pot veure és un té un aspecte simple el qual ha de ser estructurat internament i animat. Malgrat la seva simplicitat és un bon punt de partida per modelar i animar, com es veurà més endavant.



Font: Captura de pantalla del model base sense estructura.

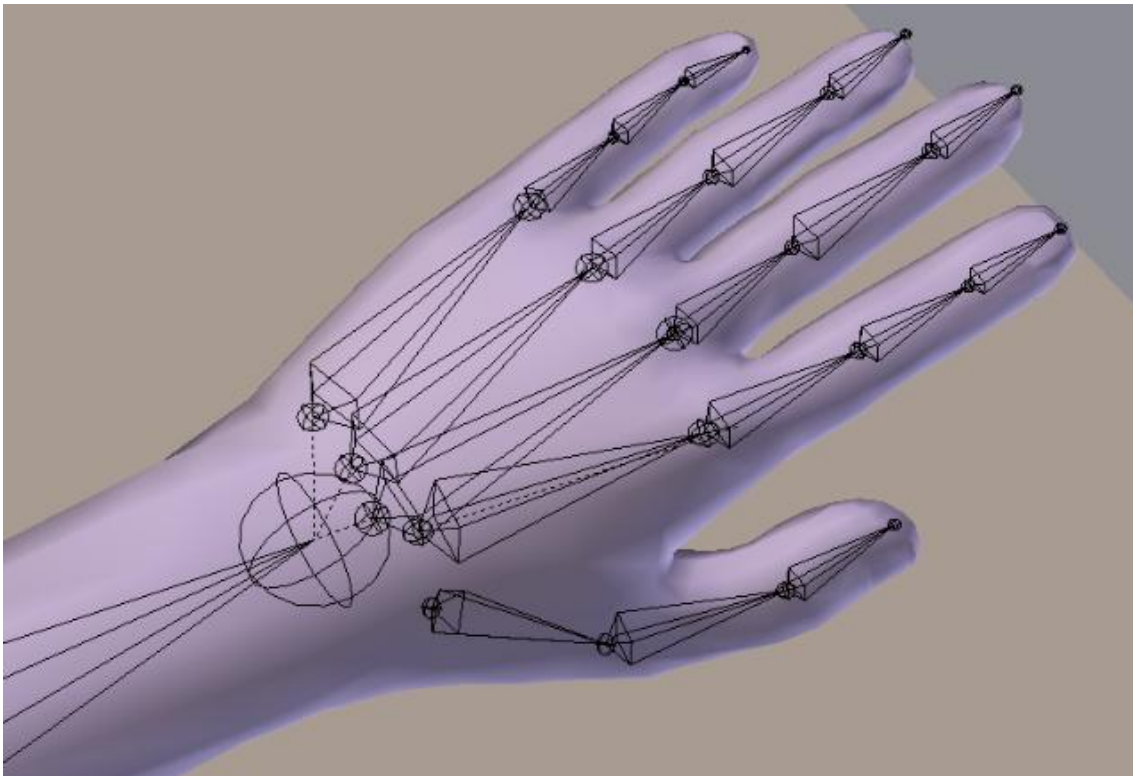
3.4 ESTRUCTURA MODELADA

L'estructura interna de la mà que s'ha pretès modelar està composta pels cinc metacarps i les catorze falanges dels dits. Aquesta estructura s'ha representat des de zero ja que l'estructura del model base sobre el que s'ha iniciat el modelatge era molt deficient i llunyana a la realitat.

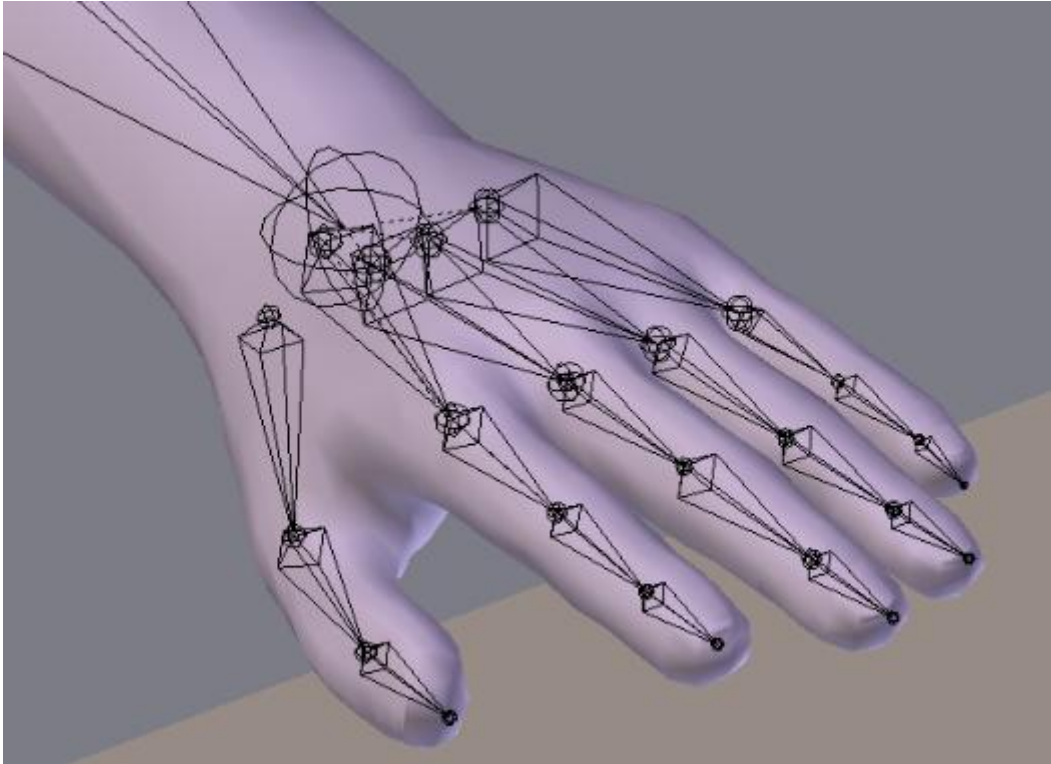
La finalitat d'aquesta part del treball no era altre que representar l'estructura òssia que s'ha definit anteriorment que està definida per 25 graus de llibertat. Llavors es pretindrà simular el moviment determinant cadascun dels graus de llibertat en un instant de temps determinat.

L'estructura s'ha modelat amb el la barra d'eines d'estructura òssia que permet crear una estructura que és representada amb geometries prismàtiques.

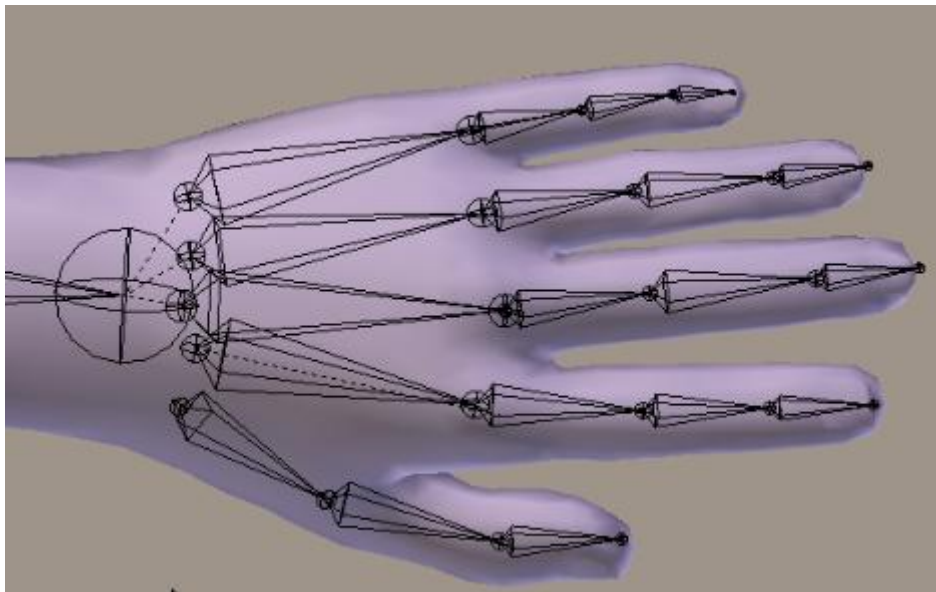
A continuació es pot apreciar l'aparença del modelat que s'ha realitzat i que representa l'estructura interna del model de mà humana:



Font: Captura de pantalla durant el modelat estructural



Font: Captura de pantalla durant el modelat estructural



Font: Captura de pantalla durant el modelat estructural

3.4.1 UNIONS ÒSSIES

Cada unió òssia de l'estructura modelada s'ha definit d'una manera determinada en funció dels graus de llibertat. Totes les unions entre falanges dels dits, excepte el polze, tenen un únic grau de llibertat i per tant s'han aplicat

restriccions als altres moviments relatius. En canvi totes les unions on hi intervenen els metacarps tenen dos graus de llibertat cadascuna i per tant s'hi ha aplicat menys restriccions per tal de conservar aquests dos possibles moviments. Pel que fa el dit polze les unions on intervé el metacarp tenen dos graus de llibertat i la unió entre falanges una, ara bé, l'orientació dels orígens de coordenades es troba inclinada 45° , ja que la flexió del dit és pràcticament perpendicular les flexions dels altres quatre dits.

Destacar que els metacarps dels dits índex i del cor no tenen mobilitat, són fixes. En canvi els metacarps dels dit polze, anular i menovell tenen dos graus de llibertat a la seva base i es poden articular, tan en flexió/extensió com en abducció/adducció. Aquestes apreciacions es poden observar en el model descrit en l'apartat 2.2.2 just abans de les taules D-H.

3.4.2 DIMENSIONS

Les dimensions dels ossos són un aspecte que incideix visualment en la representació realitzada del modelatge, però no conceptualment, ja que l'estructura òssia no es veu alterada ni limitada pels canvis de dimensions.

Les dimensions utilitzades han estat uns valors estàndards, però que podrien variar sense cap problema i la validesa de l'estudi continuaria existint. Seguiria sent vàlid perquè en la cinemàtica directe, el càlcul de les posicions de les puntes dels dits, a partir dels valors dels graus de llibertat, ja tenen en compte les dimensions dels ossos. Aquest fet es pot comprovar en les taules de paràmetres D-H, en l'apartat 2.2.2. El mateix succeeix en la cinemàtica inversa, els càlculs ja tenen en compte les dimensions dels ossos.

Les dimensions del ossos que s'avaluen són les longituds i com ja s'ha vist en l'apartat 2.2.1 es calculen a partir de l'amplada (HB) i la llargada de la mà (HL).

En el modelatge s'han utilitzat les mides $HB = 82 \text{ mm}$ i $HL = 187 \text{ mm}$, que ens proporcionen després dels càlculs (Bucholz, 1992) [36] les longituds següents:

Os	Dit	Fórmula	Nomenclatura	Longitud
Metacarp				
	Polze	$0.251 \cdot HL$	I_{I-1}	47.9 mm
	Índex	$\sqrt{(0.374 \cdot HL)^2 + (0.126 \cdot HB)^2}$	I_{II-1}	70.7 mm
	Del cor	$0.373 \cdot HL$	I_{III-1}	69.7 mm
	Anular	$\sqrt{(0.336 \cdot HL)^2 + (0.077 \cdot HB)^2}$	I_{IV-1}	63.1 mm
	Petit	$\sqrt{(0.295 \cdot HL)^2 + (0.179 \cdot HB)^2}$	I_{V-1}	57.1 mm
Falange proximal				
	Polze	$0.196 \cdot HL$	I_{I-2}	36.6 mm
	Índex	$0.265 \cdot HL$	I_{II-2}	49.5 mm
	Del cor	$0.277 \cdot HL$	I_{III-2}	51.8 mm
	Anular	$0.259 \cdot HL$	I_{IV-2}	48.4 mm
	Petit	$0.206 \cdot HL$	I_{V-2}	35.5 mm
Falange intermèdia				
	Índex	$0.143 \cdot HL$	I_{II-3}	26.7 mm
	Del cor	$0.170 \cdot HL$	I_{III-3}	31.8 mm
	Anular	$0.165 \cdot HL$	I_{IV-3}	30.8 mm
	Petit	$0.117 \cdot HL$	I_{V-3}	21.8 mm
Falange distal				
	Polze	$0.158 \cdot HL$	I_{I-3}	29.5 mm
	Índex	$0.097 \cdot HL$	I_{II-4}	18.1 mm
	Del cor	$0.108 \cdot HL$	I_{III-4}	20.2 mm
	Anular	$0.107 \cdot HL$	I_{IV-4}	20.0 mm
	Petit	$0.093 \cdot HL$	I_{V-4}	17.4 mm

4 PRESA DE DADES

4.1 ARA TEST

L' *Action Research Arm Test*, anomenat també ARA Test, va ser desenvolupat per Lyle [41] basant-se en un test predecessor anomenat UEFT, *Upper Extremity Function Test*, que va ser desenvolupat per Carroll [42]. Lyle va simplificar el test anterior ja que per portar-lo a terme requeria més d'una hora i la majoria de pacients del test són persones afectades per malalties que no poden suportar un llarg temps d'anàlisi. Lyle també hi va aplicar l'escala Guttman que permet simplificar els procediments de mesura [43] i el va subdividir en 4 breus tests.

De tal manera que l'ARA Test està constituït per un seguit de 4 subtests que consisteixen en realitzar diferents moviments amb la mà i el braç per tal de determinar-ne la mobilitat d'aquests. Els moviments consisteixen en agafar objectes de geometries diverses i col·locar-los en posicions i orientacions determinades. Aquests tests són: *grasp*, *grip*, *pinch* i *gross movement*; traduïts per cinc-dits-garra, presa cilíndrica, pinça, moviments grollers.

El material requerit per portar a terme el test és el següent:

- Una cadira.
- Una maleta específica del test.
- Quatre cubs de fusta.
- Dos gots de plàstic
- Una pilota de criquet*:
- Dos tubs d'acer.
- Una anella amb mànec.
- Prisma de metall.
- Una bala de vidre.

* La pilota de criquet ha estat reemplaçada per una pilota de tennis en l'equipament del test present a l'hospital Althaia de Manresa on s'han efectuat les proves amb els pacients.

Les mides del material mencionat que forma el test són les següents:

Material	Mida
Cub de fusta 1	10 centímetres de costat
Cub de fusta 2	7.5 centímetres de costat
Cub de fusta 3	5 centímetres de costat
Cub de fusta 4	2.5 centímetres de costat
Pilota de criquet	7.5 centímetres de diàmetre
Prisma de metall	10 x 2.5 x 1 centímetres
Tub d'acer 1	2.25 centímetres de diàmetre per 16 de llarg
Tub d'acer 2	1 centímetre de diàmetre per 16 de llarg
Bala de vidre	6 mil·límetres de diàmetre
Anella amb mànec	4 centímetres de diàmetre i 12 de mànec

Aquestes mides han estat verificades personalment el dia de la realització de les fotografies representatives que hi ha a continuació.

Seguidament es poden veure dues imatges de la maleta i tots els objectes que constitueixen l'ARA Test del centre hospitalari Althaia de Manresa que s'aplica a pacients afectats per diferents tipologies d'ictus.



Font: Captura realitzada personalment al centre hospitalari Althaia de Manresa.



Font: Captura realitzada personalment al centre hospitalari Althaia de Manresa.

Les fotos van ser realitzades el 18 de març de 2013 amb la presència i autorització de la metgessa del Servei de rehabilitació d'Althaia la Dra. Neus Ticó Falguera a la sala de rehabilitació.

Aquest equipament va ser creat anteriorment en conveni amb l'Escola Superior d'Enginyeria de Manresa.

En l'annex A situat a la part final del treball es pot observar un model d'ARA Test [44] com els que es realitzen a la centre hospitalari Althaia de Manresa i l'Institut Guttmann-hospital de neurorehabilitació de Barcelona. Aquest model de test és el que s'aplica als pacients d'aquests centres que han sofert un ictus cerebral i ha estat proporcionat per la metgessa Neus Ticó Falguera. En aquests dos centres també s'aplica una altre test més extens anomenat *Brunnstrom-Fugl-Meyer* [45], però no constarà en el contingut d'aquest treball.

L'ARA Test que s'ha explicat anteriorment ha estat els testos que s'han realitzat en els pacients per tal d'obtenir les dades de les diferents parts de la mà en cada instant de temps dels tests realitzats.

Ha estat així perquè era convenient realitzar una presa de dades en base un moviment definit prèviament per uns estàndards i no realitzar la presa de dades en base uns moviments aleatoris.

Les dades recollides durant aquests testos eren proporcionades per guant *Ciberglove II* i consistien en 18 angles de diferents parts de la mà. El guant mencionat està definit i caracteritzat en el següent apartat del treball.

Una vegada han estat recopilades aquestes dades proporcionades pel guant s'han de convertir en el model homòleg de 25 graus de llibertat, ja que és el model que s'ha pretès representar.

4.2 GUANT CYBERGLOVE II

Creat per l'empresa de desenvolupament de software de mans virtuals *CyberGlove Systems LLC* el guant *CyberGlove II* ha estat el hardware utilitzat en el treball per recollir les dades funcionals de les mans dels diferents pacients que han estat analitzats.

El guant electrònic connectat en un ordinador transforma el moviment de la mà i dels dits en dades en temps real. Aquestes dades són proporcionades per un total de 18 sensors que mesuren l'angle que es realitza en cada una de les 18 articulacions de la mà i dels dits on es troben situats.

Aquest model és emprat en camps diversos com són el del prototipatge digital, el de les pel·lícules animades, el de la realitat virtual, el de l'entrenament militar i en el camp dels estudis biomecànics com és el nostre cas.

Les especificacions tècniques del guant són les següents:

Nombre de sensors: 18.

Resolució dels sensors: 1 grau sexagesimal.

Rati de dades: 90 mesures/segon.

Desviació màxima: 3 graus sexagesimals, calibratge deficient..

Linearitat sensorial: 0.6% de desviació estàndard no lineal màxima.

Duració bateria: 3 hores.

Sistema informàtic operatiu: Windows XP i 2000.

Connexió amb computador: USB.

La connexió entre el guant i l'ordinador és a temps real, ja que qualsevol variació o petit moviment dels sensors s'aprecia instantàniament per pantalla. Aquest fet és possible gràcies a un port USB que es connecta a l'ordinador i estableix una connexió amb el guant mitjançant la xarxa sense fil Bluetooth.

Cal destacar que el guant no impedeix ni redueix cap moviment que podria realitzar la mà sense ell, fet remarcable, ja que si creés restriccions de moviment els resultats de l'estudi es podrien veure alterats.

Com veurem més endavant el guant permet mesurar el moviment del canell, tot i que l'estudi realitzat només es focalitza en la mà i dits, deixant de banda el canell i la resta del braç.

En les dues imatges següents es pot veure l'aparença visual d'aquest guant emprat en la recopilació de les dades:



Font: Imatge proporcionada per *CyberGlove Systems LLC*.



Font: Imatge proporcionada per *CyberGlove Systems LLC*.

CyberGlove Systems LLC comercialitza tant el guant per la mà dreta com el de la mà esquerra, però no incumbeix el treball ja que en cap moment es pretès realitzar una comparació ni diferenciació entre les dues mans, sinó que l'anàlisi realitzat és aplicable a les dues mans indiferentment. Aquest guant també permet ser utilitzat per qualsevol persona ja que s'adapta a qualsevol mida de mà.

Seguidament podem observar una imatge que ens permet determinar la ubicació i numeració de cadascun dels sensors que hi ha situats al guant i que ens aporten dades angulars mesurades:



Font: Imatge proporcionada per *CyberGlove Systems LLC*.

Cadascun dels 18 sensors del guant que podem veure en la imatge anterior mesura un angle d'una part determinada de la mà.

Analitzem a continuació quin angle mesura realment cadascun d'aquests 18 sensors:

Sensor 1: mesura l'angle que es forma en el palmell de la mà causat bàsicament per la flexió i extensió de l'os metacarpia del dit polze.

Sensor 2: mesura l'angle de flexió i extensió format entre la falange proximal i l'os metacarpia del dit polze.

Sensor 3: mesura l'angle de flexió i extensió format entre les falanges proximal i medial del dit polze.

Sensor 4: mesura l'angle d'abducció i adducció format entre el dit polze i l'os metacarpia del dit índex.

Sensor 5: mesura l'angle de flexió i extensió format entre la falange proximal i l'os metacarpia del dit índex.

Sensor 6: mesura l'angle de flexió i extensió format entre les falanges proximal i medial del dit índex.

Sensor 7: mesura l'angle de flexió i extensió format entre la falange proximal i l'os metacarpia del dit del mig o cor.

Sensor 8: mesura l'angle de flexió i extensió format entre les falanges proximal i medial del dit del mig o cor.

Sensor 9: mesura l'angle d'abducció i adducció format entre les falanges proximals del dit índex i del dit del cor.

Sensor 10: mesura l'angle de flexió i extensió format entre la falange proximal i l'os metacarpia del dit anular.

Sensor 11: mesura l'angle de flexió i extensió format entre les falanges proximal i medial del dit anular.

Sensor 12: mesura l'angle d'abducció i adducció format entre les falanges proximals del dit del cor i del dit anular.

Sensor 13: mesura l'angle de flexió i extensió format entre la falange proximal i l'os metacarpia del dit menovell o petit.

Sensor 14. mesura l'angle de flexió i extensió format entre les falanges proximal i medial del dit menovell o petit.

Sensor 15: mesura l'angle d'abducció i adducció format entre les falanges proximals del dit anular i del dit menovell.

Sensor 16: mesura la curvatura que es crea entre els metacarpians dels dits menovell, anular i el del cor.

Sensor 17: mesura l'angle de flexió i extensió del canell.

Sensor 18: mesura l'angle d'abducció i adducció del canell.

4.3 METODOLOGIA DE RECOPILOCIÓ DE DADES

En la recollida de dades d'aquest treball s'ha emprat el guant que s'ha analitzat anteriorment, el *CyberGlove II*. Com ja hem dit anteriorment ens ha permès emmagatzemar el valor de 18 sensors situats a diferents parts de la mà amb una mostra de 90 dades memoritzades per segon.

Per posar-lo en funcionament primerament s'ha d'obrir a l'ordinador el software que proporciona el fabricant del guant. Un cop obert podem veure per pantalla la captura següent:



Captura de pantalla del software Cyberglove COM.

Seguidament cal connectar un port USB a l'ordinador que és l'encarregat d'establir connexió amb el guant mitjançant una senyal de Bluetooth. A continuació a la mà analitzada s'ha de col·locar un guant protector de seda, per no perdre la sensibilitat al tacte, i a sobre el guant que conté els sensors, juntament amb la bateria.

Veiem a continuació el port USB, que estableix la connexió entre el guant i l'ordinador mitjançant Bluetooth:

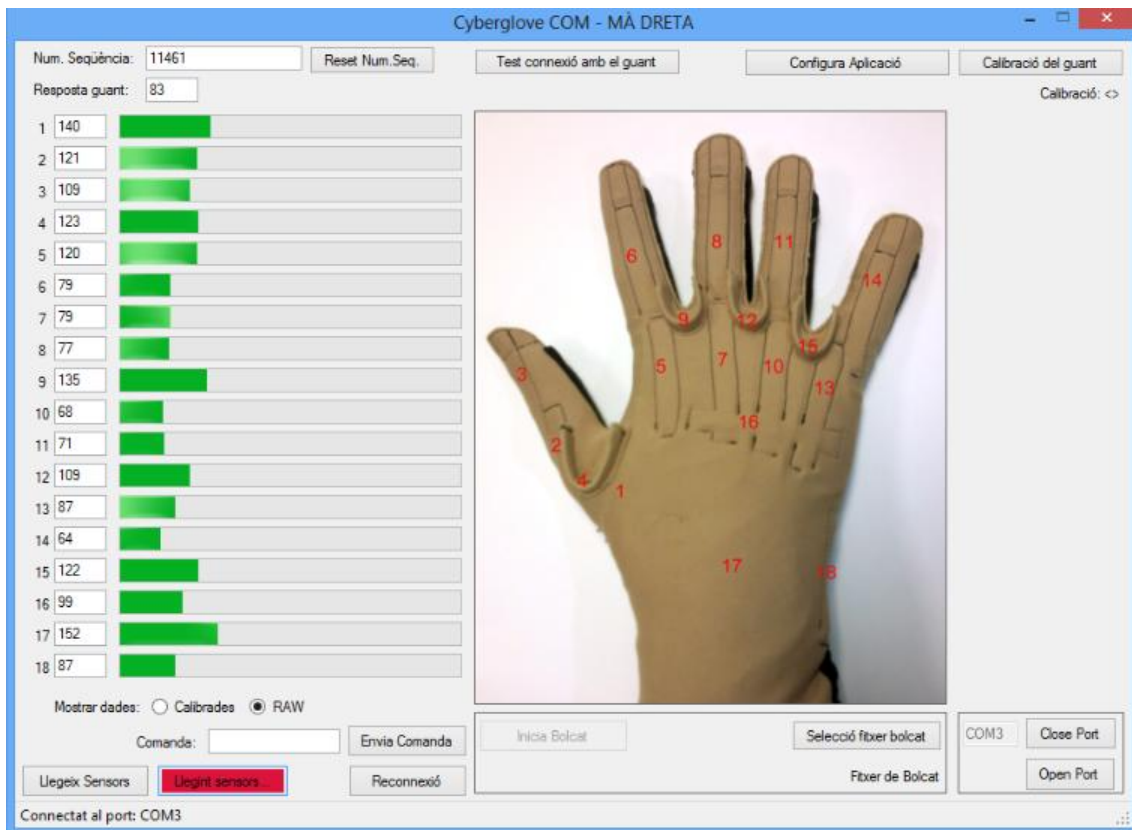


Un cop el guant s'ha col·locat sobre la mà d'estudi s'ha de prémer el botó que hi ha situat al costat de la bateria fins que s'il·lumina i el guant es posi en funcionament. Es mostra el botó en la imatge següent:



En aquest instant la connexió entre el guant i l'ordinador ja està establerta, per pantalla podrem veure com s'il·lumina de color vermell la opció llegint sensors, tal i com mostra la captura de la pàgina següent.

Finalment per iniciar l'emmagatzematge de dades només haurem de seleccionar el nom del fitxer i iniciar el Bolcat, just sota la imatge del guant.



Quan s'han finalitzat els moviments amb la mà, es clica sobre el requadre vermell i es finalitza l'emmagatzematge.

D'aquesta manera s'hauran creat dos fitxers, amb el nom seleccionat prèviament, la tipologia d'aquests serà .cal i .raw que signifiquen que tenen característiques de la georeferenciació i d'imatges. L'arxiu .cal el podem obrir amb un processador de textos qualsevol i observarem en cada una de les seqüències realitzades els valors dels 18 sensors.

Cada fitxer realitzat en les diferents captures de dades té una gran extensió, per exemple, una captura que duri 10 segons genera més de 900 pàgines de text. Això és degut a que el fitxer resultant conté una captura per línia, ara bé, si s'ordenen les dades en taules o graelles es pot reduir considerablement l'extensió. Hi ha una mostra d'un fitxer de captura de dades complet en l'annex B a la part final de la present memòria. Aquesta mostra no té una gran extensió i és molt breu, ja que està composta per 125 seqüències, el que equival a menys de 2 segons de captura.

El format del fitxer és molt simple, consta dels números de seqüència, que són correlatives d'un a un, i dins de cada una de les seqüències hi ha 18 valors corresponents als 18 angles del guant mesurats, enumerats de 1 a 18 seguint la numeració dels sensors de la fotografia del software.

Aquí es poden observar més imatges fotografiades durant la presa de dades amb el guant *CyberGlove II*.



4.4 CONVERSIÓ DE DADES

En l'apartat 4.2 hem definit què mesurava cada sensor i en l'anterior com capturar les dades, però com que volem representar un model de 25 graus de llibertat hem de relacionar aquestes 18 mesures que ens proporciona el guant amb els valors que prendran els 25 graus.

La conversió es realitza en base als diferents testos que s'han fet amb el guant i en base a l'observació dels resultats. El pas de les dades dels 18 sensors als 25 graus de llibertat no és una còpia exacte sinó una aproximació realitzada mitjançant càlculs matemàtics, principalment interpolacions.

A continuació s'explica com realitzar la conversió de 18 valors de sensors a 25 valors de graus de llibertat. Aquesta conversió s'exemplifica en una breu captura de dades real en l'annex 2, que hi ha al final de la memòria. La resta de dades recopilades, durant el treball de camp, i les corresponents conversions es troben en el document adjunt a la memòria titulat "Recopilació de dades capturades amb guant de 18 sensors i conversions a 25 graus de llibertat".

Rangs de valors dels sensors

Primerament el que s'ha realitzat ha estat observar els rangs entre el valors mínims i els valors màxims de cadascun dels 18 sensors del guant, també el valors de la mà en repòs, calculats segons les mostres de l'annex C. Aquest fet s'ha realitzat amb la intenció de conèixer el ventall de dades que cada sensor del guant ens pot proporcionar. Ho veiem a continuació:

SENSOR	VALOR MÍNIM	VALOR EN REPÒS	VALOR MÀXIM
1	55	122	180
2	105	125	160
3	40	121	215
4	120	122	131
5	105	123	135
6	56	88	206
7	20	87	130
8	50	86	186
9	15	132	155
10	10	71	162
11	36	87	202
12	1	115	146
13	15	87	208
14	43	77	216
15	50	124	168
16	40	124	245
17	85	124	160
18	36	72	202

En la majoria de sensors el valor mínim és quan s'obre l'articulació i el màxim quan es flexiona o tanca, tancant el puny per exemple. Els que mesuren el palmell, el mínim és amb la mà completament plana i el màxim amb el palmell corbat o arquejat. S'han obtingut experimentalment observant les posicions límit de la mà i els valor que n'obteníem.

Determinació dels càlculs dels graus de llibertat a partir dels valors proporcionats pels sensors del guant:

La conversió següent permet determinar el valor dels angles que componen els 25 graus de llibertat a partir de les dades que ens proporcionen els 18 sensors del guant *CyberGlove II*. El guant es usat per a la recollida de dades de camp i per fer una observació experimental. Els valors dels angles que mesura el guant no regeixen un patró definit, en canvi, el model que es basa en graus sexagesimals.

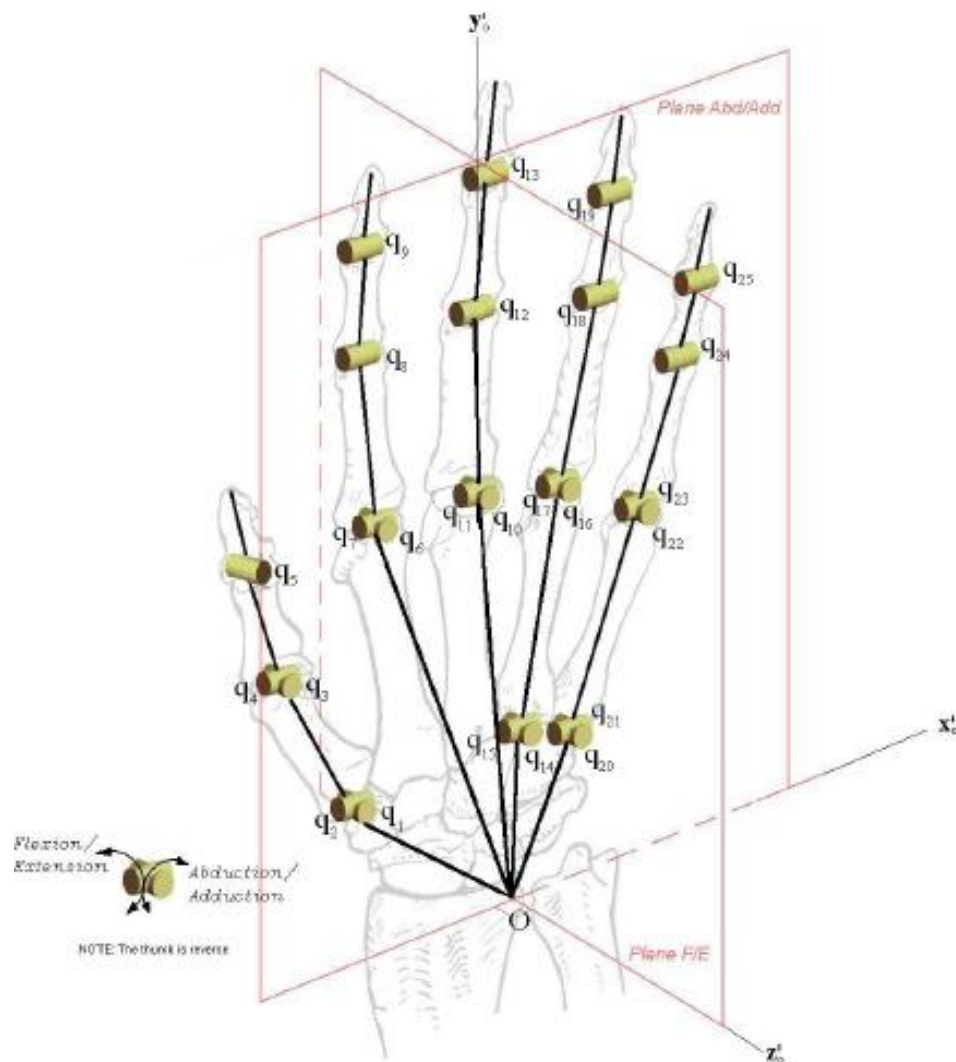
Per fer més entenedora la conversió que es realitza es presenten seguidament dues imatges on es pot apreciar gràficament la font de les dades de camp, el guant; i la ubicació dels 25 graus de llibertat.

- Ubicació dels 18 sensors:



Font: Imatge proporcionada per *CyberGlove Systems LLC*.

- Ubicació dels 25 graus de llibertat:



Font: *Virtual Human Hand*, research article.

Per a la mesura dels angles dels graus de llibertat s'utilitzaran els rangs de valors dels angles i criteris definits per Tubiana et al. (1996) [30], mencionats en l'apartat 2.1.3 on s'han avaluat els moviments de les articulacions. Per poder definir aquests valors a partir de les dades del guant haurem de fer un seguit de conversions ja que les dades del guant no segueixen el criteri definit per Tubiana.

Valors obtinguts per mesura directa:

- Flexió/Extensió

Grau de llibertat 1 (q_1): es calcula amb una interpolació lineal mitjançant el valor que proporciona el sensor número 1, x_1 . Segons taules de Tubiana et al. [30] aquesta unió, on es troba el grau de llibertat, CMC del dit polze, té un rang de 25 a 35 graus en flexió/extensió i els valors límits del sensor són 55 i 180 graus.

Quan l'articulació està oberta al màxim, posició de mà plana, el sensor ens dona el valor de 180 i segons Tubiana correspon al valor de 25°. En canvi, quan està tancada, posició de puny tancat o de dit polze a tocar dit petit, correspon a 35° segons Tubiana el sensor mesura 55°.

$$\frac{(180-55)}{(35-25)} = \frac{(x_1-55)}{(35-q_1)} \quad q_1 = -\frac{(35-25) \cdot (x_1-55)}{(180-55)} + 35 = -\frac{1}{12}(x_1-55) + 35$$

Grau de llibertat 3 (q_3): es calcula amb una interpolació lineal mitjançant el valor que proporciona el sensor número 2, x_2 . Segons taules de Tubiana et al. [30] aquesta unió, on es troba el grau de llibertat, MCP del dit polze, té un rang de 10H (-10) a 55 graus en flexió/extensió i els valors límits del sensor són 105 i 160.

$$\frac{(160-105)}{(55-(-10))} = \frac{(x_2-105)}{(q_3-(-10))} \quad ; \quad q_3 = \frac{(55-(-10)) \cdot (x_2-105)}{(160-105)} - 10 = \frac{13}{11}(x_2-105) - 10$$

Grau de llibertat 5 (q_5): es calcula amb una interpolació lineal mitjançant el valor que proporciona el sensor número 3, x_3 . Segons taules de Tubiana et al. [30] aquesta unió, on es troba el grau de llibertat, IP del dit polze, té un rang de 15 H (-15) a 80 graus en flexió/extensió i els valors límits del sensor són 40 i 215.

$$\frac{(215-40)}{(80-(-15))} = \frac{(x_3-40)}{(q_5-(-15))} \quad ; \quad q_5 = \frac{(80-(-15)) \cdot (x_3-40)}{(215-40)} - 15 = \frac{19}{35}(x_3-40) - 15$$

Grau de llibertat 7 (q_7): es calcula amb una interpolació lineal mitjançant el valor que proporciona el sensor número 5, x_5 . Segons taules de Tubiana et al. [30] aquesta unió, on es troba el grau de llibertat, MCP del dit índex, té un rang de 0 a 80 graus en flexió/extensió i els valors límits del sensor són 105 i 135.

$$q_7 = \frac{(80 - 0) \cdot (x_5 - 105)}{(135 - 105)} = \frac{8}{3}(x_5 - 105)$$

Grau de llibertat 8 (q_8): es calcula amb una interpolació lineal mitjançant el valor que proporciona el sensor número 6, x_6 . Segons taules de Tubiana et al. [30] aquesta unió, on es troba el grau de llibertat, PIP del dit índex, té un rang de 0 a 100 graus en flexió/extensió i els valors límits del sensor són 56 i 206.

$$q_8 = \frac{(100 - 0) \cdot (x_6 - 56)}{(206 - 56)} = \frac{2}{3}(x_6 - 56)$$

Grau de llibertat 11 (q_{11}): es calcula amb una interpolació lineal mitjançant el valor que proporciona el sensor número 7, x_7 . Segons taules de Tubiana et al. [30] aquesta unió, on es troba el grau de llibertat, MCP del dit del mig, té un rang de 0 a 80 graus en flexió/extensió i els valors límits del sensor són 20 i 130.

$$q_{11} = \frac{(80 - 0) \cdot (x_7 - 20)}{(130 - 20)} = \frac{8}{11}(x_7 - 20)$$

Grau de llibertat 12 (q_{12}): es calcula amb una interpolació lineal mitjançant el valor que proporciona el sensor número 8, x_8 . Segons taules de Tubiana et al. [30] aquesta unió, on es troba el grau de llibertat, PIP del dit del mig, té un rang de 0 a 100 graus en flexió/extensió i els valors límits del sensor són 50 i 186.

$$q_{12} = \frac{(100 - 0) \cdot (x_8 - 50)}{(186 - 50)} = \frac{25}{34}(x_8 - 50)$$

Grau de llibertat 17 (q_{17}): es calcula amb una interpolació lineal mitjançant el valor que proporciona el sensor número 10, x_{10} . Segons taules de Tubiana et al. [30] aquesta unió, on es troba el grau de llibertat, MCP del dit anular, té un rang de 0 a 80 graus en flexió/extensió i els valors límits del sensor són 10 i 162.

$$q_{17} = \frac{(80-0) \cdot (x_{10}-10)}{(162-10)} = \frac{10}{19}(x_{10}-10)$$

Grau de llibertat 18 (q_{18}): es calcula amb una interpolació lineal mitjançant el valor que proporciona el sensor número 11, x_{11} . Segons taules de Tubiana et al. [30] aquesta unió, on es troba el grau de llibertat, PIP del dit anular, té un rang de 0 a 100 graus en flexió/extensió i els valors límits del sensor són 36 i 202.

$$q_{18} = \frac{(100-0) \cdot (x_{11}-36)}{(202-36)} = \frac{50}{83}(x_{11}-36)$$

Grau de llibertat 23 (q_{23}): es calcula amb una interpolació lineal mitjançant el valor que proporciona el sensor número 13, x_{13} . Segons taules de Tubiana et al. [30] aquesta unió, on es troba el grau de llibertat, MCP del dit petit, té un rang de 0 a 80 graus en flexió/extensió i els valors límits del sensor són 15 i 208.

$$q_{23} = \frac{(80-0) \cdot (x_{13}-15)}{(208-15)} = \frac{80}{193}(x_{13}-15)$$

Grau de llibertat 24 (q_{24}): es calcula amb una interpolació lineal mitjançant el valor que proporciona el sensor número 14, x_{14} . Segons taules de Tubiana [30] aquesta unió, on es troba el grau de llibertat, PIP del dit petit, té un rang de 0 a 100 graus en flexió/extensió i els valors límits del sensor són 43 i 216.

$$q_{24} = \frac{(100-0) \cdot (x_{14}-43)}{(216-43)} = \frac{100}{173}(x_{14}-43)$$

- Abducció/Adducció

Grau de llibertat 2 (q_2): es calcula amb una interpolació lineal mitjançant el valor que proporciona el sensor número 4, x_4 . Segons taules de Tubiana et al. [30] aquesta unió, on es troba el grau de llibertat, CMC del dit polze, té un rang de 0 a 60 graus en abducció/adducció i els valors límits del sensor són 120 i 131.

Quan l'articulació està oberta al màxim el sensor ens dóna el valor de 131 i segons Tubiana correspon al valor de 60°. I viceversa, quan està tancada a 0° segons Tubiana el sensor mesura 120°.

$$q_2 = \frac{(60-0) \cdot (x_4 - 120)}{(131-120)} = \frac{60}{11}(x_4 - 120)$$

Grau de llibertat 4 (q_4): es calcula amb una interpolació lineal mitjançant el valor que proporciona el sensor número 4, x_4 . Segons taules de Tubiana et al. [30] aquesta unió, on es troba el grau de llibertat, MCP del dit polze, té un rang de 0 a 60 graus en abducció/adducció i els valors límits del sensor són 120 i 131.

Quan l'articulació està oberta al màxim el sensor ens dóna el valor de 131 i segons Tubiana correspon al valor de 60°. I viceversa, quan està tancada a 0° segons Tubiana el sensor mesura 120°.

$$q_4 = \frac{(60-0) \cdot (x_4 - 120)}{(131-120)} = \frac{60}{11}(x_4 - 120)$$

Grau de llibertat 6 (q_6): es calcula amb una interpolació lineal mitjançant el valor que proporciona el sensor número 9, x_9 , que mesura l'angle entre els dits del índex i del cor causat pels moviment d'abducció/adducció d'ambdós dits. Segons taules de Tubiana et al. [30] aquesta unió, on es troba el grau de llibertat, MCP del dit índex, té un rang de 13 a 42 graus en adducció/abducció.

Els valors límits del sensor x_9 són 155 en tenir els dits en contacte i 15 en màxima obertura.

En valors baixos del sensor 9 , x_9 , hi ha una gran obertura entre dits índex i del cor i el valor del grau de llibertat serà proper a 13. En aquest cas l'obertura entre el dit del cor i el dit anular no afecta. En canvi en petites obertures entre el dit índex i el dit del cor, que corresponen a alts valors del sensor 9, x_9 ; l'angle del grau de llibertat, sí que depèn de l'obertura entre els dits del cor i anular ja que poden arrossegar el dit índex tot i conservar l'obertura. Dit d'altre manera, el valor del grau pot variar, sense que el sensor ho apreciï, per això es té en compte l'obertura entre dit del cor i dit anular per a obertures petites entre el dit del cor i el dit índex.

$$q_6 = 0.4 \cdot \left[\frac{(42-13) \cdot (x_{12} - 1)}{(146-1)} + 13 \right] + 0.6 \cdot \left[\frac{(42-13) \cdot (x_9 - 15)}{(155-15)} + 13 \right]$$

$$q_6 = 0.4 \cdot \left[\frac{29}{145} (x_{12} - 15) + 13 \right] + 0.6 \cdot \left[\frac{29}{140} (x_9 - 15) + 13 \right]$$

Graus de llibertat 10 i 16 (q_{10} i q_{16}): es calculen amb una interpolació lineal mitjançant el valor que proporciona el sensor número 12, x_{12} , que mesura l'angle entre els dits del cor i anular causat pels moviment d'abducció/adducció d'ambdós dits. Segons taules de Tubiana et al. [30] aquestes unió, on es troben el graus de llibertat, MCP del dit del cor i del dit anular, tenen un rang de 8 a 35 i de 14 a 20 graus en ad/ab.

Els valors límits del sensor són 146 en tenir els dits en contacte i 1 en màxima obertura.

Per tant quan els dits estan en màxima obertura, màxima abducció, el sensor mesura 1, mentre segons Tubiana els dits del cor i anular estan a 8 i 20 graus respectivament. En canvi quan el sensor mesura 146, posició de dits en contacte, segons Tubiana els angles són 35 pel dit del cor i 14 pel dit anular.

Mitjançant interpolació lineal podem definir els angles dels dos graus a partir del valor proporcionat pel sensor 12.

Dit del cor:

$$\frac{(146-1)}{(35-8)} = \frac{(x_{12}-1)}{(q_{10}-8)} \quad q_{10} = \frac{(35-8) \cdot (x_{12}-1)}{(146-1)} + 8 = \frac{27}{145}(x_{12}-1) + 8$$

Dit anular:

$$\frac{(146-1)}{(14-20)} = \frac{(x_{12}-1)}{(q_{16}-20)} \quad q_{16} = \frac{(14-20) \cdot (x_{12}-1)}{(146-1)} + 20 = \frac{-6}{145}(x_{12}-1) + 20$$

Grau de llibertat 22 (q_{22}): es calcula amb una interpolació lineal mitjançant el valor que proporciona el sensor número 15, x_{15} , que mesura l'angle entre els dits del anular i petit causat pels moviment d'abducció/adducció d'ambdós dits. Segons taules de Tubiana et al. [30] aquesta unió, on es troba el grau de llibertat, MCP del dit petit, té un rang de 19 a 33 graus en ad/ab.

Els valors límits del sensor són 168 en tenir els dits en contacte i 50 en màxima obertura.

Per a petites obertures entre el dit petit i l'anular, quan el valor del sensor 15 és superior a 100, es tindrà en compte l'obertura d'entre els dits cor i anular, perquè aquesta pot fer que l'angle d'abducció del dit petit augmenti, ja és arrossegat pel dit anular. En canvi per a obertures grans entre el dit petit i anular la obertura entre el dit anular i del cor és indiferent, ja que no afecta l'obertura anterior.

Aquest mètode és degut a que el valor del grau de llibertat 22, q_{22} , pot variar sense que el sensor 15, x_{15} , ho indiqui.

$$q_{22} = 0.6 + \left[\frac{(19-33) \cdot (x_{15}-50)}{(168-50)} + 33 \right] + 0.4 \cdot \left[\frac{(19-33) \cdot (x_{12}-1)}{(146-1)} + 33 \right]$$

$$q_{22} = 0.6 \cdot \left[\frac{-7}{59} (x_{15} - 50) + 33 \right] + 0.4 \cdot \left[\frac{-7}{145} (x_{12} - 1) + 33 \right]$$

Valors obtinguts segons en base teòrica

La flexió/extensió de les unions DIP (interfalangeals distals), que corresponen als graus de llibertat 9, 13, 19 i 25; no són mesurades directament per cap sensor del guant però podem aproximar-les com a dues terceres parts (2/3) del valor del seu grau de llibertat predecessor [31], definit per la unió PIP (interfalangeal proximal). D'aquesta manera no es tindrà en compte la hiperextensió, però se seguiran complint els criteris de Tubiana et al. [30], ja que els valors obtinguts estaran dins els rangs.

Grau de llibertat 9 (q_9): 2/3 del valor del grau de llibertat 8 (q_8).

$$q_9 = \frac{2}{3} q_8$$

Grau de llibertat 13 (q_{13}): 2/3 del valor del grau de llibertat 12 (q_{12}).

$$q_{13} = \frac{2}{3} q_{12}$$

Grau de llibertat 19 (q_{19}): 2/3 del valor del grau de llibertat 18 (q_{18}).

$$q_{19} = \frac{2}{3} q_{18}$$

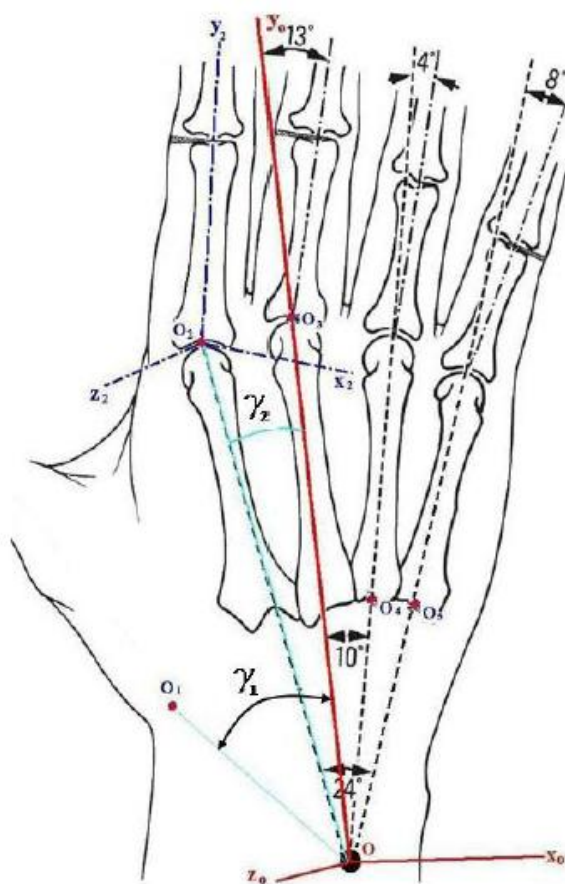
Grau de llibertat 25 (q_{25}): 2/3 del valor del grau de llibertat 24 (q_{24}).

$$q_{25} = \frac{2}{3} q_{24}$$

Valors obtinguts per observació experimental

Grau de llibertat 14 (q_{14}): aquest grau de llibertat mesura l'angle d'abducció/adducció que realitza la unió CMC del dit anular. El valor del grau de llibertat el determinarem segons el valor del sensor 12, x_{12} , que mesura l'obertura que hi ha entre el dit del cor i l'anular. Quan l'obertura és màxima, el sensor pren el valor de 1 i quan és mínima pren el valor de 146.

Resulta però, que Tubiana et al. [30] no defineix els rangs de moviment d'aquesta articulació, per aquest motiu es determinarà experimentalment. Com hem vist anteriorment en l'apartat 2.3 l'angle $\gamma_4 = 14^\circ$ i com que el dit té un angle de 4° respecte l'os que l'uneix amb el canell podem deduir que l'angle del metacarp respecte l'eix de referència és de 10° . Ho veiem en la imatge següent:



Font: *Virtual Human Hand*, research article.

Observant els moviments en l'experimentació s'atorga a aquest grau de llibertat un rang de moviment entre 10 i 13 graus. Quan l'obertura entre dit del cor i

anular és màxima el grau de llibertat està en la posició de 13 graus, en canvi, quan l'obertura és mínima el grau de llibertat es troba en la posició de 10 graus, que correspon al valor mínim. Per calcular el valor del grau, q_{14} , a partir del valor del sensor 12, x_{12} , s'efectuarà la interpolació lineal següent:

$$q_{14} = \frac{(10-13) \cdot (x_{12}-1)}{(146-1)} + 13 = \frac{-3}{145}(x_{12}-1) + 13$$

Grau de llibertat 15 (q_{15}): aquest grau de llibertat mesura l'angle de flexió/extensió de l'articulació CMC del dit anular. El seu rang no està definit per Tubiana, per aquest motiu es determinarà a partir de l'observació experimental. S'ha deduït que té un rang de 0 a 6 graus.

Per a la mesura s'utilitzarà les dades aportades pels sensors número 1 i 16, x_1 i x_{16} .

Quan la mà està plana totalment el grau té un valor de 0 graus i els sensors 1 i 16 donen valors de 55 i 40, consegüentment. En canvi, quan el palmell de la mà està corbat i el grau de llibertat està en la posició de 6 graus els sensors mesuren 180 i 245.

Per al càlcul del grau utilitzarem la interpolació lineal següent que té en compte els valors del dos sensors:

$$q_{15} = 0.5 \cdot \left[\frac{6 \cdot (x_1 - 55)}{(180 - 55)} \right] + 0.5 \cdot \left[\frac{6 \cdot (x_{16} - 40)}{(245 - 40)} \right] = \left[\frac{3 \cdot (x_1 - 55)}{125} \right] + \left[\frac{3 \cdot (x_{16} - 40)}{205} \right]$$

Grau de llibertat 20 (q_{20}): aquest grau de llibertat mesura l'angle d'abducció/adducció que realitza la unió CMC del dit petit. El valor del grau de llibertat el determinarem segons els valors dels sensors 12 i 15, x_{12} i x_{15} , que mesuren l'obertura que hi ha entre el dit del cor i l'anular i entre el dit anular i el petit. El sensor 15 determina directament l'abducció del grau de llibertat analitzat que pot ser arrossegat per l'abducció mesurada pel sensor 12.

Tubiana et al. [30] no defineix els rangs de moviment d'aquesta articulació, per aquest motiu es determinarà experimentalment. Ja vist anteriorment en l'apartat 2.3, l'angle $\gamma_5 = 25^\circ$ i com que el dit té un angle de 8° respecte l'os que l'uneix amb el canell podem deduir que l'angle del metacarp respecte l'eix de referència és de 17° . Segons l'experimentació realitzada el grau de llibertat té un rang de moviment entre 15 i 20 graus.

En la posició de 15 graus els valors dels sensors seran elevats ja que les abduccions seran reduïdes, en canvi, per a la posició de 20 graus les abduccions dels graus 16 i 22 estaran en els seus valor més elevats.

Es calcula el valor del grau mitjançant la interpolacions següent:

$$q_{20} = 0.5 \cdot \left[\frac{(15-20) \cdot (x_{15} - 50)}{(168-50)} + 20 \right] + 0.5 \cdot \left[\frac{(15-20) \cdot (x_{12} - 1)}{(146-1)} + 20 \right]$$

$$q_{20} = 0.5 \cdot \left[\frac{-5}{118} (x_{15} - 50) + 20 \right] + 0.5 \cdot \left[\frac{-5}{145} (x_{12} - 1) + 20 \right]$$

Grau de llibertat 21 (q_{21}): aquest grau de llibertat mesura l'angle de flexió/extensió de l'articulació CMC del dit petit. El seu rang no està definit per Tubiana, per aquest motiu es determinarà a partir de l'observació experimental. S'ha deduït que té un rang de 0 a 12 graus de flexió/extensió.

Per a la mesura s'utilitzarà les dades aportades pels sensors número 1 i 16, x_1 i x_{16} .

Quan la mà està plana totalment el grau té un valor de 0 graus i els sensors 1 i 16 donen valors de 55 i 40, consegüentment. En canvi quan el palmell de la mà està corbat i el grau de llibertat està en la posició de 12 graus, flexió màxima, els sensors mesuren 180 i 245.

Per al càlcul del grau utilitzarem ,la interpolació lineal següent que té en compte els valors del dos sensors:

$$q_{21} = 0.5 \cdot \left[\frac{12 \cdot (x_1 - 55)}{(180 - 55)} \right] + 0.5 \cdot \left[\frac{12 \cdot (x_{16} - 40)}{(245 - 40)} \right] = \left[\frac{6 \cdot (x_1 - 55)}{125} \right] + \left[\frac{6 \cdot (x_{16} - 40)}{205} \right]$$

Resum conversió

Número grau de llibertat	Valor
1	Aproximació a partir de les mesures del sensor 1.
2	Aproximació a partir de les mesures del sensor 4 .
3	Aproximació a partir de les mesures del sensor 2.
4	Aproximació a partir de les mesures del sensor 4.
5	Aproximació a partir de les mesures del sensor 3.
6	Aproximació a partir de les mesures dels sensors 9 i 12.
7	Aproximació a partir de les mesures del sensor 5.
8	Aproximació a partir de les mesures del sensor 6.
9	Aproximació teòrica a partir del grau de llibertat 8.
10	Aproximació a partir de les mesures del sensor 12.
11	Aproximació a partir de les mesures del sensor 7.
12	Aproximació a partir de les mesures del sensor 8.
13	Aproximació teòrica a partir del grau de llibertat 12.
14	Aproximació experimental a partir del sensor 12.
15	Aproximació experimental a partir dels sensors 1 i 16.
16	Aproximació a partir de les mesures del sensor 12.
17	Aproximació a partir de les mesures del sensor 10.
18	Aproximació a partir de les mesures del sensor 11.
19	Aproximació teòrica a partir del grau de llibertat 18.
20	Aproximació experimental a partir dels sensors 12 i 15.
21	Aproximació experimental a partir dels sensors 1 i 16.
22	Aproximació a partir de les mesures dels sensors 12 i 15.
23	Aproximació a partir de les mesures del sensor 13.
24	Aproximació a partir de les mesures del sensor 14.
25	Aproximació teòrica a partir del grau de llibertat 24.

Conversió exemplificada

A continuació veurem un exemplificació d'una conversió dels 18 valors dels sensors als 25 dels graus de llibertat. Les dades dels sensors corresponen a la posició de repòs, en la qual s'inicia qualsevol dels moviments realitzats que més endavant es simularan.

- Càlcul de la conversió dels 18 sensors als 25 graus de llibertat en la posició de repòs:

Sensor	Valor S*	Equació	Grau llibertat	Valor GL*
1	122	$q_1 = -\frac{1}{12}(x_1 - 55) + 35$	1	29,42
2	125	$q_2 = \frac{60}{11}(x_4 - 120)$	2	10,91
3	121	$q_3 = \frac{13}{11}(x_2 - 105) - 10$	3	13,64
4	122	$q_4 = \frac{60}{11}(x_4 - 120)$	4	10,91
5	123	$q_5 = \frac{19}{35}(x_3 - 40) - 15$	5	34,94
6	88	$q_6 = 0.4 \cdot \left[\frac{29}{145}(x_{12} - 15) + 13 \right] + 0.6 \cdot \left[\frac{29}{140}(x_9 - 15) + 13 \right]$	6	35,54
7	87	$q_7 = \frac{8}{3}(x_5 - 105)$	7	48,00
8	86	$q_8 = \frac{2}{3}(x_6 - 56)$	8	21,33
9	132	$q_9 = \frac{2}{3}q_8$	9	14,22
10	71	$q_{10} = \frac{27}{145}(x_{12} - 1) + 8$	10	29,23
11	87	$q_{11} = \frac{8}{11}(x_7 - 20)$	11	48,73

Sensor	Valor S*	Equació	Grau llibertat	Valor GL*
12	115	$q_{12} = \frac{25}{34}(x_8 - 50)$	12	26,47
13	87	$q_{13} = \frac{2}{3}q_{12}$	13	17,65
14	77	$q_{14} = \frac{-3}{145}(x_{12} - 1) + 13$	14	10,64
15	124	$q_{15} = \left[\frac{3 \cdot (x_1 - 55)}{125} \right] + \left[\frac{3 \cdot (x_{16} - 40)}{205} \right]$	15	2,84
16	124	$q_{16} = \frac{-6}{145}(x_{12} - 1) + 20$	16	15,28
17	124	$q_{17} = \frac{10}{19}(x_{10} - 10)$	17	32,11
18	72	$q_{18} = \frac{50}{83}(x_{11} - 36)$	18	30,72
		$q_{19} = \frac{2}{3}q_{18}$	19	20,48
		$q_{20} = 0.5 \cdot \left[\frac{-5}{118}(x_{15} - 50) + 20 \right] + 0.5 \cdot \left[\frac{-5}{145}(x_{12} - 1) + 20 \right]$	20	16,47
		$q_{21} = \left[\frac{6 \cdot (x_1 - 55)}{125} \right] + \left[\frac{6 \cdot (x_{16} - 40)}{205} \right]$	21	5,67
		$q_{22} = 0.6 \cdot \left[\frac{-7}{59}(x_{15} - 50) + 33 \right] + 0.4 \cdot \left[\frac{-7}{145}(x_{12} - 1) + 33 \right]$	22	25,53
		$q_{23} = \frac{80}{193}(x_{13} - 15)$	23	29,84
		$q_{24} = \frac{100}{173}(x_{14} - 43)$	24	19,65
		$q_{25} = \frac{2}{3}q_{24}$	25	13,10

*S = sensor *GL = grau de llibertat

5 SIMULACIÓ DEL MOVIMENT EN CAD 3D

La simulació del moviment s'ha realitzat amb el mateix software de CAD 3D que el modelat, el qual és el programari lliure Blender.

Aquest programari 3D permet fer animacions molt complexes, ja que disposa d'una gran varietat de paràmetres i valors que es poden determinar en funció del que es pretén animar. En el cas del present treball, es pretén animar una estructura òssia de la mà.

La creació d'animacions, en aquest programa, es realitza mitjançant el renderitzat de *frames*, coneguts com a fotogrames. El renderitzat el realitza el motor del propi programa i permet obtenir-ne resultats en format vídeo.

En el cas del treball, les animacions es poden realitzar amb una exactitud molt precisa ja que es pot realitzar un fotograma per cada seqüència de dades capturada pel guant. En el cas de la captura de dades que apareix en l'annex 2 les 125 seqüències es representarien en 125 *frames* o fotogrames. Si cada fotograma consta d'una posició determinada de cadascun dels 25 graus de llibertat, en resultarà, per exemple en l'annex 2, un nombre de 3125 valors en graus de llibertat per una animació d'uns 14 segons.

D'altra banda, es poden fer simplificacions com representar un fotograma per cada 5 seqüències, d'aquesta manera es redueix el nombre en un 80 per cent. En el cas de l'annex 2 es passaria de 125 *frames* i 3125 valors a 25 *frames* i 625 valors. D'aquesta manera es guanyaria eficiència alhora de l'elaboració de l'animació, malgrat això no seria tant precisa, però conserva el moviment original de manera notable ja que el programa renderitza els moviments de manera contínua. És a dir, si el valor d'un grau canvia d'un fotograma al següent, al crear l'animació el grau va del valor inicial al final de manera paulatina i no directa, fet que faria que el moviment fos a batzegades.

En el treball s'han elaborat les animacions amb una precisió de 8 seqüències per *frame* o fotograma. Obtenint-ne així uns resultats bastant bons i amb uns moviments molt representatius i propers al moviment real.

Afegir que si interessés realitzar animacions amb una grau de precisió molt i molt elevat es podrien fer les animacions seguint el mateix mètode però únicament reduint el nombre de seqüències per *frame* o fotograma. D'altra banda, es podria augmentar el nombre de seqüències per fotograma o *frame* en animacions que no requereixin una elevada exactitud o s'hagin d'elaborar en un breu període de temps.

El nombre mínim de fotogrames per animació és 2, en un s'hi posarien els valors dels graus de llibertat de la seqüència inicial i en l'altre s'hi posarien els valors de la seqüència final.

El nombre màxim de fotogrames, com s'ha explicat, és realitzar un fotograma per cadascuna de les seqüències que s'obtenen com a resultat de la captura de dades del guant.

Les animacions realitzades de la mà modelada es troben en la documentació adjunta del treball i es poden observar reproduint-les en format vídeo. En elles es representa el moviment de la mà capturat.

També s'han creat animacions on apart del moviment de la mà s'ha animat braç del model, tot i no ser objecte d'estudi. S'ha realitzat per fer l'animació més visual i representativa dels moviments reals de la persona humana, ja que habitualment el moviment de la mà va lligat en la posició o moviment del braç.

6 CONCLUSIONS

La primera conclusió extreta és que un cop realitzat el treball es pot afirmar que s'ha portat a terme satisfactòriament l'anàlisi mecànic, el modelatge i la simulació de la mà humana, tal i com s'havia establert en els objectius inicials.

Afegir també que el contingut del treball no és unilateral ni tancat, sinó que és un camp que pot ser perfectament ampliat. Per exemple, com ja s'ha vist en la simulació, aquesta es pot realitzar amb major o menor precisió segons el resultat que se'n vulgui obtenir. Un altre possibilitat seria la conversió proposada de les dades dels sensors al model de 25 graus, que s'ha realitzat majoritàriament per interpolacions, i podria presentar modificacions i alternatives de càlcul segons la dificultat tècnica que se li atorgui.

Seguint amb la possibilitat d'ampliar el contingut del present treball, afegir que podria ser utilitzat en un futur per analitzar no únicament la mà, sinó el conjunt mà i canell, el qual també és avaluat per dos sensors del guant utilitzat, el *Cyberglove II*. També es podrien realitzar ampliacions o extensions del treball basant-se en el conjunt mà i braç, ja que el moviment d'aquest últim va molt lligat amb el de la mà alhora de subjectar i manipular objectes.

D'altra banda destacar que tot el contingut del treball i l'anàlisi és útil tan per a la mà dreta com per l'esquerra. La captura de dades, per exemple, s'ha realitzat amb el guant de la mà dreta, tot i això el procés per a la mà esquerra és homònim i igual que el portat a terme en la mà dreta. Malgrat que en casos determinats la mà hàbil podria presentar diferents habilitats que la mà menys hàbil, l'estudi ha tingut en compte les dues mans com dos mecanismes simètrics.

7 POSSIBLES APLICACIONS

El treball realitzat pot ser aplicat en diversos camps com el de la medicina, disseny d'objectes ergonòmics o pel·lícules de cossos humans animats

En el camp de la medicina es podrien analitzar mobilitats de la mà dels pacients amb la simple ajuda d'un auxiliar que conegui el funcionament de la captura de dades i ser analitzats a posteriori pel metge o metgessa que porti el cas. D'aquesta manera augmentaria la flexibilitat d'horaris ja que no caldria que hi hagués un metge in-situ observant els moviments del pacient. Fins i tot es podria portar el cas a distància ja que el metge o metgessa especialista en tindria suficient rebent les dades i observant-les de manera virtual.

Es podrien aplicar, també en medicina, les tècniques utilitzades en aquest treball per tal d'analitzar visualment els moviments de persones amb mobilitat reduïda o que han patit paràlisis per causes diverses, com podria ser un ictus. També permetria augmentar la interacció dels pacients gràcies a la visualització de les imatges.

Una possible aplicació del present treball seria utilitzar-ho en futurs estudis que vulguin comparar característiques o habilitats entre les dues mans de les persones, per exemple, per comprovar semblances i diferències en el moviments de la mà hàbil i la mà menys hàbil.

En el camp de l'enginyeria es podria aplicar en el disseny d'objectes que han d'interactuar amb la mà humana, per tal de veure si s'adapta a l'ergonomia o no. Ergonomia. Es podrien fer simulacions en diferents posicions i situacions per veure com reacciona la el cos humà davant de certs objectes i estímuls externs. D'aquesta manera es podria elaborar un bon disseny i reduir el nombre de prototipus elaborats.

Pel que fa l'elaboració de pel·lícules amb presència humana l'estudi permetria crear uns moviments de la mà molt propers a la realitat i amb un gran precisió si és necessari, únicament caldrà reduir el nombre de seqüències per fotograma o *frame* i ja està. Es poden representar tots els moviments reals de

la mà únicament recopilant les dades amb el guant i simulant-les com s'ha fet en el treball.

REFERÈNCIES

1. Bell, C: The Hand. Its Mechanism and Vital Endowments as Evincing Design. Bridgewater Treatises, 1833.
2. Charles Darwin: The Expression of Emotions in Man and Animals. *John Murray, Albemarle street*, 1872.
3. W. Pickering: The Hand. Its Mechanism and Vital Endowments as Evincing Design. Reeditat per *Cambridge University Press*, 2009. ISBN 978-1-108-00088-8.
4. Schlesinger, G: Der mechanische Aufbau der kunstlichen Glieder in Ersatzglieder und Arbeitshilfen. *Springer*, 1919.
5. Stetson RH, JA McDill: Mechanism of different types of movement. *Psych. Mono*, 1923.
6. Dempster WT, JC Finerty: Relative activity of wrist moving muscles in static support of the wrist joint; an electromyographic study. *J. Physiol*: 150-596, 1947.
7. Keller AD, CL Taylor, V Zahm: Studies to determine the functional requirements for hand and arm prosthesis. Department of Engineering, University of California at Los Angeles, 1947.
8. Michel Dufour: Anatomía del Aparato Locomotor. Editorial Masson: 69-92, 2002.
9. JA Gosling, PF Harris, JR Humpherson, I Whitmore i PLT Willan: Anatomía humana. Editorial Mosby-Doyma: 3.41, 1994.
10. M Guillén del Castillo i D Linares Girela: Bases biológicas y fisiológicas del movimiento humano. Editorial médica panamericana: 131-134, 2002.
11. M Dufour i M Pillu: Biomecánica funcional. Editorial Masson: 375-416, 2006.

12. An KN, Chao EY, Cooney WP, Linscheid RL: Forces in the normal and abnormal hand. *Orthop Res*: 202-211, 1985.
13. An KN, Chao EY, Cooney WP, Linscheid RL: Normative model of human hand for biomechanical analysis. *J Biomech*: 775-788, 1979.
14. Bayat A, Shaaban H, Giakas G, Lees VC: The pulley System of the thumb: anatomical and biomechanical study. *J Hand Surg*: 628-635, 2002.
15. Cederlund R, Nordenskiöld U, Lundborg G: hand-arm vibration exposure influence performance of daily activities. *Disabil Rehabil*: 570-577, 2001.
16. Degeorges R, Oberlin C: Measurement of three-joint-finger motions. Three dimensional approach. *Radiol Anat*: 105-112, 2003.
17. Latash ML, Scholz JF, Danion F, Schoner G: Finger coordination during discrete and oscillatory force production tasks. *Exp Brain*: 419-432, 2002.
18. Nowak DA, Hermsdorfer J: Selective deficits of grip force control during object manipulation in patient with reduced sensibility of grasping digits. *Neurosci Res*: 65-72, 2003.
19. Li S, Latash ML, Zatsiorsky Vm: Finger interaction during multi-finger tasks involving finger addition and removal. *Expl Brain Res*: 230-236, 2003.
20. Li S, Latash ML, Zatsiorsky Vm: Force sharing among fingers as a model of a redundancy problem. *Expl Brain Res*: 276-286, 1998.
21. Lii Zm, Latash ML, Zatsiorsky Vm: The effect of finger extensor mechanism on the flexor force during isometric tasks. *J Biomech*: 1097-1102, 2001.
22. Rearick MP, Santello M: Force synergies multifingered grasping. Effect of predictability in object center of mass and handedness. *Exp Brain Res*: 38-49, 2002.

23. García Elías M, An KN, Berglund LJ, Lindscheid RL, Cooney WP, Chao EY: Extensor mechanism of the fingers I: A quantitative geometric study. *J Hand Surg*: 1130-1136, 1991.
24. García Elías M, An KN, Berglund LJ, Lindscheid RL, Cooney WP, Chao EY: Extensor mechanism of the fingers II: Tensile properties of components. *J Hand Surg*: 1136-1140, 1991.
25. A Caffaz, G Cannata: The design and development of the DIST-Hand dextrous gripper. Vol 3. *Robotics and Automation*: 2075 –2080, 1998.
26. I Yamano, T Maeno: Five-fingered Robot Hand using Ultrasonic Motors and Elastic Elements. *Robotics and Automation*: 2673 –2678. IEEE International Conference on 2005.
27. Inoue T: Study on hemispherical soft-fingered handling for fine manipulation by minimum D.O.F. robotic hand. Dept of robòtics, RitsumeikanUniv. *Robotics and Automation*: 2454-2459, 2006. IEEE International Conference.
28. Johan MF, Landsmeer Fadi J.Bejjani: Basic Biomechanics of the Musculoskeletal System. *Lea & Febiger*. Biomechanics of the hand: 275–304, 1989.
29. L.Y. Chang, Y. Matsuoka: A kinematic thumb model for the ACT hand. *Robotics and Automation*: 1000 –1005. IEEE International Conference on 2006.
30. Tubiana R, Thomine J, Mackin E. Examination of the hand and wrist. 2 edMartin Dunitz, 1996.
31. Peña Pitarch E, Ticó Falguera N, Jingzhou Yang: Virtual Human Hand: Model and kinematics. EPSEM-UPC, Althaia i Texas Tech Univesity, 2011.
32. H Kawasaki, T Komatsu, K Uchiyama: Dexterous anthropomorphic robot hand with distributed tactile sensor: Gifu hand II. *Mechatronics*: 296 –303, 2002.

33. Han-Pang Huang, Chun-Yen Chen: Development of a myoelectric discrimination System for a multi-degree prosthetic hand. *Robotics and Automation. IEEE International Conference on*. Vol. 3. 2392 –2397, 1999.
34. Hai Huang et al: The Mechanical Design and Experiments of HIT/DLR Prosthetic Hand. *Robotics and Biomimetics*: 896 –901, 2006.
35. H Takeda et al: Development of prosthetic arm with pneumatic prosthetic hand and tendon-driven wrist. *Engineering in Medicine and Biology Society: 5048 –5051. Annual International Conference of the IEEE*, 2009.
36. Bucholz B, Armstrong T, Goldstein S: Anthropometric data for describing the kinematics of the human hand. *Ergonomics* 35(3): 261-273, 1992.
37. Sancho-Bru X: Model biomecànic de la mà orientat orientat al disseny d'eines manuals. Universitat Jaume I, 2000.
38. J. Angeles: *Fundamentals of Robotic Mechanical Systems: Theory, Methods, and Algorithms. Mechanical Engineering Series*, 2002.
39. Bastioni M, Flerackers M, Palmius, J: User guide. MakeHuman Team, 2012.
40. Software tutorials: Blender Foundations. Organization Blender Foundation.
41. Lyle RC: A performance test for assessment of upper limb function in physical rehabilitations treatment and research. *Int J Rehabil Research* 4: 483-492, 1981.
42. Carroll D: A quantitative test of upper extremity function. *J Chronic Diseases* 18: 479-491, 1965.
43. Williams RG, Johnston M, Willis LA, Bennett AE: Disability: a model and measurement technique. *Br J Prev Soc Med* 30: 71-78, 1976.
44. Crow JL, Lincoln NNB, Nouri FM, De Weerd W: The effectiveness of EMG biofeedback in the treatment of arm function after stroke. *International Disability Studies* 11: 155-160 ,1989.

45. De Weerdt W, Harrison MA: Measuring recovery of arm-hand function in stroke patients: a comparison of the Brunnstrom-Fugl-Meyer test and Action Research arm test. *Physiotherapy Canada* 37: 65-70, 1985.

MAQUINARI UTILITZAT EN LA REALITZACIÓ DEL TFG

Software lliure Blender, eina de disseny assistit per computador en tres dimensions. Versió 2.62.

Plataforma lliure Makehuman, eina de modelatge i prototipatge d'humans virtuals.

Guant CyberGlove II del fabricant *CyberGlove Systems LLC*, eina de recollida de dades durant el moviment de la mà humana del pacient.

Maquinari informàtic i software, proporcionat pel fabricant del guant CyberGlove II, *VirtualHand Software Development Kit (SDK)*. Eina de visualització i recopilació de les dades capturades pel guant.

Pàgina Turbosquid, web de descàrrega de models 3D per a Blender, de la qual s'han descarregat objectes per complementar la simulació.

Editor de dibuix i gràfics *CorelDraw*, distribuït i comercialitzat per *Corel Corporation*, versió 16(X6).

Full de càlcul *Excel* distribuït per *Microsoft Office*, versió 15.0.4433.1506.

Equipament i material de l'ARA Test propietat del centre hospitalari Althaia de Manresa, que ha permès el seu ús.

Peu de rei, aparell de metrologia per usat verificar les dimensions dels diferents objectes de l'ARA Test.

ANEX A

MODEL DE ACTION RESEARCH ARM TEST (ARA TEST)

ACTION RESEARCH ARM TEST

Patient Name: _____

Rater Name: _____

Date: _____

Instructions

There are four subtests: Grasp, Grip, Pinch, Gross Movement. Items in each are ordered so that:

- if the subject passes the first, no more need to be administered and he scores top marks for that subtest;
- if the subject fails the first *and* fails the second, he scores zero, and again no more tests need to be performed in that subtest;
- otherwise he needs to complete all tasks within the subtest

Activity	Score
----------	-------

Pinch

- | | |
|--|-------|
| 1. Ball bearing, 6 mm, 3 rd finger and thumb (If score = 3, total = 18 and go to Grossmt) | _____ |
| 2. Marble, 1.5 cm, index finger and thumb (If score = 0, total = 0 and go to Grossmt) | _____ |
| 3. Ball bearing 2 nd finger and thumb | _____ |
| 4. Ball bearing 1 st finger and thumb | _____ |
| 5. Marble 3 rd finger and thumb | _____ |
| 6. Marble 2 nd finger and thumb | _____ |

Coefficient of reproducibility = 0.99

Coefficient of scalability = 0.98

Grasp

- | | |
|--|-------|
| 1. Block, wood, 10 cm cube (If score = 3, total = 18 and to Grip)
Pick up a 10 cm block | _____ |
| 2. Block, wood, 2.5 cm cube (If score = 0, total = 0 and go to Grip)
Pick up 2.5 cm block | _____ |
| 3. Block, wood, 5 cm cube | _____ |
| 4. Block, wood, 7.5 cm cube | _____ |
| 5. Ball (Cricket), 7.5 cm diameter | _____ |
| 6. Stone 10 x 2.5 x 1 cm | _____ |

Coefficient of reproducibility = 0.98

Coefficient of scalability = 0.94

Grip

- | | |
|---|-------|
| 1. Pour water from glass to glass (If score = 3, total = 12, and go to Pinch) | _____ |
| 2. Tube 2.25 cm (If score = 0, total = 0 and go to Pinch) | _____ |
| 3. Tube 1 x 16 cm | _____ |
| 4. Washer (3.5 cm diameter) over bolt | _____ |

Coefficient of reproducibility = 0.99

Coefficient of scalability = 0.98

Grossmt (Gross Movement)

1. Place hand behind head (If score = 3, total = 9 and finish) _____

2. (If score = 0, total = 0 and finish) _____

3. Place hand on top of head _____

4. Hand to mouth _____

Coefficient of reproducibility = 0.98

Coefficient of scalability = 0.97

ANEX B: MOSTRA DE CAPTURA DE DADES I CONVERSIÓ A 25 G.LL.:

SENSOR 18	69	69	69	69	69	69	69	69	69	69	69	69
SENSOR 1	116	116	116	116	116	116	116	116	116	116	116	116
SENSOR 2	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120
SENSOR 3	111	111	111	111	111	111	111	111	111	111	111	111
SENSOR 4	124	124	124	124	124	124	124	124	124	124	124	124
SENSOR 5	121	121	121	121	121	121	121	121	121	121	121	121
SENSOR 6	86	86	86	86	86	86	86	86	86	86	86	86
SENSOR 7	73	73	73	73	73	73	73	73	73	73	73	73
SENSOR 8	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80
SENSOR 9	147	147	147	147	147	147	147	147	147	147	147	147
SENSOR 10	75	75	75	75	75	75	75	75	75	75	75	75
SENSOR 11	78	78	78	78	78	78	78	78	78	78	78	78
SENSOR 12	128	128	128	128	128	128	128	128	128	128	128	128
SENSOR 13	91	91	91	91	91	91	91	91	91	91	91	91
SENSOR 14	66	66	66	66	66	66	66	66	66	66	66	66
SENSOR 15	131	131	131	131	131	131	131	131	131	131	131	131
SENSOR 16	103	103	103	103	103	103	103	103	103	103	103	103
SENSOR 17	129	129	129	129	129	129	129	129	129	129	129	129
SECUENCIA	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
SENSOR 1	116	116	116	116	119	120	122	123	120	116	118	126
SENSOR 2	120	120	120	120	120	120	120	118	118	119	119	120
SENSOR 3	111	111	111	111	110	110	108	103	99	97	97	98
SENSOR 4	124	124	124	124	124	124	123	122	122	122	121	121
SENSOR 5	121	121	121	121	121	121	121	119	119	118	118	120
SENSOR 6	86	86	86	86	86	86	85	83	86	86	80	79
SENSOR 7	73	73	73	73	73	73	72	66	65	59	61	73
SENSOR 8	80	80	80	80	80	80	80	79	82	81	77	77
SENSOR 9	147	147	147	147	147	148	148	139	126	106	88	86
SENSOR 10	75	75	75	75	75	75	75	70	67	66	75	92
SENSOR 11	78	78	78	78	78	78	78	76	74	70	73	77
SENSOR 12	128	128	128	128	128	128	128	112	90	63	49	53
SENSOR 13	91	91	91	91	91	91	91	95	106	114	125	136
SENSOR 14	66	66	66	66	66	66	66	59	54	51	54	54
SENSOR 15	131	131	131	131	131	131	131	117	96	89	86	98
SENSOR 16	103	103	103	103	99	95	91	77	70	90	101	103
SENSOR 17	129	129	129	129	130	130	130	130	129	129	130	130
SENSOR 18	69	69	69	69	71	71	74	80	90	97	98	98

SEQUENCIA	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36
SENSOR 1	136	137	136	138	139	140	133	131	131	132	131	132
SENSOR 2	121	121	120	120	120	120	120	120	122	122	123	124
SENSOR 3	107	114	117	115	115	116	114	108	106	105	102	102
SENSOR 4	121	121	121	121	121	121	121	121	121	121	121	121
SENSOR 5	122	122	123	123	123	122	122	121	121	121	121	121
SENSOR 6	82	90	92	95	95	99	100	100	101	101	100	93
SENSOR 7	82	81	81	80	80	78	77	75	74	74	72	70
SENSOR 8	83	89	90	90	90	94	95	95	95	94	93	89
SENSOR 9	100	100	101	102	103	113	114	106	104	104	97	97
SENSOR 10	108	110	110	107	107	107	105	100	96	95	88	85
SENSOR 11	87	97	100	100	100	105	110	111	111	111	110	106
SENSOR 12	75	78	83	83	83	83	85	82	81	81	78	78
SENSOR 13	152	157	157	154	154	155	153	146	140	139	129	121
SENSOR 14	66	83	84	84	85	95	104	106	107	107	109	106
SENSOR 15	108	110	112	113	113	114	117	116	116	115	115	115
SENSOR 16	118	100	102	98	96	75	66	65	67	68	72	76
SENSOR 17	127	125	125	123	123	123	122	121	122	122	123	125
SENSOR 18	93	88	85	85	85	84	83	83	86	87	87	87
SEQUENCIA	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48
SENSOR 1	132	135	140	141	140	140	140	141	141	141	141	140
SENSOR 2	124	124	124	124	124	124	124	124	124	124	124	124
SENSOR 3	102	101	101	101	101	101	101	101	101	101	101	101
SENSOR 4	121	121	121	121	121	121	121	121	121	121	121	121
SENSOR 5	121	121	121	121	121	121	121	121	121	121	121	121
SENSOR 6	88	88	88	89	89	89	89	89	89	90	90	90
SENSOR 7	71	71	70	70	70	70	70	71	71	71	71	71
SENSOR 8	86	88	91	91	91	92	92	92	92	92	92	92
SENSOR 9	100	100	100	100	100	100	104	106	107	107	107	107
SENSOR 10	85	84	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80
SENSOR 11	103	102	105	106	106	106	107	107	107	107	107	107
SENSOR 12	79	79	83	85	85	85	86	86	86	86	86	87
SENSOR 13	120	113	108	108	108	108	108	108	108	108	108	108
SENSOR 14	102	106	114	115	115	115	115	115	115	115	116	116
SENSOR 15	115	115	115	115	115	115	115	115	115	115	115	115
SENSOR 16	87	121	140	130	123	118	116	117	119	119	121	122
SENSOR 17	126	126	126	126	126	126	127	127	127	127	127	127
SENSOR 18	84	83	83	83	83	83	83	82	82	82	82	81

SEQUENCIA	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60
SENSOR 1	137	135	132	130	127	127	125	123	123	123	124	124
SENSOR 2	125	125	125	124	124	124	124	123	122	122	121	121
SENSOR 3	101	101	101	102	102	102	102	102	102	101	101	101
SENSOR 4	121	121	122	122	122	122	122	123	123	123	124	124
SENSOR 5	121	121	121	121	121	120	120	120	120	120	119	119
SENSOR 6	90	90	90	92	93	93	93	93	93	92	92	92
SENSOR 7	72	73	73	73	72	72	72	72	72	72	71	69
SENSOR 8	92	92	93	93	94	94	94	93	93	92	92	92
SENSOR 9	107	108	109	108	107	107	109	114	115	116	118	115
SENSOR 10	80	81	80	77	75	75	74	71	71	70	70	70
SENSOR 11	107	107	107	107	101	98	96	88	86	85	84	84
SENSOR 12	89	90	93	93	93	94	94	101	103	103	105	105
SENSOR 13	107	107	104	103	102	101	101	97	97	96	95	95
SENSOR 14	116	116	112	107	93	88	84	71	69	68	65	65
SENSOR 15	115	115	116	115	112	112	112	109	109	109	111	112
SENSOR 16	132	137	141	140	142	142	141	136	136	137	134	131
SENSOR 17	128	128	128	128	129	129	129	130	130	130	131	131
SENSOR 18	81	80	80	80	80	80	80	81	81	81	81	81
SEQUENCIA	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72
SENSOR 1	126	126	122	119	118	116	116	115	112	112	109	108
SENSOR 2	121	121	121	121	121	122	122	122	123	123	122	121
SENSOR 3	101	101	101	101	101	102	102	102	102	102	103	103
SENSOR 4	124	124	124	124	124	124	124	124	125	125	125	125
SENSOR 5	119	119	119	119	119	119	119	119	119	119	118	118
SENSOR 6	90	90	88	88	88	88	88	88	81	79	76	76
SENSOR 7	68	68	67	67	67	66	66	66	68	68	65	65
SENSOR 8	89	88	87	87	87	87	87	87	84	82	79	79
SENSOR 9	112	110	110	110	110	111	110	110	111	113	120	123
SENSOR 10	70	70	71	71	72	71	71	71	71	70	69	69
SENSOR 11	83	83	83	83	83	84	84	84	83	83	82	82
SENSOR 12	105	103	102	102	102	101	101	102	104	104	103	103
SENSOR 13	95	95	95	95	95	95	94	94	93	93	92	92
SENSOR 14	65	65	66	66	66	67	67	67	66	66	65	65
SENSOR 15	115	116	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120
SENSOR 16	114	110	118	118	117	114	112	111	109	109	107	107
SENSOR 17	131	131	132	132	132	132	132	132	132	132	132	132
SENSOR 18	79	78	76	76	76	75	75	75	75	75	74	74

SEQUENCIA	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84
SENSOR 1	105	105	105	108	109	109	104	104	104	110	111	115
SENSOR 2	122	122	122	122	122	122	123	123	125	127	127	127
SENSOR 3	103	103	104	104	105	105	106	107	104	107	107	107
SENSOR 4	125	125	125	125	125	125	125	125	125	125	125	125
SENSOR 5	118	118	118	118	118	118	119	119	120	121	121	122
SENSOR 6	78	78	81	82	83	83	89	91	92	92	92	91
SENSOR 7	65	65	65	62	62	62	67	67	70	75	77	81
SENSOR 8	77	77	77	77	77	78	83	85	87	87	87	87
SENSOR 9	128	129	133	137	137	137	138	138	139	140	142	142
SENSOR 10	69	69	69	69	69	69	72	73	76	83	86	89
SENSOR 11	80	79	79	79	80	80	83	85	86	87	88	88
SENSOR 12	107	108	108	108	108	108	110	110	111	113	115	116
SENSOR 13	92	92	92	92	92	92	95	95	101	109	111	116
SENSOR 14	64	64	64	67	67	68	71	72	73	73	74	74
SENSOR 15	119	119	119	121	121	121	122	122	122	122	122	124
SENSOR 16	109	110	113	108	107	107	107	106	96	78	75	61
SENSOR 17	130	129	127	125	125	124	121	120	119	119	119	121
SENSOR 18	73	73	77	85	86	87	89	89	90	91	93	98
SEQUENCIA	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96
SENSOR 1	116	116	116	110	107	104	85	77	77	79	80	80
SENSOR 2	127	126	125	123	119	117	117	119	119	119	119	119
SENSOR 3	105	104	104	103	103	102	104	108	108	108	108	108
SENSOR 4	125	125	126	126	126	126	127	127	127	127	126	126
SENSOR 5	121	121	120	119	118	117	117	116	116	116	116	116
SENSOR 6	84	83	82	80	78	74	76	79	82	82	80	80
SENSOR 7	78	76	66	59	52	50	48	48	47	47	47	46
SENSOR 8	82	80	76	72	72	71	71	75	77	77	77	77
SENSOR 9	142	142	143	145	145	150	149	149	148	148	148	148
SENSOR 10	81	79	72	67	61	55	56	55	54	54	54	54
SENSOR 11	84	83	77	69	68	64	64	66	70	70	70	70
SENSOR 12	113	113	113	114	119	129	132	133	133	133	133	132
SENSOR 13	110	107	99	94	88	79	79	78	78	78	78	78
SENSOR 14	72	72	67	60	56	50	50	49	49	49	49	49
SENSOR 15	121	121	121	121	123	129	128	128	128	129	129	129
SENSOR 16	58	63	71	86	85	84	61	55	50	46	46	47
SENSOR 17	128	129	131	134	134	136	136	137	137	137	137	137
SENSOR 18	101	102	108	112	111	112	101	95	92	88	85	84

SEQUENCIA	97	98	99	100	101	102	103	104	105	106	107	108
SENSOR 1	80	80	80	80	80	82	82	83	83	83	83	83
SENSOR 2	119	119	119	119	119	119	119	119	119	119	119	119
SENSOR 3	108	108	108	108	108	108	108	108	108	108	108	108
SENSOR 4	126	126	126	126	126	126	126	126	126	126	126	126
SENSOR 5	116	116	116	116	116	116	116	116	116	116	116	116
SENSOR 6	80	79	79	79	78	78	78	78	78	78	78	78
SENSOR 7	46	46	46	46	46	46	46	47	47	47	47	49
SENSOR 8	77	77	77	77	77	76	76	76	76	76	76	76
SENSOR 9	147	147	147	147	146	145	144	143	143	143	143	143
SENSOR 10	54	54	54	53	53	53	53	55	55	55	55	56
SENSOR 11	70	70	70	70	70	70	70	71	71	71	71	71
SENSOR 12	132	132	132	132	130	130	130	130	130	130	130	131
SENSOR 13	78	78	78	78	77	77	77	77	78	78	78	78
SENSOR 14	49	49	49	49	49	50	50	50	50	50	50	50
SENSOR 15	129	129	129	129	129	129	130	131	131	131	131	131
SENSOR 16	47	47	47	46	45	43	39	38	36	36	36	35
SENSOR 17	137	137	137	137	137	137	137	137	137	137	137	137
SENSOR 18	84	82	82	82	80	76	75	74	74	74	74	73
SEQUENCIA	109	110	111	112	113	114	115	116	117	118	119	120
SENSOR 1	83	85	86	90	93	95	96	96	97	97	98	98
SENSOR 2	119	119	119	119	119	119	119	119	119	119	119	119
SENSOR 3	109	109	109	109	110	110	110	110	111	111	111	111
SENSOR 4	126	125	125	125	125	125	125	125	124	124	124	124
SENSOR 5	116	117	117	118	118	119	119	119	119	119	120	120
SENSOR 6	78	79	79	80	81	82	82	82	83	83	83	83
SENSOR 7	49	53	53	56	60	62	65	65	67	67	68	68
SENSOR 8	76	76	76	76	76	76	76	76	76	76	76	76
SENSOR 9	143	143	143	144	145	145	146	146	146	146	146	146
SENSOR 10	56	58	58	61	63	64	65	66	67	67	67	67
SENSOR 11	71	71	71	72	72	72	72	72	72	72	72	72
SENSOR 12	131	131	131	131	131	132	132	132	133	133	133	133
SENSOR 13	79	80	80	81	83	83	84	84	85	85	86	86
SENSOR 14	50	50	50	52	53	53	54	54	54	55	55	55
SENSOR 15	131	131	131	131	131	131	131	129	129	129	129	129
SENSOR 16	35	39	40	48	61	70	77	79	88	89	91	91
SENSOR 17	136	136	136	135	134	134	133	133	132	132	132	132
SENSOR 18	73	71	69	69	68	68	70	71	71	71	71	71

SECUENCIA	121	122	123	124	125							
SENSOR 1	99	99	99	99	100							
SENSOR 2	119	119	119	119	119							
SENSOR 3	111	111	111	111	111							
SENSOR 4	124	124	124	124	124							
SENSOR 5	120	120	120	120	120							
SENSOR 6	84	84	84	84	84							
SENSOR 7	69	69	69	69	69							
SENSOR 8	76	76	76	76	76							
SENSOR 9	146	146	146	146	146							
SENSOR 10	67	67	68	68	68							
SENSOR 11	72	72	73	73	73							
SENSOR 12	133	133	133	133	133							
SENSOR 13	86	86	86	86	86							
SENSOR 14	55	55	55	55	55							
SENSOR 15	129	129	129	129	129							
SENSOR 16	93	93	93	93	93							
SENSOR 17	132	132	132	132	132							
SENSOR 18	71	71	71	71	71							

A continuació en la següent pàgina es pot observar la conversió d'aquestes 125 seqüències, capturades amb el guant de 18 sensors *Cyberglove II*, al model de 25 graus de llibertat definit en aquesta memòria.

Aquesta conversió és una mostra, la resta de les conversions realitzades es poden analitzar el document adjunt a la memòria, titulat: "Preses de dades i conversions".

SEQUENCIA	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
GRAU 1	29,9	29,9	29,9	29,9	29,9	29,9	29,9	29,9	29,9	29,9	29,9	29,9
GRAU 2	21,8	21,8	21,8	21,8	21,8	21,8	21,8	21,8	21,8	21,8	21,8	21,8
GRAU 3	7,7	7,7	7,7	7,7	7,7	7,7	7,7	7,7	7,7	7,7	7,7	7,7
GRAU 4	21,8	21,8	21,8	21,8	21,8	21,8	21,8	21,8	21,8	21,8	21,8	21,8
GRAU 5	43,1	43,1	43,1	43,1	43,1	43,1	43,1	43,1	43,1	43,1	43,1	43,1
GRAU 6	38,4	38,4	38,4	38,4	38,4	38,4	38,4	38,4	38,4	38,4	38,4	38,4
GRAU 7	42,7	42,7	42,7	42,7	42,7	42,7	42,7	42,7	42,7	42,7	42,7	42,7
GRAU 8	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0
GRAU 9	13,3	13,3	13,3	13,3	13,3	13,3	13,3	13,3	13,3	13,3	13,3	13,3
GRAU 10	31,6	31,6	31,6	31,6	31,6	31,6	31,6	31,6	31,6	31,6	31,6	31,6
GRAU 11	38,5	38,5	38,5	38,5	38,5	38,5	38,5	38,5	38,5	38,5	38,5	38,5
GRAU 12	22,1	22,1	22,1	22,1	22,1	22,1	22,1	22,1	22,1	22,1	22,1	22,1
GRAU 13	14,7	14,7	14,7	14,7	14,7	14,7	14,7	14,7	14,7	14,7	14,7	14,7
GRAU 14	10,4	10,4	10,4	10,4	10,4	10,4	10,4	10,4	10,4	10,4	10,4	10,4
GRAU 15	2,4	2,4	2,4	2,4	2,4	2,4	2,4	2,4	2,4	2,4	2,4	2,4
GRAU 16	14,7	14,7	14,7	14,7	14,7	14,7	14,7	14,7	14,7	14,7	14,7	14,7
GRAU 17	34,2	34,2	34,2	34,2	34,2	34,2	34,2	34,2	34,2	34,2	34,2	34,2
GRAU 18	25,3	25,3	25,3	25,3	25,3	25,3	25,3	25,3	25,3	25,3	25,3	25,3
GRAU 19	16,9	16,9	16,9	16,9	16,9	16,9	16,9	16,9	16,9	16,9	16,9	16,9
GRAU 20	16,1	16,1	16,1	16,1	16,1	16,1	16,1	16,1	16,1	16,1	16,1	16,1
GRAU 21	4,8	4,8	4,8	4,8	4,8	4,8	4,8	4,8	4,8	4,8	4,8	4,8
GRAU 22	24,8	24,8	24,8	24,8	24,8	24,8	24,8	24,8	24,8	24,8	24,8	24,8
GRAU 23	31,5	31,5	31,5	31,5	31,5	31,5	31,5	31,5	31,5	31,5	31,5	31,5
GRAU 24	13,3	13,3	13,3	13,3	13,3	13,3	13,3	13,3	13,3	13,3	13,3	13,3
GRAU 25	8,9	8,9	8,9	8,9	8,9	8,9	8,9	8,9	8,9	8,9	8,9	8,9

SEQUENCIA	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
GRAU 1	29,9	29,9	29,9	29,9	29,7	29,6	29,4	29,3	29,6	29,9	29,8	29,1
GRAU 2	21,8	21,8	21,8	21,8	21,8	21,8	16,4	10,9	10,9	10,9	5,5	5,5
GRAU 3	7,7	7,7	7,7	7,7	7,7	7,7	7,7	5,4	5,4	6,5	6,5	7,7
GRAU 4	21,8	21,8	21,8	21,8	21,8	21,8	16,4	10,9	10,9	10,9	5,5	5,5
GRAU 5	43,1	43,1	43,1	43,1	43,1	43,6	43,6	38,7	31,7	20,8	11,1	10,0
GRAU 6	38,4	38,4	38,4	38,4	38,4	38,6	38,6	36,2	32,8	28,2	24,8	24,9
GRAU 7	42,7	42,7	42,7	42,7	42,7	42,7	42,7	37,3	37,3	34,7	34,7	40,0
GRAU 8	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	19,3	18,0	20,0	20,0	16,0	15,3
GRAU 9	13,3	13,3	13,3	13,3	13,3	13,3	12,9	12,0	13,3	13,3	10,7	10,2
GRAU 10	31,6	31,6	31,6	31,6	31,6	31,6	31,6	28,7	24,6	19,5	16,9	17,7
GRAU 11	38,5	38,5	38,5	38,5	38,5	38,5	37,8	33,5	32,7	28,4	29,8	38,5
GRAU 12	22,1	22,1	22,1	22,1	22,1	22,1	22,1	21,3	23,5	22,8	19,9	19,9
GRAU 13	14,7	14,7	14,7	14,7	14,7	14,7	14,7	14,2	15,7	15,2	13,2	13,2
GRAU 14	10,4	10,4	10,4	10,4	10,4	10,4	10,4	10,7	11,2	11,7	12,0	11,9
GRAU 15	2,4	2,4	2,4	2,4	2,4	2,4	2,4	2,2	2,0	2,2	2,4	2,6

GRAU 16	14,7	14,7	14,7	14,7	14,7	14,7	14,7	14,7	15,4	16,3	17,4	18,0	17,8
GRAU 17	34,2	34,2	34,2	34,2	34,2	34,2	34,2	34,2	31,6	30,0	29,5	34,2	43,2
GRAU 18	25,3	25,3	25,3	25,3	25,3	25,3	25,3	25,3	24,1	22,9	20,5	22,3	24,7
GRAU 19	16,9	16,9	16,9	16,9	16,9	16,9	16,9	16,9	16,1	15,3	13,7	14,9	16,5
GRAU 20	16,1	16,1	16,1	16,1	16,1	16,1	16,1	16,1	16,7	17,5	18,1	18,4	18,1
GRAU 21	4,8	4,8	4,8	4,8	4,8	4,7	4,7	4,7	4,3	4,0	4,4	4,8	5,3
GRAU 22	24,8	24,8	24,8	24,8	24,8	24,8	24,8	24,8	26,1	28,0	29,0	29,5	28,6
GRAU 23	31,5	31,5	31,5	31,5	31,5	31,5	31,5	31,5	33,2	37,7	41,0	45,6	50,2
GRAU 24	13,3	13,3	13,3	13,3	13,3	13,3	13,3	13,3	9,2	6,4	4,6	6,4	6,4
GRAU 25	8,9	8,9	8,9	8,9	8,9	8,9	8,9	8,9	6,2	4,2	3,1	4,2	4,2

SEQUENCIA	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36
GRAU 1	28,3	28,2	28,3	28,1	28,0	27,9	28,5	28,7	28,7	28,6	28,7	28,6
GRAU 2	5,5	5,5	5,5	5,5	5,5	5,5	5,5	5,5	5,5	5,5	5,5	5,5
GRAU 3	8,9	8,9	7,7	7,7	7,7	7,7	7,7	7,7	10,1	10,1	11,3	12,5
GRAU 4	5,5	5,5	5,5	5,5	5,5	5,5	5,5	5,5	5,5	5,5	5,5	5,5
GRAU 5	17,6	17,6	18,1	18,7	19,2	24,6	25,2	20,8	19,7	19,7	15,9	15,9
GRAU 6	28,4	28,6	29,1	29,3	29,4	30,6	30,9	29,7	29,3	29,3	28,2	28,2
GRAU 7	45,3	45,3	48,0	48,0	48,0	45,3	45,3	42,7	42,7	42,7	42,7	42,7
GRAU 8	17,3	22,7	24,0	26,0	26,0	28,7	29,3	29,3	30,0	30,0	29,3	24,7
GRAU 9	11,6	15,1	16,0	17,3	17,3	19,1	19,6	19,6	20,0	20,0	19,6	16,4
GRAU 10	21,8	22,3	23,3	23,3	23,3	23,3	23,6	23,1	22,9	22,9	22,3	22,3
GRAU 11	45,1	44,4	44,4	43,6	43,6	42,2	41,5	40,0	39,3	39,3	37,8	36,4
GRAU 12	24,3	28,7	29,4	29,4	29,4	32,4	33,1	33,1	33,1	32,4	31,6	28,7
GRAU 13	16,2	19,1	19,6	19,6	19,6	21,6	22,1	22,1	22,1	21,6	21,1	19,1
GRAU 14	11,5	11,4	11,3	11,3	11,3	11,3	11,3	11,3	11,3	11,3	11,4	11,4
GRAU 15	3,1	2,8	2,9	2,8	2,8	2,6	2,3	2,2	2,2	2,3	2,3	2,4
GRAU 16	16,9	16,8	16,6	16,6	16,6	16,6	16,5	16,6	16,7	16,7	16,8	16,8
GRAU 17	51,6	52,6	52,6	51,1	51,1	51,1	50,0	47,4	45,3	44,7	41,1	39,5
GRAU 18	30,7	36,7	38,6	38,6	38,6	41,6	44,6	45,2	45,2	45,2	44,6	42,2
GRAU 19	20,5	24,5	25,7	25,7	25,7	27,7	29,7	30,1	30,1	30,1	29,7	28,1
GRAU 20	17,5	17,4	17,3	17,3	17,3	17,2	17,1	17,2	17,2	17,2	17,3	17,3
GRAU 21	6,2	5,7	5,7	5,7	5,7	5,1	4,5	4,4	4,4	4,5	4,6	4,7
GRAU 22	27,4	27,2	27,0	26,9	26,9	26,9	26,6	26,7	26,8	26,8	26,9	26,9
GRAU 23	56,8	58,9	58,9	57,6	57,6	58,0	57,2	54,3	51,8	51,4	47,3	43,9
GRAU 24	13,3	23,1	23,7	23,7	24,3	30,1	35,3	36,4	37,0	37,0	38,2	36,4
GRAU 25	8,9	15,4	15,8	15,8	16,2	20,0	23,5	24,3	24,7	24,7	25,4	24,3

SEQUENCIA	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48
GRAU 1	28,6	28,3	27,9	27,8	27,9	27,9	27,9	27,8	27,8	27,8	27,8	27,9
GRAU 2	5,5	5,5	5,5	5,5	5,5	5,5	5,5	5,5	5,5	5,5	5,5	5,5
GRAU 3	12,5	12,5	12,5	12,5	12,5	12,5	12,5	12,5	12,5	12,5	12,5	12,5
GRAU 4	5,5	5,5	5,5	5,5	5,5	5,5	5,5	5,5	5,5	5,5	5,5	5,5
GRAU 5	17,6	17,6	17,6	17,6	17,6	17,6	19,7	20,8	21,4	21,4	21,4	21,4
GRAU 6	28,7	28,7	29,0	29,2	29,2	29,2	29,7	30,0	30,1	30,1	30,1	30,2
GRAU 7	42,7	42,7	42,7	42,7	42,7	42,7	42,7	42,7	42,7	42,7	42,7	42,7
GRAU 8	21,3	21,3	21,3	22,0	22,0	22,0	22,0	22,0	22,0	22,7	22,7	22,7
GRAU 9	14,2	14,2	14,2	14,7	14,7	14,7	14,7	14,7	14,7	15,1	15,1	15,1
GRAU 10	22,5	22,5	23,3	23,6	23,6	23,6	23,8	23,8	23,8	23,8	23,8	24,0
GRAU 11	37,1	37,1	36,4	36,4	36,4	36,4	36,4	37,1	37,1	37,1	37,1	37,1
GRAU 12	26,5	27,9	30,1	30,1	30,1	30,9	30,9	30,9	30,9	30,9	30,9	30,9
GRAU 13	17,6	18,6	20,1	20,1	20,1	20,6	20,6	20,6	20,6	20,6	20,6	20,6
GRAU 14	11,4	11,4	11,3	11,3	11,3	11,3	11,2	11,2	11,2	11,2	11,2	11,2
GRAU 15	2,5	3,1	3,5	3,4	3,3	3,2	3,2	3,2	3,2	3,2	3,2	3,2
GRAU 16	16,8	16,8	16,6	16,5	16,5	16,5	16,5	16,5	16,5	16,5	16,5	16,4
GRAU 17	39,5	38,9	36,8	36,8	36,8	36,8	36,8	36,8	36,8	36,8	36,8	36,8
GRAU 18	40,4	39,8	41,6	42,2	42,2	42,2	42,8	42,8	42,8	42,8	42,8	42,8
GRAU 19	26,9	26,5	27,7	28,1	28,1	28,1	28,5	28,5	28,5	28,5	28,5	28,5
GRAU 20	17,3	17,3	17,2	17,2	17,2	17,2	17,2	17,2	17,2	17,2	17,2	17,1
GRAU 21	5,1	6,2	7,0	6,8	6,5	6,4	6,3	6,4	6,4	6,4	6,5	6,5
GRAU 22	26,9	26,9	26,8	26,8	26,8	26,8	26,7	26,7	26,7	26,7	26,7	26,7
GRAU 23	43,5	40,6	38,5	38,5	38,5	38,5	38,5	38,5	38,5	38,5	38,5	38,5
GRAU 24	34,1	36,4	41,0	41,6	41,6	41,6	41,6	41,6	41,6	41,6	42,2	42,2
GRAU 25	22,7	24,3	27,4	27,7	27,7	27,7	27,7	27,7	27,7	27,7	28,1	28,1

SEQUENCIA	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60
GRAU 1	28,2	28,3	28,6	28,8	29,0	29,0	29,2	29,3	29,3	29,3	29,3	29,3
GRAU 2	5,5	5,5	10,9	10,9	10,9	10,9	10,9	16,4	16,4	16,4	21,8	21,8
GRAU 3	13,6	13,6	13,6	12,5	12,5	12,5	12,5	11,3	10,1	10,1	8,9	8,9
GRAU 4	5,5	5,5	10,9	10,9	10,9	10,9	10,9	16,4	16,4	16,4	21,8	21,8
GRAU 5	21,4	21,9	22,5	21,9	21,4	21,4	22,5	25,2	25,7	26,3	27,3	25,7
GRAU 6	30,4	30,6	30,9	30,8	30,7	30,8	31,0	32,2	32,5	32,6	33,0	32,6
GRAU 7	42,7	42,7	42,7	42,7	42,7	40,0	40,0	40,0	40,0	40,0	37,3	37,3
GRAU 8	22,7	22,7	22,7	24,0	24,7	24,7	24,7	24,7	24,7	24,0	24,0	24,0
GRAU 9	15,1	15,1	15,1	16,0	16,4	16,4	16,4	16,4	16,4	16,0	16,0	16,0
GRAU 10	24,4	24,6	25,1	25,1	25,1	25,3	25,3	26,6	27,0	27,0	27,4	27,4
GRAU 11	37,8	38,5	38,5	38,5	37,8	37,8	37,8	37,8	37,8	37,8	37,1	35,6
GRAU 12	30,9	30,9	31,6	31,6	32,4	32,4	32,4	31,6	31,6	30,9	30,9	30,9
GRAU 13	20,6	20,6	21,1	21,1	21,6	21,6	21,6	21,1	21,1	20,6	20,6	20,6
GRAU 14	11,2	11,2	11,1	11,1	11,1	11,1	11,1	10,9	10,9	10,9	10,8	10,8
GRAU 15	3,3	3,3	3,3	3,3	3,2	3,2	3,2	3,0	3,0	3,1	3,0	3,0

GRAU 16	16,4	16,3	16,2	16,2	16,2	16,2	16,2	15,9	15,8	15,8	15,7	15,7
GRAU 17	36,8	37,4	36,8	35,3	34,2	34,2	33,7	32,1	32,1	31,6	31,6	31,6
GRAU 18	42,8	42,8	42,8	42,8	39,2	37,3	36,1	31,3	30,1	29,5	28,9	28,9
GRAU 19	28,5	28,5	28,5	28,5	26,1	24,9	24,1	20,9	20,1	19,7	19,3	19,3
GRAU 20	17,1	17,1	17,0	17,0	17,1	17,1	17,1	17,0	17,0	17,0	16,9	16,9
GRAU 21	6,6	6,7	6,7	6,5	6,4	6,4	6,3	6,1	6,1	6,1	6,1	6,0
GRAU 22	26,7	26,7	26,5	26,6	26,8	26,8	26,8	26,9	26,8	26,8	26,6	26,6
GRAU 23	38,1	38,1	36,9	36,5	36,1	35,6	35,6	34,0	34,0	33,6	33,2	33,2
GRAU 24	42,2	42,2	39,9	37,0	28,9	26,0	23,7	16,2	15,0	14,5	12,7	12,7
GRAU 25	28,1	28,1	26,6	24,7	19,3	17,3	15,8	10,8	10,0	9,6	8,5	8,5

SEQUENCIA	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72
GRAU 1	29,1	29,1	29,4	29,7	29,8	29,9	29,9	30,0	30,3	30,3	30,5	30,6
GRAU 2	21,8	21,8	21,8	21,8	21,8	21,8	21,8	21,8	27,3	27,3	27,3	27,3
GRAU 3	8,9	8,9	8,9	8,9	8,9	10,1	10,1	10,1	11,3	11,3	10,1	8,9
GRAU 4	21,8	21,8	21,8	21,8	21,8	21,8	21,8	21,8	27,3	27,3	27,3	27,3
GRAU 5	24,1	23,0	23,0	23,0	23,0	23,5	23,0	23,0	23,5	24,6	28,4	30,1
GRAU 6	32,3	31,8	31,8	31,8	31,8	31,8	31,7	31,8	32,1	32,3	33,1	33,5
GRAU 7	37,3	37,3	37,3	37,3	37,3	37,3	37,3	37,3	37,3	37,3	34,7	34,7
GRAU 8	22,7	22,7	21,3	21,3	21,3	21,3	21,3	21,3	16,7	15,3	13,3	13,3
GRAU 9	15,1	15,1	14,2	14,2	14,2	14,2	14,2	14,2	11,1	10,2	8,9	8,9
GRAU 10	27,4	27,0	26,8	26,8	26,8	26,6	26,6	26,8	27,2	27,2	27,0	27,0
GRAU 11	34,9	34,9	34,2	34,2	34,2	33,5	33,5	33,5	34,9	34,9	32,7	32,7
GRAU 12	28,7	27,9	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	25,0	23,5	21,3	21,3
GRAU 13	19,1	18,6	18,1	18,1	18,1	18,1	18,1	18,1	16,7	15,7	14,2	14,2
GRAU 14	10,8	10,9	10,9	10,9	10,9	10,9	10,9	10,9	10,9	10,9	10,9	10,9
GRAU 15	2,8	2,7	2,7	2,7	2,6	2,5	2,5	2,5	2,4	2,4	2,3	2,3
GRAU 16	15,7	15,8	15,8	15,8	15,8	15,9	15,9	15,8	15,7	15,7	15,8	15,8
GRAU 17	31,6	31,6	32,1	32,1	32,6	32,1	32,1	32,1	32,1	31,6	31,1	31,1
GRAU 18	28,3	28,3	28,3	28,3	28,3	28,9	28,9	28,9	28,3	28,3	27,7	27,7
GRAU 19	18,9	18,9	18,9	18,9	18,9	19,3	19,3	19,3	18,9	18,9	18,5	18,5
GRAU 20	16,8	16,8	16,8	16,8	16,8	16,8	16,8	16,8	16,7	16,7	16,8	16,8
GRAU 21	5,6	5,5	5,5	5,4	5,3	5,1	5,0	5,0	4,8	4,8	4,6	4,5
GRAU 22	26,4	26,3	26,1	26,1	26,1	26,1	26,1	26,1	26,0	26,0	26,0	26,0
GRAU 23	33,2	33,2	33,2	33,2	33,2	33,2	32,7	32,7	32,3	32,3	31,9	31,9
GRAU 24	12,7	12,7	13,3	13,3	13,3	13,9	13,9	13,9	13,3	13,3	12,7	12,7
GRAU 25	8,5	8,5	8,9	8,9	8,9	9,2	9,2	9,2	8,9	8,9	8,5	8,5

SEQUENCIA	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84
GRAU 1	30,8	30,8	30,8	30,6	30,5	30,5	30,9	30,9	30,9	30,4	30,3	30,0
GRAU 2	27,3	27,3	27,3	27,3	27,3	27,3	27,3	27,3	27,3	27,3	27,3	27,3
GRAU 3	10,1	10,1	10,1	10,1	10,1	10,1	11,3	11,3	13,6	16,0	16,0	16,0
GRAU 4	27,3	27,3	27,3	27,3	27,3	27,3	27,3	27,3	27,3	27,3	27,3	27,3
GRAU 5	32,8	33,3	35,5	37,7	37,7	37,7	38,2	38,2	38,7	39,3	40,4	40,4
GRAU 6	34,4	34,6	35,1	35,6	35,6	35,6	35,9	35,9	36,1	36,4	36,8	36,9
GRAU 7	34,7	34,7	34,7	34,7	34,7	34,7	37,3	37,3	40,0	42,7	42,7	45,3
GRAU 8	14,7	14,7	16,7	17,3	18,0	18,0	22,0	23,3	24,0	24,0	24,0	23,3
GRAU 9	9,8	9,8	11,1	11,6	12,0	12,0	14,7	15,6	16,0	16,0	16,0	15,6
GRAU 10	27,7	27,9	27,9	27,9	27,9	27,9	28,3	28,3	28,5	28,9	29,2	29,4
GRAU 11	32,7	32,7	32,7	30,5	30,5	30,5	34,2	34,2	36,4	40,0	41,5	44,4
GRAU 12	19,9	19,9	19,9	19,9	19,9	20,6	24,3	25,7	27,2	27,2	27,2	27,2
GRAU 13	13,2	13,2	13,2	13,2	13,2	13,7	16,2	17,2	18,1	18,1	18,1	18,1
GRAU 14	10,8	10,8	10,8	10,8	10,8	10,8	10,7	10,7	10,7	10,7	10,6	10,6
GRAU 15	2,2	2,2	2,3	2,3	2,3	2,3	2,2	2,1	2,0	1,9	1,9	1,7
GRAU 16	15,6	15,6	15,6	15,6	15,6	15,6	15,5	15,5	15,4	15,4	15,3	15,2
GRAU 17	31,1	31,1	31,1	31,1	31,1	31,1	32,6	33,2	34,7	38,4	40,0	41,6
GRAU 18	26,5	25,9	25,9	25,9	26,5	26,5	28,3	29,5	30,1	30,7	31,3	31,3
GRAU 19	17,7	17,3	17,3	17,3	17,7	17,7	18,9	19,7	20,1	20,5	20,9	20,9
GRAU 20	16,7	16,7	16,7	16,7	16,7	16,7	16,6	16,6	16,6	16,5	16,5	16,4
GRAU 21	4,4	4,4	4,5	4,5	4,6	4,6	4,3	4,3	4,0	3,8	3,7	3,5
GRAU 22	26,0	26,0	26,0	25,9	25,9	25,9	25,8	25,8	25,8	25,7	25,7	25,5
GRAU 23	31,9	31,9	31,9	31,9	31,9	31,9	33,2	33,2	35,6	39,0	39,8	41,9
GRAU 24	12,1	12,1	12,1	13,9	13,9	14,5	16,2	16,8	17,3	17,3	17,9	17,9
GRAU 25	8,1	8,1	8,1	9,2	9,2	9,6	10,8	11,2	11,6	11,6	11,9	11,9

SEQUENCIA	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96
GRAU 1	29,9	29,9	29,9	30,4	30,7	30,9	32,5	33,2	33,2	33,0	32,9	32,9
GRAU 2	27,3	27,3	32,7	32,7	32,7	32,7	38,2	38,2	38,2	38,2	32,7	32,7
GRAU 3	16,0	14,8	13,6	11,3	6,5	4,2	4,2	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5
GRAU 4	27,3	27,3	32,7	32,7	32,7	32,7	38,2	38,2	38,2	38,2	32,7	32,7
GRAU 5	40,4	40,4	40,9	42,0	42,0	44,7	44,2	44,2	43,6	43,6	43,6	43,6
GRAU 6	36,6	36,6	36,7	37,1	37,5	38,9	39,0	39,1	39,0	39,0	39,0	38,9
GRAU 7	42,7	42,7	40,0	37,3	34,7	32,0	32,0	29,3	29,3	29,3	29,3	29,3
GRAU 8	18,7	18,0	17,3	16,0	14,7	12,0	13,3	15,3	17,3	17,3	16,0	16,0
GRAU 9	12,4	12,0	11,6	10,7	9,8	8,0	8,9	10,2	11,6	11,6	10,7	10,7
GRAU 10	28,9	28,9	28,9	29,0	30,0	31,8	32,4	32,6	32,6	32,6	32,6	32,4
GRAU 11	42,2	40,7	33,5	28,4	23,3	21,8	20,4	20,4	19,6	19,6	19,6	18,9
GRAU 12	23,5	22,1	19,1	16,2	16,2	15,4	15,4	18,4	19,9	19,9	19,9	19,9
GRAU 13	15,7	14,7	12,7	10,8	10,8	10,3	10,3	12,3	13,2	13,2	13,2	13,2
GRAU 14	10,7	10,7	10,7	10,7	10,6	10,4	10,3	10,3	10,3	10,3	10,3	10,3
GRAU 15	1,7	1,8	1,9	2,0	1,9	1,8	1,0	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7

GRAU 16	15,4	15,4	15,4	15,3	15,1	14,7	14,6	14,5	14,5	14,5	14,5	14,6
GRAU 17	37,4	36,3	32,6	30,0	26,8	23,7	24,2	23,7	23,2	23,2	23,2	23,2
GRAU 18	28,9	28,3	24,7	19,9	19,3	16,9	16,9	18,1	20,5	20,5	20,5	20,5
GRAU 19	19,3	18,9	16,5	13,3	12,9	11,2	11,2	12,0	13,7	13,7	13,7	13,7
GRAU 20	16,6	16,6	16,6	16,5	16,4	16,1	16,1	16,1	16,1	16,1	16,1	16,1
GRAU 21	3,5	3,6	3,8	4,0	3,8	3,6	2,1	1,5	1,3	1,3	1,4	1,4
GRAU 22	25,8	25,8	25,8	25,8	25,5	24,9	24,9	24,9	24,9	24,8	24,8	24,8
GRAU 23	39,4	38,1	34,8	32,7	30,3	26,5	26,5	26,1	26,1	26,1	26,1	26,1
GRAU 24	16,8	16,8	13,9	9,8	7,5	4,0	4,0	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5
GRAU 25	11,2	11,2	9,2	6,6	5,0	2,7	2,7	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3

SEQUENCIA	97	98	99	100	101	102	103	104	105	106	107	108
GRAU 1	32,9	32,9	32,9	32,9	32,9	32,8	32,8	32,7	32,7	32,7	32,7	32,7
GRAU 2	32,7	32,7	32,7	32,7	32,7	32,7	32,7	32,7	32,7	32,7	32,7	32,7
GRAU 3	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5
GRAU 4	32,7	32,7	32,7	32,7	32,7	32,7	32,7	32,7	32,7	32,7	32,7	32,7
GRAU 5	43,1	43,1	43,1	43,1	42,5	42,0	41,5	40,9	40,9	40,9	40,9	40,9
GRAU 6	38,8	38,8	38,8	38,8	38,5	38,4	38,2	38,1	38,1	38,1	38,1	38,2
GRAU 7	29,3	29,3	29,3	29,3	29,3	29,3	29,3	29,3	29,3	29,3	29,3	29,3
GRAU 8	16,0	15,3	15,3	15,3	14,7	14,7	14,7	14,7	14,7	14,7	14,7	14,7
GRAU 9	10,7	10,2	10,2	10,2	9,8	9,8	9,8	9,8	9,8	9,8	9,8	9,8
GRAU 10	32,4	32,4	32,4	32,4	32,0	32,0	32,0	32,0	32,0	32,0	32,0	32,2
GRAU 11	18,9	18,9	18,9	18,9	18,9	18,9	18,9	19,6	19,6	19,6	19,6	21,1
GRAU 12	19,9	19,9	19,9	19,9	19,9	19,1	19,1	19,1	19,1	19,1	19,1	19,1
GRAU 13	13,2	13,2	13,2	13,2	13,2	12,7	12,7	12,7	12,7	12,7	12,7	12,7
GRAU 14	10,3	10,3	10,3	10,3	10,3	10,3	10,3	10,3	10,3	10,3	10,3	10,3
GRAU 15	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6
GRAU 16	14,6	14,6	14,6	14,6	14,7	14,7	14,7	14,7	14,7	14,7	14,7	14,6
GRAU 17	23,2	23,2	23,2	22,6	22,6	22,6	22,6	23,7	23,7	23,7	23,7	24,2
GRAU 18	20,5	20,5	20,5	20,5	20,5	20,5	20,5	21,1	21,1	21,1	21,1	21,1
GRAU 19	13,7	13,7	13,7	13,7	13,7	13,7	13,7	14,1	14,1	14,1	14,1	14,1
GRAU 20	16,1	16,1	16,1	16,1	16,1	16,1	16,1	16,1	16,1	16,1	16,1	16,0
GRAU 21	1,4	1,4	1,4	1,4	1,3	1,4	1,3	1,3	1,2	1,2	1,2	1,2
GRAU 22	24,8	24,8	24,8	24,8	24,9	24,9	24,8	24,7	24,7	24,7	24,7	24,7
GRAU 23	26,1	26,1	26,1	26,1	25,7	25,7	25,7	25,7	26,1	26,1	26,1	26,1
GRAU 24	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0
GRAU 25	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,7	2,7	2,7	2,7	2,7	2,7	2,7

SEQUENCIA	109	110	111	112	113	114	115	116	117	118	119	120
GRAU 1	32,7	32,5	32,4	32,1	31,8	31,7	31,6	31,6	31,5	31,5	31,4	31,4
GRAU 2	32,7	27,3	27,3	27,3	27,3	27,3	27,3	27,3	21,8	21,8	21,8	21,8
GRAU 3	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5
GRAU 4	32,7	27,3	27,3	27,3	27,3	27,3	27,3	27,3	21,8	21,8	21,8	21,8
GRAU 5	40,9	40,9	40,9	41,5	42,0	42,0	42,5	42,5	42,5	42,5	42,5	42,5
GRAU 6	38,2	38,2	38,2	38,3	38,4	38,5	38,6	38,6	38,7	38,7	38,7	38,7
GRAU 7	29,3	32,0	32,0	34,7	34,7	37,3	37,3	37,3	37,3	37,3	40,0	40,0
GRAU 8	14,7	15,3	15,3	16,0	16,7	17,3	17,3	17,3	18,0	18,0	18,0	18,0
GRAU 9	9,8	10,2	10,2	10,7	11,1	11,6	11,6	11,6	12,0	12,0	12,0	12,0
GRAU 10	32,2	32,2	32,2	32,2	32,2	32,4	32,4	32,4	32,6	32,6	32,6	32,6
GRAU 11	21,1	24,0	24,0	26,2	29,1	30,5	32,7	32,7	34,2	34,2	34,9	34,9
GRAU 12	19,1	19,1	19,1	19,1	19,1	19,1	19,1	19,1	19,1	19,1	19,1	19,1
GRAU 13	12,7	12,7	12,7	12,7	12,7	12,7	12,7	12,7	12,7	12,7	12,7	12,7
GRAU 14	10,3	10,3	10,3	10,3	10,3	10,3	10,3	10,3	10,3	10,3	10,3	10,3
GRAU 15	0,6	0,7	0,7	1,0	1,2	1,4	1,5	1,6	1,7	1,7	1,8	1,8
GRAU 16	14,6	14,6	14,6	14,6	14,6	14,6	14,6	14,6	14,5	14,5	14,5	14,5
GRAU 17	24,2	25,3	25,3	26,8	27,9	28,4	28,9	29,5	30,0	30,0	30,0	30,0
GRAU 18	21,1	21,1	21,1	21,7	21,7	21,7	21,7	21,7	21,7	21,7	21,7	21,7
GRAU 19	14,1	14,1	14,1	14,5	14,5	14,5	14,5	14,5	14,5	14,5	14,5	14,5
GRAU 20	16,0	16,0	16,0	16,0	16,0	16,0	16,0	16,1	16,1	16,1	16,1	16,1
GRAU 21	1,2	1,4	1,5	1,9	2,4	2,8	3,1	3,1	3,4	3,5	3,6	3,6
GRAU 22	24,7	24,7	24,7	24,7	24,7	24,7	24,7	24,8	24,8	24,8	24,8	24,8
GRAU 23	26,5	26,9	26,9	27,4	28,2	28,2	28,6	28,6	29,0	29,0	29,4	29,4
GRAU 24	4,0	4,0	4,0	5,2	5,8	5,8	6,4	6,4	6,4	6,9	6,9	6,9
GRAU 25	2,7	2,7	2,7	3,5	3,9	3,9	4,2	4,2	4,2	4,6	4,6	4,6

SEQUENCIA	121	122	123	124	125							
GRAU 1	31,3	31,3	31,3	31,3	31,3							
GRAU 2	21,8	21,8	21,8	21,8	21,8							
GRAU 3	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5							
GRAU 4	21,8	21,8	21,8	21,8	21,8							
GRAU 5	42,5	42,5	42,5	42,5	42,5							
GRAU 6	38,7	38,7	38,7	38,7	38,7							
GRAU 7	40,0	40,0	40,0	40,0	40,0							
GRAU 8	18,7	18,7	18,7	18,7	18,7							
GRAU 9	12,4	12,4	12,4	12,4	12,4							
GRAU 10	32,6	32,6	32,6	32,6	32,6							
GRAU 11	35,6	35,6	35,6	35,6	35,6							
GRAU 12	19,1	19,1	19,1	19,1	19,1							
GRAU 13	12,7	12,7	12,7	12,7	12,7							
GRAU 14	10,3	10,3	10,3	10,3	10,3							
GRAU 15	1,8	1,8	1,8	1,8	1,9							
GRAU 16	14,5	14,5	14,5	14,5	14,5							
GRAU 17	30,0	30,0	30,5	30,5	30,5							
GRAU 18	21,7	21,7	22,3	22,3	22,3							
GRAU 19	14,5	14,5	14,9	14,9	14,9							
GRAU 20	16,1	16,1	16,1	16,1	16,1							
GRAU 21	3,7	3,7	3,7	3,7	3,7							
GRAU 22	24,8	24,8	24,8	24,8	24,8							
GRAU 23	29,4	29,4	29,4	29,4	29,4							
GRAU 24	6,9	6,9	6,9	6,9	6,9							
GRAU 25	4,6	4,6	4,6	4,6	4,6							

ANEX C

OBTENCIÓ DELS VALORS DELS SENSORS PER A POSICIÓ DE REPÒS.

Veiem a continuació com s'han obtingut els valors mitjans dels 18 sensors en repòs. La posició de repòs és la posició natural de la mà a l'estar sobre una superfície plana sense efectuar cap moviment forçat. Aquesta posició pot tenir petites variacions angulars en funció de la persona, és per això que s'ha realitzat una mostra de 4 persones amb tres captures i se n'ha calculat la mitjana.

- Sensor 1:

Els 12 valors han estat:

130	117	120	125	117	136
119	128	115	118	123	120

La mitjana dels quals és: 122

- Sensor 2:

Els 12 valors han estat:

121	123	123	130	127	123
125	124	121	128	126	129

La mitjana dels quals és: 125

- Sensor 3:

Els 12 valors han estat:

111	129	123	122	127	118
123	114	125	117	120	127

La mitjana dels quals és: 121

- Sensor 4:

Els 12 valors han estat:

122	122	123	122	122	123
122	122	122	123	122	122

La mitjana dels quals és: 122

- Sensor 5:

Els 12 valors han estat:

120	120	122	124	122	126
122	121	124	125	125	123

La mitjana dels quals és: 123

- Sensor 6:

Els 12 valors han estat:

79	84	87	83	92	98
88	89	94	89	83	87

La mitjana dels quals és: 88

- Sensor 7:

Els 12 valors han estat:

97	86	89	92	84	90
86	89	84	79	83	88

La mitjana dels quals és: 87

- Sensor 8:

Els 12 valors han estat:

81	84	89	83	85	84
84	88	92	90	83	88

La mitjana dels quals és: 86

- Sensor 9:

Els 12 valors han estat:

128	130	132	135	131	129
130	136	135	130	134	128

La mitjana dels quals és: 132

- Sensor 10:

Els 12 valors han estat:

68	69	71	72	70	73
70	69	73	72	71	68

La mitjana dels quals és: 71

- Sensor 11:

Els 12 valors han estat:

90	88	92	90	87	89
85	84	81	86	86	84

La mitjana dels quals és: 87

- Sensor 12:

Els 12 valors han estat:

109	115	113	119	121	118
114	116	118	114	113	110

La mitjana dels quals és: 115

- Sensor 13:

Els 12 valors han estat:

84	87	91	87	83	86
90	86	87	88	89	85

La mitjana dels quals és: 87

- Sensor 14:

Els 12 valors han estat:

80	83	77	79	71	73
75	73	77	81	74	76

La mitjana dels quals és: 77

- Sensor 15:

Els 12 valors han estat:

118	126	128	128	124	119
120	127	130	126	123	125

La mitjana dels quals és: 124

- Sensor 16:

Els 12 valors han estat:

135	126	128	124	130	126
119	115	118	120	123	124

La mitjana dels quals és: 124

- Sensor 17:

Els 12 valors han estat:

118	122	123	129	124	130
119	125	124	128	125	119

La mitjana dels quals és: 124

- Sensor 18:

Els 12 valors han estat:

68	74	70	72	71	69
72	77	72	75	77	71

La mitjana dels quals és: 72

ALTRES DOCUMENTS



Escola Politècnica Superior
d'Enginyeria de Manresa

**NORMATIVA DEL TFG DE
L'EPSEM**

Emplenar per l'estudiant/a

ANNEX 1.- AUTORIZACIÓ DE LA MATRÍCULA DEL TFG EN MODALITAT A o B

ESTUDIANT/A: GERARD PUIGORIOL ARNAUS		Núm. Identificatiu 39380794X	
GRAU EN: ENGINYERIA MECÀNICA			
DIRECTOR/A DEL TFG: ESTEBAN PEÑA PITARCH			
DEPARTAMENT: ENGINYERIA MECÀNICA			
REALITZACIÓ EN ANGLÈS: Sí <input type="checkbox"/> No <input checked="" type="checkbox"/>			
MODALITAT: A <input checked="" type="checkbox"/> B <input type="checkbox"/>			
TÍTOL: REPRESENTACIÓ MECÀNICA D'UNA MÀ HUMANA I SIMULACIÓ DEL SEU MOVIMENT EN CAD 3D.			
DESCRIPCIÓ:			
EN EL PRESENT TREBALL ES REALITZA UN ESTUDI MECÀNIC DE L'ESTRUCTURA INTERNA D'UNA MÀ HUMANA, CONJUNTAMENT AMB UNA REPRESENTACIÓ I SIMULACIÓ DEL SEU MOVIMENT.			
EL MODEL DE MÀ DESCRIT CONSTA DE 25 GRAUS DE LLIBERTAT I HA ESTAT MODELAT AMB EL PROGRAMARI BLENDER, SOFTWARE LLIURE MULTI-PLATAFORMA DE CAD 3D.			
LA SIMULACIÓ DEL MOVIMENT HA ESTAT REALITZADA EN BASE AL GUANT CYBERGLOVE II DE 18 SENSORS QUE HA PERMÉS CALCULAR CADASCUN DELS 25 GRAUS DE LLIBERTAT DE LA MÀ EN CADA INSTANT DE TEMPS DEL SEU MOVIMENT.			
SOL·LICITUD PER A SER AVALUAT DE LES COMPETÈNCIES GENÈRIQUES EN NIVELL 3 (si no estan assolides)		Sí	No
1.- Emprenedoria i innovació			x
2.- Sostenibilitat i compromís social			x
3.- Tercera Llengua			x
4.- Comunicació eficaç oral i escrita			x
5.- Ús solvent dels recursos d'informació			x
6.- Aprenentatge autònom			x
7.- Treball en equip			x

Director/a

Signatura

Co-director/a

(si s'escau)

Signatura

Estudiant/a

Signatura

Data Registre : _____ (validesa: un any des de la data del registre)

3 Exemplars: Director/a / Secretaria de l'Escola / Estudiant/a per incorporar al TFG

* Normativa Transitòria fins que l'aplicatiu PRISMA permeti la gestió telemàtica del TFG
(Document aprovat per la Comissió Permanent de 5 de juliol de 2012, i per la Junta de Centre de 12 de juliol de 2012)



Escola Politècnica Superior
d'Enginyeria de Manresa

**NORMATIVA DEL TFG DE
L'EPSEM**

Emplenar per l'estudiant/a

ANNEX 2.- LLIURAMENT DEL TFG

ESTUDIANT/A: GERARD PUIGORIOL ARNAUS **Núm. Identificatiu** 39380794X

GRAU EN: ENGINYERIA MECÀNICA

DIRECTOR/A DEL TFG: ESTEBAN PEÑA PITARCH

BREU RESUM DEL TFG (màxim 500 paraules):

En el present treball es realitza un estudi de la mà humana. Aquest estudi analitza els diferents ossos que conformen l'estructura interna de la mà i els diferents rangs de moviment que aquests poden realitzar.

En base a aquest anàlisi s'avalua un model de mà virtual de 25 graus de llibertat, el qual suposa una complexitat considerable, però també una gran aproximació a l'estructura real de qualsevol mà humana.

Aquest model de mà descrit, que consta de 25 graus de llibertat, és representat virtualment i modelat en 3 dimensions amb el programa Blender, software lliure multiplataforma de Disseny Assistit per Computador (CAD).

Finalment, amb aquest programari es realitza una simulació del moviment de la mà. Per a la presa de dades s'ha utilitzat el guant Cyberglove II, que consta de 18 sensors, i ha permès determinar cadascun dels 25 graus de llibertat que determinen la posició de les diferents parts de la mà en cada instant del moviment.

D'aquesta manera el treball es pot dir que té tres grans blocs: l'anàlisi mecànic d'un model definit de mà, el modelat de l'estructura de 25 graus de llibertat en CAD i la simulació del moviment d'aquest model.

PARAULES CLAU (entre 2 i 5):

mà, virtual, moviment, simulació.

AUTORITZO A PUBLICAR EL TREBALL A UPCommons: Sí No

Director/a

Signatura

Co-director/a
(si s'escau)

Signatura

Estudiant/a

Signatura

Data lliurament : 26/06/2013

Lliurar a la secretaria: 1 còpia en paper de la memòria del TFG.

4 còpies en versió digital (CD o DVD) de la memòria del TFG

2 Exemplars: Secretaria de l'Escola / Estudiant/a

* Normativa Transitòria fins que l'aplicatiu PRISMA permeti la gestió telemàtica del TFG
(Document aprovat per la Comissió Permanent de 5 de juliol de 2012, i per la Junta de Centre de 12 de juliol de 2012)