

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ

FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA



PUCP

**Integración de un sistema robótico asistencial controlado
mediante una interfaz cerebro computador para personas con
discapacidad motora**

Tesis para obtener el título profesional de Ingeniero Mecatrónico

AUTOR

Jairo Jener Pirca Cárdenas

ASESOR

David Ronald Achancaray Diaz

Lima, Diciembre, 2019

RESUMEN

La calidad de vida de una persona que sufre alguna discapacidad motora hoy en día depende de muchos factores. Entre ellos los más importantes son el factor económico, familiar y emocional.

La discapacidad motora es la incapacidad de controlar los músculos del cuerpo. Esta hace de la persona con discapacidad dependiente de otra persona. En la actualidad existen tratamientos físicos, psicológicos que contribuyen a mejorar la calidad de vida, pero esto no evita la que sigan siendo dependientes de otras personas.

En este contexto, la presente tesis, desarrolla la implementación de un sistema robótico que devuelve la autonomía parcial a una persona con discapacidad motora para permitir a las personas realizar algunas labores cotidianas. En la presente tesis se describe entonces las tecnologías, mecánica, eléctrica, control e informática para la correcta implementación del sistema robótico, donde las principales partes del sistema son: brazo robótico, casco con electrodos pasivos, pantalla de interacción, cámaras HD.

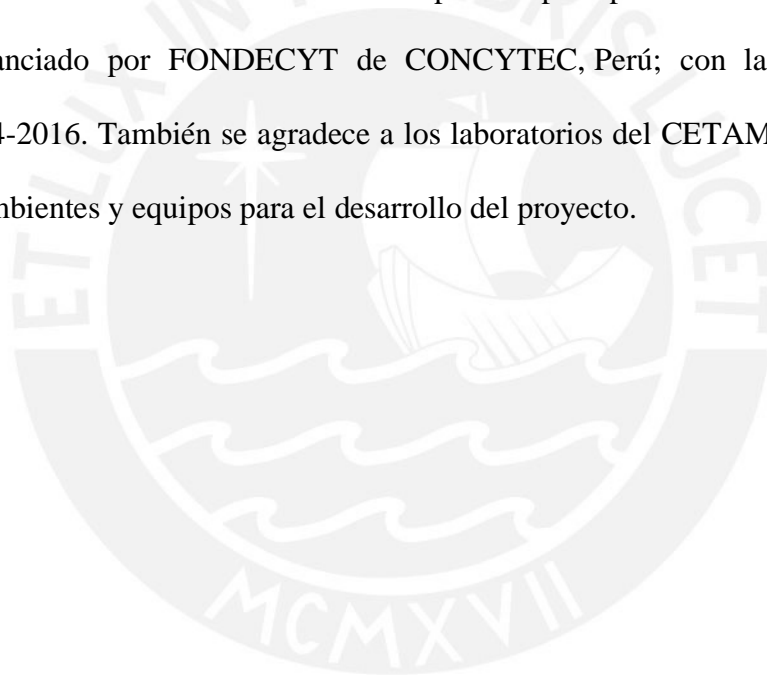
Con el fin de determinar si la implementación de sistema robótico tuvo éxito, se realizan pruebas con personas sanas, teniendo resultados satisfactorios después de las sesiones de entrenamiento y de experiencia con el sistema robótico.



Dedicado a mis padres y a mi hermana,
Nancy, Jener, Mya, quienes siempre me
han apoyado en lograr todos mis objetivos,
siempre estaré agradecido por su
incondicional apoyo.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo de tesis fue parte del proyecto de investigación "Control de un robot asistencial mediante una interfaz cerebro computador para personas con discapacidad motora", financiado por FONDECYT de CONCYTEC, Perú; con la subvención de proyecto J004-2016. También se agradece a los laboratorios del CETAM y GIRAB por brindar los ambientes y equipos para el desarrollo del proyecto.



ÍNDICE DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN.....	1
1 FUNDAMENTO TEORICO.....	5
1.1 Tratamientos comunes para personas con discapacidad motora	5
1.1.1 Terapia física.....	5
1.1.2 Terapia acuática	5
1.1.3 Tratamiento neuro-rehabilitador.....	5
1.2 Interfaz Cerebro Computador.....	6
1.3 Paradigmas.....	7
1.3.1 Ondas cerebrales	8
1.3.2 Potencial relacionado a eventos.....	9
1.3.3 Potencial evocado por estados visuales	10
1.3.4 Ritmos sensoriomotores	11
1.4 Adquisición de la señal.....	11
1.4.1 Técnica invasiva.....	12
1.4.2 Técnica no invasiva.....	12
1.4.3 Tipos de electrodos	12
1.5 Procesamiento de la señal.....	13
1.5.1 Transformada de Wavelet	13
1.5.2 Filtro adaptativo	14
1.5.3 Patrones espaciales comunes.....	15
1.6 Aplicaciones de un sistema BCI en la actualidad	16
2 DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA Y MÉTODOS.....	17
2.1 Requerimientos del sistema.....	17
2.1.1 Requerimientos mecánicos.....	17
2.1.2 Requerimientos eléctricos y electrónicos	18
2.1.3 Requerimientos de control.....	18
2.2 Concepto de integración definitiva.....	19
2.2.1 Solución óptima	19
2.3 Sistema electrónico	21
2.3.1 Sensores y actuadores	21
2.3.2 Comunicación	23
2.4 Sistema de visión artificial	25
2.4.1 Especificaciones, selección de cámaras.....	26
2.4.2 Calibración.....	28



2.4.3	Captura de escena.....	28
2.4.4	Procesamiento de las imágenes.....	29
2.4.5	Cálculo de posición del objeto con referencia al brazo robótico.....	34
2.5	Sistema mecánico.....	40
2.5.1	Diseño de soporte brazo robótico.....	40
2.5.2	Diseño de soporte de cámaras.....	41
2.5.3	Montaje del brazo robótico.....	41
2.5.4	Montaje de cámaras.....	43
2.6	Sistema de control.....	43
2.6.1	Adquisición y procesamiento de la señal cerebral.....	44
2.6.2	Detección de la señal EEG.....	45
2.6.3	Control del brazo robótico.....	46
2.6.4	Diagrama de flujo del sistema.....	48
2.6.5	Flujo de trabajo del sistema.....	51
3	COSTOS DEL SISTEMA.....	52
3.1	Costos de diseño:.....	52
3.2	Costos de fabricación:.....	53
3.3	Costos de programación:.....	53
3.4	Costos de pruebas.....	54
3.5	Costos totales.....	54
4	EXPERIMENTOS Y RESULTADOS.....	55
4.1	Requisitos para el experimento.....	55
4.2	Primera sesión.....	56
4.3	Segunda sesión.....	57
	CONCLUSIONES.....	60
	RECOMENDACIONES.....	61
	BIBLIOGRAFIA.....	62
	ANEXOS.....	70

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2-1: Ensayos de velocidad del brazo de una persona de 22 años. Fuente propia.	21
Tabla 2-2: Comparación entre los brazos robóticos. Fuente propia.	22
Tabla 2-3 Comparación entre las sillas eléctricas. Fuente propia	23
Tabla 2-4: Tabla de características de la computadora principal. Fuente propia	25
Tabla 2-5: Características de las cámaras	27
Tabla 2-6: Elección de cantidad de puntos característicos. Fuente propia.	32
Tabla 2-7: Resultados de las pruebas de profundidad. Fuente propia.	36
Tabla 2-8: Coordenadas con referencia la gripper	37
Tabla 2-9: Elección de la posición origen del brazo. Fuente propia.....	38
Tabla 2-10: Tabla de resultado de control de brazo robótico. Fuente Propia.	48
Tabla 3-1: Tabla de precios de componentes del sistema robótico. Fuente propia.....	52
Tabla 3-2: Tabla de horas empleadas en el diseño. Fuente propia.	52
Tabla 3-3: Componentes a fabricar. Fuente propia.	53
Tabla 3-4: Tabla con horas de programación. Fuente propia.	53
Tabla 3-5: Tabla de costos de pruebas.....	54
Tabla 3-6: Tabla general con los gastos totales	54
Tabla 4-1 Características del usuario. Fuente propia.	55
Tabla 4-2 Resultados de la primera sesión. Fuente Propia.....	57
Tabla 4-3: Resultados de pruebas de sujeción de objetos. Fuente propia.....	58

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura introducción 1: Pacientes con esclerosis lateral amiotrófica	2
Figura 1-1: Esquema de una Interfaz Cerebro Computador.....	7
Figura 1-2: Tipos de ondas cerebrales	9
Figura 1-3 Matriz del P300 Speller	10
Figura 1-4 Modelo funcional BCI basada en SSVEP	10
Figura 1-5: Comparación entre la transformada rápida de Fourier	14
Figura 1-6 Dos patrones espaciales comunes (CSP) de un ejemplo correspondiente a tareas de imaginación motora de izquierda y derecha	15
Figura 1-7 Modelo del Proyecto BETTER.....	16
Figura 2-1: Esquema de solución general del sistema. Fuente propia.....	20
Figura 2-2: Kinova- Mico 2.....	22
Figura 2-3: Silla de ruedas eléctrica Optimus.....	23
Figura 2-4: Diagrama de bloques del sistema. Fuente propia	24
Figura 2-5: ASUS modelo K555UQ-XX002	25
Figura 2-6: Cámaras Logitech	27
Figura 2-7: Pares de fotografías tomadas por el sistema estéreo al patrón de “tablero de damas”. Fuente propia	28
Figura 2-8: Objetos predefinidos. Fuente propia	29
Figura 2-9: Fotografía de la escena tomada de la cámara izquierda y derecha respectivamente. Fuente propia	29
Figura 2-10 Detención de imagen por algoritmo SIFT	32
Figura 2-11: Fotografías de las cámaras izquierda y derecha con 300 puntos característicos. Fuente propia	33
Figura 2-12: Reconocimiento de puntos característicos iguales con la imagen izquierda de la escena. Fuente propia	33
Figura 2-13: Reconocimiento de puntos característicos iguales con la imagen derecha de la escena. Fuente propia	34
Figura 2-14: Reconocimiento de la posición de la imagen predefinida en las fotografías de la escena. Fuente propia	34
Figura 2-15: Triangulación para el cálculo de la profundidad	35
Figura 2-16 : Cambio de origen para la sujeción de objetos. Fuente propia	37
Figura 2-17: Coordenadas de la cámara derecha	37

Figura 2-18: Coordenadas del brazo robótico.....	38
Figura 2-19: Posición de origen del movimiento del brazo robótico. Fuente propia	39
Figura 2-20: Coordenadas relativos y absolutas del sistema. Fuente propia	39
Figura 2-21: Soporte unión silla de ruedas - brazo robótico. Fuente propia.....	40
Figura 2-22: Soporte unión brazo robótico – cámaras. Fuente propia.....	41
Figura 2-23: Soporte impreso en impresora 3D. Fuente propia	41
Figura 2-24: Ensamble silla – soporte. Fuente propia	42
Figura 2-25: Ensamble silla – soporte –brazo robótico. Fuente propia	42
Figura 2-26: Ensamble silla - brazo robótico – cámaras. Fuente propia	43
Figura 2-27: Flujo de procesamiento de la señal y extracción de sus características. Fuente propia	45
Figura 2-28: Colocación del EEG EEG g.Nautilus correctamente. Fuente propia	45
Figura 2-29: Señales obtenidas por EEG para estímulo a imágenes P300 (izquierda) y estímulos no objetivos (derecha). Fuente propia	46
Figura 2-30: Brazo controlado con realimentación de información para cálculo de la velocidad del gripper. Fuente Propia	47
Figura 2-31: Diagrama de flujo general del proyecto. Fuente propia.....	49
Figura 2-32: Subrutina “Realizar tareas predefinidas del brazo”. Fuente propia.....	50
Figura 2-33: Diagrama de Flujo del Cliente y Servidor respectivamente. Fuente propia	51
Figura 2-34: Flujo de trabajo del sistema. Fuente propia	51
Figura 4-1 Posición correcta para las sesiones. Fuente propia	56
Figura 4-2: Interfaz gráfica. Fuente propia	56
Figura 4-3: Desarrollo de prueba de sujeción. Fuente propia.....	59

INTRODUCCIÓN

Según Organismo Mundial de la Salud se estima que 15% de la población mundial vive con un tipo de discapacidad y lamentablemente este porcentaje sigue aumentando [1]. En la actualidad el 5.2% de los peruanos tiene algún tipo de discapacidad y más de un millón y medio sufren de alguna limitación. Según un estudio, la discapacidad motora es la que más afecta a los peruanos, llegando a alcanzar la cantidad de 932,000 personas y tiene como principal causa la avanzada edad [2].

Esta condición de discapacidad motora afecta de forma drástica a la población económicamente vulnerable, debido a que al no tener las posibilidades económicas para recibir un buen tratamiento estas personas no consiguen trabajo por muchos obstáculos, tanto emocionales como sociales.

Para las personas que padecen de discapacidades motoras, su estilo y calidad de vida cambia rotundamente debido a que sufren la degeneración progresiva de neuronas motoras, lo cual hace perder la autonomía, esto implica necesitar un acompañamiento permanente para la realización de sus necesidades básicas. Algunas de las enfermedades más conocidas son la Esclerosis Lateral Amiotrófica (ELA), tumores, infecciones o inflamaciones de los tejidos musculares o nerviosos, donde la más grave es la primera debido a que es una enfermedad neurológica progresiva y mortal que ataca a las células nerviosas encargadas de controlar a los músculos voluntariamente [3].

En la figura introducción 1 se puede apreciar a los pacientes de ELA dependiendo de un compañero permanente para sus rutinas diarias, donde este es el principal problema, debido a que una persona normalmente desearía realizar sus actividades de manera independiente.



Figura introducción 1: Pacientes con esclerosis lateral amiotrófica [4].

Teniendo en cuenta la situación anterior la cual es, la dependencia de personas que sufren discapacidad motora como también el rotundo cambio de calidad y estilo de vida, se planteó resolver este problema mejorando su estilo de vida y devolviendo, al menos parcialmente, su dependencia, mediante la implementación de un sistema robótico asistencial, a través una interfaz cerebro computador (BCI).

El interés científico de la realización de esta tesis está en viabilizar la implementación de una interfaz cerebro computador para el control de un sistema robótico asistencial que eventualmente sería usado por las personas que sufran de discapacidades motoras.

La motivación para realizar la tesis radica en devolver la autonomía a las personas que sufren de enfermedades motoras e incrementar su independencia en la realización de las necesidades básicas obteniendo así una mejor calidad de vida.

Ya teniendo establecida la problemática que se quiere resolver con esta tesis, se plantearon objetivos tanto específicos como generales los cuales se exponen a continuación:

Objetivo general

El objetivo general de la tesis es integrar un sistema robótico asistencial con una interfaz cerebro computador con la finalidad de que una persona con discapacidad motora pueda controlar dicho sistema para tareas específicas.

Objetivos específicos

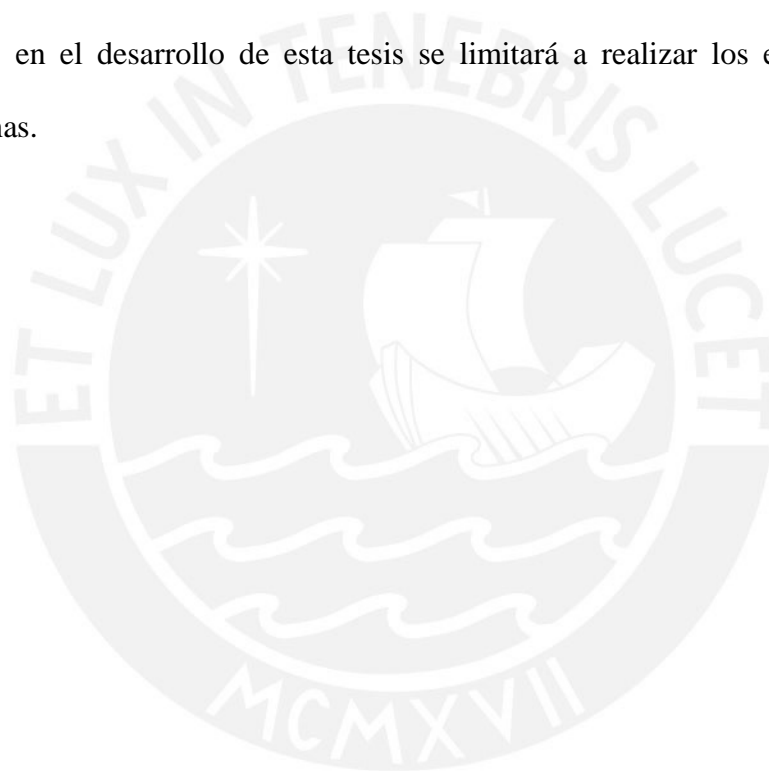
- Determinar, comprender y evaluar el funcionamiento del hardware necesario para realizar la adquisición y procesamiento de las señales electroencefalográficas.
- Determinar, comprender y evaluar el funcionamiento del hardware necesario para el movimiento del sistema robótico.
- Desarrollar e implementar algoritmos de control para los movimientos del sistema robótico.
- Desarrollar e implementar algoritmos para producir los comandos para el control del sistema robótico.
- Desarrollar la comunicación entre el sistema robótico con los comandos producidos por las señales cerebrales.
- Desarrollar e implementar la integración de todo el sistema robótico asistencial con la interfaz cerebro computador.
- Establecer la secuencia y la forma en la que se realizarán los experimentos.

El desarrollo e implementación de un hardware y software necesario para la independencia completa de una persona con discapacidad motora, demandaría muchas horas-hombre, por lo que el presente trabajo no contempla el desarrollo de un sistema que

busque la independencia completa de la persona, sino más bien se limita a una independencia parcial de una persona con discapacidad motora para la realización de sus tareas cotidianas.

Aunque el sistema de interfaz cerebro computador con su aplicación tiene como finalidad ayudar a personas con problemas motores, es posible desarrollar y realizar los experimentos de prueba con los datos recolectados de personas sanas aprovechando que las personas sanas tienen mayor disponibilidad de tiempo.

Por ello, en el desarrollo de esta tesis se limitará a realizar los experimentos con personas sanas.



FUNDAMENTO TEORICO

1.1 Tratamientos comunes para personas con discapacidad motora

1.1.1 Terapia física

Ayuda al paciente a integrar y estimular los movimientos voluntarios en su propia secuencia de desarrollo. La finalidad es que el paciente adquiera conciencia de sus movimientos [6].

1.1.2 Terapia acuática

Aplicada más para los niños con discapacidades motrices, aplicando el Principio de Arquímedes (“el principio de Arquímedes afirma que todo cuerpo sumergido en un fluido experimenta un empuje vertical y hacia arriba igual al peso de fluido desalojado”) [7]. Se puede utilizar para tratar segmentos corporales y realizar ejercicios de activa asistida, también es posible utilizar la resistencia del agua al rozamiento, esta resistencia se hace mayor cuanto más rápido sea el movimiento dentro de agua o mayor sea la superficie que el cuerpo ofrezca en este ambiente [8].

1.1.3 Tratamiento neuro-rehabilitador

El objetivo principal del tratamiento neuro-rehabilitador es el de prolongar la capacidad funcional, promover la independencia y ofrecer al paciente la mayor calidad de vida posible [9].

1.1.3.1 Primera fase: pacientes independientes

El tratamiento rehabilitador consiste en realizar ejercicios que mantengan los balances articulares y potencien la musculatura no deficitaria, y evitar los ejercicios que aumenten

la fatiga [9].

1.1.3.2 Segunda fase: paciente parcialmente independiente

El tratamiento rehabilitador consiste en que este momento es fundamental empezar a instruir a la familia del enfermo sobre los cuidados que éste necesita (cambios posturales, movilizaciones pasivas, etc.), así como sobre las ayudas técnicas que pueden mejorar su calidad de vida (camas clínicas, cojines y colchones anti escaras, grúas para transferencias, etc.) [9].

1.1.3.3 Tercera fase: paciente totalmente dependiente

Es fundamental brindar el apoyo psicológico al paciente, no descuidar el apoyo y la atención tanto al paciente como al cuidador, debido a que el cuidador puede verse afectado por el esfuerzo el estrés, por eso en esta tercera fase comprende al paciente y al cuidador [9].

1.2 Interfaz Cerebro Computador

Una Interfaz Cerebro Computador o más conocida por su nombre en inglés *Brain Computer Interfaces* (BCI) se define como: “Un sistema de comunicaciones entre hardware y software que permiten a las personas interactuar con su entorno” [10]. También se define como: “Una interfaz para el usuario, que ayuda a comunicarse a las personas que sufre de discapacidades física, mediante ondas cerebrales, controlando dispositivos” [11]. El BCI es usado hoy en día en diferentes aplicaciones tales como control de video juegos [12], control de silla de ruedas [13], control de brazo robótico [14], etc.

BCI tiene diferentes campos de aplicaciones, hoy en día es un área muy activa debido a que tiene como objetivo ayudar a las personas con discapacidades físicas. Evidenciando

la necesidad de esto, se puede ver que en la actualidad el número de personas que sufren de ELA sigue aumentando llegando a la cantidad de 5 por cada 100,000 en el mundo [15]. Aunque llevar una vida normal no será posible este sistema BCI ayuda a mejorar la calidad de vida de la persona afectada. En la figura 1.1 se muestra el principio básico de funcionamiento de la interfaz cerebro computador, donde empieza con la actividad cerebral del usuario, pasando al bloque de adquisición de la señal donde se amplifican y se realiza la conversión de análogo a digital, pasando al bloque de procesamiento de la señal, este bloque se caracteriza por tener 3 etapas principales: cancelación de ruido, obtención de características y decodificación de las características en último punto se tiene el bloque de aplicación donde se realizan acciones con la señal de control.

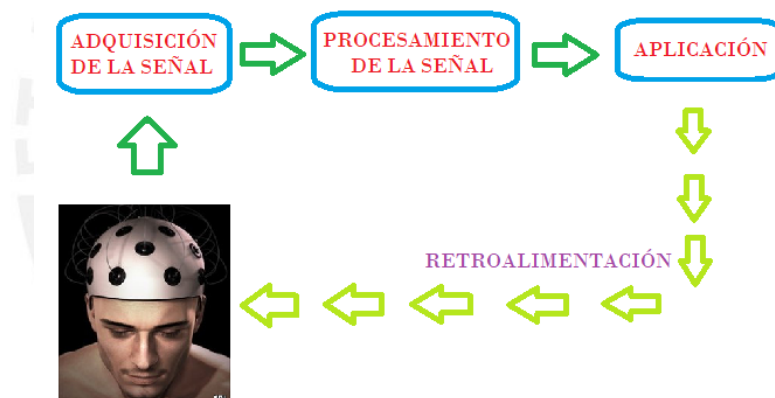


Figura 1-1: Esquema de una Interfaz Cerebro Computador
Fuente propia.

1.3 Paradigmas

BCI usa diferentes paradigmas, sin embargo, los más usados en la actualidad son: Potencial Relacionado a Eventos (ERP, siglas en inglés), Potencial Evocado por Estados Visuales (SSVEP, siglas en inglés) y ritmos sensoriomotores [16].

Los paradigmas ERP y SSVEP son clasificados como exógenos porque requieren de un estímulo externo, mientras que ritmos sensoriomotores se consideran como endógenos porque son recordados por el mismo usuario sin necesidad de un estímulo externo.

1.3.1 Ondas cerebrales

En el cerebro se producen los impulsos eléctricos que viajan por las neuronas, estos impulsos producen señales las cuales se conocen como ondas cerebrales. Los impulsos viajan de neurona a neurona y la actividad de las ondas cerebrales se observa por medio de un electroencefalograma o EEG [17].

Existen cuatro tipos principales de ondas cerebrales: Alfa, beta, theta y delta, (figura 1.2). A continuación, se describen dichas ondas.

Ondas Beta: Esta onda está presente cuando el cerebro está despierto e implicado en actividades mentales, su frecuencia oscila entre 14 y 30-35Hz. Actividades en las que están presentes estas ondas: discursos, estudiando, resolviendo problemas matemáticos, etc [17].

Ondas Alfa: Esta onda es más lenta y de mayor amplitud que las ondas beta, su frecuencia oscila entre 8 y 14 Hz debido a que refleja una escasa actividad cerebral. Actividades en las que están presentes estas ondas: sentarse a descansar, personas paseando, disfrutando el paisaje, etc. [17].

Ondas Theta: Esta onda tiene una frecuencia que oscila entre 4 y 8 Hz, se alcanza estando en un estado de calma profunda. Actividades en las que están presentes estas ondas: realizar tareas automáticamente, estar distraído, estado de inspiración de ideas creativas [17].

Ondas Delta: Esta onda es la de mayor amplitud y menor frecuencia, su frecuencia oscila entre 1 y 4 Hz, nunca llega a 0 debido a que eso significa la muerte cerebral, esta onda está presente en estado de sueño. Actividades en las que están presentes estas ondas: presentes cuando estamos en un sueño profundo [17].

ONDAS CEREBRALES

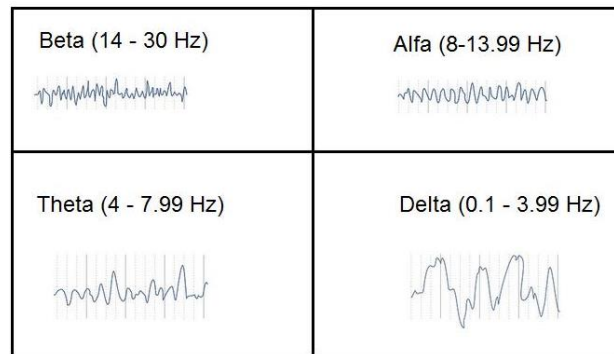


Figura 1-2: Tipos de ondas cerebrales [17].

1.3.2 Potencial relacionado a eventos

Potencial relacionado a eventos, también conocido como Event-Related Potential (ERP), es definido como los cambios en el potencial eléctrico cerebral relacionado específicamente con un estímulo, esencialmente visual o auditivo, de ahí viene su nombre “Potenciales relacionados a eventos” [18]. En este paradigma, el P300 es el más popular aplicándose en “El deletreador”, el cual es utilizado como una forma de comunicación para los pacientes que sufren de ELA [16]. El P300 se caracteriza por tener una variación en la amplitud de la señal electroencefalográfica (EEG), el cual ocurre 300ms después de un estímulo no frecuente. En la figura 1.3, se muestra la matriz de letras introducidas inicialmente por Farwell y Donchin, la dinámica era iluminar la matriz de forma aleatoria mientras que la persona con ELA se enfoca en la letra que quiere elegir para después ser seleccionada y mostrada en la interfaz.

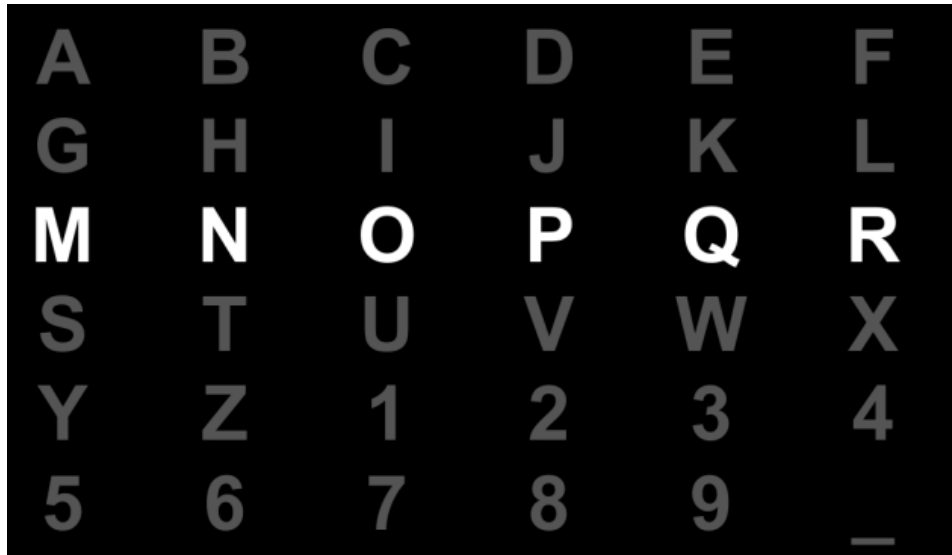


Figura 1-3 Matriz del P300 Speller [18].

1.3.3 Potencial evocado por estados visuales

Potencial evocado por estados visuales refleja la actividad cerebral producida por el procesamiento de información visual, en SSVEP se produce para estímulos con frecuencias mayores a 6 Hz [19]. En la figura 1.4 se presenta su modelo funcional, está compuesto por un estimulador visual, una etapa de adquisición, una etapa de procesamiento y por último la aplicación en dispositivos.

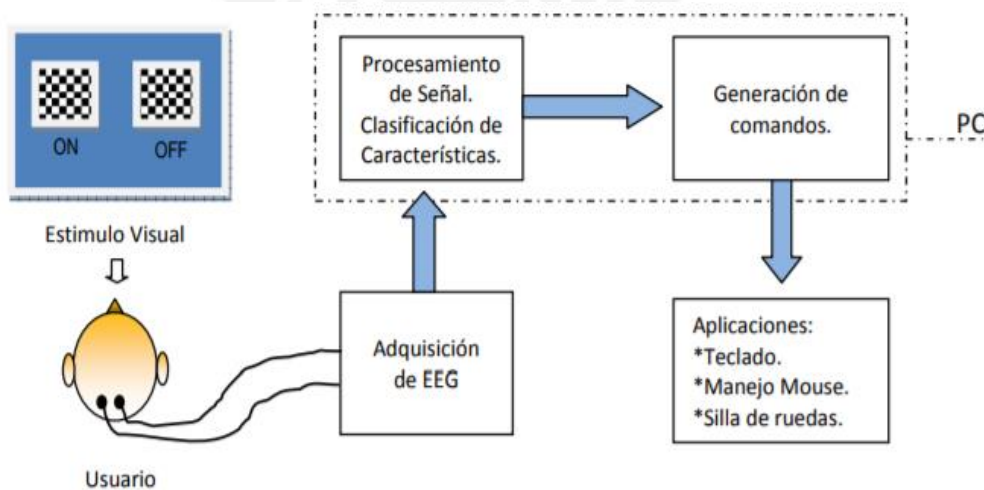


Figura 1-4 Modelo funcional BCI basada en SSVEP [19].

1.3.4 Ritmos sensoriomotores

Los ritmos sensoriomotores usan ondas de la actividad cerebral localizadas en las bandas mu (8 – 12 Hz) y beta (18 – 26 Hz).

Los ritmos están relacionados con la imaginación de movimientos de las personas y no es necesario de su acción de los movimientos reales, gracias a esta propiedad es posible usar los ritmos sensoriomotores para el diseño de un BCI sin embargo el control de estos ritmos no es sencillo debido a que la mayoría de las personas tienen dificultades con la imaginación de los movimientos [20].

Los ritmos sensorio-motores experimentan dos tipos de modulaciones las cuales son: eventos relacionados de desincronización y eventos relacionados de sincronización, estos se generan durante la realización o imaginación de algún movimiento. Los eventos relacionados de desincronización están ligados con la preparación e inicio del movimiento por lo que involucra la atenuación de la amplitud de los ritmos mu y beta, en cambio los eventos relacionados de sincronización están ligados a después de realizado el movimiento por lo que involucra al incremento de amplitud de los ritmos mu y beta [20].

1.4 Adquisición de la señal

El objetivo de un BCI es reconocer patrones en las señales cerebrales las cuales serán procesadas para su posterior aplicación. Se tienen 2 técnicas de adquisición, las cuales son: técnicas invasivas y técnicas no invasivas [21].

También en la adquisición de la señal los electrodos cumplen un papel muy importante, debido a que son estos quienes capturan la señal, entre los cuales se tienen a los electrodos pasivos y activos.

1.4.1 Técnica invasiva

Una técnica invasiva es cuando necesariamente la adquisición de la señal se tiene que realizar dentro de la persona con el fin de tomar medidas de mejor calidad en mayor resolución. Para el uso de esta técnica se hace uso de tecnología invasiva de sensores, como son los microelectrodos, los cuales se implantan en el cerebro, por ello esta técnica tiene riesgos médicos.

Existen 2 métodos con técnica invasiva los cuales son los más usados en la BCI, la primera es la electrocorticografía (ECoG) donde se realiza la colocación de electrodos en la superficie cortical, la segunda es la grabación neuronal intracortical en este método se implanta electrodos dentro de la corteza cerebral [22].

1.4.2 Técnica no invasiva

En una técnica no invasiva, no es necesario la intervención quirúrgica debido a que los electrodos se colocan en la superficie externa del cráneo en comparación con las técnicas invasivas, el nivel de señal tanto su calidad y su resolución es mucho más pobre.

La adquisición de datos con esta técnica se da por electroencefalografía (EEG), la magnetoencefalografía (MEG) o resonancia magnética funcional (fMRI), estos dos últimos utilizan instrumentos muy costosos y de grandes dimensiones por esto el EEG es el más usado en el BCI [22].

1.4.3 Tipos de electrodos

1.4.3.1 Electrodo pasivos

Los electrodos pasivos en su mayoría son de: cloruro de plata, estaño, hierro u oro y se recomienda no usar electrodos de distintos materiales. Uno de los problemas con este tipo

de electrodos es el procedimiento que requiere para su colocación debido a que es muy tediosa, pero son el tipo de electrodos más usado en EEG, debido a que son más fáciles de diseñar y no son costosos [23].

1.4.3.2 Electrodo activo

En los electrodos activos viene integrado un pre-amplificador que es de bajo ruido para agrandar directamente las señales EEG en el lugar del registro, esta es su gran ventaja ante los electrodos pasivos [24].

1.5 Procesamiento de la señal

En la adquisición de la señal, especialmente en la técnica no invasiva, las señales de entrada siempre contienen algunos datos no deseados (ruido). Estos datos no deseados pueden llevar a una conclusión errónea, por lo que las señales de entrada deben de ser pre-procesadas.

Se puede procesar la señal en el dominio del tiempo o en el dominio de la frecuencia o se puede usar los dos dominios para mejorar la calidad de procesamiento. A continuación, se presentan algunos métodos para la filtración del ruido y la extracción de las características principales.

1.5.1 Transformada de Wavelet

La transformada de Wavelet (WT, siglas en inglés) es una herramienta matemática valiosa para las señales no estacionarias, las señales EEG no son estacionarias por lo cual la WT es muy útil con estas señales.

La WT a diferencia de la transformada de Fourier permite diferentes frecuencias con duración finita sin embargo tiene limitaciones en cuanto a la resolución de escalas de

tiempo y frecuencia. En la figura 1.5 se muestra una comparación entre la transformada de Fourier y Wavelet.

El análisis de la WT permite hacer una representación de la señal como una expansión de coeficientes del producto entre la Wavelet Madre, las funciones obtenidas por escalamiento, la traslación de esta y la señal [25].

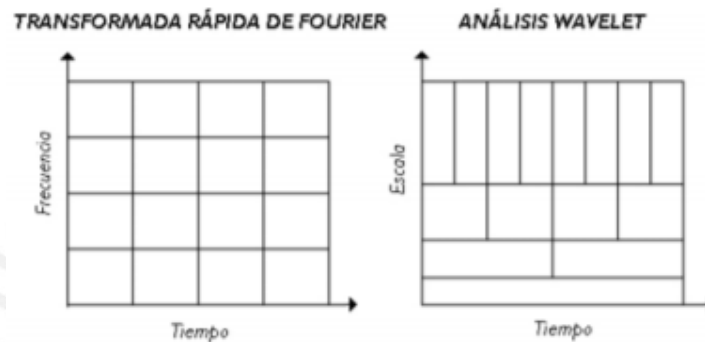


Figura 1-5: Comparación entre la transformada rápida de Fourier (tiempo-frecuencia) y el análisis Wavelet (tiempo-escala) [25].

1.5.2 Filtro adaptativo

La mayor parte del tiempo se desconocen las bandas de frecuencias con las señales no deseadas debido a que siempre están cambiando por lo tanto un filtro pasa-banda no siempre funciona. El filtro debe adaptarse a la señal de entrada por lo que un filtro predictivo es una buena opción.

La ecuación de entrada-salida de un filtro adaptativo digital:

$$y(n) = \sum_{i=0}^N a_i(n)x(n-i) - \sum_{j=1}^M b_j(n)y(n-j),$$

donde $x(n)$ e $y(n)$ son las muestras de entrada y salida, respectivamente, en el instante n , $a_i(n)$ y $b_j(n)$ son los pesos del filtro i -ésimo y j -ésimo en el instante n , y $N + M + 1$

es el número total de coeficientes del filtro. Si en lugar de usar $ai(n)$ y $bj(n)$ se utilizan ai y bj , los coeficientes ya no serían variantes con el tiempo [26].

1.5.3 Patrones espaciales comunes

Los patrones espaciales comunes (CSP, siglas en inglés) es uno de los métodos para la extracción de características que procesa señales de diferentes canales EEG para diseñar filtros especiales, se encarga de maximizar la varianza para un conjunto de datos y minimizar la varianza del otro conjunto de datos con lo cual resalta la diferencia y minimiza las similitudes.

La figura 1.6 muestra dos patrones espaciales comunes que provienen de una señal EEG donde se ha usado la estrategia mental de imaginación motora en tareas de movimiento de la mano izquierda y derecha. La imaginación motora de la mano izquierda induce patrones de actividad sensoriomotora (ERD/ERS) sobre las áreas sensoriomotoras del lado derecho del cerebro y viceversa [27].

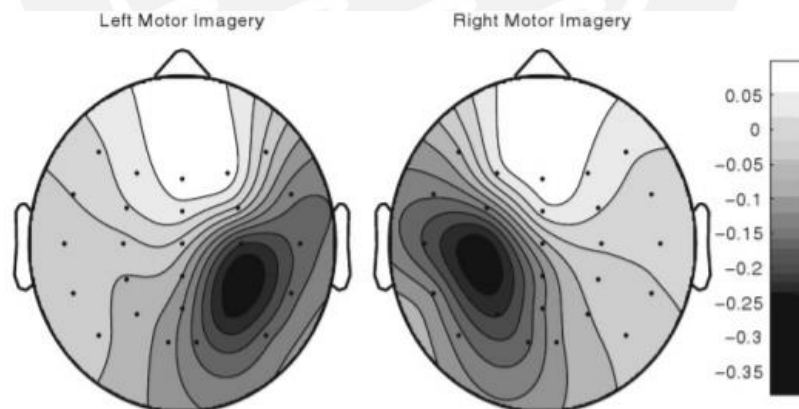


Figura 1-6 Dos patrones espaciales comunes (CSP) de un ejemplo correspondiente a tareas de imaginación motora de izquierda y derecha [27].

El CSP incrementa la precisión para BCI síncronos, sin embargo, no ofrece la misma mejora para los BCI asíncronos, por lo que es una desventaja con el Wavelet [27].

1.6 Aplicaciones de un sistema BCI en la actualidad

Son muchas las aplicaciones que uno puede pensar con esta tecnología. Uno de los campos en donde está siendo usado es en los videojuegos, específicamente el control de videojuegos por medio de la BCI, y es que es un mercado muy tolerante a los cambios drásticos de la tecnología, buscando la comodidad del usuario. De hecho, el Emotiv EPOC el cual es un dispositivo con interfaces BCI para videojuegos está teniendo bastante acogida.

Por otro lado, en la investigación, recuperar o sustituir actividades humanas motoras ha sido una de las áreas más frustrantes pero la tecnología BCI ha permitido que se logren bastantes avances en esta área; por lo cual se han realizado proyectos con financiamiento en gran parte del mundo, como, por ejemplo:

- El BRAIN2ROBOT fue un proyecto financiado por el the EU's sixth Framework Programme (FP6).

Objetivo: Integrar la tecnología BCI con la tecnología de un “eye tracker” (seguimiento ocular) para mover un brazo robótico asistente de una persona discapacitada en tareas diarias [28].

- Proyecto BETTER (BNCI-driven robotic physical therapies in stroke rehabilitation of Gait disorders) con una financiación de 2.95 millones de euros a 3 años.

Objetivo: Mejorar las terapias de rehabilitación física de desórdenes de la marcha para personas que han sufrido accidentes vasculares [29]. En la figura 1.7 se muestra el modelo del proyecto Better.

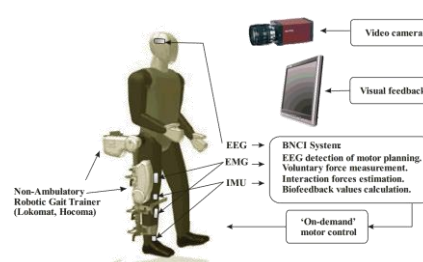


Figura 1-7 Modelo del Proyecto BETTER [29].

DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA Y MÉTODOS

Este diseño apoya en brindar una solución a la dependencia que presenta una persona con discapacidad motora para el desarrollo de sus actividades cotidianas teniendo en cuenta que se desea que tenga su ergonomía, practicidad de uso y una buena funcionalidad. A continuación, se presentarán los requerimientos del sistema y su concepto de solución.

2.1 Requerimientos del sistema

Los requerimientos fueron elaborados teniendo en cuenta las necesidades del usuario se detalla a profundidad en la lista de exigencias que se encuentra en el Anexo A.

2.1.1 Requerimientos mecánicos

- Todos los componentes utilizados en el montaje del sistema robótico deben de ser ergonómicos para una persona con discapacidad motora (usuario).
- Los componentes deberán ser del menor peso posible para ser transportable debido a que el sistema robótico se trasladará con el usuario para realizar sus tareas cotidianas.
- El sistema mecatrónico deberá brindar seguridad al usuario en la realización de sus tareas.
- El sistema mecatrónico no debe de ser tan robusto debido de que es un sistema de uso cotidiano.
- El uso de sistema mecatrónico está restringido para que se use en zona urbana y superficies planas.
- En el diseño del sistema robótico se debe de tomar en cuenta que no debe de ocupar más de 0.80 x 0.80 x 1.50 m, debido a que las áreas urbanas son por donde se va trasladar el sistema robótico, principalmente en el hogar y tendrá que moverse por pasajes y puertas.

- El volumen de trabajo establecido por el sistema debe de ser $0.63 \times 0.63 \times 0.63$ m debido a que este es el volumen de trabajo promedio de un brazo adulto [30].
- El peso máximo del usuario debe de ser de 90 kg además el peso de los objetos a mover por el sistema robótico debe de tener un peso máximo de 2 kg y un volumen aproximado de $5 \times 5 \times 10$ cm debido a que es el volumen promedio que alcanza una mano adulta [30].

2.1.2 Requerimientos eléctricos y electrónicos

- El sistema deberá contar con sensores que deberán ayudar con la adquisición de señales EEG.
- Se deberá implementar un sistema de transmisión y recepción de datos de manera inalámbrica entre la recolección de señales EEG y el procesamiento de la señal, con una capacidad mínima de comunicación de 10Mbits/s.
- El sistema deberá contar con una pantalla, la cual funciona como una interfaz gráfica de comunicación entre el usuario y el sistema.
- La alimentación del sistema se realizará con una fuente externa (batería) de 24V.
- El sistema contará con actuadores para realizar tareas preestablecidas por el usuario.

2.1.3 Requerimientos de control

- Se controlará la velocidad de trabajo del sistema con el objetivo de cumplir las funciones preestablecidas.
- El sistema mecatrónico deberá tener un sistema anticolidión para evitar dañar al usuario en caso se produzca una obstrucción o un choque con algún objeto.
- El sistema mecatrónico deberá contar con un control sobre el volumen de trabajo con el fin de realizar las tareas preestablecidas.

- Las tareas preestablecidas serán de mover diferentes objetos, por lo que se necesita saber la posición de los objetos en el espacio con un error máximo de 10 mm.

2.2 Concepto de integración definitiva

El sistema mecatrónico deberá realizar las tareas de trasladarse por una superficie plana y sujetar los objetos para su posterior traslado, a través de órdenes creadas por las señales cerebrales.

El concepto de solución óptimo es resultado de aplicar la metodología del diseño mecatrónico. El proceso está documentado y se puede observar en los Anexos B, C, D y E.

2.2.1 Solución óptima

Según la problemática descrita anteriormente, se desea devolver la autonomía a la persona con discapacidad motora usando una interfaz cerebro computador (BCI) con el paradigma potencial relacionado a eventos se decidió usar este paradigma debido a que este paradigma usa EEG el cual es un procedimiento no invasivo y de fácil colocación, además de que se escogió la mejor forma de presentarle al usuario las tareas preestablecidas sería a través de imágenes las cuales se harán parpadear a diferentes frecuencias identificando cada tarea con este paradigma.

En la figura 2.1 se presenta el esquema de la solución planteada, donde se observa que la adquisición de señales cerebrales será realizada por electrodos que estarán conectados de manera inalámbrica a la computadora portátil principal para el posterior procesamiento de las señales; estas señales cerebrales serán producidas por estímulos visuales por medio de la pantalla de la computadora portátil. Para el movimiento de traslación de la persona se empleará una silla de ruedas eléctrica, en la cual estará montado el brazo robótico para

la sujeción de los objetos predefinidos. La captura de la posición del objeto será detectada por dos cámaras, que se encontrarán en el actuador final del brazo robótico. Todos estos dispositivos estarán conectados a la computadora portátil principal, la cual funcionará como el dispositivo de control de todo el sistema donde su pantalla funcionará como una interfaz de estimulación de señales cerebrales entre el usuario y el sistema. Todos los dispositivos a excepción de los electrodos serán energizados por una batería de 24V, esta batería se encontrará en la parte inferior posterior de la silla de ruedas.

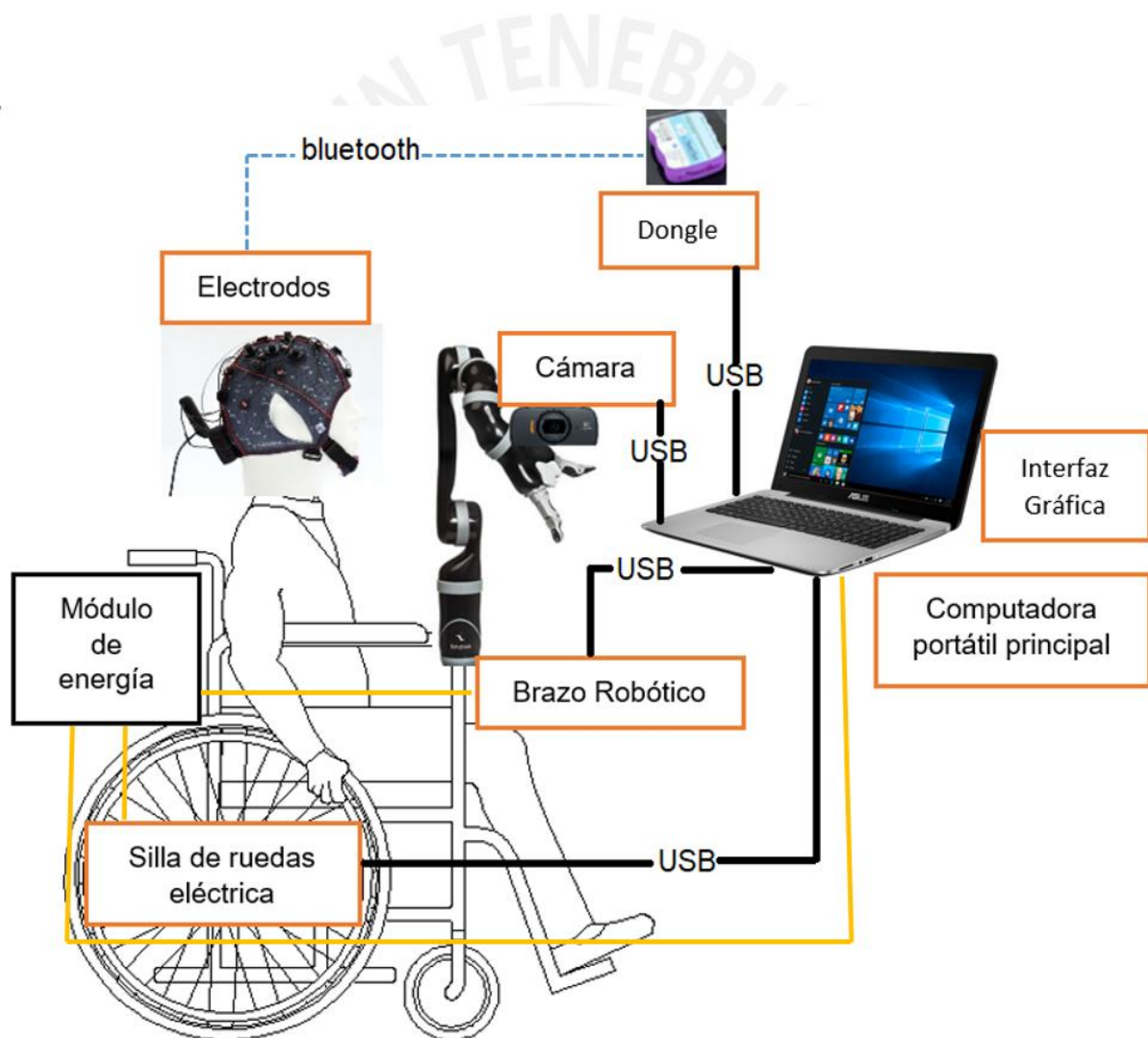


Figura 2-1: Esquema de solución general del sistema. Fuente propia.

2.3 Sistema electrónico

Para el diseño de este sistema, se seleccionaron diferentes actuadores los cuales estaban contemplados en el concepto de solución definitivo.

2.3.1 Sensores y actuadores

2.3.1.1 Brazo robótico

Para la realización de las tareas del sistema se decidió usar un brazo robótico, debido a que es lo más parecido a un brazo, el brazo y los pies son las partes del cuerpo más usadas por las personas para la realización de las tareas diarias [31]. Para que el brazo robótico cumpla las características del brazo humano, se tomaron en cuenta las principales características que son necesarias para el sistema mecatrónico, las cuales son: longitud del brazo, volumen de trabajo, velocidad del brazo y el peso que soporta.

En la siguiente tabla 2.1 se puede observar las características principales del brazo humano que fueron calculadas.

Tabla 2-1: Ensayos de velocidad del brazo de una persona de 22 años. Fuente propia.

Longitud del brazo (m)	Volumen de trabajo (m ³)	Tarea Realizada	Distancia recorrida (m)	Tiempo (s)	Velocidad Promedio (cm/s)
0.63	0.262	Acercar una taza de leche	0.30	1.35	22.22
0.63	0.262	Agarrar una botella de agua	0.40	1.96	20.41
0.63	0.262	Agarrar un lapicero	0.35	1.61	21.74

Al finalizar los experimentos, se llegó a la conclusión que la velocidad promedio de un brazo es alrededor de 21.46 cm/s y se observó que la cantidad de peso que podía soportar en la mano con el brazo extendido por un tiempo de 2 minutos era de 1 kg.

En la tabla 2.2 se muestran diferentes brazos robóticos con sus características.

Tabla 2-2: Comparación entre los brazos robóticos. Fuente propia.

Brazo Robótico	Largo (m)	Velocidad (cm/s)	Volumen de trabajo (m ³)	Peso (kg)	Peso carga (kg)	Fuente de alimentación
Arm LWA 4D [32]	1.05	2-28	0.752	17.5	10	24V DC
Kinova-Mico 2 [33]	0.85	3-25	0.623	3.8	2.7	24V DC
Kinova- Jaco 3 [33]	1.20	3-25	1.024	4.4	2.1	24V DC
BionicCobot [34]	0.70	3-22	0.356	6	1.5	24V DC

Todos los brazos robóticos cumplen con las características para la elaboración de las tareas necesarias del sistema. Por motivos de disponibilidad para la implementación, se escoge el brazo robótico Kinova-Mico 2 (figura 2.2), debido a que este se encuentra en la Pontificia Universidad Católica del Perú y su disponibilidad es inmediata.



Figura 2-2: Kinova- Mico 2 [33].

2.3.1.2 Silla de ruedas

La tarea principal de este dispositivo es realizar el traslado de la persona, en la tabla 2.3 se observa la comparación entre diferentes tipos de sillas eléctricas.

Tabla 2-3 Comparación entre las sillas eléctricas. Fuente propia

Silla de ruedas	Peso (kg)	Peso que soporta (kg)	Velocidad (km/h)	Duración en km
OPTIMUS 2 2.322 [35]	150	150	6 / 10 / 15	70
ICHAIR MC1 1.610[36]	280	120	6	40
1595-Nemo- Vertival [37]	295	100	6	35
Clou 9.500 [38]	210	120	6	40
Solero Light 9.072 [39]	183	130	6	40

Por motivos de disponibilidad para la implementación del proyecto, se decide usar la silla de ruedas OPTIMUS 2 (figura 2.3), debido a que esta se encuentra en la Pontificia Universidad Católica del Perú y su disponibilidad es inmediata.



Figura 2-3: Silla de ruedas eléctrica Optimus 2 [35].

2.3.2 Comunicación

El sistema mecatrónico está conformado por siete módulos electrónicos que interactúan entre sí: Electrodo con transmisor de señales EEG, receptor de señales EEG, brazo robótico, computadora principal, silla de ruedas, cámara, módulo de alimentación general; en la figura 2.4, se visualiza la interacción del sistema mediante un diagrama de bloques.

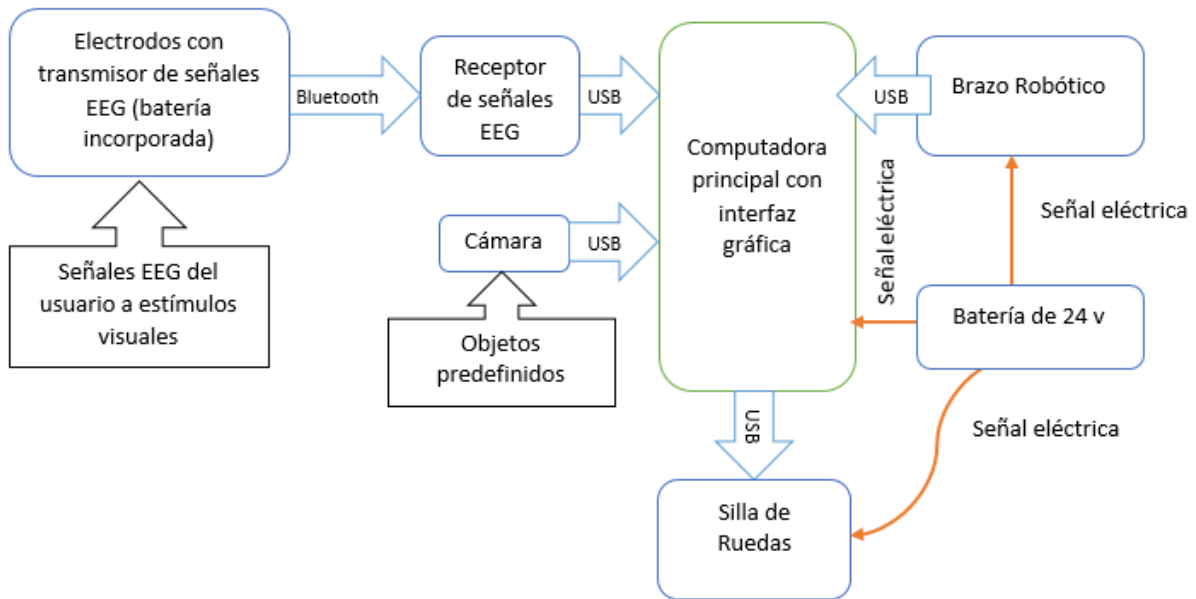


Figura 2-4: Diagrama de bloques del sistema. Fuente propia.

Cinco dispositivos se enlazan directamente con la computadora principal, donde cuatro de ellos (receptor de señales EEG, cámara, brazo robótico, silla de ruedas) se comunican por el protocolo estandarizado USB, el último dispositivo (interfaz gráfica) viene integrada en la computadora.

La computadora principal se conecta a los 4 dispositivos periféricos, por medio de una comunicación serial USB 2.0 con una velocidad máxima de 480 Mbps. En la computadora principal se ejecutará el programa de la interfaz visual, el programa que controle el brazo robótico y la silla de ruedas, el programa que realice el procesamiento y la extracción de características de la señal y el programa que capture la posición del objeto predefinido en el entorno.

Para la interfaz gráfica y el procesamiento de las señales como la extracción de características, se utilizará el programa visual studio 2017 con el lenguaje de programación C++, por lo que se requiere que el sistema operativo principal sea Windows, para el control de la silla de ruedas y el brazo robótico se utilizará el lenguaje Python por lo que se requiere

también el uso del sistema operativo Linux. El sistema operativo Linux se ejecutará en la computadora principal mediante una máquina virtual logrando así la ejecución de los dos sistemas en simultáneo. Se propone el uso de la laptop ASUS modelo K555UQ-XX002 (figura 2.5) debido a que esta se encuentra en la Pontificia Universidad Católica del Perú y su disponibilidad es inmediata, sus características se presentan en la tabla 2.4.

Tabla 2-4: Tabla de características de la computadora principal. Fuente propia

	Requerido	K555UQ-XX002
Procesador	Intel Core™	Intel Core™ i7-6500U 2.50Ghz
Memoria RAM	1 GB	8 GB DDR3 ampliable
Almacenamiento	10 GB	1TB 5400RPM
Pantalla	LED 10.2"	LED 15.6"
Dimensiones	250 x 300 x 27 mm	256 x 382 x 25.3 mm
Peso	2 kg	2.3 kg
Puertos USB	3 puertos USB	3 puertos USB



Figura 2-5: ASUS modelo K555UQ-XX002 [40].

2.4 Sistema de visión artificial

El objetivo del sistema de visión artificial es reducir la carga cognitiva del usuario y mejorar el desempeño general del sistema, el cual es desarrollado para la tarea de agarre y acercamiento de objetos al usuario en actividades de la vida diaria, en entornos naturales y no ordenados.

2.4.1 Especificaciones, selección de cámaras

Se plantea la ubicación del efector final. Esta configuración permitirá tener una vista cercana del objeto a reconocer y además, al estar colocada en el manipulador, puede tomar una vista panorámica útil para mostrar al usuario y para una identificación inicial de los objetos del entorno.

Debido a que los objetos van a ser agarrados por el manipulador, es necesario tener la ubicación espacial de los objetos, y por ello se requiere que la cámara detecte profundidad. Existen varias maneras de detectar profundidad, de ellas se ha escogido la configuración estéreo ya que existen diversos papers que respaldan su uso [41] y por otro lado las técnicas de tiempo de vuelo y de luz estructurada aún no han sido muy estudiadas en la aplicación con manipuladores. Ya que no existen muchas cámaras estéreo a color en el mercado, se plantea armar un arreglo personalizado con 2 cámaras idénticas. Además, se plantea el uso de sensores RGB en vez de monocromáticos con la finalidad de disponer de mayor información visual en la implementación de los algoritmos de reconocimiento de objetos.

La carga máxima que puede manipular el robot MICO es de 2.7 kg, por lo que la cámara debe ser ligera, se plantea un máximo de 600 g. Se asume que el peso de la estructura soporte será como máximo de 150 g, por lo que el peso de cada cámara no deberá superar los 300 g.

De las diversas conexiones existentes se plantea el uso de USB ya que el procesamiento se realizará en una laptop y para evitar el uso de componentes, adaptadores adicionales. La velocidad de procesamiento del sistema será de 2.5 GHz, debido a que en primer lugar deberá procesar las señales EEG, en segundo lugar, el sistema estará limitado por el usuario que presentará diversas discapacidades y en tercer lugar porque no se requieren

movimientos rápidos del manipulador, sino más bien alta precisión. Por ello también se plantea un número de cuadros por segundo (fps) no menor a 15.

De las cámaras web encontradas, que han sido usadas en efector final marca Logitech. Las cámaras actuales que dispone esta marca se presentan dos de ellas (figura 2.6) y sus características (tabla 2.5)



Figura 2-6: Cámaras Logitech. [42]

Tabla 2-5: Características de las cámaras

Marca	Modelo	Resolución	Campo de Visión	FPS	Distancia Mínima al Objeto (MOD)	Peso	Precio (soles)
Logitech	C270	1280x960 (1.2 MP)	60°	30fps @ 640x480	-	75 g	100
Logitech	C525	2MP	69°	30fps @ 640x480	7 cm	88 g	200

Todos los precios deben ser multiplicados por 2 ya que se usará una configuración estéreo. Finalmente, se decidió utilizar las cámaras Logitech C525, debido a que es la que cuenta con más campo de visión.

2.4.2 Calibración

La calibración ha sido realizada usando la aplicación “Stereo Calibration App” de Matlab. La aplicación produce un objeto que contiene los parámetros del sistema estéreo. Para calibrar el sistema se necesita tomar múltiples fotografías a un patrón de “tablero de damas” (figura 2.7).

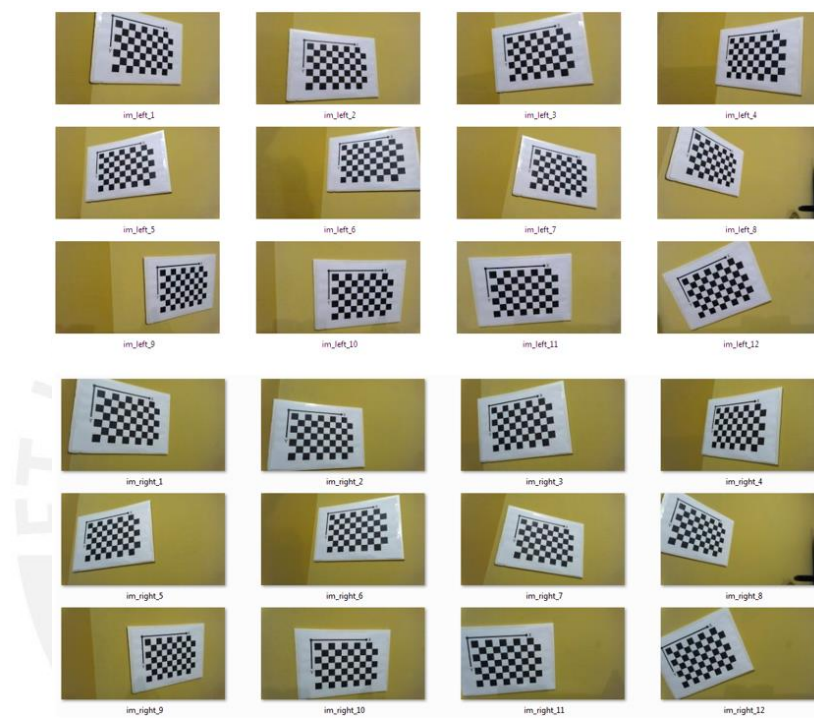


Figura 2-7: Pares de fotografías tomadas por el sistema estéreo al patrón de “tablero de damas”. Fuente propia.

2.4.3 Captura de escena

Para la captura de la escena, en la interfaz gráfica se visualizan diferentes imágenes, los cuales son los objetos predefinidos, como se muestran en la figura 2.8. Previamente el brazo robótico tiene que estar instalado en la computadora, los pasos para su instalación se encuentran en el Anexo G.



Figura 2-8: Objetos predefinidos. Fuente propia.

Se selecciona una de estas imágenes y después de seleccionar la imagen predefinida a través de las señales EEG (apartado 3.6.2) se realiza la captura de imagen de la escena en tiempo real usando las dos cámaras (figura 2.9) que se encuentran en el gripper.



Figura 2-9: Fotografía de la escena tomada de la cámara izquierda y derecha respectivamente. Fuente propia.

2.4.4 Procesamiento de las imágenes

2.4.4.1 Transformación de la característica invariante de la escala

La transformación de las características invariantes de la escala o más conocida como Scale-invariant feature transform (o SIFT siglas en inglés) es un algoritmo muy usado en la visión artificial sirve para la detección de objetos, detección de movimiento, registro de la imagen, estereopsis y otras tareas. Este algoritmo consiste 5 etapas principales, las cuales se presentan a continuación:

2.4.4.1.1 Detección de extremos en la escala-espacio

En esta etapa se aplica la diferencia gaussiana o DoG con diferentes tamaños de región t , donde se buscan los máximos locales a lo largo del espacio que es determinado por las coordenadas “ x ” e “ y ” en la imagen y en escalas determinada por $k\sigma$.

$$D(x, y, \sigma) = L(x, y, k_i\sigma) - L(x, y, k_j\sigma),$$

$$L(x, y, k\sigma) = G(x, y, k\sigma) * I(x, y).$$

Donde:

$I(x, y)$ es la imagen original.

$G(x, y, k\sigma)$ es el desenfoque Gaussiano a escalas $k\sigma$.

Una vez ya obtenidas las imágenes DoG a diferentes escalas $k\sigma$, se deben identificar los puntos clave, los cuales son los puntos máximos y mínimos locales de las imágenes DoG. Estos puntos se obtienen comparando cada pixel de las imágenes DoG con sus 8 vecinos más cercanos en la misma escala y sus nueve vecinos correspondientes en una escala inmediatamente inferior y superior donde si el valor de pixel es el máximo o mínimo entre todos los pixeles comparados, se selecciona como un candidato a punto clave.

2.4.4.1.2 Localización de puntos de interés

Para cada candidato a punto clave se debe de redefinir a sub-pixel para ello se usa la serie de Taylor de escala- espacio donde se descarta los candidatos menores al umbral, posteriormente se debe de usar la matriz Hessiana para el cálculo de las curvaturas principales y eliminación de bordes.

2.4.4.1.3 Asignación de orientaciones

A cada punto de interés se le asigna una orientación que es basada en la dirección de su gradiente para este paso la imagen gaussiana analizada se representa por $L(x, y, \sigma)$ donde σ es la escala del punto clave, gradiente $m(x, y)$, orientación $\theta(x, y)$.

$$m(x, y) = \sqrt{(L(x + 1, y) - L(x - 1, y))^2 + (L(x, y + 1) - L(x, y - 1))^2},$$

$$\theta(x, y) = \text{atan2}(L(x, y + 1) - L(x, y - 1), L(x + 1, y)).$$

Se calcula la magnitud y dirección de la gradiente de los vecinos del punto clave. Se forma un histograma de orientación de 36 conectores donde cada conector tiene 10 grados, formando 360 grados en total, donde el pico más alto del histograma indica la orientación del punto clave.

2.4.4.1.4 Descriptor de punto de interés

Para la descripción de cada punto de interés se toma una vecindad de 16x16 puntos donde cada histograma tiene una subregión de 4x4 de la región vecina original, donde un descriptor en un vector con todos los valores de los histogramas, teniendo un total de 128 elementos.

2.4.4.1.5 Correspondencia de puntos de interés

La correspondencia de los puntos de interés en 2 imágenes, se hallan por la búsqueda del punto más próximo en los descriptores al punto de interés.

Después de realizada la toma de la escena, se procede a la comparación entre imágenes (imagen predefinida y la escena), primero se tiene que localizar los puntos característicos más fuertes de la imagen de referencia, en este caso se escogió la lata de atún (figura 2.10),

en donde la tabla 2.6 se puede observar la localización de los N puntos característicos más fuertes de la imagen predefinida.

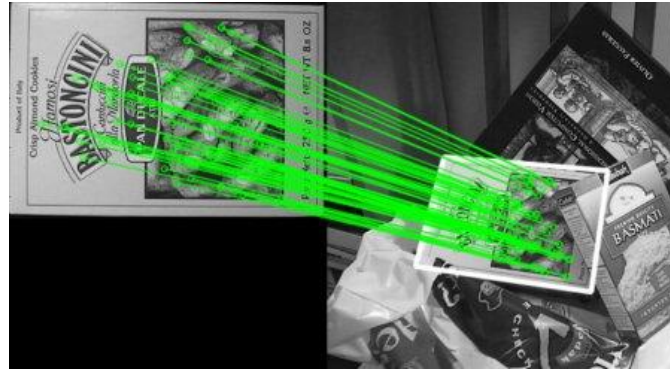



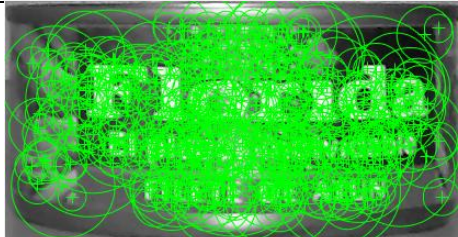


Figura 2-10 Detención de imagen por algoritmo SIFT

Tabla 2-6: Elección de cantidad de puntos característicos. Fuente propia.

Cantidad de puntos característicos	Imagen con los puntos característicos	Porcentaje de reconocimiento con la imagen de la escena
50		90.3%
100		97.1%
250		97.5%
500		97.9%

Se escoge usar la cantidad de 100 puntos debido a que el porcentaje de reconocimiento de la imagen predefinida es de 97.1% y no varía tanto el porcentaje de reconocimientos si se usara 500 puntos lo cual sí implicaría más cantidad de memoria y tiempo de procesamiento. Después de realizado el reconocimiento de los puntos característicos más fuertes de la imagen predefinida. Se realiza el mismo procedimiento, pero con las fotografías de la escena, para las fotografías de la escena se utilizará el triple de número de puntos característicos, obteniendo la posición de los puntos característicos como se muestra en la figura 2.11.

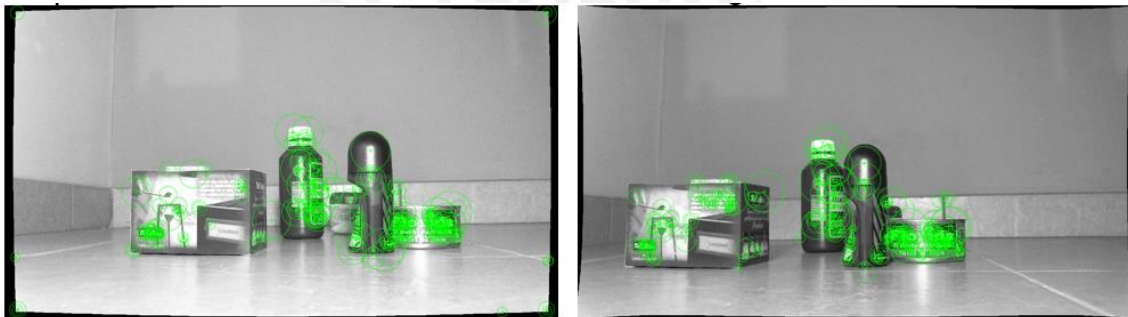


Figura 2-11: Fotografías de las cámaras izquierda y derecha con 300 puntos característicos. Fuente propia.

Después de obtención de puntos característicos de cada imagen, se realiza la determinación de qué puntos característicos coinciden entre la imagen predefinida y las fotografías de la escena, como se muestra en la figura 2.12 y figura 2.13. En este proceso se realiza la comparación punto por punto, ubicándose cada punto característico de la imagen predefinida con su semejante punto característico en la fotografía de la escena.

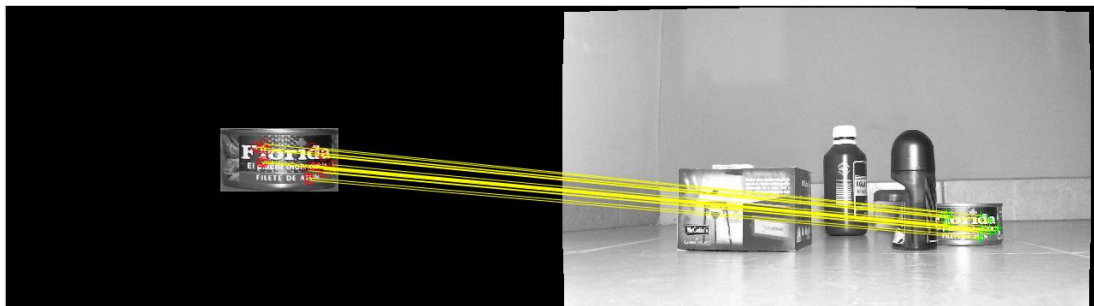


Figura 2-12: Reconocimiento de puntos característicos iguales con la imagen izquierda de la escena. Fuente propia.

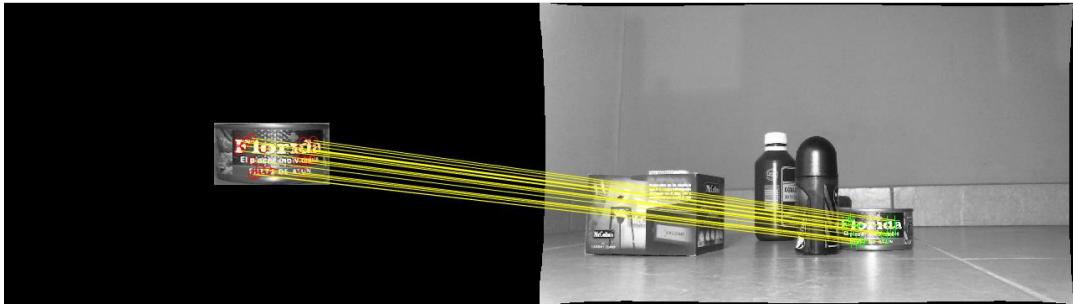


Figura 2-13: Reconocimiento de puntos característicos iguales con la imagen derecha de la escena. Fuente propia.

Finalizado el reconocimiento de los puntos característicos iguales entre la imagen y las fotografías de la escena, se calcular su posición en un plano XY con origen en el centro de cada imagen de la escena (figura 2.14).



Figura 2-14: Reconocimiento de la posición de la imagen predefinida en las fotografías de la escena. Fuente propia.

2.4.5 Cálculo de posición del objeto con referencia al brazo robótico

Después de determinada las posiciones en X e Y se realiza el cálculo de profundidad, para ello se utiliza la triangulación. Al conocer la posición en la que se encuentran las 02 cámaras con el mismo punto de referencia, puedo saber la distancia que están separadas y teniendo las fotografías tomadas por las 02 cámaras además de tener como punto de coincidencia el objeto predefinido (figura 2.15).

tomaron 16 pares de imágenes (4 pares por objeto), donde los resultados se muestran en la tabla 2.7.

Tabla 2-7: Resultados de las pruebas de profundidad. Fuente propia.

Objeto	Distanciar real (mm)	Distancia calculada (mm)	Error absoluto (mm)
Desodorante	250	244	6
	350	353	3
	450	457	7
	550	542	8
Atún	250	246	4
	350	355	5
	450	453	3
	550	544	6
Agua de azahar	250	253	3
	350	352	2
	450	447	3
	550	559	9
Gaseosa	250	247	3
	350	353	3
	450	443	7
	550	554	4

Se observa de la tabla 3.7 que el error absoluto es muy pequeño teniendo un promedio de 4.75 mm de error, el cual es aceptable para el sistema, debido a que las pinzas abiertas del brazo robótico miden 160 mm, representado un 3% del tamaño de las pinzas abiertas, no se consideraría aceptable cuando el error represente 10% del tamaño de las pinzas abiertas.

Las coordenadas que se tuvieron del resultado de la triangulación (figura 2.15) tienen como sistema de referencia el centro de la cámara derecha, para el movimiento del brazo robótico el sistema de referencia tiene que variar al centro del gripper (figura 2.16), debido a que es el gripper quien se va a estar moviendo y su posición final tiene que ser la posición del objeto predefinido. En la tabla 2.8 se detalla las coordenadas finales de la cámara derechas respecto al gripper.

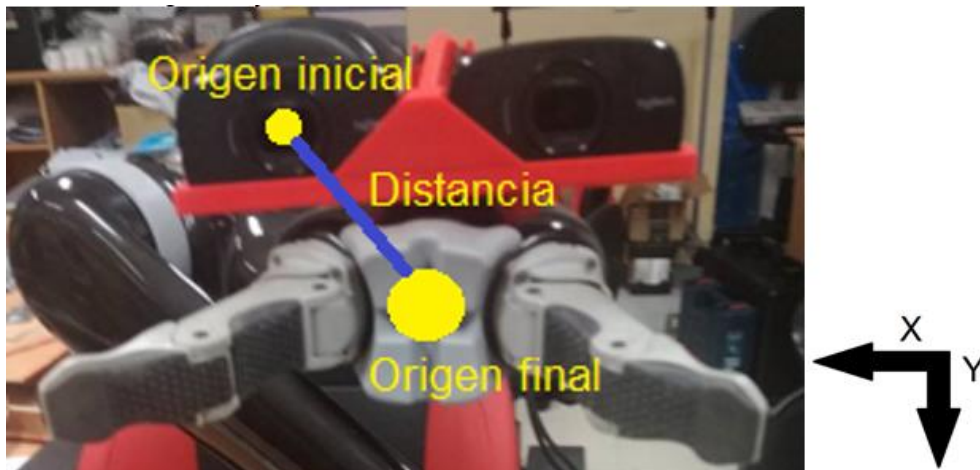


Figura 2-16 : Cambio de origen para la sujeción de objetos. Fuente propia.

Tabla 2-8: Coordenadas con referencia la gripper

	Origen Inicial (mm)	Origen Final (mm)	Coordenadas finales del origen (mm)
X	0	-41	-41
Y	0	48	48
Z	0	37	37

Estas coordenadas son relativas debido a que el origen general del sistema es el origen del brazo robótico. Como se observa en las figuras 3.17 y 3.18 las coordenadas de la cámara y las coordenadas del brazo robótico son diferentes por lo que se tiene que hacer una traslación de coordenadas.



Figura 2-17: Coordenadas de la cámara derecha. [42]



Figura 2-18: Coordenadas del brazo robótico. [33]

Para realizar la transformación de coordenadas se tiene que definir una posición inicial del brazo robótico. En la tabla 2.9 se muestra las posiciones en las cuales se probaron poner el brazo para ser la posición inicial.

Tabla 2-9: Elección de la posición origen del brazo. Fuente propia.

Posición X,Y,Z respecto al brazo robótico	Observaciones
0.35,-0.36, 0.30	La posición es muy alta no se visualiza nada que tenga como base una mesa al mismo nivel que la base del brazo robótico.
0.35,-0.36, 0.05	En esta posición si se observa los objetos que tenga como base una mesa al mismo nivel que la base del brazo robótico, pero su rango de operación es muy pequeño debido a que está muy lejos de la base del brazo robótico
0.30,-0.30,0.05	En esta posición si se observa los objetos que tenga como base una mesa al mismo nivel que la base del brazo robótico, pero su rango de operación sigue siendo muy pequeño, se puede mejorar.
0.21,-0.21,0.05	Esta posición es la ideal debido a que es la posición del brazo robótico más cerca a la base del brazo robótico sin causar choques consigo mismo y su rango de visión sí observa a los objetos que tenga como base una mesa al mismo nivel que la base del brazo robótico.

En la figura 2.19 se observa al brazo robótico en la posición 0.21, -0.21, 0.05



Figura 2-19: Posición de origen del movimiento del brazo robótico. Fuente propia.

Ya obtenida la posición inicial del brazo robótico se realiza el cálculo de transformación de coordenadas de la cámara a las coordenadas del brazo robótico con origen en su base.

En la figura 2.20 se muestra las coordenadas vistas desde arriba.

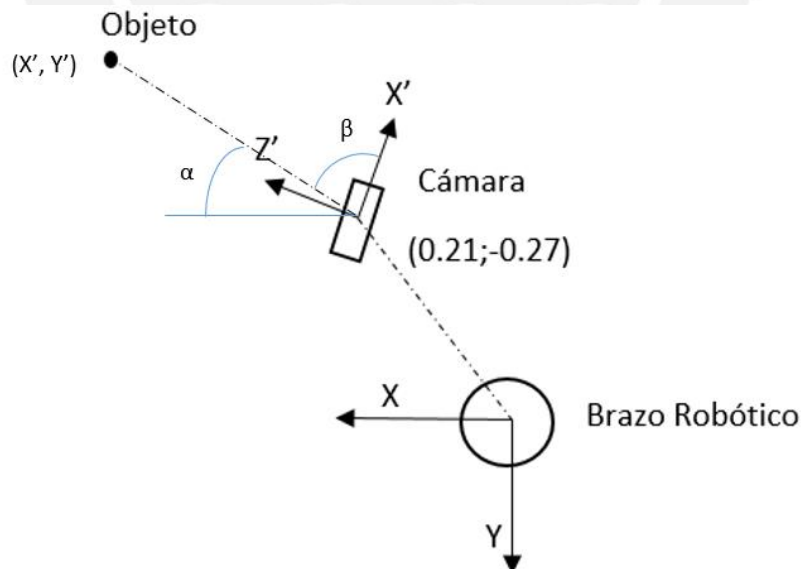


Figura 2-20: Coordenadas relativos y absolutas del sistema. Fuente propia.

Las traslaciones de coordenadas se muestran en las siguientes ecuaciones:

Dato de la posición inicial:

$$\alpha + \beta = 120^\circ;$$

Ecuaciones generales:

$$x = 0.21 + \frac{(x' * \cos(\arctan(\frac{z'}{x'}) - (\alpha + \beta)^\circ))}{\cos(\arctan(\frac{z'}{x'}))};$$

$$y = -0.27 + \frac{(z' * \sin(\arctan(\frac{z'}{x'}) - (\alpha + \beta)^\circ))}{\sin(\arctan(\frac{z'}{x'}))};$$

Donde α y β son los ángulos de posición del objeto con respecto a la cámara teniendo como ejes de origen X, X' respectivamente. Con estas ecuaciones se logra la transformación exitosa de las coordenadas del objeto que estaban respecto a la cámara ahora están respecto a la base del brazo robótico.

2.5 Sistema mecánico

2.5.1 Diseño de soporte brazo robótico

El sistema mecánico se basa en el montaje del brazo robótico con la silla de ruedas. Para ello, se diseñó y se implementó un soporte para el brazo robótico en la silla de ruedas (figura 2.21).



Figura 2-21: Soporte unión silla de ruedas - brazo robótico. Fuente propia.

2.5.2 Diseño de soporte de cámaras

Las cámaras se encontrarán en el actuador final del brazo robótico por lo que necesita un soporte que una el brazo robótico y las cámaras, en la figura 2.22 se muestra el soporte diseñado para la unión de estos elementos.

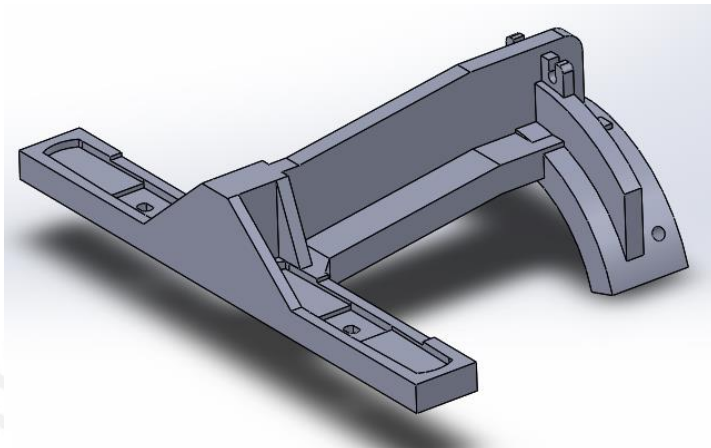


Figura 2-22: Soporte unión brazo robótico – cámaras. Fuente propia.

Este soporte fue manufacturado en una impresora 3D, como se muestra en la figura 2.23.



Figura 2-23: Soporte impreso en impresora 3D. Fuente propia.

2.5.3 Montaje del brazo robótico

En la implementación del sistema mecánico, como se puede observar en la figura 2.24, el soporte unión silla de ruedas y brazo robótico ya se encuentra ensamblado con la silla de ruedas para su posterior unión con el brazo robótico.



Figura 2-24: Ensamble silla – soporte. Fuente propia.

En la figura 2.25 se muestra el ensamble completo de silla de ruedas, soporte y brazo robótico.



Figura 2-25: Ensamble silla – soporte –brazo robótico. Fuente propia.

2.5.4 Montaje de cámaras

Como se muestra en la figura 2.26 las cámaras ya se encuentran unidas a través de su soporte con el brazo robótico.



Figura 2-26: Ensamble silla - brazo robótico – cámaras. Fuente propia.

2.6 Sistema de control

El sistema de control es el encargado de recibir las señales provenientes de los electrodos para su procesamiento y extracción de características, estas señales ya procesadas serán interpretadas como comandos para el movimiento del brazo robótico. Para ello se necesita un entrenamiento entre el usuario y el sistema, donde dicho entrenamiento consistirá generar estímulos visuales independientes y se espera como respuesta las señales cerebrales generadas por estos estímulos.

Este sistema de control estará implementado en la computadora portátil ya seleccionada anteriormente.

Los programas a ejecutar son: Visual Studio 2017, Matlab 2016, Ubuntu 16.04.

- El programa Visual Studio 2017 será ejecutado para la recepción de la señal cerebral, su procesamiento, extracción de características y también se realizará la interfaz gráfica en este programa.
- El programa Matlab 2016 será ejecutado para que interactúe con las cámaras y así capturar de posición del objeto predefinido en el entorno.
- Ubuntu 16.04 será ejecutado para el envío de los comandos de acciones de la silla de ruedas y el brazo robótico.

2.6.1 Adquisición y procesamiento de la señal cerebral

La adquisición de la señal estará a cargo de EEG g.Nutilus de la empresa g.tec Medical Engineering GmbH, que utiliza 32 electrodos secos, y muestrea las señales cerebrales con una frecuencia de 500Hz. Esta adquisición y procesamiento de la señal se realizará mediante el programa Visual Studio.

Las 32 señales provenientes del EEG, muestreadas a 500 Hz serán filtradas con un filtro pasabanda Butterworth de orden 10, con frecuencias de corte de 1 Hz y 15 Hz, luego se tomarán ventanas de un segundo de longitud a partir del inicio del estímulo, y se realizará downsampling a 50 Hz. En el siguiente paso se aplicará un filtro espacial de Patrones Espaciales Comunes (CSP), para realizar una reducción dimensional, obteniendo solo 16 canales en el nuevo espacio de las características. Finalmente, se realizará la normalización de la data en esta nueva ventana, obteniéndose un vector de características final que se utilizará en el clasificador. En la figura 2.27 se muestra el flujo de procesamiento de las señales cerebrales.

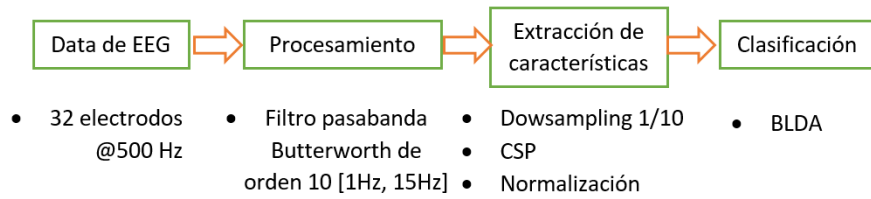


Figura 2-27: Flujo de procesamiento de la señal y extracción de sus características. Fuente propia.

2.6.2 Detección de la señal EEG

Como se explicó en el capítulo anterior se utilizará para la adquisición de señales cerebrales el equipo EEG g.Nautilus, su correcta colocación en la cabeza se presenta en la figura 2.28.



Figura 2-28: Colocación del EEG EEG g.Nautilus correctamente. Fuente propia.

La interfaz gráfica comenzará a parpadear cíclicamente, en donde primero parpadea la silla de ruedas y después el brazo robótico, cuando la persona está concentrada en el parpadeo de alguna de esas dos imágenes generará picos de señales cerebrales las cuales serán interpretadas como una orden en el sistema.

En la figura 2.29 se visualizan dos señales, la señal de la izquierda es la señal cuando el usuario se concentra en la imagen que parpadea en donde se observar un pico el cual es interpretado por el sistema como un comando y la señal de la derecha es la señal cuando el usuario no está concentrado en la imagen que parpadea (estado de relajación).

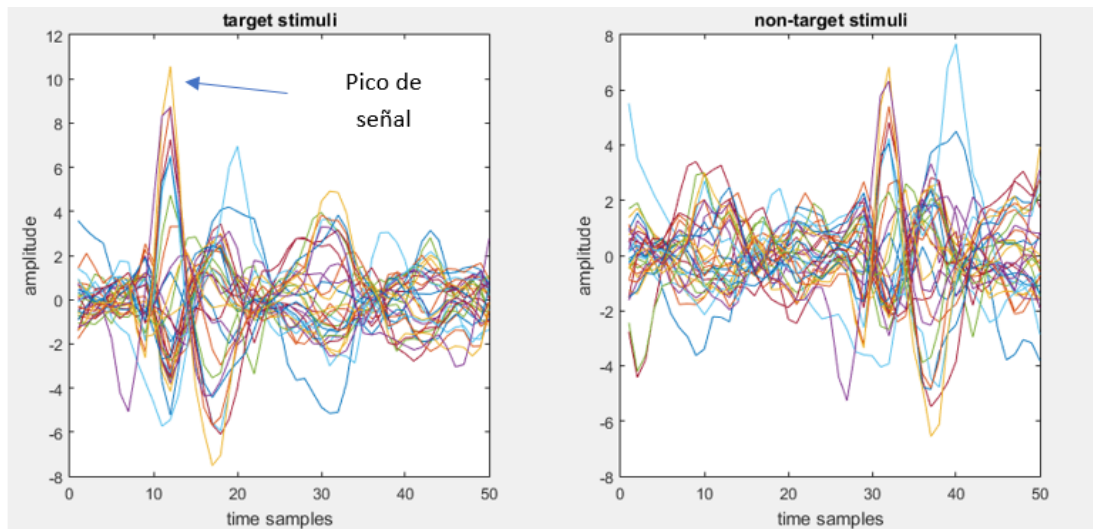


Figura 2-29: Señales obtenidas por EEG para estímulo a imágenes P300 (izquierda) y estímulos no objetivos (derecha). Fuente propia.

2.6.3 Control del brazo robótico

El brazo robótico puede recibir de entrada 2 parámetros: posición final y velocidad de traslación del efector final. Si el brazo no recibe una velocidad de entrada, este asume una velocidad 25 cm/s (velocidad máxima de traslación), por lo que también se variará el parámetro de velocidad de traslación para que se traslade con una velocidad que desacelera constantemente hasta que llegue a su posición final.

Para generar la señal de velocidad de entrada del efector final del brazo robótico, se toma la diferencia generada entre el valor de la posición deseada y la posición real dada por el sensor de posición del brazo robótico, el error resultante entre estas dos posiciones deberá ser multiplicado por una constante K , dando como resultado la señal de entrada velocidad del efector final del brazo robótico.

En la figura 2.30 se muestra el lazo de control del brazo robótico.

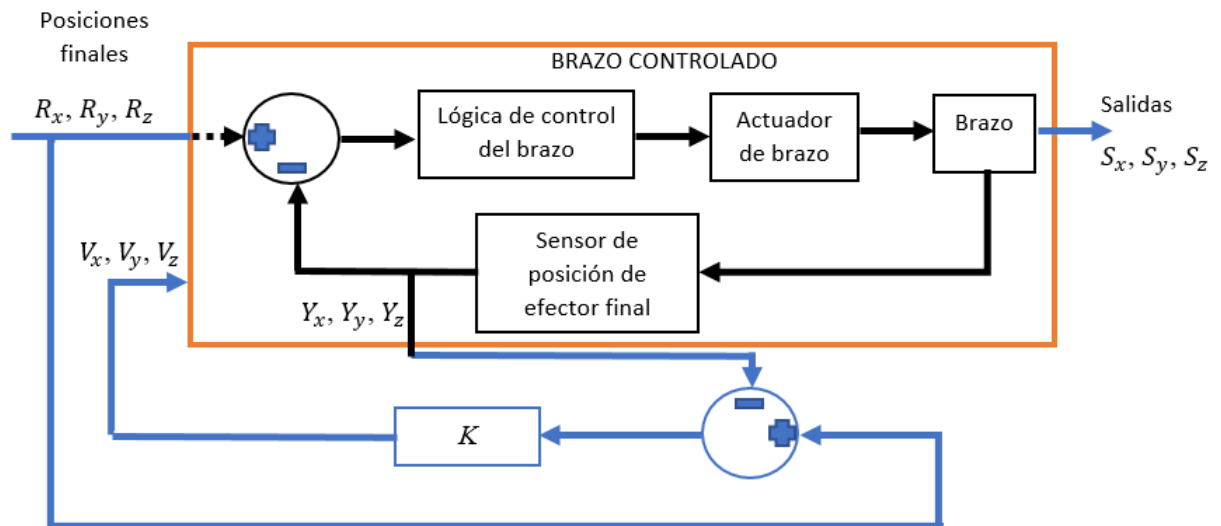


Figura 2-30: Brazo controlado con realimentación de información para cálculo de la velocidad del efector final del brazo robótico. Fuente Propia.

Así:

$$V_x = K \cdot (R_x - Y_x),$$

$$V_y = K \cdot (R_y - Y_y),$$

$$V_z = K \cdot (R_z - Y_z).$$

Donde “ V_x ”, “ V_y ”, “ V_z ” representan a las velocidades del efector final del brazo robótico, “ K ” es la ganancia, “ R_x ”, “ R_y ”, “ R_z ” son las posiciones finales deseadas o de referencia, “ S_x ”, “ S_y ”, “ S_z ” son las posiciones en tiempo real del efector final del brazo robótico y “ Y_x ”, “ Y_y ”, “ Y_z ” son las salidas del sensor de posición del efector final del brazo.

A continuación, se presentan las pruebas que se realizaron con diferentes constantes multiplicadas con la diferencia de posiciones, en la tabla 2.10.

Tabla 2-10: Tabla de resultado de control de brazo robótico. Fuente Propia.

Número de prueba	Distancia Recorrida (m)	Constante de multiplicación (ganancia)	Observaciones
1	0.10	0.01	El movimiento es muy variable debido a que su oscilación es excesiva.
2	0.10	0.015	El movimiento sigue siendo muy inestable.
3	0.10	0.71	El movimiento mejora ya no hay oscilación, aunque se percibe oscilaciones.
4	0.10	0.80	El movimiento es preciso y el tiempo de llegada a la posición final es el deseado (3s).
5	0.20	1.00	El tiempo de respuesta al movimiento es muy rápido lo cual implica exigir al robot, además no es preciso debido a que la distancia recorrida no es a deseada.

Como resultado a las pruebas realizadas con el brazo robótico se realizará el control de movimiento del brazo con una ganancia ($k=0.80$) la cual será multiplicada con el error entre la posición deseada y la posición actual, este resultado será la velocidad del efector final que se le dará al brazo robótico, esta velocidad será descendiente hasta llegar a 0 donde sería su posición final.

2.6.4 Diagrama de flujo del sistema

En la figura 2.31 se muestra en diagrama de flujo general del sistema, el sistema inicia con la configuración inicial en donde se energiza todo el sistema, después de ya realizada la esta primera etapa, se da inicio a la interfaz gráfica donde el usuario podrá seleccionar entre la silla de ruedas y el brazo robótico, según las necesidades que tenga el usuario con ayuda del paradigma P300 y el EEG g.Nautilus, siguiendo con el proceso, las funciones varían si se escoge la silla de ruedas o el brazo robótico, en caso se escoja el brazo robótico se realiza la sub-rutina “Realizar tareas predefinidas del brazo” esta sub-rutina se muestra

en la figura 2.32 después de realizar la tarea se pregunta si se quiere dejar de usar el sistema, si la respuesta es “Sí” se finaliza el programa y si la respuesta es “No” se vuelve al inicio del programa principal para seguir siendo ejecutado.

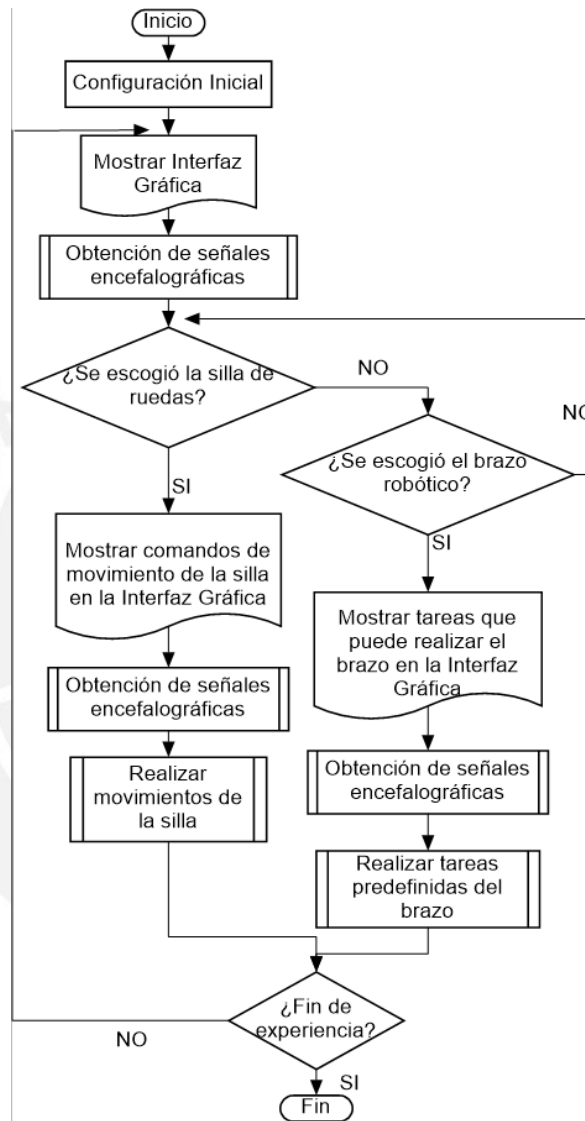


Figura 2-31: Diagrama de flujo general del proyecto. Fuente propia.

En la Figura 2.32 se muestra la subrutina que sigue el brazo robótico para la realización de sus tareas, para la ejecución de esta subrutina se hace uso de dos cámaras, las cuales toman una fotografía de la escena cada una.

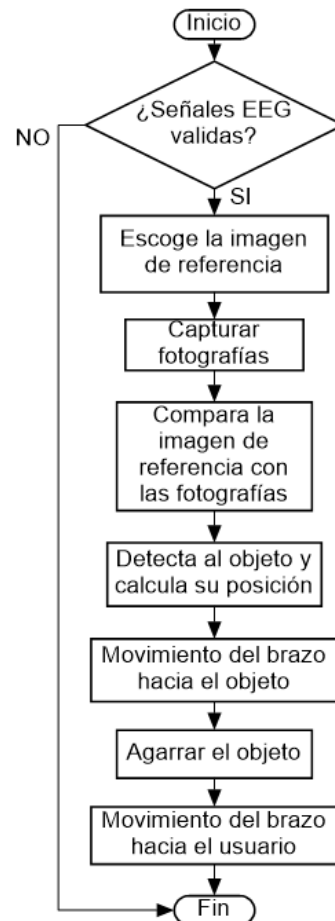


Figura 2-32: Subrutina “Realizar tareas predefinidas del brazo”. Fuente propia.

Ya obtenidas las coordenadas XYZ del objeto predefinido, ahora se necesita enviar las coordenadas al brazo robótico, para este proceso se escogió utilizar el protocolo de control de transmisión (TCP) realizando la comunicación en entre el Matlab - cliente (programa donde se programó la cámara) y Terminal Ubuntu de máquina virtual - servidor (programa donde se ejecutará las tareas predefinidas del brazo). Se escogió este protocolo de control de transmisión debido a que permite que dos máquinas que están comunicadas controlen el estado de la transmisión, la comunicación es como se muestra en la figura 2.33.

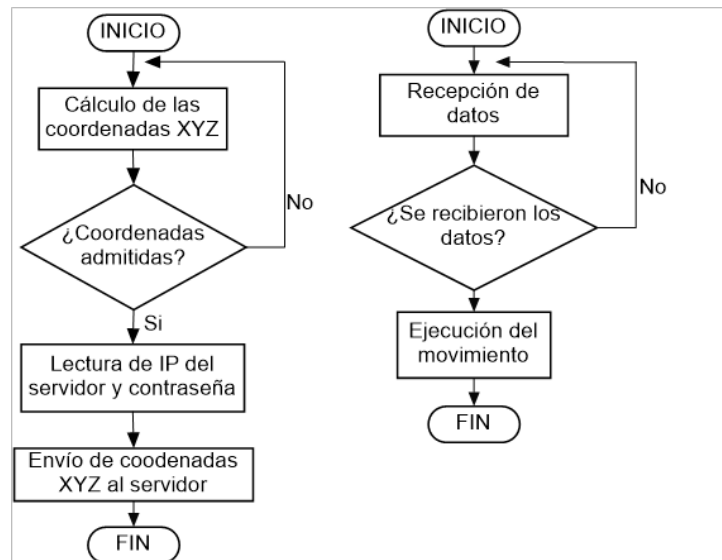


Figura 2-33: Diagrama de Flujo del Cliente y Servidor respectivamente. Fuente propia.

2.6.5 Flujo de trabajo del sistema

Para la elaboración del flujo de trabajo se tiene que tener clara la estructura de funciones del sistema, la cual se puede observar en el Anexo F. En la figura 2.34 se muestra el flujo de trabajo de todo el sistema, desde la interacción del usuario con el sistema, hasta el resultado final que son las acciones comandadas por las señales cerebrales de la persona.

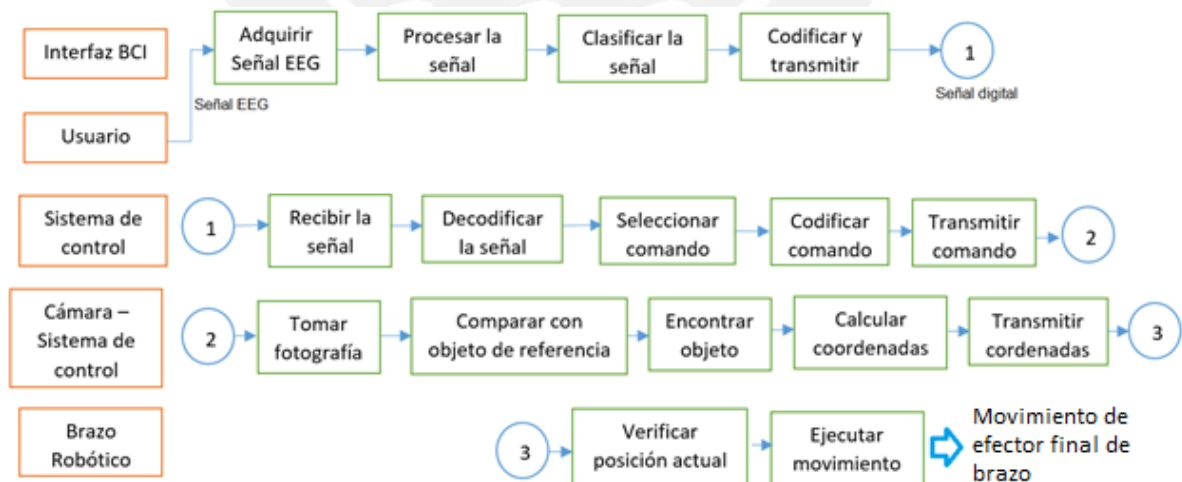


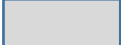
Figura 2-34: Flujo de trabajo del sistema. Fuente propia

COSTOS DEL SISTEMA

Gracias al apoyo del Grupo de Investigación en Robótica Aplicada y Biomecánica (GIRAB) de la Pontificia Universidad Católica del Perú y el Centro de Tecnologías Avanzadas de Manufactura. Se contó con los dispositivos G.Nautilus, brazo robótico Kinova Mico 2, silla de ruedas eléctrica Optimus 2. Para fines de la tesis se considera los costos de cada uno de estos elementos como referencia. En la tabla 3.1 se detalla los precios de todos los componentes del sistema.

Tabla 3-1: Tabla de precios de componentes del sistema robótico. Fuente propia.

Ítem	Componentes	Detalle	Cantidad	Precio Total (S/.)
1	Electrodos no invasivos	g.Nautilus 32 Channels	1	60,705.16
2	Brazo robótico	Kinova Mico 2	1	82,608.64
3	Silla de ruedas	Optimus 2	1	28,948.43
4	Cámaras	Logitech C525	2	400.00
5	Laptop	K555UQ-XX002	1	3,274.00
6	Electrodos parches	3M	50	50.00
				175,986.23

 : Componentes prestados por Grupo de Investigación en Robótica Aplicada y Biomecánica (GIRAB) de la Pontificia Universidad Católica del Perú y el Centro de Tecnologías Avanzadas de Manufactura.

3.1 Costos de diseño:

En la tabla 3.2 se muestra las horas empleadas para el diseño de cada dominio presente en este trabajo de tesis. La suma total en el diseño de la tesis es de S/. 1,800.00.

Tabla 3-2: Tabla de horas empleadas en el diseño. Fuente propia.

Ítem	Concepto	Horas	Costo Unitario	Precio Total (S/.)
1	Dominio mecánico	30	20.00	600.00
2	Dominio eléctrico/electrónico	30	20.00	600.00
3	Dominio de control	30	20.00	600.00
				1,800.00

3.2 Costos de fabricación:

En la tabla 3.3 se muestra los componentes que se mandaron a fabricar para la integración del sistema robótico. La suma total en la fabricación de componentes es de S/. 300.00.

Tabla 3-3: Componentes a fabricar. Fuente propia.

Ítem	Componentes	Cantidad	Costo Unitario	Precio Total (S/.)
1	Soporte de brazo robótico	1	180.00	180.00
2	Soporte de cámaras	1	150.00	150.00
				330.00

3.3 Costos de programación:

En la tabla 3.4 se muestra el detallado de los costos de programación necesarios para la implementación del sistema robótico, tomando en cuenta un costo de programación de S/. 30.00 por hora, donde las horas totales empleadas para la programación del sistema robótico asistencial son de 42 horas, nos da un total de S/. 1200.00.

Tabla 3-4: Tabla con horas de programación. Fuente propia.

Ítem	Tarea	Horas	Costo Unitario	Precio Total (S/.)
1	Configuración del software	3	30.00	90.00
2	Configuración de protocolos de comunicación	4	30.00	120.00
3	Programación de detección de objetos	10	30.00	300.00
4	Programación de movimientos del brazo robótico	10	30.00	300.00
5	Procesamiento de la señal EEG y programación de órdenes de trabajo para el brazo robótico	10	30.00	300.00
6	Integración del sistema robótico	5	30.00	150.00
				1,200.00

3.4 Costos de pruebas

En la tabla 3.5 se muestra los costos de la calibración y pruebas para la integración del sistema, tomando en cuenta un precio por hora de S/. 30.00 y donde las horas totales empleadas en las pruebas fue de 63 horas, nos da un total de S/. 1890.00.

Tabla 3-5: Tabla de costos de pruebas.

Ítem	Tarea	Horas	Costo Unitario	Precio Total (S/.)
1	Calibración de cámaras	5	30.00	150.00
2	Pruebas de detección de objetos	10	30.00	300.00
3	Pruebas de movimiento de brazo robótico	8	30.00	240.00
4	Pruebas de integración entre brazo y cámaras	15	30.00	450.00
5	Pruebas de integración de todo el sistema robótico	15	30.00	450.00
6	Pruebas del sistema con personas	10	30.00	300.00
				1,890.00

3.5 Costos totales

En la tabla 3.6 se muestra los costos totales de cada concepto.

Tabla 3-6: Tabla general con los gastos totales

Ítem	Conceptos	Sub Total (S/.)
1	Costos de componentes (Considerando precios de equipos prestados)	175,986.23
2	Costos de diseño	1,800.00
3	Costos de fabricación	330.00
4	Costos de programación	1,200.00
5	Costos de pruebas	1,890.00
	Total	181,206.23

EXPERIMENTOS Y RESULTADOS

En este capítulo se exponen los experimentos realizado como también los resultados que se obtuvieron de dichos experimentos.

Para la realización de los experimentos con personas, se dividió en 2 sesiones, la sesión de adquisición de señales y la sesión de control de sistema robótico.

4.1 Requisitos para el experimento

Para la realización del experimento con personas, se tiene que tener en cuenta los siguientes requisitos que deben de cumplir las personas que participarán en el experimento:

- Ser mayor de edad.
- La noche anterior haber dormido alrededor de 8 horas.
- No presentar en el cabello ningún tipo de producto químico.
- Firmar consentimiento para someterse a pruebas con el sistema BCI.

En la tabla 4.1, se muestra las características de los usuarios que participaron en los experimentos con el sistema, cabe recalcar como se dijo al inicio de la presente tesis, los experimentos se realizaron con personas sanas.

Tabla 4-1 Características del usuario. Fuente propia.

Paciente	Edad (años)	¿Usa lentes?	Altura (m)	Peso (kg)	Ocupación	Horas que durmió antes del experimento	Sexo
1	22	Si	1.72	80	Estudiante	8	Masculino
2	21	No	1.70	68	Estudiante	7	Masculino
3	24	No	1.74	83	Estudiante	7	Masculino
4	24	Si	1.51	55	Estudiante	8	Femenino
5	22	No	1.75	60	Estudiante	7	Masculino
6	23	Si	1.47	54	Estudiante	8	Femenino
7	26	No	1.41	45	Investigadora	6	Femenino
8	21	Si	1.60	55	Estudiante	7	Femenino
9	20	Si	1.55	56	Estudiante	7	Femenino

4.2 Primera sesión

Al inicio de la primera sesión se le explica al paciente a grandes rasgos de que se va a tratar la experiencia como también la manera en que se debe de sentar y mirar la interfaz gráfica para una correcta adquisición de señales cerebrales (figura 4.1).



Figura 4-1 Posición correcta para las sesiones. Fuente propia.

En esta sesión se capturan las señales cerebrales del usuario (figura 3.27), donde la finalidad de esta experiencia es entrenar al sistema con las señales cerebrales del usuario. A esta primera sesión se la denominó “off-line”.

Para la adquisición de las señales cerebrales se utilizó la interfaz gráfica como se aprecia en la figura 4.2, utilizando el paradigma P300, se realizará el flash de las imágenes, donde serán 5 rutinas de 6 flashes cada imagen, llegando a un total de 30 flashes por imagen. Estas 5 rutinas de deben de repetir 6 veces.



Figura 4-2: Interfaz gráfica. Fuente propia.

Los resultados de la primera sesión se tienen en la tabla 4.2.

Tabla 4-2 Resultados de la primera sesión. Fuente Propia.

Paciente	Porcentaje de eficiencia por 3 flashes (%)	Porcentaje de eficiencia por 4 flashes (%)	Porcentaje de eficiencia por 10 flashes (%)
1	83.33	83.33	100
2	91.67	91.67	83.33
3	83.33	75	91.67
4	83.33	91.67	100
5	91.67	91.67	100
6	83.33	83.33	100
7	75	85.35	83.33
8	91.67	91.67	100
9	75	83.33	91.67
Promedio	84.72	86.45	93.05

4.3 Segunda sesión

Previa a esta sesión, se entrena las señales cerebrales, para que el sistema pueda predecir que objeto se está observando.

La segunda parte consiste en comandar el sistema ya entrenado con las señales de un usuario específico, a esta parte se la denominó “on-line”. Cabe resaltar que para la realización de estas 2 partes se realizan en días diferentes, debido a que el cansancio visual puede ser muy agotador para algunas personas provocando sueño, lo cual provocaría error en la predicción de figuras.

Para esta segunda sesión se realizará el flasheo de las imágenes con 4 flashes cada imagen.

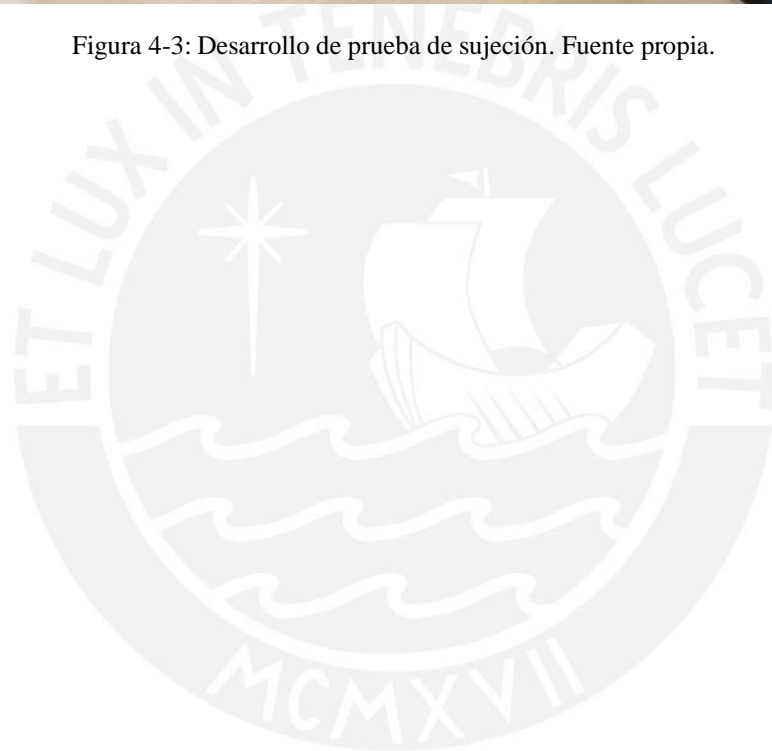
En la siguiente tabla 4.3 se muestra los resultados de las pruebas del brazo robótico dirigiéndose al objeto (figura 4.3).

Tabla 4-3: Resultados de pruebas de sujeción de objetos. Fuente propia.

Paciente	Objeto	Error (X,Y,Z) en dejar el objeto en posición final (mm)	¿LLEGÓ AL OBJETIVO?
1	Botella Coca Cola	3,3,1	Sí
	Lata de Atún	3,2,3	Sí
	Botella de agua oxigenada	2,2,2	Sí
	Desodorante	2,1,3	Sí
2	Botella Coca Cola	5,3,5	Sí
	Lata de Atún	3,3,4	Sí
	Botella de agua oxigenada	4,2,3	Sí
	Desodorante	0,0,2	Sí
3	Botella Coca Cola	3,2,3	Sí
	Lata de Atún	2,2,2	Sí
	Botella de agua oxigenada	2,1,3	Sí
	Desodorante	5,3,5	Sí
4	Botella Coca Cola	4,2,3	Sí
	Lata de Atún	2,0,2	Sí
	Botella de agua oxigenada	3,2,3	Sí
	Desodorante	2,2,2	Sí
5	Botella Coca Cola	2,2,3	Sí
	Lata de Atún	2,1,3	Sí
	Botella de agua oxigenada	6,0,5	Sí
	Desodorante	4,2,3	Sí
6	Botella Coca Cola	0,2,2	Sí
	Lata de Atún	3,2,3	Sí
	Botella de agua oxigenada	0,5,1	Sí
	Desodorante	3,2,3	Sí
7	Botella Coca Cola	2,2,2	Sí
	Lata de Atún	2,2,3	Sí
	Botella de agua oxigenada	2,1,3	Sí
	Desodorante	3,2,5	Sí
8	Botella Coca Cola	4,2,3	Sí
	Lata de Atún	2,4,2	Sí
	Botella de agua oxigenada	3,2,3	Sí
	Desodorante	2,2,4	Sí
9	Botella Coca Cola	2,5,3	Sí
	Lata de Atún	2,1,3	Sí
	Botella de agua oxigenada	7,2,5	Sí
	Desodorante	4,2,3	Sí



Figura 4-3: Desarrollo de prueba de sujeción. Fuente propia.



CONCLUSIONES

- Conforme a los resultados obtenidos de los experimentos con personas sanas, se concluye que la integración de un sistema robótico asistencial controlado por una interfaz cerebro computador puede tener grandes éxitos con personas que sufren discapacidad motora debido a que ha cumplido los requerimientos planteados al inicio del proyecto, realizar tareas cotidianas de una persona como son mover objetos a cortas distancias.
- Se ha implementado un sistema de visión artificial de reconocimientos de objetos teniendo un error promedio casi despreciable (4.75 milímetros). A pesar de este error, el robot alcanzo el objeto y culmino con las tareas predefinidas.
- La interfaz cerebro computador basada en P300 ha obtenido unos resultados favorables con sujetos sanos, donde cada sujeto cumplió al 100% con los objetivos planteados en las pruebas, por lo cual se puede asumir que se tendrá resultados favorables también con personas con discapacidad motora, debido a que el P300 es un paradigma en respuesta a estímulos visuales.

RECOMENDACIONES

El brazo robótico empleado en los experimentos solo cumplía la función de trasladar objetos, se puede diseñar un mecanismo que no solo realice estas funciones y que sea multifuncional para tener más aplicaciones, como por ejemplo saludar a personas, escribir, etc.

El sistema BCI utilizado en la tesis es un sistema básico, debido a la falta de experiencia en el desarrollo de estos sistemas BCI. Esto implica que el sistema genera un grado de error, esto se puede mejorar realizando mayor cantidad de entrenamiento entre el usuario y el sistema, este grado de error sería el de reconocer las órdenes dadas por el usuario.

En el sistema de visión artificial, siempre se tiene que estar protegiendo el lente de la cámara debido a que la limpieza y el cuidado de la cámara influye en la detección de los objetos.

Se recomienda usar 2 computadoras o procesadores para distribuir mejor el trabajo debido a que si una computadora se encarga del control de todo el sistema, el sistema se vuelve más lento, esto también significaría encarecer el sistema un 5% del total.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Organización Mundial de la Salud (OMS).
2011 *Discapacidad en el mundo*. Consulta: 16 de agosto 2017
<http://www.citamericas.org/archivos/8eb24c8f67879c1b5b9bfdef68ba48f2.pdf>
- [2] Perú 21.
2013 *El 5.2% de peruanos tiene algún tipo de discapacidad*. Consulta: 30 de agosto 2017
<https://peru21.pe/lima/5-2-peruanos-tipo-discapacidad-115645>
- [3] Fernández Leronés MJ, De la Fuente Rodríguez A.
2010 *“Esclerosis lateral amiotrófica”*. Caso clínico. Cantabria, volumen VI, número 1, pp. 568-569. Consulta: 04 de septiembre 2017
http://mgyf.org/wp-content/uploads/2017/revistas_antes/revista_130/568-570.pdf
- [4] RTVE.
2016 *“Una de cada 400 personas en España padecerá esclerosis lateral amiotrófica (ELA)”*. Consulta: 31 de agosto 2017
<http://www.rtve.es/noticias/20160620/cada-400-personas-espana-padecera-ela/1360461.shtml>
- [5] INEI
2013 *En el Perú 1 millón 575 mil personas presentan algún tipo de discapacidad*. Consulta: 2 de febrero de 2018.

<https://www.inei.gob.pe/prensa/noticias/en-el-peru-1-millon-575-mil-personas-presentan-alg/>

[6] Bustamante Mungarro Jesús Manuel

2010 *Discapacidad motora – Tratamientos*. Consulta: 10 de septiembre de 2017.

<http://dmotora.blogspot.pe/>

[7] Física con ordenador

2015 *Principio de Arquímedes*. Consulta: 10 de septiembre de 2017.

<http://www.sc.ehu.es/sbweb/fisica/fluidos/estatica/arquimedes/arquimedes.htm>

[8] Perez Carol Tatiana y Reyes Soto

2008 *Terapia acuática para niños con discapacidad motriz*. Consulta: 11 de septiembre de 2017.

<https://www.efisioterapia.net/articulos/terapia-acuatica-ninos-discapacidad-motriz>

[9] F. Orient-López, R. Terré-Boliart, D. Guevara-Espinosa, M. Bernabeu-Guitart

2006 “*Tratamiento neurorrehabilitador de la esclerosis lateral amiotrófica*”.

Barcelona, número 38, pp. 549-555. Consulta: 11 de septiembre de 2017.

[10] Nicolás Alonso Luis Fernando y Gomez Gil Jaime.

2012 *Brain Computer Interfaces, a Review*. Consulta: 23 de agosto 2017

<http://www.mdpi.com/1424-8220/12/2/1211/htm>

[11] Achanccaray David, Flores Christian y Fonseca Chirstian.

2017 *A P300-based brain computer interface for smart home interaction through an*

ANFIS ensemble. Consulta: 28 de agosto 2017

<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=8015770>

- [12] Nijholt Anton.
2008 *BCI for Games: A “State of the Art” Survey*. Consulta: 31 de agosto 2017
https://link.springer.com/content/pdf/10.1007%2F978-3-540-89222-9_29.pdf
- [13] Chung-Min Wu, Yeou-Jiunn Chen y Ilham A. E. Zaeni
2016 *A new SSVEP based BCI application on the mobile robot in a maze game*.
Consulta: 31 de agosto 2017
<http://ieeexplore.ieee.org/document/7840197/>
- [14] Grupo de Robótica, Percepción y Tiempo Real.
2011 *Tecnología de Interfaz Cerebro – Computador*. Consulta: 02 de septiembre 2017.
https://webdiis.unizar.es/~jminguez/Sesion001_UJI.pdf
- [15] Fearon C, Murray B, Mitsumoto H.
2005 *Esclerosis lateral amiotrófica (ELA)*. Consulta: Consulta: 01 de septiembre 2017.
<https://medlineplus.gov/spanish/ency/article/000688.htm>
- [16] Velasco Álvarez, Francisco.
2012 *Interfaz cerebro-computadora: paradigmas de navegación basados en una tarea de imaginación motora*. Consulta: 04 de septiembre 2017.
http://www.diana.uma.es/administrator/components/com_jresearch/files/publications/Tesis_VelascoAlvarez.pdf
- [17] Psicología de la percepción visual.
2005 *Las ondas cerebrales*. Consulta: 07 de septiembre 2017.

<http://www.ub.edu/pa1/node/130>

[18] Donchin, E.

2000 *Potenciales relacionados con eventos*. Consulta: 04 de septiembre 2017.

<http://www.facmed.unam.mx/Libro-NeuroFisio/10-Sistema%20Motor/10a-Movimiento/Textos/ERP.html>

[19] A. García Pablo, M. Spinelli Enrique, M. Toccaceli Graciela

2011 *Interfaz Cerebro Computador basada en potenciales evocados visuales de estado estacionario: ensayos preliminares*. Consulta: 06 de septiembre 2017.

http://www.sabi2011.fi.mdp.edu.ar/proceedings/SABI/Pdf/SABI2011_47.pdf

[20] A.L. Miguel, A. Baccala Luis, C.S. Lin Rick y K. Chapin John.

1995 *Sensorimotor Encoding by Synchronous Neural Ensemble Activity at Multiple Levels of the Somatosensory System*. Consulta: 07 de septiembre 2017.

<https://science.sciencemag.org/content/268/5215/1353/tab-pdf>

[21] Prashant Parmar, Joshi Anand, Gandhi Vaibhav.

2013 *Brain Computer Interface: A Review*. Consulta: 08 de septiembre 2017.

<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC3304110/>

[22] Hornero Roberto, Corralejo Rebeca y Álvarez Daniel

2010 *Brain-Computer Interface (BCI) aplicado al entrenamiento cognitivo y control domótico para prevenir los efectos del envejecimiento*. Consulta: 08 de septiembre 2017.

<http://envejecimiento.csic.es/documentos/documentos/lychnos08-hornero-braincomputer-01.pdf>

- [23] SourceForge.

2011 *OpenEEG- Active Electrodes for the modularEEG*. Consulta: 08 de septiembre 2017.

<http://openeeg.sourceforge.net/doc/hw/ae.html>
- [24] Biosemi Group.

2010 *EEG signals, what are the advantages of Active electrodes with respect to shielding?* Consulta: 09 de septiembre 2017.

<http://www.biosemi.com/faq/shielding%20vs%20active%20electrodes.htm>
- [25] Orozco Marcela Diana y Nieto Natalia.

2008 “*El uso de la transformada wavelet discreta en la reconstrucción de señales senosoidales*”. Pereira, número 38, pp. 381-385. Consulta: 09 de septiembre 2017.
- [26] Dra. María del Pilar Gómez Gil.

2017 *Procesamiento digital de señales*. Consulta: 03 de marzo 2018.

<http://ccc.inaoep.mx/~pgomez/cursos/pds/slides/S10-FiltrosLMS.pdf>
- [27] JOHN EDISON MUNOZ CARDONA.

2014 *Patrones de imaginación motora en una interfaz cerebro computador de bajo costo usando software libre*. Consulta: 05 de marzo 2018.

<https://docplayer.es/33514551-Clasificacion-de-patrones-de-imaginacion-motora-en-una-interfaz-cerebro-computador-de-bajo-costo-usando-software-libre.html>
- [28] Prof. J.L. Pons y Dr. Juan Moreno

2008 *Robotic Physical Therapies in Stroke Rehabilitation of*

Gait Disorders. Consulta: 15 de diciembre 2017.

http://myexs.ru/wp-content/uploads/2012/05/BETTER_Strep_v2.4-3.pdf

[29] PHYSORG.

2007 *Brain2Robot*. Consulta: 15 de diciembre 2017

<https://phys.org/news/2007-11-brain2robot.html>

[30] Valeria Lanas

2012 *Tabla de equivalencias de las medidas por tallas*. Consulta: 10 de diciembre 2017.

<https://www.valerialanas.com/es/mas-para-ti/tabla-de-equivalencias-de-las-medidas-por-tallas/>

[31] BBC

2014 *Las increíbles extremidades del ser humano: manos y pies*. Consulta: 10 de diciembre 2017.

https://www.bbc.com/mundo/noticias/2014/03/140227_ciencia_manos_y_pies_jgc_fi
nde

[32] Ros Components.

2016 *LWA 4D*. Consulta: 10 de octubre 2017.

<https://www.roscomponents.com/es/15-brazos-roboticos>

[33] Kinova Robotics.

2017 *Kinova Mico-2*. Consulta: 12 de octubre 2017

<https://www.kinovarobotics.com/en/products/assistive-technologies>

[34] Festo

2017 *BionicCobot*. Consulta: 08 de noviembre 2017

<https://www.festo.com/group/en/cms/12746.htm>

[35] Meyra

2016 *Optimus 2*. Consulta: 14 de noviembre 2017

2015 <https://www.meyra.com/wheelchairs/productetails/product-47/>

[36] Meyra

2015 *iChair mc1*. Consulta: 14 de noviembre 2017

<https://www.meyra.com/wheelchairs/e-power/e-power-wheelchair-details/product-43/>

[37] Meyra

2015 *Nemo Vertical*. Consulta: 14 de noviembre 2017

https://www.meyra.com/fileadmin/user_upload/pdf/downloads/english/e-power/1595-Nemo-Vertikal-GB-PLohne-2017.pdf

[38] Meyra

2015 *Clou 9.500*. Consulta: 14 de noviembre 2017

<https://www.meyra.co.uk/wheelchairs/productetails/product-42/>

[39] Meyra

2015 *Solero Light 9.072*. Consulta: 14 de noviembre 2017

<https://www.meyra.com/wheelchairs/productetails/product-25/>

[40] ASUS

2017 *K555UQ-XX002*. Consulta: 14 de noviembre 2017

<https://www.asus.com/es/Laptops/>

[41] División de Estudios de Posgrado e Investigación

2015 *Comparación de mediciones de profundidad entre un sistema de visión en estéreo y un sensor RGBD*. Consulta: 15 de marzo de 2018

https://www.researchgate.net/profile/Elisabet_Gonzalez/publication/311643542_Comparacion_de_Mediciones_de_Profundidad_entre_un_Sistema_de_Vision_en_Estereo_y_un_Sensor_RGBD/links/5851aea708ae7d33e016ee47/Comparacion-de-Mediciones-de-Profundidad-entre-un-Sistema-de-Vision-en-Estereo-y-un-Sensor-RGBD.pdf

[42] LOGITECH

2016 *HD WEBCAM C525*. Consulta: 15 de marzo de 2018

<https://www.logitech.com/es-es/product/hd-webcam-c525?crd=34>

[43] Universidad del Norte Santo Tomás de Aquino - Facultad de Ingeniería

2009 *Técnicas de Implementación de Visión Estereoscópica en Robótica*. Consulta: 20 de marzo de 2018

<http://42jaiio.sadio.org.ar/proceedings/simposios/Trabajos/EST/29.pdf>

[44] EL DIA

2017 *Un robot ayuda a personas con discapacidad a desenvolverse*. Consulta: 1 de febrero de 2019

<https://eldia.es/sociedad/2017-05-01/9-robot-ayuda-personas-discapacidad-desenvolverse.htm>

ÍNDICE DE ANEXOS

- Anexo A: Lista de exigencias.
- Anexo B: Conceptos de solución para el sistema mecánico.
- Anexo C: Conceptos de solución para el sistema eléctrico.
- Anexo D: Conceptos de solución para el sistema control.
- Anexo E: Conceptos de solución para el sistema de visión.
- Anexo F: Estructura de funciones.
- Anexo G: Guía de instalación de brazo robótico en la computadora.
- Anexo H: Guía de uso del brazo robótico
- Anexo I: Planos



Anexo A: Lista de exigencias

LISTA DE EXIGENCIAS			Fecha: 01/09/2017
PROYECTO:		Integración de un sistema robótico asistencial controlado mediante una interfaz cerebro computador para personas con discapacidad motora.	Revisado: Achanccaray Díaz
CLIENTE:		PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ	Elaborado: Jairo Pirca C.
N°	TIPO	DESCRIPCIÓN	RESPONSABLE
1	E	FUNCIÓN PRINCIPAL: <ul style="list-style-type: none"> Mover un brazo robótico automáticamente con señales cerebrales de una persona, a través de una interfaz cerebro computador. 	Jairo Pirca C.
2	E	CINEMÁTICA: <ul style="list-style-type: none"> Movimiento de brazo robótico en el plano XYZ a un rango de aproximadamente de 60 cm de extensión. 	Jairo Pirca C.
3	E	CAPACIDAD: <ul style="list-style-type: none"> El sistema soportará el peso persona de hasta 90kg asegurando el buen funcionamiento del sistema. 	Jairo Pirca C.
4	E	PARADIGMA: <ul style="list-style-type: none"> Uso del paradigma P300 para la adquisición y procesamiento de señales cerebrales. 	Jairo Pirca C.
5	E	INTERFAZ GRÁFICA: <ul style="list-style-type: none"> Interfaz gráfica para interacción entre el sistema mecatrónico y el usuario. 	Jairo Pirca C.
7	E	SEGURIDAD: <ul style="list-style-type: none"> El sistema será diseñado e implementado de tal forma que no ponga en riesgo ni la seguridad del usuario ni la seguridad ambiental. 	Jairo Pirca C.
8	E	MANTENIMIENTO: <ul style="list-style-type: none"> La instalación y la distribución de los componentes de la máquina que requieran mantenimiento o reemplazo serán de fácil acceso. 	Jairo Pirca C.

N°	TIPO	DESCRIPCIÓN	RESPONSABLE
9	E	USO: <ul style="list-style-type: none"> El sistema se diseñará e implementará de forma que su uso sea de fácil acceso para el usuario además se realizará una capacitación para su uso. El sistema está diseñado para realizar su trabajo en zonas urbanas y realizar tareas cotidianas. 	Jairo Pirca C.
10	D	GEOMETRÍA: <ul style="list-style-type: none"> El espacio ocupado por la máquina no podrá exceder 1,40 x 1,10 x 1,40 [m.] (L x An x Al). 	Jairo Pirca C.
11	E	MONTAJE Y PORTABILIDAD: <ul style="list-style-type: none"> El montaje de la máquina debe ser de rápida instalación y de fácil comprensión para los operarios; asimismo, el desmontaje deberá ser rápido y simple para el posterior traslado y así poder usarla en diferentes lugares. 	Jairo Pirca C.
12	E	ENERGÍA: <ul style="list-style-type: none"> La máquina recibirá energía eléctrica de una batería externa que alimentará todo el sistema. Salida de energía en forma de calor y/o ruido en los componentes de la máquina 	Jairo Pirca C.
13	D	ERGONOMÍA: <ul style="list-style-type: none"> La ubicación de la interfaz gráfica será de tal forma que sea de fácil observación para el usuario. La altura aproximada donde se encontrará la interfaz gráfica es de 1.30 m. 	Jairo Pirca C.
14	D	FABRICACIÓN: <ul style="list-style-type: none"> Los materiales y tecnologías elegidas para la fabricación y el ensamble deben ser comerciales que permitan ser adquiridos en el mercado local a la medida de lo posible. 	Jairo Pirca C.
16	E	PLAZO DE ENTREGA: <ul style="list-style-type: none"> La entrega de la tesis concluida se realizará el 27.12.2017 	Jairo Pirca C.




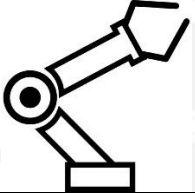
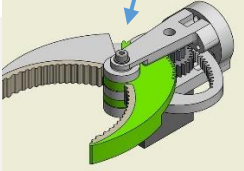


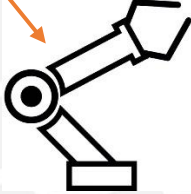


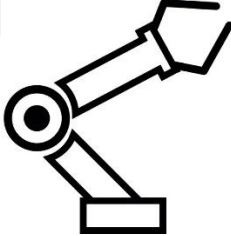
E: EXIGENCIA

D: DESEO

Anexo B: Conceptos de solución para el sistema mecánico.

Dominio mecánico

Matriz morfológica

Función	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3
Mover al usuario	Silla de Ruedas Eléctrica 	Grúa 	Camilla 
Recoger el objeto	Brazo robótico con pinzas 	Pinzas 	Transporte por rodillos 
Trasladar el objeto	Faja transportadora 	Brazo robótico 	
Dejar el objeto	Poleas 	Faja transportadora 	Brazo robótico 




Solución 1: 
 Solución 2: 
 Solución 3: 

Tabla 1: Cuadro comparativo entre silla de ruedas

Características	Airwheel h3 panasonic	R120	optimus 2
Cant. de personas	1	1	1
Velocidad	6 km/h	5 km/h	6 km/h
RPM	4500	3800	4200
Peso máximo	130kg	114 kg	120 kg
Radio de giro	1.2m	1.1 m	1.2 m
Tiempo de carga	8 horas	8 horas	8 horas
Batería	litio 24v	litio 24v	litio 24v
Dimensiones	98x96x63 cm	56x67x63 cm	108x67x91cm
Potencia	120 w	180 w	120 w
Peso neto	30.5 kg	44kg	48 kg
Precio	\$ 1,950.00	\$ 1,788.87	\$ 1,225.00

Evaluación técnico – económica

En las tabla 2 se observa la evaluación técnica y evaluación económica de los conceptos de solución mecánicos.

Puntaje de 0 a 4: 0= No Satisface, 1= Aceptable a las justas, 2= Suficiente, 3= Bien, 4=Muy bien (ideal)

Tabla 2: Evaluación Técnica del Concepto de Solución

Nro.	Criterios de evaluación	Solución 1	Solución 2	Solución 3	Ideal
1	Eficiencia energética	2	2	2	4
2	Seguridad	2	2	3	4
3	Rapidez	3	2	3	4
4	Mantenimiento	2	2	3	4
5	Facilidad de uso	2	2	3	4
6	Cumplimiento en función a la lista de exigencias	3	3	3	4
7	Ergonomía	2	3	3	4
8	Tamaño de la máquina	1	1	3	4
9	Montaje	2	2	2	4
10	Capacidad de la máquina	2	1	2	4
	Total	21	20	27	40

Tabla 3: Evaluación Económica del Concepto de Solución

1	Costo material	2	1	1	4
2	Costo fabricación	2	2	2	4
3	Costo de mantenimiento	2	3	2	4
4	Costo mano de obra	2	2	1	4
5	Número de piezas	2	2	2	4
6	Facilidad para obtener componentes	2	2	2	4
	Total	12	12	10	24
	Total Acumulado	33	32	37	64

Solución 3:




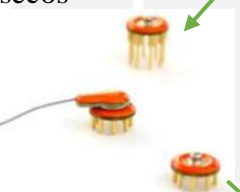
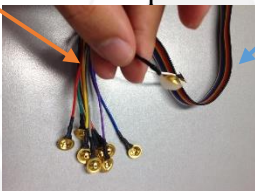






Se decidió usar una silla de ruedas eléctrica debido a que en comparación con las demás alternativas su facilidad de uso es mucho más fácil, para la etapa de recoger objeto se escogió el mecanismo de 4 barras (brazo robótico) por la precisión y exactitud que es característico de los brazos robóticos, con respecto a su traslado del objeto, también se escogió al brazo robótico, así como también se volvió a escoger al brazo para el proceso de dejar el objeto. Se escogieron estas alternativas debido a que el funcionamiento de estas son las más óptimas.


Anexo C: Conceptos de solución para el sistema eléctrico.


Dominio eléctrico – electrónico


Matriz morfológica

En función a los distintos componentes encontrados y las distintas formas de unir estos componentes, se armó la siguiente matriz morfológica en la que se muestran las 3 mejores soluciones.

Función	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3
Fuente de alimentación	Batería de vehículos 	Batería recargable 	Energía solar 
Adquisición de la señal	Electrodos activos secos 	Electrodos pasivos 	
Procesamiento de la señal	Procesador 	Computadora 	Microcontrolador 
Indicador de emergencia	Altavoz pasivo 	Sirena 	Altavoz y Sirena 

Solución 1: 

Solución 2: 

Solución 3: 

Evaluación técnico – económica

Puntaje de 0 a 4: 0= No Satisface, 1= Aceptable a las justas, 2= Suficiente, 3= Bien, 4=Muy bien (ideal)

Tabla 4: Evaluación Técnica del Concepto de Solución

Nro.	Criterios de evaluación	Solución 1	Solución 2	Solución 3	Ideal
1	Eficiencia energética	2	2	3	4
2	Seguridad	2	3	2	4
3	Rapidez	1	3	2	4
4	Mantenimiento	2	2	2	4
5	Facilidad de uso	2	3	2	4
6	Cumplimiento en función a la lista de exigencias	2	3	3	4
7	Ergonomía	2	2	2	4
8	Tamaño	2	3	2	4
9	Montaje	2	2	2	4
	Total	17	23	20	36

Tabla 5: Evaluación Económica del Concepto de Solución

Nro.	Criterios de evaluación	Solución 1	Solución 2	Solución 3	Ideal
1	Costo material	2	3	3	4
2	Costo fabricación	2	2	2	4
3	Costo de mantenimiento	3	3	2	4
4	Costo mano de obra	2	3	2	4
5	Número de piezas	2	2	2	4
6	Facilidad para obtener componentes	3	3	3	4
	Total	14	16	14	24
	Total Acumulado	31	39	34	

Solución 2:

Se decidió usar una batería recargable de una duración aproximada de 8 horas para la toma de datos se decidió utilizar electrodos activos debido a que son mucho más fáciles de usar que los electrodos pasivos estas señales serán procesadas y decodificadas en un computador. Cuando ocurra una falla o haya algún incidente con el sistema se utilizará una sirena de emergencia para avisar al usuario.






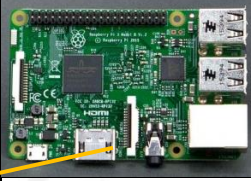





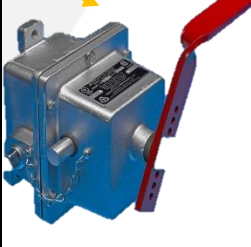


Anexo D: Conceptos de solución para el sistema control.

Dominio control

Matriz morfológica

Tabla 6: Matriz morfológica (Dominio Control)

Función	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3
Control del usuario con el sistema	Pantalla táctil 	Pantalla de Laptop 	Tablet 
Control de dispositivo de transporte de usuario	PIC 	Controlador 	Raspberry 
Programación	Java 	C# 	Python 
Apagado de emergencia	Botón 	Llave 	Palanca 

Solución 1: →

Solución 2: →

Solución 3: →

Evaluación técnico - económica

Puntaje de 0 a 4: 0= No Satisfice, 1= Aceptable a las justas, 2= Suficiente, 3= Bien, 4=Muy bien (ideal)

Tabla 7: Evaluación Técnica del Concepto de Solución

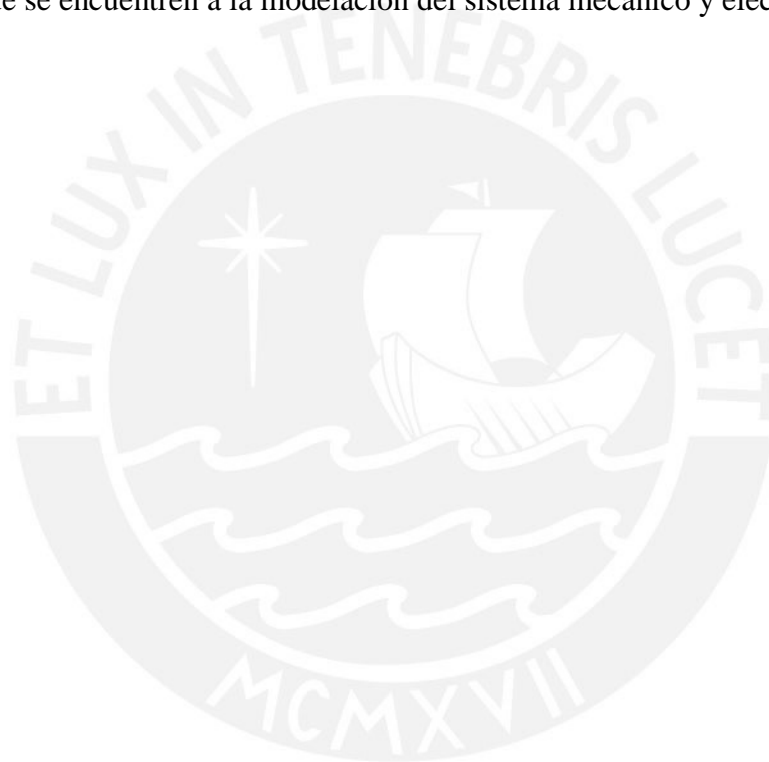
Nro.	Criterios de evaluación	Solución 1	Solución 2	Solución 3	Ideal
1	Eficiencia energética	3	2	3	4
2	Seguridad	3	3	3	4
3	Rapidez	2	2	2	4
4	Manipulación	3	2	3	4
5	Confiabilidad	3	3	3	4
6	Cumplimiento en función a la lista de exigencias	3	3	3	4
7	Transportabilidad	3	2	3	4
8	Facilidad de manejo	3	2	2	4
9	Complejidad	2	2	2	4
	Total	25	21	24	36

Tabla 8: Evaluación Económica del Concepto de Solución

Nro.	Criterios de evaluación	Solución 1	Solución 2	Solución 3	Ideal
1	Costo material	2	3	2	4
2	Costo fabricación	2	2	2	4
3	Costo de mantenimiento	1	2	1	4
4	Costo mano de obra	2	1	2	4
5	Costo de operación	2	2	2	4
6	Facilidad para obtener componentes	3	3	3	4
SUMA		12	13	12	24
SUMA TOTAL		37	35	36	60

Solución 1:

Nuestra solución óptima se relaciona con la solución óptima del dominio mecánico y electrónico, pues se determina debido a los actuadores y sensores que se usaran en la solución. Se elige la solución 1 debido a que la interfaz con el usuario por cuestiones de dimensiones se elige la pantalla más grande la cual es de una laptop, con un controlador de motores para los movimientos que se necesiten realizar el lenguaje de programación a usar será el python debido a la amplia gama de librerías que posee para programar las soluciones que se encuentren a la modelación del sistema mecánico y electrónico.









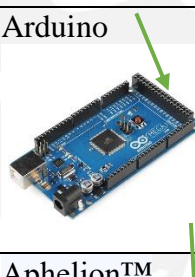



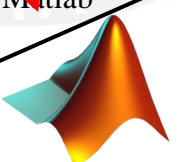





ANEXO E: Conceptos de solución para el sistema visión.

Dominio procesamiento de imágenes

Matriz morfológica




Tabla 9: Matriz morfológica (Dominio Procesamiento de imágenes)

Función	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3
Recepción de la imagen de referencia	USB 	SD 	
Plantillas para calibrar la cámara			
Cámara	Raspberry NOIR 	Logitech HD Webcam C525 	Logitech HD Webcam C270 
Procesar imagen	Arduino 	Computadora 	Raspberry 
Software	Aphelion™ 	Matlab 	

- Solución 1: 
- Solución 2: 
- Solución 3: 

En esta sección se comparan las características más importantes de las cámaras disponibles en el mercado para el proyecto.

Tabla 10: Cuadro Comparativo de Cámaras

Modelo	Logitech HD Webcam C525	Pi NOIR	Logitech HD Webcam C270
Imagen			
Megapixeles	8MP	5MP	8MP
Resolución de video	720p HD	1080p30, 720p60 y 640x480p/90	720p HD
Precio	\$39	\$24	\$40

Evaluación Técnico-Económica

Puntaje de 0 a 4: 0= No Satisfice, 1= Aceptable a las justas, 2= Suficiente, 3= Bien, 4=Muy bien (ideal)

Tabla 11: Evaluación Técnica del Concepto de Solución

Nro.	Criterios de evaluación	Solución 1	Solución 2	Solución 3	Ideal
1	Eficiencia energética	3	3	3	4
2	Seguridad	3	3	3	4
3	Rapidez	2	3	2	4
4	Mantenimiento	2	2	2	4
5	Facilidad de uso	2	2	2	4
6	Cumplimiento en función a la lista de exigencias	3	3	3	4
7	Ergonomía	2	3	2	4
8	Tamaño de la máquina	2	2	2	4
9	Montaje	2	2	1	4
	Total	21	23	20	36

Tabla 12: Evaluación Económica del Concepto de Solución

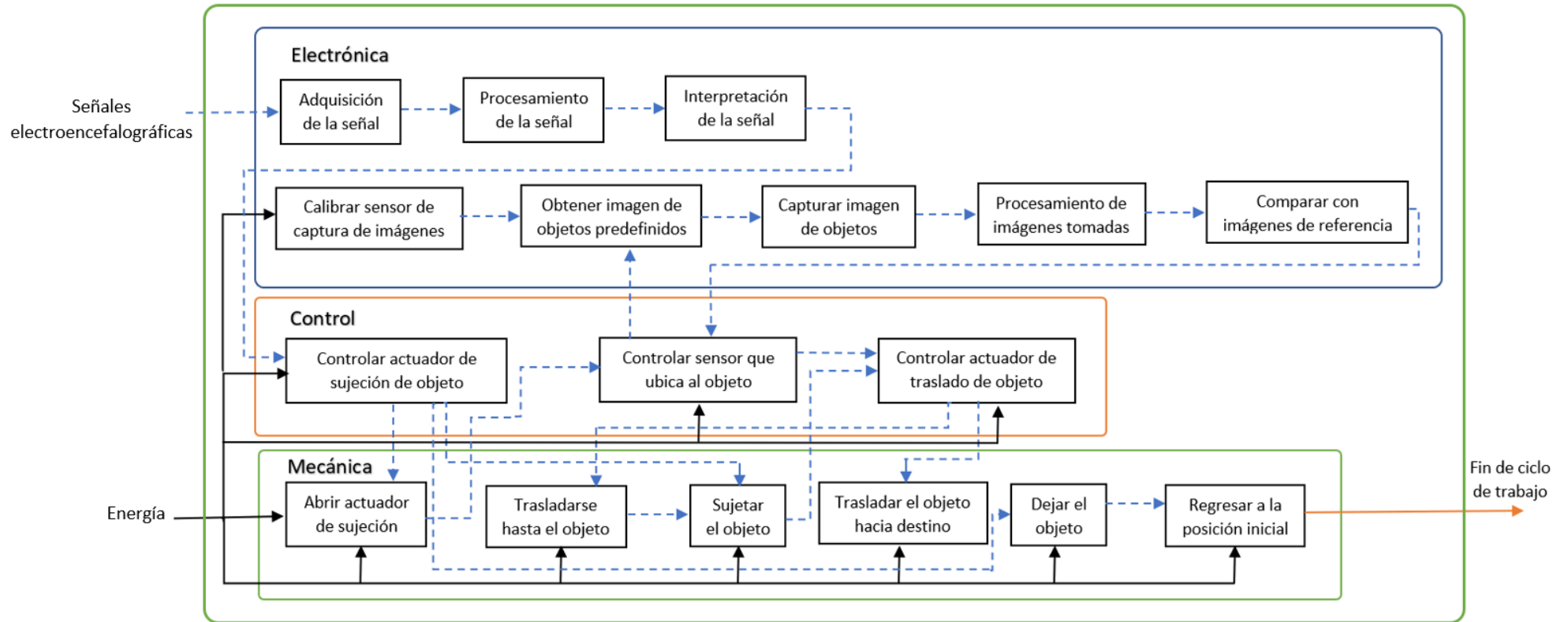
Nro.	Criterios de evaluación	Solución 1	Solución 2	Solución 3	Ideal
1	Costo material	2	2	2	4
2	Costo fabricación	2	2	2	4

3	Costo de mantenimiento	2	2	2	4
4	Costo mano de obra	2	2	2	4
5	Número de piezas	3	3	2	4
6	Facilidad para obtener componentes	3	3	2	4
	Total	14	14	12	24
	Total Acumulado	35	37	32	60

Solución óptima 2

Para este dominio se consideró como solución óptima la opción 2. Esto se debe a que se provechará el uso en otros dominios de la computadora, la calibración se realizará con una platilla de tablero de ajedrez, debido a que le Matlab tiene una opción de calibración con esa plantilla para desarrollar proyectos con la cámara; esto nos brinda una mayor facilidad de obtener librerías, código y aplicaciones. La cámara escogida es de alta definición por lo que no se tendrá problemas en la captura de imágenes.

Anexo F: Estructura de funciones

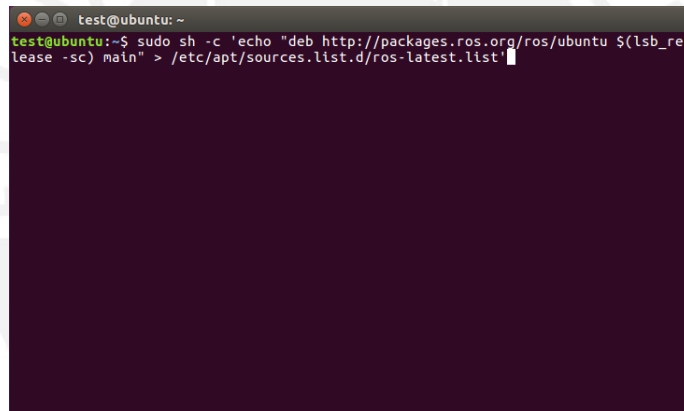


Anexo G: Guía de instalación de brazo robótico en la computadora

Guía de instalación (TBD)

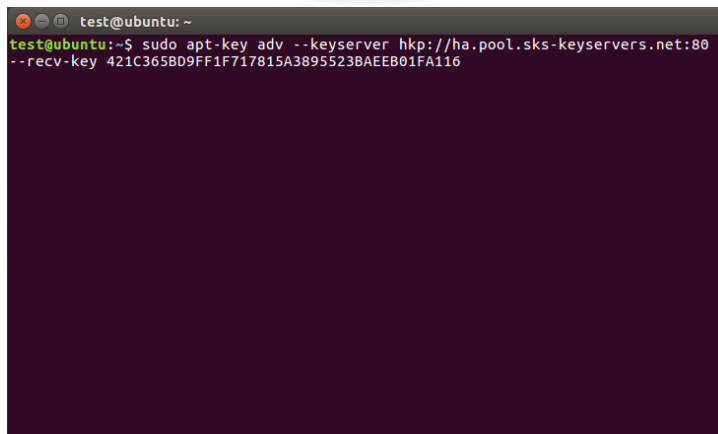
Instalación de ROS

Para realizar la instalación de ROS, se deben tomar en cuenta una serie de pasos específicos. El primero consiste en indicarle al sistema operativo que acepte los paquetes provenientes del sitio web de ROS, como se muestra en la Figura 1. También será necesario agregar el *key* para la descarga correcta de dichos paquetes, indicado en la Figura 1. Nótese que todos los siguientes procedimientos se realizarán en la ventana de Terminal del sistema operativo.



```
test@ubuntu: ~  
test@ubuntu:~$ sudo sh -c 'echo "deb http://packages.ros.org/ros/ubuntu $(lsb_release -sc) main" > /etc/apt/sources.list.d/ros-latest.list'
```

Figura 1. Código para agregar dirección de paquete a la lista del sistema operativo.



```
test@ubuntu: ~  
test@ubuntu:~$ sudo apt-key adv --keyserver hkp://ha.pool.sks-keyservers.net:80 --recv-key 421C365BD9FF1F717815A3895523BAEEB01FA116
```

Figura 1. Código para indicar el *key* necesario para la descarga de paquetes de ROS.

Luego, para evitar conflictos con la instalación, es necesario asegurarse que el sistema operativo se encuentre actualizado.

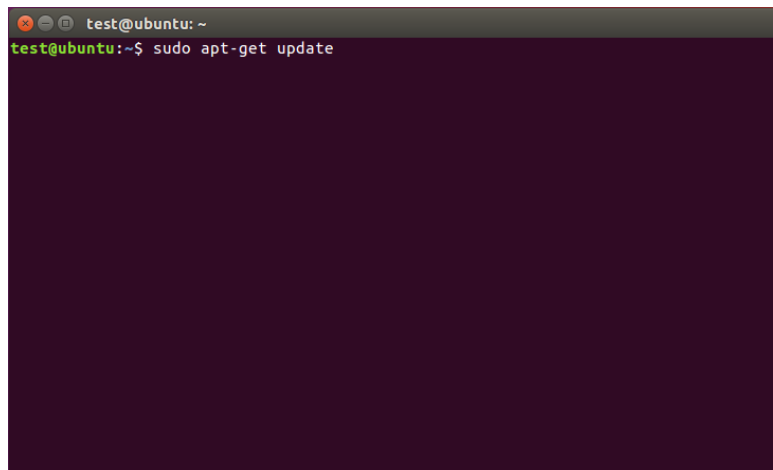
A terminal window with a dark purple background. The title bar shows 'test@ubuntu: ~'. The prompt is 'test@ubuntu:~\$' and the command entered is 'sudo apt-get update'. The rest of the terminal is empty.

Figura 2. Código para actualizar el sistema operativo.

El siguiente paso consiste en realizar la instalación completa de ROS. Para ello, se debe utilizar el código mostrado en la X.

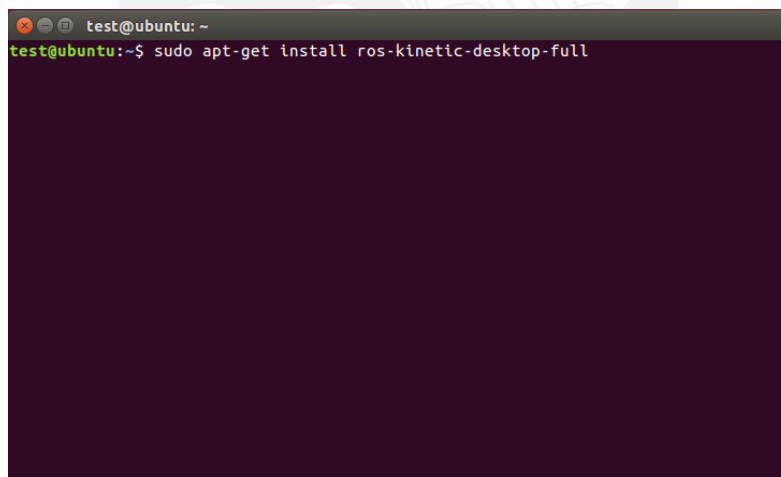
A terminal window with a dark purple background. The title bar shows 'test@ubuntu: ~'. The prompt is 'test@ubuntu:~\$' and the command entered is 'sudo apt-get install ros-kinetic-desktop-full'. The rest of the terminal is empty.

Figura 3. Código para instalación completa de ROS.

Una vez realizada la instalación completa, es necesario también inicializar las dependencias de ROS, como se muestra en la Figura . Luego de realizar dicho procedimiento, será conveniente actualizar dichas dependencias, utilizando el código indicado en la Figura 4.


```
test@ubuntu: ~  
test@ubuntu:~$ sudo rosdep init
```

Figura 5. Código para inicializar las dependencias de ROS.

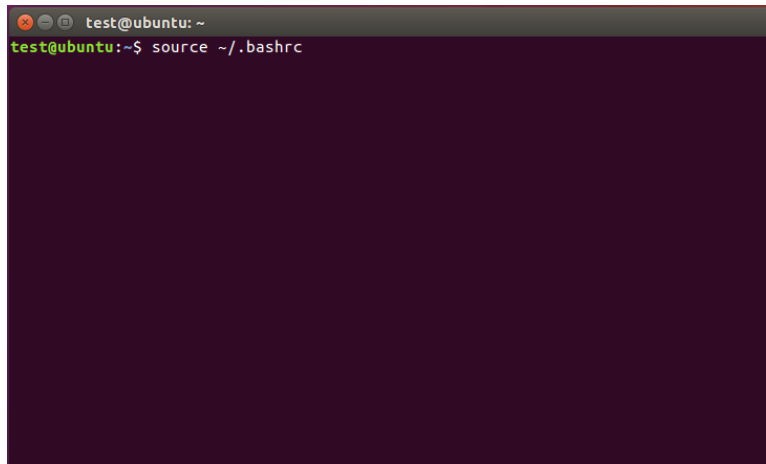
```
test@ubuntu: ~  
test@ubuntu:~$ rosdep update
```

Figura 4. Código para actualizar las referencias de ROS.

A continuación, se realiza un procedimiento conveniente para agregar las variables de ROS al entorno, desde que este es inicializado, de manera que se pueda disponer de ellas inmediatamente en cada sesión. El código para agregarlas se muestra en la Figura 5, mientras que en la Figura 6 se muestra el código para volver a ejecutar el archivo *.bashrc*, que se encarga de manejar las variables de entorno.

```
test@ubuntu: ~  
test@ubuntu:~$ echo "source /opt/ros/kinetic/setup.bash" >> ~/.bashrc
```

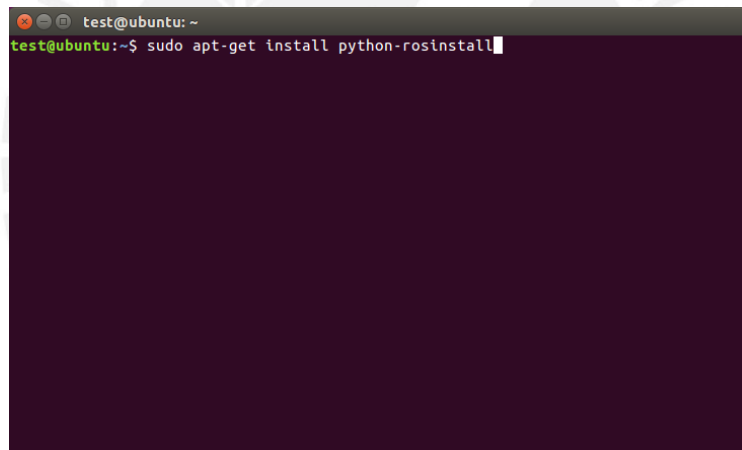
Figura 5. Código para agregar las variables de ROS al entorno.



```
test@ubuntu: ~  
test@ubuntu:~$ source ~/.bashrc
```

Figura 6. Código para ejecutar el archivo.

Finalmente, para instalar con facilidad paquetes adicionales para ROS, se recomienda instalar la herramienta *rosinstall*, como se muestra en la Figura 7.



```
test@ubuntu: ~  
test@ubuntu:~$ sudo apt-get install python-rosinstall
```

Figura 7. Código para realizar la instalación de *rosinstall*.

Instalación del programa

Para la conexión entre el software y el brazo, es necesario instalar el archivo *KinovaAPI-5.0.6-amd64.deb*, contenido en la carpeta *Project*. También será necesario copiar la carpeta *catkin_ws* al *home* del sistema operativo, y eliminar los contenidos de la carpeta interna *build*. Finalmente, se debe correr el comando mostrado en Figura 8, desde la ubicación en la carpeta mostrada en la misma figura, lo que compilará el programa.

```
test@ubuntu: ~/catkin_ws
test@ubuntu:~/catkin_ws$ catkin_make
```

Figura 8. Código para compilar el programa.



Anexo H: Guía de uso del brazo robótico

Inicio del programa

Primero, con la silla y el brazo conectados a la computadora, se debe abrir la ventana de Terminal de Ubuntu, para poder ingresar los comandos necesarios para abrir la interfaz.

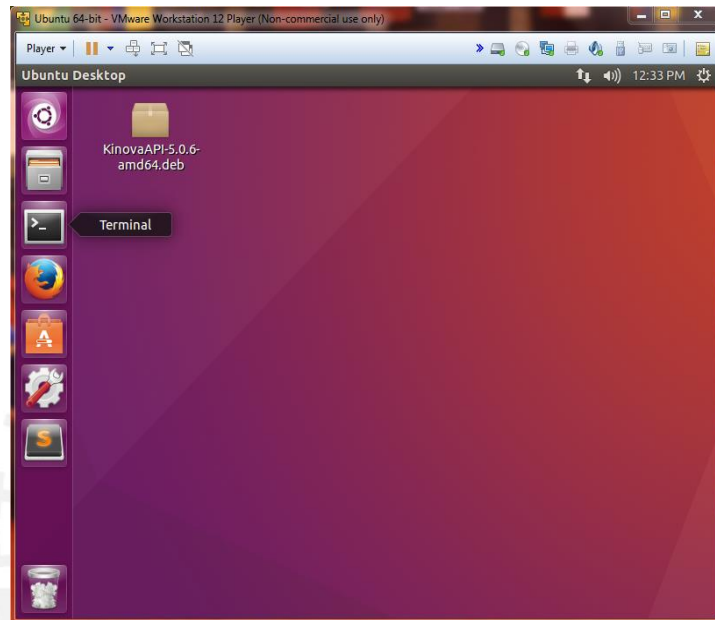


Figura 11. Ícono de Terminal en Ubuntu.

A continuación, se debe ejecutar el comando `python binit.py`, que se encargará de abrir la interfaz, e inicializar la conexión con el brazo y la silla, enviando los comandos adecuados.

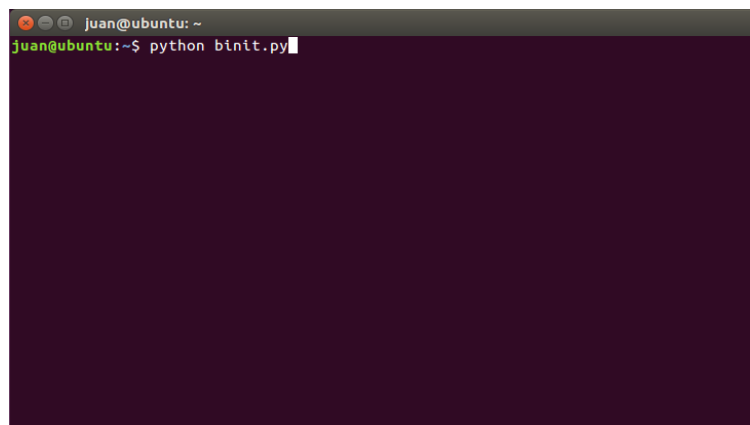


Figura 12. Código a ejecutar en Terminal para iniciar el programa.

Luego, se podrá observar cómo se abrirán cuatro ventanas adicionales de Terminal secuencialmente. Dos de ellas están específicamente encargadas de verificar la conexión correcta de la silla y el brazo. Las otras dos, se encargan de inicializar la interfaz, y el núcleo de ROS.

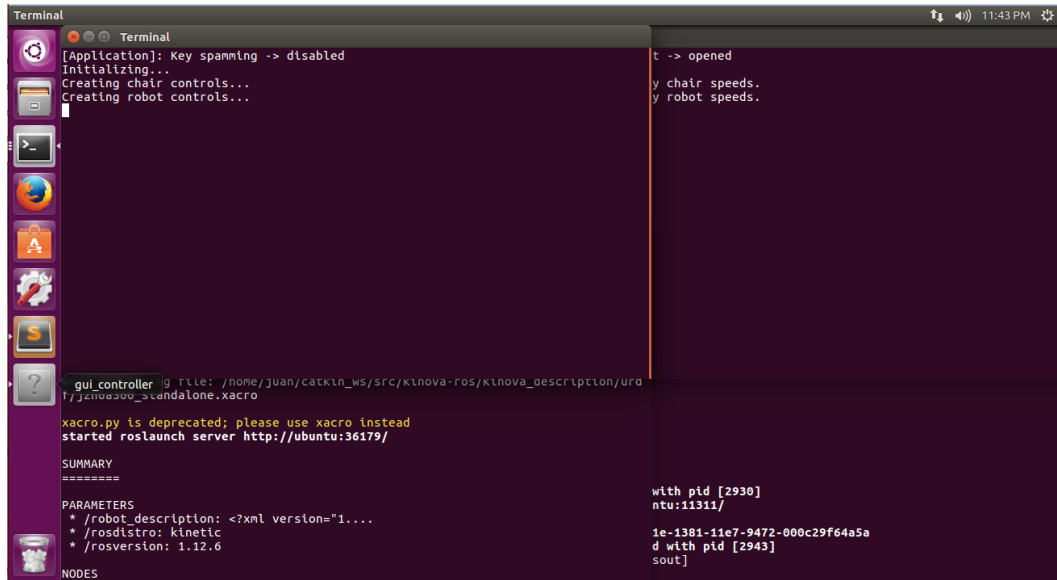


Figura 13. Ventanas de Terminal que se abren al ejecutar el programa.

Finalmente, una vez que aparece la interfaz de control, se podrán controlar las tres velocidades en los ejes, x, y, z, del efector final del robot utilizando las teclas WASDQE, además de las cuatro direcciones de la silla, adelante, atrás, izquierda y derecha con las teclas 8456. Las sliders se utilizan para regular los valores de velocidad. Esto podría considerarse como calibración, para futuros propósitos.

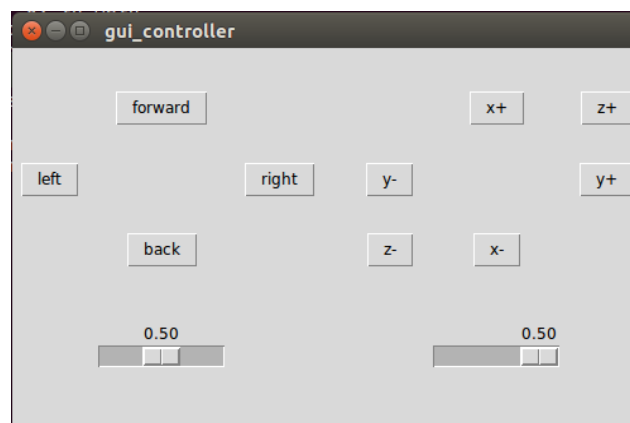


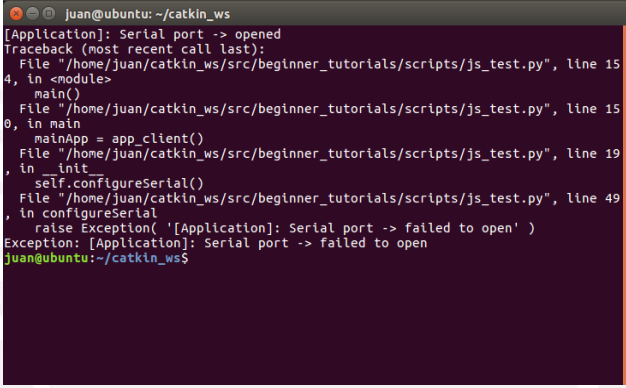
Figura 14. Interfaz para controlar la silla y el brazo.

Detección de errores

Los posibles errores más comunes al utilizar el sistema desarrollado se detallan a continuación.

Error al inicializar puerto serial

Como se puede observar en la Figura 13, el error es el no encontrar ningún dispositivo conectado al puerto `/dev/ttyUSB0`. En este caso, se deben desconectar todos los dispositivos USB de la computadora, y colocar la conexión a la silla primero.

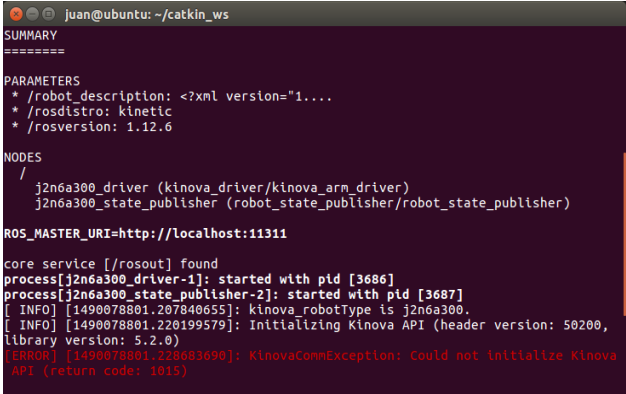


```
juan@ubuntu:~/catkin_ws
[Application]: Serial port -> opened
Traceback (most recent call last):
  File "/home/juan/catkin_ws/src/beginner_tutorials/scripts/js_test.py", line 15
    4, in <module>
      main()
    File "/home/juan/catkin_ws/src/beginner_tutorials/scripts/js_test.py", line 15
    0, in main
      mainApp = app_client()
    File "/home/juan/catkin_ws/src/beginner_tutorials/scripts/js_test.py", line 19
    , in __init__
      self.configureSerial()
    File "/home/juan/catkin_ws/src/beginner_tutorials/scripts/js_test.py", line 49
    , in configureSerial
      raise Exception( '[Application]: Serial port -> failed to open' )
Exception: [Application]: Serial port -> failed to open
juan@ubuntu:~/catkin_ws$
```

Figura 15. Error que aparece cuando la silla no está conectada a la computadora.

Error al inicializar conexión con el robot

Puede ocurrir cuando el robot está siendo manipulado ya con su control, o si no está en su posición inicial. También puede ocurrir si el robot no ha sido configurado correctamente, o si la variable `robotType` no coincide con el tipo del robot.



```
juan@ubuntu:~/catkin_ws
SUMMARY
=====
PARAMETERS
 * /robot_description: <?xml version="1...
 * /roscpp: kinetic
 * /rosversion: 1.12.6
NODES
 /
  j2n6a300_driver (kinova_driver/kinova_arm_driver)
  j2n6a300_state_publisher (robot_state_publisher/robot_state_publisher)
ROS_MASTER_URI=http://localhost:11311

core service [/rosout] found
process[j2n6a300_driver-1]: started with pid [3686]
process[j2n6a300_state_publisher-2]: started with pid [3687]
[ INFO ] [1490078801.207840655]: kinova_robotType is j2n6a300.
[ INFO ] [1490078801.220199579]: Initializing Kinova API (header version: 50200,
library version: 5.2.0)
[ERROR] [1490078801.228683690]: KinovaCommException: Could not initialize Kinova
API (return code: 1015)
```

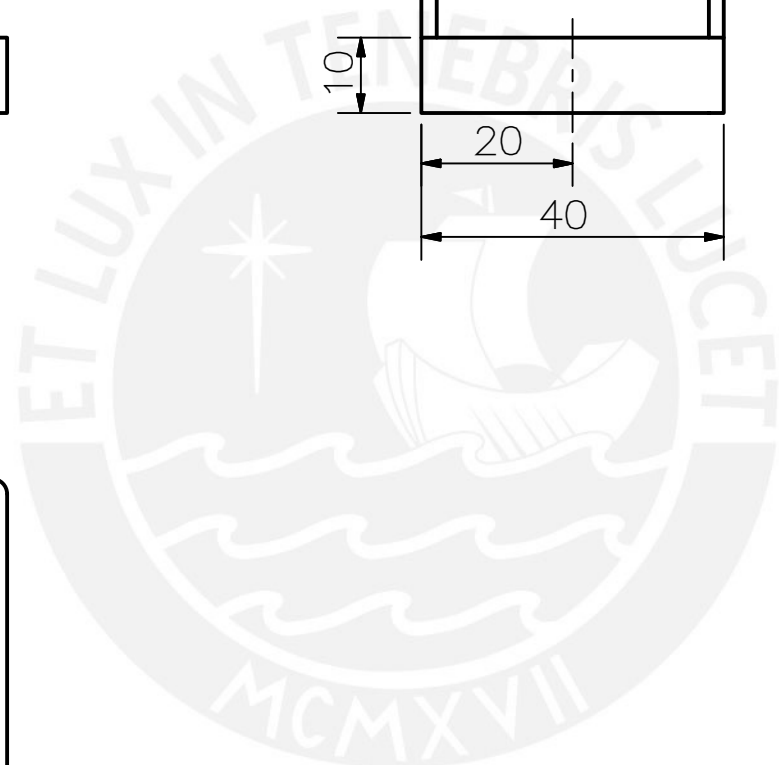
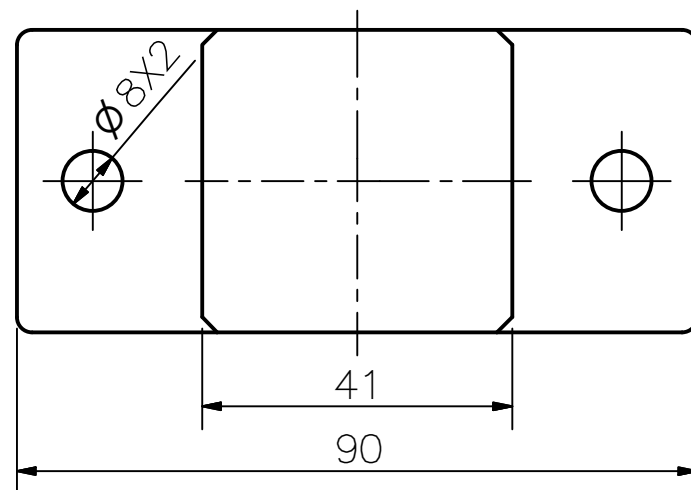
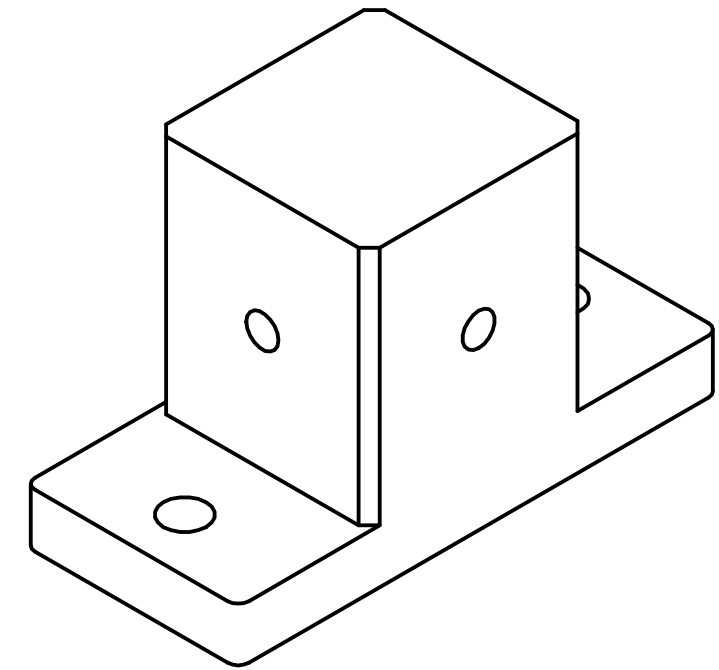
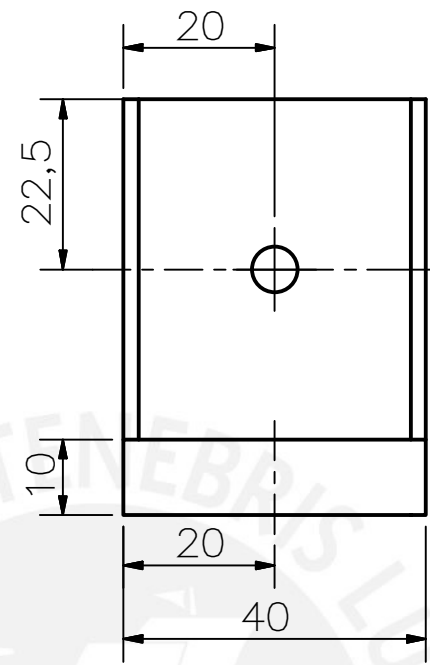
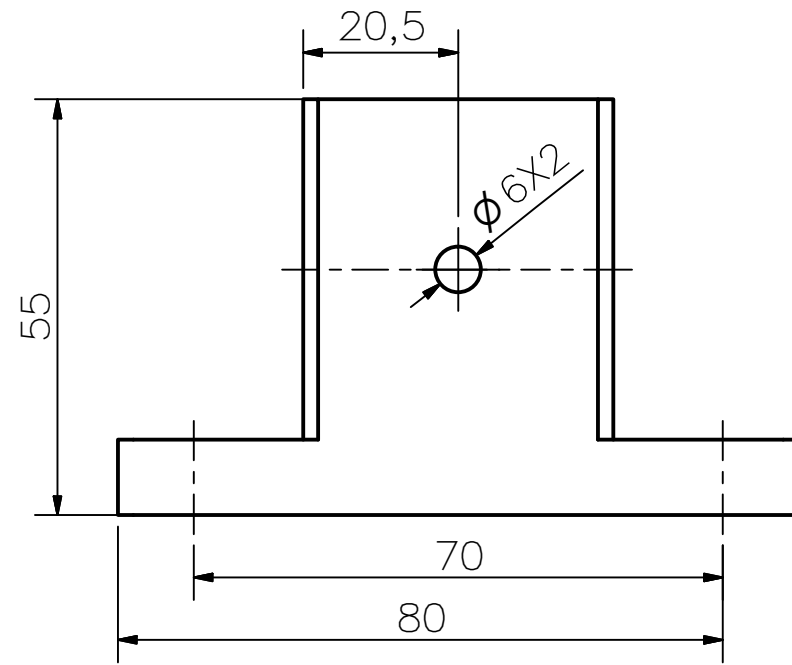
Figura 16. Mensaje de error que aparece cuando hay algún problema con el brazo.

Anexo I: Planos

En la implementación del sistema, para el correcto funcionamiento del brazo se diseñó un soporte para el brazo robótico que une el brazo robótico con la silla de ruedas electrónica.

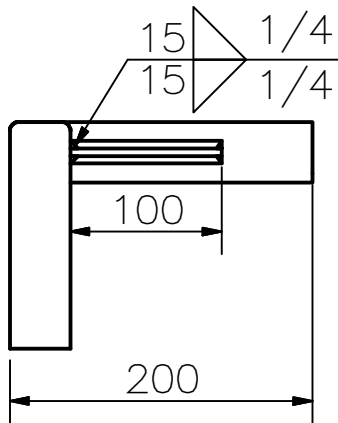
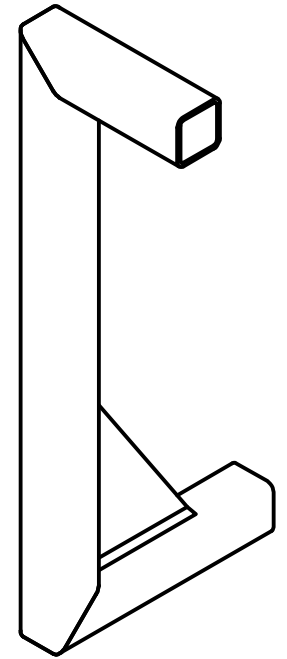
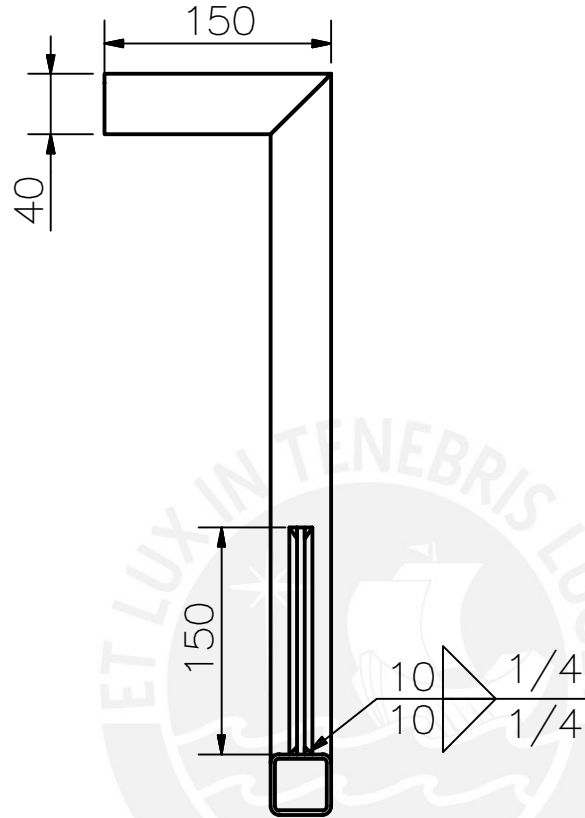
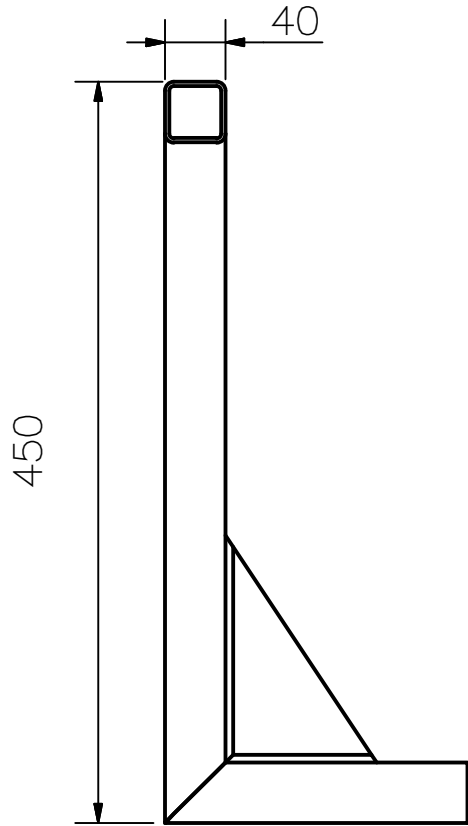
Los planos de diseño se presentan a continuación:



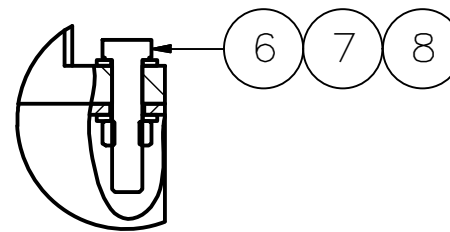
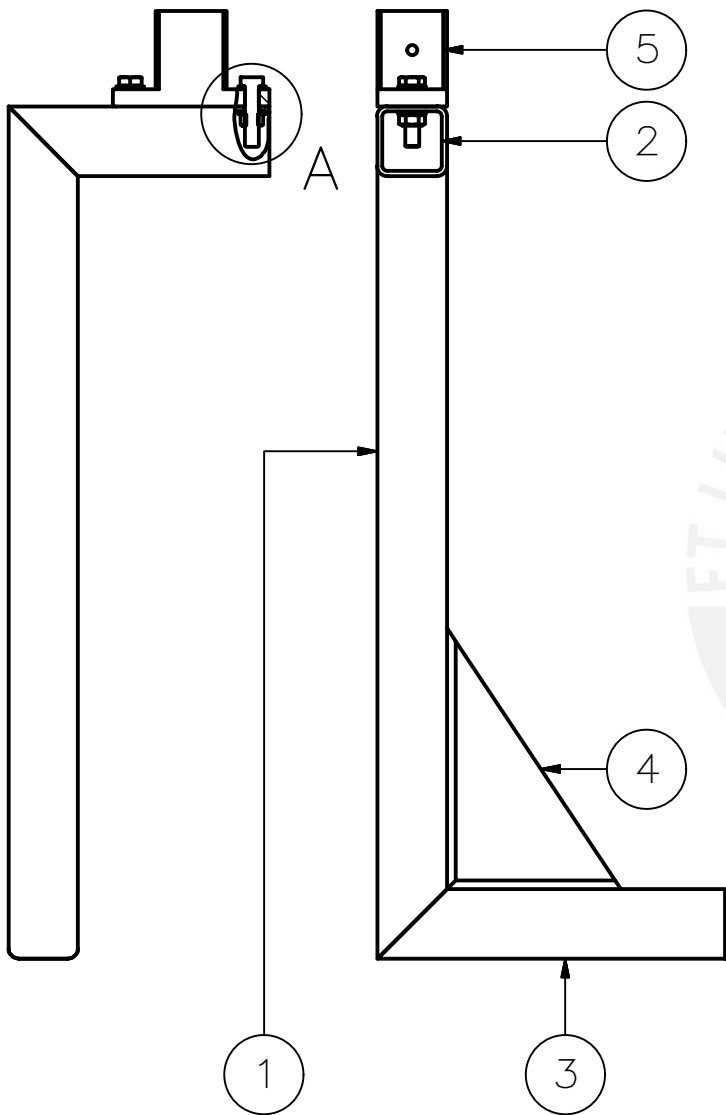


TOLERANCIAS DIMENSIONALES SEGÚN DIN 7168					
GRADO DE EXACTITUD	Más de 0,5 hasta 3	Más de 3 hasta 6	Más de 6 hasta 30	Más de 30 hasta 120	Más de 120 hasta 400
MEDIO	±0,1	±0,1	±0,2	±0,3	±0,5

ACABADO SUPERFICIAL	TOLERANCIA GENERAL DIN 1768 MEDIO	MATERIAL ALUMINIO 6061
PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA – INGENIERÍA MECATRÓNICA		
MÉTODO DE PROYECCIÓN 	TRABAJO DE FIN DE CARRERA– A703– 10M1 SOPORTE BRAZO ROBÓTICO	ESCALA 1:1
20122951	PIRCA CÁRDENAS, JAIRO JENER	FECHA: 2017.11.04
		LÁMINA: P1–A3



ACABADO SUPERFICIAL	TOLERANCIA GENERAL	MATERIAL
		ACERO ASTM A-36
PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA – INGENIERÍA MECATRÓNICA		
MÉTODO DE PROYECCIÓN	TRABAJO DE FIN DE CARRERA – A703 – 10M1	ESCALA
	ESTRUCTURA DE SOPORTE BRAZO	1:5
20122951	PIRCA CÁRDENAS, JAIRO JENER	FECHA: 2017.11.08
		LÁMINA: P2-A4

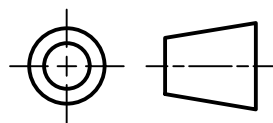


DETALLE A
1:2

8	2	TUERCA HEXAGONAL M8	DIN 934	AIISI 304	
6	2	TOR. CAB. HEXAGONAL M8 x 35	DIN 931-1	8.8	
7	4	ARANDELA 8.4	DIN 125	8.8	
5	1	SOPORTE BRAZO		ALUMNIO 6061	
4	1	PLANCHA DE 5MM DE ESPESOR		ACERO A-36	
3	1	PERFIL CUADRADO 40x40x2.9-200		ACERO A-36	
2	1	PERFIL CUADRADO 40x40x2.9-150		ACERO A-36	
1	1	PERFIL CUADRADO 40x40x2.9-450		ACERO A-36	
POS.	CANT.	DESCRIPCIÓN	NORMA	MATERIAL	OBSERVACIONES

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ
FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA – INGENIERÍA MECATRÓNICA

MÉTODO DE PROYECCIÓN



TRABAJO DE FIN DE CARRERA – A703 – 10M1

ENSAMBLE SOPORTE
BRAZO

ESCALA

1:2

20122951

PIRCA CÁRDENAS, JAIRO JENER

FECHA:
2017.11.09

LÁMINA:
P3 – A3