



**ESPE**  
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA



# **DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA**

## **TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO EN MECATRÓNICA**

**AUTORES:** EDISSON ROBERTO ESCOBAR SAILEMA  
DAVID ALEJANDRO ZURITA ARBOLEDA

**DIRECTOR:** ING. MARCO SINGAÑA

Latacunga, Febrero del 2017



**TEMA:  
“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO  
DE MANO ROBÓTICA CONTROLADO MEDIANTE  
ONDAS CEREBRALES”**

# DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO



# SISTEMAS ANTROPOMÓRFICOS

## Fisiología de la mano humana



## Referencia entre sus Falanges

$$fp = fd + fm \quad Mtc = fp + fm$$

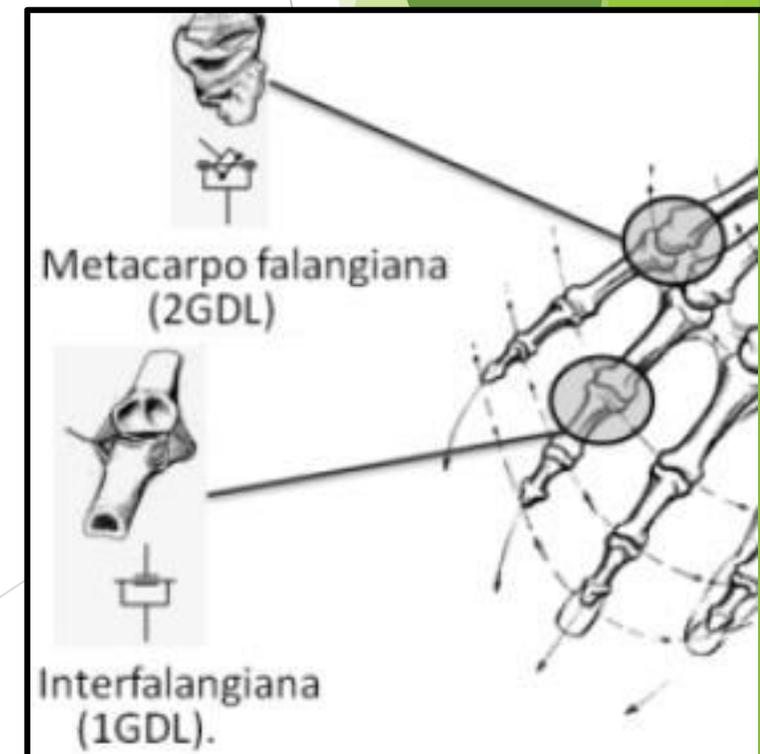
$fp$  = Longitud de la falange proximal

$fd$  = Longitud de la falange distal

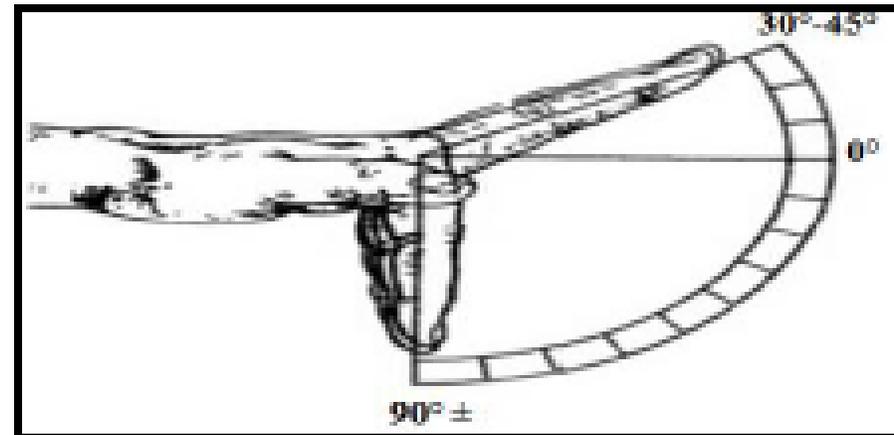
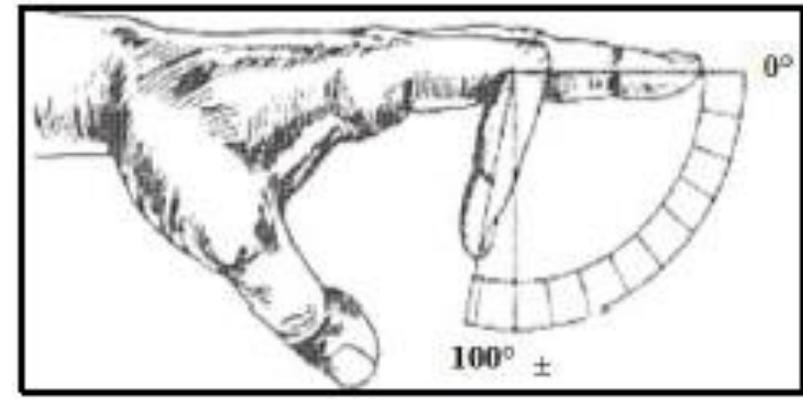
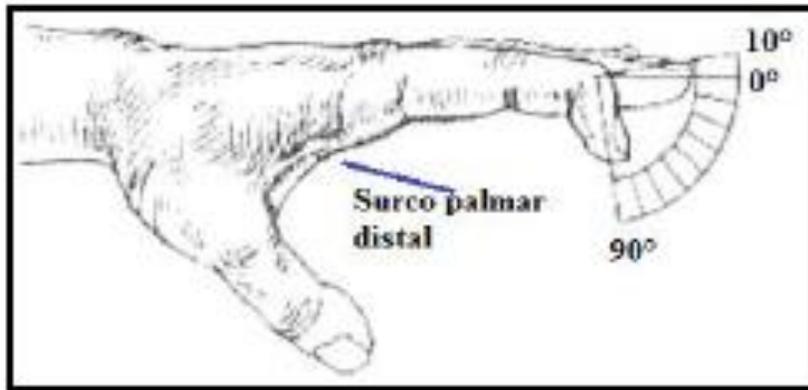
$fm$  = Longitud de la falange medial

Mtc = Metacarpofalángica

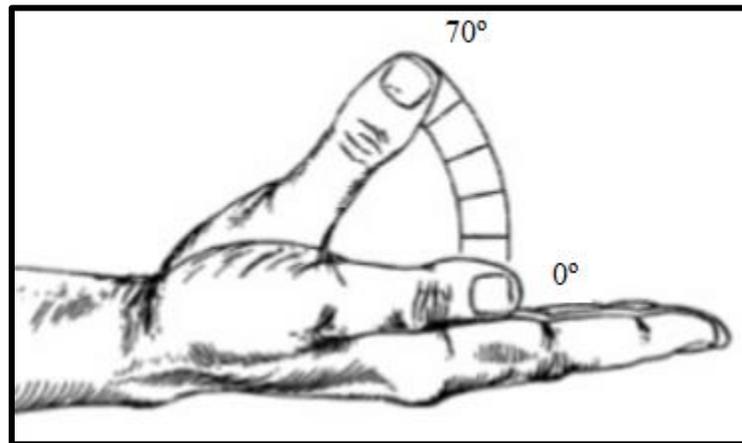
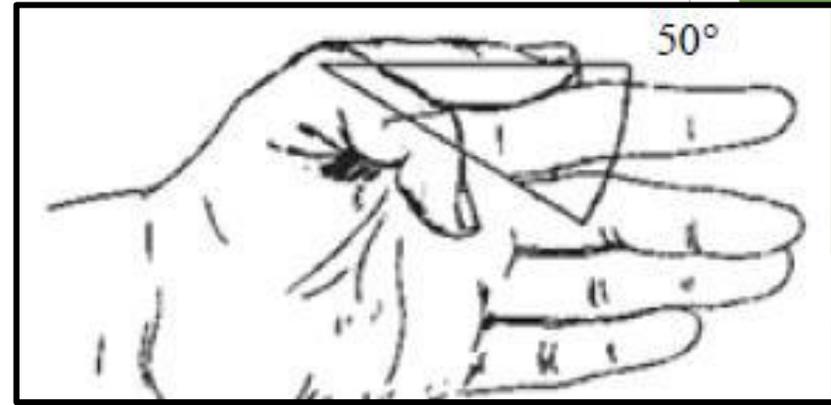
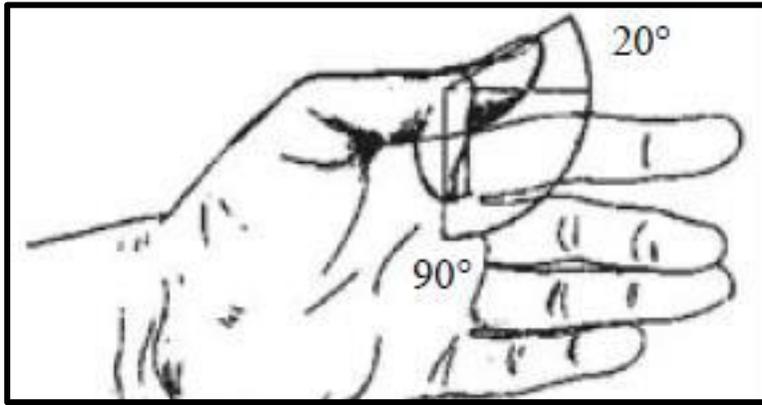
## Grados de libertad en las articulaciones



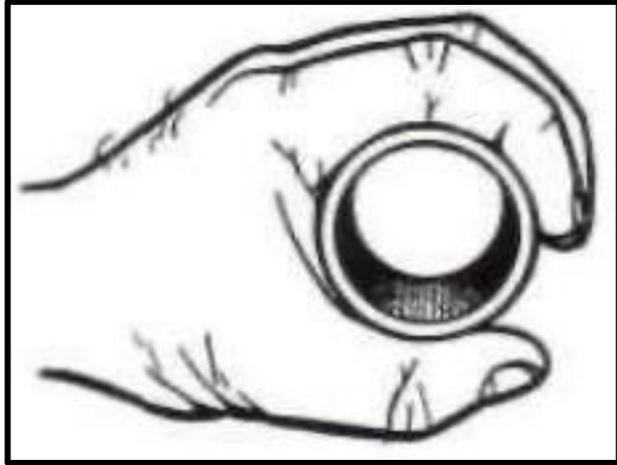
# Ángulos limitantes para dedos meñique, anular, medio e índice



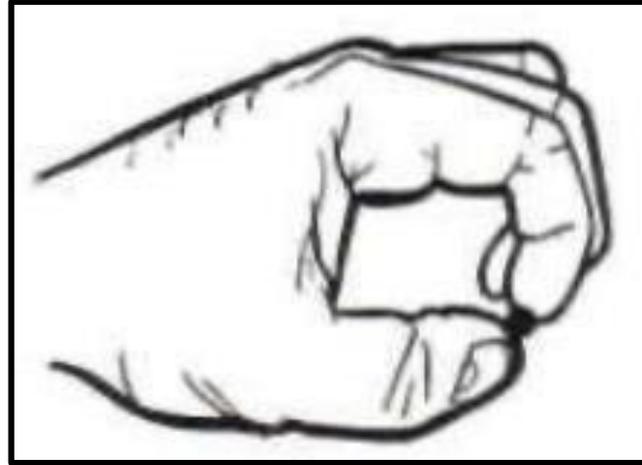
# Ángulos limitantes para dedo pulgar



# Movimientos



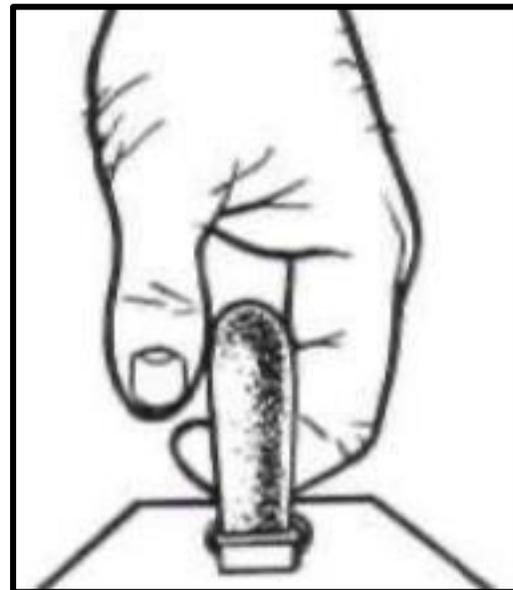
*Movimiento cilíndrico*



*Movimiento punta*



*Movimiento esférico*

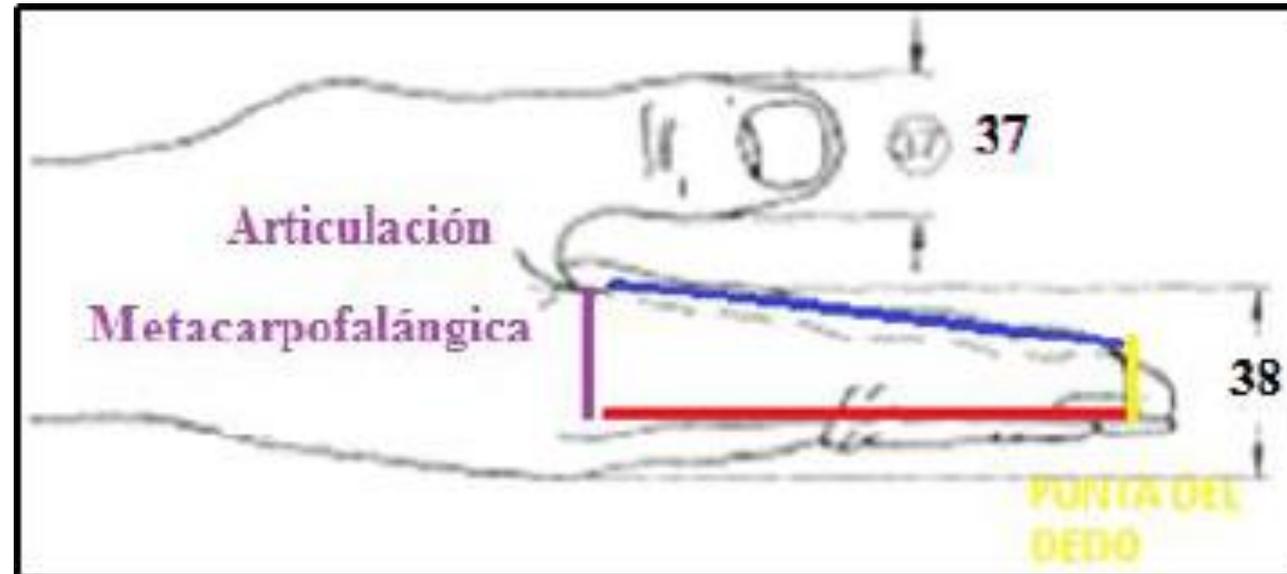


*Movimiento gancho*



*Movimiento lateral*

# Relación entre articulación metacarpofalángica y punta de dedo

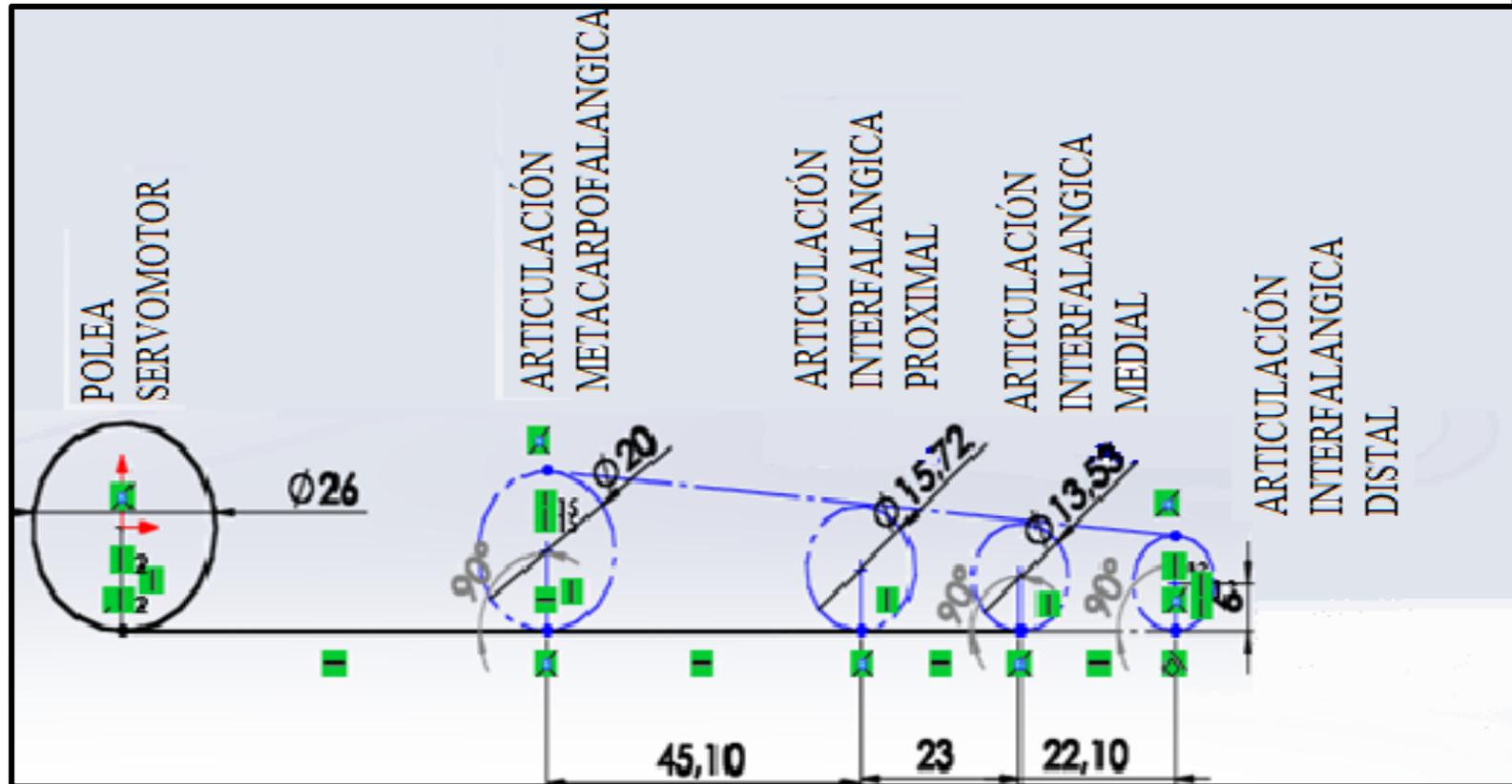


## Tabla de longitud y radio de falanges

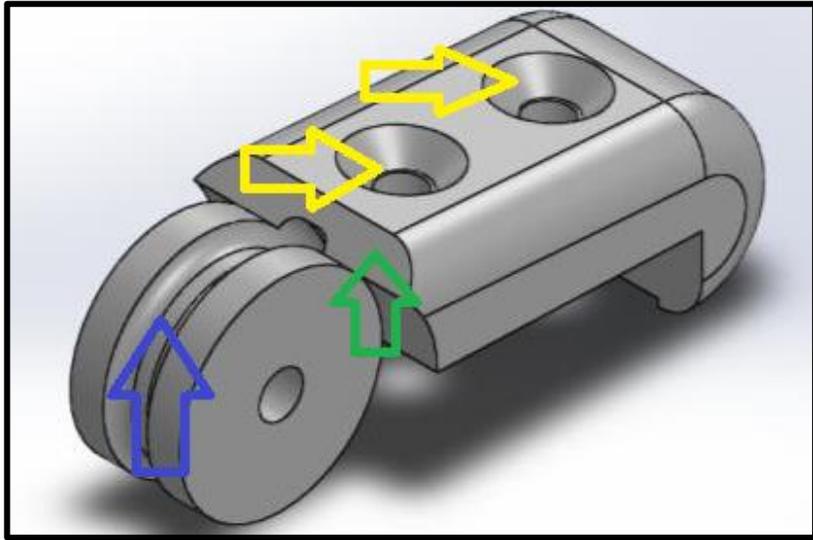
### Cálculo de articulaciones en base a la longitud de falanges

	Meñique (mm)	Anular (mm)	Medio (mm)	Índice (mm)
Pendiente	-0,048	-0,041	-0,039	-0,044
Altura de punta del dedo(APD)	12	12	12	12
Radio de APD	6	6	6	6
Falange distal (FD)	22.1	24.2	24.9	23.2
Articulación Inter falángica distal (IFD)	13,530	13,492	13,474	13,505
Radio de IFD	6.765	6,746	6,737	6,753
Falange medial (FM)	23	27.6	29.4	25.5
Articulación Inter falángica proximal(IFP)	15,715	15,754	15,766	15,737
Radio de IFP	7,857	7,877	7,833	7,869
Falange proximal (FP)	45,1	51,8	54,3	48,7
Articulación metacarpofalángica (MCF)	20	20	20	20
Radio de MCF	10	10	10	10
Longitud total	90,2	103,6	108,6	97,4
Metacarpo	68,1	79,4	83,7	74,2

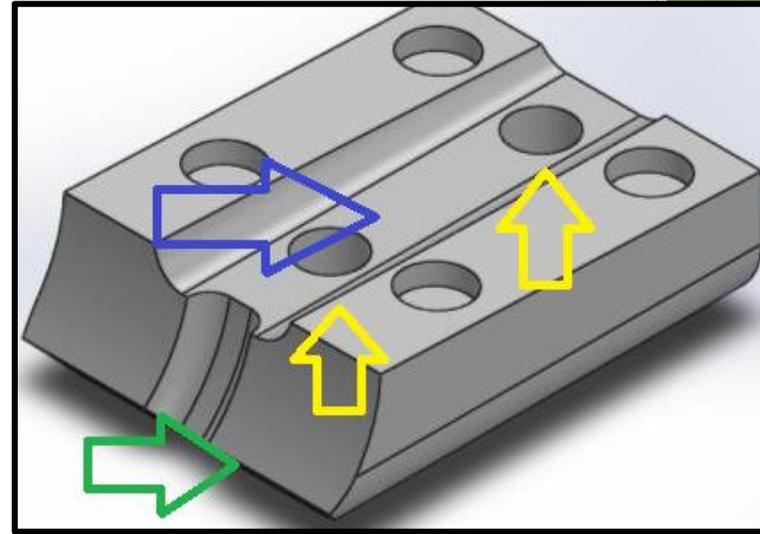
# Esquema de diseño con longitudes y radios modelo



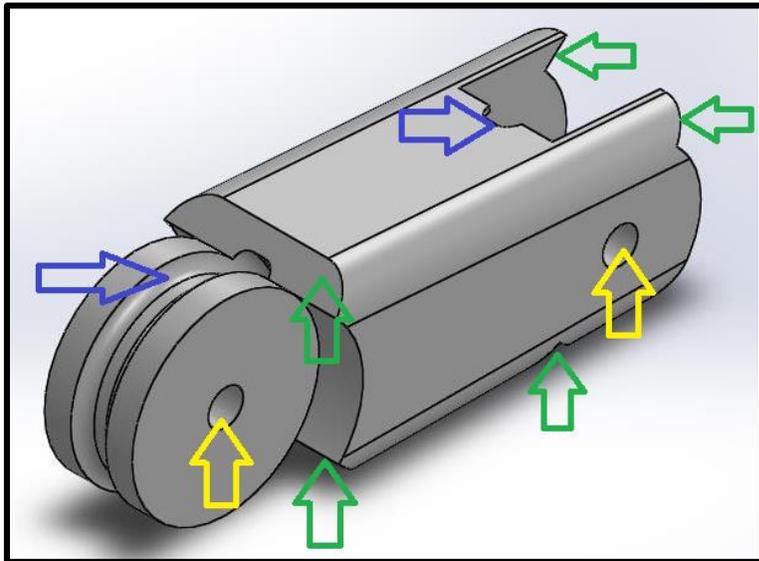
# DISEÑO DE FALANGES



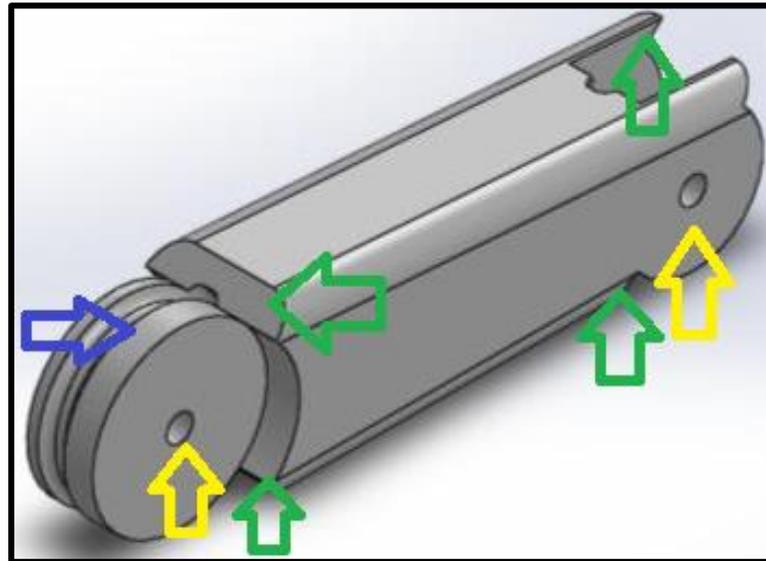
*Falange distal*



*Cubierta palmar falange distal*



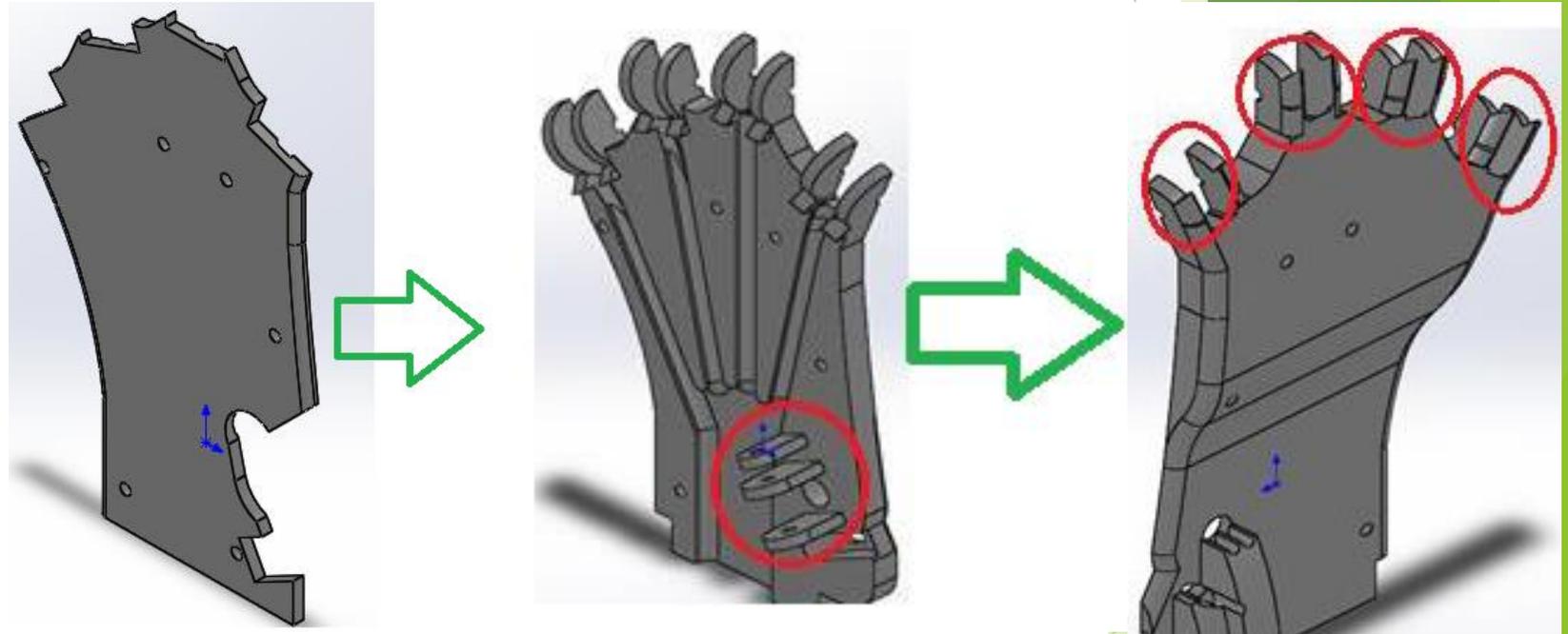
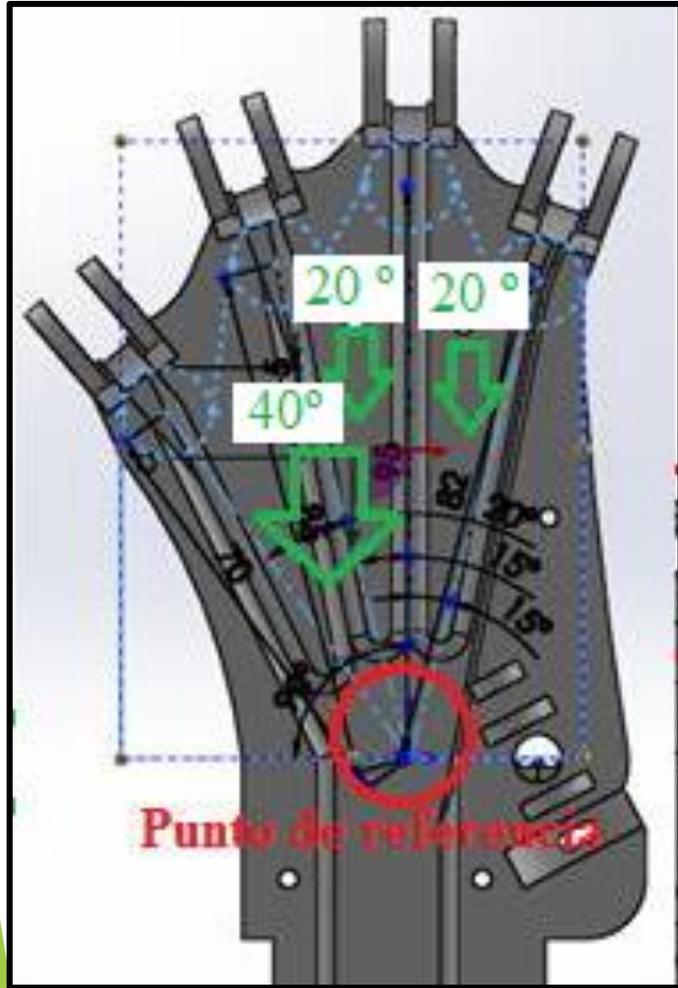
*Falange medial*



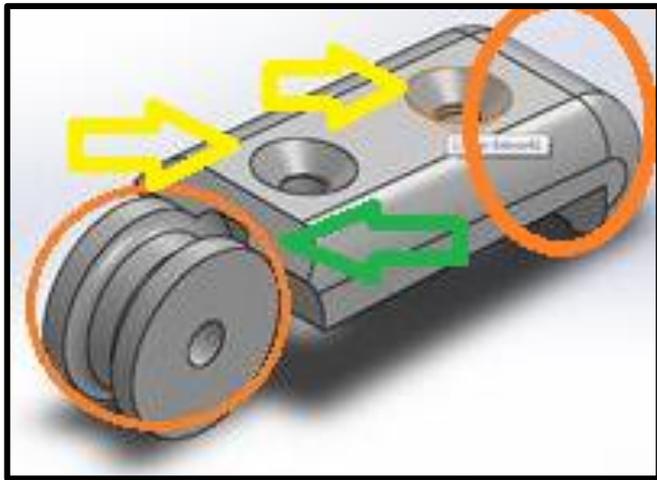
*Falange proximal*

# DISEÑO DE METACARPO

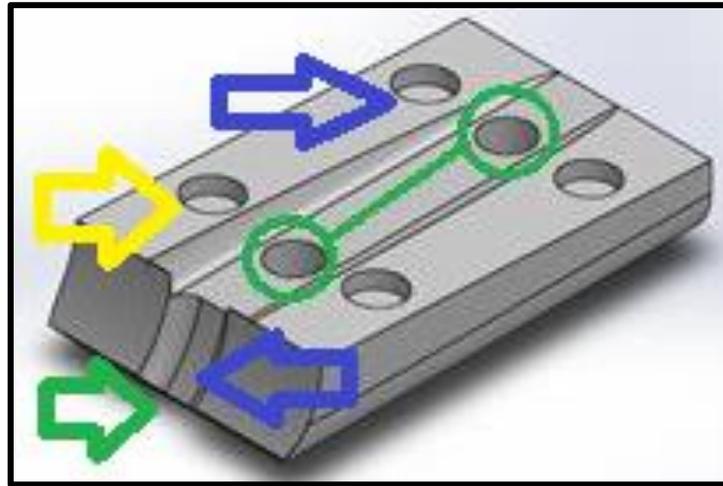
# Ángulos de aducción designados para el diseño



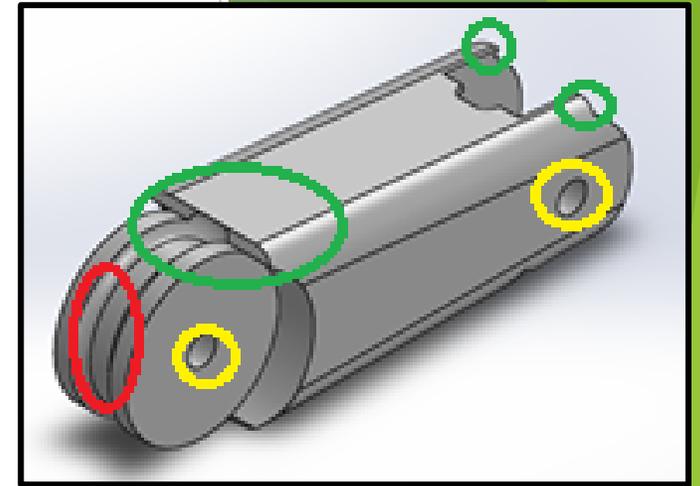
# DISEÑO DEL PULGAR



*Falange distal*

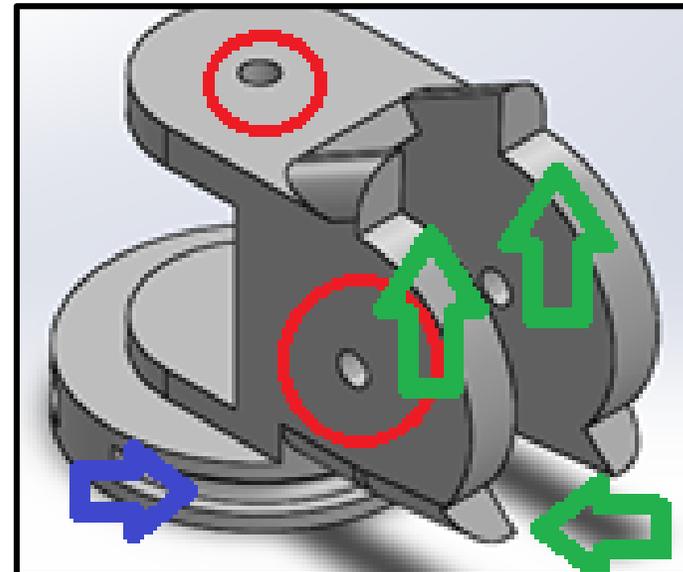
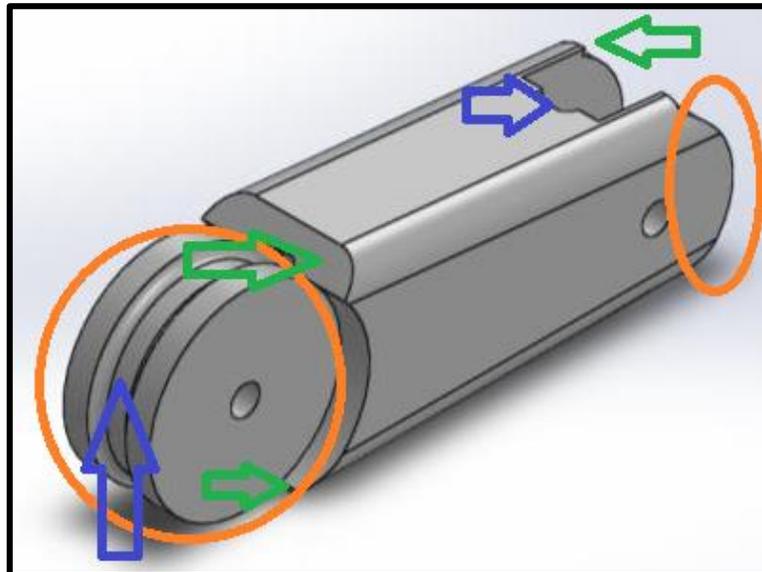


*Cubierta palmar falange distal*



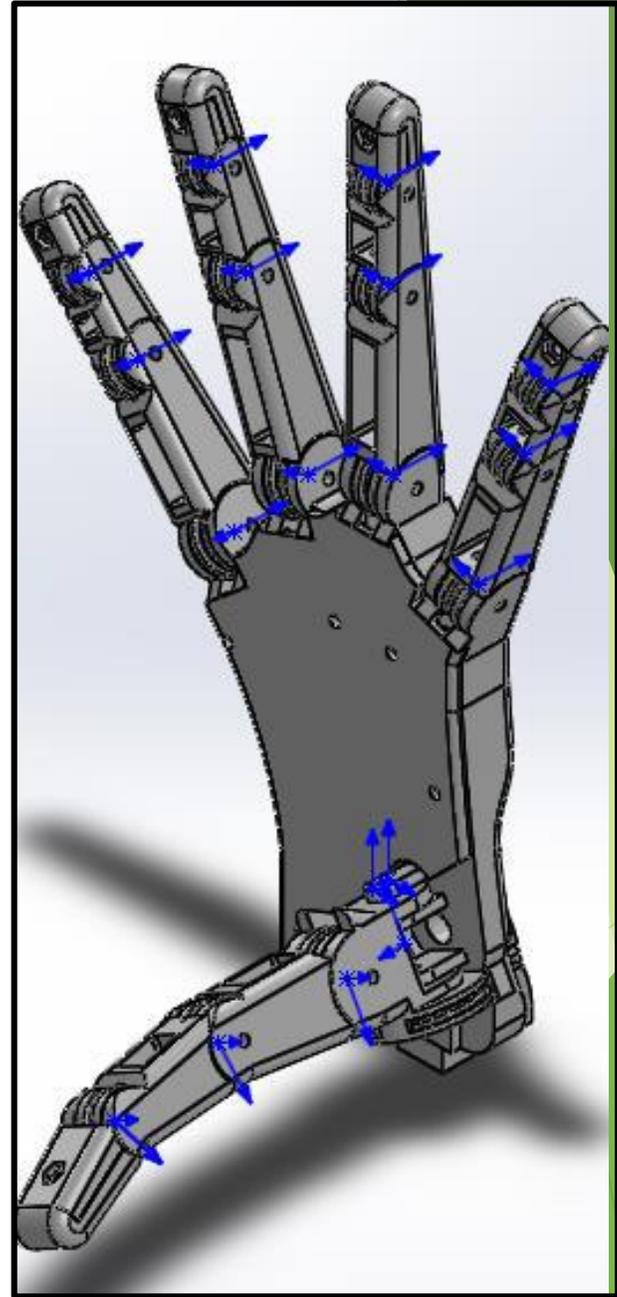
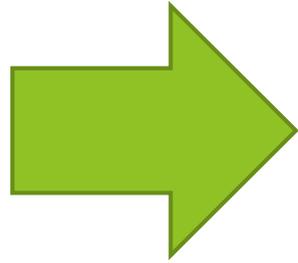
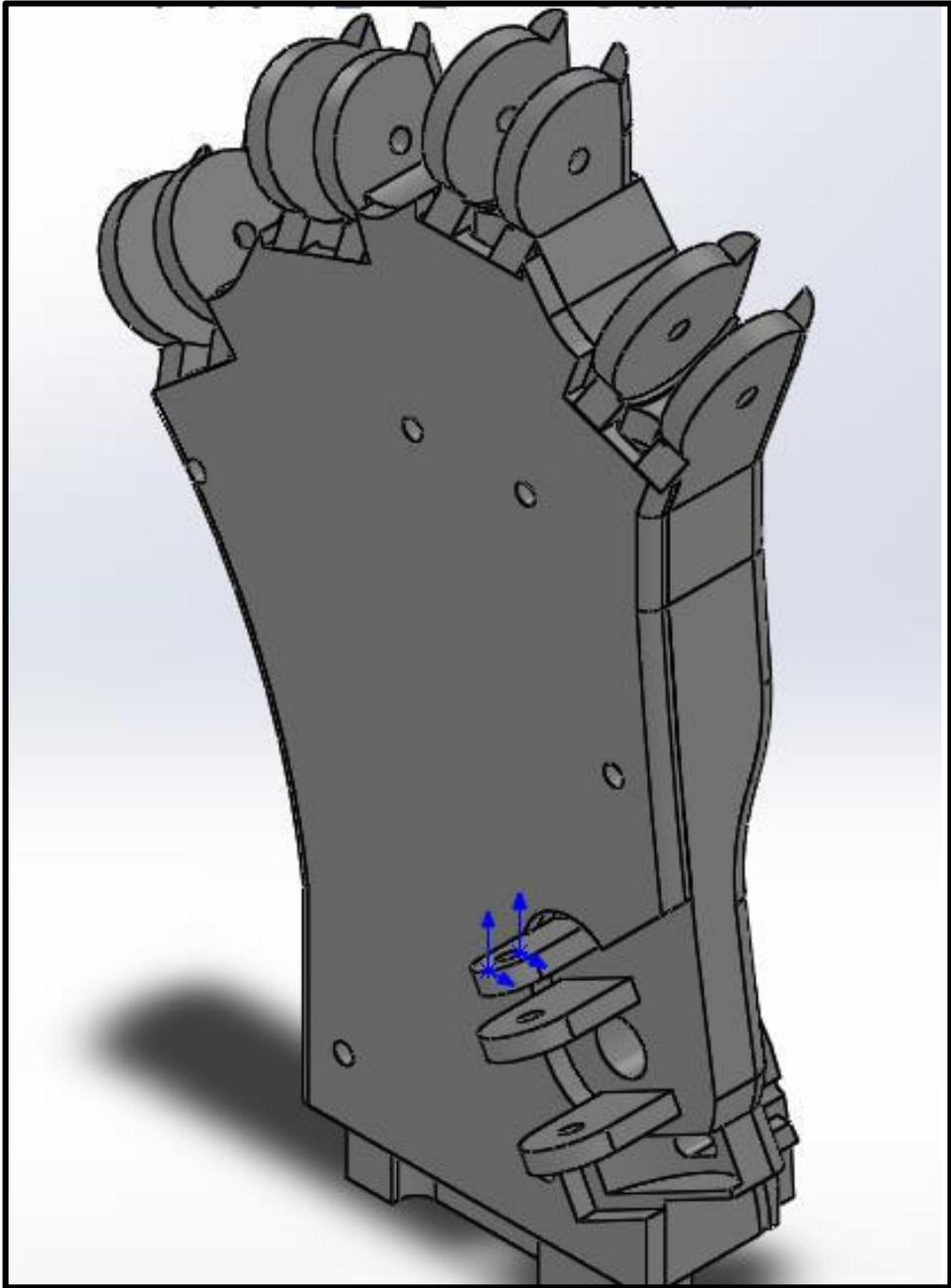
*Falange proximal*

*Metacarpo*



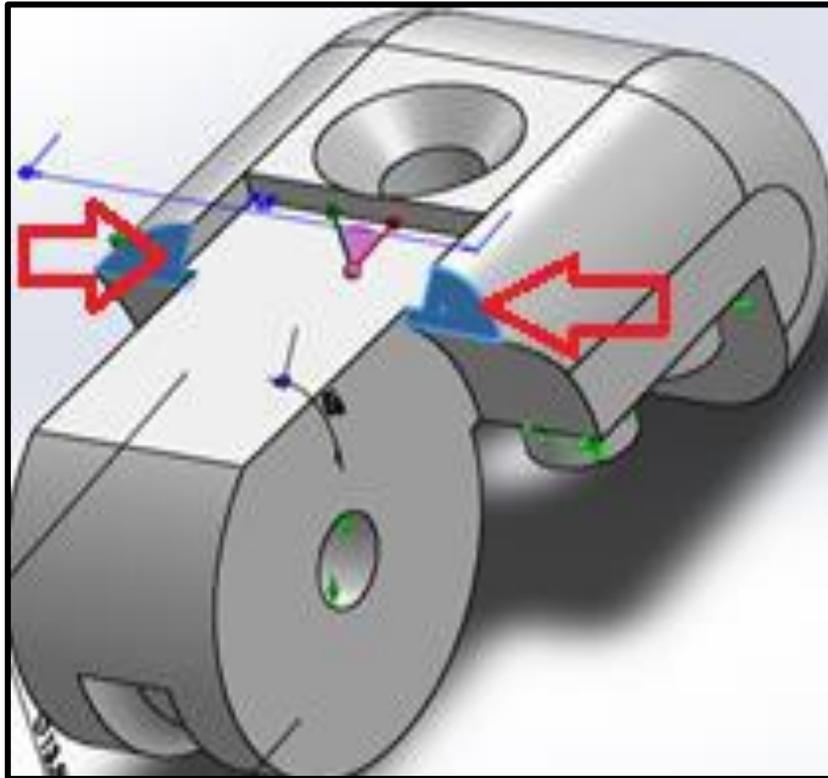
*Articulación  
carpometacarpiana*

# ENSAMBLAJE TOTAL



# ANÁLISIS DE ESFUERZOS

# Cálculo de áreas en zonas vulnerables



Las propiedades de sección de la cara seleccionada de Falange Dital Menq

Área = 3.93 milímetros<sup>2</sup> → **Área = 3.93 mm<sup>2</sup>**

Centro de gravedad con relación al origen del sistema de coordenadas de u

X = 4.99  
Y = 5.38  
Z = -5.92

Momentos de inercia, del área, en el centro de gravedad ( milímetros<sup>4</sup> )

Ixx = 0.96	Iyy = 0.20	Izz = 0.22
Ixy = 0.20	Iyz = 2.73	Ixz = 0.48
Iyx = -0.22	Izy = 0.48	Izx = 2.63

Momento polar de inercia, del área, en el centro de gravedad = 3.26 milim<sup>4</sup>

Momentos principales de inercia, del área, en el centro de gravedad ( milim<sup>4</sup> )

Iu = 0.90  
Iv = 2.27

Momentos de inercia del área, en el sistema de coordenadas de salida ( milim<sup>4</sup> )

I11 = 252.08	I12 = 105.26	I13 = -215.77
I21 = 105.26	I22 = 238.07	I23 = -425.47
I31 = -215.77	I32 = -425.47	I33 = 294.34

A 3D CAD model of the same mechanical part, shown from a different perspective. A red arrow points to the same area on the top surface, which is highlighted in blue. The model is shown in a perspective view, with various axes and dimensions visible.

*Área: 3,93 mm<sup>2</sup>*

## Cálculo de esfuerzo máximo

$$\sigma T = \frac{Su}{FDS}$$

- ▶ Área= 3,93 mm<sup>2</sup>
- ▶ Área= 3,93 x10<sup>-6</sup> m<sup>2</sup>
- ▶ FDS: 12
- ▶ Su= 30MPa “*Esfuerzo máximo para el ABS*”

$$\sigma T = \frac{30 \text{ MPa}}{12}$$

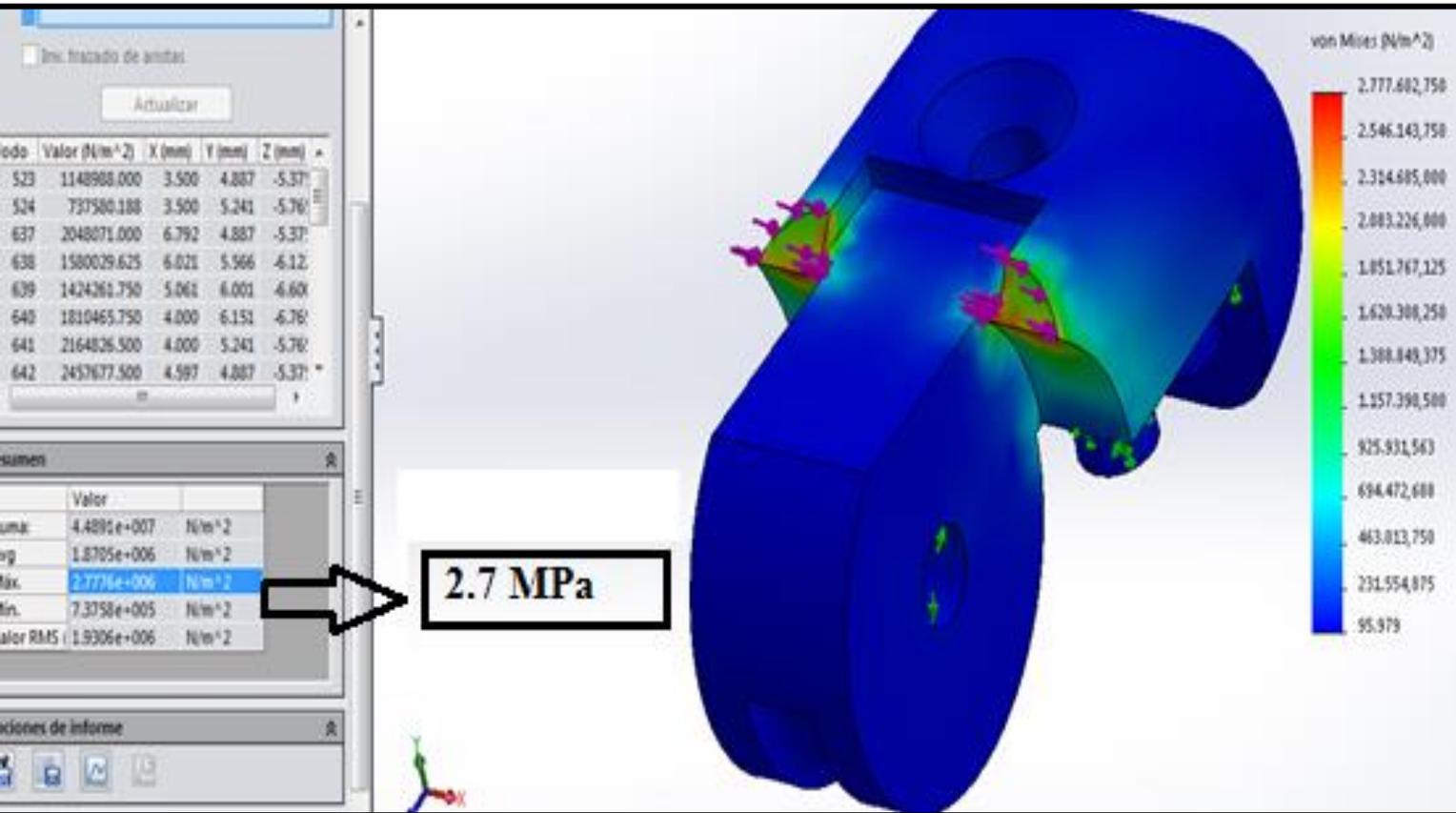
$$\sigma T = 2,5 \text{ MPa}$$

$$F = \sigma T * A$$

$$F = 2,5\text{MPa} * 3,93 \times 10^{-6} \text{ m}^2$$

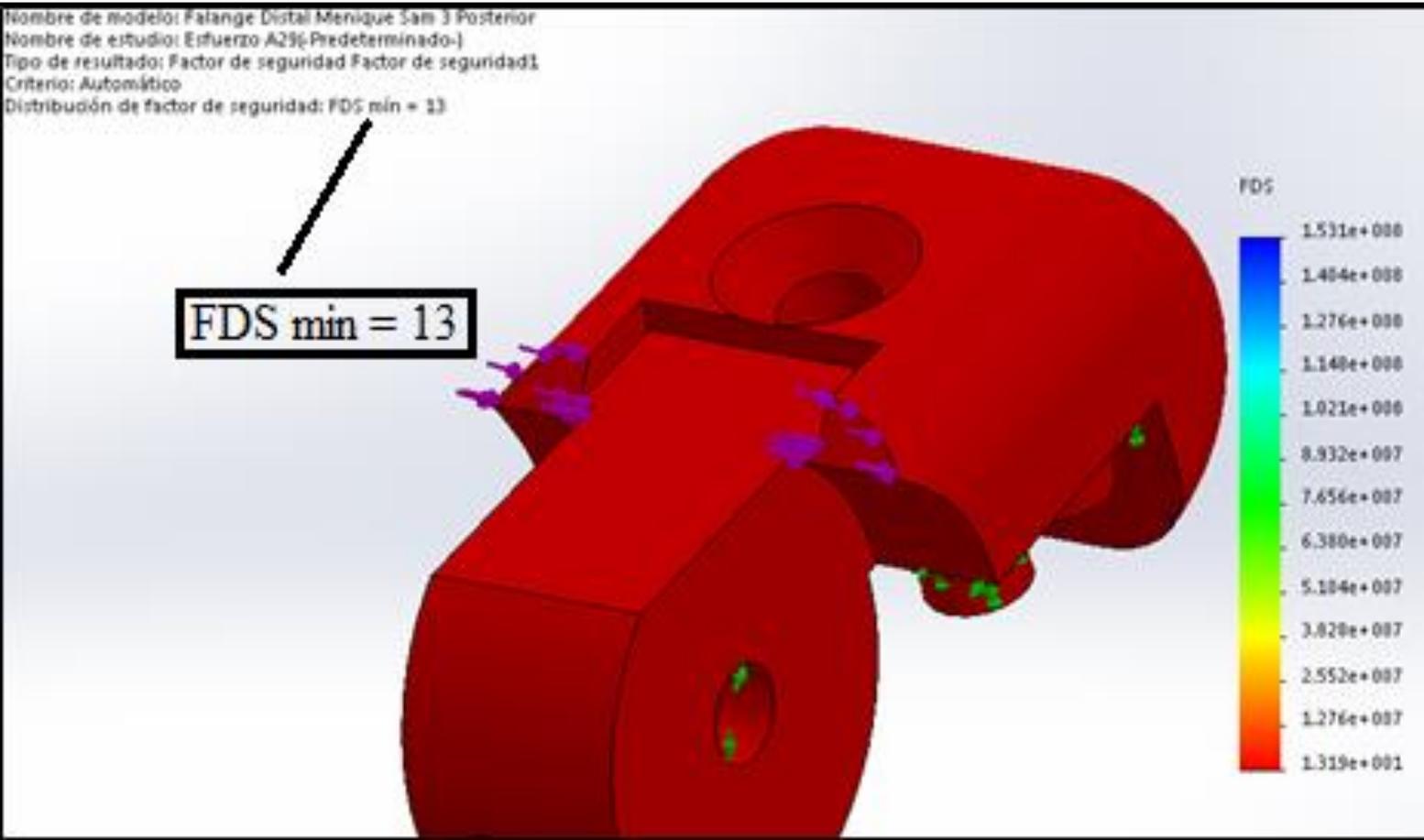
$$F = 9,825 \text{ N}$$

# Análisis de esfuerzo de VonMises



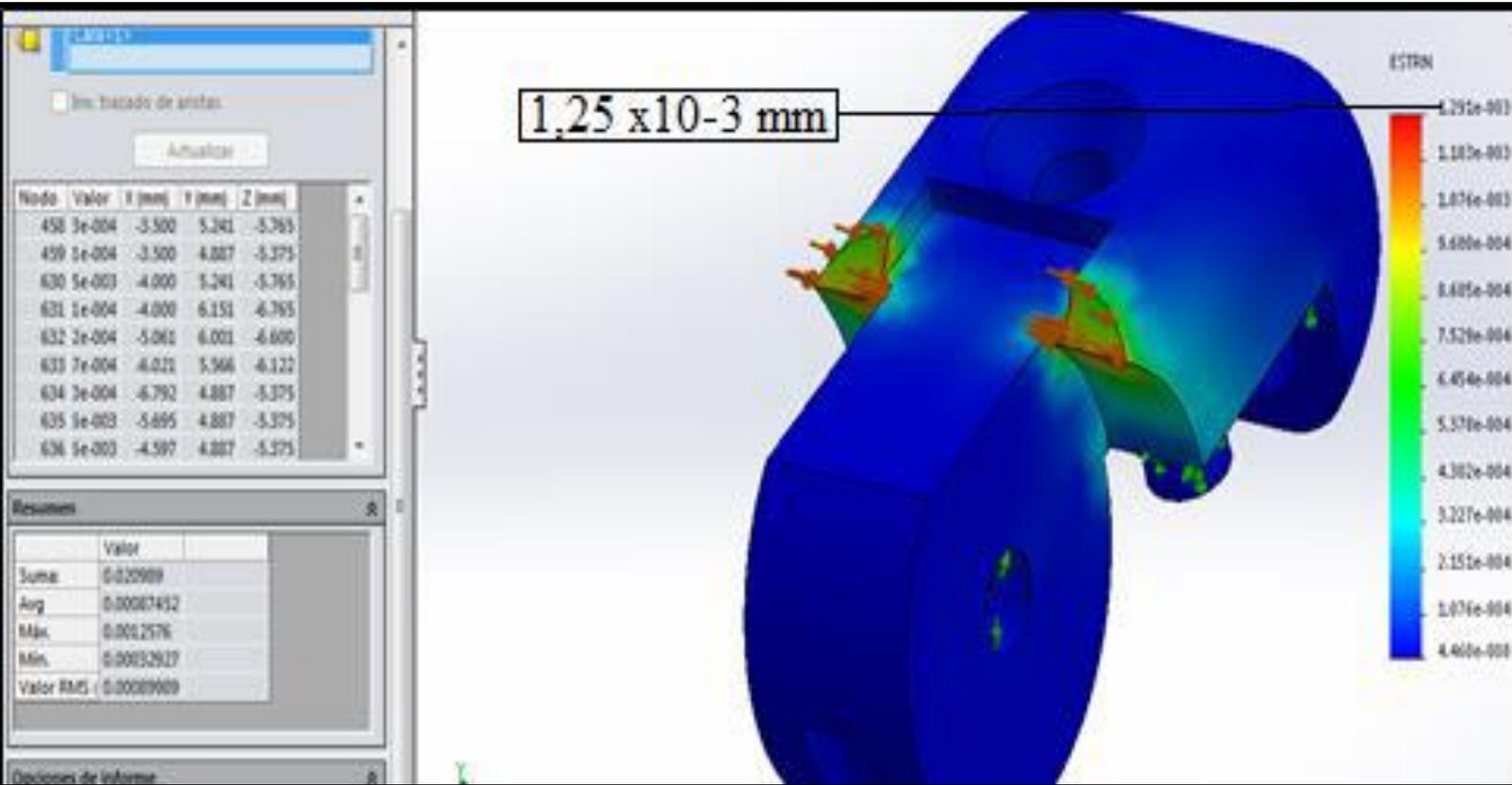
$$\sigma_T = 2,7 \text{ MPa}$$

# Análisis del factor de seguridad



**FDS = 13**

# Análisis de la deformación máxima

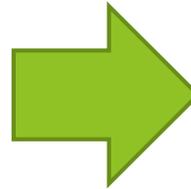
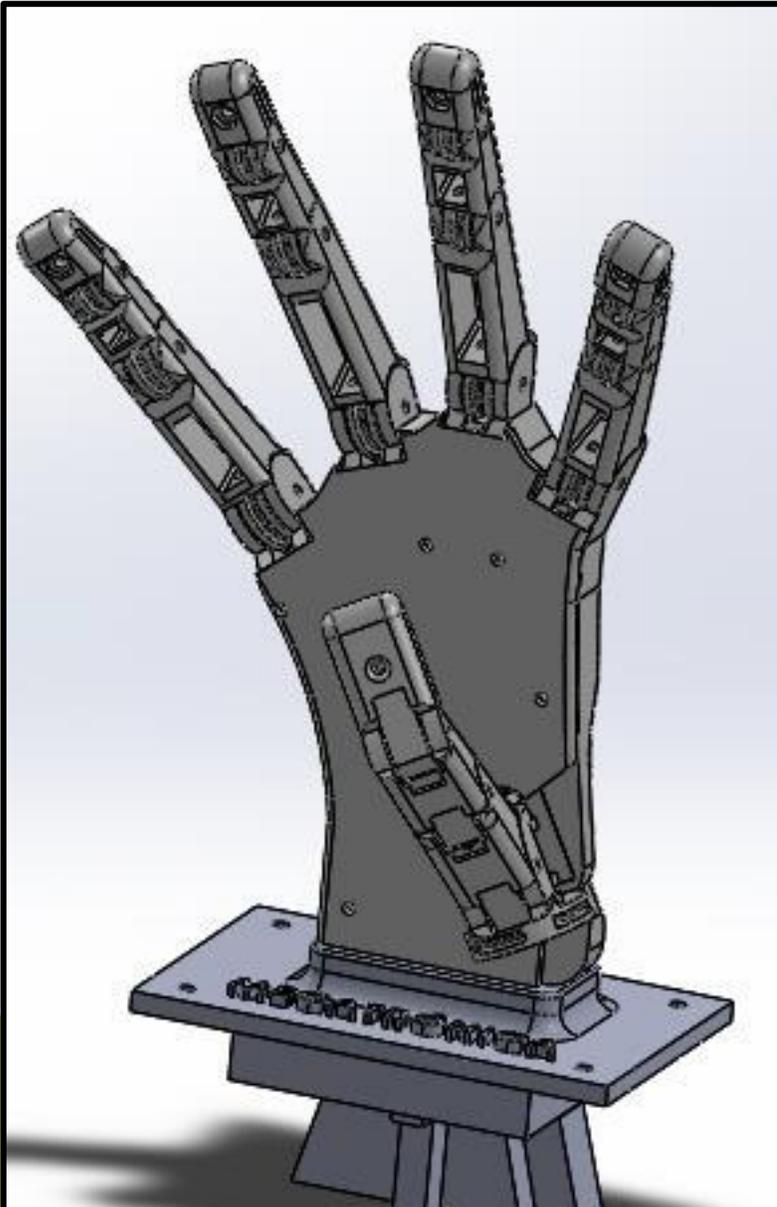


Deformación máxima  
 $1,25 \times 10^{-3}$  mm

The background features abstract, overlapping geometric shapes in various shades of green, ranging from light lime to dark forest green. These shapes are primarily located on the right side of the frame, creating a modern, layered effect. The rest of the background is plain white.

# IMPRESIÓN EN PROTOTIPADORA SOLIDOODLE

# Cambio de formato en piezas para prototipado



A screenshot of a 3D printing software interface. On the left, a file explorer window is open, showing a list of files in a folder named 'Metacarpio STL'. The files include 'METACARPIO BASE.STL', 'METACARPIO DORSAL cambio.STL', 'METACARPIO DORSAL.STL', 'METACARPIO PALMAR.STL', and 'sd.gcode'. The 'METACARPIO BASE.STL' file is selected. Below the file list, the file name 'METACARPIO BASE.STL' is entered in a text field, and the file type is set to 'GCode/STL-Files (\*.gcode;\*.gcc)'. The 'Abrir' (Open) button is highlighted. On the right, the software's main interface is visible, showing a 3D view of a grid and various settings panels. The 'Disposición de Objetos' (Object Placement) panel is active, showing options for 'Guardar como STL' (Save as STL), 'Slice con Slic3r' (Slice with Slic3r), and 'Traslación' (Translation) settings. The translation settings are X: 141.936, Y: 28.74997, and Z: 19. The 'Escala' (Scale) settings are X: 1, Y: 1, and Z: 1. The 'Rotación' (Rotation) settings are X: 0, Y: 180, and Z: 0. The 'Objetos STL' (STL Objects) list shows 'METACARPIO BASE.STL' selected. At the bottom, there are buttons for 'Copiar Objeto(s)', 'Centrar Objeto', 'Añadir Objeto', 'Autoposicionamiento', 'Soltar Objeto', and 'Eliminar Objeto'. The status bar at the bottom shows 'renderer: Intel (R) HD Graphics Family' and 'fast VBOs for rendering is possible'.

# Creación de códigos G



# **Parámetros e impresión de piezas**

- ▶ **Temperatura extrusor para ABS 1.75mm = 220 C**
- ▶ **Temperatura cama para ABS 1.75mm = 125 C**
- ▶ **SLICE con SLIC3R = 0.2MM**



# ENSAMBLAJE DE FALANGES

## Ensamblaje de falange distal

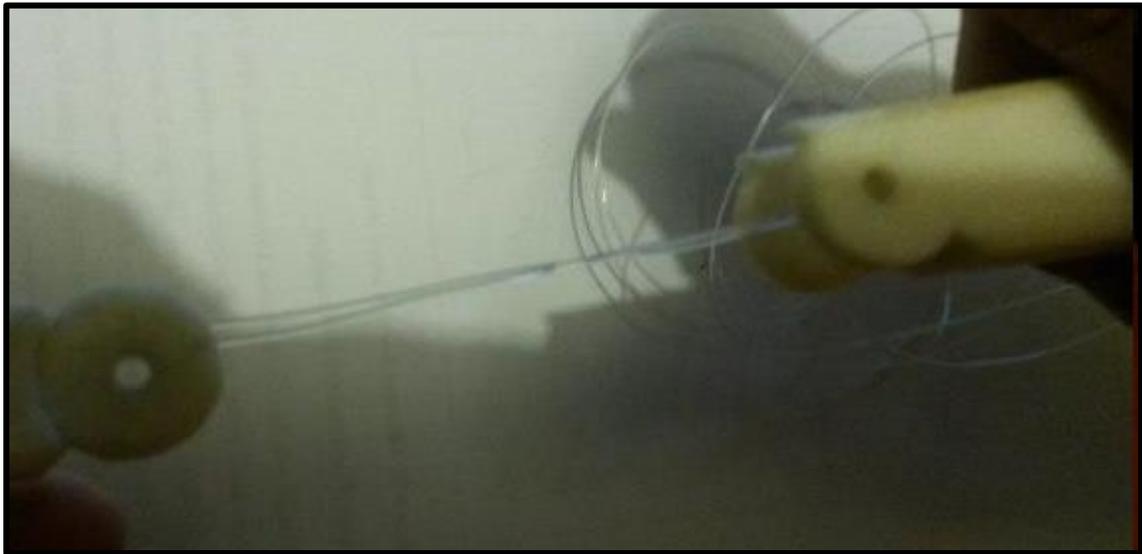


**Anclaje de hilo**

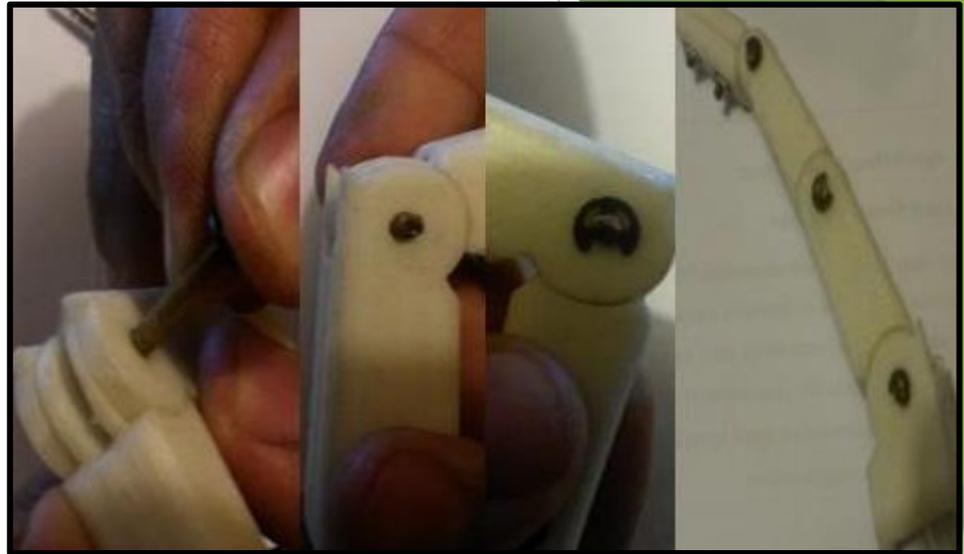


**Unión de distal palmar y dorsal**

# **Acoplamiento de falanges y metacarpo**



**Acoplamiento de falanges mediante hilo**



**Unión de articulaciones con eje de cobre**



**Ensamble total**

## Ubicación de elásticos



# ONDAS CEREBRALES

Contamos con 5 tipos de ondas cerebrales: alfa, beta, delta, theta y gamma, predominantes en ciertos estados de conciencia, por lo cual pueden estar presentes todas al mismo tiempo

## ONDA DELTA (0,1 Hz – 3,99 Hz)



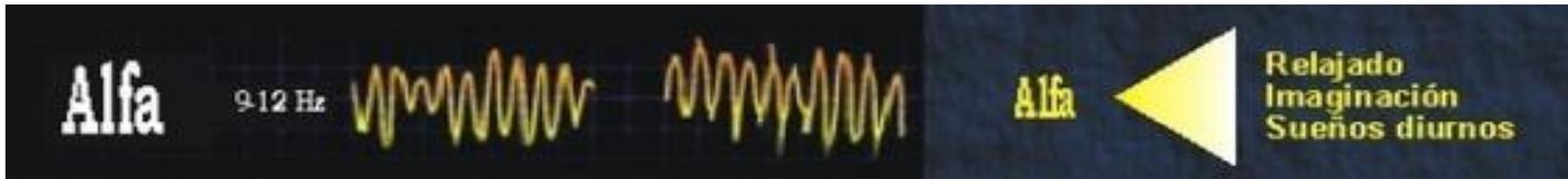
- ▶ Se presentan en estados de sueño profundo
- ▶ No se presenta en la actividad cerebral consiente
- ▶ Nunca llega a cero pues eso es la muerte cerebral

## ONDA THETA (4 Hz – 7,99 Hz)



- ▶ Se presentan en estados de sueño profundo
- ▶ No se presenta en la actividad cerebral consiente
- ▶ Nunca llega a cero pues eso es la muerte cerebral

## ONDA ALFA (9 Hz – 12,99 Hz)



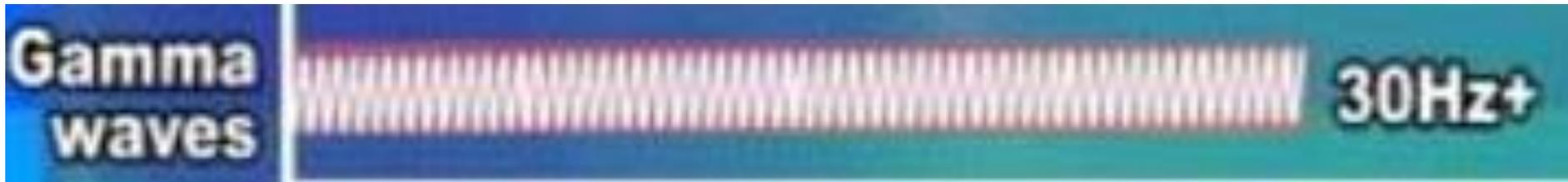
- ▶ Se presentan antes de dormir
- ▶ Mas notables en momentos de relajación y descanso

## ONDA BETA (14 Hz – 30 Hz)



- ▶ Se presentan cuando la persona se encuentra despierta en alerta
- ▶ Al tener altos niveles de concentración

## ONDA GAMMA (Superior a 30 Hz)



- ▶ Se las conoce como cognitivas de alto nivel
- ▶ Presentes en la fase REM del sueño

# SELECCIÓN DE ONDAS

- ▶ Ondas alfa: se la selecciona como una onda de control por su accesibilidad y relacionándola en adelante con la meditación
- ▶ Ondas beta: seleccionada ya que su variación es controlada en estos consientes y relacionándola con la atención

NOTA: el parpadeo no es considerado como una onda cerebral pero por su facilidad de adquisición se la utiliza para la selección mas no para el control

# SOFTWARE PARA EL ANÁLISIS DE ONDAS Y CONTROL DE ACTUADORES

Para este fin se selecciono LabView como el software de adquisición y control, esto debido a su compatibilidad con varios dispositivos de adquisición de ondas cerebrales y plataformas de control para servomotores como arduino la cual se ha seleccionado para el control de servomotores



# SELECCIÓN DE EQUIPO DE LECTURA

Equipos de lectura	Capacidad para adquisición de ondas alfa, beta, theta, delta	Compatibilidad con LabView + toolkit	Adquisición	Precio \$
MindWave	SI	SI	Bajo pedido en el país	218,26
Epoc+	SI	SI	Compra en el exterior	799,00



Se decide utilizar MindWave de NeuroSky ya que al igual que Epoc+ cuenta con la capacidad de adquisición de las ondas seleccionadas para el control, pero su compra en el país es fácil a un costo mas bajo

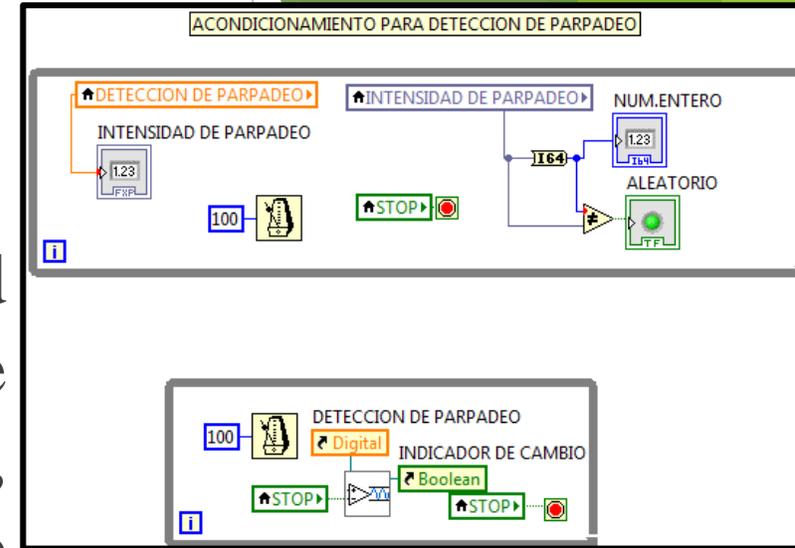


# DESARROLLO DE LA APLICACIÓN

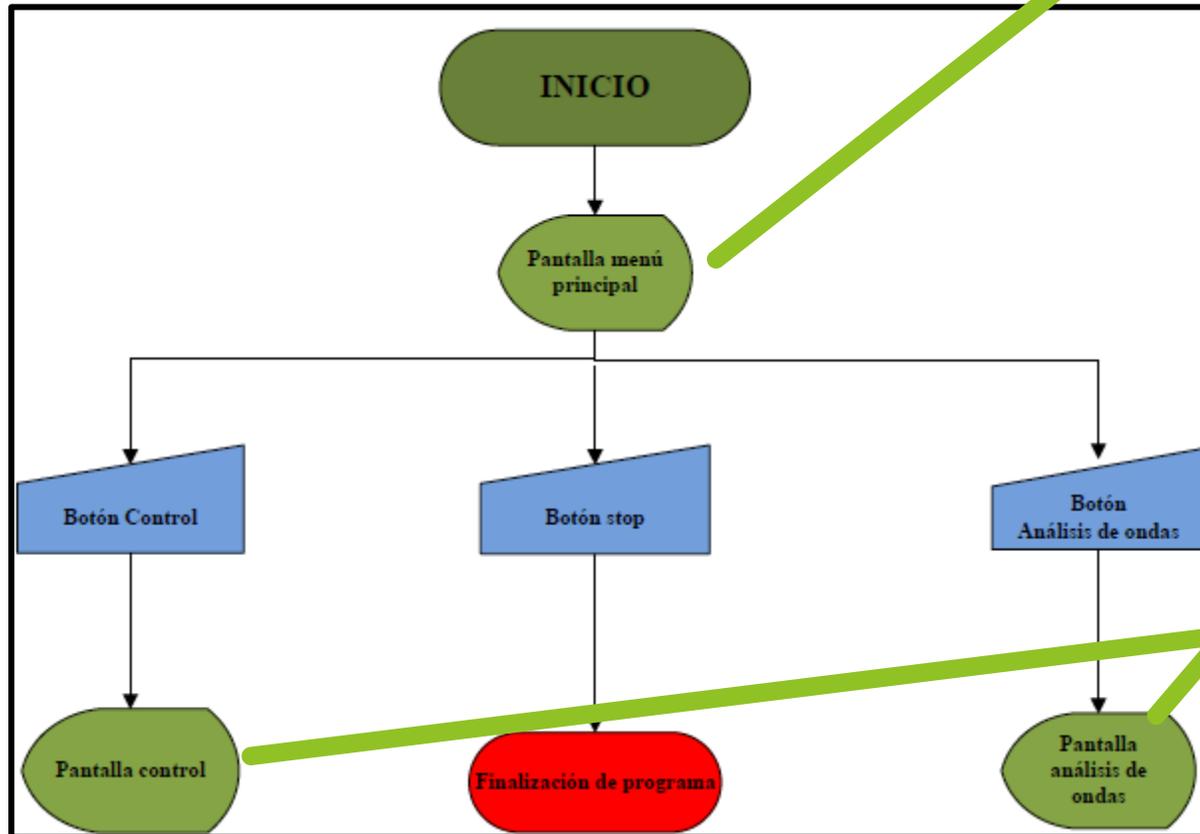
## Acondicionamiento de señales

En el parpadeo se presenta como una magnitud adimensional comprendida entre 0 y 250; se acondiciona la señal para trabajar en dos rangos, parpadeo fuerte magnitud superior a 80 y parpadeo suave menor a 80; convirtiendo la señal analógica en un dato booleano

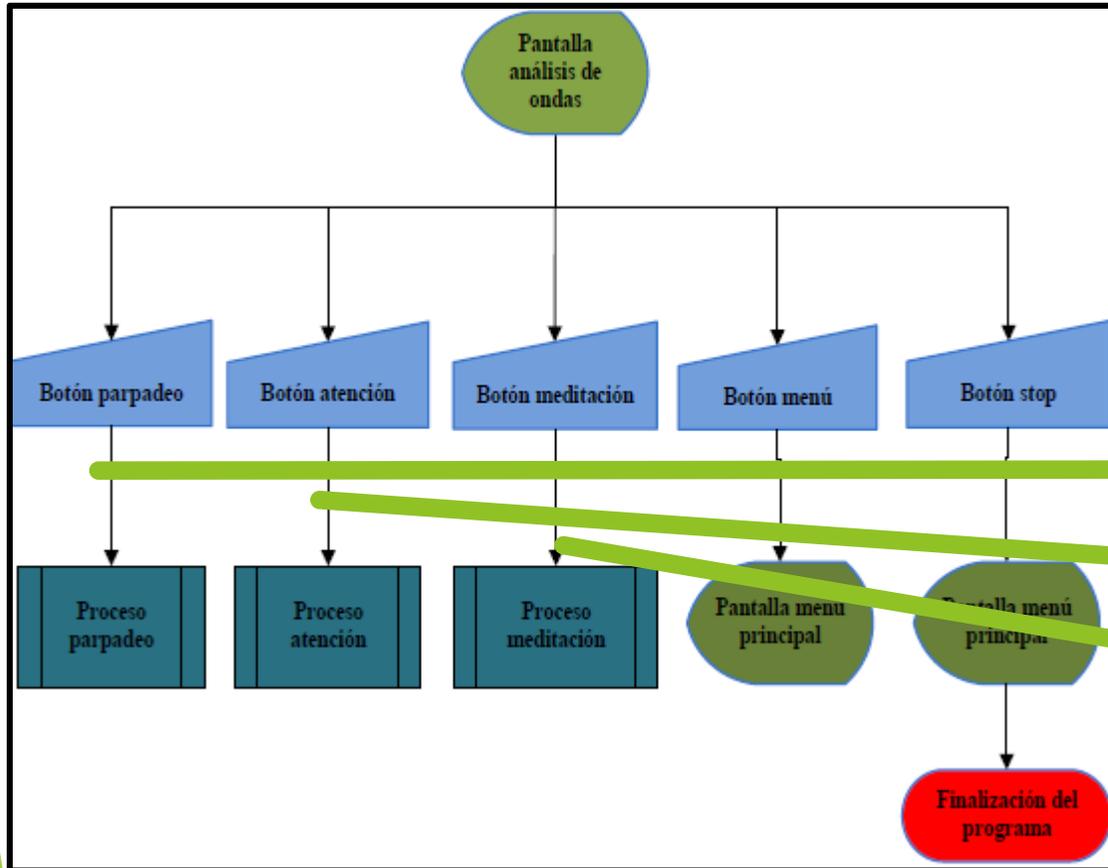
La atención y la meditación se las adquiere en un rango de 0 a 100 % así que no requieren modificación en sus señales



# Creación de menú principal



# Pantalla de análisis de ondas

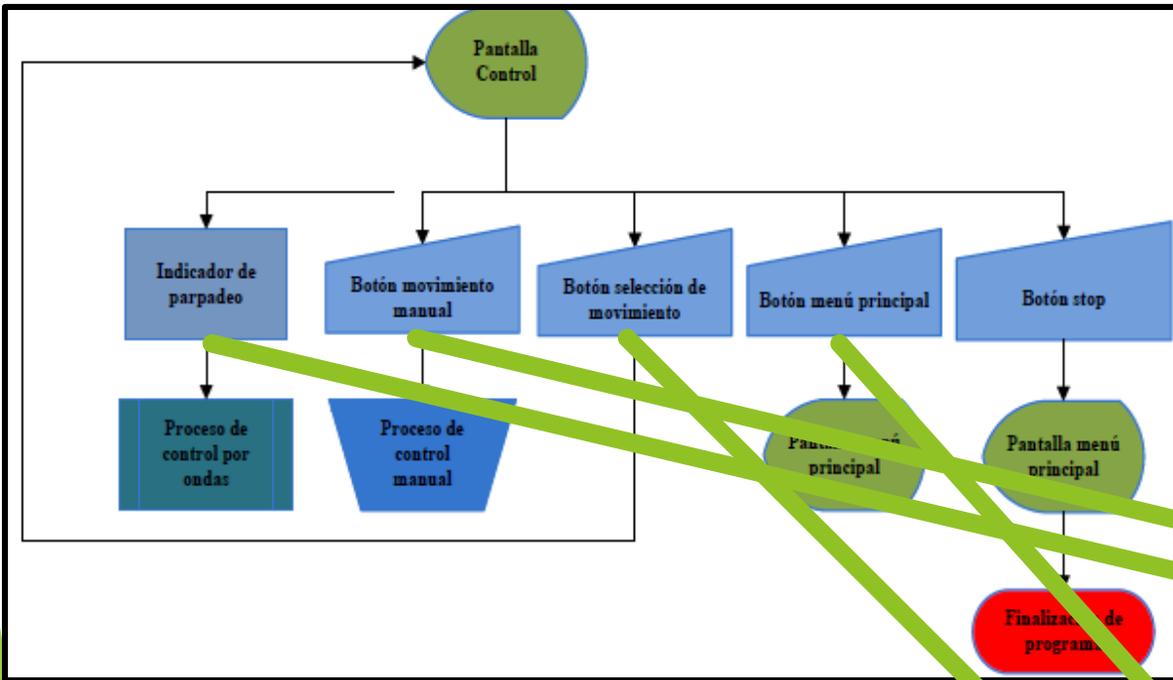


En esta pantalla se selecciona los rangos de control y se realiza practicas con ondas



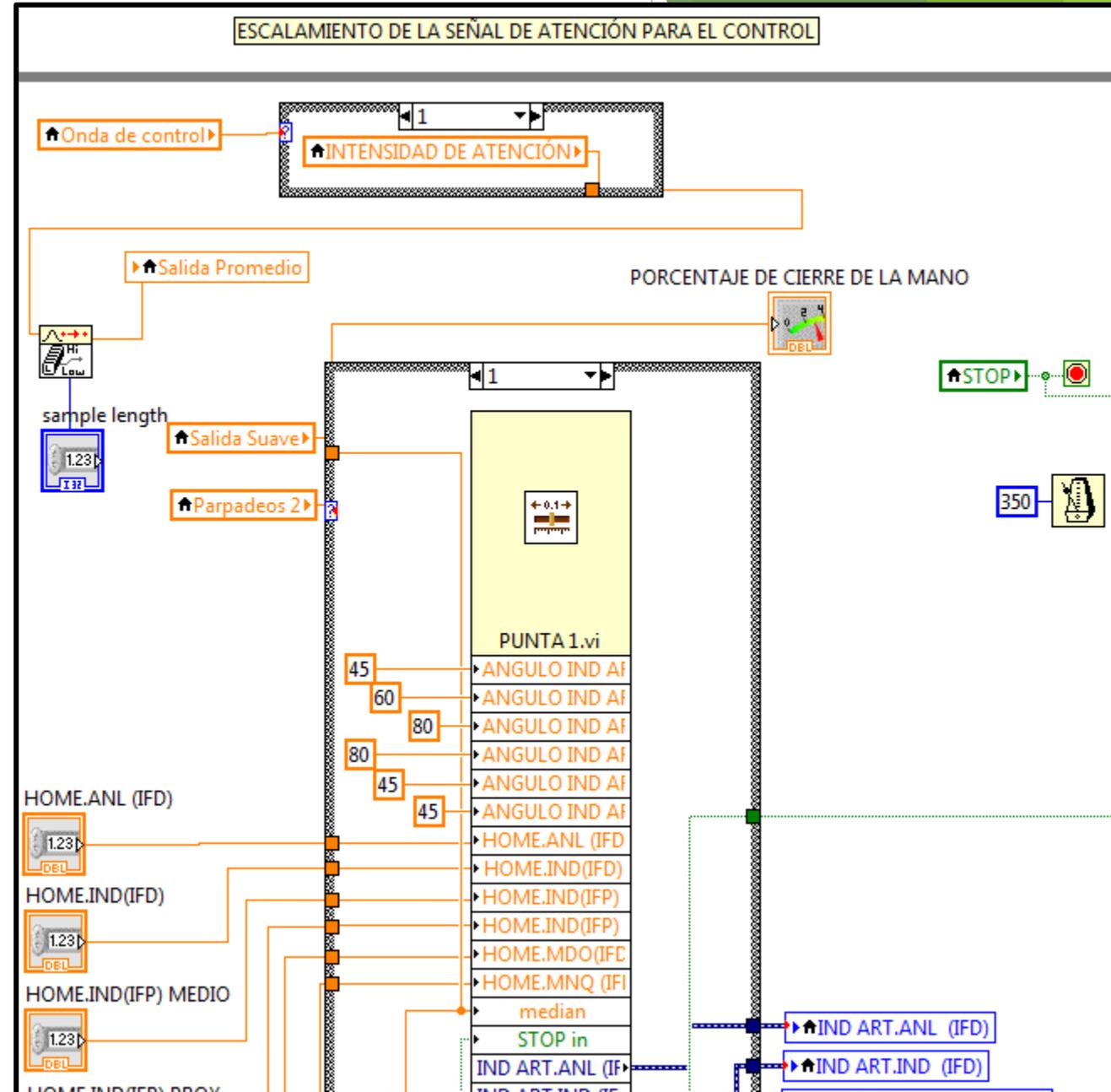
# Pantalla de control

En esta pantalla se elegir en realizar un movimiento manual o control por ondas

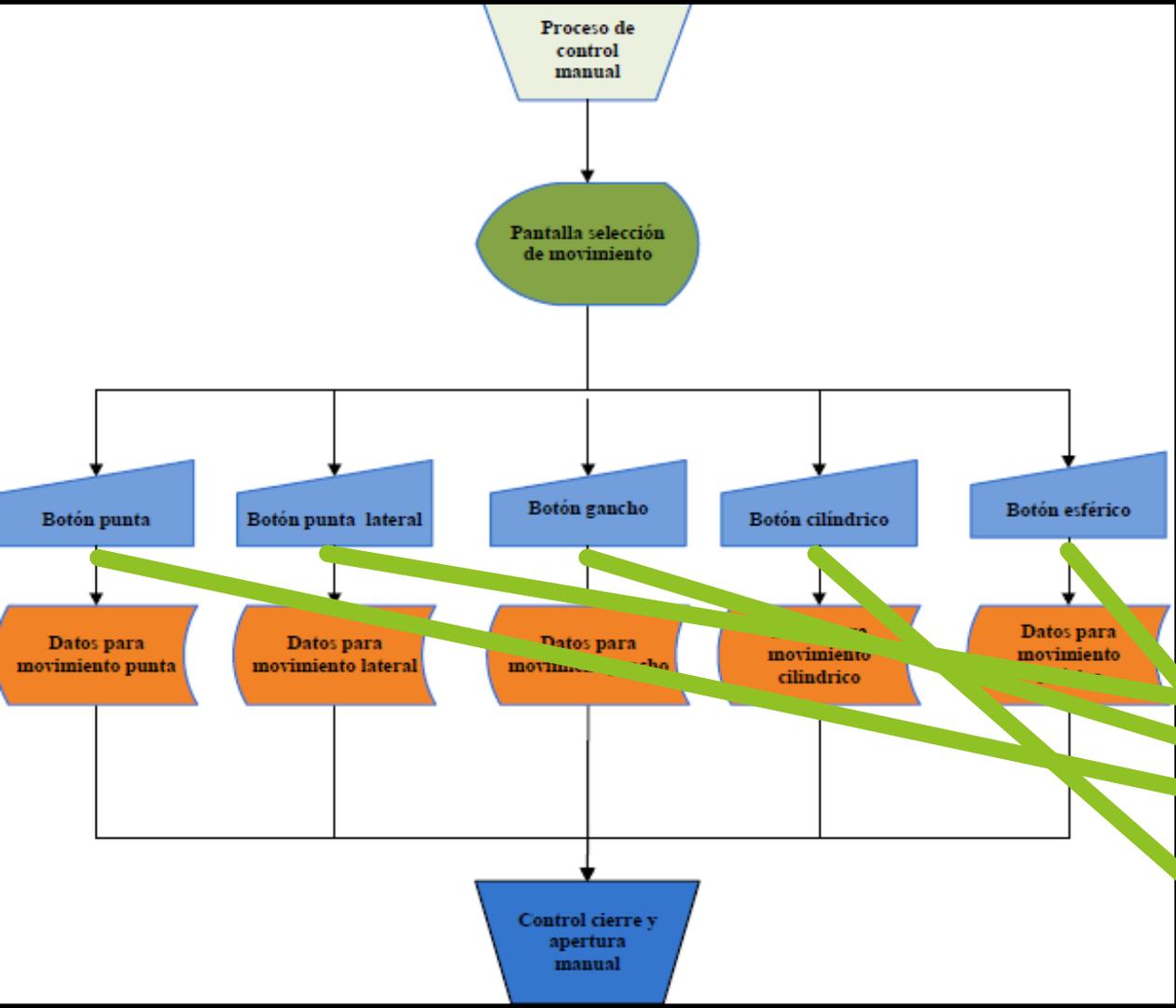


# Programación de ángulo de movilidad

Se cargan ángulos de movilidad correspondientes a los ángulos limitantes de la mano humana



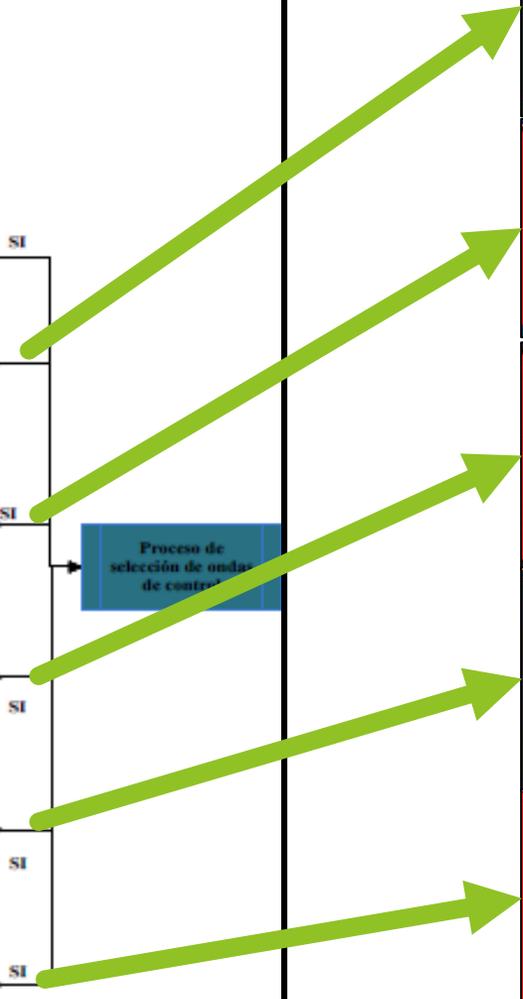
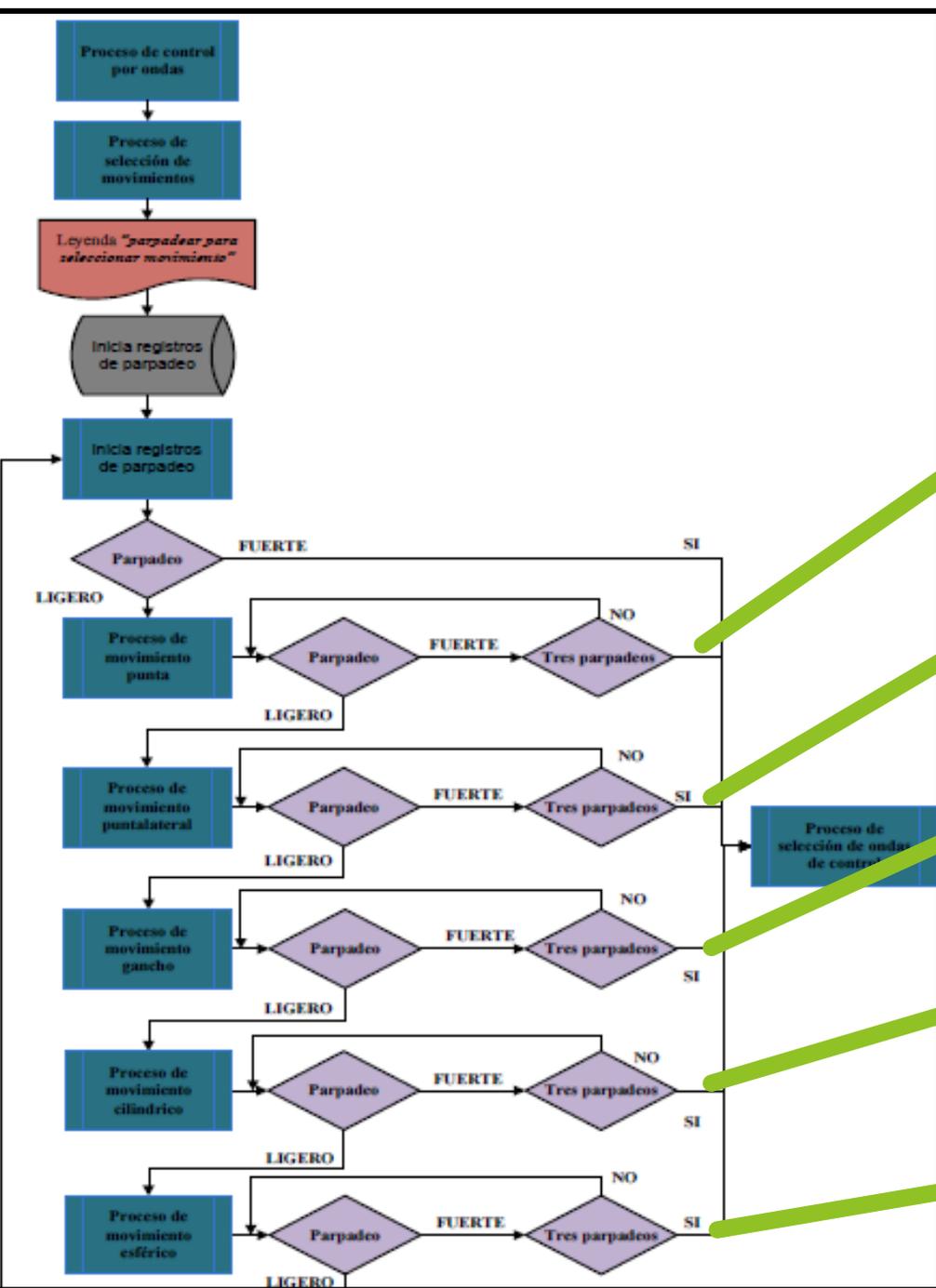
# Pantalla de control manual



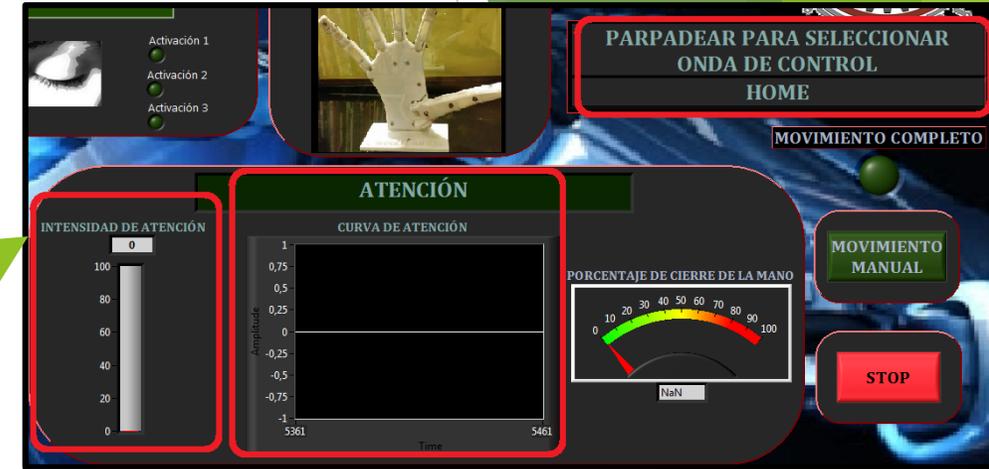
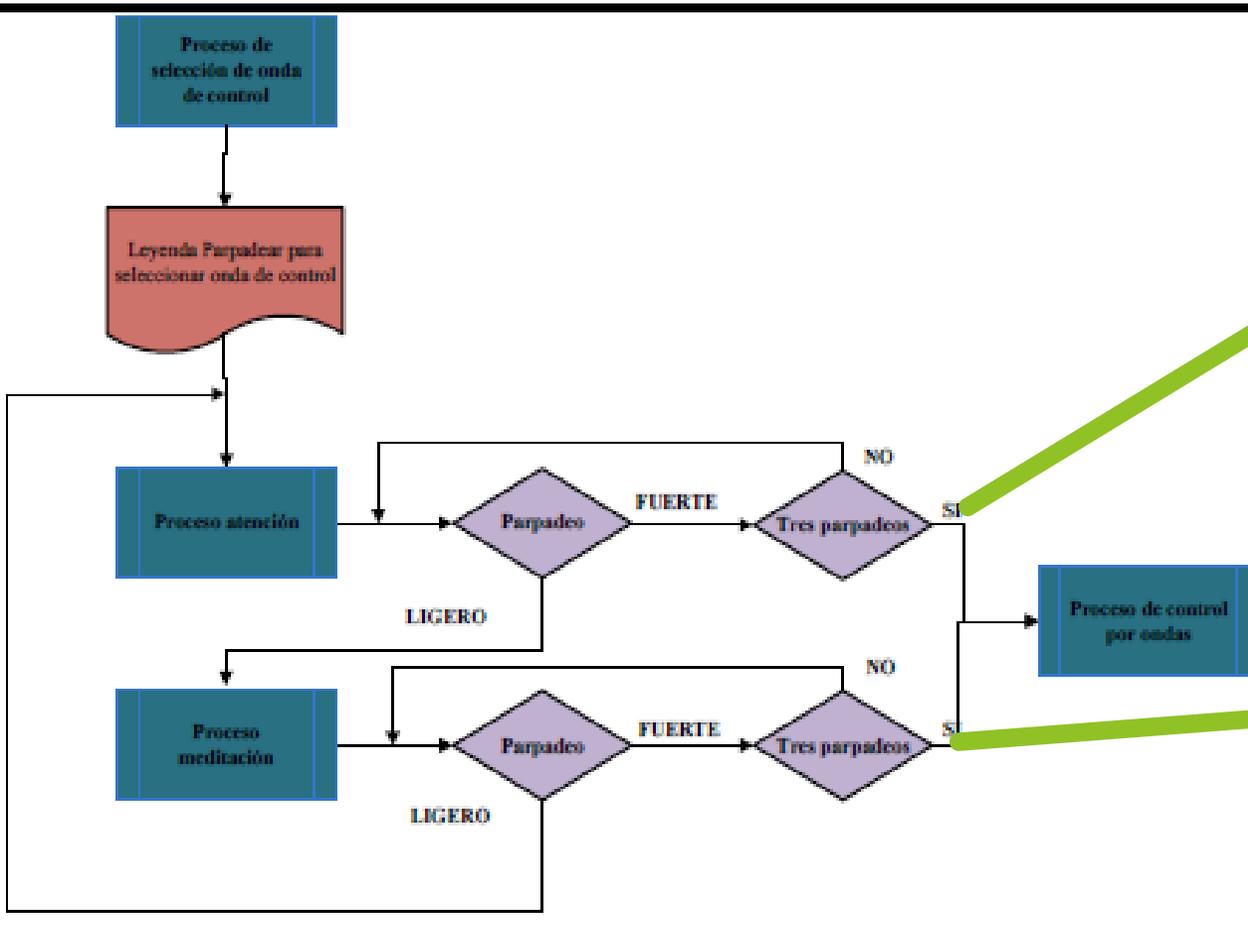
Se selecciona el movimiento cuyo desplazamiento es controlado mediante el deslizador “Porcentaje de apertura”



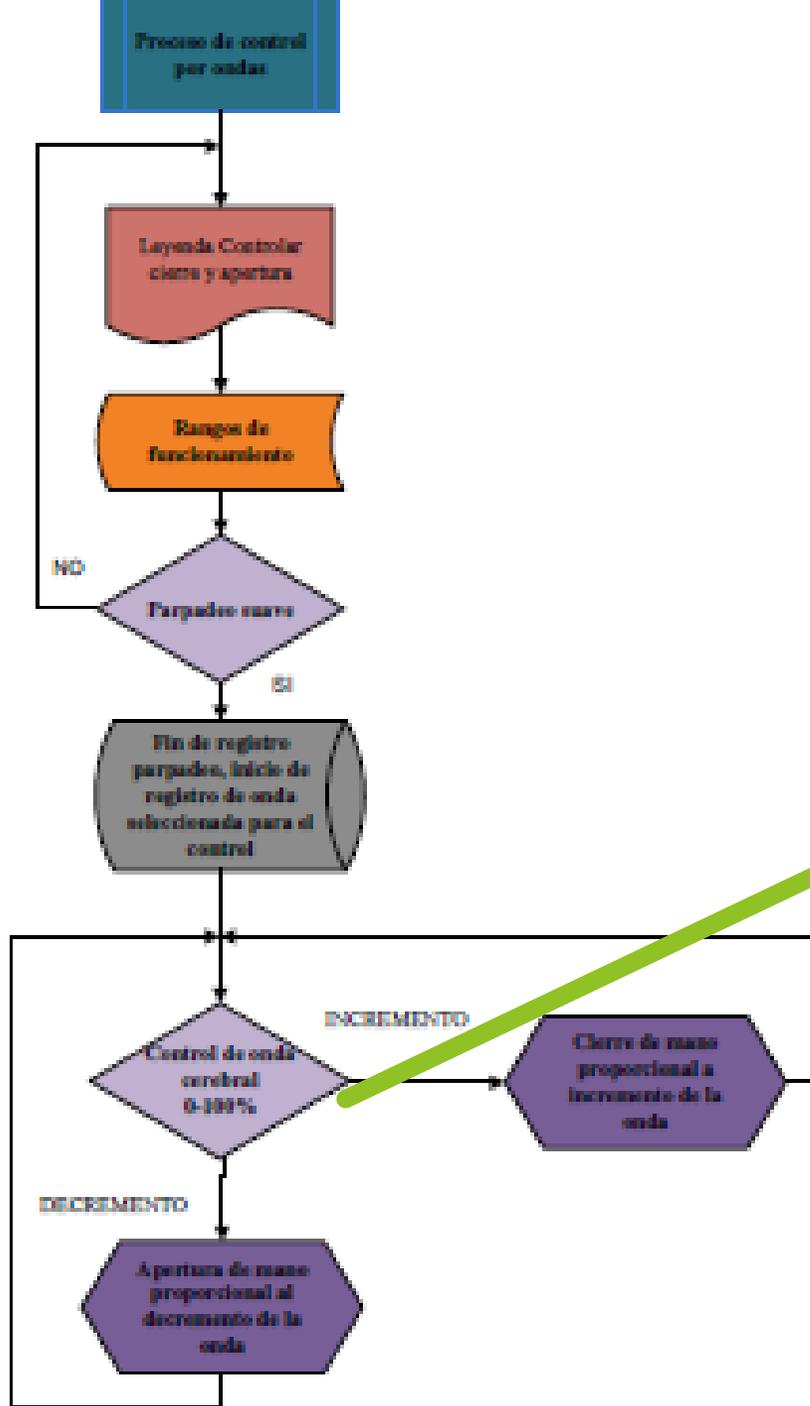
# Selección de movimiento



# Selección de onda de control



# **Control de movimientos por ondas cerebrales**



**PARPADEAR PARA SELECCIONAR**

**INDICADOR DE PARPADEO**

FALLA DE LECTURA 

Activación 1

Activación 2

Activación 3

**CONTROLAR APERTURA Y CIERRE LATERAL**

**MOVIMIENTO COMPLETO**

**ATENCIÓN**

MENU

SELECCION MOVIMIENTO

INTENSIDAD DE ATENCIÓN

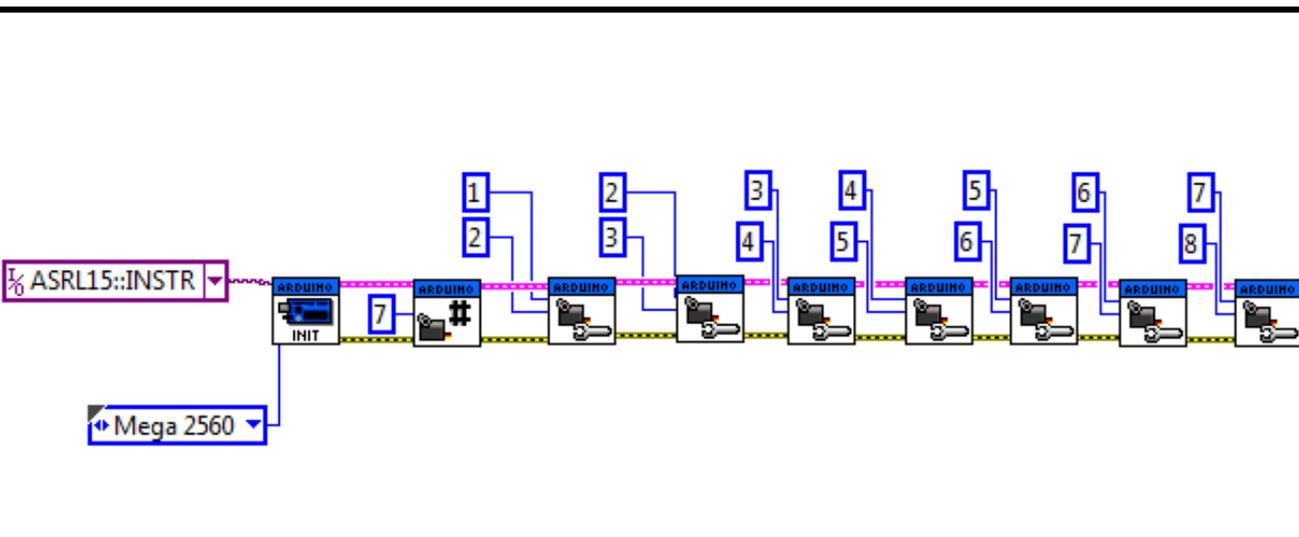
CURVA DE ATENCIÓN

PORCENTAJE DE CIERRE DE LA MANO

MOVIMIENTO MANUAL

STOP

# **Designación de puertos para salida a plataforma arduino**



Puerto PWM arduino	Elemento a controlar
2	Meñique
3	Anular
4	Medio
5	Índice
6	Pulgar base 1
7	Pulgar base 2
8	Auxiliar (canal y servomotor)

# ANÁLISIS DE FUERZAS Y TORQUES PARA LA SELECCIÓN DEL SERVOMOTOR

# Medición de pesos y cálculo de torques

Dedos de la Mano	Falange	Peso Software (gr) SolidWorks	Peso Real (Gr) Balanza	Medida(Kg) Conversión Unidad /1000	Peso (N) Conversión Unidad /0,1019	Peso (Kgf) Conversión *9,8067	Torque Requerido Calculado sin fricción (Kgf.cm) *2,6 cm	Fuerza medida con dinamómetro dedo completo (Kgf)	Torque requerido ensamble completo (Kgf.cm) *2,6 cm	Servomotor Requerido (Kgf.cm)
Indice	Falange distal palmar	0,84	0,525	0,000525	0,005152	0,0505	3,51	3,6	9,36	11
	Falange distal dorsal	2,34	1,785	0,001785	0,017517	0,1718				
	Falange medial	3,9	2,73	0,002730	0,026791	0,2627				
	Falange proximal	8,76	5,355	0,005355	0,052552	0,5154				
	Accesorios		3,63	0,003630	0,035623	0,3493				
	Total dedo peso con accesorios	15,84	14,025	0,014025	0,137635	1,3497				
Medio	Falange distal palmar	0,92	0,63	0,000630	0,006183	0,0606	3,72	3,95	10,27	11
	Falange distal dorsal	2,63		0,001890	0,018548	0,1819				
	Falange medial	4,34	3,045	0,003045	0,029882	0,2930				
	Falange proximal	9,55	5,67	0,005670	0,055643	0,5457				
	Accesorios		3,63	0,003630	0,035623	0,3493				
	Total dedo peso con accesorios									

## Selección del servomotor

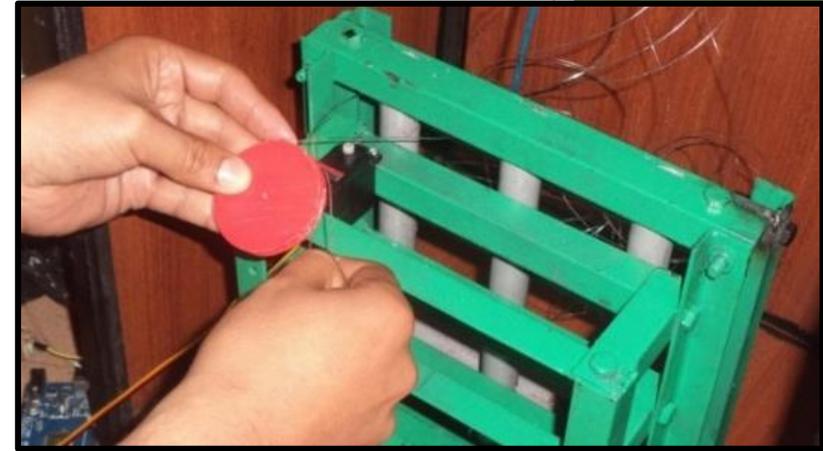
Servomotor Modelo	Torque (Kg.cm)		Velocidad seg/60°		Dimensiones (mm)			Precio (\$)	
	4,8 (V)	6 (V)	4,8 (V)	6 (V)	Largo	Ancho	Profundidad	Unitario	Por docena
HS-311	3,02	3,53	0,19	0,15	39,9	19,8	36,3	12,5	148,1
HS-422	3,3	4,1	0,21	0,16	39,88	19,82	36,02	17,5	201,5
HS-485	4,8	6	0,22	0,18	40	19,82	37,75	22,5	261,5
HS-645	7,7	9,6	0,24	0,2	40,6	19,8	37,8	52,5	630
MG-945	10	12	0,23	0,2	40,7	19,7	42,9	21	252
MG-996 r	9,4	11	0,17	0,14	40,7	19,7	42,9	20	240

Ya que cumple con el torque requerido se seleccionó el servomotor MG -996 r

# UNIFICACIÓN DEL SISTEMA

The background features abstract, overlapping geometric shapes in various shades of green, ranging from light lime to dark forest green. These shapes are primarily located on the right side of the frame, creating a modern, layered effect. The rest of the background is plain white.

Conexión de servomotores a su estructura



Instalación de mano robótica en modulo de exposición



## Conexión de servomotores con mano robótica



# VALIDACIÓN DE HIPÓTESIS

## Planteamiento de la hipótesis

¿Mediante las ondas cerebrales es posible controlar un prototipo de mano robótica con arquitectura antropomórfica?

## Planteamiento de la hipótesis alternativa y nula

- ▶ Hipótesis alternativa (H1): Mediante el uso de ondas cerebrales se puede llegar a controlar un prototipo de mano robótica con arquitectura antropomórfica.
- ▶ Hipótesis nula (H0): Mediante el uso de ondas cerebrales no se puede llegar a controlar un prototipo de mano robótica con arquitectura antropomórfica.

## Designación de variables

- ▶ Variable dependiente: Control de mano robótica con arquitectura antropomórfica
- ▶ Variable independiente: Dominio en el uso de ondas cerebrales

# VALIDACIÓN DE HIPÓTESIS

MUESTRA : Seis hombres, tres mujeres

Valores obtenidos en pruebas de control

Dominio en el uso de ondas cerebrales	Control de cierre y apertura de mano robótica con arquitectura antropomórfica	
	Si	No
Si	6	1
No	0	2

# VALIDACIÓN DE HIPÓTESIS

MUESTRA : Seis hombres, tres mujeres

Suma de valores obtenidos en pruebas de control

Dominio en el uso de ondas cerebrales	Control de cierre y apertura de mano robótica con arquitectura antropomórfica		Total
	Si	No	
Si	6	1	7
No	0	2	2
Total	6	3	9

# VALIDACIÓN DE HIPÓTESIS

MUESTRA : Seis hombres, tres mujeres

Valores esperados

Dominio en el uso de ondas cerebrales	Controla el cierre y apertura de mano robótica con arquitectura antropomórfica		Total
	Si	No	
Si	4.67	2.33	7
No	1.33	0.67	2
Total	6	3	9

# CÁLCULO DE CHI CUADRADO

Ecuación del chi cuadrado

$$x^2_{\text{calc}} = \sum \frac{(f_o - f_e)^2}{f_e}$$

Dónde:

$f_e$  Frecuencia de valor esperado

$f_o$  Frecuencia de valor observado

$$x^2_{\text{calc}} = \frac{(6 - 4.67)^2}{4.67} + \frac{(0 - 1.33)^2}{1.33} + \frac{(1 - 2.33)^2}{2.33} + \frac{(2 - 0.67)^2}{0.67}$$

$$x^2_{\text{calc}} = 5.11$$

Cálculo de grado de libertad

$$gl = (\text{numero de filas} - 1) * (\text{numero de columnas} - 1)$$

$$gl = (2 - 1) * (2 - 1)$$

$$gl = 1$$

- Valor de chi-cuadrado obtenido de la tabla mediante la significancia (0,05) y el grado de libertad

<b>v/p</b>	<b>0,001</b>	<b>0,0025</b>	<b>0,005</b>	<b>0,01</b>	<b>0,025</b>	<b>0,05</b>	<b>0,1</b>
<b>1</b>	16,0274	9,1484	7,8794	6,6349	5,0239	3,8415	2,7055
<b>2</b>	13,8150	11,9827	10,5965	9,2104	7,3778	5,9915	4,6052
<b>3</b>	16,2660	14,3202	12,8381	11,3449	9,3484	7,8147	6,2514
<b>4</b>	18,4662	16,4238	14,8602	13,2767	11,1433	9,4877	7,7794
<b>5</b>	20,5147	18,3854	16,7496	15,0863	12,8325	11,0705	9,2363
<b>6</b>	22,4575	20,2491	18,5475	16,8119	14,4494	12,5916	10,6446
<b>7</b>	24,3213	22,0402	20,2777	18,4753	16,0128	14,0671	12,0170
<b>8</b>	26,1239	23,7742	21,9549	20,0902	17,5345	15,5073	13,3616
<b>9</b>	27,8767	25,4625	23,5893	21,6660	19,0228	16,9190	14,6837
<b>10</b>	29,5879	27,1119	25,1881	23,2093	20,4832	18,3070	15,9872

$$x^2_{\text{tabla}} = 3.8415$$

Para el análisis se utiliza la siguiente condición:

Si ( $x^2_{\text{calc}} \leq x^2_{\text{tabla}}$ ), se acepta la hipótesis nula y se rechaza la alternativa y si ( $x^2_{\text{calc}} \geq x^2_{\text{tabla}}$ ), se acepta la hipótesis alternativa y se rechaza la nula

Por lo tanto, mediante los cálculos se tiene que:

$$x^2_{\text{calc}} \geq x^2_{\text{tabla}}$$

$$5.11 \geq 3.8415$$

Por esta razón se rechaza la hipótesis nula y se acepta la hipótesis alternativa, concluyendo de esta manera que si se puede controlar un prototipo de mano robótica con arquitectura antropomórfica mediante el uso de ondas cerebrales

# CONCLUSIONES

- ▶ El diseño y construcción del prototipo de mano robótica de tipo antropomórfico, fue posible realizarlo mediante características de la anatomía de la mano humana, lo cual le permitió la imitación de los tipos de agarre punta, lateral, gancho, cilíndrico y esférico, que son controlados en su cierre y apertura mediante ondas cerebrales
- ▶ La emulación de las características antropomórficas de la mano humana en la mano robótica, se alcanzó mediante la relación entre las dimensiones de las falanges, sus grados de libertad y ángulos de movilidad en cada uno de sus dedos, por lo cual fue necesario utilizar una restricción mecánica, es decir que poseen topes físicos que impiden sobrepasar los movimientos especificados
- ▶ La versatilidad del movimiento de las falanges es directamente proporcional a los grados de libertad de cada dedo y éste a su vez con el sistema de transmisión que se utilice
- ▶ Por medio de un análisis de los diversos tipos de ondas que genera el cerebro, se seleccionó el uso de la onda alpha (meditación) y beta (atención), las mismas que pueden ser fácilmente generadas por el humano para el control de la mano robótica.

- ▶ Las ondas cerebrales de atención y meditación al ser generados por estados mentales son susceptibles a estímulos externos como distracciones, sonidos, sensaciones, olores, etc., lo que pudiera provocar la pérdida de control
- ▶ Las ondas cerebrales no se pueden utilizar directamente, debido a que estas son inestables, por lo cual es necesario su acondicionamiento por hardware o software para generar estabilidad proporcional en cada una de ellas
- ▶ La calibración de tiempos de ejecución interna del programa, es clave para un correcto intercambio de datos, pues esta debe ir a la par de la velocidad de transmisión de ondas dada por el lector
- ▶ La pantalla “análisis de onda” de la aplicación permite al usuario practicar con las señales de meditación, atención y adicionalmente el parpadeo, logrando adquirir la habilidad de control sobre estas ondas y en la mano robótica o cualquier mecanismo que se utilice
- ▶ La aplicación permite calibrar el rango alto y bajo de la amplitud de onda de atención y meditación, para el control de apertura de los dedos de la mano robótica; permitiéndole al usuario lograr maniobrar con mayor facilidad
- ▶ Se puede seleccionar y ejecutar el movimiento de los tipos de agarre de manera manual en la pantalla “control” de la aplicación, variando el porcentaje de apertura y cierre, mediante un control virtual “pointer slide”