

**MOVIMIENTO DE UN MODELO DE SIMULACIÓN DE UNA MANO HUMANA
EMPLEANDO EL GUANTE ACCELEGLOVE**

**SILVIA NATHALIA MORENO LIZARAZO
JAIRO ALEJANDRO VARGAS QUINTERO**

**UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA
FACULTAD DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA
ESCUELA DE INGENIERÍA
BUCARAMANGA
2012**

**MOVIMIENTO DE UN MODELO DE SIMULACIÓN DE UNA MANO HUMANA
EMPLEANDO EL GUANTE ACCELEGLOVE**

**SILVIA NATHALIA MORENO LIZARAZO
JAIRO ALEJANDRO VARGAS QUINTERO**

Trabajo de grado para optar por el título de ingeniero electrónico

**Director
Luis Ángel Silva PhD.
Ingeniero Electrónico**

**UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA
FACULTAD DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA
ESCUELA DE INGENIERÍA
BUCARAMANGA
2012**

Nota Aceptación:

Firma del presidente del jurado

Firma del jurado

Bucaramanga, Septiembre 20 de 2012

DEDICATORIA

**A mi compañero, por su trabajo y por ser mi apoyo,
A mi familia, porque sin ellos, nada de esto sería posible
y en especial a Lina, porque me enseñó
que el mundo hay que cambiarlo
con una sonrisa, a pesar
de las dificultades.**

SNML

**Esto es dedicado a mis padres quienes me han apoyado
en este camino lleno de obstáculos y retos. También,
a los profesores que nos han brindado
un apoyo incondicional.**

**Y nada más y nada menos que
a mi compañera de tesis que
me ha sabido exigir para
terminar este proceso.**

JAVQ

AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan agradecimientos:

A Dios por brindarnos salud, paciencia y mucha tranquilidad para poder seguir adelante ante las dificultades que se fueron presentando.

Al PhD. Luis Ángel Silva, por sus aportes durante el proceso que llevamos a cabo y por la confianza y apoyo al acogernos como sus estudiantes.

Al Ing. Sergio Salinas por su apoyo y sugerencias, así como por la exigencia que nos ayudó a lograr un resultado aún mejor.

Al Ing. Juan Carlos Villamizar por el apoyo y la colaboración, así como por el ánimo que nos brindó para seguir adelante.

Al Ing. Omar Pinzón por sus aportes y apoyo, que nos permitieron lograr el objetivo.

A Carlos Díaz, amigo, gracias, es complicado decirlo de otra manera.

A Camilo Moncayo por su apoyo y asesoría en los momentos difíciles.

A los amigos, que estuvieron motivándonos y apoyándonos ante las dificultades, creyendo en nuestras capacidades y en que todo se lograría.

A nuestras familias, apoyo incondicional y esencial en todo este proceso, sin ellos, nada de esto sería posible.

CONTENIDO

	PAG.
OBJETIVOS.....	13
1. INTRODUCCIÓN.....	16
2. ENTORNO DE SIMULACIÓN.....	28
2.1 MODELO CATIA.....	28
2.1.1 CATIA.....	28
2.1.2 CONSTRUCCIÓN DE LAS PIEZAS EN CATIA.....	29
2.2 MODELO ADAMS.....	37
2.2.1 ADAMS.....	37
2.2.2 CONSTRUCCIÓN DE LAS PIEZAS EN ADAMS.....	38
2.3 MODELO ACCELEGLOVE.....	55
2.3.1 ACCELEGLOVE.....	55
2.3.2 MICROSOFT EXCEL.....	58
2.3.3 CONSTRUCCIÓN DEL MODELO DE COMPORTAMIENTO.....	58
2.4 MODELO ADAMS-CONTROL/MATLAB.....	64
2.4.1 MATLAB.....	64
2.4.2 ADAMS/CONTROLS Y MATLAB/SIMULINK.....	64
2.4.3 DESARROLLO DEL MODELO ADAMS-CONTROL/MATLAB.....	65
2.4.4 DESARROLLO DEL LAZO DE CONTROL.....	74
2.4.4.1 ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	75
CONCLUSIONES.....	80
TRABAJOS FUTUROS.....	81
BIBLIOGRAFÍA.....	82

LISTA DE FIGURAS

	PÁG
Figura 1 Análisis biomecánico a un atleta.....	16
Figura 2 Esquema general de la temática.....	17
Figura 3 Sistema tele operado	19
Figura 4 Huesos de la mano	20
Figura 5 Numeración de tamaños de la mano	21
Figura 6 Medidas suplementarias de la mano.....	22
Figura 7 Medidas de la parte posterior de la mano	22
Figura 8 Campo de operación de las manos.....	23
Figura 9 Esquema del proyecto	27
Figura 10 Creación de un diseño mecánico	29
Figura 11 Paralelepipedo que forma la palma de la mano.....	30
Figura 12 Diseño inicial del círculo base de la primera falange del dedo	31
Figura 13 Diseño de la mano en Catia con el índice desarrollado.....	31
Figura 14 Configuración necesaria para poder ajustar el plano con una inclinación a la palma.....	33
Figura 15 Ubicación del primer cilindro en el plano del pulgar	34
Figura 16 Reflejo de la base del cilindro en la palma, para poder hacer la proyección.....	35
Figura 17 Configuración para poder modificar cada elemento de la mano	35
Figura 18 Características del chaflán realizado a los bordes de la figura.....	36
Figura 19 Mano resultante del diseño en Catia.....	36
Figura 20 Diseño inicial de una mano en Adams como falanges conectadas	38
Figura 21 Ubicación de la pieza Rigid Body	39
Figura 22 Dedos por falanges	39
Figura 23 Ubicación y elección del Joint	40
Figura 24 Ubicación del bloque Location	40
Figura 25 Modificación del bloque Location.....	41
Figura 26 Orden correcto de las articulaciones.....	41
Figura 27 Ubicación de la herramienta de giro.....	42
Figura 28 Dirección del movimiento en todas las falanges	42
Figura 29 Ubicación de la herramienta Construction Geometry	43
Figura 30 Ubicación correcta Construction Geometry	43
Figura 31 Ubicación Measure	44
Figura 32 Orden correcto de la herramienta Measure	44
Figura 33 Segunda parte del orden correcto de la herramienta Measure	45
Figura 34 Generación de variables	45
Figura 35 Zona de asignación del nombre a la variable	46
Figura 36 Elección de la función Varval	46
Figura 37 Variables asignadas.....	47

Figura 38 Eliminación de la constante y selección de la herramienta Measure	48
Figura 39 Configuración de la pieza.....	48
Figura 40 Configuración de la pieza.....	49
Figura 41 Ubicación de la herramienta Rotate	49
Figura 42 Modelo con modificaciones en las falanges	50
Figura 43 Envío a Matlab	51
Figura 44 Exportación en Adams Control	51
Figura 45 Asignación de variables de entrada y salida.....	52
Figura 46 Importación de gráficas	52
Figura 47 Importado de la mano de Catia a Adams	53
Figura 48 Configuración general del nombre de la parte enumerada	53
Figura 49 Ubicación del nombre de la parte	54
Figura 50 Mano importada a Adams desde Catia	54
Figura 51 Mano con los puntos asignados	55
Figura 52 Ejes del guante	56
Figura 53 Ubicación y enumeración de cada dedo	57
Figura 54 Guante Acceleglove.....	57
Figura 55 Fotografías de los movimientos de la mano	59
Figura 56 Movimiento del dedo índice con respecto al ángulo.....	60
Figura 57 Ruta para la herramienta Análisis de datos	61
Figura 58 Ubicación de Regresión	61
Figura 59 Cuadro para la configuración de regresión lineal.....	62
Figura 60 Resultados de las variables elegidas.....	62
Figura 61 Diagrama general Adams View y Controls Application.....	65
Figura 62 Proceso de carga de información de Adams en Matlab	66
Figura 63 Programación en Simulink.....	67
Figura 64 Programación del bloque naranja de Adams.....	67
Figura 65 Configuración para que la simulación sea interactiva	68
Figura 66 Creación de una nueva hoja de trabajo.....	69
Figura 67 Ubicación de la herramienta model properties	69
Figura 68 Ubicación Inittfcn	70
Figura 69 Programación de la función de inicio	70
Figura 70 Configuración por código del cierre del puerto.....	71
Figura 71 Código especial para el guante.....	72
Figura 72 Bloque Interpreted Matlab Function	72
Figura 73 Multiplexor de datos del guante Acceleglove	73
Figura 74 Configuración del bloque Data type conversion.....	73
Figura 75 Modelo final generado en Simulink	74
Figura 76 Subsistema con lazo de control	75
Figura 77 Movimiento 1, mano abierta	76
Figura 78 Movimiento 2, cierre del meñique.....	76
Figura 79 Movimiento 3, cierre del corazón.....	76

Figura 80 Movimiento 4, cierre del anular77
Figura 81 Movimiento 5, cierre del índice77
Figura 82 Movimiento 6, pulgar cerrado.....77
Figura 83 Gráficas de lazo de entrada, error y realimentación del dedo Índice.....78

LISTA DE TABLAS

	PÁG
Tabla 1 Correspondencia de medidas con referencia a la Figura 5	21
Tabla 2 Información correspondiente de medidas de la Figura 6	22
Tabla 3 Correspondencia de medidas con la Figura 7.....	23
Tabla 4 Relación de iconos de Catia con su nombre	32
Tabla 5 Relación de íconos usados en ADAMS	37
Tabla 6 Datos almacenados en Excel y separados los dedos	58
Tabla 7 Recopilación de datos Posicion 1	60

LISTA DE ANEXOS

	PÁG
ANEXO 1 TABLA DE RECOPIACIÓN DE DATOS	87
ANEXO 2 GRÁFICAS DE RESULTADOS.....	100

OBJETIVOS

Objetivo general

Desarrollar un modelo dinámico de simulación de la mano humana, a través del software ADAMS y controlar 5 grados de libertad, uno por cada dedo, a partir de señales generadas por el guante Acceleglove.

Objetivos específicos

- Establecer un modelo geométrico y dinámico de simulación de la mano derecha de un hombre adulto empleando software de diseño asistido por computador.
- Identificar las señales de transmisión del guante Acceleglove
- Establecer una comunicación entre el guante y el modelo de simulación de la mano, mediante un acondicionamiento matemático de las señales del guante a través de software.
- Desarrollar un sistema de control por software que permita posicionar los dedos del modelo de la mano simulada.

RESUMEN GENERAL DE TRABAJO DE GRADO

TÍTULO: MOVIMIENTO DE UN MODELO DE SIMULACIÓN DE UNA MANO HUMANA EMPLEANDO EL GUANTE ACCELEGLOVE

AUTORES: SILVIA NATHALIA MORENO LIZARAZO
JAIRO ALEJANDO VARGAS QUINTERO

FACULTAD: INGENIERÍA ELECTRÓNICA

DIRECTOR: LUIS ÁNGEL SILVA Ph.D.

RESUMEN

El proyecto consiste en el desarrollo de un modelo de simulación de una mano humana controlado a partir del guante Acceleglove¹. Para este propósito se crea un enlace entre los programas ADAMS, CATIA y MATLAB, logrando la captura, modelamiento y operación de un prototipo que corresponde al desplazamiento de la extremidad original. En una etapa inicial se realiza un modelo gráfico de la mano haciendo uso del programa CATIA, el cual es importado al software de diseño dinámico ADAMS. Adicionalmente se procede a analizar la información de las señales generadas por los acelerómetros que se encuentran en el guante. Se hace una captura de datos donde, para cada movimiento ejecutado, se tiene una correspondencia con el ángulo equivalente a la posición de la mano, generando de esta manera una ecuación lineal, con la cual se hace el modelamiento utilizando la herramienta Simulink de MATLAB. Finalmente se establece la co-simulación con ADAMS, que tiene incluido el diseño previamente importado desde CATIA. Esta conexión permite que al realizar movimientos con el guante, el desplazamiento se pueda apreciar gráficamente en la pantalla del computador.

Los resultados logrados permiten determinar que es posible generar una comunicación estable entre los tres software. Se demuestra que el modelo corresponde fielmente al movimiento original de la mano. De manera adicional se verifica la salida del sistema con un lazo de realimentación que permite aumentar la velocidad y disminuir la sensibilidad a perturbaciones del sistema.

PALABRAS CLAVE: Biomecánica, Teleoperación, CATIA, ADAMS, MATLAB, Control

Vº Bº DIRECTOR DE TRABAJO DE GRADO

¹ Guante producido por la empresa AnthroTronix. Posee acelerómetros en las falangetas con los cuales genera una señal según el movimiento que realice la mano. AnthroTronix. "AcceleGlove" [En línea] <http://www.acceleglove.com/default.asp> [Con acceso el 12-03-20120]

ABSTRACT OF THE PROJECT

TITLE: MOVEMENT OF A SIMULATION MODEL OF A HUMAN HAND USING THE GLOVE ACCLEGLOVE

AUTHORS: SILVIA NATHALIA MORENO LIZARAZO
JAIRO ALEJANDO VARGAS QUINTERO

DEPARTMENT: INGENIERÍA ELECTRÓNICA

DIRECTOR: LUIS ÁNGEL SILVA Ph.D

ABSTRACT

The project consists in the development of a simulation model of a human hand controlled from the Acceleglove. For this purpose a link is created between the programs: ADAMS, CATIA and MATLAB, achieving the capture, modelling and operation of a prototype that corresponds to the displacement of the original extremity.

In an initial stage a graphical model of the hand is made using the program CATIA, which is imported to the dynamic desing program ADAMS. Further on, there's an analysis of the information from the signals generated by the accelerometers that are on the glove. A capture of the data is made where for each movement made there is a correspondence with the equivalent angle to the position of the hand, generating this way the lineal equation, with the one the modeling is made using the tool Simulink from MATLAB. Finally a cosimulation is stablished with ADAMS with a previously imported design included from CATIA. This connection allows movements with the glove, the displacement can be graphically appreciated in the screen of the computer.

The results made allow establishing that is possible to generate an stable communication between the three software. It's demonstrated that the model corresponds loyally to the original movement of the hand. Additionally, the output of the system is verified with a loop of feedback that grants a faster speed and decrease the sensibility to perturbations of the system.

KEY WORDS: Biomechanics, Teleoperation, CATIA, ADAMS, MATLAB, Control

V° B° DIRECTOR OF THE DEGREE WORK

1. INTRODUCCIÓN

La biomecánica es una rama de la cinesiología encargada del movimiento y de su análisis estructural. Aborda los temas de la cinemática y la cinética, que se encargan del estudio en estructuras vivas, sus fuerzas internas y externas. Este campo ha sido ampliamente estudiado por entrenadores y físicos puros, como Wiener y Bigelow [1], que encuentran en el área, las bases de su estudio y trabajo sobre cibernética. Es de gran importancia reconocer las raíces de nuestra sociedad y su acelerado desarrollo gracias a los grandes avances tecnológicos. Este fenómeno, sumado al de la globalización, ha permitido optimizar y profundizar en áreas que ayuden a superar de mejor manera y en un menor tiempo enfermedades, rehabilitaciones y en general el nivel de vida de nuestra sociedad. En la Figura 1 se muestra un análisis que permite realizar las tecnologías actuales, donde se analizan los ángulos, centros de masa y movimientos realizados por el desplazamiento generado por un atleta, estudios dentro de los cuales permiten mejorar el rendimiento de los deportistas, diseño de prótesis, desarrollo de exoesqueletos, entre otros.

Figura 1 Análisis biomecánico a un atleta²

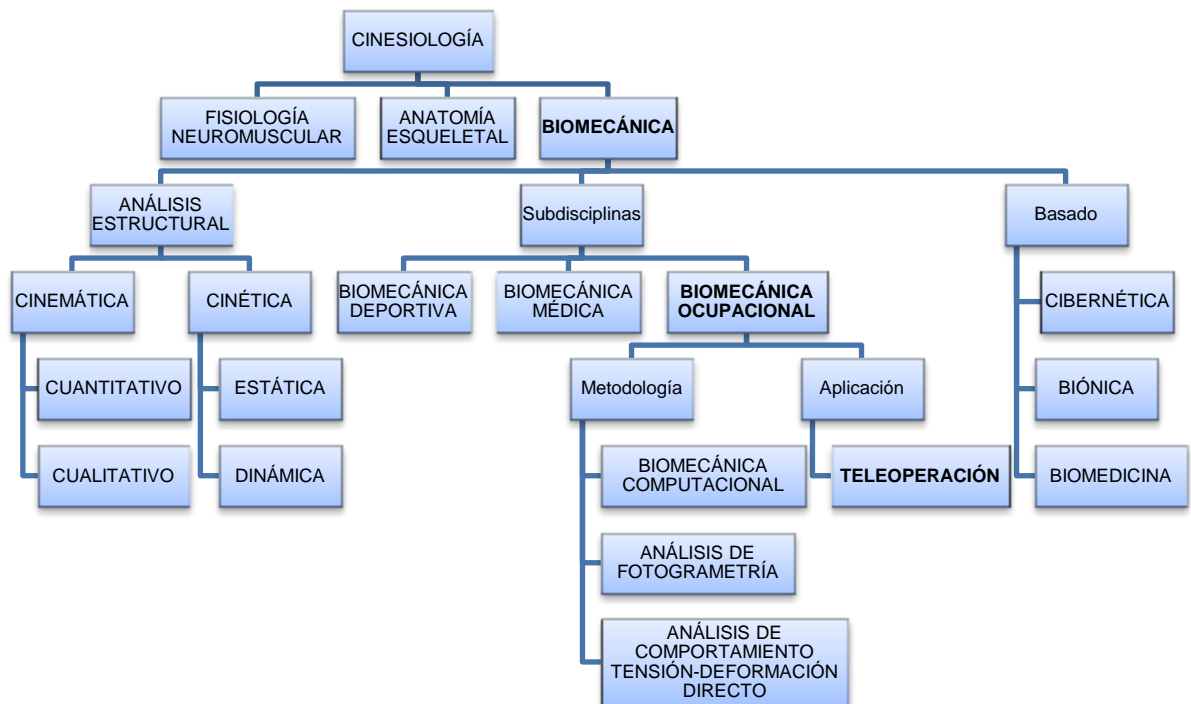
²Análisis biomecánico de un atleta [En línea]

<http://www.grupogaleano.com/catalogo/index.php?option=com_virtuemart&page=shop.browse&category_id=69&Itemid=2> [Con acceso el 25-08-2012]



En la Figura 2 se describen las áreas y los temas de trabajo que abarca la biomecánica, como bases de desarrollo se encuentra la biónica [2] y la biomedicina [3], así como las divisiones especializadas de su estudio. Para efectos del presente proyecto las consideraciones enfatizan en las subdisciplinas, dando una mayor importancia a la ocupacional.

Figura 2 Esquema general de la temática



La biomecánica ocupacional se enfoca en la relación entre el cuerpo y el entorno que lo rodea, buscando optimizar esta relación en el mejor desempeño posible para cada parte. [4]

Esta área pretende mejorar así la práctica laboral estudiando los espacios, recursos y capacidades del personal, para ello divide el objeto de trabajo en tres ejes: el computacional, basado en el análisis por medio de simulaciones y algoritmos programables; el análisis de fotogrametría, que consiste en el análisis de diagramas 3D con centro en el video digital y el análisis comportamental, cuyos ejes de experticia son las resistencias de los materiales según la fuerza a la que sean afectados, las cuales pueden ser compresivas o de tracción. [5]

La geometría computacional hace parte de la ciencia de la computación basándose en estudios de algoritmos los cuales pueden ser representados de forma geométrica, este tema se viene hablando desde 1978 en la tesis de Ph. D. de Michael Shamos en la Universidad de Yale y desde entonces se ha expandido estos conocimientos en el ámbito de mejorar. Estas mejoras se ven en la aplicación actual que es en el ámbito de la robótica, ingeniería asistida por computadora y sistemas de información geográfica, pertinente para el proyecto puesto que envuelve el modelo geométrico del sistema.³

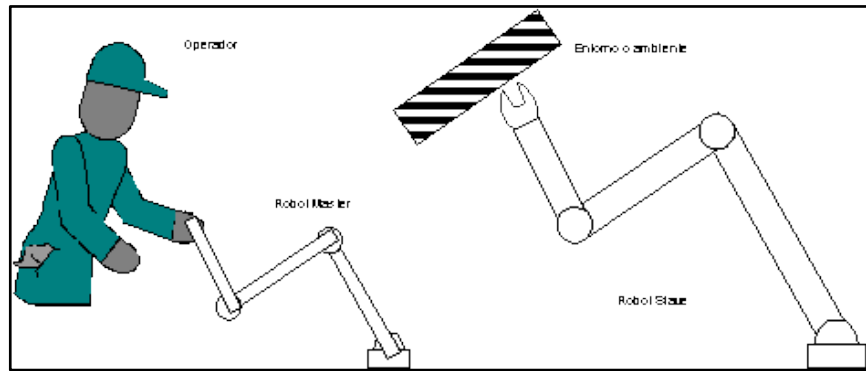
Un claro ejemplo de la biomecánica ocupacional es la tele-operación, la cual estudia metodologías y herramientas de operación a distancia, como la manipulación de robots (llamado esclavo) ubicado en zonas remotas, a través del manejo de un robot maestro, por un experto. El principal interés en el desarrollo de este trabajo es el de profundizar en el área de la cinesiología, debido a la necesidad del análisis estructural del elemento a trabajar. La aplicación de esta ciencia ha sido enfocada en simplificar procesos, optimizándolos en lugares donde anteriormente era compleja la acción humana, en su mayor parte por agentes nocivos o por seguridad en tareas de alto riesgo. Si se hace un análisis, se asemeja a un control realimentado con comportamiento lineal, similar a un sistema masa-amortiguador. [6]

En la Figura 3 se puede observar este ejemplo, donde se ve con claridad el operador y el robot controlado.

Figura 3 Sistema tele operado⁴

³Universidad de los andes, Facultad de ciencias, departamento de matemáticas, Francisco Rivero Mendoza, GEOMETRIA COMPUTACIONAL

⁴Tele operación [En línea]<<http://www.tecnun.es/asignaturas/control1/proyectos/teleop2D/teleoperacion.htm>> [Con acceso el 25-08-2012]

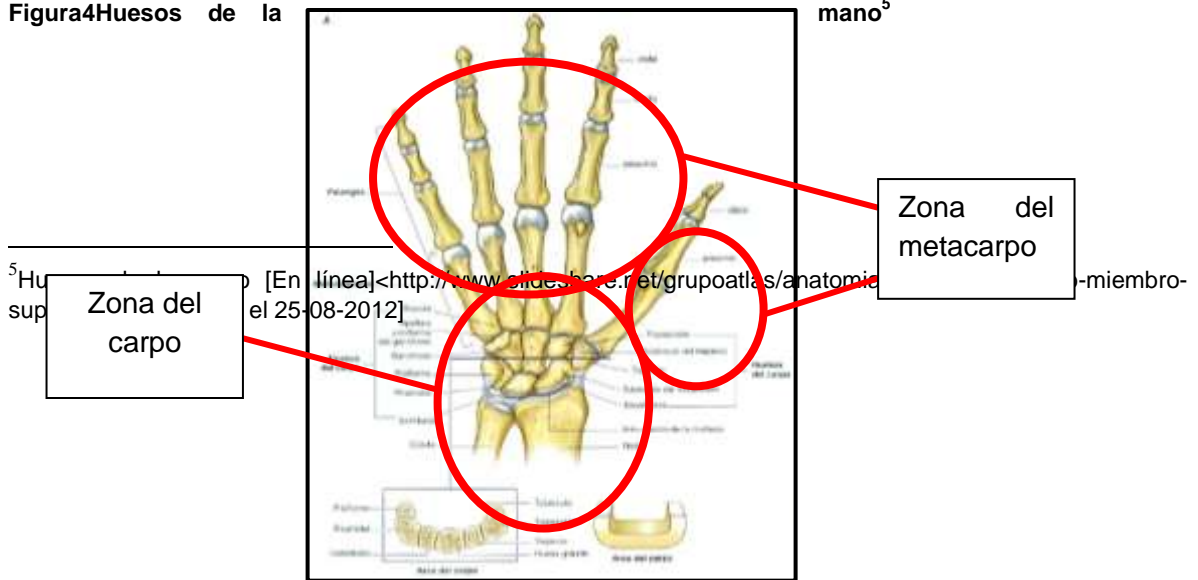


El ser humano desde tiempos remotos ha modificado su medio, con la facilidad que las herramientas que desarrolla le han permitido. Las manos han sido por excelencia la herramienta ejecutora, que ha permitido la cosecha de alimentos, comunicación, construcción, entre otros.

Dentro del desarrollo social enmarcado en optimizar la eficiencia de los procesos siempre se ha pensado en herramientas que mejoren las limitaciones físicas y protejan la integridad de los seres humanos. La mano humana es una estructura ósea conformada por dos zonas, el carpo y el metacarpo.

La primera es la parte de la muñeca y la conforman una serie de huesos que le proporcionan fuerza a la zona del metacarpo, donde se encuentran las falanges. Una serie de ellas conforma lo que se conoce como dedo y su cantidad es de tres exceptuando el último que posee dos. En orden los dedos reciben los nombres: menique, corazón, anular, índice y pulgar. La falange más cercana a la palma recibe el nombre de falange, seguida de la falangina y la falangeta. [7] Para apreciar mejor este concepto general se puede apreciar la Figura 4.

Figura 4 Huesos de la mano⁵

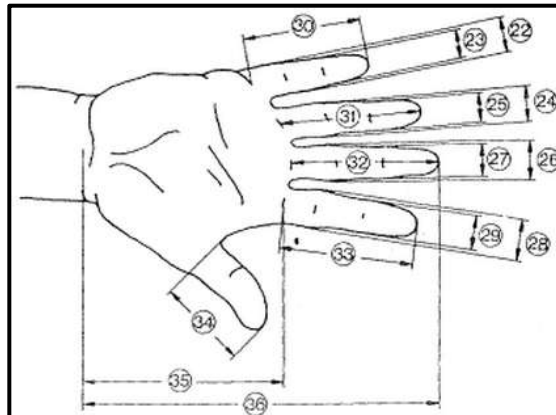


⁵Hu
sup

-miembro

Para profundizar en la temática, se hizo una lectura detenida de la anatomía presente en la mano humana, no sólo en artículos sino en libros y normas referentes al tema [8-9] y que responden a las medidas y parámetros que se aprecian en la Figura 5:

Figura 5 Numeración de tamaños de la mano



La correspondencia de medidas de la anterior figura con sus valores se puede apreciar en la Tabla 1:

Tabla 1 Correspondencia de medidas con referencia a la Figura 5

Dimensiones En cm.		PERCENTIL					
		Hombres			Mujeres		
		5 %	50 %	95 %	5 %	50 %	95 %
22	Ancho del meñique en la palma de la mano	1,8	1,7	1,8	1,2	1,5	1,7
23	Ancho del meñique próximo de la yema	1,4	1,5	1,7	1,1	1,3	1,5
24	Ancho del dedo anular en la palma de la mano	1,8	2,0	2,1	1,5	1,6	1,8
25	Ancho del dedo anular próximo a la yema	1,5	1,7	1,9	1,3	1,4	1,6
26	Ancho del dedo mayor en la palma de la mano	1,9	2,1	2,3	1,6	1,8	2,0
27	Ancho del dedo mayor próximo a la yema	1,7	1,8	2,0	1,4	1,5	1,7
28	Ancho del dedo índice en la palma de la mano	1,9	2,1	2,3	1,6	1,8	2,0
29	Ancho del dedo índice próximo a la yema	1,7	1,8	2,0	1,3	1,5	1,7
30	Largo del dedo meñique	5,6	6,2	7,0	5,2	5,8	6,6
31	Largo del dedo anular	7,0	7,7	8,6	6,5	7,3	8,0
32	Largo del dedo mayor	7,5	8,3	9,2	6,9	7,7	8,5
33	Largo del dedo índice	6,8	7,5	8,3	6,2	6,9	7,6
34	Largo del dedo pulgar	6,0	6,7	7,6	5,2	6,0	6,9
35	Largo de la palma de la mano	10,1	10,9	11,7	9,1	10,0	10,8
36	Largo total de la mano	17,0	18,6	20,1	15,9	17,4	19,0

A manera complementaria se muestran las medidas con la mano en posición horizontal, como se aprecia en la Figura 6, con sus datos correspondientes en la Tabla 2:

Figura 6 Medidas suplementarias de la mano

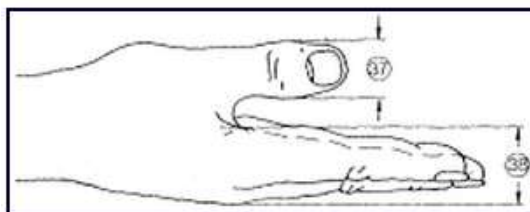
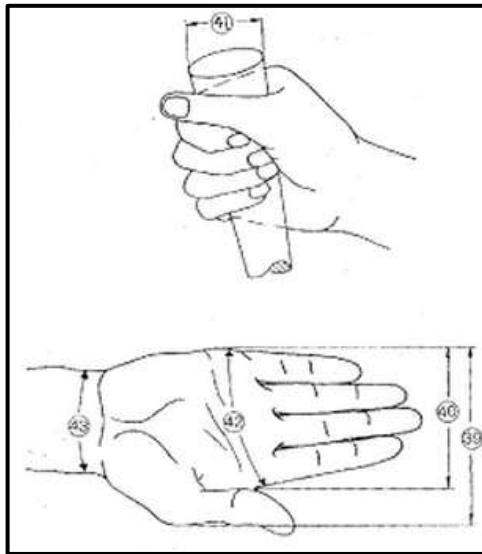


Tabla 2 Información correspondiente de medidas de la Figura 6

Dimensiones En cm.		PERCENTIL					
		Hombres			Mujeres		
		5 %	50 %	95 %	5 %	50 %	95 %
37	Ancho del dedo pulgar	2,0	2,3	2,5	1,6	1,9	2,1
38	Grosor de la mano	2,4	2,8	3,2	2,1	2,6	3,1

Para la parte posterior de la mano y el agarre de la mano se presentan las medidas de la Figura 7:

Figura 7. Medidas de la parte posterior de la mano



La correspondencia de medidas de la Figura 7 se presenta en la Tabla 3.

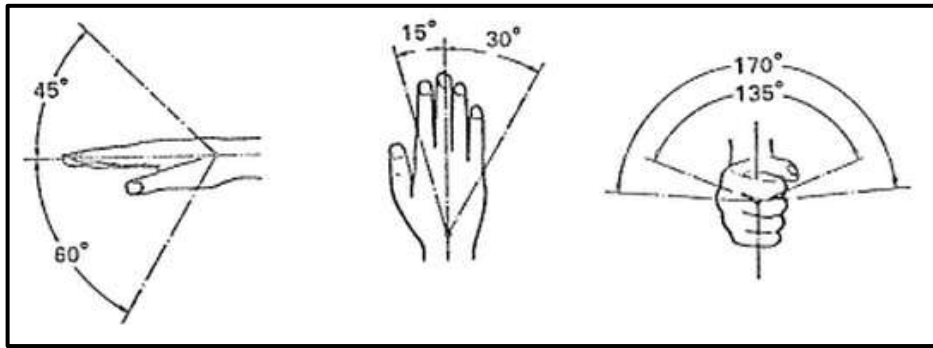
Tabla 3 Correspondencia de medidas con la Figura 7

Dimensiones En cm.		PERCENTIL					
		Hombres			Mujeres		
		5 %	50 %	95 %	5 %	50 %	95 %
39	Ancho de la mano incluyendo dedo pulgar	9,8	10,7	11,6	8,2	9,2	10,1
40	Ancho de la mano excluyendo el dedo pulgar	7,8	8,5	9,3	7,2	8,0	8,5
41	Diámetro de agarre de la mano*	11,9	13,8	15,4	10,8	13,0	15,7
42	Perímetro de la mano	19,5	21,0	22,9	17,6	19,2	20,7
43	Perímetro de la articulación de la muñeca	16,1	17,6	18,9	14,6	16,0	17,7

* Las medidas corresponden al anillo descrito por los dedos pulgar e índice

Finalmente se presentan los rangos en grado en los cuales el movimiento de la mano es válido, como se aprecia en la Figura 8.

Figura 8 Campo de operación de las manos



Adicionalmente se realiza la búsqueda de algunos artículos que mencionan la aplicación de guantes [10-12]. Es por tanto que se plantea un modelo de simulación que pueda ser controlado por un guante. La principal razón de ello radica en que garantiza el uso de sensores adheridos al material licrado del guante lo cual lo hace inamovible y permite generar señales que representen el movimiento en relación con las falanges respecto a la palma.

De acuerdo a esto, se hizo una búsqueda de artículos cuyo eje central fuera la cinesiología [13-16] y como consecuencia otros que hablan con mayor profundidad de su rama, la biomecánica [17-19] y sus tres bases, la cibernética [20-22], biónica [23-25] y biomedicina [26-27].

Todo para poder aterrizar finalmente en la rama de interés, la tele operación [28-30] y la influencia sobre el tiempo en guantes que generen un control o que durante el tiempo se hayan utilizado para temáticas semejantes, los cuales sirven como base para lo que se pretende en el presente trabajo.

A continuación se hizo la búsqueda de modelos gráficos que hayan manejado este importante elemento en su trabajo [11][31], donde se ve alguna preferencia por simulaciones de redes neuronales [32], referente a una conexión de neuronas para obtener una señal de salida (hápticas [33]) o referente al contacto, haciendo uso de elementos resistivos y plegables [34], tendones o actuadores embebidos [35], los cuales son sistemas de cómputo diseñados para realizar una sola función, en general en tiempo real, y con uso de fotodiodos [36-37], un semiconductor

sensible a la luz, e inclusive que manejaran relaciones de electromiografía [38-39], los cuales son señales provenientes del impulsos nerviosos por parte de los músculos.

Sus aplicaciones son muy variadas pero se enfocan en pocas áreas, como lo son las prótesis [32][39], reemplazo de extremidades ausentes, y la rehabilitación de miembro [34][38-39], cuando alguna parte del cuerpo está limitada en su movimiento y se busca que regrese a la normalidad a través de terapias. Algunos parámetros representativos en los estudios buscan con insistencia estandarizar diferentes movimientos y agarres [40] y la repetitividad de resultados [41] para verificar que sus resultados sean certeros. Como método de trabajo sobre los datos es frecuente ver procesos de realimentación [33], el control de un sistema dinámico para registrar su comportamiento, auto alineación como método matemático [42] o de simulación numérica [43], de análisis cinemático [31] e inclusive el uso de software dinámico como ADAMS para calcular características de agarre en su modelo de control [44].

Es un factor relevante que el proyecto sea enfocado en un bajo presupuesto [33-34][36] y se ve con claridad en varios artículos, debido a que la investigación debe proveer un resultado con ganancias y en un mundo actual, si son económicas, el interés aumenta.

Debido al costo, pertinencia y facilidad con la que se pudo acceder al guante Acceleglove, es el instrumento de principal trabajo en el proyecto. Su área de desempeño cumple con las expectativas vistas desde la metodología de la biomecánica, en especial de la computacional, ya que se hace un énfasis aplicativo de sus elementos a un algoritmo programable que se puede apreciar en un monitor.

También incluye el área comportamental debido a la posibilidad de ser la base de desarrollo de un elemento físico que mejore la calidad de los entornos de trabajo.

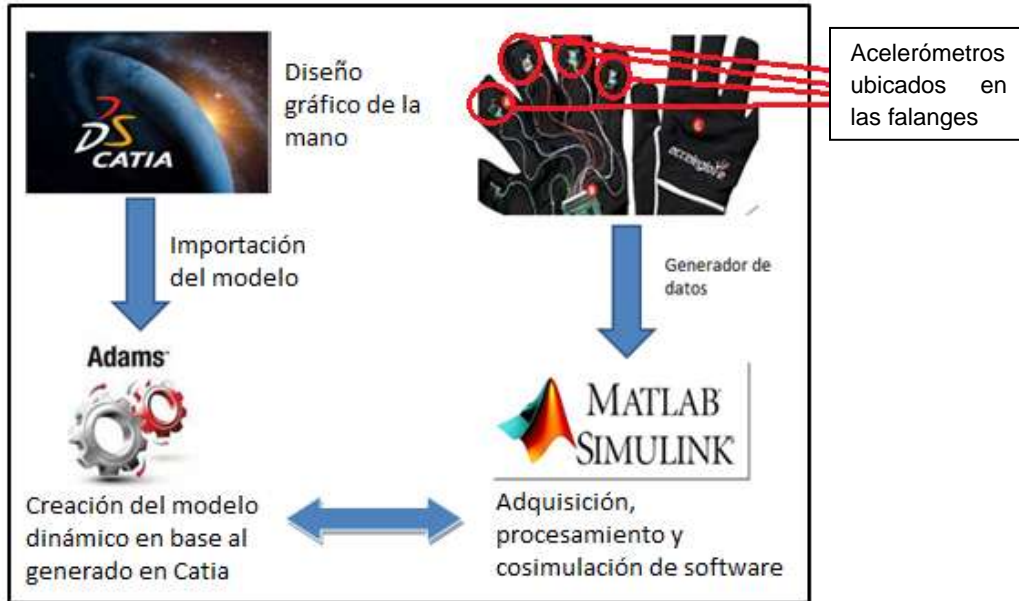
La parte de diseño del modelo se realiza en base a elementos básicos como cilindros y paralelepípedos, construidos en el software CATIA. En este software se realiza pieza por pieza todo el modelo, buscando representar con el mayor detalle posible la forma de la mano.

Para responder con el análisis dinámico de la extremidad se importaron las piezas a ADAMS, generando un modelo final, el cual maneja un método llamado dinámica multicuerpo, que consiste en incorporar física real a través de la solución simultánea para cinemática, estática, estática cuántica y dinámica. [45] Maneja la dinámica no lineal en una fracción de tiempo requerido por una solución FEA, *FiniteElementAnalysis*, la cual es una técnica numérica donde las variables tienen una relación con ecuaciones algebraicas, diferenciales e integrales, para obtener soluciones casi exactas. [46]

La información es suministrada por los acelerómetros que se encuentran en las falanges del guante Acceleglove, donde haciendo uso de una conexión USB se realiza la transmisión de datos a MATLAB en formato ASCII⁶. Este último toma la información y la procesa a través de operaciones con bloques en Simulink. Cuando el comportamiento de la mano es procesado, se realiza una comunicación entre ADAMS y MATLAB con lo cual se unifica el proyecto. En la Figura 9 se puede apreciar de manera lúdica lo anteriormente mencionado.

⁶ American Standard Code for Information Interchange — Código Estándar Estadounidense para el Intercambio de Información, código de caracteres de 7 bits

Figura 9 Esquema del proyecto



Adicionalmente cabe recalcar que debido a que los grados de libertad o DOF (por sus siglas en inglés) es la cantidad de parámetros que son libres de variación. Para el caso de la biomecánica, son el número de formas independientes en que un sistema se puede mover o los valores requeridos para poder describir completamente un sistema de movimiento relativo a la coordenada de referencia. [47] Con esto, se hace un énfasis en un grado de libertad por dedo, ubicado en la articulación de la base de las falanges donde se encuentra en unión con la palma.

Para poder hacer mayor énfasis en el procedimiento detallado del proyecto, el siguiente capítulo presenta los entornos de simulación anteriormente, en su orden: ADAMS, CATIA, ADAMS Control y Acceleglove. Cabe aclarar que en cada uno de ellos se concentra el desarrollo de cada una de las etapas con la finalidad de cumplir los objetivos propuestos, así como procurar aclarar posibles dudas que se llegaran a presentar.

2. ENTORNO DE SIMULACIÓN

A manera específica, a continuación se abordan los modelos con los cuales se realiza el desarrollo del proyecto, presentando a través de diferentes etapas, la evolución de la solución del problema así como la comunicación necesaria para poder generar una co-simulación.

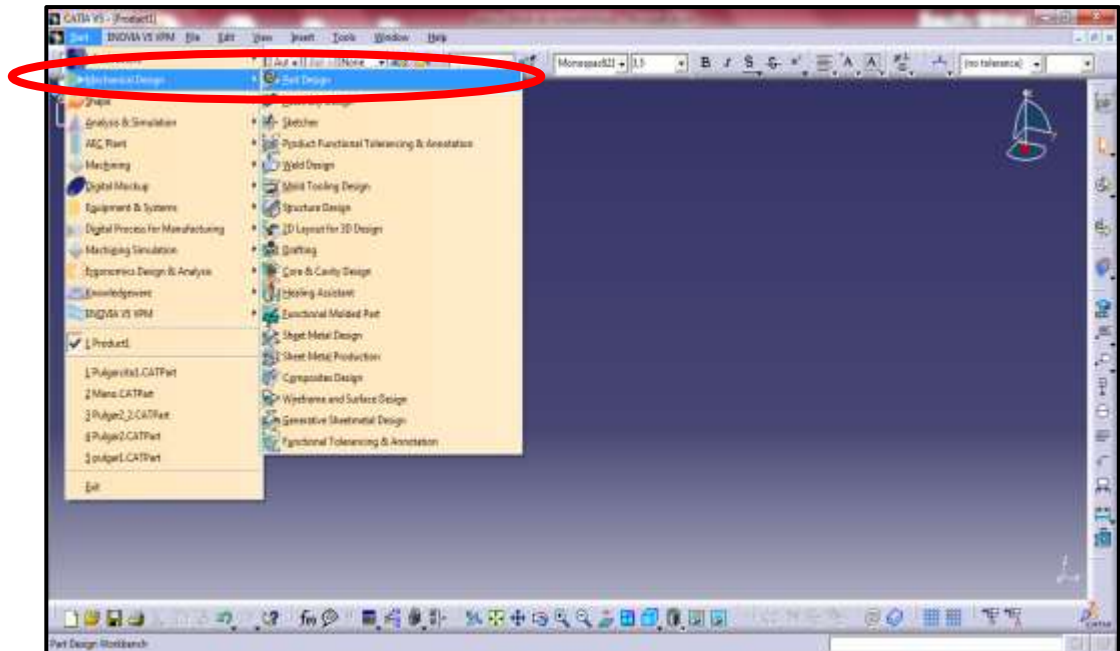
2.1 Modelo Catia

2.1.1 Catia

Catia, que por sus siglas en inglés, *computer-aided three dimensional interactive application*, es un software que pertenece a la familia de elementos CAD, correspondiente en su traducción a Diseño Asistido por Computadora, es el uso de sistemas de computadora en la creación, modificación, análisis u optimización de un diseño. Es utilizado para incrementar la productividad del diseñador, mejorando la calidad del diseño, mejorar las comunicaciones a través de documentación y crear una base de datos para la manufactura. Su salida casi siempre está en forma de archivos electrónicos para imprimir o para operaciones de mecanizado. El software utiliza gráficos basados en vectores para representar los objetos de redacción tradicional o puede producir muestras de gráficos de trama para la apariencia general del diseño de objetos. La empresa encargada de este programa se llama Dassault Systèmes. [45-46]

Para generar un nuevo proyecto, es necesario acceder a la construcción de una parte, como se aprecia en la Figura 10:

Figura 10 Creación de un diseño mecánico



2.1.2 Construcción de las piezas en Catia

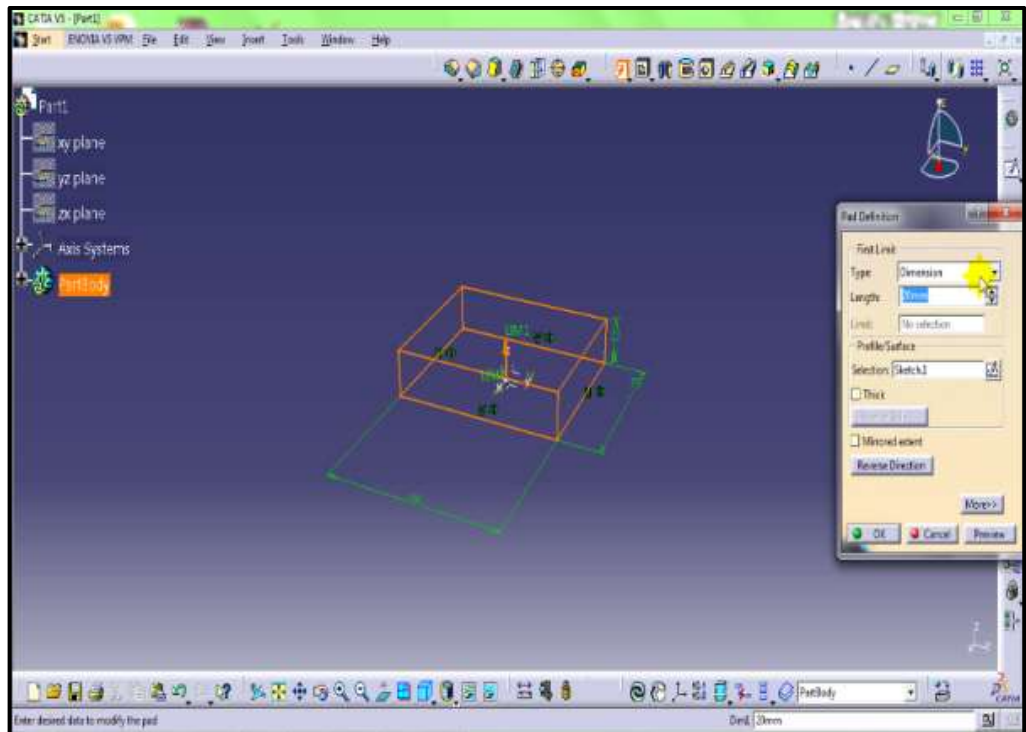
Los íconos a continuación mencionados se pueden apreciar en la Tabla 1. Con el uso de Sketch, se inicia la construcción, eligiendo el plano a utilizar. Para este caso se hace uso del XY. A continuación se ingresa una figura con el ícono Cuadrado, ya que se asemeja más a la palma, y se ubica en cualquier lugar del espacio. Al hacer uso del ícono Constraint, se pueden modificar medidas, paralelismos y centralidad del elemento.

Cabe aclarar que para este caso se hace uso de medidas del formato de la norma DIN 33-402. Al seleccionar ExitWorkbench, se activan otros íconos, entre los cuales el necesario para dar volumen al rectángulo realizado.

En este caso se hace uso de Pad, el cual al modificar su longitud y aceptar el cambio, resulta en el paralelepípedo deseado, como se puede observar en la Figura 11.

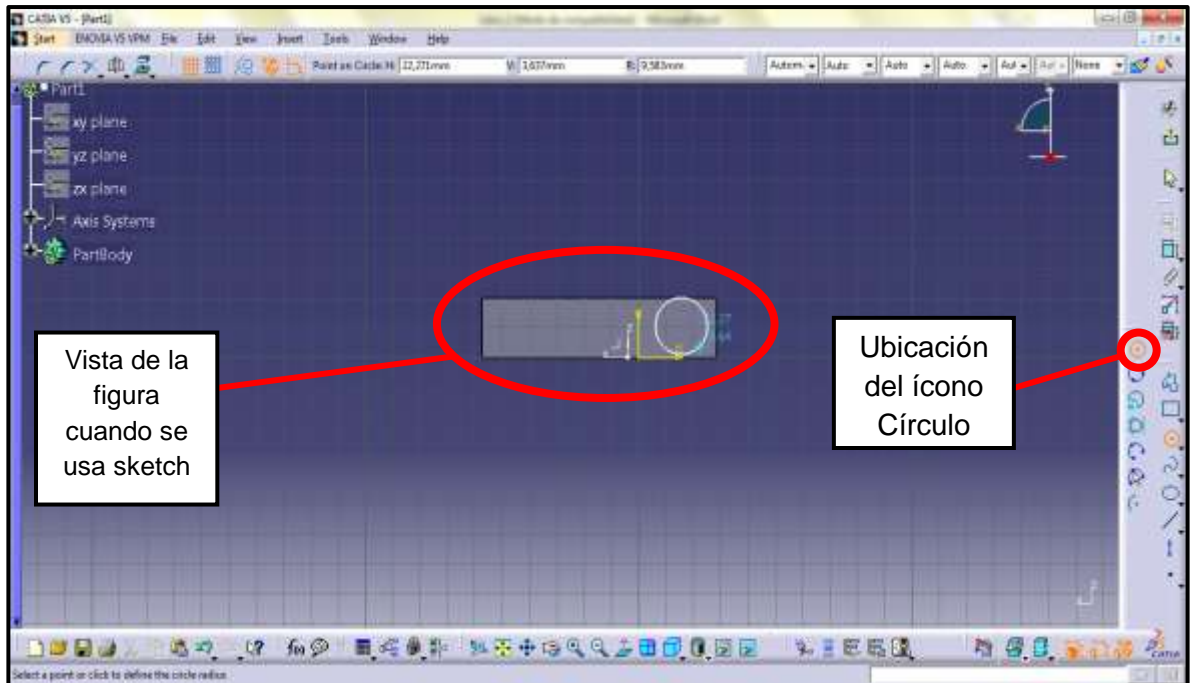
A partir de este punto se procede a realizar en uno de los extremos de la figura, los dedos meñique, anular, corazón, índice en el orden correspondiente y con las medidas especificadas de la norma DIN mencionada anteriormente.

Figura 11 Paralelepipedo que forma la palma de la mano



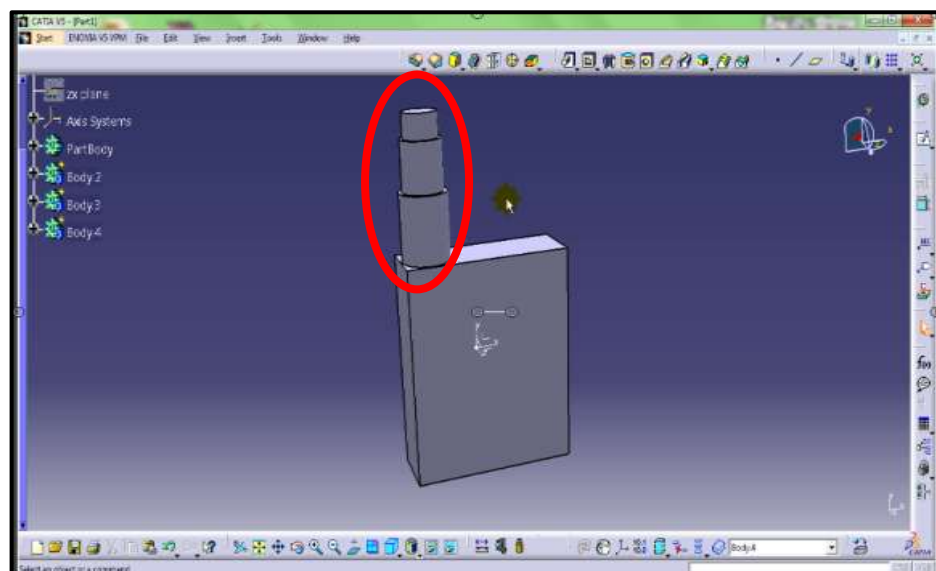
Para continuar, se selecciona la cara sobre la cual se desea hacer el dedo, se abre nuevamente el sketch y se realiza un Círculo sobre la superficie y con Constraint se aseguran las medidas de su radio y la correcta ubicación dentro de la superficie. Al elegir Salir del Workbench, nuevamente se utiliza el ícono Pad y se le agrega profundidad al cilindro deseado. Una apreciación de la vista antes de modificarle sus medidas se aprecia en la Figura 12.

Figura 12 Diseño inicial del círculo base de la primera falange del dedo



Como los dedos de la mano humana poseen tres falanges, este procedimiento debe repetirse en tres ocasiones, con las medidas de cada una de ellas, la proximal, media y distal. El resultado se aprecia en la Figura 13.

Figura 13 Diseño de la mano en Catia con el índice desarrollado



Los otros dedos manejan el mismo procedimiento, conservando la distancia y longitudes referentes a cada dedo para conservar la congruencia con una referencia real y para manejar estándares que le den veracidad al proyecto.

Tabla 4 Relación de iconos de Catia con su nombre










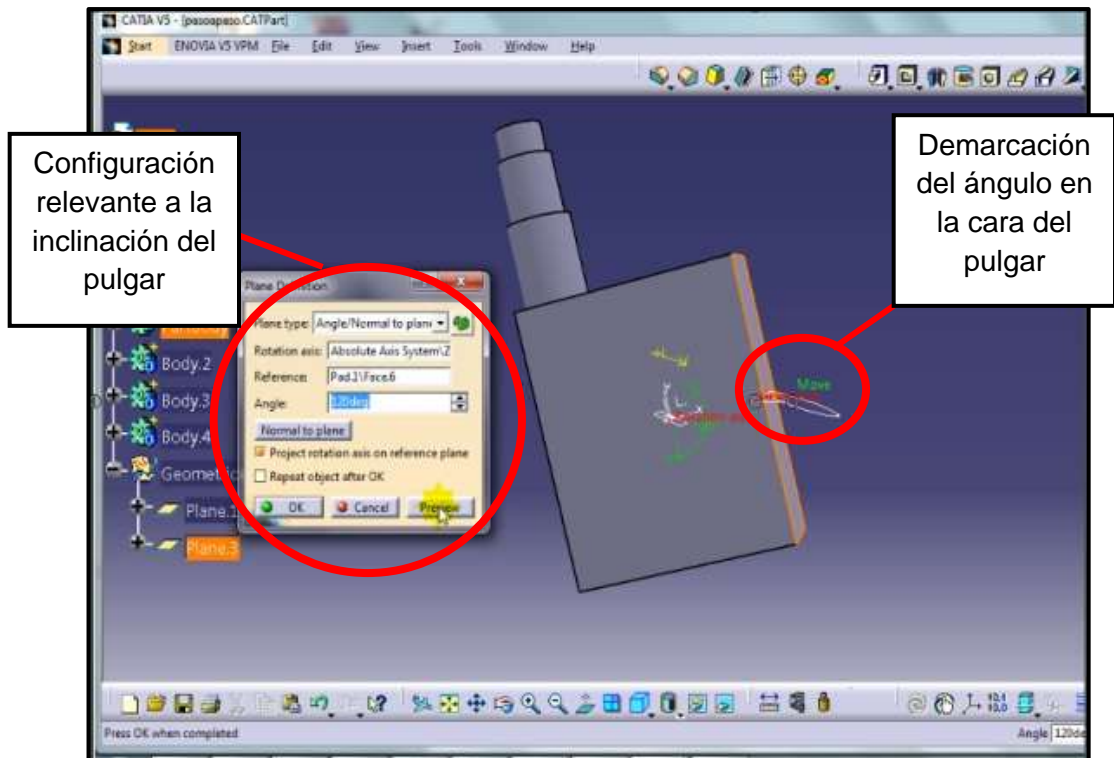
ÍCONO	Nombre
	Sketch
	Cuadrado
	Constraint
	Exit Workbench
	Pad
	Círculo
	Plane
	Project 3D Elements
	Chamfer

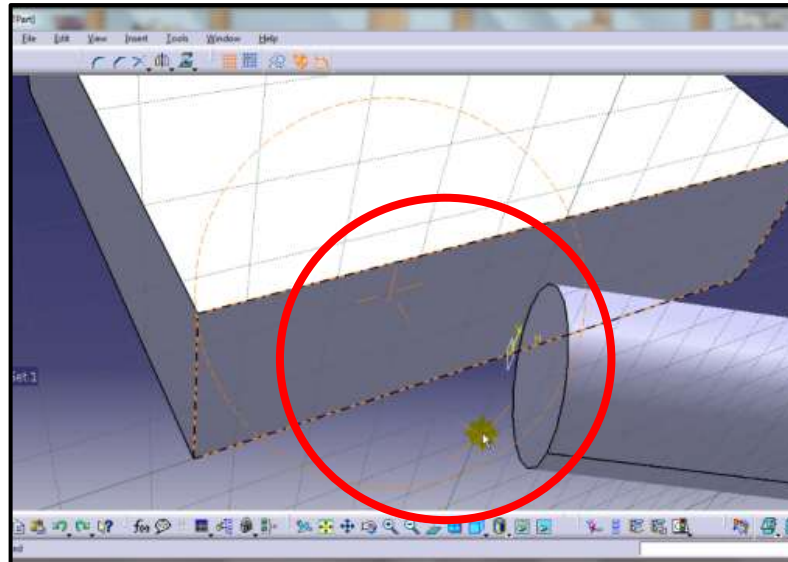
Figura 14 Configuración necesaria para poder ajustar el plano con una inclinación a la palma



Para el pulgar, dedo restante para completar la mano, el procedimiento varía puesto que es una falange que presenta mayor complejidad que las anteriores, ya que su inclinación y funciones son más amplias. En este caso, inicialmente se realiza el mismo procedimiento de elegir la superficie sobre la cual se desea hacer el elemento pero para poder aplicar una pendiente diferente a los otros dedos, hay que hacer uso de un nuevo comando, Plane. Se debe tener en cuenta la siguiente configuración para que el plano esté bien ubicado como también el eje referencia de la rotación deseada, agregando el valor del ángulo en grados que en realidad posee la curvatura del dedo pulgar en estado de reposo como se ve en la Figura 11.

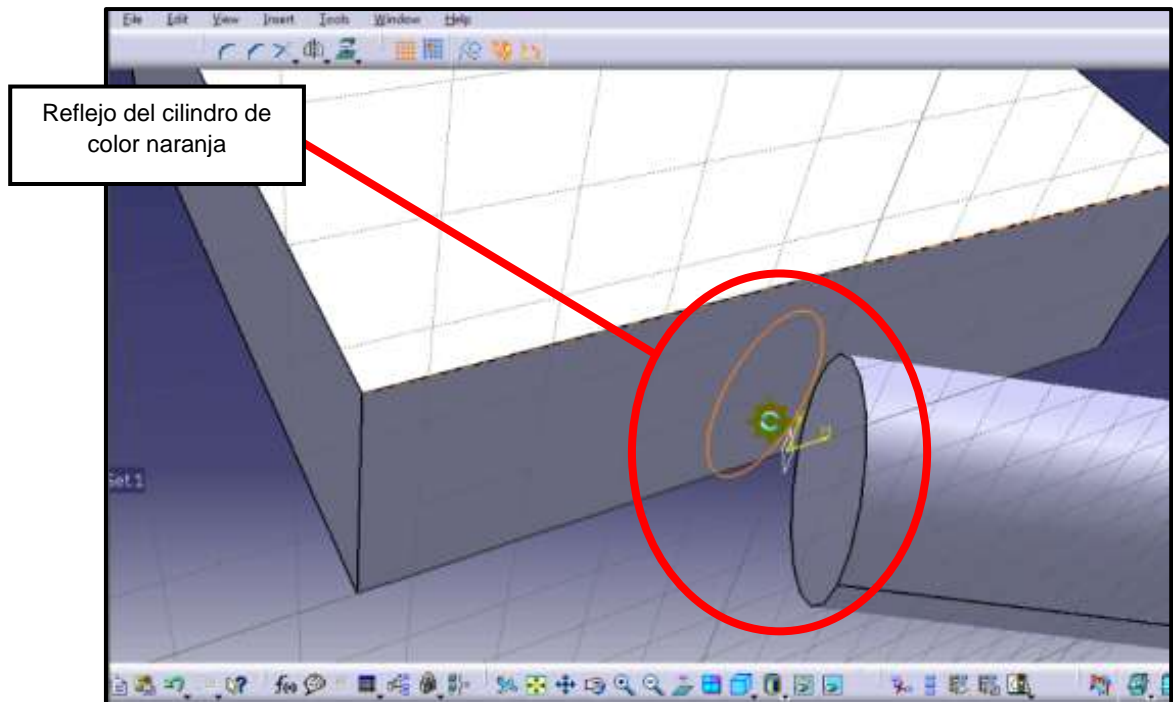
Sobre este eje se realiza un Sketch y a continuación, un círculo pero se debe ser cuidadoso que al momento de usar el Pad, no se cruce con la superficie del paralelepípedo, como se aprecia en la Figura 15.

Figura 15 Ubicación del primer cilindro en el plano del pulgar



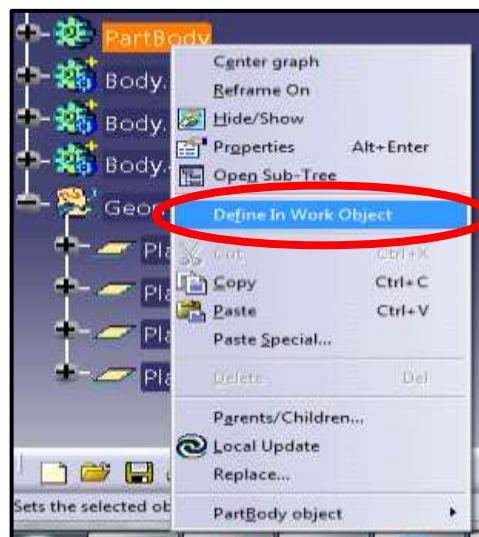
A continuación se busca hacer un reflejo de la base circular del cilindro sobre la superficie recta donde se pretende unir el pulgar, haciendo uso del ícono Project 3D Elements, teniendo cuidado en agregar las caras adicionales y de usarlo cuando se ha activado Pad, de lo contrario no aparecerá. Este procedimiento es importante para poder rellenar la curvatura de espacio faltante entre las dos figuras e imprimirle mayor realismo al diseño final deseado. En la Figura 16 se observa un acercamiento de cómo están antes del proceso y en la Figura 17 el resultado de esta acción. Para el siguiente paso, se realiza un segundo plano, proyectado a partir del plano anterior, sobre la superficie del primer cilindro del pulgar. Sobre este plano, se realiza un segundo, pero sobre el mismo eje, es decir que si no oculto ningún detalle en el árbol del proyecto, se pueden apreciar dos planos que se cortan dependiendo de la inclinación que haya decidido utilizar.

Figura 16 Reflejo de la base del cilindro en la palma, para poder hacer la proyección



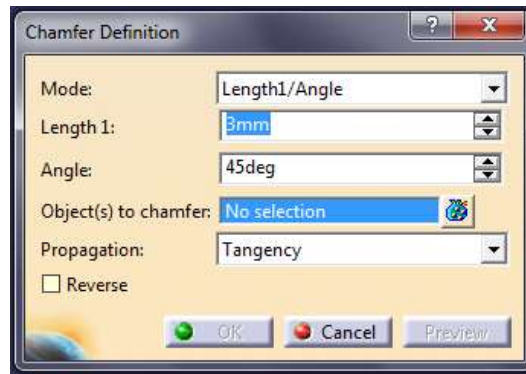
Sobre este plano se realiza un segundo cilindro, que representa la segunda falange del dedo. Entre estas dos falanges se repite el proceso de la primera y la palma para llenar el espacio faltante entre ellos y así quede el dedo completo.

Figura 17 Configuración para poder modificar cada elemento de la mano



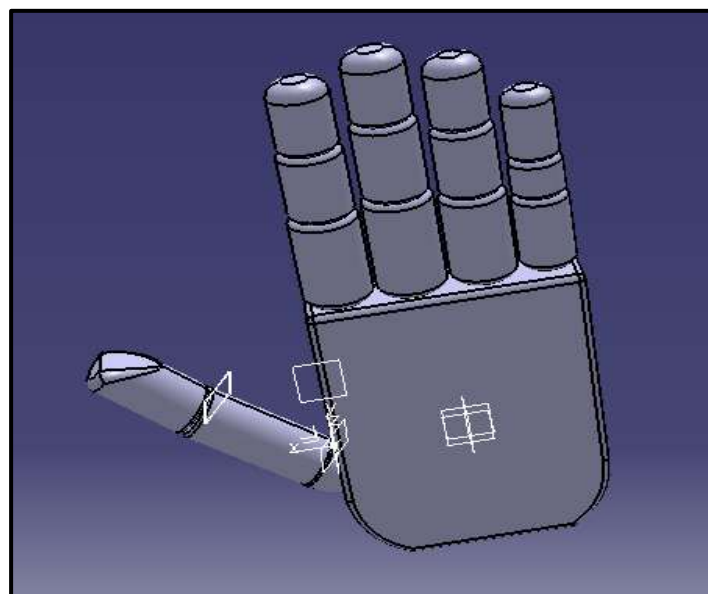
Para poder crear un efecto más semejante al de una mano real, se aplican unos cortes en los bordes de las superficies haciendo uso del elemento Chamfer, teniendo cuidado que la figura sobre la cual se desea hacer el corte, sea definida como objeto de trabajo, como se aprecia en la Figura 18. Se deben tener en cuenta las características de diseño que se deseen emplear, como profundidad del corte y el borde que se desea utilizar, datos que se ingresan en la misma figura.

Figura18 Características del chaflán realizado a los bordes de la figura



La profundidad y pertinencia de cada corte depende de la superficie donde se trabaje y el resultado de ellos es evidenciable en el diseño final que hasta este punto se maneja en el espacio de trabajo de CATIA en la Figura 19.

Figura 19 Mano resultante del diseño en Catia



El proyecto se guarda bajo dos formatos, el del proyecto normal, .CATpart, y el bajo el mismo nombre pero .igs para que pueda ser accesible desde ADAMS.

2.2 Modelo Adams

2.2.1 Adams









Adams es un software de análisis de sistemas mecánicos, el cual se desempeña en áreas como la hidráulica, neumática, mecánica y tecnología de control para que el usuario tenga acceso a una prueba de prototipos antes de sacarlos al mercado.







Este programa tiene la capacidad de trabajar con el software matemático MATLAB, con el fin de fusionar algoritmos de control e implementarlo con las partes dinámicas creadas en ADAMS. De la misma manera, permite la importación de diferentes piezas creadas en programas alternativos como CATIA. [47]

GENERACION DE UN NUEVO PROYECTO.

La relación de los íconos utilizados de la barra de herramientas y que fueron necesarios para la aplicación realizada se puede apreciar en la Tabla 5.

Tabla 5 Relación de íconos usados en ADAMS

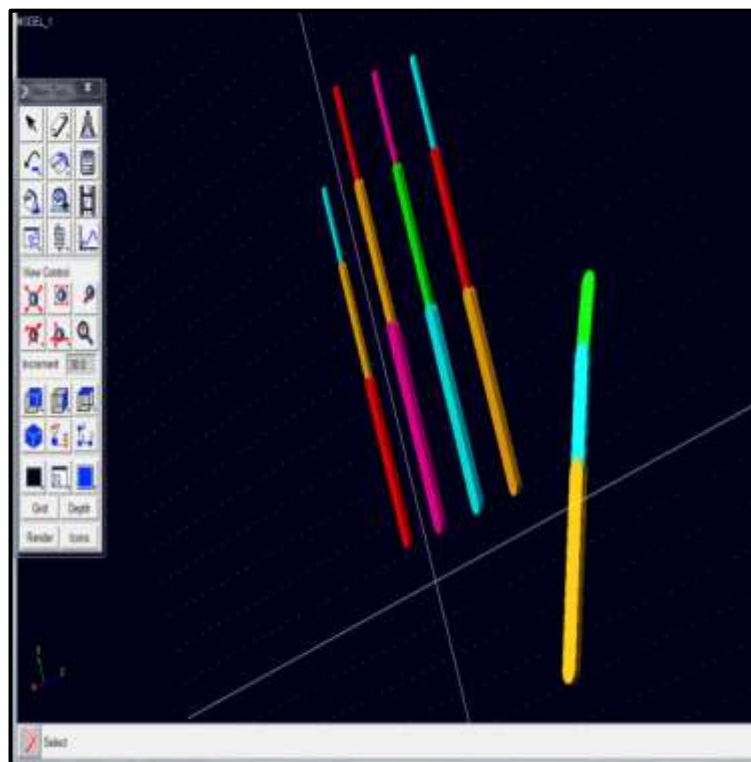
FIGUR A	NOMBRE	FIGUR A	NOMBRE
	RigidBody:Link		Joint: Fixed
	Joint:Revolute		Selector
	RotationalJoint		Entity Color
	ConstructionGeometry		Rotación sobre XY

	Measure		Traslación Dinámica
	InteractiveSimulationControls		Lupa
	Vista Frontal		Vista Diagonal

2.2.2 Construcción de las piezas en Adams

Para las pruebas iniciales no se tuvieron en cuenta las medidas de una mano estándar debido a que era una etapa de reconocimiento del manejo del software y de acercamiento en la dinámica. El modelo básico se puede apreciar entonces en la Figura 20, teniendo en cuenta las falanges principales.

Figura 20 Diseño inicial de una mano en Adams como falanges conectadas



Para cada dedo se tiene en cuenta el movimiento de cada articulación, generando un desplazamiento y una estabilización.

Se creó una variable para cada uno de ellos permitiendo el control según el ángulo que se requiera, con el fin de imitar la dinámica de la mano humana.

Figura 21 Ubicación de la pieza Rigidbody



Con la herramienta Rigidbody que es apreciable en la Figura 21 se generan las falanges distal, medio y proximal. En la Figura 22 se encuentra la construcción de los dedos sin incluir el pulgar y con diferenciación de colores.

Figura22 Dedos por falanges



Con el resultado anterior, se procede a asignar la parte dinámica correspondiente, con la herramienta Joint: Revolute que se aprecia en la Figura 23.

El siguiente paso consiste en asegurar las falanges unas contra las otras, como se observa en la Figura 24. Debido a que la construcción es de una sola locación, sólo hay una indicación en la parte inferior. En la Figura 25 la construcción se modifica para asegurar las piezas faltantes. Finalmente en la Figura 26 se aprecia la unión final de las falanges, resaltando la importancia del orden de asignación.

Figura 23 Ubicación y elección del Joint

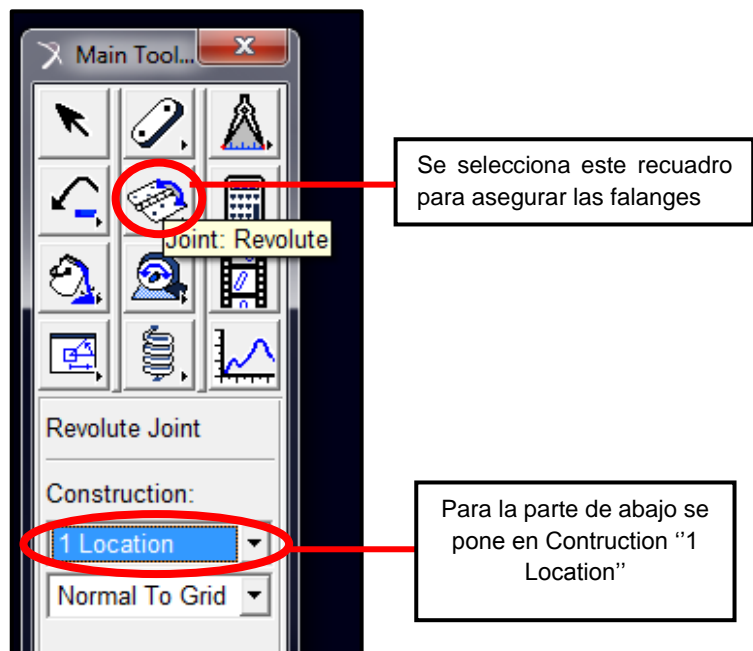


Figura 24 Ubicación del bloque Location



Figura 25 Modificación del bloque Location

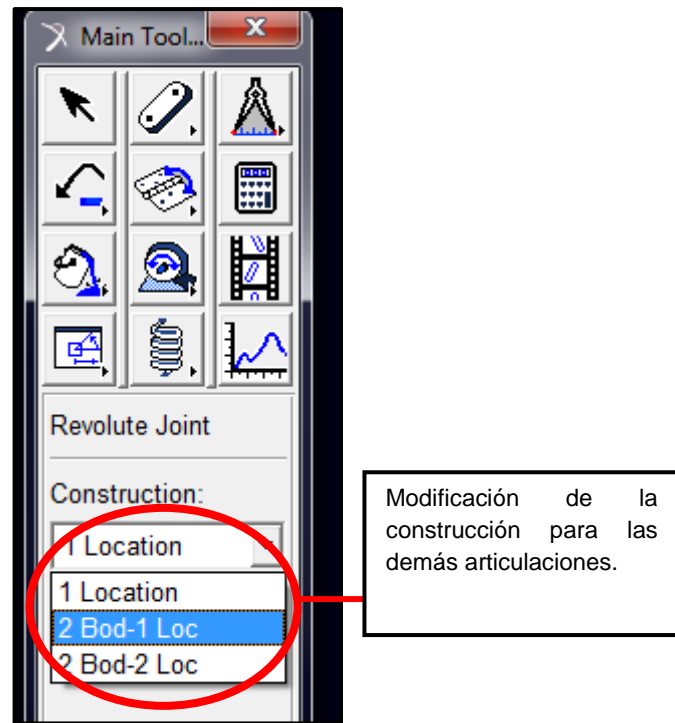
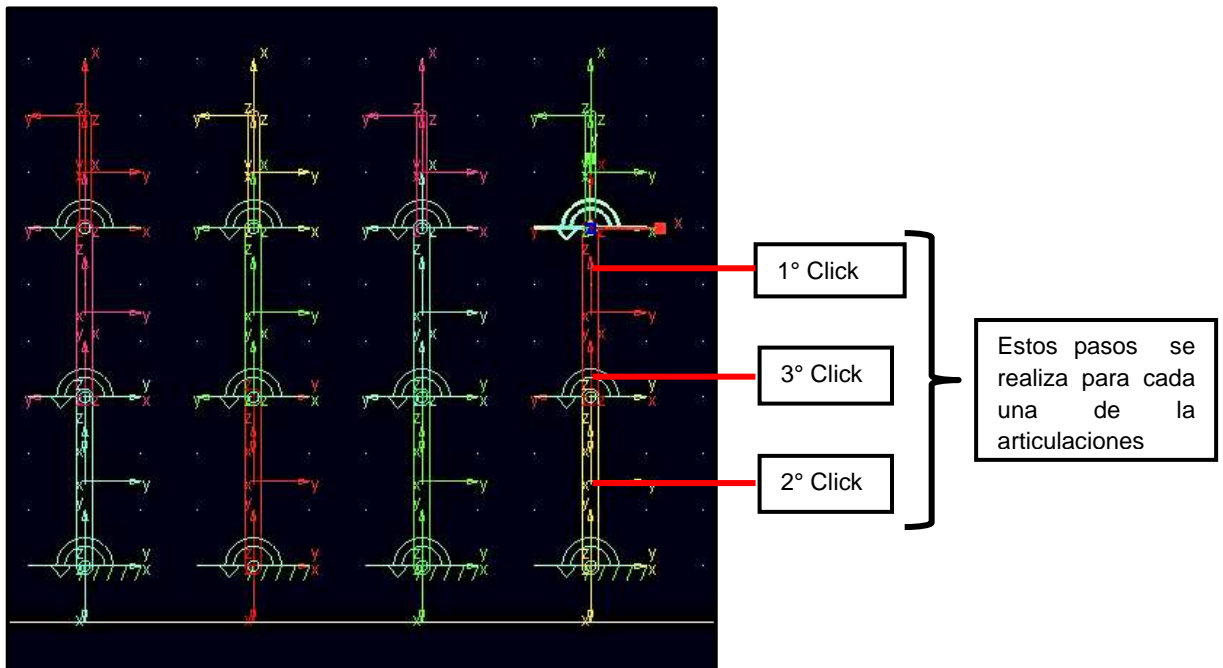
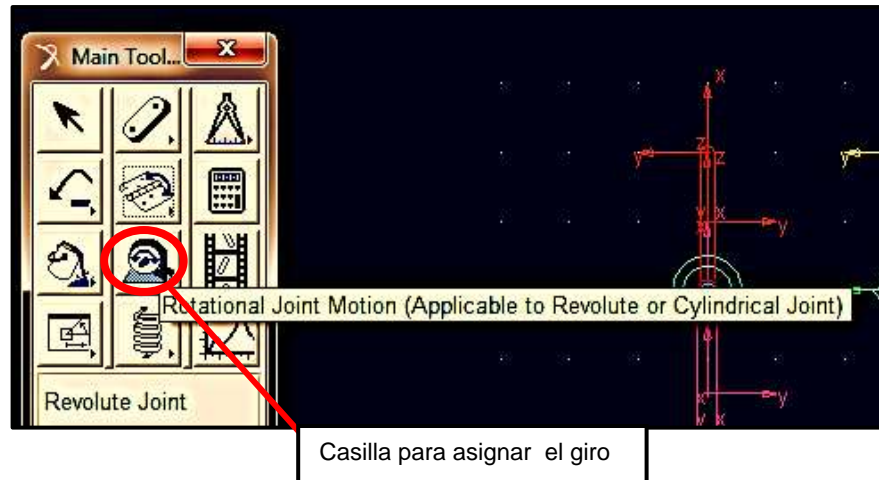


Figura 26 Orden correcto de las articulaciones



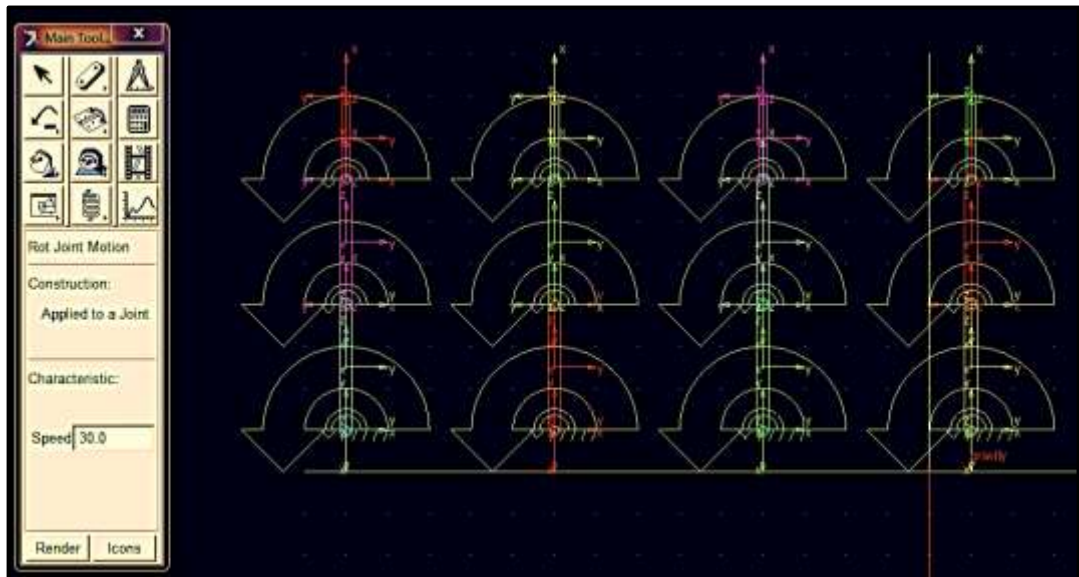
Después se asigna el generador del giro del movimiento se utiliza la herramienta Rotationaljointmotion que se ve en la Figura 27.

Figura 27 Ubicación de la herramienta de giro



En cada una de las juntas se le aplica la herramienta anterior, la cual representa la dirección en la cual se va a dirigir el movimiento, como se aprecia en la Figura 28.

Figura 28 Dirección del movimiento en todas las falanges



Para asignarle los ángulos correspondientes para cada falange, es necesario realizar dos acciones. La primera se aprecia en las Figuras 29 y 30 donde se indican las herramientas a utilizar y la ubicación correcta.

Figura 29 Ubicación de la herramienta ConstructionGeometry

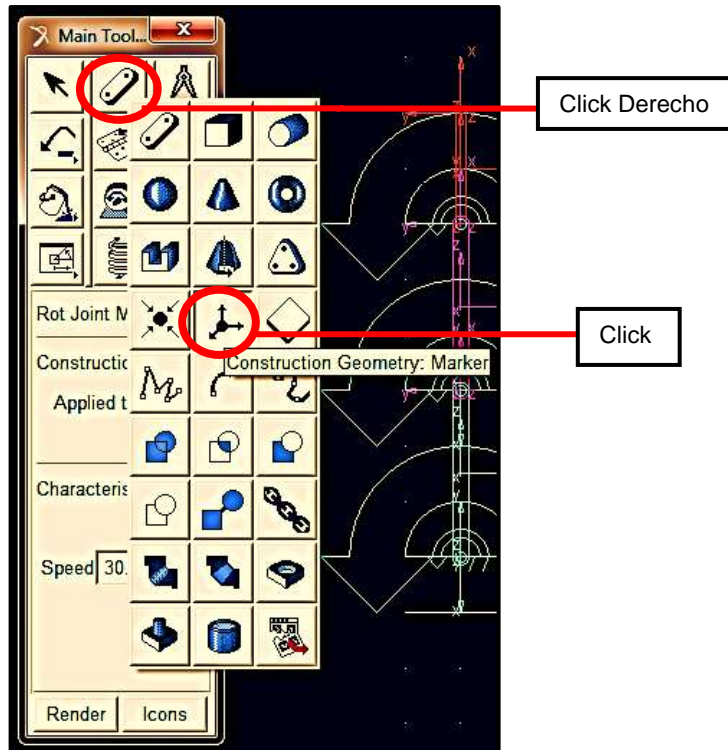


Figura 30 Ubicación correcta ConstructionGeometry



El segundo paso se aprecia en las Figuras 31, 32 y 33. Inicialmente se muestra la ubicación y selección de la herramienta de la barra principal, a continuación el orden necesario para su funcionamiento dividido en dos etapas puesto que debe tener una secuencia de referencia.

Figura 31 Ubicación Measure

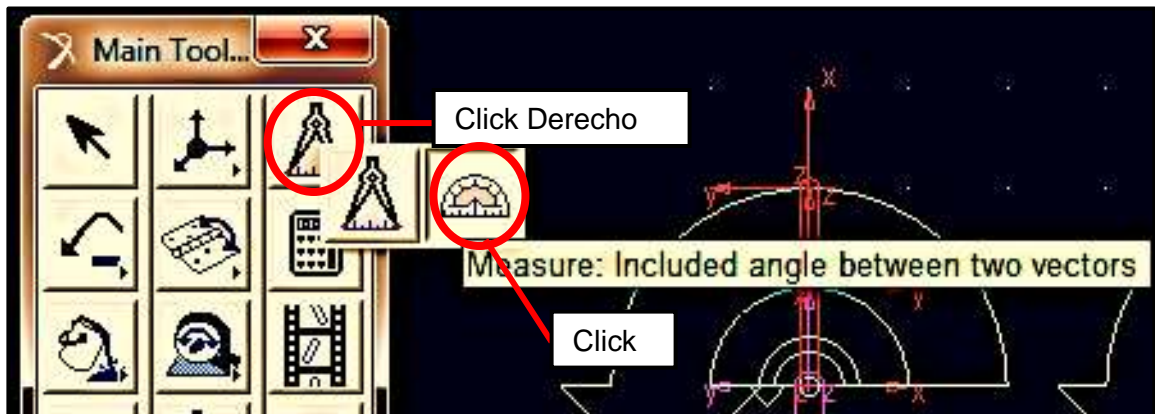


Figura 32 Orden correcto de la herramienta Measure

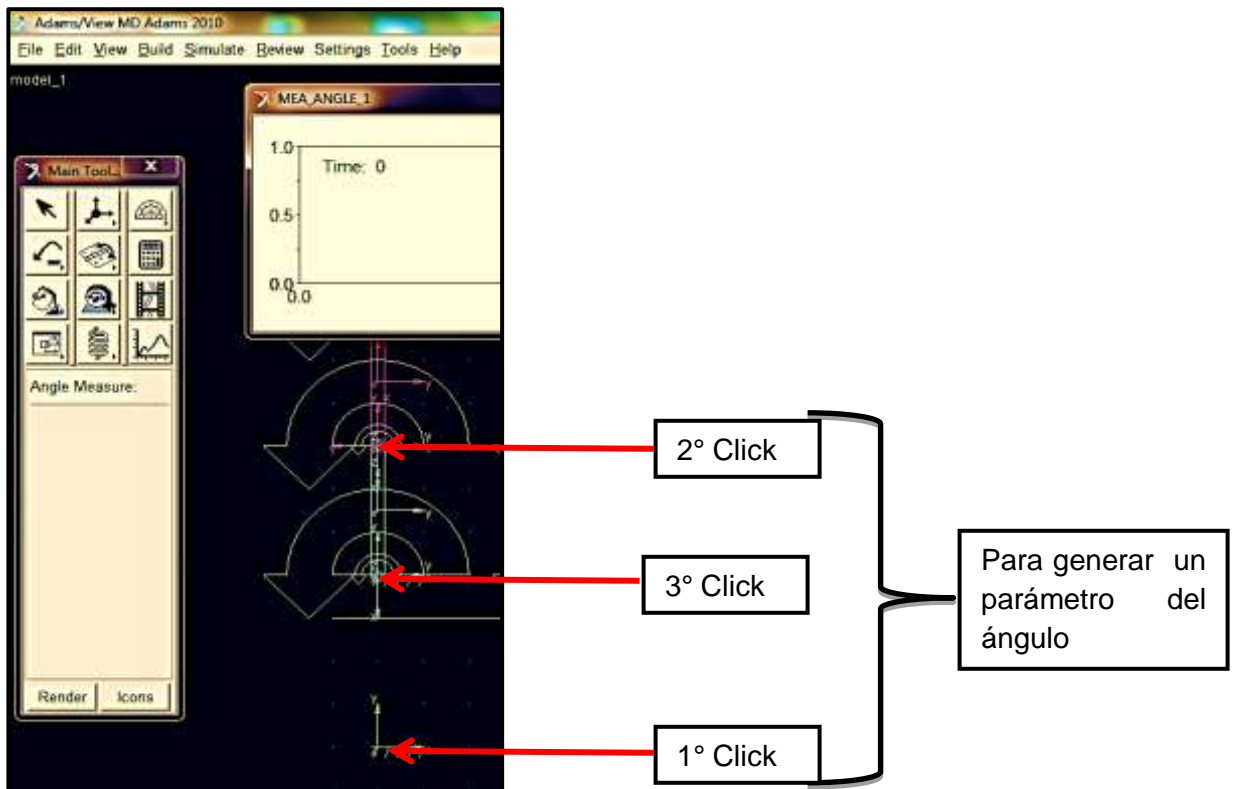
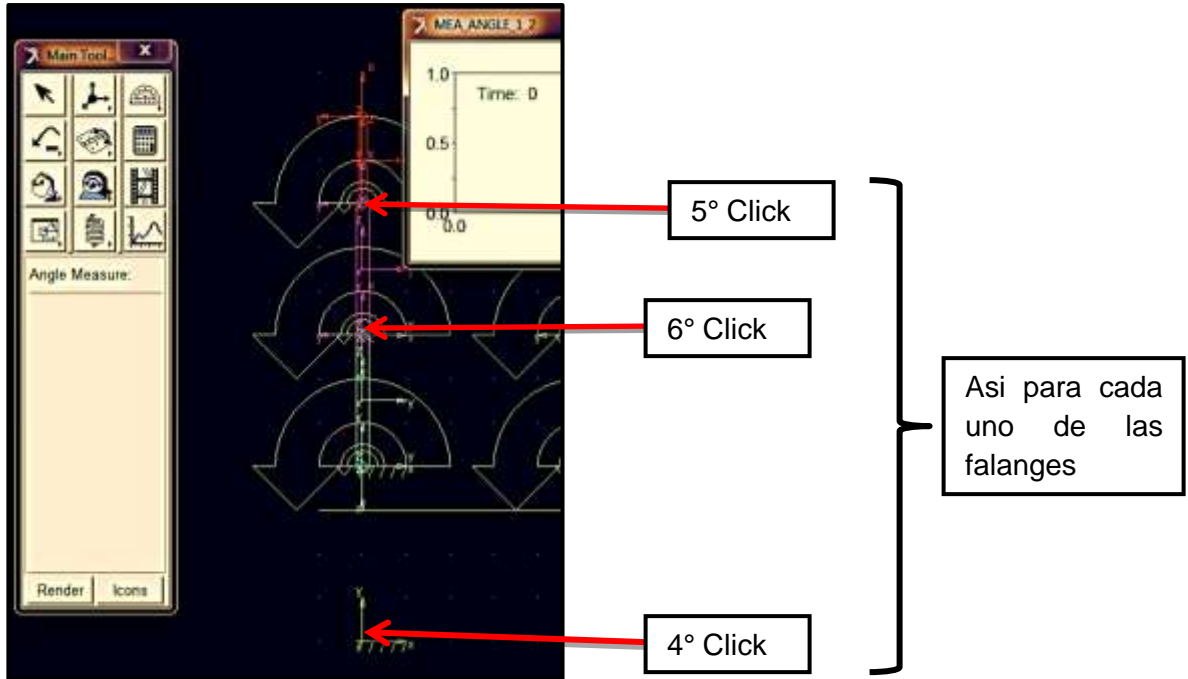
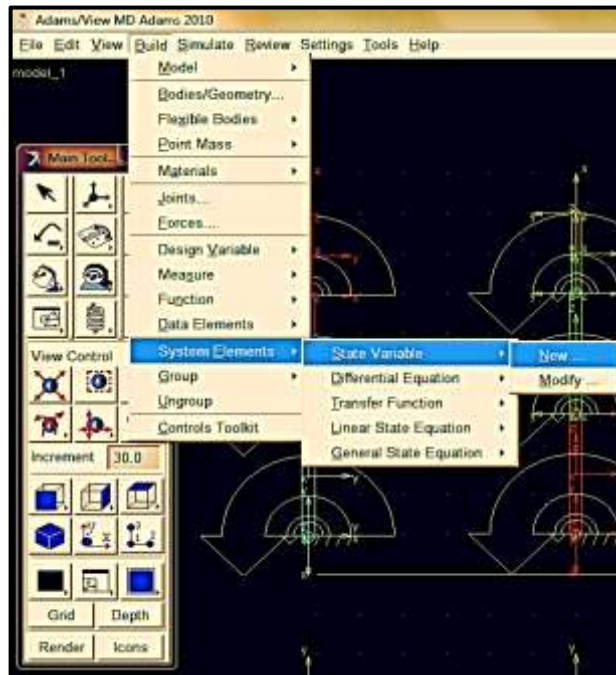


Figura 33 Segunda parte del orden correcto de la herramienta Measure



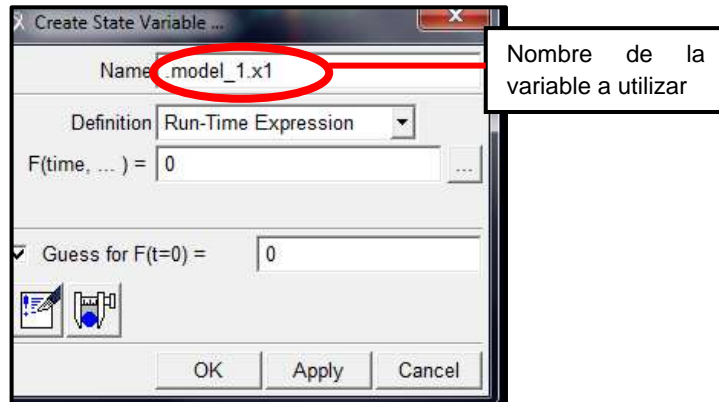
En la Figura 34 se muestra la generación de las variables a utilizar sobre el modelo las cuales están relacionadas con Matlab.

Figura 34 Generación de variables



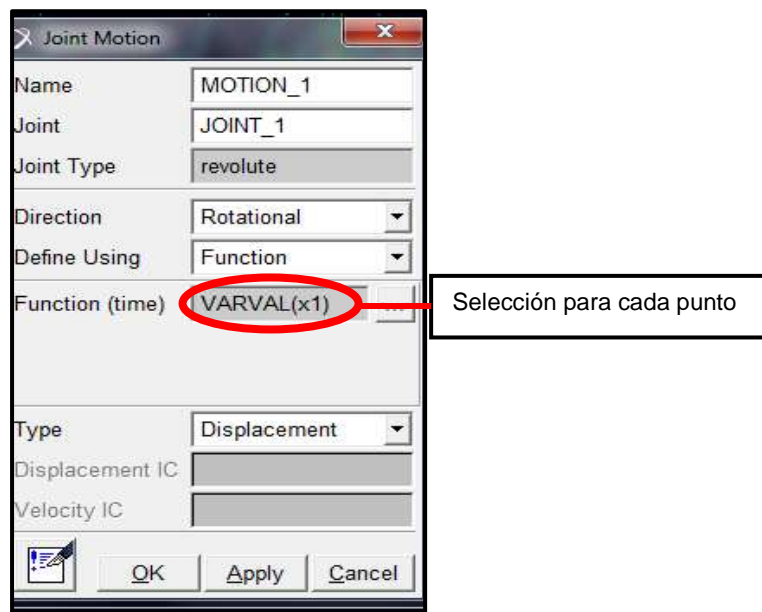
De manera más explícita, en la Figura 35 se muestra la generación de las variables de cada uno de los puntos y de los ángulos, para los primeros será X y para los segundos será Y.

Figura 35 Zona de asignación del nombre a la variable



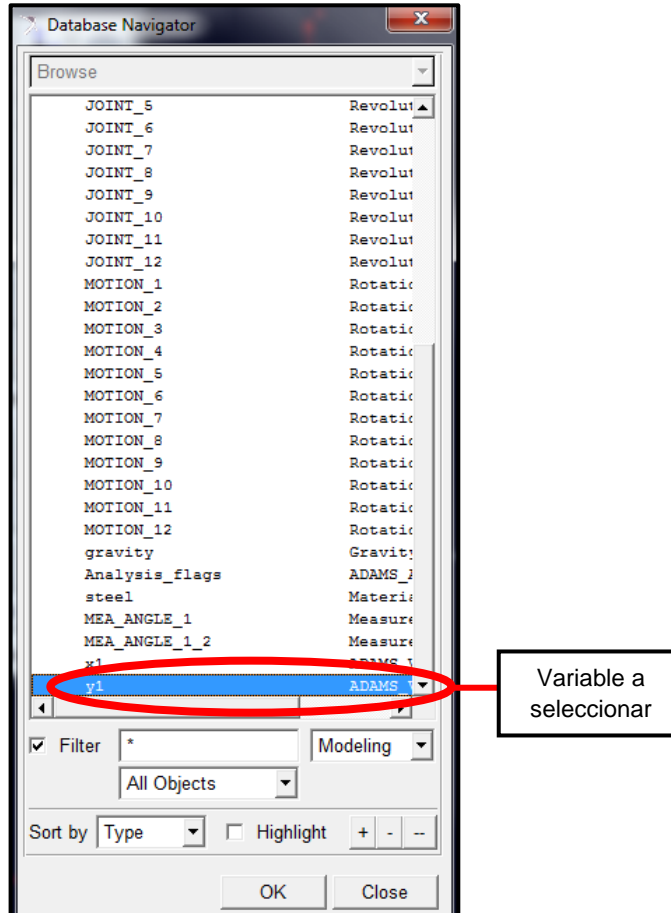
Ubicándose sobre la flecha y seleccionándola, surge el recuadro de la Figura 36, en el cual es importante seleccionar como función Varval para cada punto, debido a que es un formato que se debe pre-determinar en las variables para que puedan ser leídas en el entorno de co-simulación Adams/Matlab.

Figura 36 Elección de la función Varval



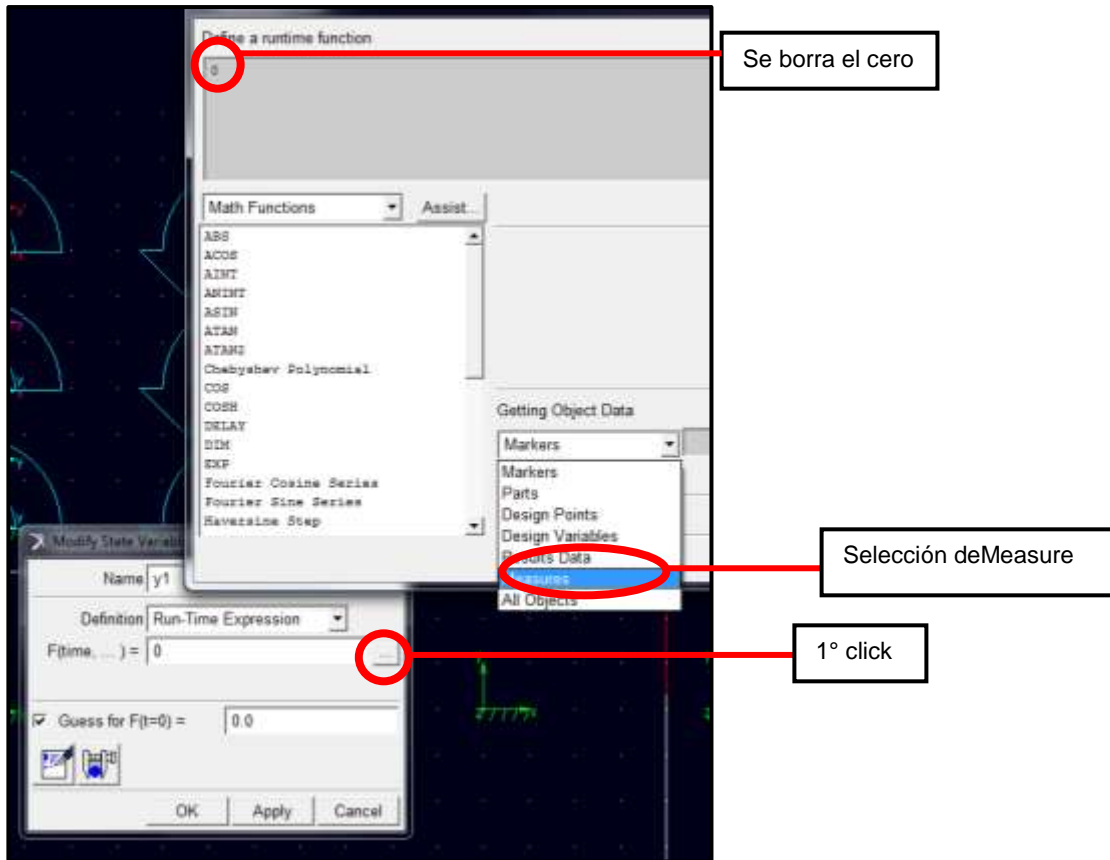
Para poder configurar los ángulos se hace uso del teclado del computador, seleccionando ctrl+E y surge la ventana que se aprecia en la Figura 37, donde se encuentran las variables que anteriormente fueron asignadas.

Figura37 Variables asignadas



Las siguientes acciones consisten en abrir la información de la variable, en F(time...) con lo cual una segunda ventana se abre, como se aprecia en la figura 66 donde se elimina el valor 0 de la función de tiempo de ejecución, adicionalmente se modifica el valor de la información de objeto a "Measure". En la Figura 38 se muestra la configuración haciendo uso del parámetro de ángulo MEA_ANGLE1.

Figura 38 Eliminación de la constante y selección de la herramienta Measure



Finalmente en la Figura 39y 40se muestra la asignación de toda la configuración para que se inserte en la pieza sobre la cual se está trabajando.

Figura 39 Configuración de la pieza

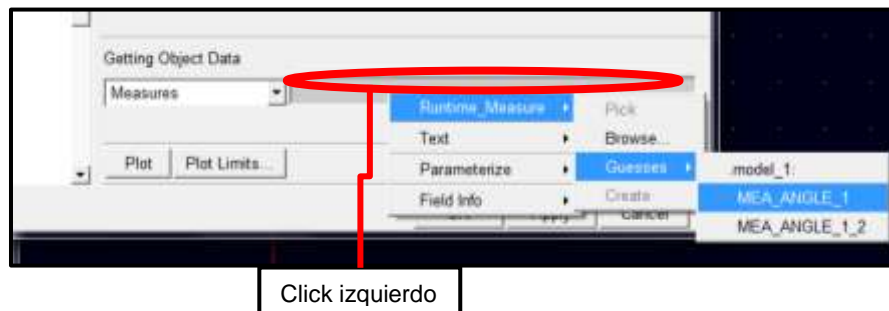
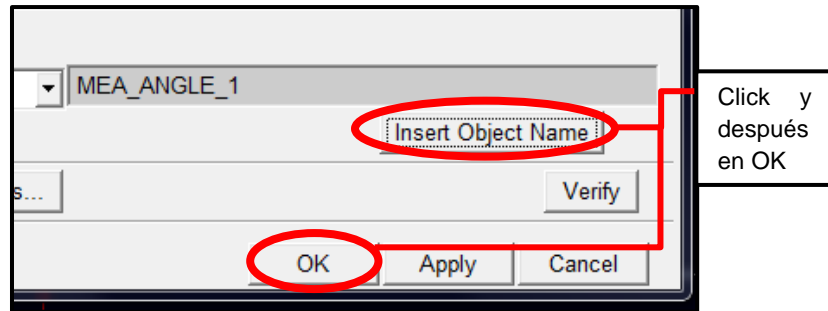
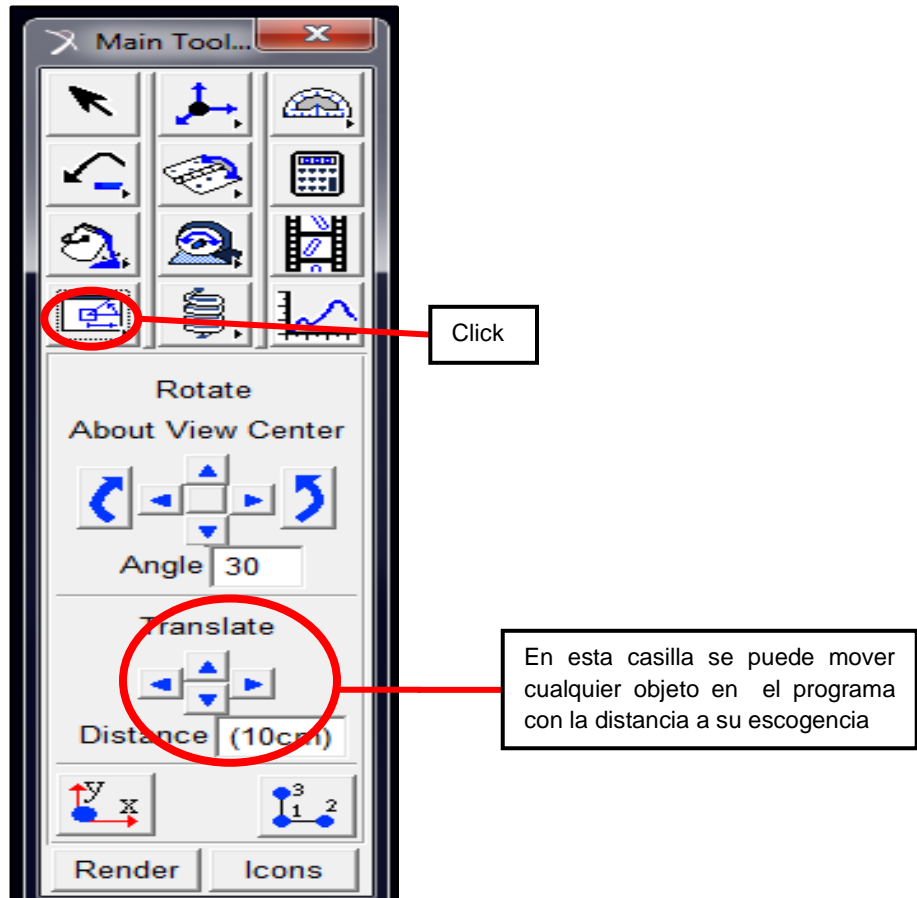


Figura 40 Configuración de la pieza



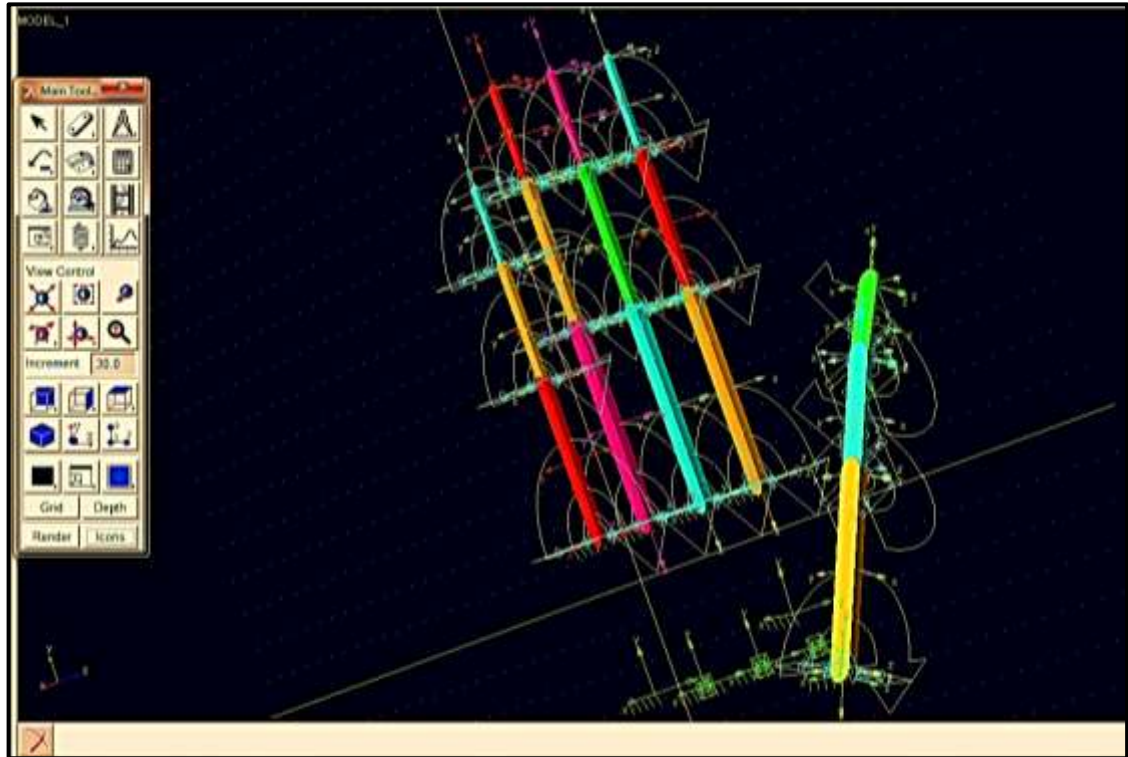
En este punto es posible que alguna pieza haya tenido algún movimiento, por lo tanto se hace uso de la pieza Rotate que se observa en la Figura 41. La herramienta está apoyada en las flechas inferiores que modifican el elemento a decisión del usuario.

Figura 41 Ubicación de la herramienta Rotate



El modelo con todas las modificaciones anteriores se puede apreciar en la figura 42.

Figura 42 Modelo con modificaciones en las falanges



Para enviar esta información a Matlaben necesario dirigirse al menú superior de ADAMS e ingresar a la ventana Tools hasta la opción Plugin Manager, como se observa en la Figura 43. En la Figura 44 se aprecia que la exportación se realiza al seleccionar Adams/Controls.

Figura 43 Envío a Matlab

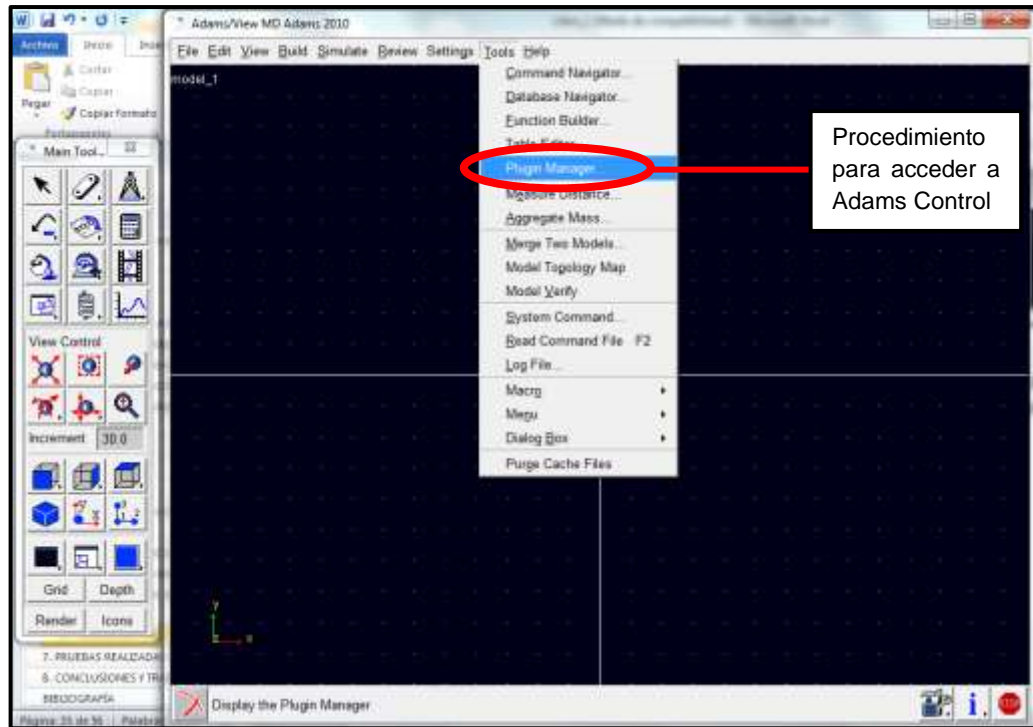
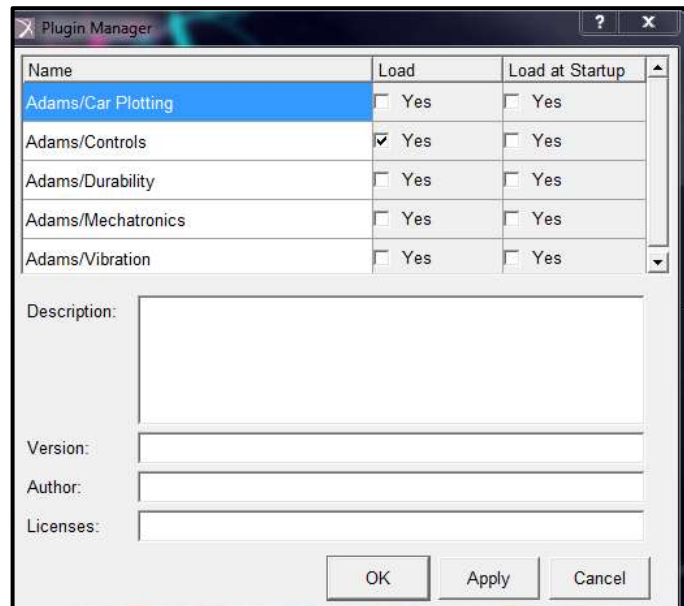
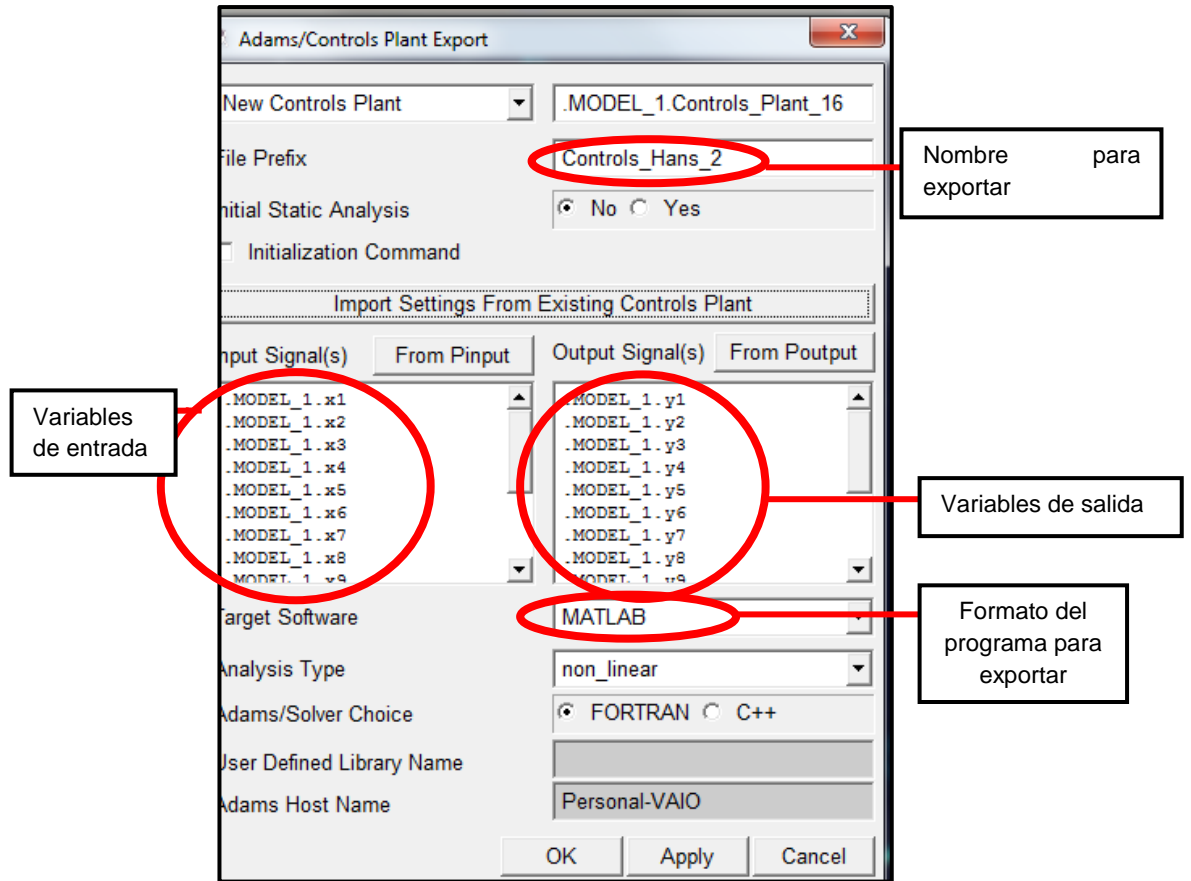


Figura 44 Exportación en Adams Control



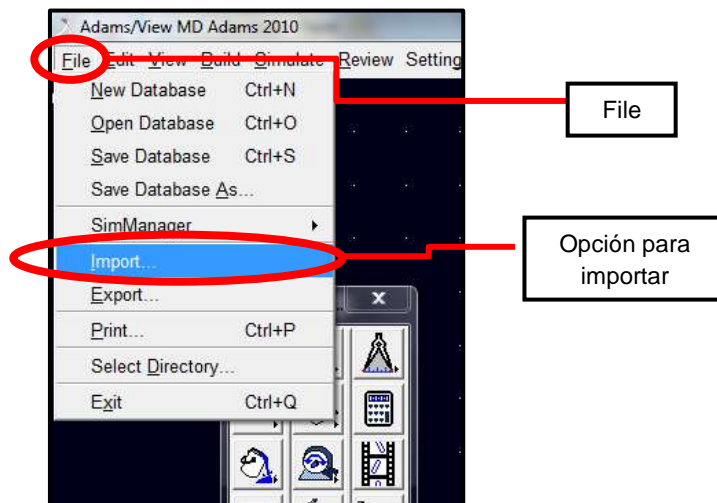
Después de aceptar las modificaciones y como se observa en la Figura 45 se abre una nueva ventana en la parte superior cuyo título es Controls/PlantExport, ahí se asignan las variables de entradas y salidas para el control.

Figura 45 Asignación de variables de entrada y salida



Para importar las gráficas desde CATIA, hay que dirigirse a file<Import, como se aprecia en la Figura 46.

Figura 46 Importación de gráficas



En la Figura 47 se detalla el formato que debe tener el archivo adicionalmente de la opción en donde se debe buscar la pieza dentro del computador, según se haya elegido con anterioridad. Otro detalle importante es la configuración de la Figura 48, donde hay que crear una nueva pieza, por lo tanto hay que seguir el procedimiento mostrado.

Figura 47 Importado de la mano de Catia a Adams

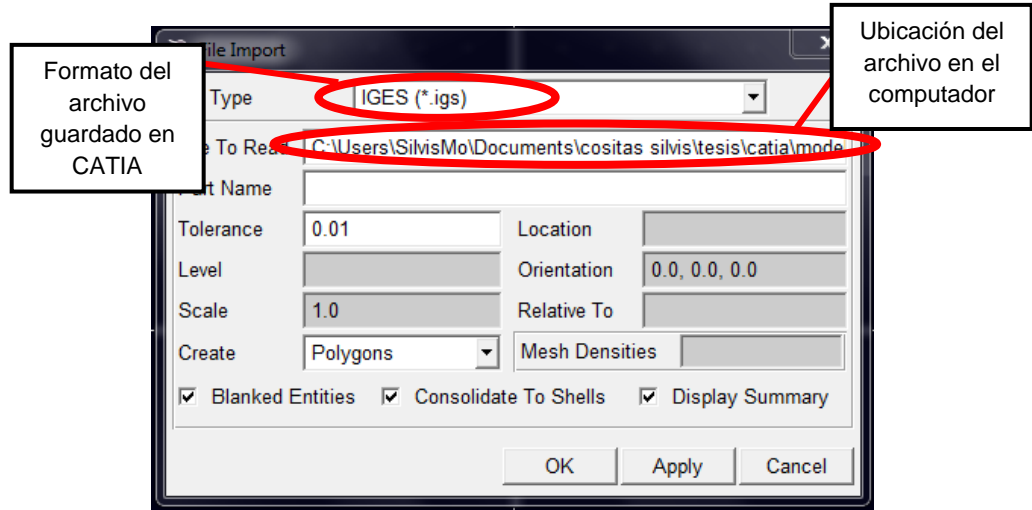
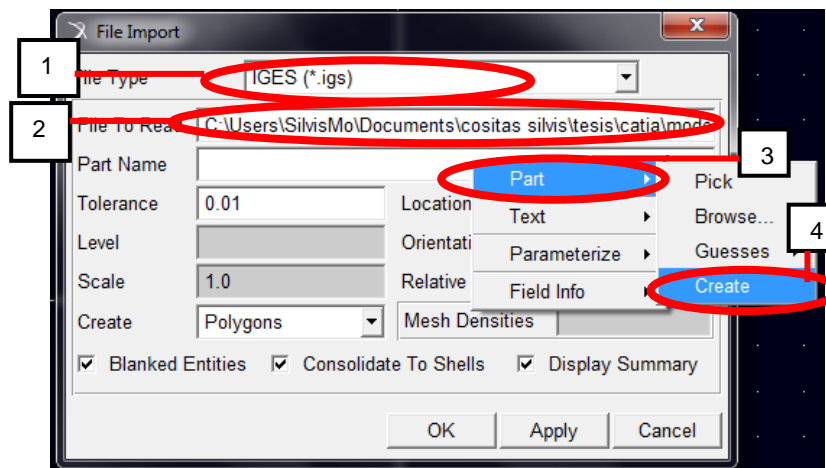
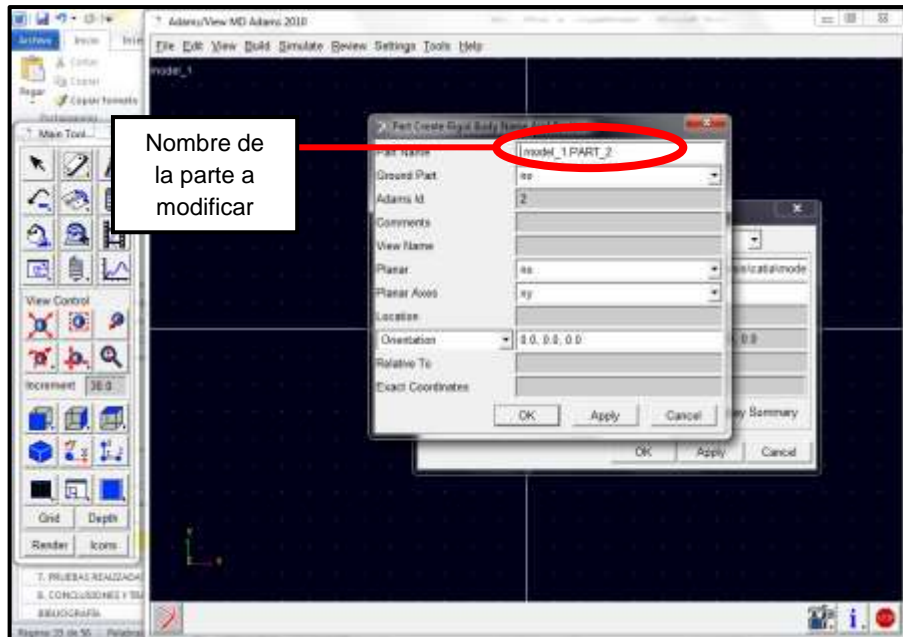


Figura 48 Configuración general del nombre de la parte enumerada



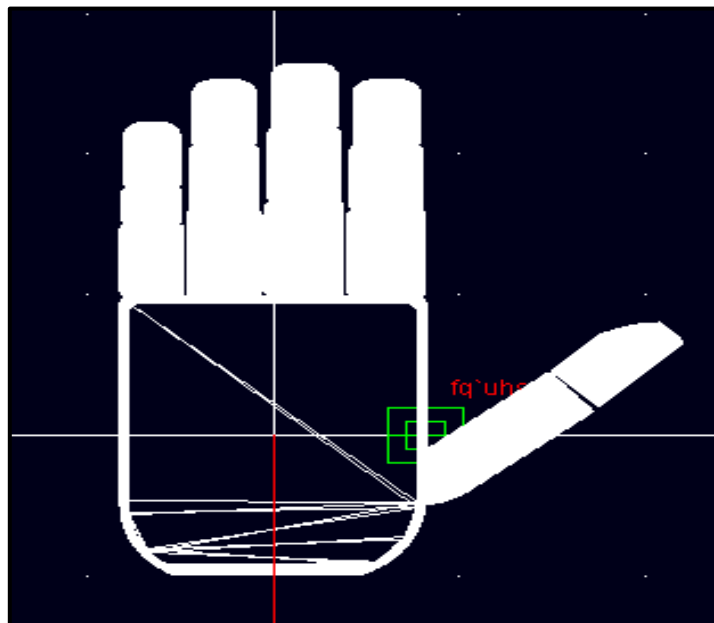
En la Figura 49 se resalta la parte en donde es necesario hacer la modificación del nombre, de ser necesario, para evitar confusiones. Para este caso lo que se debe modificar es la parte que dice PART_2.

Figura 49 Ubicación del nombre de la parte



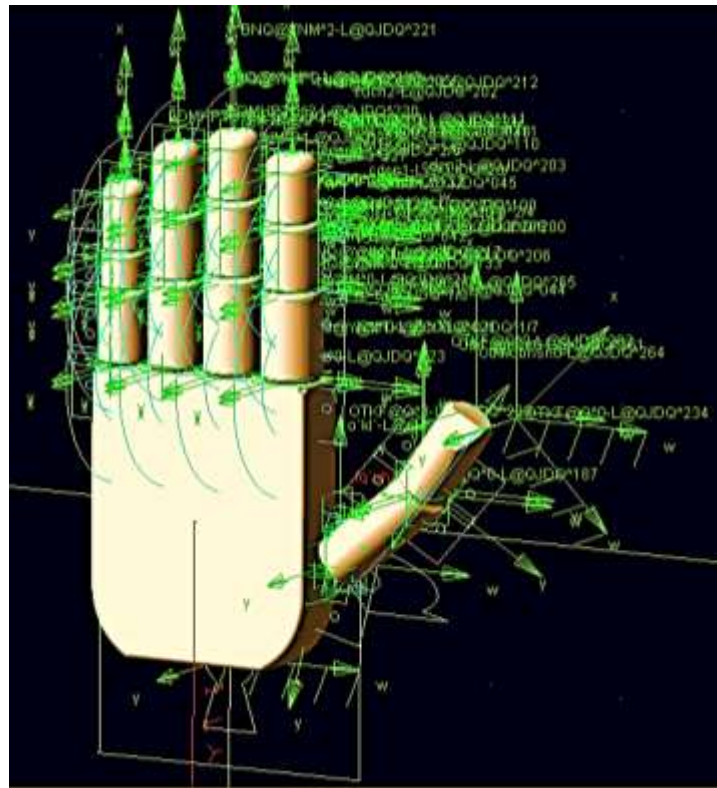
Finalmente se aceptan los cambios y se obtiene la pieza seleccionada en el entorno de ADAMS. Cabe aclarar que debido al dinamismo de la mano, se hizo necesario realizar pieza por pieza y por lo tanto importarlas de la misma manera. El resultado final vista desde ADAMS se observa en la Figura 50.

Figura 50 Mano importada a Adams desde Catia



Con la mano importada, se utilizan las herramientas ya trabajadas anteriormente para asignar los puntos y movimientos necesarios, con el fin de manejarlos en MATLAB, la mano final se muestra en la Figura 51. Los elementos de color verde a tipo de letra representan la asignación de variables y los puntos donde hubo conexión de piezas.

Figura 51 Mano con los puntos asignados



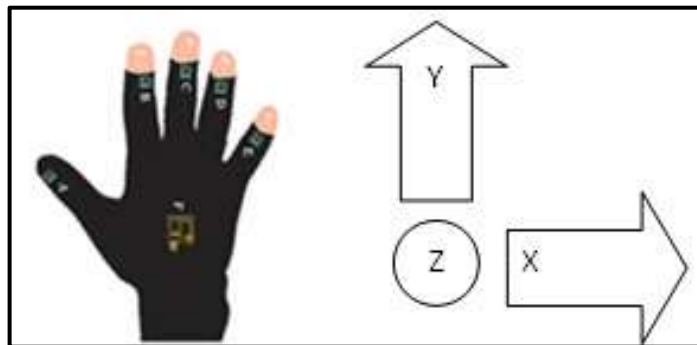
2.3 Modelo Acceleglove

2.3.1 Acceleglove

Este guante es una solución completa para adicionar una entrada de movimiento de la mano o un control a un rango de aplicaciones en los campos de Robótica, Rehabilitación Médica y Telemedicina, entrenamiento, juegos y simulación de ambientes de realidad virtual.

Usa sensores, llamados acelerómetros, integrados en un guante flexible y de bajo peso. Los sensores están ubicados en cada dedo adicionalmente de uno en el dorso, estos transmiten en los tres ejes de coordenadas X, Y y Z. Si la mano está en posición horizontal, el elemento Z de detección está orientada a lo largo de un eje (el "vector de gravedad") que es perpendicular a la superficie de la Tierra. Los ejes X y Y dependen de un plano que es perpendicular al eje Z, que se diferencian entre sí por 90 grados (Figura 52). El guante transmite el movimiento de la mano y la información de orientación a través de un cable USB aunque su comercialización incluye una segunda opción donde se ofrece un módulo inalámbrico.

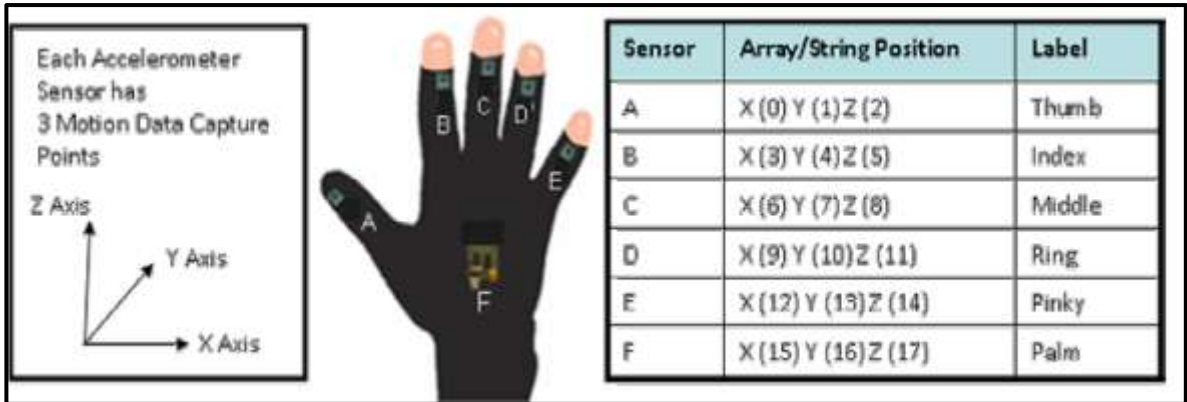
Figura_52 Ejes del guante⁷



En la Figura 53 se muestra la posición de cada sensor y como se interpretan los datos string y la matriz API. La ubicación de cada dedo es, A= pulgar, B= índice, etc.

⁷ Acceleglove user guide, page 13, versión 1.1.0 november 2010

Figura 53 Ubicación y enumeración de cada dedo⁸



Adicionalmente a esto, posee un SDK, Kit de Desarrollo de Software, (por sus siglas en inglés) que permite al operador utilizar directamente la salida del guante y reconocer gestos estáticos en una librería que viene con el cd de instalación. Incluye algunos subprogramas de interés general y permite la creación de librerías a través del lenguaje Java. [48] Es por tanto que el guante es despachado con una calibración previa, modificable por el usuario. La rata de datos es de aproximadamente 5 por segundo. Para efectos comerciales se encuentra en tres tallas: S, M y L. En la Figura 54 se puede apreciar el guante en funcionamiento con el visualizador incluido con su compra.

Figura 54 Guante Acceleglove⁹



⁸Acceleglove user guide, page 13, versión 1.1.0 november 2010

⁹AnthroTronix. "AcceleGlove" [En línea] <http://www.acceleglove.com/default.asp> [Con acceso el 12-03-20120]

2.3.2 Microsoft Excel

Microsoft Excel 2010 permite analizar, administrar y compartir información. Las herramientas de análisis y visualización le ayudan a realizar un seguimiento y resaltar importantes tendencias de datos. Adicionalmente permite graficar y calcular ecuaciones y datos obtenidos desde otros programas.[49]

2.3.3 Construcción del modelo de comportamiento

Las primeras pruebas realizadas con el guante consistieron en identificar las señales de transmisión al computador, para su análisis comportamental y la implementación en un código o bloques de Simulink. Para este primer análisis se realiza un programa de lectura de puerto serial. La información se almacena en una matriz y previamente es enviada a Excel. Para cada serie de datos almacenados, se realiza la captura de fotos de su posición real como referencia y poder realizar el análisis posterior. En la Tabla 6 se aprecia la información obtenida en su orden respectivo.

Tabla 6 Datos almacenados en Excel y separados los dedos

PULGAR		INDICE			CORAZON			ANULAR			MEÑIQUE			
106	37	63	102	0	151	80	1	129	111	0	140	90	0	157
110	35	66	104	0	152	80	0	130	108	0	141	89	0	155
107	34	65	104	0	151	80	1	130	109	0	140	89	0	155
107	36	63	104	0	151	79	0	130	108	0	142	89	0	156
107	36	64	103	0	152	79	1	129	109	0	140	91	0	156
107	36	63	103	0	152	80	0	129	108	0	139	90	0	156
106	37	63	102	0	149	79	1	130	110	0	139	91	0	156
108	38	64	103	0	151	80	0	128	110	0	138	90	0	156
108	38	64	103	0	152	79	0	129	110	0	139	90	0	157
106	36	62	102	0	150	80	0	127	109	0	138	90	0	155
107	36	63	102	0	149	79	0	128	110	0	137	89	0	155
106	38	64	102	0	149	80	1	127	110	0	138	91	0	155
106	38	63	103	0	150	79	1	127	110	0	138	90	0	154
107	38	64	102	0	151	79	0	127	110	0	139	90	0	154
106	37	63	101	0	150	79	1	127	109	0	137	91	0	157

En total hubo una captura de 27 movimientos que incluyen la apertura y cierre de la mano. En la Figura 55 se aprecian algunas de las posiciones utilizadas.

Figura 55 Fotografías de los movimientos de la mano



La captura se realiza con una cámara NIKON COOLPIX P100 de 10.3 Megapíxeles. Se hace uso de un trípode para mejorar la calidad de la imagen, la cual podría ser afectada por movimientos externos. La manipulación del guante se realiza a una distancia aproximada de 46 cm, desde el lente de la cámara hasta la pared.

Con los datos adquiridos se inicia la tabulación, ubicando los datos en orden creciente con el fin de estandarizar el movimiento, generando la información presentada en la Tabla 7, donde se muestra por cada dedo los intervalos de operación.

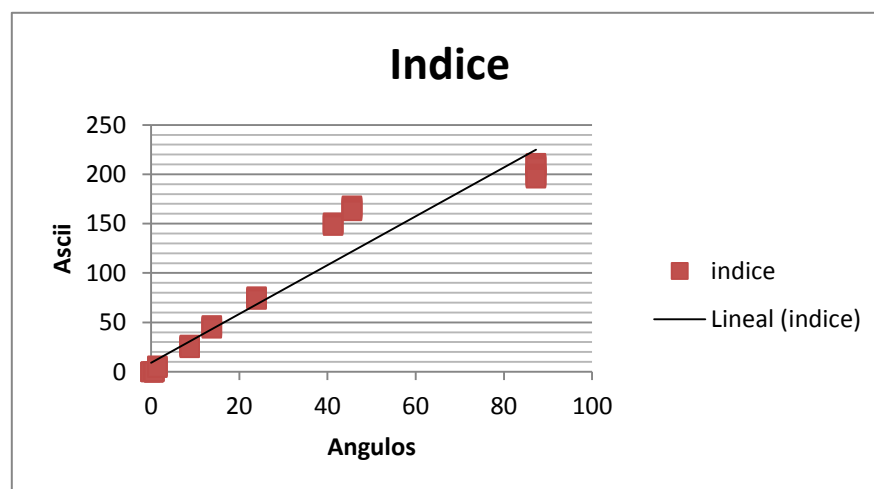
Tabla 7 Recopilación de datos Posicion 1

Índice		Corazón	
x	101-104	x	79-80
y	0	y	0-1
z	149-152	z	127-130
Anular		Meñique	
x	89-91	x	108-111
y	0	y	0
z	154-157	z	137-140
pulgar			
x	106-109		
y	90-92		
z	30-32		

Con respecto a cada fotografía el cálculo de ángulos según sus posiciones se realiza por medio del programa Measure, al asignar un parámetro de referencia.

Con los ángulos de cada una de las posiciones, se genera la tabulación por dedo, con el fin de poder realizar una regresión lineal. Los resultados de la información adquirida y a manera de tabulación por dedo se encuentran disponibles en el Anexo 1, para el caso presente, una referencia se muestra en la Figura 56, con respecto al dedo índice.

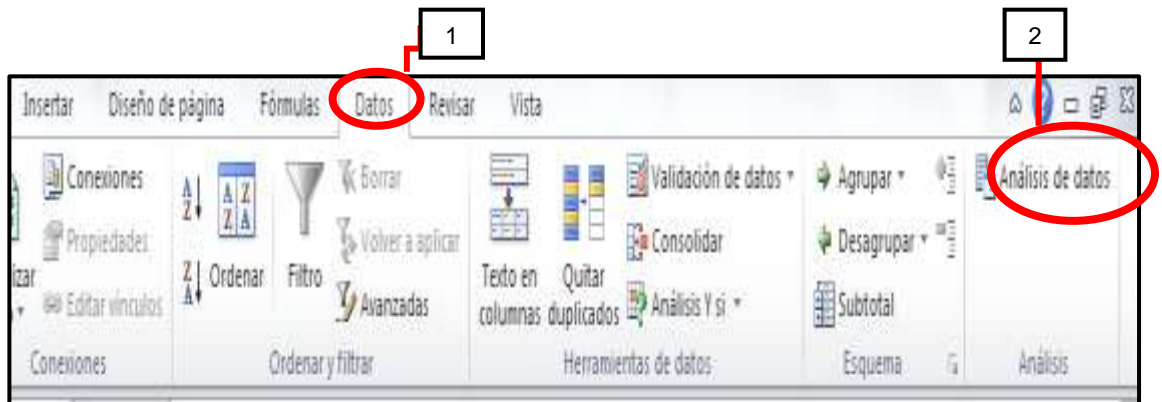
Figura 56 Movimiento del dedo índice con respecto al ángulo



Se procede a obtener las ecuaciones a través del método de regresión lineal y para ello se hace uso del programa Excel.

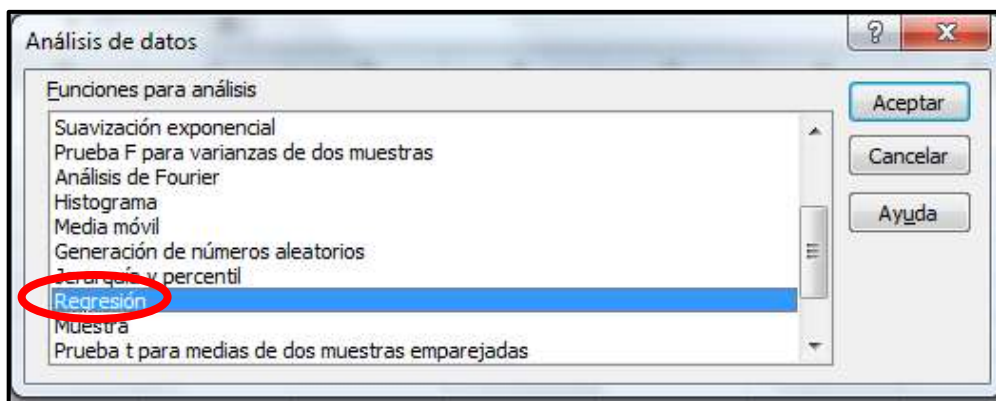
El procedimiento necesario para realizar la regresión consiste en ingresar a la barra principal del programa, a la opción Datos y luego a análisis de datos como se observa en la Figura 57.

Figura 57 Ruta para la herramienta Análisis de datos



Se despliega una ventana donde se debe elegir la opción Regresión, como se aprecia en la Figura 58.

Figura 58 Ubicación de Regresión



El último paso para obtener la ecuación se muestra en la Figura 59, donde después del paso anterior, se accede a esta ventana, donde se establecen las variables de entrada y salida.

Figura 59 Cuadro para la configuración de regresión lineal

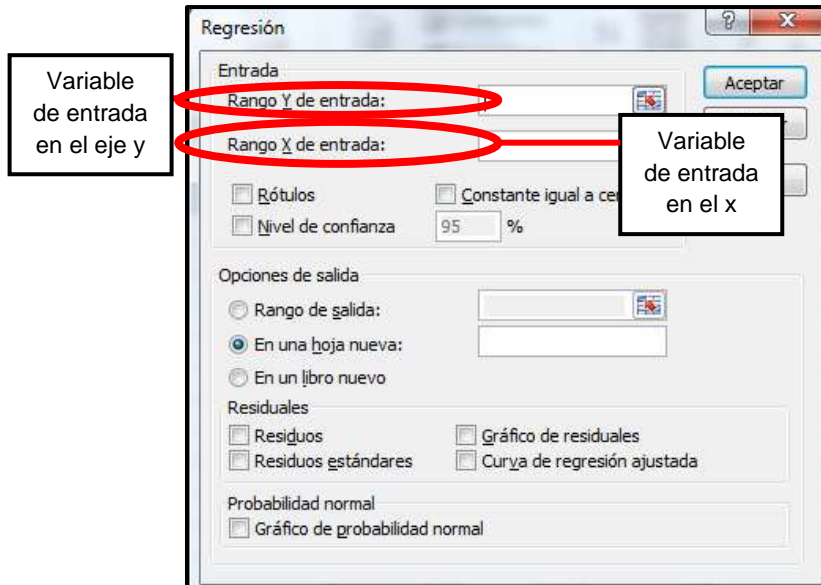


Figura 60 Resultados de las variables elegidas

A	B	C	D	E	F	G	H	I
Resumen								
<i>Estadísticas de la regresión</i>								
Coeficiente de cor	0,975641146							
Coeficiente de det	0,951875645							
R^2 ajustado	0,949950671							
Error típico	7,324393793							
Observaciones	53							
ANÁLISIS DE VARIANZA								
		<i>Grados de libertad</i>	<i>de cuadrado de los cua</i>	<i>F</i>	<i>Valor crítico de F</i>			
Regresión		2	53055,2873	26527,6437	494,487483	1,14584E-33		
Residuos		50	2682,33722	53,6467444				
Total		52	55737,6245					
	<i>Coe</i>	<i>ientes</i>	<i>Error típico</i>	<i>Estadístico t</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Inferior 95%</i>	<i>Superior 95%</i>	<i>nferior 95,0%</i> <i>superior 95,0%</i>
Intercepción	-20,1116327	4,35113505	-4,62215777	2,7016E-05	-28,85114462	-11,3721207	-28,8511446	-11,3721207
Variable X 1	0,410292233	0,01415427	28,9871645	6,291E-33	0,38186254	0,43872193	0,38186254	0,43872193
Variable X 2	0,172426591	0,03824699	4,50823966	3,9613E-05	0,095605254	0,24924793	0,09560525	0,24924793

Los resultados de la regresión lineal se aprecian en la Figura 60 y la información resumida por cada dedo es la siguiente:

Regresión lineal del índice

Ángulos 1-2
Intercepción = -20,1116327
Variable Y = 0,41029223
Variable Z = 0,17242659
R²=0,930986661

Ángulos 2-3
Intercepción = -10,5467038
Variable Y = 0,34538094
Variable Z = 0,16803906

Regresión lineal del dedo Anular

Ángulos 1-2
Intercepción = -23,3316717
Variable Y = 0,31686247
Variable Z = 0,21373981
R²=0,95972988

Ángulos 2-3
Intercepción = -9,22852588
Variable Y = 0,2503567
Variable Z = 0,17115183

Regresión lineal del dedo Corazón

Ángulos 1-2
Intercepción = -21,7427992
Variable Y = 0,27834282
Variable Z = 0,21682144
R²=0,9481333

Ángulos 2-3
Intercepción = -7,7536859
Variable Y = 0,22083762
Variable Z = 0,16551934

Regresión lineal del dedo meñique

Ángulos 1-2
Intercepción = -13,7589237
Variable Y = 0,38842629
Variable Z = 0,11897622
R²=0,97187708

Ángulos 2-3
Intercepción = -0,98679592
Variable Y = 0,30679792
Variable Z = 0,08958783

Regresión lineal del dedo pulgar

Angulo AB
Intercepción -48,63249559
Variable X 1 1,306609716
Variable X 2 0,340409955
R²=0,926648

Angulo BC
Intercepción -15,41896381
Variable X 1 0,612105166
Variable X 2 0,119531834

La información es representada por medio de ecuaciones planteadas a través de unos bloques en Simulink con los cuales se interpreta la información proveniente del guante.

2.4 Modelo Adams-Control/Matlab

2.4.1 Matlab

MATLAB, por otra parte, es un software matemático creado en 1984 por Cleve Moler para ayudar al estudiantado con subrutinas escritas en algunos cursos de análisis numéricos y algebra lineal. Hoy en día se encuentra disponible para Windows, Unix y Mac OS X. Este software permite el análisis de matrices, representación de datos, la comunicación con otros lenguajes de programación y la creación de interfaces de usuarios.

Matlab posee una herramienta conocida como Simulink (Plataforma de simulación Multidominio) que para el efecto de este proyecto es la herramienta básica donde el desarrollo en los software en CATIA y ADAMS es unificada. [50-51]

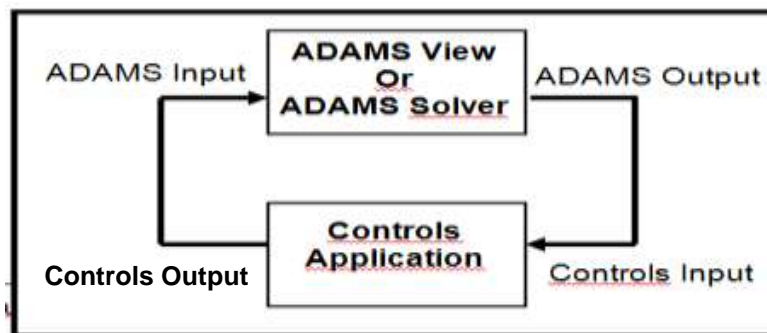
2.4.2 Adams/Controls y Matlab/Simulink

Adams Controls combina las ventajas de construcción y simulación compleja de sistemas dinámicos multi-cuerpo con paquetes especializados de control como Matlab/Simulink. Inicialmente las entradas y salidas son definidas en Adams Controls, luego el modelo es exportado en un formato de lectura apto. Para el caso, el modelo aparece como un subsistema en Simulink, que tiene tantas entradas y salidas como definidas previamente en ADAMS y sus salidas son entradas al sub sistema ADAMS.

Cuando se corre la simulación, ambos paquetes realizan un intercambio de información a través de las entradas y salidas definidas para computar al modelo. Este procedimiento se puede realizar de varias formas, la primera consiste en elegir cuál paquete resuelve las ecuaciones de movimiento del sistema dinámico. Una manera es permitir el paquete de controles resolver las ecuaciones de movimiento como las de la salida del controlador, esto recibe el nombre de modo continuo. El otro método se denomina modo discreto. En este método, el

ADAMS/Solver, resuelve las ecuaciones de movimiento, el cual soluciona de manera sintonizada para solucionar sistemas mecánicos. Utiliza un tamaño de paso fijo el cual intercambia información con la aplicación de control, teniendo cuidado con el tamaño del paso, el cual debe ser lo suficientemente pequeño.¹⁰ La Figura 61 muestra un diagrama general de cómo la salida de Adams se convierte en la entrada de ControlsApplication, la cual para el caso del proyecto, es un bloque que se importa a Simulink y del que se habla posteriormente. La salida del mismo bloque se utiliza como entrada al sistema de Adams, generando las instrucciones necesarias para el movimiento de la estructura diseñada, es decir, la mano.

Figura 61 Diagrama general Adams View y ControlsApplication¹¹

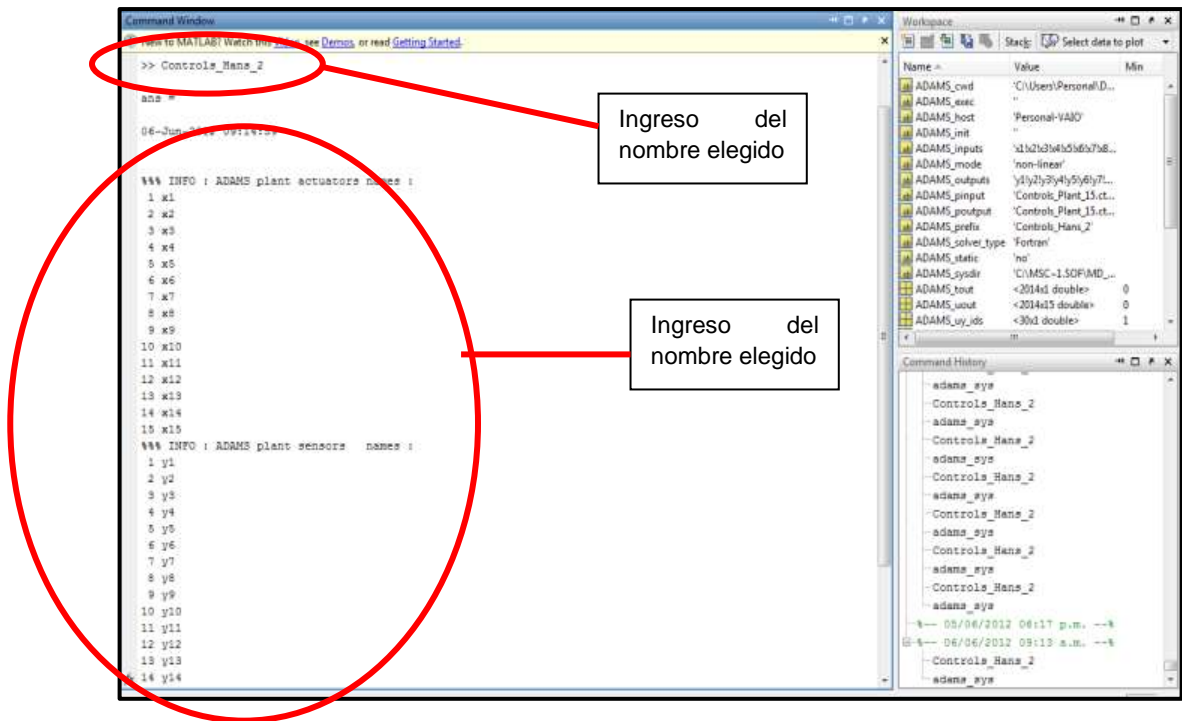


2.4.3 Desarrollo del modelo Adams-Control/MATLAB

Para observar en Matlab las co-simulaciones con la información previamente almacenada con el nombre asignado, que en este caso es Controls_Hans_2 y se redacta en el workspace, o zona de trabajo, con lo cual se muestra algo semejante a lo mostrado en la Figura 69.

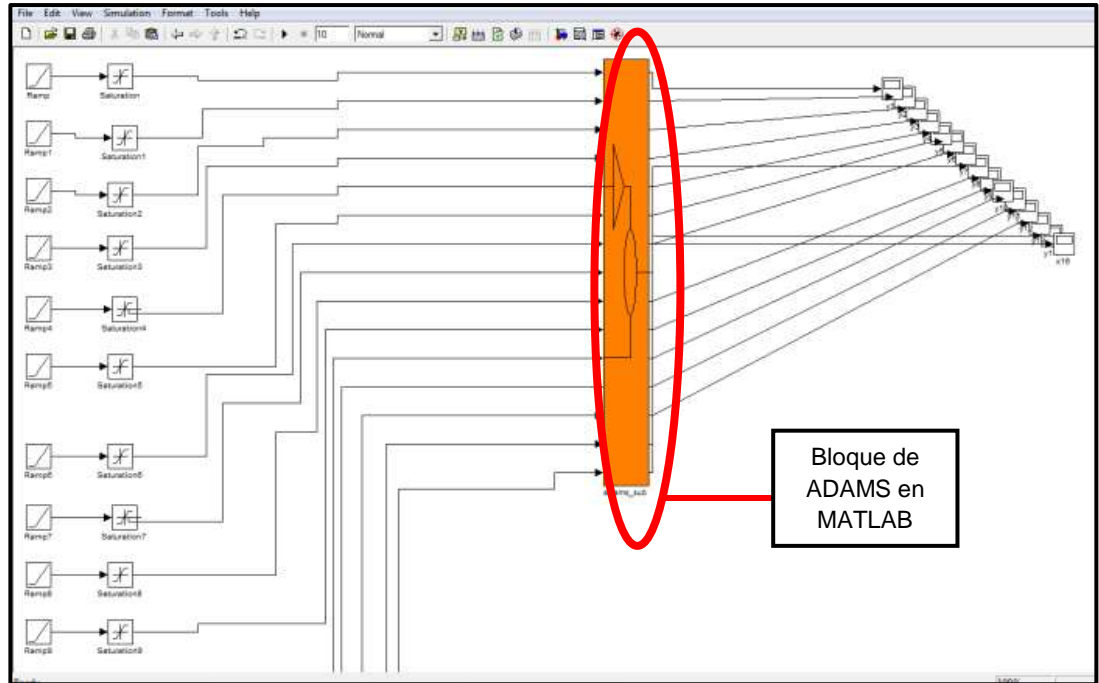
¹⁰ Adams/Control y Simulink [En línea] <<http://alexandria.tue.nl/repository/books/614916.pdf>> [Con acceso el 12-09-2012]

Figura 62 Proceso de carga de información de Adams en Matlab



A continuación se carga el modelo no linealizado de Adams y se modifica con la parte de control para que trabaje de forma que el usuario requiera, para cargarlo se escribe `adams_sys`, ya con el bloque de Adams en simulink, esto se observa en la Figura 63. Para visualizar la simulación se selecciona el cuadro de `adams_sub`, cabe aclarar que el bloque naranja es la programación que va directamente conectada a Adams, es decir, es el mando central de la mano que se tiene en el programa dinámico de la misma figura.

Figura 63 Programación en Simulink



Cuando se selecciona el cuadro rojo de la Figura 64 con el nombre de ADAMS Plant, surge el recuadro de la Figura 65. Donde dice animationmode se selecciona la opción interactive, de esta forma es posible ver los movimientos generados de la simulación.

Figura 64 Programación del bloque naranja de Adams

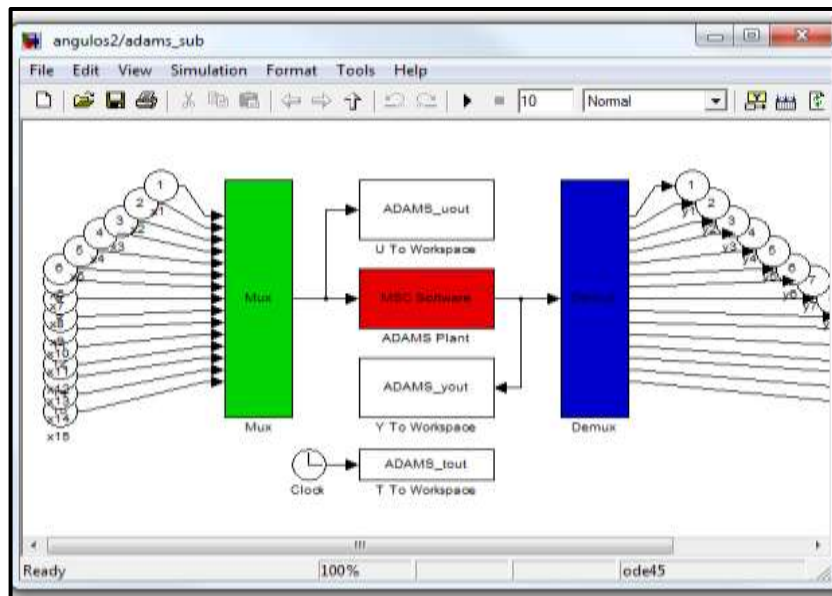
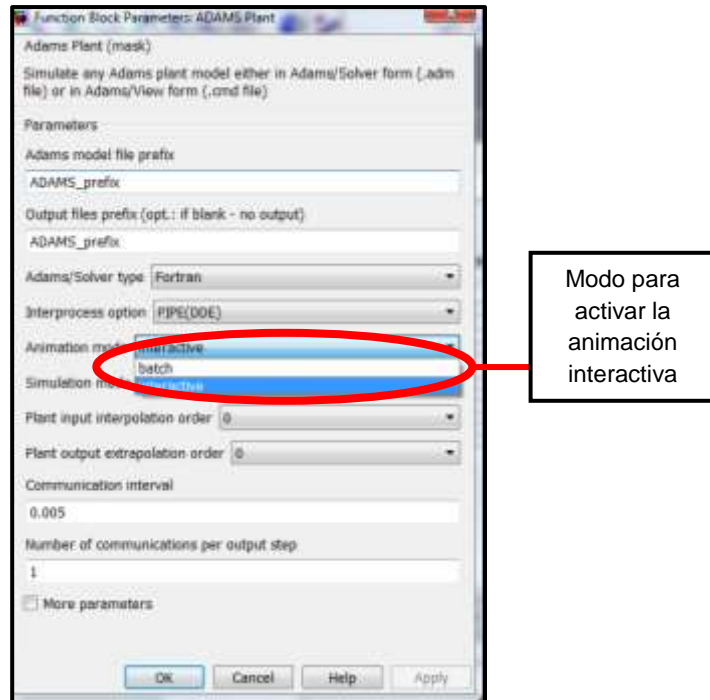


Figura 65 Configuración para que la simulación sea interactiva



Para la comunicación serial en MATLAB, se realiza la siguiente configuración:

En primer lugar se accede a la plataforma de Simulink, creando un nuevo proyecto como se aprecia en la Figura 66. En la Figura 67 se muestra cómo al ingresar a File<ModelProperties, aparece una nueva ventana, donde es necesario ingresar a la opción Callbacks.

Figura 66 Creación de una nueva hoja de trabajo

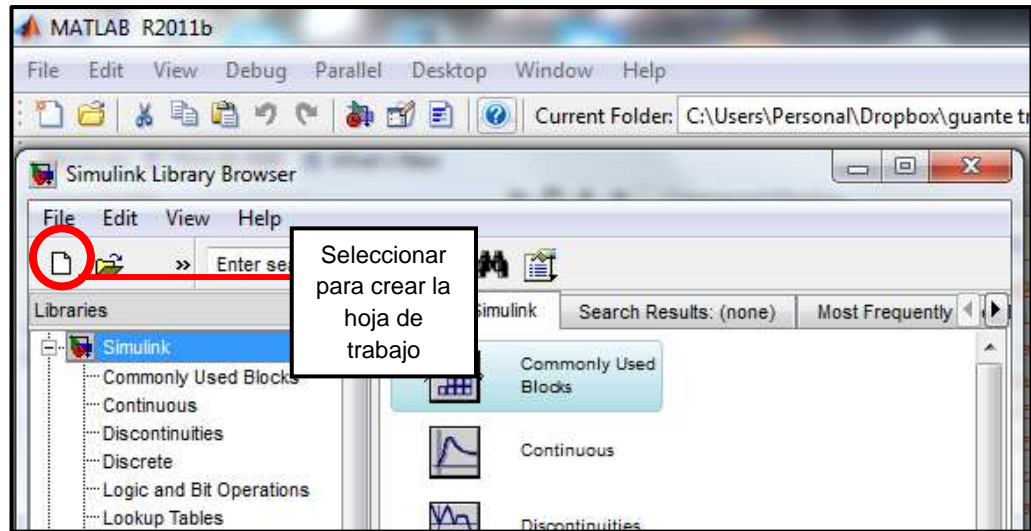
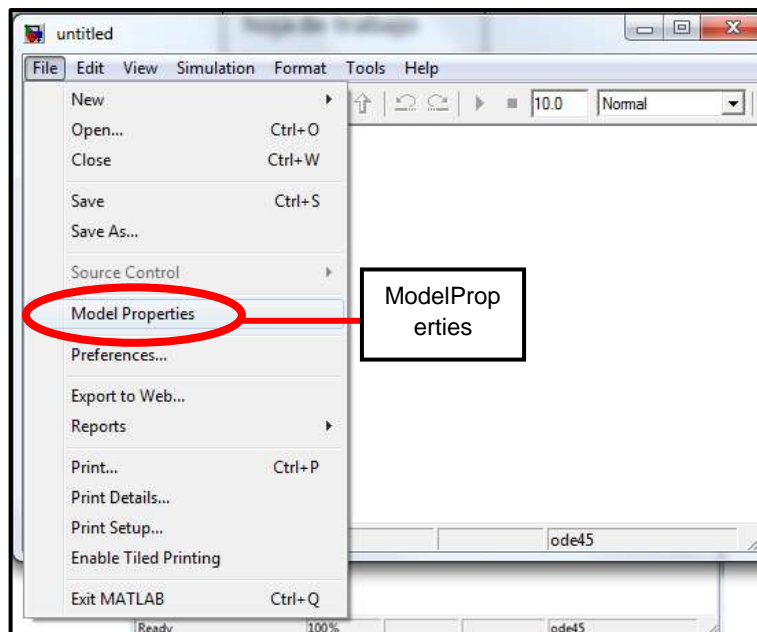
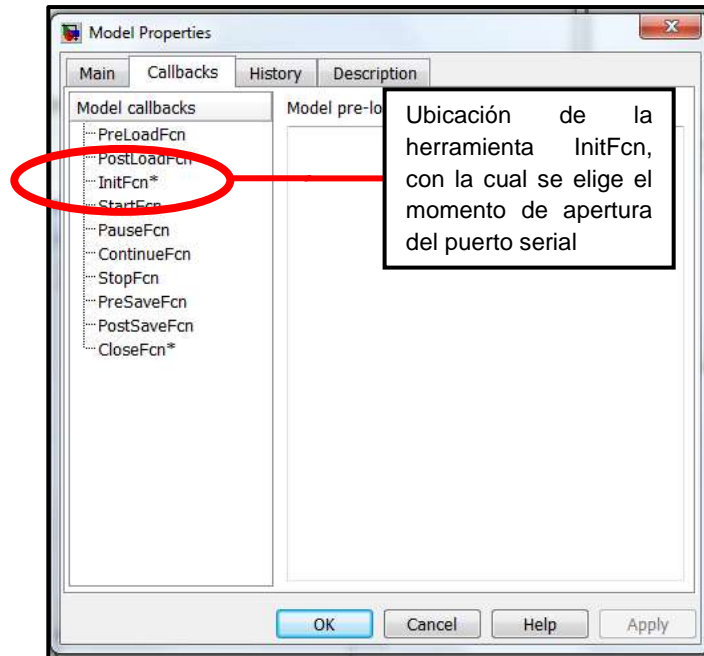


Figura 67 Ubicación de la herramienta modelproperties



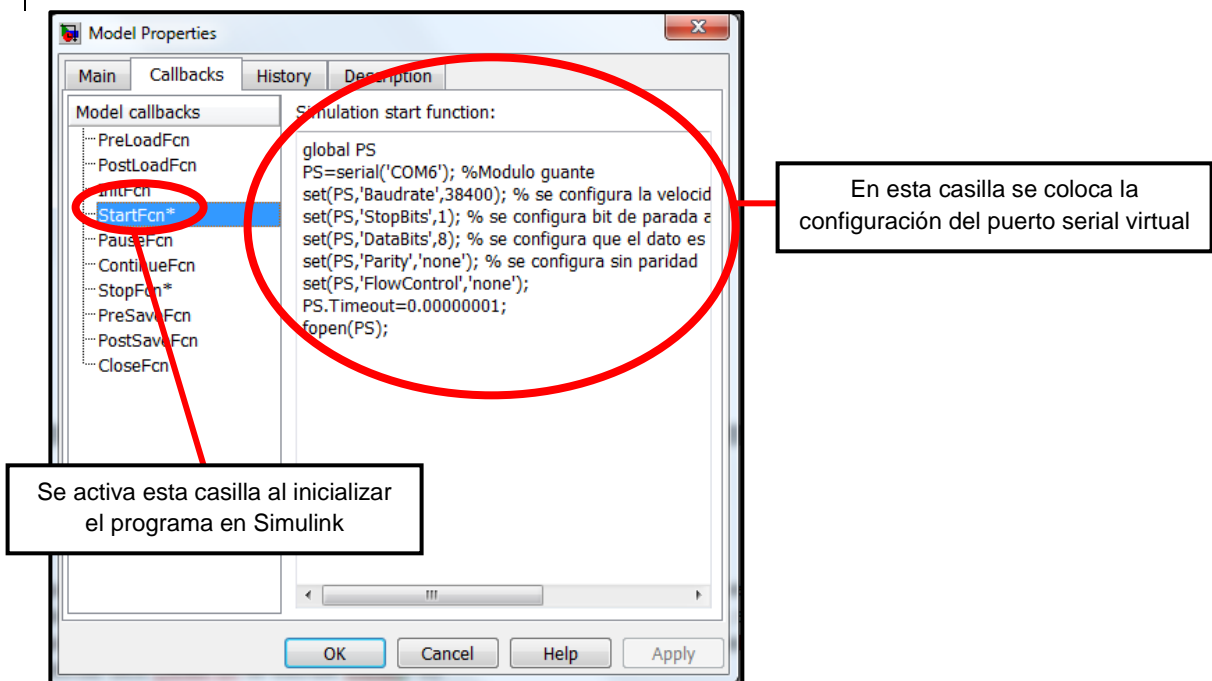
Su funcionalidad radica en generar configuraciones predeterminadas, ya sea, cuando se abre el programa, cuando se pone a compilar, etc. En este proyecto se requiere que se configure el puerto serial al iniciar el programa, aunque la posibilidad de elegir el momento de apertura es libre para el usuario, por ello se emplea la configuración donde dice InitFcn, como se observa en la Figura 68.

Figura 68 Ubicación Initfcn



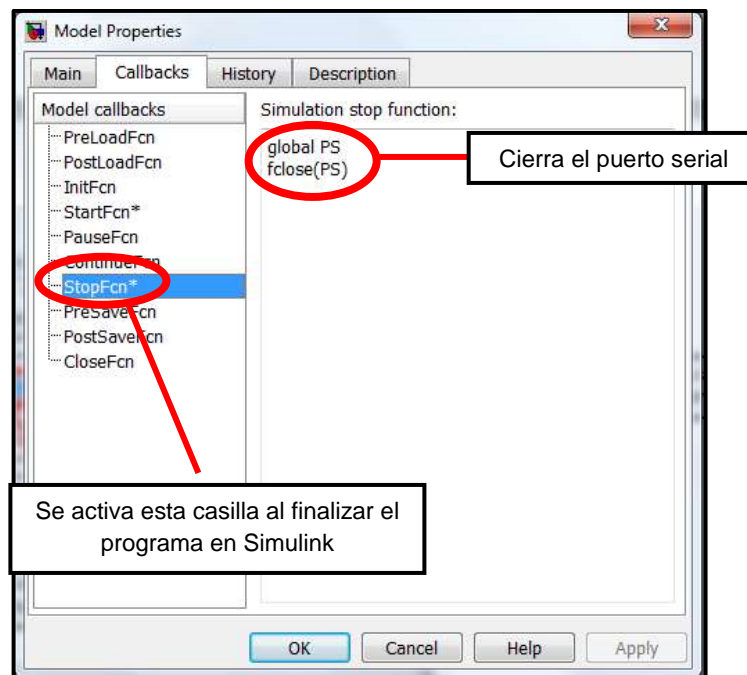
En la Figura 69 se presenta la configuración por código del puerto serial virtual, determinando cuál puerto COM es utilizado, la tasa de baudios, los bits de parada, entre otros.

Figura 69 Programación de la función de inicio



En la Figura 70 se aprecia la codificación del cierre del puerto y así mismo del programa que se está corriendo en Simulink. Algunas partes del código son soportadas en el manual del guante, presentada por el fabricante a la hora de la compra. La adquisición de los datos del guante se configura haciendo uso de la función `StopFcn`, la cual cierra del puerto serial, con el código `fclose(PS)`, como se aprecia en la misma figura.

Figura 70 Configuración por código del cierre del puerto



Haciendo uso del bloque Interpreted MATLAB Function que se encuentra en Simulink- UserDefinedFunction, se abre la posibilidad de trabajar una función desde el editor de Matlab, donde se llama la información que genera el guante por medio de puerto serial virtual, tal como se aprecia en la Figura 71, donde el código de lectura del guante está detallado y en la Figura 72 que detalla el bloque anteriormente mencionado y la lectura serial.

Figura 71 Código especial para el guante

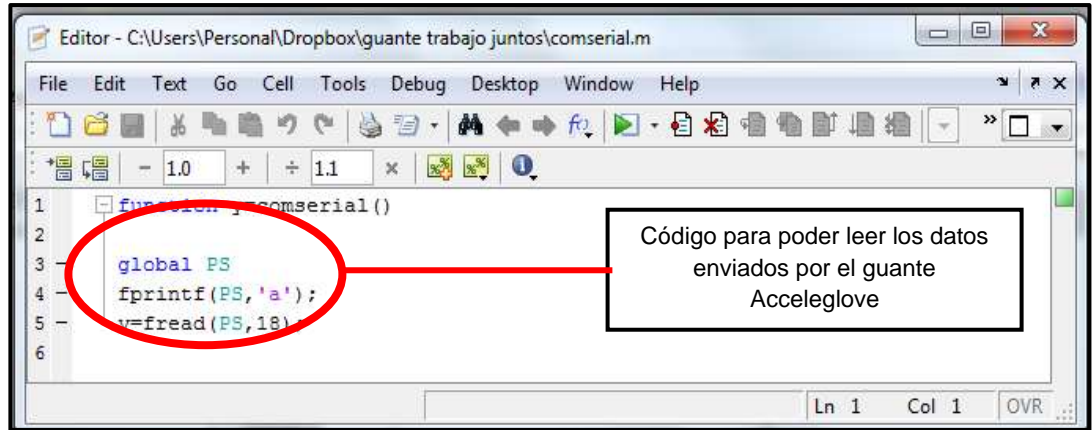
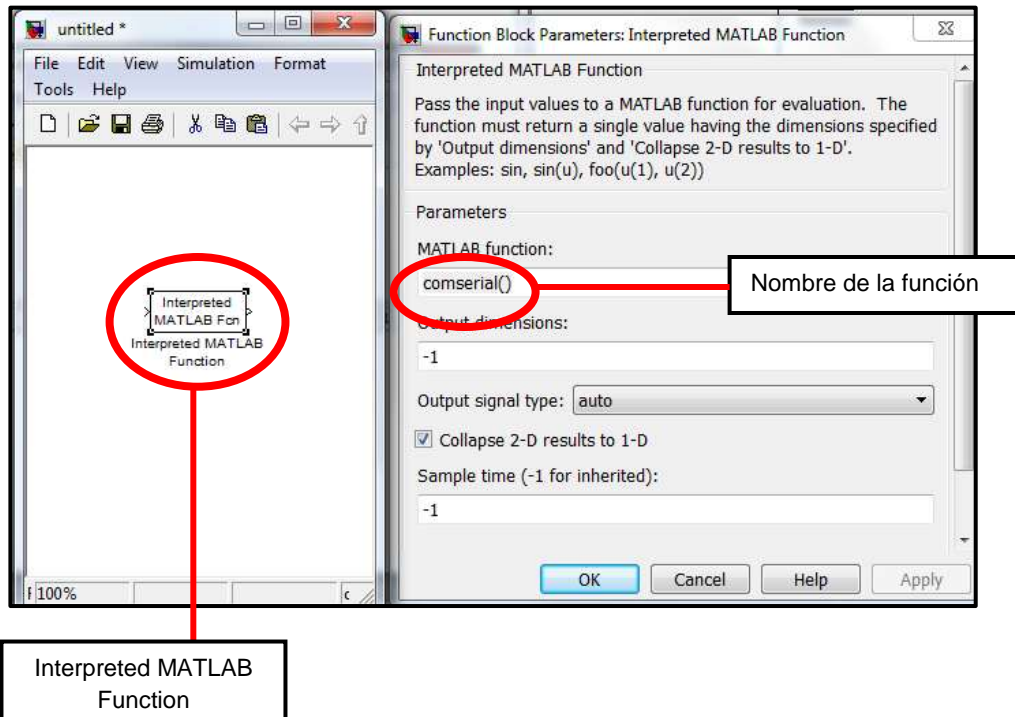
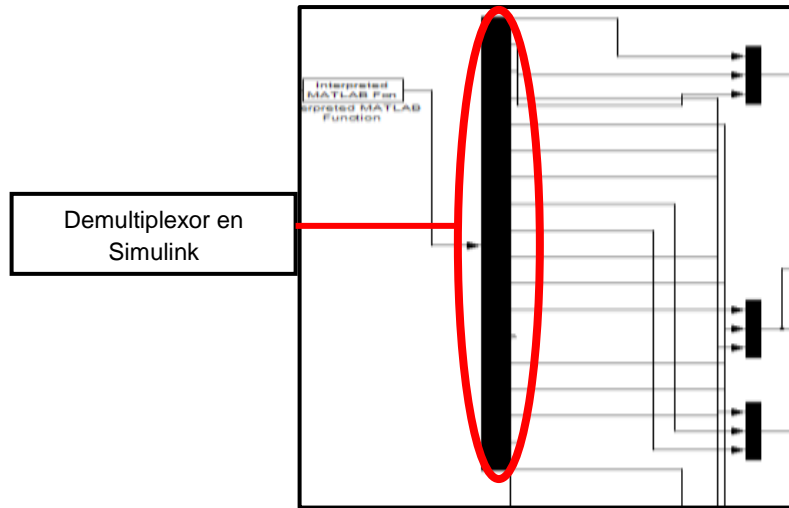


Figura 72 Bloque Interpreted Matlab Function



En la Figura 73, se presenta la demultiplexación de las señales de entrada, las cuales vienen en un bus de 18 datos. Previamente se dividen y unen o multiplexan en grupos de a tres, es decir, X, Y y Z de cada acelerómetro. Toda esta información es suministrada por el guante.

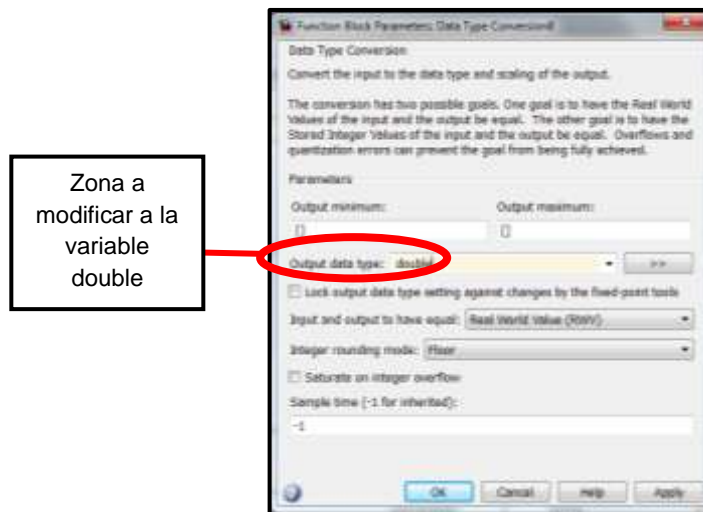
Figura 73 DeMultiplexor de datos del guante Aceleglove



El guante envía 18 datos al mismo tiempo, estos datos corresponden a cada dedo y a la palma de la mano, son enviados tres datos correspondientes a las coordenadas X,Y y Z. Estas son las señales que se interpretan dentro de MATLAB para el control de la mano diseñada en CATIA y que se trabaja con ADAMS.

Los datos en formato ASCII arrojados por los acelerómetros ingresan inicialmente a un *Data Type Conversion*, el cual convierte el formato a un valor entero. La única modificación necesaria del bloque consiste en elegir la variable double, como se puede apreciar en la Figura 74.

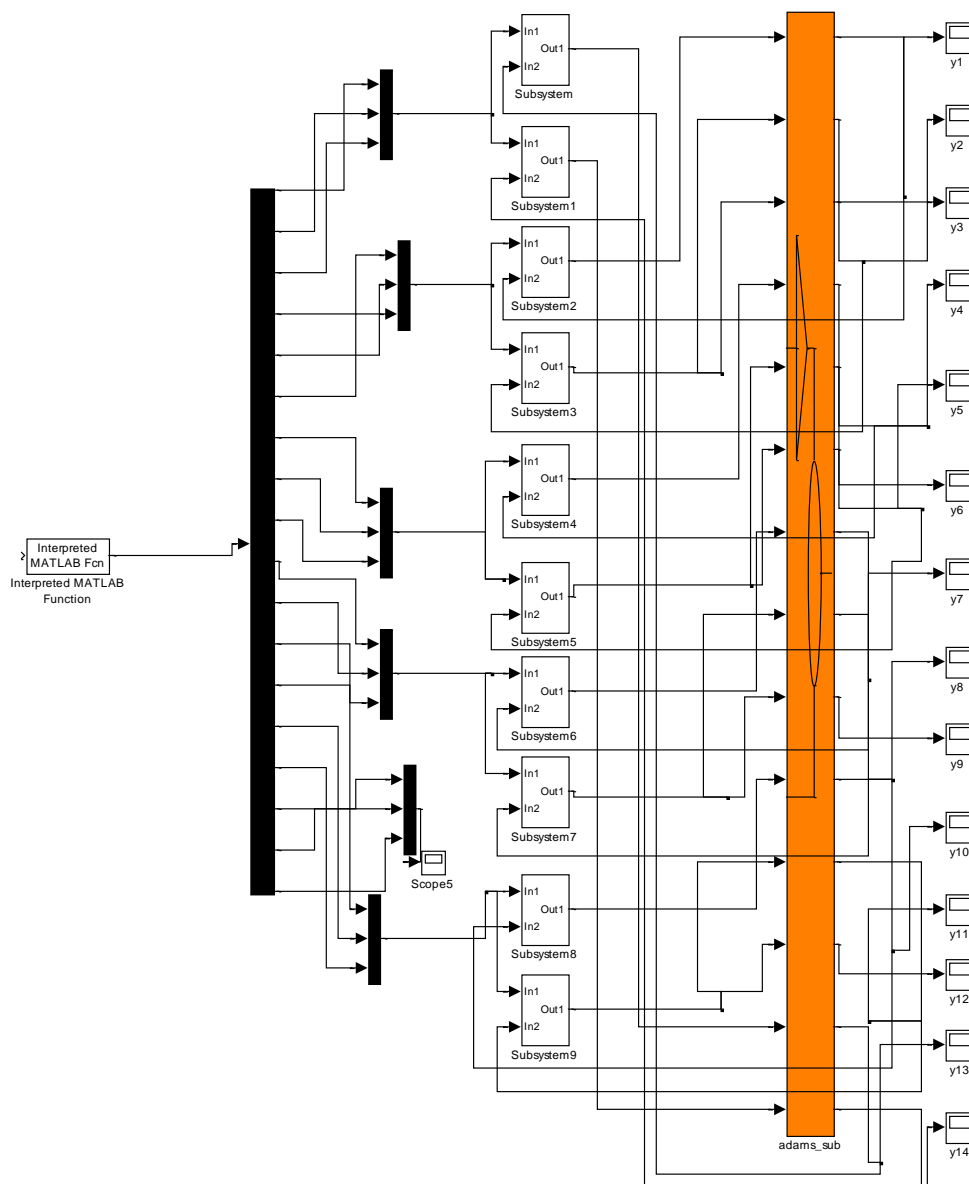
Figura 74 Configuración del bloque Data typeconversion



2.4.4 Desarrollo del lazo de control

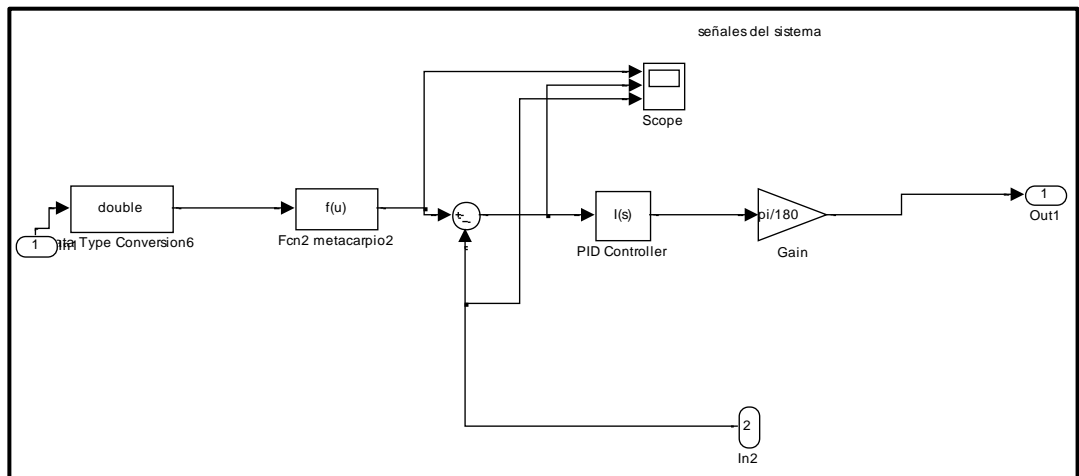
Inicialmente se realiza una adquisición de datos de los sensores del guante, los cuales son entradas digitales, son procesadas a través de programación por bloques en Simulink. Este proceso permite la comunicación con el modelo de simulación co-creado entre ADAMS y CATIA. El sistema final a base de bloques generado en Simulink se puede apreciar en la Figura 75.

Figura 75 Modelo final generado en Simulink



Al interior de los subsistemas se presenta el lazo de control y la aplicación de las ecuaciones correspondiente a cada falange, obtenida con anterioridad, para generar el movimiento deseado, como se aprecia en la Figura 76.

Figura 76 Subsistema con lazo de control



El control usado se presenta como un sistema integral dado que permite disminuir y atenuar el error en estado estacionario y su sintonización se basa en el método del tanteo. Adicionalmente este control permite que la velocidad sea proporcional respecto a un punto de consigna.

2.4.4.1 Análisis de resultados

Para completar el último objetivo del proyecto, se presenta el último lazo, el de la realimentación integral. Para verificar los resultados obtenidos se realizan una serie de pruebas por movimientos de los dedos para generar la réplica en el modelo y corroborarlo a través de imágenes, gráficas y análisis de ellos. Los movimientos son de cierre, por lo cual en la Figura 77 se presenta la mano abierta, en la 78 se muestra el cierre del meñique y en la 79 el cierre del corazón. A continuación en la Figura 80 se aprecia el cierre del dedo anular, del índice en la 81 y finalmente en la Figura 82 el movimiento del pulgar.

MOVIMIENTOS PARA CADA UNO DE LOS DEDOS DE LA MANO

Figura 77 Movimiento 1, mano abierta



Figura 78 Movimiento 2, cierre del meñique



Figura 79 Movimiento 3, cierre del corazón



Figura 80 Movimiento 4, cierre del anular



Figura 81 Movimiento 5, cierre del índice



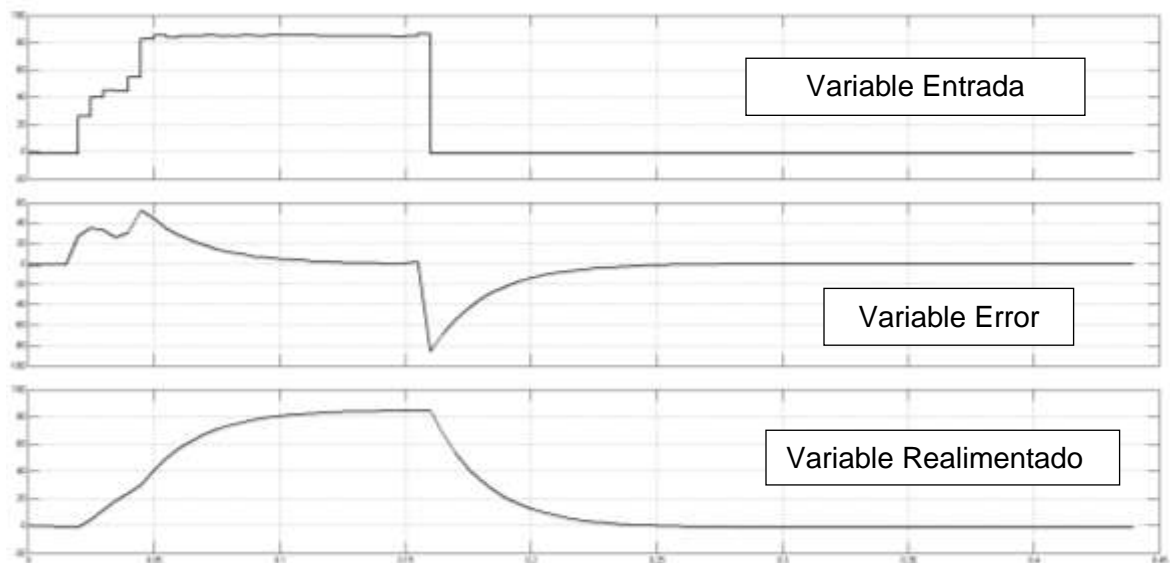
Figura 82 Movimiento 6, pulgar cerrado



ANÁLISIS REALIZADO PARACADA UNO DE LOS DEDOS

En la Figura 83 se relacionan las señales de entrada, salida y error del dedo índice de manera gráfica. Cabe resaltar que los resultados obtenidos por los otros dedos, se presentan en el Anexo 2.

Figura83 Gráficas de lazo de entrada, error y realimentación del dedo índice



El experimento realizado consistió en movimientos completos de la mano, de apertura y cierre de manera repetitiva y a diferentes velocidades.

Bajo el concepto general, el error es la diferencia entre la señal de realimentación y la señal de entrada al sistema. La señal de error equivale entonces a la diferencia entre la posición deseada, dada por el dato adquirido y la posición representada en el modelo de simulación, dada por el sistema de control. Este error es generado por la ecuación que modela la posición y el control integral desarrollado.

En la figura anterior, se puede apreciar la señal de realimentación, de control y el error, el cual se calcula restando la posición deseada (señal de control) y la posición enviada y optada por modelo de simulación en Adams (señal de realimentación). El error del sistema presenta picos únicamente en los cambios de posición y se estabiliza al poco tiempo.

Para una mejor apreciación del resultado final y a manera de apoyo, se puede acceder a:

http://www.youtube.com/watch?v=Oqw5_4mQuxM&feature=youtu.be

CONCLUSIONES

- Se estableció un modelo geométrico y dinámico de simulación de la mano derecha de un hombre adulto empleando la co-simulación de los software Catia-Adams-Matlab de diseño asistido por computador, manejando medidas estándares de un hombre adulto con un percentil del 50%.
- Se realizó un acercamiento al manejo de los acelerómetros y se graficaron las señales de transmisión del guante Acceleglove, demostrando su comportamiento.
- A través de una programación por bloques realizada en Simulink, se estableció una comunicación entre el guante y el modelo de simulación de la mano, mediante un acondicionamiento matemático de las señales del guante.
- Se desarrolló un sistema que permite posicionar los dedos del modelo de la mano simulada, haciendo uso de control proporcional por medio de software.

TRABAJOS FUTUROS

- A través del desarrollo y trabajo sobre el modelo obtenido se puede lograr la implementación sobre un sistema mecánico real
- Posibilidad de generar sistemas teleoperados en ambientes hostiles
- Se presenta la opción de trabajar con un mayor número de grados de libertad para sistemas más robustos
- Generación de proyectos con enfoque en la realimentación de esfuerzos para sistemas hápticos

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Barón Marcelo (2004) Enseñar y aprender tecnología. Novedades Educativas. ISBN 987-538-101-2 (93-111)
- [2] Biónica [En línea]
<<http://es.scribd.com/doc/62424971/La-biomecanica-y-su-aplicacion-en-las-protesis>>[Con acceso el 25-08-2012]
- [3] Subdisciplinas de la biomecánica [En línea]
<<http://www.mibienestar.es/salud/2-general/2-biomecanica.html>>
[Con acceso el 25-08-2012]
- [4] Salas Margarita (2002) La biomedicina del siglo XXI. ISBN 84-8102-310-8
- [5] Biomecánica ocupacional [En línea]
<http://www.mapfre.com/documentacion/publico/i18n/catalogo_imagenes/grupo.cmd?path=1010871>[Con acceso el 25-08-2012]
- [6] Tele operación [En línea]
<<http://www.tecnun.es/asignaturas/control1/proyectos/teleop2D/teleoperacion.htm>>
[Con acceso el 25-08-2012]
- [7] Huesos de la mano [En línea]
<<http://www.slideshare.net/grupoatlas/anatomia-grupo-atlas-mano-miembro-superior>>[Con acceso el 25-08-2012]
- [8] Norma de estándares de mano
Norma DIN 33-402, ISO, Alemania, 1987
- [9] Modelo de Hanavan de masas [En línea]
<<http://www.kwon3d.com/theory/bspeq/hanavan.html>> [Con acceso el 02-09-2012]
- [10] Overton, Parker. (1987) Glove U.S. Patente No. 4701963. [En línea]
<<http://www.freepatentsonline.com/4701963.html>> [Con acceso el 16-03-2012]
- [11] Neil A. Davidoff, AndrisFreivalds (1993), A graphic model of the human hand using CATIA, International Journal of Industrial Ergonomics, 12 (1993) 255-264, Elsevier
- [12] Laura Dipietro, Angelo M. Sabatini and Paolo Dario (2008), “A Survey of Glove-Based Systems and Their Applications”, IEEE Transactions on systems, MAN, and cybernetics-Part C: Applications and reviews, Vol. 38, NO. 4

- [13] Anthony L. Rosner, Ph.d., Scott C. Cuthbert, B.A. (2012), Applied kinesiology: Distinctions in its definition and interpretation, Elsevier
- [14] Yu Konishi (2011), Tactile simulation with Kinesiology tape alleviates muscle weakness attributable to attenuation of Ia afferents, Elsevier
- [15] M. Rouvarel (2011), Kinesiology study of different fingerings of the same piano score. About twenty cases. Elsevier, Chirugie de la Main,
- [16] Reinhard Gentner, Joseph Classen (2008), Development and evaluation of a low-cost sensor glove for assessment of human finger movements in neurophysiological settings, Elsevier, Journal of Neuroscience Methods
- [17] Paul C. LaStayo, PT, PhD, CHT, Michael J. Lee, PT, DPT, CHT(2006), The forearm Complex: Anatomy, Biomechanics and Clinical Considerations, Elsevier, Journal of Hand Therapy
- [18] Herwig Drobotz, MD, Adam L. Bryant, PhD, Tom Pokorny, MD, Spitaler, MD, Martin Leixnering, MD, Jesse B. Jupiter, MD (2006), Volar Fixed-Angle Plating of Distal Radius Extension Fractures: Influence of Plate Position on Secondary Loss of Reduction—A Biomechanic Study in a Cadaveric Model, Elsevier, The Journal of Hand Surgery
- [19] N.W. Williams (2005), The virtual hand: The Pulvertaft Prize Essay for 1996, Elsevier, The Journal of Hand Surgery: British & European Volume,
- [20] G. Di Pino, E. Guglielmelli, P.M. Rossini (2009), Neuroplasticity in amputees: Main implications on bidirectional interfacing of cybernetic hand prostheses, Elsevier, Progress in Neurobiology
- [21] Shigemichi Ohshima, Hiroki Yokota, Atsumi Ohtsuki (2012), Simulation model of underhand throw for cybernetic training, Elsevier, Procedia Engineering
- [22] M. C. Carrozza, G. Cappiello, S. Micera, B. B. E d i n, L. Beccai, C. Cipriani (2006), Design of a cybernetic hand for perception and action, Springer-Verlag, Biological Cybernetics
- [23] Dejan Popović, PhD, Aleksandar Stojanović, PT, Slobodanka Radosavljević, PT, Mirjana Popović, PhD, Stevan Jović, MD, PhD, Dragan Vulović, MD (2004), Clinical evaluation of the bionic glove, Elsevier, Archives of Physical Medicine and Rehabilitation

- [24] Arthur Prochazka, PhD, Michel Gauthier, BEng, Marguerite Wieler, BABSc, PT, Zoltan Kenwell, DiplEng (2004), The bionic glove: An electrical stimulator garment that provides controlled grasp and hand opening in quadriplegia, Elsevier, Archives of Physical Medicine and Rehabilitation
- [25] R.G.E. Clement, K.E. Bugler, C.W. Oliver, Bionic prosthetic hands (2011); A review of present technology and future aspirations, Elsevier, The Surgeon
- [26] Keith R. Godfrey (2002), The identifiability of parameters of models used in biomedicine, Elsevier, Mathematical Modelling
- [27] Tim W. Nattkemper (2004), Multivariate image analysis in biomedicine, Elsevier, Journal of Biomedical Informatics
- [28] Jiang Zainan, Lui Hong, Wang Jie, Huan Jiabin (2009), Virtual Reality-based Teleoperation with Robustness Against Modeling Errors, Elsevier, Chinese Journal of Aeronautics
- [29] Christian Smith, Mattias Bratt, Henrik I. Christensen (2008), Teleoperation for a ball-catching task with significant dynamics, Elsevier, Neural Networks
- [30] Bárbara Álvarez, Andrés Iborra, Alejandro Alonso, Juan Antonio de la Puente (2001), Reference architecture for robot teleoperation: development details and practical use, Elsevier, Control Engineering Practice
- [31] Edgar Portilla Flores, Roberto Piña Quintero, Oscar Avilés Sánchez, Paola Niño Suárez, María Molina Vilchis (2011), Diseño de mecanismo actuador de un dedo robótico antropomórfico, SciELO
- [32] Z. Taha*, R. Brown* and D. Wright† (1997), Modelling and simulation of the hand grasping using neural networks, Med. Eng. Phys. Vol. 19, No. 6, pp. 536–538, 1997 IPEM, Elsevier Science Ltd 1350–4533/97
- [33] A.R. Al-Ali, M.A. Jarrah, R. Dhaouadi (2005), Microcontroller-operated anthropomorphic manipulator with haptic feedback, Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, Elsevier
- [34] Reinhard Gentner, Joseph Classena (2008), Development and evaluation of a low-cost sensor glove for assessment of human finger movements in neurophysiological settings, Journal of Neuroscience Methods, Elsevier
- [35] Yuichi Kurita, Yasuhiro Ono, Atsutoshi Ikeda, Tsukasa Ogasawara (2010), Human-sized anthropomorphic robot hand with detachable mechanism at the wrist, Mechanism and Machine Theory, Elsevier

- [36] A. Cavallo, G. De Maria, C. Natale, S. Pirozzi (2009), Optoelectronic joint angular sensor for robotic fingers, *Sensors and Actuators A: Physical*, Elsevier
- [37] Jaime Leybón Ibarra, María del Rocío Ramírez Barba, Verónica Taboada Picazo (2006), Sensor Foto-Eléctrico Aplicado al Movimiento de los Dedos de las Manos, *Photo-Electric Sensor Applied to Hand Fingers Movement*, *Computación y Sistemas* Vol. 10 No. 1, pp57-68, ISSN 1405-5546
- [38] Andrés Felipe Ruíz Olaya. Sistema Robótico Multimodal para Análisis y Estudios en Biomecánica, Movimiento Humano y Control Neuromotor. Universidad Carlos III de Madrid. Departamento Ingeniería de Sistemas y Automática. 2008.
- [39] Lila Esther Silgado Villadiego (2012), La prótesis hace posible el movimiento de la mano, DISNNET Red Digital de Noticias, <http://discapacidadcolombia.com/modules.php?name=News&file=article&sid=1421> [Con acceso el 13-03-2012]
- [40] Joseph C. Chan, Yunhui Liu (1999), Dynamic simulation of multi-fingered robot hands based on a unified model, *Robotics and Autonomous Systems*, Elsevier
- [41] Antonio Chella, Haris Džindo, Ignazio Infantino, Irene Macaluso (2004), A posture sequence learning system for an anthropomorphic robotic hand, *Robotics and Autonomous Systems*, Elsevier
- [42] Matthew Wagner, John Morehouse, Shreyes Melkote (2008), "Prediction of part orientation error tolerance of a robotic gripper", *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, Elsevier
- [43] A. Velásquez Sánchez, E. Merchán Cruz, L. Hernández Gómez, G. Urriolagoitia Calderón (2007), Rango de movilidad y función descriptiva del dedo índice, *Redalyc, Científica*
- [44] Giuseppe Carbone, Antonio González (2010), A numerical simulation of the grasp operation by LARM Hand IV: A three finger robotic hand, *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, Elsevier
- [45] Dinámica multicuerpo [En línea] <<http://www.mscsoftware.com/Products/CAE-Tools/Adams.aspx>> [Con acceso el 09-10-2012]
- [46] FEA [En línea] <<http://www.siliconfareast.com/fea.htm>> [Con acceso el 09-10-2012]

[47] Grados de libertad [En línea]

<http://books.google.com.co/books?id=JsFvOy1w-1QC&pg=PT48&lpg=PT48&dq=dof+degree+of+freedom&source=bl&ots=vNxuo6d2l5&sig=uxtMI_9LHTZT5z-hl615ca2DslQ&hl=es&sa=X&ei=oVFwUIOaK-zh0wG4uYCgAw&ved=0CFwQ6AEwCA> [Con acceso el 06-10-2012]

[48] CATIA [En línea]

<<http://repositorio.utn.edu.ec/bitstream/123456789/629/2/CAPITULO%20II.pdf.>>
[Con acceso el 15-05-2012]

[49] Software CATIA [En línea]

<<http://www.3ds.com/products/catia/>> [Con acceso el 26-08-2012]

[50] ADAMS [En línea]

<<http://www.mscsoftware.com/Products/CAE-Tools/Adams.aspx>>
[Con acceso el 26-08-2012]

[51] AnthroTronix. "AcceleGlove" [En línea]

<http://www.acceleglove.com/default.asp>
[Con acceso el 12-03-2012]

[52] Microsoft Excel [En línea]

<<http://office.microsoft.com/es-es/excel/caracteristicas-y-ventajas-de-excel-2010-HA101806958.aspx>> [Con acceso el 12-09-2012]

[53] MATLAB [En línea]

<<http://www.mathworks.com/products/matlab/>>
[Con acceso el 26-08-2012]

[54] Software MATLAB [En línea]

<<http://www.catalogodesoftware.com/producto-matlab%C2%AE-simulink%C2%AE-215>>
[Con acceso el 26-08-2012]

[55] Katsukiho Ogata, Ingeniería de control moderno, Editorial Pearson, ISBN 0-13-227307-1

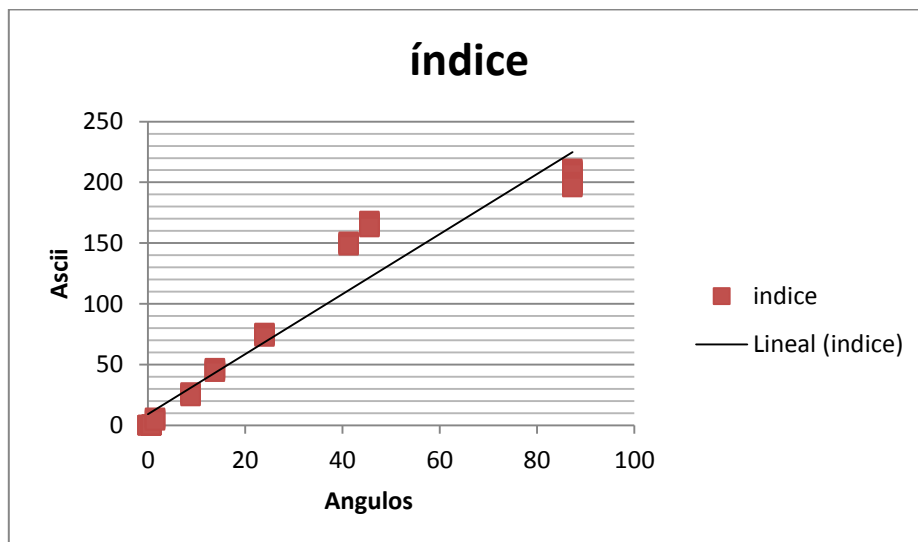
ANEXO 1

Tabla de recopilación de datos

A continuación se relacionan las tablas de datos con sus gráficas correspondientes referentes a los movimientos de cierre y apertura de la mano utilizando el guante Acceleglove.

		ÍNDICE		
Ángulo 1-2	Ángulo 2-3	x	y	z
0	0	104	0	152
0	0	103	0	151
0	0	102	0	150
0	0	101	0	149
0,7	9,6	97	0	131
0,7	9,6	96	0	130
0,7	9,6	95	0	129
0,7	9,6	94	0	128
0,7	11,9	93	0	127
0,7	11,9	92	0	126
0,7	11,9	91	0	125
0,7	11,9	90	0	124
0,7	11,9	89	0	123
0,7	11,9	88	0	120
0,7	11,9	87	0	117
0,7	11,9	86	0	116
0,7	11,9	85	0	115
0,7	11,9	84	0	114
1,5	14,4	75	6	97
1,5	14,4	74	5	96
1,5	14,4	73	4	94
8,8	19,4	64	27	78
8,8	19,4	63	26	77
8,8	19,4	62	25	76
8,8	19,4	61	24	75
13,8	21,6	57	47	65
13,8	21,6	56	46	64
13,8	21,6	55	45	63
13,8	21,6	54	44	62
24	27,6	52	76	52

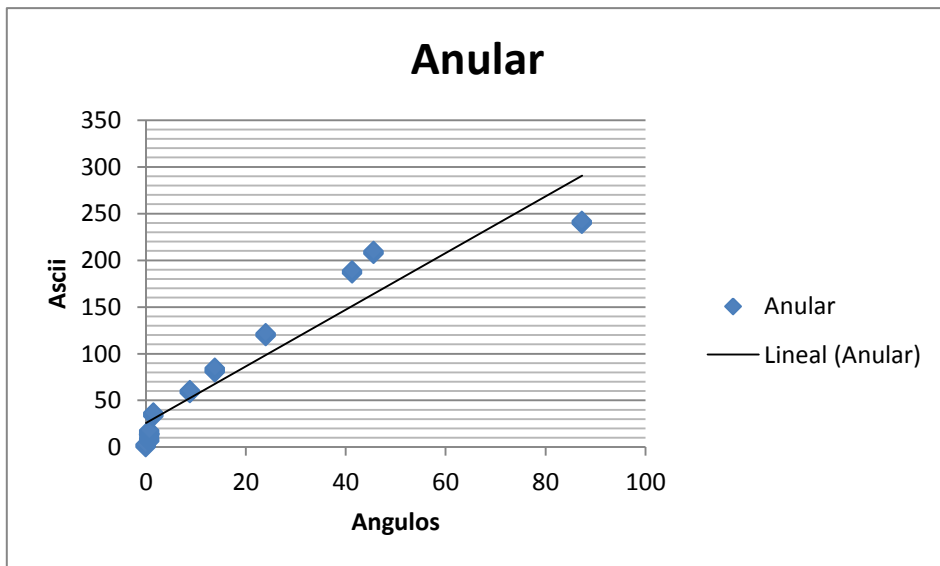
24	27,6	51	75	51
24	27,6	50	74	50
24	27,6	49	73	49
41,3	30	53	151	53
41,3	30	52	150	52
41,3	30	51	149	51
41,3	30	50	148	50
45,6	45,3	43	168	69
45,6	45,3	42	167	68
45,6	45,3	41	166	67
45,6	45,3	40	165	66
45,6	45,3	39	164	65
45,6	45,3	38	163	65
87,3	85,7	57	211	102
87,3	85,7	56	210	101
87,3	85,7	55	209	100
87,3	85,7	54	208	99
87,3	85,7	53	207	98
87,3	85,7	57	200	87
87,3	85,7	56	199	86
87,3	85,7	55	198	85
87,3	85,7	54	197	84
87,3	85,7	53	196	81



R²=0,930986661

		ANULAR		
Ángulo 1-2	Ángulos 2-3	x	y	z
0	0	79	0	130
0	0	80	1	129
0	0	81	2	128
0	0	82	3	127
0,7	9,6	84	6	104
0,7	9,6	85	7	103
0,7	9,6	86	8	102
0,7	9,6	85	9	101
0,7	9,6	84	10	100
0,7	11,9	83	12	95
0,7	11,9	83	13	94
0,7	11,9	86	14	93
0,7	11,9	85	14	92
0,7	11,9	84	14	91
0,7	11,9	83	14	90
0,7	11,9	83	14	86
0,7	11,9	84	15	85
0,7	11,9	80	16	84
0,7	11,9	79	17	83
0,7	11,9	78	18	82
1,5	14,4	78	33	66
1,5	14,4	77	34	65
1,5	14,4	76	35	64
1,5	14,4	75	36	63
1,5	14,4	74	37	62
8,8	19,4	70	58	51
8,8	19,4	69	59	50
8,8	19,4	68	60	49
8,8	19,4	67	61	48
13,8	21,6	69	80	40
13,8	21,6	68	81	39
13,8	21,6	67	82	38
13,8	21,6	66	83	37
13,8	21,6	65	84	36
13,8	21,6	64	85	35
24	27,6	72	119	32
24	27,6	71	120	31
24	27,6	70	121	30

24	27,6	70	122	29
41,3	30	90	186	44
41,3	30	89	187	45
41,3	30	88	188	46
41,3	30	86	189	47
45,6	45,3	75	207	67
45,6	45,3	74	208	68
45,6	45,3	73	209	69
45,6	45,3	72	210	70
87,3	85,7	90	239	112
87,3	85,7	91	240	113
87,3	85,7	92	241	114
87,3	85,7	93	242	115

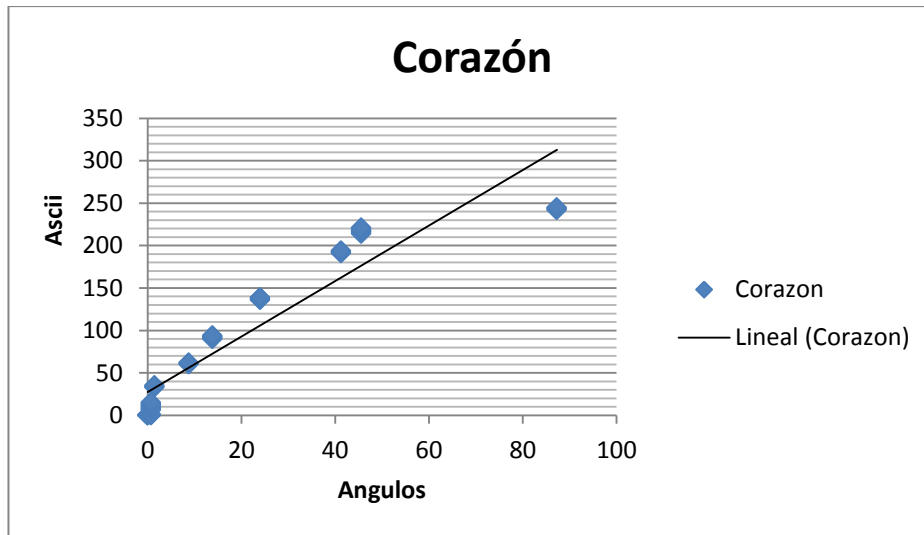


$R^2=0,95972988$

		CORAZÓN		
Ángulo 1-2	Ángulo 2-3	x	y	z
0	0	108	0	140
0	0	109	0	139
0	0	110	0	138
0	0	111	0	137
0,7	9,6	126	0	101

0,7	9,6	127	0	100
0,7	9,6	128	1	99
0,7	9,6	129	1	98
0,7	11,9	126	6	91
0,7	11,9	127	7	90
0,7	11,9	128	8	89
0,7	11,9	129	9	88
0,7	11,9	130	10	87
0,7	11,9	128	11	81
0,7	11,9	129	12	80
0,7	11,9	130	13	79
0,7	11,9	131	14	78
0,7	11,9	132	15	77
1,5	14,4	139	33	59
1,5	14,4	140	34	58
1,5	14,4	141	35	57
8,8	19,4	144	60	41
8,8	19,4	145	61	40
8,8	19,4	146	62	39
13,8	21,6	151	90	32
13,8	21,6	152	91	31
13,8	21,6	153	92	30
13,8	21,6	154	93	29
13,8	21,6	155	94	29
24	27,6	150	136	31
24	27,6	151	137	30
24	27,6	152	138	28
24	27,6	155	139	27
41,3	30	158	191	54
41,3	30	159	192	55
41,3	30	160	193	56
41,3	30	161	194	57
45,6	45,3	133	214	67
45,6	45,3	134	215	67
45,6	45,3	132	216	68
45,6	45,3	133	217	68
45,6	45,3	134	218	69
45,6	45,3	135	219	69
45,6	45,3	134	220	70
45,6	45,3	133	221	70

87,3	85,7	130	242	129
87,3	85,7	129	243	130
87,3	85,7	128	244	131
87,3	85,7	127	245	132

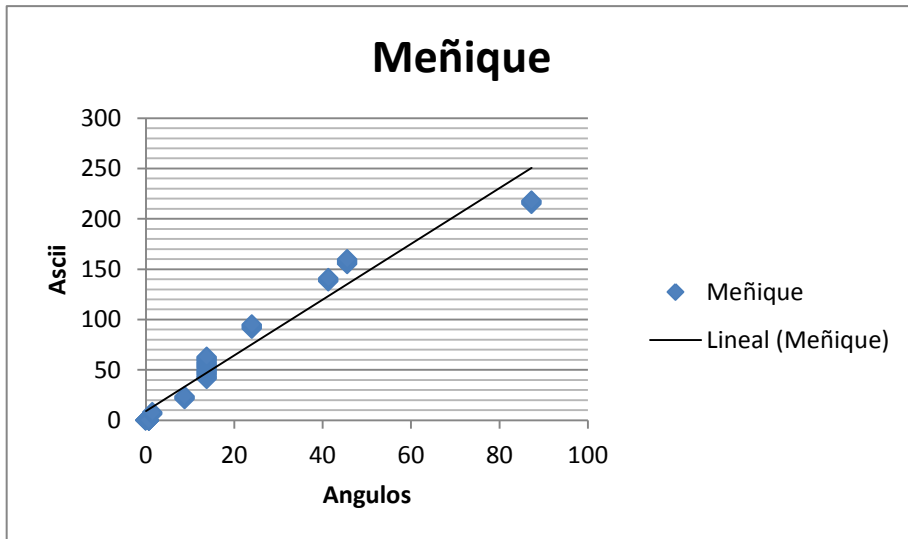


$R^2=0,9481333$

		MEÑIQUE		
Ángulo 1-2	Ángulos 2-3	x	Y	Z
0	0	91	0	157
0	0	90	0	156
0	0	89	0	155
0	0	89	0	154
0,7	9,6	89	0	134
0,7	9,6	88	0	133
0,7	9,6	87	0	132
0,7	9,6	87	0	131
0,7	9,6	88	0	130
0,7	11,9	86	0	125
0,7	11,9	85	0	124
0,7	11,9	84	0	123
0,7	11,9	83	0	122
0,7	11,9	83	0	121
0,7	11,9	83	0	120

0,7	11,9	84	0	117
0,7	11,9	83	0	116
0,7	11,9	82	0	115
0,7	11,9	82	0	114
1,5	14,4	81	6	102
1,5	14,4	80	7	101
1,5	14,4	80	8	100
8,8	19,4	79	21	81
8,8	19,4	78	22	80
8,8	19,4	77	23	79
8,8	19,4	77	24	78
13,8	21,6	78	41	60
13,8	21,6	79	42	59
13,8	21,6	80	43	58
13,8	21,6	81	44	57
13,8	21,6	82	45	56
13,8	21,6	83	46	55
13,8	21,6	84	47	54
13,8	21,6	85	48	53
13,8	21,6	86	49	52
13,8	21,6	87	50	51
13,8	21,6	88	51	50
13,8	21,6	78	52	49
13,8	21,6	79	53	48
13,8	21,6	80	54	47
13,8	21,6	81	55	46
13,8	21,6	82	56	45
13,8	21,6	83	57	44
13,8	21,6	84	58	43
13,8	21,6	85	59	42
13,8	21,6	86	60	41
13,8	21,6	87	61	40
13,8	21,6	88	62	39
13,8	21,6	89	63	38
24	27,6	83	91	37
24	27,6	82	92	36
24	27,6	81	93	35
24	27,6	80	94	34
24	27,6	80	95	34
41,3	30	89	138	33

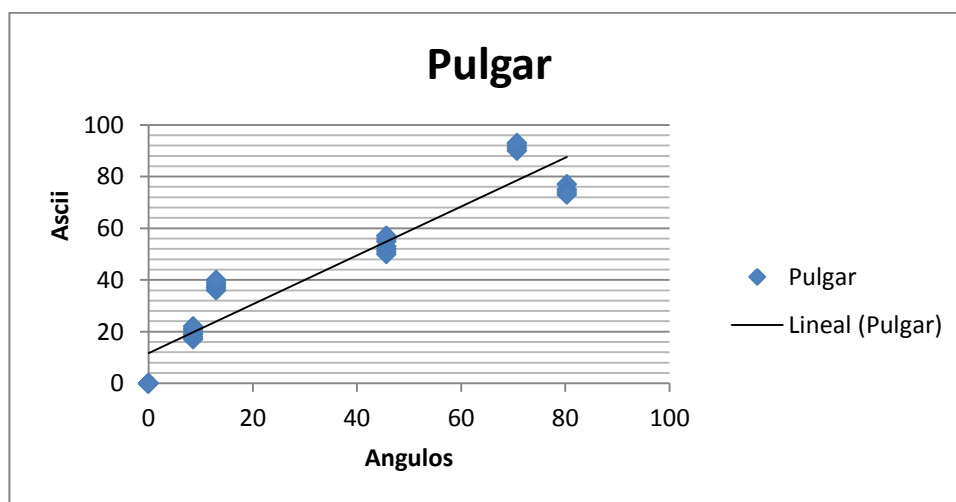
41,3	30	90	139	32
41,3	30	91	140	31
41,3	30	92	141	30
45,6	45,3	84	155	38
45,6	45,3	83	156	39
45,6	45,3	82	157	40
45,6	45,3	81	158	41
45,6	45,3	80	159	42
45,6	45,3	82	160	43
87,3	85,7	107	215	72
87,3	85,7	108	216	73
87,3	85,7	109	217	74
87,3	85,7	108	218	75



$R^2=0,97187708$

		pulgar		
A-B	B-C	x	y	z
0	0	97	0	152
0	0	96	0	151
0	0	95	0	150
0	0	94	0	149
0	0	93	0	148
8,6	5,3	97	17	90
8,6	5,3	96	18	95

8,6	5,3	95	19	86
8,6	5,3	94	20	85
8,6	5,3	93	21	84
8,6	5,3	92	22	83
13	18	101	36	65
13	18	102	37	64
13	18	103	38	63
13	18	104	39	62
13	18	105	40	61
45,7	24,7	102	50	53
45,7	24,7	103	51	52
45,7	24,7	104	52	51
45,7	24,7	105	53	50
45,7	24,7	106	55	49
45,7	24,7	107	56	47
45,7	24,7	108	57	45
70,7	33,4	106	90	30
70,7	33,4	107	91	31
70,7	33,4	108	92	32
70,7	33,4	109	93	33
80,3	48,7	46	77	66
80,3	48,7	47	75	65
80,3	48,7	48	74	64
80,3	48,7	49	73	63



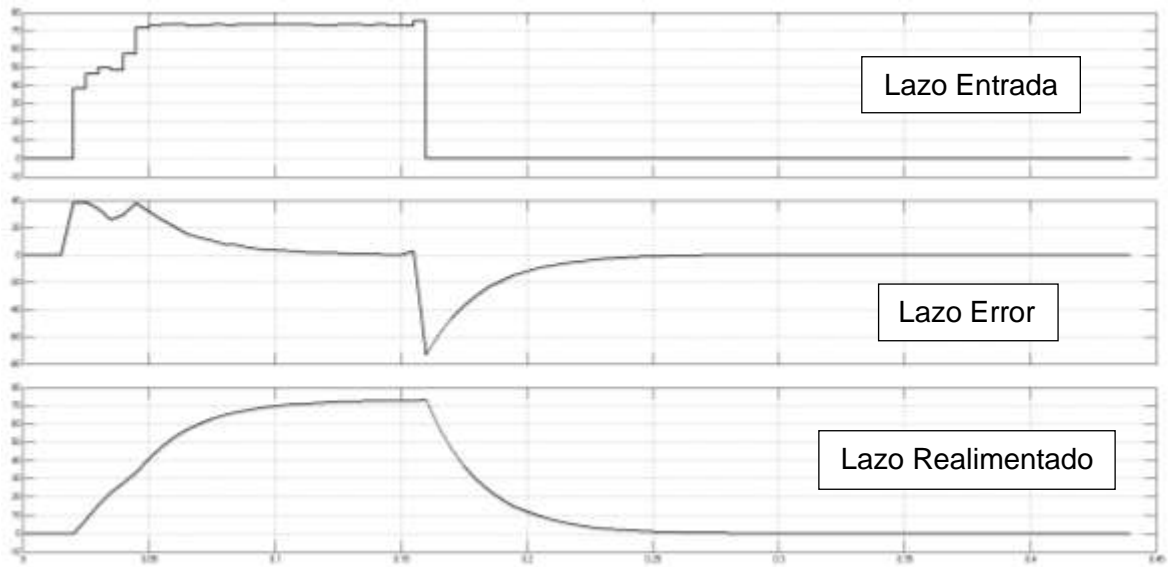
$R^2=0,926648$

ANEXO 2

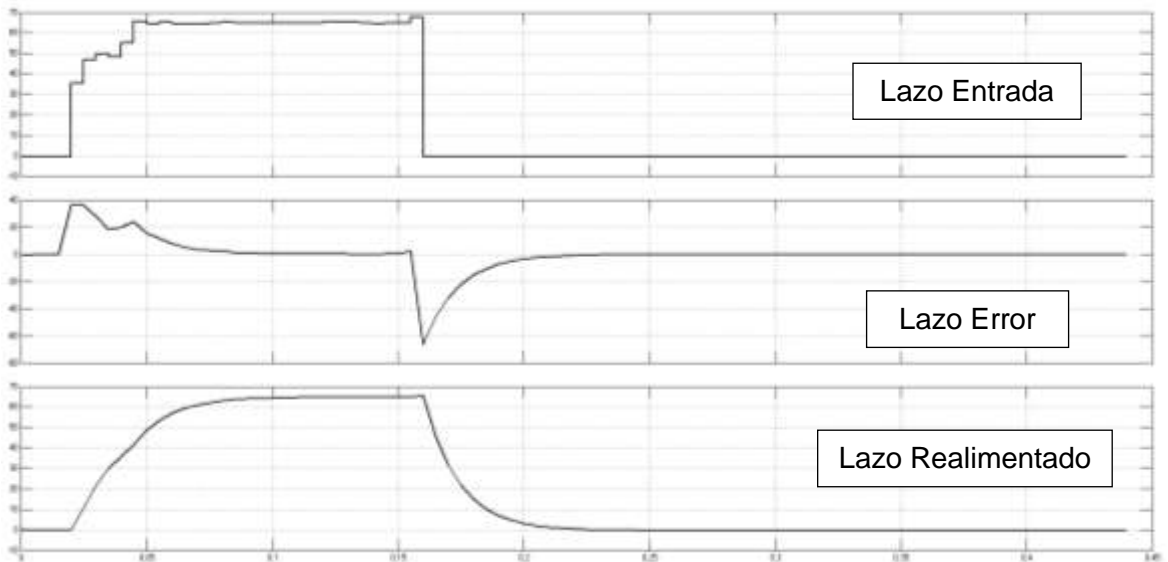
Gráficas de Resultados

Los datos obtenidos a continuación son de movimientos de apertura y cierre de la mano, en cada una de las articulaciones donde se generó un grado de libertad.

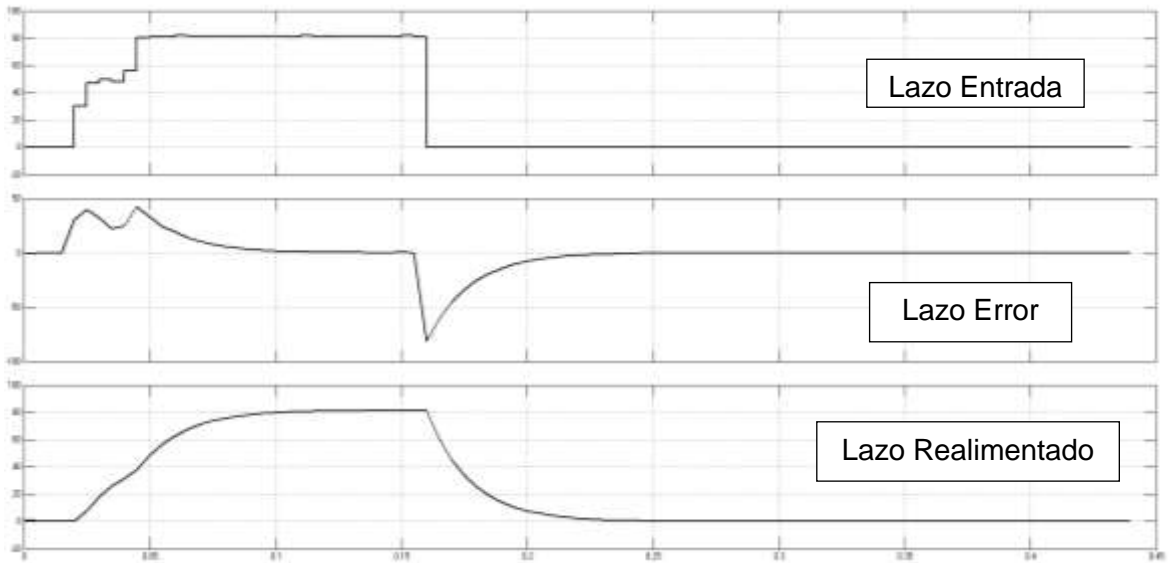
Anular



Corazón



Anular



Pulgar

