



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**SISTEMA DE ENTRENAMIENTO PARA
EL LANZAMIENTO DE UN FRISBEE
EN REALIDAD VIRTUAL**

TESIS

Que para obtener el título de
Ingeniero Mecatrónico

P R E S E N T A

Daniel Velásquez Matus

DIRECTOR DE TESIS

M. en A. Luis Yair Bautista Blanco



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2019



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Agradecimientos

A la Universidad Nacional Autónoma de México por haberme formado como ingeniero.

A mis maestros por haberme transmitido sus conocimientos.

Gracias a mis sinodales Doctora María del Pilar Corona Lira, Maestro Ulises Peñuelas Rivas, Maestro Gabriel Hurtado Chong y Maestro Sergio Arzamendi Perez, por haber revisado este trabajo y por sus valiosas aportaciones al mismo. Muy especialmente a mi director de tesis, Maestro Yair Bautista Blanco por haberla dirigido, por sus inapreciables consejos y su apoyo incondicional de siempre.

Asimismo, a todos los que de una manera u otra colaboraron para llevar a cabo este proyecto.

A mi mamá y mi hermano por su apoyo y la confianza que pusieron en mí.

A mis amigos que me apoyaron a lo largo de la carrera y con quienes compartí alegrías y frustraciones.

Índice

Introducción	1
1 Antecedentes	2
1.1 Frisbee	2
1.2 Ultimate Frisbee	2
1.2.1 Ultimate Frisbee en la UNAM.....	3
1.2.1 Ultimate Frisbee en la actualidad	5
1.3 Videojuegos Frisbee	5
1.4 Tecnologías aplicables.....	6
1.4.1 Guantes	7
2 Planteamiento del problema	9
2.1 Justificación	9
2.2 Objetivos	13
2.1 Objetivos específicos.....	13
3 Diseño Conceptual	14
3.1 Necesidades	14
3.2 Requerimientos	14
3.3 Especificaciones.....	15
3.4 Concepto	16
3.5 Carta Morfológica.....	17
3.6 Subsistemas para solución	18
4 Diseño de configuración.....	20
4.1 Análisis por sistemas	20
4.1.1 Sistema de Sensado.....	20
4.1.2 Sistema de Comunicación	28
4.1.3 Sistema de Procesamiento.....	30
4.1.4 Sistema de entorno virtual.....	32
4.1.6 Sistema de Soporte	33
4.2 Configuración final	34
5 Resultados	58
5.1 Pruebas realizadas.....	58

6.1.1 Prueba 1 Colocar guante	59
5.1.2 Prueba 2 Detección de “puño cerrado”	60
5.1.3 Prueba 3 Velocidad de respuesta.....	60
5.1.4 Prueba 4 Lanzamiento del <i>Frisbee</i>	60
5.1.5 Prueba 5 Comparación del lanzamiento simulado contra un lanzamiento real	61
5.2 Análisis de resultados.....	62
5.3 Valores obtenidos en las especificaciones	64
Conclusiones	66
Trabajos futuros	67
Referencias.....	68
Índice de ilustraciones.....	72
Índice de gráficas.....	74
Índice de tablas	75
Apéndice.....	76
Apéndice 1 Encuesta de la justificación	76
Apéndice 2 Protocolo de pruebas.....	77
Apéndice 3 Manual de usuario	80

Introducción

El *Ultimate Frisbee* es un deporte relativamente nuevo y difiere en muchos aspectos al compararlo con los deportes en equipo que existen actualmente. A pesar de esto, es un deporte que ha ido creciendo alrededor del mundo y ha tenido una gran importancia y un gran desarrollo en la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM).

Debido a que se trata de un deporte nuevo, no existe mucha información sobre él. Por ese motivo y por la creciente importancia que ha tenido en el país y principalmente en la UNAM se decidió llevar a cabo un trabajo en el que se les ayude a los jugadores representantes de la UNAM a mejorar su desempeño en el juego.

En este trabajo se presenta el desarrollo de diseño de un modelo funcional que permita a los usuarios mejorar en el deporte. Esto mediante la reducción o eliminación -en lo posible- de algún problema que les impida o imposibilite la práctica.

El Capítulo 1, Antecedentes, es una recopilación de la información que se tiene sobre el deporte, su historia desde sus orígenes, cómo fue su llegada a México y su desarrollo en la UNAM. Asimismo se habla de las principales reglas de juego y la forma en la que se practica el deporte actualmente. Asimismo, se describen las tecnologías que existen actualmente, sobre el deporte y otras más que pudieran implementarse.

Teniendo un panorama general sobre el deporte y la forma de jugarlo, en el Capítulo 2, Planteamiento del problema, se muestran los problemas que se tienen en el equipo representativo y se exponen las razones por las que se realizó este trabajo. Posteriormente teniendo esta información se plantea el objetivo de este proyecto.

El Capítulo 3, Diseño conceptual, plantea los problemas que tienen los jugadores del equipo representativo que se pretenden resolver o al menos minimizar, sus necesidades y los parámetros con los que debe de cumplir este proyecto para que sea de utilidad. También se plantea la solución que se llevará a cabo, incluyendo los subsistemas que la conformarán.

En el Capítulo 4, Diseño de configuración, selección de los elementos, - dependiendo de las características de cada uno -, que conformarán la solución final. Se plantea la forma en la que los diferentes elementos interactúan entre sí, los conocimientos necesarios para que puedan funcionar y el prototipo que se desarrolló.

El Capítulo 5, Resultados, muestra los resultados que se obtuvieron al probar el prototipo final. Se analizan los resultados para poder determinar su utilidad para este trabajo, asimismo, se muestran las razones por las que se llega a estos resultados.

1 Antecedentes

En este capítulo se habla sobre el origen de los *Frisbees* y algunos cambios que han tenido a lo largo de la historia. Asimismo se habla sobre el deporte de *Ultimate Frisbee*, su origen, sus reglas, la llegada a México, su desarrollo en la UNAM y el deporte a nivel mundial. Se mencionan algunos juegos que se han desarrollado relacionados al Frisbee y algunas tecnologías aplicables al lanzamiento del *Frisbee*.

1.1 Frisbee

El término *Frisbee* es utilizado para referirse a los discos voladores. Antes de que los discos voladores se convirtieran en juguetes y se empezaran a comercializar se utilizaban los moldes en los que se hacían los pasteles “Frysbe Pie”, los cuales eran usados por las personas para lanzarse entre sí como entretenimiento. [1]

Posteriormente Walter Frederick Morrison aprovecha el creciente uso del plástico para crear un nuevo modelo de *Frisbee* y empezar a comercializarlos. En 1948 Walter Morrison patenta el primer disco volador con el nombre “*Pluto Platter*” el cual estaba hecho de baquelita, pero tuvo muchos inconvenientes por ser muy quebradizo. Debido a las demandas de los consumidores Walter Morrison decide vender la patente a la compañía de juguetes Wham’O en 1955. La compañía empezó a producir discos con distintas formas y tamaños con la finalidad de que volaran más lejos, fueran más ligeros y fáciles de atrapar. Esto facilitó la distribución de los *Frisbee* y que empezaran a surgir nuevos deportes como lo es el *Ultimate Frisbee*, *Disc Golf*, *Guts*, entre otros. [2] [3].[4]



Ilustración 1 Walter Frederick Morrison. Foto tomada de [5]

1.2 Ultimate Frisbee

La Federación Mundial del Disco Volador (WFDF por sus siglas en inglés) define el *Ultimate Frisbee* como un deporte de no contacto y auto arbitrado el cual se juega con un disco volador. Dos equipos juegan en un campo con las mismas dimensiones que un campo de fútbol americano, 100 metros de largo y 37 m de ancho y con dos zonas de anotación de 16 m. Como no se puede correr con el disco, el objetivo de cada equipo es anotar puntos atrapando el disco en su respectiva zona de anotación. [6] [7]



Ilustración 2 Juego de Ultimate Frisbee. Foto tomada de [8]

En este deporte existen varias formas de lanzar el disco entre los jugadores como lo son el *backhand* o *back*, *forehand* o *flick*, *hammer*, *scoober*, entre otros. El tipo de lanzamiento depende de la situación en la que se encuentre cada jugador ya que la trayectoria del disco volador varía, sin embargo los dos lanzamientos más utilizados son el *back* y el *flick*. El lanzamiento de *back* es el primero en ser enseñado debido a que tiene un movimiento de mano más sencillo. [9] [10]

El deporte hoy conocido como *Ultimate Frisbee*, empieza en E.E. U.U. en los años 60's con un grupo de estudiantes que mezclan reglas de varios deportes como el fútbol americano, soccer y basquetbol pero con un *Frisbee*. El nombre lo recibe de un estudiante que consideraba que la experiencia era lo último (*Ultimate*) en deporte. El deporte sigue creciendo hasta que en 1985 se crea la WFDF la cual se encarga de regular el deporte a nivel mundial. En esa década llega el deporte a México, al principio conocido como "Fútbol Frisbee" nombre que luego cambia al oficial *Ultimate Frisbee*. [2] [11] [12]

1.2.1 Ultimate Frisbee en la UNAM

Aunque el deporte se practicaba en la Ciudad Universitaria con anterioridad, el *Ultimate Frisbee* llega a la UNAM de manera oficial en el 2014 cuando el Lic. Jorge Mercado decide institucionalizar el deporte, invitando a la profesora Marcela Trejo Clemente a dirigir el nuevo proyecto. De esta forma se organiza el primer torneo Interfacultades del deporte en la UNAM, del cual saldría el primer equipo representativo. En este torneo, se invitó a participar a toda la comunidad de la UNAM. Los equipos que jugaron en esta ocasión, fueron los de las facultades de Ciencias, Ingeniería, Economía y Odontología. [13] [14]



Ilustración 3 Dirección General del Deporte Universitario. Foto tomada de [7]

Tras este primer torneo la Coordinadora Marcela Trejo y el entrenador Daniel Aguilar deciden, por ética, invitar a los participantes del primer torneo interfacultades que no cuenten con un equipo a pesar de que sean inexpertos en el deporte, dejando las puertas abiertas para cualquier persona que quiera representar a la máxima casa de estudios. A partir de esto se crea el primer equipo representativo de *Ultimate Frisbee* en la UNAM formado principalmente de gente nueva en el deporte. [13] [14]



Ilustración 4 Equipo representativo de la UNAM 2019, rama varonil. Foto tomada de [8]

El principal problema al que se enfrentó el equipo es la falta de popularidad del deporte en el país, problema que persiste hasta la actualidad. Por este motivo el trabajo del deporte en la UNAM se enfoca en la promoción, la difusión, el desarrollo, la evaluación del proyecto y el mantenimiento del mismo, tareas que son apoyadas por el actual director de la Dirección General del Deporte Universitario (DGDU) el Lic. Alejandro Fernández Varela. [13] [14]

Actualmente, se ha conformado la primera asociación de *Ultimate Frisbee* en la UNAM. El director de la DGDU se encuentra sobre la asociación, seguido de la figura del presidente, el vicepresidente, el tesorero, el secretario, el vocal universitario, el vocal de media superior y el vocal de alumnos. La asociación de *Ultimate Frisbee* de la UNAM se forma con el fin de aumentar

la participación de la UNAM, en los asuntos relacionados con el deporte en el país, además de ayudar a que se pueda formar la primera federación mexicana de *Ultimate Frisbee*. [13] [14]

Entre los logros que ha tenido el equipo se encuentra el obtener el 4º lugar nacional en el 2018 en la categoría mixta. Además el equipo ha logrado, desde el 2016, ganar su pase en el torneo regional para competir en los torneos nacionales en todas las categorías. Todo esto se ha conseguido a pesar de ser un equipo nuevo en comparación con los demás clubes del país. Como universidad, se realizaron 2 Torneos Universitarios, en el 2018 y el 2019, en los cuales el equipo quedó en primer lugar en la categoría mixta, categoría que se ha convocado como torneo Universitario. [13] [14]

Entre los logros individuales de los jugadores se encuentra, el de 5 jugadores del equipo los cuales fueron invitados a formar parte de un equipo que participaría en el torneo *Sectionals 2017* que se llevó a cabo en Austin Texas. De la misma manera dos jugadores fueron invitados a participar con el equipo Master Medellin Colombia en el mundial de Canadá en el 2018. [13] [14]

La UNAM está interesada en que toda su comunidad conozca este deporte. Como equipo se tiene el objetivo de seguir formando jugadores de muy buena calidad y que la formación de los alumnos sea integral, que puedan combinar el deporte de alto rendimiento junto con todos sus estudios, obteniendo como resultado un equipo más competitivo. De la misma manera se espera que otras universidades logren formar sus propios equipos representativos para tener un evento a nivel universiada u olimpiada nacional. [13] [14]

1.2.1 Ultimate Frisbee en la actualidad

En la actualidad el deporte es uno de los 37 deportes reconocidos por el Comité Olímpico Internacional, pero, todavía no forma parte de los juegos Olímpicos. Esto se ha logrado gracias a los esfuerzos de la WFDF que ha trabajado para su difusión. En la lista de los juegos Olímpicos de Paris 2024 no apareció el *Ultimate Frisbee* pero se espera que en los juegos 2028 que se llevarán a cabo en Los Angeles California, se agregue este deporte. [15] [16]

1.3 Videojuegos Frisbee

En el tiempo que ha existido el *Frisbee* han sido fabricados varios videojuegos, como Windjammers para la Neo Geo en 1994, el cual consiste en anotar goles con un *Frisbee*. Asimismo se encuentra el juego de computadora “Layout Ultimate” que emula un juego de Ultimate Frisbee. O el simulador del lanzamiento del *Frisbee* de Wii Sports Resort “Frisbee Dog”. Sin embargo ninguno de estos juegos se acerca a una experiencia real del lanzamiento de un disco volador. [17] [18] [19]



Ilustración 5 Juego “Frisbee Dog”. Foto tomada de [19]

1.4 Tecnologías aplicables

Actualmente con el desarrollo de nuevas tecnologías de realidad virtual, han empezado a desarrollarse algunas tecnologías para que el usuario pueda interactuar con el entorno. Algunas de las tecnologías se enfocan en las manos, de tal forma que el usuario las pueda usar como si se encontrara en la realidad. Actualmente en la industria de los videojuegos existe un gran avance en el desarrollo de controles, los cuales no permiten la inmersión completa del usuario.



Ilustración 6 Forma común de un control para consola. Foto tomada de [20]

La palabra inmersión puede definirse cómo la acción de introducirse en un ambiente determinado. Este elemento es importante para que los usuarios realicen mejor una actividad definida. Cuando se trata de inmersión en juegos o software, es importante que el usuario sienta que el entorno que lo rodea se parezca a la actividad real. Los controles clásicos como los que se mostraron en la Ilustración 6 no se parecen a objetos utilizados en el deporte de *Ultimate Frisbee*, por lo que limitarían la inmersión del usuario. [21]

Con el fin de quitar los problemas de inmersión que generan los controles tradicionales, se empezaron a desarrollar tecnologías que se pueden vestir, o tecnología wearable. La finalidad de este tipo de tecnología es que se pueda usar como una prenda cualquiera.

1.4.1 Guantes

Debido a que la tecnología *wearable* es una tecnología en desarrollo no cuenta con una gran variedad. En el mercado actual existen varios guantes que obtienen la posición de la mano junto con información de los movimientos de los dedos. A continuación, se realiza un análisis de los sensores que se encuentran en el mercado actualmente.



Ilustración 7 Guante Manus ONE waerable. Foto tomada de [22]

Manus VR

Estos guantes cuentan con 10 sensores, distribuidos por todo el guante con la finalidad de conocer la posición y los gestos que realiza la mano. Por medio de acelerómetros y giroscopios el guante es capaz de detectar la posición de las manos de los usuarios. Tienen un rango de error de 3 grados para determinar el ángulo de los dedos. Pesa 68.5 [g], es inalámbrico y cuenta con Led's para indicar cuando está cargando o si hay algún problema con el sensor, entre otras cosas. [22]



Ilustración 8 Manus VR. Foto tomada de [22]

Dexmo

Estos guantes son desarrollados por Dexta Robotics y también cuentan con sensores para detectar la posición de la mano y los movimientos de los dedos. La diferencia de este guante en comparación con el anterior no utiliza acelerómetros y cuenta con actuadores para oponer resistencia al movimiento de los dedos. Lo que se busca es que el usuario tenga la sensación de que se encuentra tocando algo. El peso de estos guantes es de 340 [g]. [23]



Ilustración 9 Dexmo. Foto tomada de [23]

Guante de ETH Zurich y New York University

Los estudiantes de las universidades ETH Zurich y la Universidad de Nueva York (NYU por sus siglas en inglés) presentaron en la Siggraph 2019 un nuevo guante para medir la posición y los gestos de la mano en tiempo real y con mucha precisión. Este guante no necesita de ningún equipamiento externo para usarse y puede ser usado con una calibración mínima. Los guantes son suaves y delgados para que el usuario los sienta cómodos, además contiene 44 sensores para obtener la información. [24]



Ilustración 10 Guante de ETH Zurich y NYU. Foto tomada de [24]

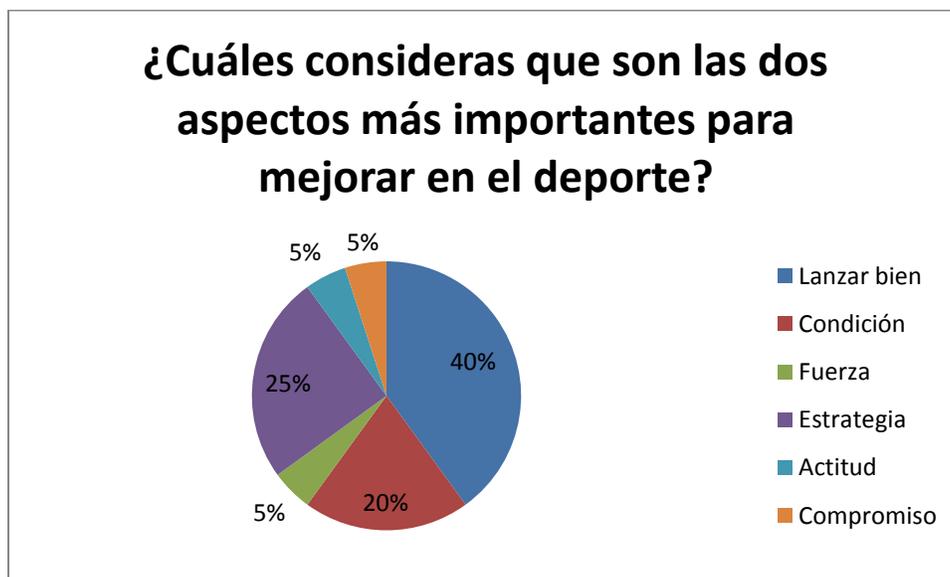
2 Planteamiento del problema

En este capítulo se plantea el problema principal que se busca resolver en este proyecto. Para identificar el problema se realizó una encuesta a los jugadores que practican el deporte regularmente. La finalidad de esta encuesta es determinar los problemas que tienen, para poder definir los objetivos que tendrá este trabajo.

2.1 Justificación

Como se mencionó en el Capítulo 1 el deporte de *Ultimate Frisbee* ha tenido un gran crecimiento en la UNAM, por eso surge la intención de ayudar a las personas que practican este deporte a mejorar con la finalidad de conocer los aspectos en los que se deben practicar para mejorar en el deporte así como la información de interés, se aplicó una encuesta a diez jugadores del equipo representativo de *Ultimate Frisbee* de la UNAM. La encuesta aplicada se puede observar en el Apéndice 1 Encuesta de la justificación y a continuación se muestran los resultados obtenidos.

Un dato de interés para este trabajo es saber qué aspectos consideran más importantes para poder mejorar en el deporte, en esta pregunta se les permitió elegir 2 opciones, los resultados se muestran a continuación.

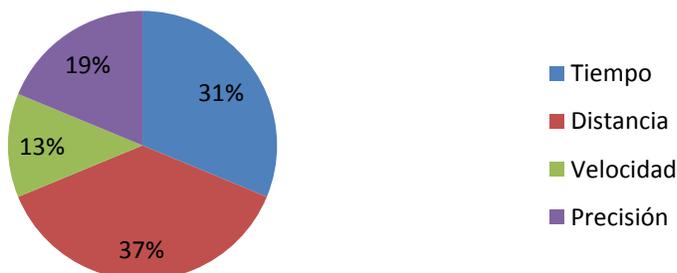


Gráfica 1 Aspectos importantes para mejorar en el deporte

El resultado con más respuestas fue el de “Lanzar bien” con un 40%, en segundo lugar con el 25% se encuentra la “Estrategia” y en tercer lugar la “Condición” con el 20%.

Adicionalmente se les preguntó ¿Cómo sabrían si están haciendo bien la actividad, si han mejorado o si requieren más práctica?

¿Qué información te serviría saber para mejorar en el aspecto antes mencionado?

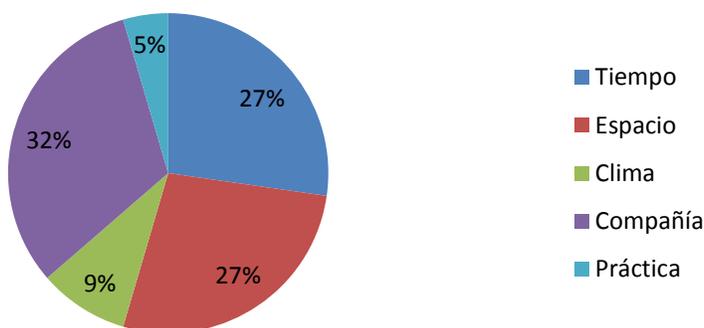


Gráfica 2 Información útil para mejorar en *Ultimate Frisbee*

Las respuestas que se obtuvieron hacen referencia a la respuesta que cada encuestado seleccionó anteriormente. El tiempo que cada uno le dedica a practicar, su lanzamiento, su fuerza, condición, etc. Los usuarios que respondieron “distancia”, “velocidad” y “precisión” se referían a la distancia final a la que queda su *Frisbee* al ser lanzado, la velocidad con la que se lanza y la precisión que ellos tienen para lanzar el disco. Las respuestas con mayor frecuencia fueron la distancia con 37%, el tiempo con 31% y la precisión con 19%.

A continuación, se les preguntaron los motivos que les impiden practicar con regularidad.

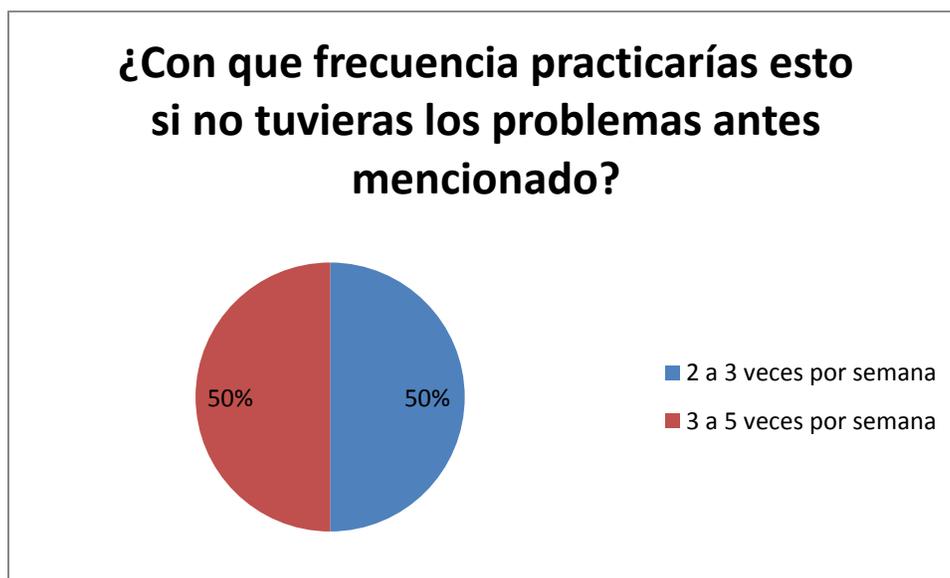
¿Cuáles son los problemas que tienes para poder mejorar estos aspectos?



Gráfica 3 Motivos que impiden mejorar

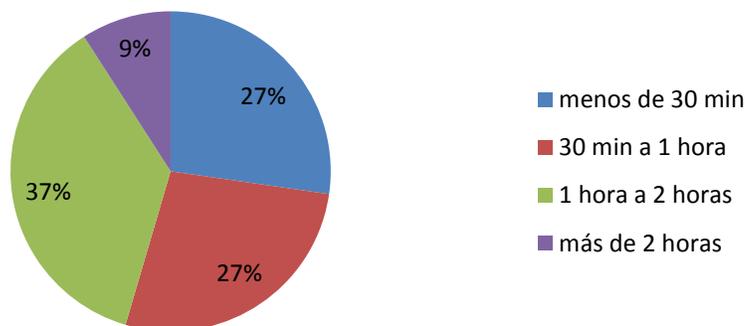
Para este caso los problemas que presentan los usuarios son el tiempo libre para practicar, el cual no es suficiente. El espacio en el cual pueden practicar es muy reducido y no pueden realizar la actividad adecuadamente. Como son actividades al aire libre dependen de tener un buen clima y para practicar su lanzamiento requieren de un compañero con el cual lanzar, de hacerlo solos tendrían que recoger cada disco que lanzan. El problema más recurrente fue la falta de "Compañía" con 32%. En segundo lugar se encuentra empatado el "Tiempo" y la falta de "Espacio" con 27% cada uno.

También se deseaba saber la frecuencia y el tiempo con el cual realizarían la actividad si no existieran esos problemas.



Gráfica 4 Frecuencia de práctica

¿Cuánto tiempo le dedicarías a realizar esta actividad?



Gráfica 5 Tiempo de práctica

En estas preguntas hubo un empate en los días que le dedicarían a practicar, el 50% dijo que practicarían de 2 a 3 días y el otro 50% mencionó que lo harían de 3 a 5 días.

El aspecto más importante para los jugadores del equipo representativo de *Ultimate Frisbee* de la UNAM es el lanzar bien. Sin embargo tienen algunos problemas como el tiempo, el espacio y la falta de alguien con quien lanzar para poder mejorar en este aspecto. De no tener estos problemas podrían practicar mejor y mejorar en el deporte.

Aunque existen varios juegos que utilizan un Frisbee su función es meramente recreativa. El único que podría acercarse a un lanzamiento real ya que es necesario mover la mano para hacer el lanzamiento es el juego *Frisbee Dog* de Wii Sport Resort, pero la trayectoria que sigue el Frisbee se aleja de la realidad. Por este motivo surge la idea de crear una herramienta para que las personas que practiquen *Ultimate Frisbee* puedan practicar desde su casa.

Aunque la encuesta y el proyecto se enfocan en el equipo representativo de *Ultimate Frisbee* de la UNAM, los problemas aquí mencionados son problemas que comparten todos los jugadores de este deporte, por lo cual la solución a la que se llegue podría beneficiar a cualquier persona que practique el deporte.

Se desea que la solución a proponer reduzca los problemas de espacio y tiempo y que disminuya la dependencia de un acompañante para que se pueda realizar. Además sería de utilidad que exista una realimentación para que el usuario pueda conocer su estado actual y mejorar los aspectos que desee mejorar. Todo esto con la finalidad de que el usuario pueda practicar su lanzamiento del tipo backhand.

Se decidió que la solución se debe de enfocar en el lanzamiento *backhand*, porque es el lanzamiento más fácil de realizar y por eso es el primero en enseñarse. Asimismo el movimiento de la mano es más simple en comparación con el tiro de *flick*, lo que facilitará su desarrollo.

2.2 Objetivos

El objetivo de este proyecto es:

Desarrollar una herramienta para ayudar a los jugadores de *Ultimate Frisbee* a practicar su lanzamiento de *backhand*.

2.1 Objetivos específicos

- Identificar las características del lanzamiento.
- Proponer un sistema para leer los valores de interés para el *backhand*.
- Simular la trayectoria del vuelo de un *Frisbee*.
- Análisis de lanzamiento con pruebas de laboratorio.
- Pruebas de lanzamiento virtual y real con jugadores de *Ultimate Frisbee*.

3 Diseño Conceptual

Teniendo en cuenta la problemática y los objetivos antes mencionados, se definen los elementos con los que debe cumplir la solución final. En el diseño conceptual se definen las necesidades del usuario, los requerimientos y las especificaciones que debe cumplir el proyecto. Teniendo claros estos puntos, se define la solución final como concepto, de esta manera se puede materializar la solución para empezar a trabajar en ella.

3.1 Necesidades

Las necesidades son las características que el usuario desea que tenga el proyecto, éstas son independientes de cualquier otro producto en particular. Se expresan como enunciados y describen lo que el resultado final debe hacer, mas no indican la forma de hacerlo. [25] [26]

Después de analizar la información obtenida en la encuesta que se aplicó y considerar algunos aspectos obtenidos de los antecedentes, se definieron los siguientes puntos como las necesidades del usuario para el proyecto.

- Recibir información útil para medir el rendimiento.
- Evitar depender de un acompañante para realizar la actividad.
- Poder implementarse en casa.
- Rápido de configurar.
- Trayectoria del Frisbee similar a un lanzamiento real.

3.2 Requerimientos

Los requerimientos se pueden considerar como acciones u operaciones que debe de incluir o realizar el proyecto. Por eso se reestructuraron las necesidades para definir los requerimientos que describan elementos destacados de las necesidades. En la Tabla 1 “Necesidades y requerimientos” se muestran los requerimientos obtenidos de las necesidades.

Tabla 1 Necesidades y requerimientos

Necesidades	Requerimientos
Recibir información útil para medir el rendimiento.	Proporcionar datos del lanzamiento al usuario.
Evitar depender de un acompañante para realizar la actividad.	Poder ser usado sin la ayuda de otra persona.
Poder implementarse en casa.	Poder ser usado en un espacio pequeño.
Rápido de configurar.	Poder usarse en un periodo corto de tiempo.
Trayectoria del Frisbee similar a un lanzamiento real.	Tener una trayectoria similar a la del lanzamiento de un disco normal.
	Evitar elementos que entorpezcan la acción de lanzar un <i>Frisbee</i> .

Para que el sistema propuesto ayude a que el usuario mejore sus habilidades, se debe dar la información sobre la manera en la que lo está haciendo, como se muestra en la Gráfica 3 “Información para mejorar”.

Con el fin de reducir los problemas que impiden que un jugador de este deporte pueda practicar, se debe reducir el número de personas necesarias para practicar. Otro problema que es importante resolver es el espacio que necesita el usuario para practicar, el cual debe ser lo suficientemente pequeño para que pueda realizar la actividad en su casa.

Como los usuarios a los que se enfoca el proyecto tienen un tiempo limitado, la solución no debe de utilizar mucho tiempo en su configuración.

Finalmente la actividad a realizar debe de ser lo más parecida a un lanzamiento en condiciones normales, de modo que les ayude cuando se encuentren en una práctica, esto incluye la trayectoria del disco y la acción de lanzar.

3.3 Especificaciones

El proyecto se debe basar en las especificaciones, de modo que éste pueda satisfacer las necesidades del usuario. Las especificaciones son una métrica, cuyos valores representan los objetivos del proyecto.

Las especificaciones se definen partiendo de los requerimientos del usuario, basándose en la experiencia y juicio del autor, con el fin de tener resultados cualitativos y cuantitativos.

El resultado es una guía con la cual se puede evaluar si el proyecto cumple con los objetivos mencionados. En la Tabla 2 “Requerimientos y especificaciones de la solución”, se definen los requerimientos y las especificaciones que se emplearon en este proyecto.

Tabla 2 Requerimientos y especificaciones de la solución

Requerimientos	Especificaciones
Proporcionar datos del lanzamiento al usuario	Distancia a la que se lanzó el disco
Número de personas involucradas para practicar el lanzamiento reducido	Número máximo de personas requeridas
Poder ser usado en un espacio pequeño	Dimensiones mínimas del espacio
Poder usarse en un periodo corto de tiempo	Tiempo máximo de configuración
Tener una trayectoria similar a la del lanzamiento de un disco normal	Porcentaje de semejanza mínimo
Evitar elementos que entorpezcan la acción de lanzar un <i>Frisbee</i> .	Peso máximo
	Número máximo de elementos

Para tener una referencia de los datos que se le deben dar al usuario se utilizó la información recabada en la encuesta, en la cual los usuarios respondieron que los datos que más les ayudarían a mejorar son el tiempo y la distancia del lanzamiento.

Otro punto a resolver es el número de personas que intervienen al practicar los lanzamientos, las cuales, al ser más de uno limitan la práctica de jugador. Por eso se pretende reducir este número, para facilitar el entrenamiento de los usuarios.

A continuación, se listan las especificaciones que se tomarán en cuenta para este proyecto. Se coloca la variable junto con su valor, para el caso de los puntos cuantificables o su parámetro para los cualitativos.

Tabla 3 Especificaciones con valores

Especificaciones	Valores	Justificación
Número máximo de personas requeridas	1 persona	Como el número mínimo de personas que se necesita para practicar es de dos, la forma de reducirlo es que el usuario lo pueda hacer sólo
Dimensiones mínimas del espacio	1.8 m x 1.8m	Se consideró el espacio que una persona necesita para hacer el movimiento del lanzamiento de un <i>Frisbee</i>
Porcentaje de semejanza mínimo	90%	Para que los usuarios puedan mejorar en el deporte, la experiencia que se les proponga debe de asemejarse a la realidad
Peso máximo	200 g	El peso de un disco de Ultimate Frisbee es de 175 [g], por eso el dispositivo con el cual tenga que interactuar el usuario no puede ser mucho más pesado, de otra forma le causará limitaciones en la actividad
Número máximo de elementos	1	Para hacer más sencillo y rápido el uso de la solución
Tiempo máximo de configuración	3 min	El tiempo máximo de atención de una persona es de 3 minutos. No se debe de superar este tiempo para que el usuario no pierda interés. [27]

3.4 Concepto

El concepto es una descripción aproximada de la tecnología, principios de trabajo y la forma del producto, es decir, una explicación concisa de la solución que va a satisfacer las necesidades antes mencionadas. [25]

Tomando en cuenta lo anterior y usando como base las necesidades, requerimientos y especificaciones antes planteadas se definió una solución con la finalidad de tener una referencia de lo que se desea realizar. Con el concepto se puede hacer un diagrama del sistema y se puede empezar a trabajar en las funciones permitidas.

El concepto quedó definido como:

“Un dispositivo que obtenga información sobre el movimiento del usuario. Esta información será usada para generar la representación del lanzamiento del disco en un entorno virtual, esto se conecta a una interfaz gráfica para que el usuario tenga una retroalimentación del movimiento del

Frisbee y pueda tener datos que le ayuden a mejorar. La solución solo requerirá de una persona para que se pueda emplear, de igual manera, la implementación será fácil y rápida de emplear. Además, se podrá implementar en una casa”.

El concepto descrito cumple con las características planteadas de la siguiente forma.

- Los aspectos de tiempo, personas y espacio, se resuelven al crear el entorno virtual, ya que el usuario lo puede hacer solo, desde su casa y solo necesita del espacio necesario para hacer el movimiento.
- El tiempo de uso, elementos que intervengan y peso, se incluye en el sensor que se encarga de obtener la información, éste deberá contar con el peso máximo, el tiempo máximo que se necesita para configurarlo y los elementos que incluya.
- El crear una trayectoria similar al lanzamiento real, se conseguirá en el entorno virtual.
- La retroalimentación visual, se dará por medio de la interfaz gráfica, en la cual el usuario observará la trayectoria del disco, así como información adicional, como la distancia.

3.5 Carta Morfológica

La carta morfológica, es una técnica de análisis morfológico, la cual permite visualizar las posibles configuraciones que se pueden tener de un sistema. Esta técnica se basa en la idea de que cada objeto está compuesto de un número de elementos, los cuales cuentan con identidad propia y pueden ser aislados. Para identificar los subsistemas hay que realizar un análisis de las partes que componen a la solución final. [25] [28]

Posteriormente se deberán elegir los elementos de cada subsistema, dependiendo de su relevancia y viabilidad, tras analizar las interacciones que tienen los subsistemas entre sí, dependiendo de los elementos que se elija para cada uno de ellos. Al final se eligen los elementos dependiendo de su relevancia y la viabilidad del proyecto. [25] [28]

Para resolver el problema antes planteado, se requieren varios elementos. Primero es necesario un dispositivo que mida la posición de la mano, para conocer la dirección en la que el usuario desea lanzar el disco volador. No obstante, se requiere saber el momento en el cual el usuario sujeta el Frisbee y lo suelta, por lo que hay que agregar otro elemento para obtener esta información. Es importante resaltar que como este dispositivo no debe de interferir con los movimientos de la mano, por lo mismo, debe de tener un peso reducido.

Como los sensores se colocan en el usuario, se necesita un soporte donde se puedan colocar todos los elementos. Este soporte debe permitir que la información se obtenga de forma rápida y precisa, además de ser cómodo para el usuario, de modo que pueda realizar la actividad con la mayor libertad posible y tenga una mayor inmersión. Al aumentar la inmersión que tiene el usuario en la solución, la experiencia es más real, por lo que los resultados del entrenamiento mejoran.

La información de los sensores, debe ser procesada antes de poder usarla para generar el entorno virtual. Por eso se requiere un sistema que filtre, interprete los datos obtenidos y los prepare para

enviarlos, para que se pueda generar el entorno virtual. El procesamiento también ayudará a disminuir la carga de trabajo de los sistemas para agilizar el proceso.

Una vez que los datos han sido procesados, debe existir un medio de comunicación entre el sistema que se encarga de procesar los datos y el que genere el entorno virtual. Este medio se encuentra relacionado de forma directa con el sistema, ya que este último se encargará de mandar la información. El medio debe de ser compatible con el sistema que genere el entorno virtual, para su correcto funcionamiento.

Por último, se necesita un elemento que use la información obtenida para generar el entorno virtual. Este entorno debe incluir la interacción del usuario con el entorno generado y la retroalimentación visual que se le proporcionará al usuario. Es muy importante tomar en cuenta la información que los usuarios dijeron necesitar cuando se les aplicó la encuesta.

3.6 Subsistemas para solución

Con la información dada anteriormente, se realizó una abstracción de las partes que debe tener el prototipo final. Se realizó un diagrama de caja negra para observar la interacción que tienen los diferentes sistemas entre sí. Se partió de la posición de la mano y como resultado se tiene al sistema virtual.

Para este proyecto en particular se tienen como entradas la posición de la mano del usuario y algún gesto que esté realizando. La salida será la interacción del usuario con el sistema de realidad virtual y los datos del lanzamiento que se realiza.

En la Ilustración 11 “Diagrama de caja negra con entradas y salidas”, se muestra el sistema completo, al cual entra la posición de la mano y los gestos de la misma y se tiene como salida la interacción del usuario con el entorno virtual y los datos del lanzamiento.

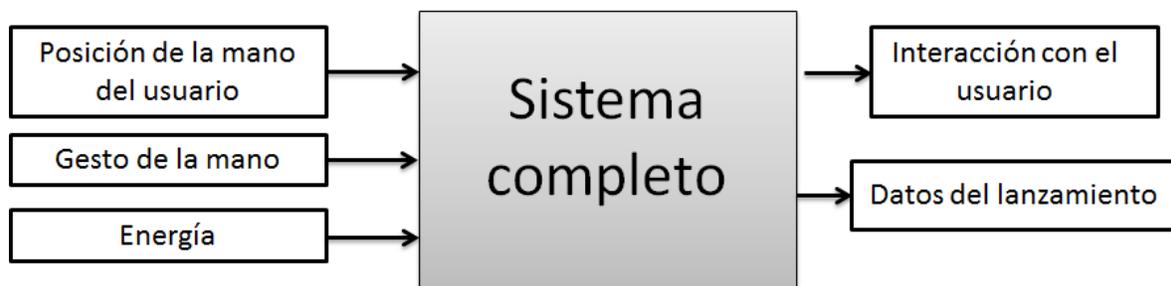


Ilustración 11 Diagrama de caja negra con entradas y salidas

Para entender el funcionamiento de la caja negra, se realiza una separación de los subsistemas que intervienen en la solución. De esta manera se puede observar de manera gráfica el proceso por el que deben de pasar las entradas para conseguir las salidas deseadas. En la Ilustración 12 “Interacción entre subsistemas”, se puede observar gráficamente la interacción entre los subsistemas propuestos.

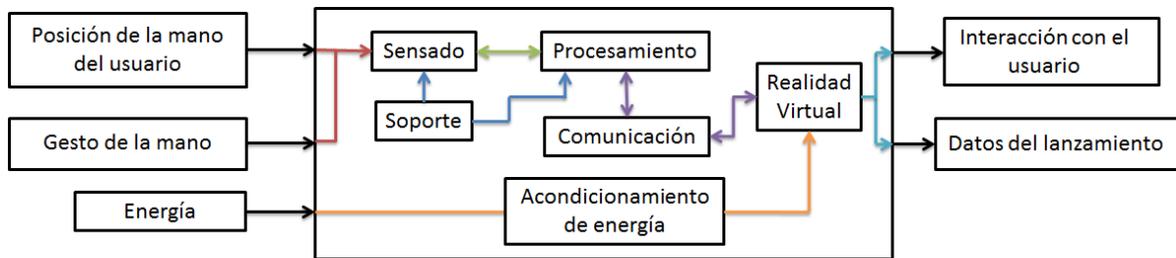


Ilustración 12 Interacción entre subsistemas

A continuación se da una descripción de cada uno de los subsistemas, para comprender mejor la interacción que hay entre ellos y la tarea que realizan dentro del sistema completo.

- **Subsistema Sensado:** Son todos los sensores que se encargarán de medir los gestos y los datos sobre la posición de la mano necesarios para que funcione el sistema. Estos sensores serán controlados y alimentados por el subsistema de procesamiento.
- **Subsistema Soporte:** Almacena los elementos del subsistema de sensado y procesamiento, además se encarga de mantener los sensores en su lugar. Además debe de tener una forma de ajustarse para evitar que se caiga durante la actividad.
- **Subsistema Procesamiento:** Se encargaría de obtener y organizar todos los datos provenientes de la mano del usuario. Asimismo, filtra la información obtenida para poder enviarlos por medio del sistema de comunicación al subsistema encargado de generar el entorno virtual.
- **Subsistema Comunicación:** Este apartado funciona como vínculo entre el subsistema de procesamiento y el subsistema de realidad virtual. Se encarga de que la información del sensor, llegue al subsistema de realidad virtual de la forma más rápida y confiable para que sea utilizada.
- **Subsistema entorno virtual:** Genera el entorno virtual con el cual tiene interacción directa el usuario. Para lograr esto, utiliza los datos obtenidos del gesto de la mano y la posición de la misma, recibidos por el subsistema de comunicación.
- **Subsistema de acondicionamiento de energía:** Como los sistemas que intervienen en la solución final tienen varios requerimientos tanto de voltaje como de corriente, es necesario agregar un elemento que regule esta energía.

4 Diseño de configuración

Una vez que se realiza el concepto de la solución final y los subsistemas que intervienen en ella, es necesario elegir los elementos que conformarán cada parte del prototipo. Se utilizan como referencia los requerimientos, la relevancia e interacciones con otros elementos para decidir la mejor configuración de la solución.

4.1 Análisis por sistemas

Primero es necesario conocer a fondo cada subsistema y las posibles soluciones con las que se cuenta. Se utilizaron los elementos ya definidos para determinar la viabilidad de cada una de las posibles soluciones.

4.1.1 Sistema de Sensado

Este subsistema se dividió en dos partes, la lectura de la posición de la mano, y la otra encargada de medir los gestos de la misma. Como los sensores para realizar estas acciones son independientes, se hizo la selección de elementos por separado.

Sensor Gesto

Se necesita conocer el gesto de la mano, para determinar el momento en que el usuario suelta el disco y que puede interactuar con el sistema, para calibrarlo. Se determinó que para este proyecto solo se necesitan de tres gestos, el de “puño cerrado”, para saber el momento en el cual el usuario tiene el disco en la mano, el de “mano abierta”, cuando el usuario no tiene el disco o la acaba de lanzar y el de “doble toque” para que el usuario pueda calibrar el sensor. En la Ilustración 13 “Gestos de la mano”, se pueden observar los gestos con los que el usuario podrá interactuar con el entorno virtual.

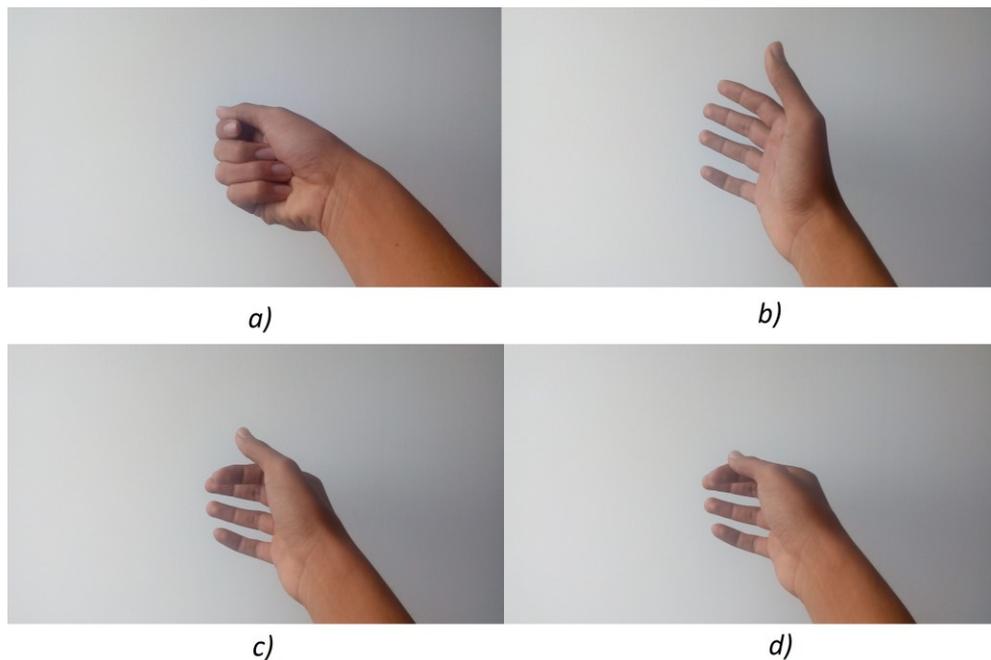


Ilustración 13 Gestos de la mano, a) puño cerrado, b) mano abierta, c) y d) doble toque.

Puño cerrado: Los dedos deben de tocar la palma de la mano a excepción del índice y el pulgar. El pulgar va sobre el dedo índice el cual puede separarse de la palma. El motivo por el cual se requiere esta posición es para simular la forma en la que se sostiene un Frisbee como se muestra en la Ilustración 14 “Agarre de *backhand* de un *Frisbee*”. En la Ilustración 13 “Gestos de la mano”, a) puño cerrado, se muestra la posición de la mano que se considerará como “puño cerrado” en este proyecto.



Ilustración 14 Agarre de *backhand* de un *Frisbee*

Mano abierta: Para el caso de la mano abierta se tomará en cuenta que los dedos no se estén tocando entre sí o a otra parte de la mano. Al igual que en el gesto anterior se hace pensando en el lanzamiento del disco el cual empieza cuando se suelta el *Frisbee* no necesariamente cuando los dedos están completamente extendidos. En la Ilustración 13 “Gestos de la mano”, b) Mano abierta, se puede observar el gesto que se considerará como mano “abierta”.

Doble toque: Este gesto, a diferencia de los anteriores, no tiene que ver con el lanzamiento de un disco, su función dentro del sistema es para calibrar. El gesto consiste en que el pulgar toque dos veces en menos de dos segundos el dedo índice, para este proceso el usuario debe de pasar de la imagen c) a la d) -de la Ilustración 13 “Gestos de la mano”- dos veces seguidas.

Después de analizar cada gesto se determinó que para diferenciarlos solo es necesario conocer la posición de tres dedos. Los tres dedos seleccionados fueron:

Meñique: Este dedo se utiliza para saber que el usuario se encuentra haciendo el gesto de “puño cerrado” lo cual sucederá en el momento en el que el dedo meñique toque o se encuentre cerca de la palma de la mano.

Pulgar: Este dedo ayuda a distinguir los tres gestos, cuando se encuentra tocando el dedo índice representa al “puño cerrado”, si toca dos veces seguidas el dedo índice sin que el meñique toque la palma significa que es el gesto de “doble toque” y si no toca el dedo índice es “mano abierta”.

Sensores ópticos

Como su nombre lo indica, los sensores ópticos funcionan con la luz, modificando la señal entregada dependiendo de la intensidad de ésta. Los sensores varían dependiendo del tipo de luz que mida, sin embargo el funcionamiento de todos ellos es similar, a continuación se explica la forma en la que funcionan los sensores infrarrojos.

Funcionamiento

Los sensores ópticos miden la luz infrarroja se requiere de una fuente de luz infrarroja la cual consiste en un LED por lo general. La otra parte es un convertidor de corriente a voltaje, como se muestra en la Ilustración 15 “Circuito del sensor óptico”.

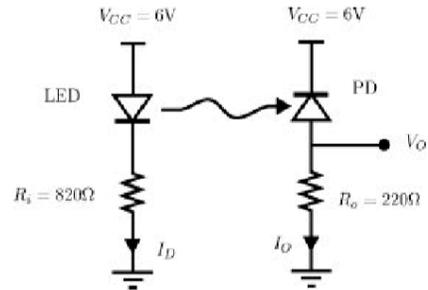


Ilustración 15 Circuito del sensor óptico. Foto tomada de [29]

Cuando se quiere utilizar este tipo de sensor en guantes instrumentales, para medir la rotación de las articulaciones, entran en juego dos variables, la distancia focal y el ángulo entre los ejes focales. Al error generado por estas variables se le conoce como excentricidad y se puede explicar de una mejor forma con la Ilustración 16 “Esquema de variables en un sensor óptico”. [29]

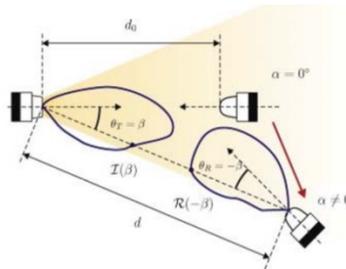


Ilustración 16 Esquema de variables en un sensor óptico. Foto tomada de [29]

Como el valor de la medición depende de dos variables el sistema es no lineal, por lo que es necesario caracterizar y linealizar el sensor para poder usarlo. Al linealizar el sistema se determinó que el rango de operación del sensor, para este tipo de aplicación es de 30° a 60°. [29]

Sensor piezoeléctrico.

Los materiales piezoeléctricos son aquellos que cambian sus propiedades eléctricas cuando se les aplica una tensión mecánica. Por otro lado cuando existe una deformación el material produce un campo magnético. [29]

Funcionamiento.

En el mercado existe una variedad de sensores que aprovechan las características de los materiales piezoeléctricos para medir la deformación. A este tipo de materiales se les suele conocer como *flex sensor* que son una barra, la cual se debe doblar.

Existe una forma de realizar un flex sensor casero, el cual no depende de un material piezoeléctrico. Este sensor consiste en hojas conductoras apiladas y un alma de alambre a la mitad.

En el interior se colocan dos alambres, los cuales deben de estar en diferentes capas de las hojas. Al flexionarse el sensor, cambia el contacto que tiene el sensor con las hojas y da como resultado una variación en la resistencia del sensor.

El sensor *flex sensor* funciona como una resistencia variable, cuyo valor depende de la deformación del mismo. Para poder emplear este tipo de sensor es necesario emplear un circuito para convertir las variaciones de resistencia en variaciones de voltaje, el circuito más común y fácil de usar es un divisor de voltaje. Este circuito tiene como resultado una señal no lineal la cual se debe de caracterizar y linealizar para poder utilizarlo de forma práctica. En la ilustración 17 “Sensor *flex*” se puede observar un tipo de sensor *flex sensor* que se encuentra en el mercado. [31]

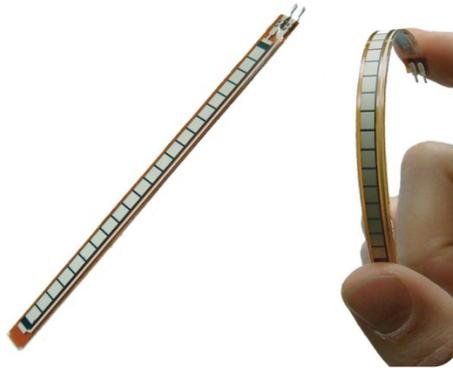


Ilustración 17 Sensor Flex. Foto tomada de [31]

Sensores por tendones

Este tipo de sensores están basados en la teoría de tendones para actuadores, la cual dice que es posible actuar un mecanismo con motores fuera de éste, utilizando poleas para girar los eslabones, como en el caso de los tendones. Este sistema se suele usar para manos mecánicas, pero se puede usar un sistema que mida el movimiento de las falanges. [29]

Funcionamiento

Cuando un dedo se flexiona, las falanges del dedo deben rotar, como resultado de la extensión o contracción de los tendones. Para este tipo de sensores se convierte la contracción y extensión en rotación al conectarse una banda a un eje, como si fuera una polea con una cadena. Cuando el dedo se flexione la tensión moverá el sistema en un sentido, el problema se encuentra al quitar la tensión ya que no hay un elemento que haga que el eje regrese. Por eso se plantea la idea de agregar un elemento que almacene energía. [29]

Este sistema se puede conectar a un potenciómetro, elemento que varía su resistencia eléctrica dependiendo de la posición en la que se encuentre. El valor de la resistencia eléctrica es proporcional al ángulo de giro y preciso, esto lo convierte en un elemento confiable y fácil de usar.

Al igual que en el caso de los sensores piezoeléctricos, es necesario agregar un circuito para convertir la variación de resistencia en una variación de voltaje, el cual suele ser un divisor de voltaje.

Sensor de contacto

Los sensores de contacto, son sensores mecánicos que permiten o cortan el flujo de corriente eléctrica dependiendo del caso. Por lo general se ocupan para saber si un elemento llegó a un lugar determinado o para encender o apagar algo. Suele usarse en los pistones, para saber el inicio y el final de carrera pero, también se utilizan para detectar la presencia de algún objeto o como interruptores.

Funcionamiento

La forma en la que operan estos dispositivos es sencilla, cuando un elemento determinado, llega al lugar deseado, empuja un elemento mecánico el cual cierra o abre el circuito, dejando pasar o cortando la corriente eléctrica, como se muestra en la Ilustración 18 “Sensor de contacto”. [30]

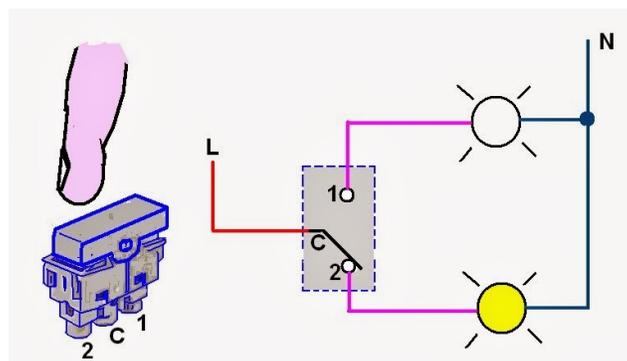


Ilustración 18 Sensor de contacto. Foto tomada de [32]

Existen varios tipos de sensores de contacto o *switches*, pero, todos son digitales y se ocupan para saber si los estados están activados o desactivados. No detectan puntos intermedios como los sensores antes mencionados.

Matriz de decisiones

Para definir la mejor opción, se definieron varios parámetros -como se muestra a continuación- para evaluar las diferentes propuestas.

- **Precisión:** La precisión de la lectura es importante para que el movimiento se asemeje al real.
- **Peso:** Para que el usuario se sienta cómodo con el sensor, se estableció un peso máximo para el guante, por ese motivo el peso del sensor resulta importante.
- **Tamaño:** Con el fin de que el movimiento sea lo más natural posible, se debe de reducir el tamaño de los componentes, con el fin de que no entorpezca el movimiento del usuario.
- **Calibración:** En este rubro se califica lo fácil que es calibrar el tipo de sensor, el objetivo es reducir el tiempo que debe emplear el usuario, para que la actividad se realice de la forma más rápida posible.

En este caso todos los parámetros se evaluaron de la misma forma, con una calificación del 1 al 3. Para asignar los valores se compararon los elementos entre sí, donde el valor de 1 se asignó a la opción con menos precisión y al elemento con mejor precisión. En la siguiente tabla los resultados de la evaluación de cada una de las opciones.

Tabla 4 Matriz de sensor de los dedos

Selección de elementos de sensor de los dedos				
	Precisión	Peso	Tamaño	Calibración
Sensor Óptico	1	2	3	2
Flexi Force	2	2	1	2
Sensor de Contacto	3	3	3	3

El sensor ganador fue el sensor de contacto ya que solo requiere que se calibre una vez para su uso, con el avance de los materiales para tecnología wearable se pueden hacer sensores de este tipo con poco peso y poco tamaño, además de que como sólo cuenta con dos estados resulta ser un sensor muy preciso.

Sensor de posición

Además de conocer los gestos que realiza la mano, se necesita conocer el movimiento que hace la mano. Para eso se necesita un sensor de unidad de medición inercial (IMU), el cual tiene acelerómetro, giroscopio, altímetro o termómetro dependiendo del modelo. A continuación se presentan varias IMU's que se encuentran en el mercado para elegir la mejor opción.

ADXL345 SEN-09836

Este sensor tiene acelerómetro digital y se puede comunicar por I2C o por comunicación SPI. Funciona con un voltaje de 2 a 3.6 [V] y cuenta con varios rangos de medición. Es pequeño, sus dimensiones son de 3 [mm] x 5 [mm] x 1 [mm] y pesa 1.6 [g]. [33]

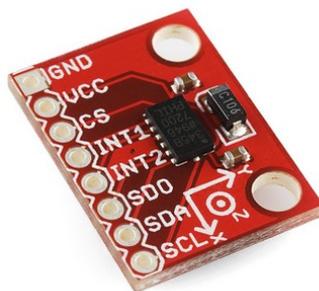


Ilustración 19 SparkFun ADXL345 SRN-09836. Foto tomada de [33]

GY-87

Esta IMU cuenta con sensor de aceleración, giroscopio, presión y magnetómetro. Se comunica por el protocolo I2C y funciona con un voltaje de 3.3 a 5 [V]. Las dimensiones son de 22 [mm] x 17 [mm] y tiene un peso de 6 [g]. [34]

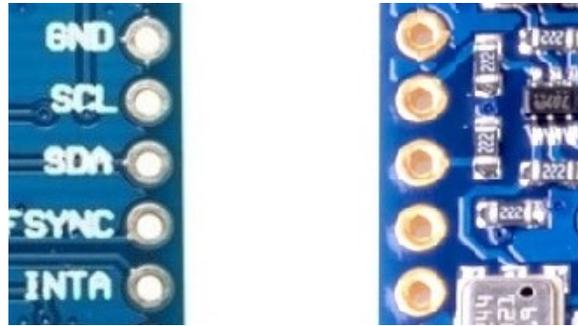


Ilustración 20 IMU GY-87. Foto tomada de [34]

Gy-61

La IMU Gy -61 cuenta con un acelerómetro de 3 ejes con un rango de ± 3 [g]. La diferencia con los otros sensores es que la información es de tipo analógico y se tienen que conectar a un convertidor analógico digital. Trabaja con un voltaje de 1.8 a 3.6 [V], las dimensiones son de 21.5 x 15.9 x 3.1 [mm] y pesa 2 [g]. [35]



Ilustración 21 IMU GY-61. Foto tomada de [35]

L3GD20

Este sensor cuenta con 8 grados de libertad (GDL) digitales, con diferentes rangos, a los cuales se puede acceder por comunicación I2C. 3 GDL son para el giroscopio y la información se muestra en 16-bits por eje, tiene un acelerómetro de 3 GDL con información de 12 bits por eje y además cuenta con barómetro y magnetómetro. El voltaje de operación va de los 2.5 [V] a los 5.5 [V] y sus dimensiones son de 25 [mm] x 13 [mm] x 3 [mm], con un peso de 1 [g]. [36]

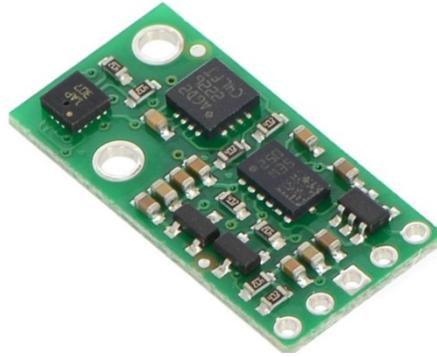


Ilustración 22 IMU L3GD20 [36]

MPU-6050

El MPU-6050 tiene tres convertidores digitales para digitalizar la señal del giroscopio a 16 bits y otros tres para convertir la señal del acelerómetro. Tiene varias resoluciones tanto para el giroscopio como para el acelerómetro. Se puede acceder a la información por comunicación I2C y funciona a voltajes de 3 a 5 [V]. Sus dimensiones son de 20 x 16 x 3 [mm] y tiene un peso de 4 [g]. [37]



Ilustración 23 MPU-6050 Foto tomada de [37]

Matriz de decisiones

A continuación se describen los parámetros que se tomaron en consideración para elegir la IMU que se usa en este proyecto.

- **Peso:** Para que el usuario se sienta cómodo con el sensor, se especificó un peso máximo para el guante, por ese motivo el peso del sensor resulta importante.
- **Dimensiones:** Con el fin de que el movimiento sea lo más natural posible se debe de reducir el tamaño de los componentes, con el fin de que no entorpezca el movimiento del usuario.
- **Acelerómetro:** Para poder determinar la posición de la mano se necesita de un acelerómetro.

- **Giroscopio:** Es necesario que la IMU cuente con un giroscopio por el mismo motivo que se necesita de un acelerómetro.
- **Otro sensor:** Algunas de las IMUs cuentan con otros sensores que no son necesarios para este proyecto, por lo que contar con ellos resultaría una desventaja ya que aumentarían su tamaño, peso y costo, sin mencionar que no se utilizarían.

Tabla 5 Matriz de sensor de posición

Selección de elementos del subsistema de sensado						
	Dimensiones [mm]	Peso [g]	Acelerómetro	Giroscopio	Otro sensor	5 [V]
ADXL345 SEN-09836	3 x 5 x 1	1.6	SI	NO	NO	NO
GY-87	22 x17	6	SI	SI	SI	SI
Gy-61	21.5 x 15.9 3.1	2	SI	NO	NO	NO
L3GD20	25 x 13 x 3	1	SI	SI	SI	SI
MPU-6050	20 x 16 x 3	4	SI	SI	NO	SI

El elemento seleccionado fue la IMU MPU-6050, ya que cuenta con todos los sensores que se requieren en este proyecto y el tamaño es de los más pequeños. Asimismo es de los sensores más utilizados, por lo que existe mucha documentación sobre la forma de utilizarla.

4.1.2 Sistema de Comunicación

Este subsistema, funciona como vínculo entre el subsistema de procesamiento y el subsistema de realidad virtual. Se encarga de que la información del sensor llegue al subsistema de realidad virtual, de la forma más rápida y confiable para que sea utilizada. Por ese motivo es importante que sea compatible con ambas soluciones, para que pueda ser aplicado en la solución.

Serial RS232

La comunicación RS232 es un tipo de comunicación serial cableada del tipo asíncrona. Esta comunicación es robusta ante la interferencia y requiere de poca energía para funcionar. Solo se pueden comunicar dos dispositivos a una distancia máxima de 15 [m] a una velocidad máxima de 20 [kbps]. Este protocolo de comunicación se implementó por primera vez en los 60's. [38] [39]

Bluetooth

El bluetooth es un tipo de comunicación inalámbrica que favorece la comunicación entre dispositivos. Es una tecnología de baja escala y utiliza enlaces de radio de corto alcance y es capaz de atravesar paredes. El bluetooth es capaz de transmitir hasta 720 [kbps] con un rango óptimo de 10 [m]. [40]

WiFi

El WiFi es un tipo de comunicación inalámbrica en el cual se pueden conectar múltiples dispositivos al mismo tiempo. Un dispositivo WiFi con una frecuencia de 2.4 [GHz] puede alcanzar velocidades de hasta 150 [Mbps] a distancias de 30 m. [41]

XBee

Las tarjetas XBee son dispositivos de comunicación inalámbricos fabricados por la empresa Digi International. Su característica es que se pueden comunicar a distancias de hasta 105 [km] a una velocidad de 250 [Kbps]. [42]

Matriz de decisiones

A continuación se describen los parámetros que se tomaron en consideración para elegir la IMU que se usa en este proyecto.

- **Alcance:** Dado que la solución planteada contempla que el usuario se encuentre en un espacio reducido, el alcance que debe tener el subsistema de comunicación también debe ser pequeño. El tener un alcance mayor, puede repercutir en los costos y el tamaño.
- **Velocidad:** Aunque no se transmiten muchos datos la velocidad es importante para el proyecto, en caso de que la velocidad no sea la adecuada, se puede llegar a experimentar un retardo en la imagen, algo que alteraría la interacción del usuario con el sistema.
- **Inalámbrico:** El tener dispositivos inalámbricos, implica la necesidad de agregar batería, circuitos de carga y descarga y otros elementos con los que debe interactuar el usuario, por esta razón este elemento no cumple con las especificaciones.
- **Simplicidad:** Este parámetro se refiere a la facilidad para implementar el medio de comunicación. Como lo puede ser el uso de antenas especiales, protocolos de comunicación, configuración de los dispositivos, documentación que existe, entre otros. En este parámetro se compararon los cuatro elementos y se ordenaron dependiendo de los aspectos antes mencionados. Se le asignó el 4 al elemento más simple y el 1 al elemento más complejo.

Tabla 6 Matriz de subsistema de comunicación

Selección de elementos de comunicación				
	Alcance	Velocidad	Inalámbrico	Simplicidad
RS232	15 m	20 Kbps	NO	3
Bluetooth	10 m	720 Kbps	SI	2
Wifi	30 m	150 Mbps	SI	2
Xbee	105 km	250 Kbps	SI	1

El sistema que se eligió para la comunicación es el RS232, esto reduce el peso que tiene que cargar el usuario ya que funciona para alimentar el sistema de sensado y el de procesamiento. Además el protocolo de comunicación es sencillo y no requiere de una configuración previa, aunque no es la más rápida tampoco se requiere de mandar información adicional para establecer la comunicación como lo requieren los protocolos TCP/IP.

4.1.3 Sistema de Procesamiento

Como este sistema se encarga de controlar los sensores, de procesar la información y de enviarla, es necesario que sea capaz de interactuar con los demás componentes. El elemento que se seleccione debe ser capaz de obtener la información del sistema de sensado. Asimismo, debe poder comunicarse con la computadora para poder enviar la información necesaria para generar el entorno virtual. Otro punto importante, es el tamaño y el peso, los cuales deben ser pequeños, para evitar que interfiera con el movimiento del usuario y para que cumpla con las especificaciones establecidas.

Adrafruit Feather M0 Basic Proto

En esta tarjeta de desarrollo, se pueden utilizar hasta 12 entradas analógicas y hasta 20 entradas digitales. Todas sus salidas cuentan con PWM y se pueden usar 20 salidas digitales y 10 analógicas. Cuenta con los protocolos de comunicación I2C y SPI además de la comunicación serial. Tiene conexión para batería externa y tiene un regulador de salida de 3.3 [V] a 500 [mA]. Sus dimensiones son de 50.8 x 22.9 x 7.1 [mm] y tiene un peso de 4.6 [g]. [43]

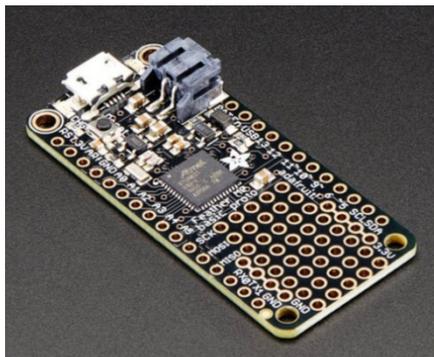


Ilustración 24 Adrafruit Feather M0 Basic Proto. Foto tomada de [43]

Photon

La tarjeta de desarrollo *Photon* cuenta con 18 entradas o salidas digitales a 3.3 [V], 8 entradas analógicas y 2 salidas analógicas. Cuenta con un módulo WiFi integrado. Se puede comunicar por los protocolos SPI, I2S, I2C y serial. Requiere de 5 V de entrada y tiene un voltaje de salida de 3.3 [V]. Sus dimensiones son de 36.6 x 20.30 x 4.32 [mm] y pesa 3.7 [g]. [44]

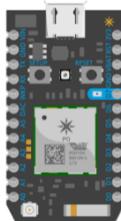


Ilustración 25 Particle Photon Wifi. Foto tomada de [44]

Arduino NANO

Esta tarjeta cuenta con 8 entradas analógicas y 14 entradas digitales. Tiene 14 salidas digitales y 6 salidas PWM. Se puede comunicar por protocolos SPI, I2C y comunicación serial. Tiene un voltaje de salida de 5 [V]. Sus dimensiones son de 45 x 18 [mm] y pesa 5 [g]. [45] [46]

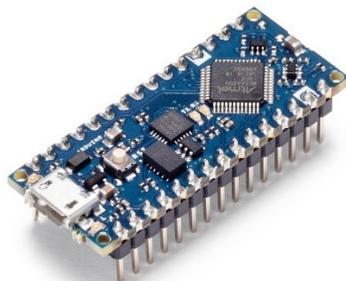


Ilustración 26 Arduino NANO. Foto tomada de [45]

Matriz de decisiones

A continuación, se describen los parámetros que se tomaron en consideración, para elegir la IMU que se usó en este proyecto.

- **Peso:** Para que el usuario se sienta cómodo con el sensor, se definió un peso máximo para el guante, por ese motivo el peso del sensor resulta importante.
- **Dimensiones:** Con el fin de que el movimiento sea lo más natural posible, se debe reducir el tamaño de los componentes, con el fin de que no entorpezca el movimiento del usuario.
- **Comunicación I2C:** La mayoría de los sensores necesitan la comunicación I2C para obtener la información, por este motivo, es necesario que el sistema de procesamiento sea capaz de utilizar este tipo de información.
- **Voltaje de salida 5 [V]:** Varios de los sensores ocupados tienen un mejor rendimiento cuando se alimentan con 5 [V], aunque no es indispensable, ayuda a que el sistema funcione de una mejor manera.
- **WiFi:** Como este proyecto no requiere de comunicación WiFi, se buscó una tarjeta de desarrollo sin esta característica.
- **Bluetooth:** La comunicación *Bluetooth* no se requiere para este proyecto, por lo tanto, se buscó una tarjeta de desarrollo sin esta característica.

Tabla 7 Matriz de subsistema de procesamiento

Selección de elementos del subsistema de procesamiento						
	Tamaño [mm]	Peso [g]	Comunicación I2C	V salida 5 [V]	WiFi	Bluetooth
Feather	50.8 x 22.9 x 7.1	4.6	SI	NO	NO	NO
Photon	20.30 x 4.32	3.7	SI	NO	SI	NO
Arduino	45 x 18	5	SI	SI	NO	NO

El elemento seleccionado para este subsistema fue el Arduino Nano. A pesar de que no es el elemento con el tamaño más reducido o menor peso, la diferencia en peso que tiene con las otras

tarjetas es del 26% con respecto a Photon y 8% con respecto a Feather. Cuenta con salida de 5 [V] y no cuenta con ningún módulo adicional que no sea necesario, esto reduce su costo. Por último, aunque no se agregó el parámetro en la tabla, la marca Arduino es muy conocida, por lo que la cantidad de información que hay, supera a la de los otros componentes.

4.1.4 Sistema de entorno virtual

Este subsistema es el encargado de generar el entorno virtual con el cual interactuará el usuario. Como este subsistema recibe la información por medio del sistema de comunicación, ambos subsistemas deben de ser compatibles. Para este elemento se eligió entre los dos programas de desarrollo que permiten generar entornos virtuales más famosos, Unity y Unreal.

Unity

Es un *software* gratuito cuando se ocupa con fines académicos, creado especialmente para el desarrollo de videojuegos. Este programa permite crear un mundo virtual, con el cual se pueden colocar objetos para interactuar con ellos de distintas formas. Permite hacer programas para que los objetos se comporten de una manera específica o se pueden utilizar controles externos para que el usuario los maneje. [47]

La ventaja de este *software* es su versatilidad, es decir, se pueden hacer cosas tan simples o tan complicadas como sea necesario, dependiendo de las habilidades y necesidades del. Es fácil de utilizar y cuenta con una comunidad muy grande, aunque la calidad de los gráficos no es mucha. Tiene una tienda de elementos prefabricados muy amplia, además, acepta una gran cantidad de formatos de audio y video. Cuenta con una gran cantidad de elementos ya programados lo que facilita su aprendizaje. [47]



Ilustración 27 Unity. Foto tomada de [47]

Unreal

Unreal es una herramienta orientada principalmente a desarrolladores, creada por Epic Games liberada en el 2015. Cualquiera persona lo puede utilizar para desarrollar videojuegos o escenarios. Se puede integrar con C++ para poder crear cualquier mecánica que se requiera. La calidad visual de Unreal es grande, en comparación con las otras herramientas de desarrollo. Sus principales desventajas, son la falta de información y que tiene una comunidad reducida. [47]



Ilustración 28 Unreal Engine. Foto tomada de [47]

El *software* que se decidió utilizar para este proyecto fue el de Unity, debido a la información que existe sobre él. Otra razón por la que se eligió fue por los programas de físicas y otros elementos con los que cuenta de fábrica, los cuales facilitan su uso y aprendizaje. La única desventaja que presenta, se encuentra en la parte gráfica, sin embargo no es un problema para este trabajo ya que no se busca que tenga una excelente calidad gráfica.

4.1.6 Sistema de Soporte

Como soporte se decidió usar un guante de tela, de preferencia que no fuera elástico para evitar que los sensores cambien de lugar. También se requiere contar con un elemento que permita que se ajuste a la mano del usuario para evitar que se caiga o cambie de posición durante la actividad. Es recomendable que el elemento que se encarga de mantener el guante en su lugar sea de velcro, con el fin de hacerlo más fácil y rápido de poner y quitar.

Para evitar los procesos de manufactura, se optó por comprar un guante que cuente con las características antes mencionadas. Como en este deporte es común el uso de guantes para evitar que se resbale el *Frisbee*, el usuario se sentirá cómodo al utilizar un guante diseñado para jugar *Ultimate Frisbee*. Se decidió utilizar un guante *Friction Gloves* el cual está hecho de tela y cuenta con velcro para sujetarlo a la mano. La marca *Friction Gloves* es de las marcas más utilizadas en el deporte y cuenta con varios tamaños.

Para este experimento se utilizó un guante de la marca *Friction Gloves* modelo 2.0 talla grande con medidas de largo de 18.5 a 19 [cm] y medidas de ancho de 10.5 a 11 [cm]. [48]



Ilustración 29 Friction Gloves. Foto tomada de [48]

4.2 Configuración final

Sistema de procesamiento

Para el sistema de procesamiento se seleccionó el Arduino nano. El Arduino nano tiene un microcontrolador ATmega328 el cual cuenta con 8 entradas analógicas y puede comunicarse por el protocolo I2C. Esta tarjeta se puede alimentar de forma cableada a la computadora y al mismo tiempo se alimenta, además de tener un voltaje de salida de 5 V. Las medidas de Arduino son de 18 x 45 [mm] y tiene una masa de 7 [g], lo que la hace perfecta para sensores *wearables*. [49]

Este Arduino se encarga de alimentar y obtener la información correspondiente a los sensores de los dedos y del sensor de posición. Al mismo tiempo, filtra los datos y manda el resultado al sistema encargado del entorno virtual, con el fin de agilizar el proceso. A continuación, se muestra la interacción entre estos subsistemas.

Sensor posición mano.

En este proyecto se utilizó hilo conductor para hacer un sensor de contacto. El hilo conductor es utilizado en *wearables* por su flexibilidad y practicidad. El hilo conductor se recomienda en trabajos pequeños, porque, se pueden hacer nudos y causar corto circuitos. El hilo conductor se encuentra hecho de acero inoxidable y tiene una resistencia de 0.92 [Ω /cm]. [50]



Ilustración 30 Bobina de hilo conductor. Foto tomada de [50]

El hilo conductor se cosió al guante, para que llegara a las partes que deben de hacer contacto para identificar alguno de los gestos. En los puntos que se debe hacer contacto, se añadió papel

conductor con el fin de aumentar el área de contacto en la zona y facilitar la detección de los movimientos. En la Ilustración 31 “Sensores de contacto en el guante” se muestra el resultado final.



Ilustración 31 Sensores de contacto en el guante

Los sensores de contacto se conectaron a un sensor *Pull-up*, para evitar el ruido en las mediciones. Las resistencias que se emplearon para este circuito son de 680 Ω . El sensor se conecta a una entrada analógica, esto se debe a la resistencia que tiene el hilo conductor, el cual evita que la señal que llega al Arduino, sea suficiente para reconocerse por una entrada digital. La salida de estos sensores de contacto, se conectó a los pines A0 y A2 para obtener la medición del dedo meñique y del dedo índice respectivamente.

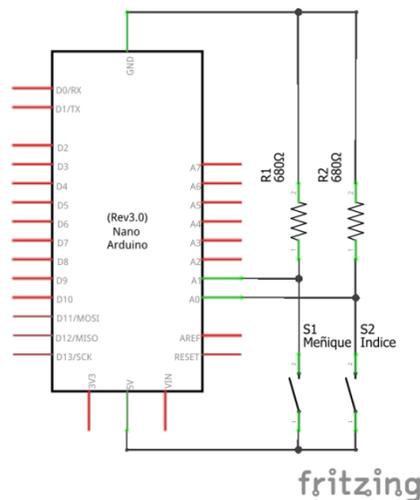


Ilustración 32 Esquema sensor de dedos

IMU 6050

Como el guante va a trabajar a velocidades altas, es necesario modificar algunos parámetros de la IMU, de tal manera que estos valores queden dentro del rango de medición. A continuación se muestran los datos que se usaron:

- Dirección 0x68
- Rango 3 para el giroscopio ± 2000 °/s
- Rango 1 para el acelerómetro ± 2 g

Para esta configuración, los factores de escalamiento que se necesitan para cada sensor son los siguientes.

- Giroscopio: FB = 16.4 LSB/°/s
- Acelerómetro: GR = 16384 LSB/g

La alimentación y la obtención de datos de la IMU, se realizaron con el Arduino. Para establecer la comunicación entre ambos componentes se utilizó el protocolo I2C. Las conexiones del protocolo en la tarjeta de Arduino se encuentran en los Pines A4 y A5 que corresponden a la vía de comunicación de información serial (SDA por sus siglas en inglés) y a la vía de comunicación del reloj (SCL por sus siglas en inglés) respectivamente. Estos pines se conectaron a los pines correspondientes SDA y SCL del sensor MPU-6050 como se muestra en el siguiente diagrama.

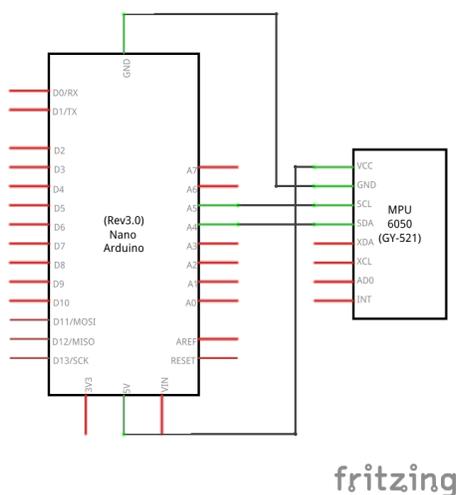


Ilustración 33 Circuito IMU

Todos los datos obtenidos por los sensores, contienen errores en la medición debido al ruido que existe en el ambiente y a la naturaleza de los propios sensores. Por este motivo deben aplicarse filtros a los datos obtenidos, para que la información sea confiable. En este caso se aplicó una combinación de dos filtros, el filtro de Kalman para filtrar la información obtenida por el acelerómetro y el filtro pasa bajas, para conseguir el ángulo en el que se encuentra la mano.

Filtro Kalman

El filtro de Kalman funciona como un estimador, en el cual se ocupa la muestra para generar una función estadística. El filtro consiste en estimar el valor inmediatamente después de un sistema dinámico lineal perturbado, utilizando como referencia los datos con ruido blanco del estado actual. Es decir, se predice un estado futuro preciso, utilizando como referencia el estado actual el cual es impreciso debido al ruido. [51] [53]

Para este caso, se ocupa la forma más simple del filtro de Kalman, el cual utiliza un solo dato del estado actual para predecir el estado futuro.

Ganancia (E error)

$$K = \frac{E_{ESTIMACIÓN}}{E_{ESTIMACIÓN} + E_{MEDIDA}} \quad K \in [0,1]$$

Al principio el error de la estimación será alto, por lo que la ganancia tenderá a un valor cercano a 1. Lo ideal es que la ganancia tienda a 0 esto significará que la predicción es más confiable que la lectura. Sin embargo como lo que se está midiendo no es un sistema lineal y mucho menos predecible, ya que se trata de los movimientos de una persona, la tendencia es que la constante tienda a 0.5. [51]

Estimación estado actual

Una vez que se conoce la ganancia se puede conocer el valor del estado actual utilizando el valor de la predicción y el valor medido. [51]

$$EST_{actual} = Predicción + K[Medida - Predicción]$$

Error en la estimación actual.

Este valor sirve para saber qué tan próxima se encuentra la predicción del valor real. La forma de calcularlo es la siguiente. [51]

$$E_{EstActual} = \frac{(E_{Medida})(E_{Predicción})}{(E_{Medida})+(E_{Predicción})} \quad E_{ESTActual} = (1 - k)E_{Predicción}$$

Predicción

Para mejorar la precisión del filtro de Kalman es necesario hacer una predicción del estado futuro. Para esta aplicación el movimiento del guante realiza una trayectoria circular, por ese motivo es necesario considerar la aceleración centrípeta y la aceleración tangencial en el modelo del sensor, ya que estos datos también son leídos por el sensor. También se le agregó una regresión lineal considerando los momentos en los que no se realice el movimiento circular.

La predicción simple queda de la siguiente forma:

$$Predicción = \frac{E_{t-1} + E_t(\Delta t)}{\Delta t}$$

El modelado se hace con una regresión lineal simple,

donde:

- E_{t-1} Es el estado anterior,
- E_t es el estado actual y
- Δt es el tiempo entre las mediciones.

Cuando un objeto sigue una trayectoria curva dentro de un plano, el cuerpo tiene una aceleración en un punto p de la trayectoria. Esta aceleración se puede separar en dos componentes, una tangencial a la trayectoria del objeto y otra con dirección al centro de la curva como se muestra en la Ilustración 34 “Movimiento circular”. [54]

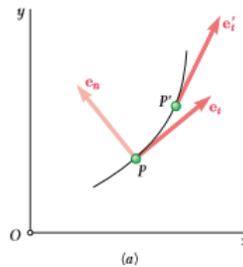


Ilustración 34 Movimiento circular. Foto tomada de [54]

Para este proyecto se consideró que el sensor siempre gira en torno a un punto fijo, por lo tanto se puede considerar que la trayectoria del mismo se encuentra contenido en un plano dentro de los ejes “x” y “y” relativo al sensor. Se toma como referencia la articulación de la muñeca como centro de giro y se crea el plano x_D y y_D que se muestran en la Ilustración 35 “Movimiento de la muñeca en el lanzamiento de un Frisbee”.

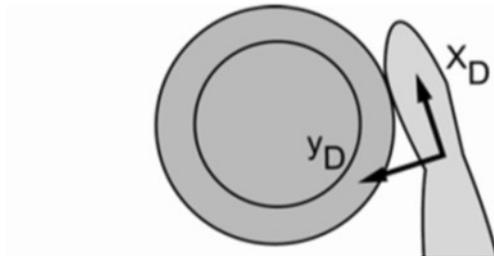


Ilustración 35 Movimiento de la muñeca en el lanzamiento de un Frisbee. Foto modificada de [52]

Tras realizar esta simplificación, se puede considerar que la aceleración tangencial que se obtiene por el movimiento circular, sólo afectará al eje x del sensor y la aceleración centrípeta se mantiene en el eje “y” del sensor.

Para poder calcular la velocidad tangencial, se necesita saber la velocidad a la que gira el sensor, para eso se utilizan los datos obtenidos por el giroscopio. A continuación, se presentan los cálculos necesarios para obtener la aceleración tangencial. [54]

Primero es necesario calcular la aceleración tangencial del sensor, como la velocidad de giro que entrega el giroscopio está dada en grados por segundo, primero se obtiene la aceleración angular.

$$dGx = \frac{(Gx_t - Gx_{t-1})}{\Delta t}$$

donde:

- dGx es la aceleración tangencial,
- Gx_t es la medida del giroscopio actual,
- Gx_{t-1} es la medida del giroscopio anterior y
- Δt es el tiempo entre las mediciones.

Como se desea saber la aceleración lineal del guante, es necesario convertir la aceleración angular en aceleración lineal. Esto se hace de la siguiente forma:

$$dG = \frac{dGx * \pi * r}{180}$$

donde:

- dG es la aceleración lineal y
- $r = 1.7$ es el radio del giro

Como el acelerómetro mide la aceleración en unidades de gravedad es necesario convertir el valor obtenido a las unidades del sensor.

$$A_{tangencial} = \frac{dG * GR}{G * C_{tan}}$$

donde:

- GR es el factor de escalamiento,
- G es la gravedad y
- C_{tan} es una constante para el factor de error

Al igual que para la aceleración tangencial se tomó la velocidad obtenida del giroscopio para calcular la aceleración centrípeta, a continuación se representa el modelo de la aceleración centrípeta. [54]

Primero es necesario obtener la velocidad lineal del sensor, para eso es necesario convertir la velocidad angular del sensor en velocidad lineal.

$$v = \frac{Gx * \pi * r}{180}$$

donde:

- v es la velocidad lineal del sensor,
- Gx es la medida del giroscopio y
- r es el radio de giro.

Teniendo la velocidad lineal se puede calcular la aceleración centrípeta con la siguiente expresión.

$$A_{cen} = \frac{v^2}{r}$$

Para poder agregarlo al filtro es necesario convertirlo a las unidades que da el acelerómetro.

$$A_{centripeta} = \frac{A_{cen} * GR}{G * C_{cen}}$$

donde:

- C_{cen} es una constante para el factor de error

Una vez teniendo el modelado de la aceleración en el sensor, se agregó al filtro con el fin de obtener la predicción del acelerómetro. El estado futuro para el filtro de Kalman queda de la siguiente forma:

$$E_{fut_x} = E_{actx} + Predicción_x$$

$$E_{fut_y} = E_{acty} + Predicción_y + A_{centripeta}$$

$$E_{fut_z} = E_{actz} + Predicción_z + A_{tangencial}$$

A continuación en la Ilustración 36 “Diagrama de flujo del filtro de Kalman” se muestra el proceso general.

Diagrama de flujo

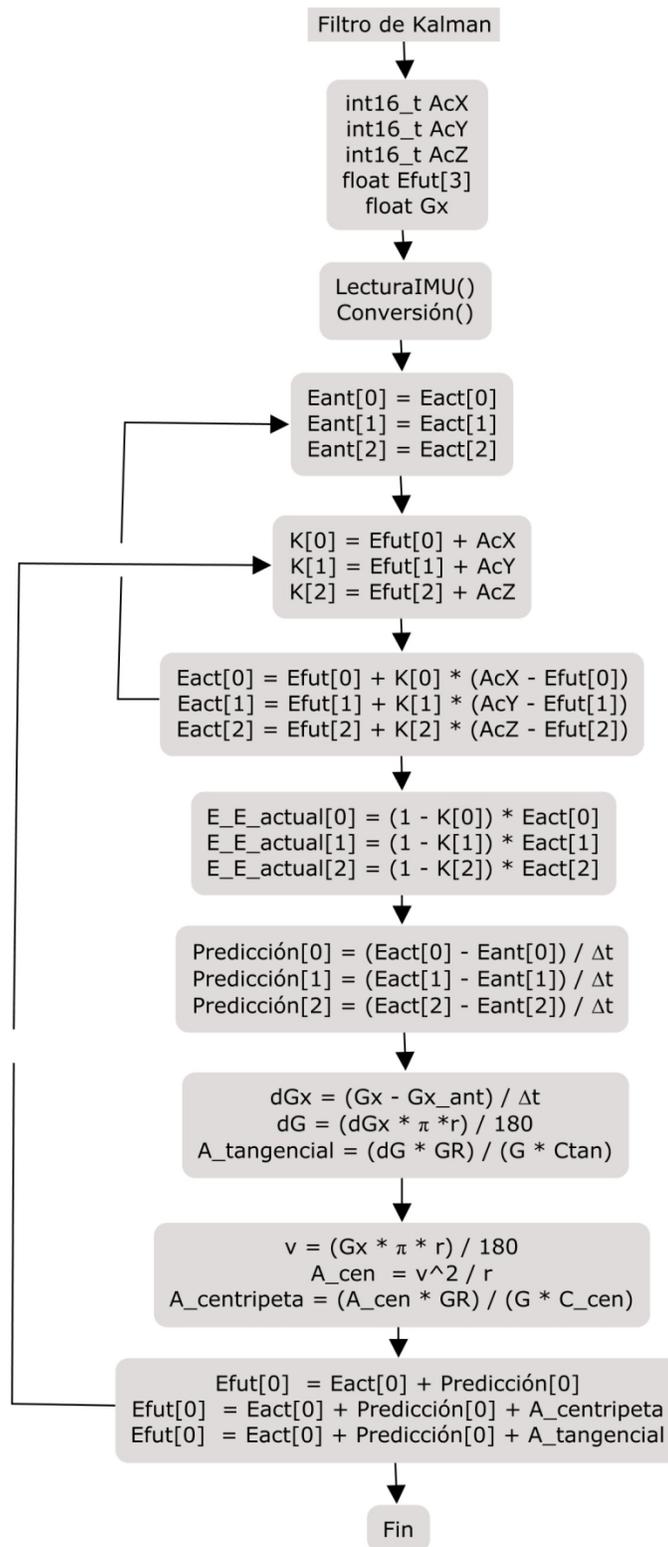


Ilustración 36 Diagrama de flujo del filtro de Kalman

Angulo pitch y roll

Para este proyecto es necesario conocer la posición de la mano para saber la dirección en la que el usuario lanza el *Frisbee*. La dirección se determina usando los ángulos de *pitch*, *roll* y *yaw*, los cuales se pueden conocer con el giroscopio de la IMU. Para obtener datos más precisos se utiliza la dirección de la gravedad como referencia.

Los componentes de los ángulos de *pitch* y *roll* pueden calcularse a partir de los valores del acelerómetro. Para eso es necesario emplear las siguientes ecuaciones.

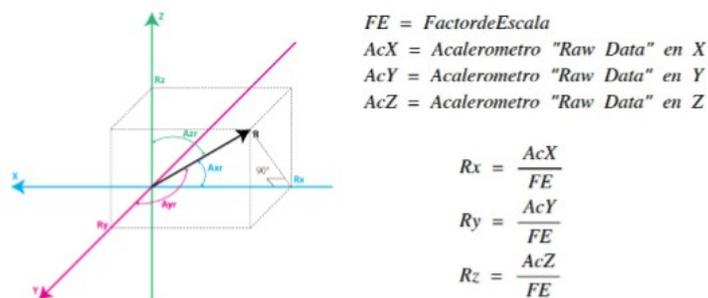


Ilustración 37 Proyecciones de la gravedad. Foto tomada de [55] [56]

Para obtener los ángulos se deben emplear las siguientes ecuaciones. [55] [56]

$$A_{xr} = \arctan\left(\frac{AcX}{\sqrt{AcY^2 + AcZ^2}}\right)$$

$$A_{yr} = \arctan\left(\frac{AcY}{\sqrt{AcX^2 + AcZ^2}}\right)$$

$$A_{zr} = \arctan\left(\frac{\sqrt{AcX^2 + AcY^2}}{AcZ}\right)$$

Donde se considera a los valores A_{xr} y A_{yr} como los ángulos de *Roll* y *Pitch* respectivamente. A_{zr} no puede considerarse como el ángulo de *Yaw* porque no hay una componente de gravedad en esta dirección.

Giroscopio

Como el giroscopio da una medida de velocidad angular, es necesario realizar una integración para obtener el ángulo. La diferencia es que no posee una referencia como la gravedad, por eso es necesario calibrarlo para posteriormente poder integrar. Las ecuaciones para hacer la integral se muestran a continuación.

$$FB = \text{Factor de Escala}$$

$$G_{ref} = \text{Valor de referencia para cada eje}$$

Δt Diferencial de tiempo

$$Gx = \frac{ValorX}{FB}$$

$$Gy = \frac{ValorY}{FB}$$

$$Gz = \frac{ValorZ}{FB}$$

$$AngulosGx_n = (Gx - Gx_{ref})\Delta t + AnguloGx_{n-1}$$

$$AngulosGy_n = (Gy - Gy_{ref})\Delta t + AnguloGy_{n-1}$$

$$AngulosGz_n = (Gz - Gz_{ref})\Delta t + AnguloGz_{n-1}$$

Debido a la integral que se tiene que realizar, la medición tiende a acumular error conocido como deriva. Para reducir el error se recomienda utilizar una diferencial de tiempo (Δt) constante. [55] [56]

Filtro

Una vez que se tiene el valor del acelerómetro y del giroscopio se pueden juntar ambas mediciones para obtener el ángulo. Estas funciones, fusionan el valor de ambos sensores, se basan en el concepto de un filtro pasa bajas digital. A continuación, se muestran las ecuaciones para realizar la unión. [55]

$$AnguloFiltrado = \alpha x(AnguloGiroscopio) + (1 - \alpha)x(AnguloAcelerometro)$$

$$\alpha = \frac{\tau}{\tau + \Delta t}$$

$$AnguloGiroscopio = AnguloFiltrado(n - 1) + (G - G_{ref})x\Delta t$$

Para el cálculo del filtro se recomienda utilizar un tiempo (τ) mayor al tiempo de estabilización del acelerómetro, sin embargo el tiempo de respuesta del filtro aumenta. Por ese motivo se utilizó un tiempo menor, que aunque reduce la precisión del filtro mejora la velocidad de respuesta, el valor final fue de $\alpha = 0.94$. [55] [56]

Este proceso de sensado y filtrado lo realiza el Arduino, en la Ilustración 38 “Diagrama de flujo del filtro complementario” se muestran los procesos que se deben de hacer.

Diagrama de flujo

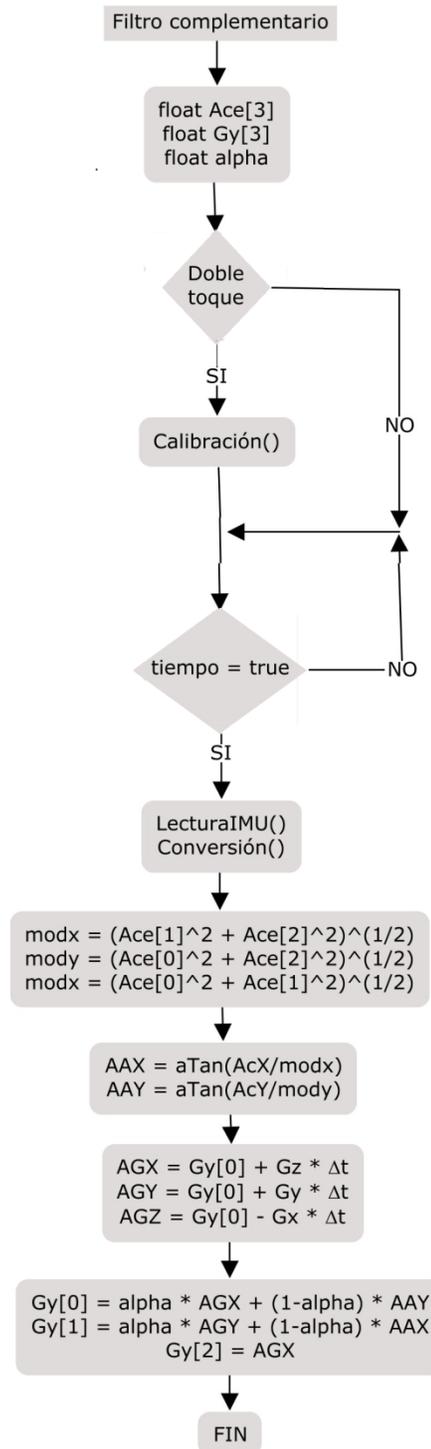


Ilustración 38 Diagrama de flujo del filtro complementario

Calibración

Como el sistema no es fijo y se planea que sea utilizado por varias personas, se le agregó una rutina para calibrarlo. Esto se hace con la finalidad de que cada vez que el usuario desee usar el sistema, lo pueda calibrar y tener la mayor precisión posible. La calibración pretende reducir los valores de *offset* que tiene el sensor y quitar el error de deriva que se va acumulando con el tiempo.

Para calibrarlo se usó el gesto de doble toque, en el cual el usuario debe juntar dos veces seguidas su dedo índice y su dedo pulgar, en menos de 1.5 s. Después de esta acción, el Arduino recopila datos sobre el sensor para obtener los datos de offset y regresa los valores de los ángulos a cero. Los datos de *offset* representados como G_{ref} se le restan a los valores obtenidos por el giroscopio, como se mostró en la sección del giroscopio. El problema de la deriva se resuelve regresando el valor acumulado del giroscopio a cero, de esta forma se reinicia la integral a un tiempo cero. A continuación en la Ilustración 39 “Diagrama de flujo de la calibración” se muestra el diagrama de flujo correspondiente a este proceso.

Diagrama de flujo

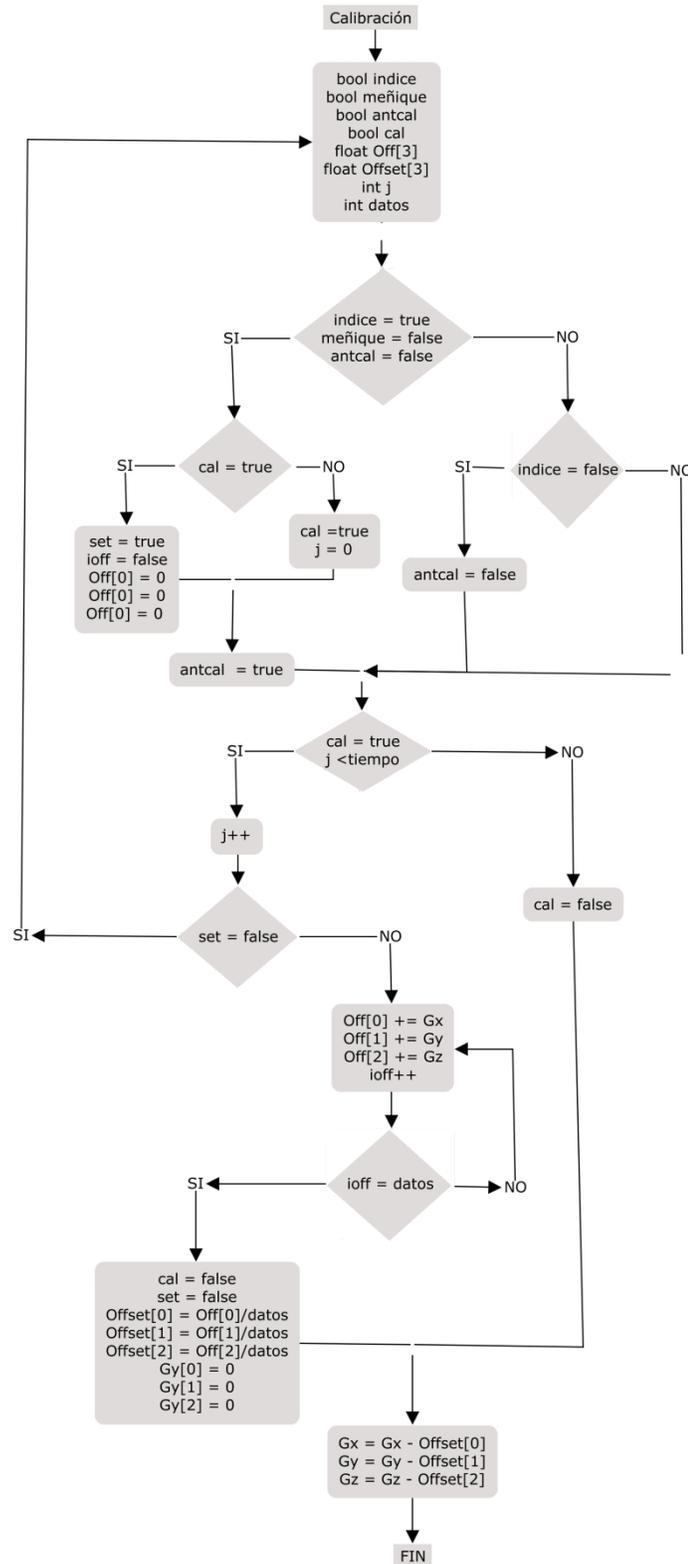


Ilustración 39 Diagrama de flujo de la calibración

Comunicación

Una parte importante del sistema es que la información llegue de la forma más rápida y completa posible, de esta forma el usuario puede interactuar mejor con el sistema y tiene una mejor experiencia. Por ese motivo se optó por un protocolo de comunicación sencillo.

A pesar de que la comunicación por RS-232 es asíncrona, se busca que la información obtenida por el sistema generador de realidad virtual sea actual. Como el Arduino y el Sistema VR trabajan a velocidades diferentes, se implementó un protocolo con solicitud, en el cual el sistema VR manda la solicitud de la información y el Arduino envía la información actual.

Como medida de seguridad, se le agregó un encabezado y un final a la información enviada, de esta forma el sistema VR puede determinar cuando terminó la comunicación y si la información se encuentra completa.

En caso de que no llegue la información o no se encuentre completa el programa pasa al siguiente proceso sin retrasos. Esto se hace, con el fin de que sea lo más rápido posible y que no se pierda el tiempo en enviar paquetes perdidos cuando hay datos nuevos, esto se debe a que los datos del Arduino cambian cada 10 [ms].

Debido a que la información que se envía es del tipo carácter, es necesario modificar los datos para que la comunicación sea más rápida. A continuación se muestra el tratamiento que se le aplicó a la información para poder enviarla.

Datos del sistema de procesamiento

Para reducir la cantidad de datos enviados y facilitar la comunicación, se truncaron los datos para dejarlos en decimales, además se multiplican por 10 para tener valores enteros, con el mismo propósito se les quitó el signo el cual se envió después. Esto se hizo con los datos de los tres ejes de los ángulos y al final se mandó el valor del puño. Se utilizaron los separadores "x", "y" y "z" para distinguir cada uno de los datos enviados. A la información se le agregó como encabezado el símbolo de "&" y se terminó con un salto de línea. La información completa se ve de la siguiente forma.

&xAnguloGiroscopio_xSigno_xAnguloGiroscopio_ySigno_yAnguloGiroscopio_zSigno_zValorPuño

donde:

- *AnguloGiroscopio* $\in A$, donde $A = \{a \mid a \geq 0, a \in Z\}$
y Z es el conjunto de los números enteros
- *Signo* $\begin{cases} \text{Signo} = 0 \\ \text{Signo} = 1 \end{cases}$
- *ValorPuño* $\begin{cases} \text{ValorPuño} = 0 \\ \text{ValorPuño} = 1 \end{cases}$

La solicitud de los datos se realiza enviando un carácter 's', al momento de recibir el carácter, el sistema de procesamiento envía la cadena antes mencionada con los datos recientes. En la

Ilustración 40 “Diagrama de flujo de los datos enviados” se muestra el proceso que realiza el Arduino para enviar los datos.

Diagrama de flujo

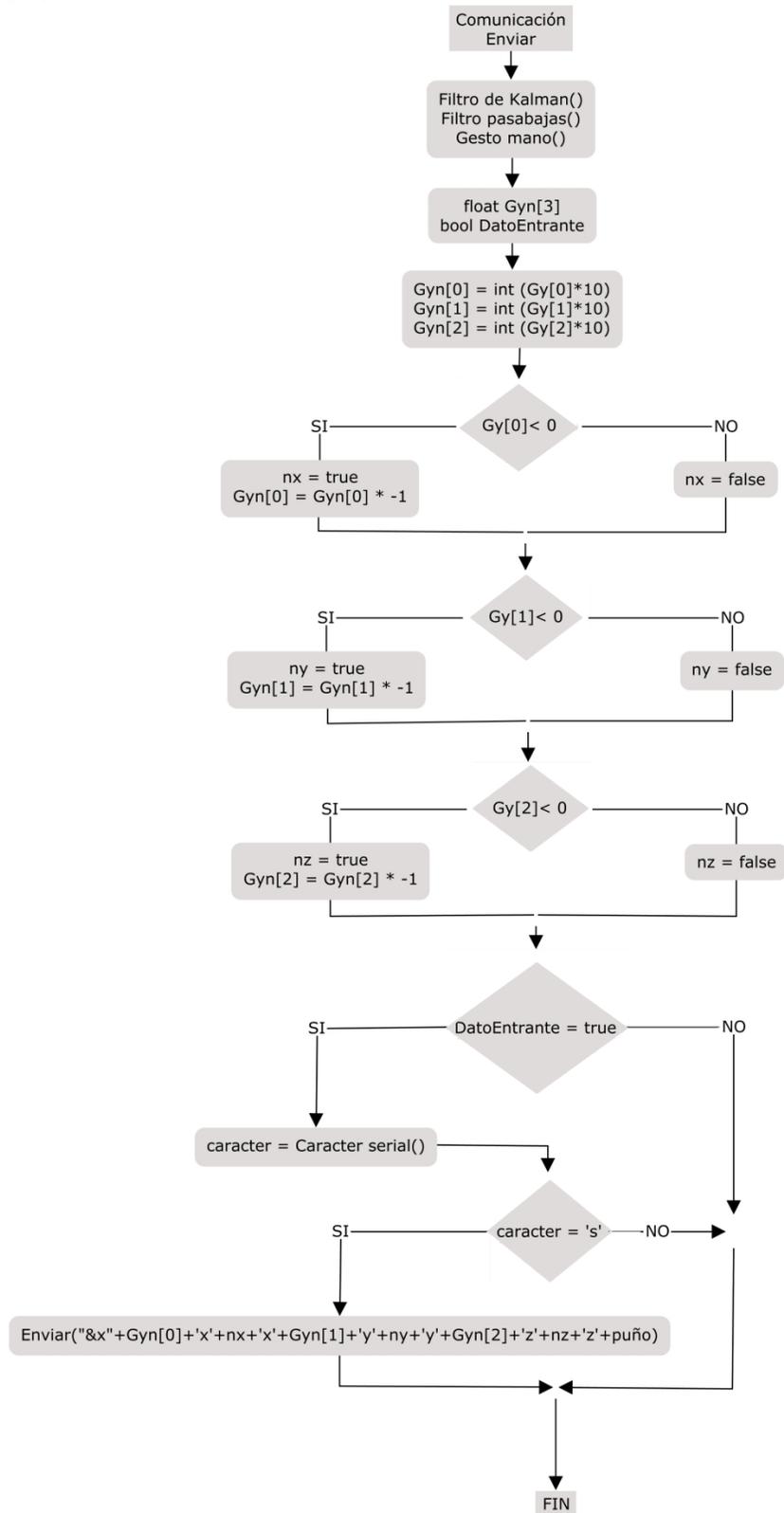


Ilustración 40 Diagrama de flujo de los datos enviados

Datos recibidos en el entorno virtual.

Para poder utilizar la comunicación por puertos COM en Unity es necesario configurar el proyecto antes de empezar a programar, de otra forma el programa no deja cambiar la configuración.

Esta configuración se realiza en la sección de “Configurations” en la sección de “Other Settings” para construir. En el apartado “Scripting Runtime Version” se debe seleccionar la opción “.NET 3.5 Equivalent” y posteriormente cambiar el apartado de “Scripting Backend” a “.NET 2.0 Subset”. Esto es para cambiar la configuración de Visual Studio para poder usar las Bibliotecas necesarias para usar la comunicación COM.

Una vez que se configuró Unity, se puede realizar el programa con la comunicación serial por puerto COM. El primer paso en el protocolo de comunicación que se creó para este proyecto, es hacer la solicitud de información al sistema de procesamiento, esto se realiza enviando el caracter ‘s’. Después de hacer esto, se espera la respuesta del Arduino y se lee todo hasta encontrar un salto de línea. La cadena recibida se separa utilizando los separadores ‘x’, ‘y’ y ‘z’ y se verifica que el primer elemento sea un ‘&’, de ser así se continúa con el proceso, en caso contrario se vuelve a hacer la solicitud.

Cuando se sabe que los datos que se tienen se encuentran completos, se realiza la conversión de las cadenas a los valores decimales del giroscopio. Se utilizó el código ASCII y el valor del signo para poder convertir las cadenas con los datos a números flotantes. A continuación se muestra la Ilustración 41 “Diagrama de flujo de recepción de datos en Unity”.

Diagrama de flujo

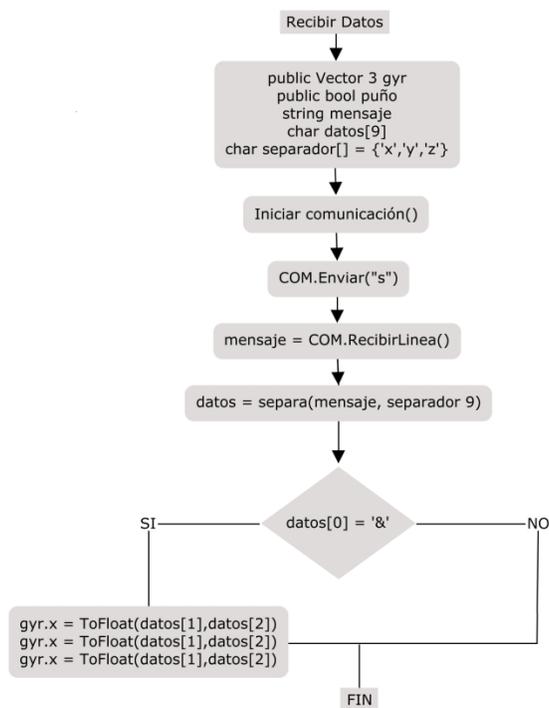


Ilustración 41 Diagrama de flujo de recepción de datos en Unity

Modelado del Lanzamiento del Frisbee

El movimiento de un Frisbee cuando es lanzado, resulta complejo modelarlo, debido al giro y a las fuerzas externas que interactúan con él. Por este motivo, es difícil realizar un modelo del movimiento del *Frisbee* de forma teórica, por eso el modelo que existe se realizó de forma empírica en un túnel de viento. [57] [52]

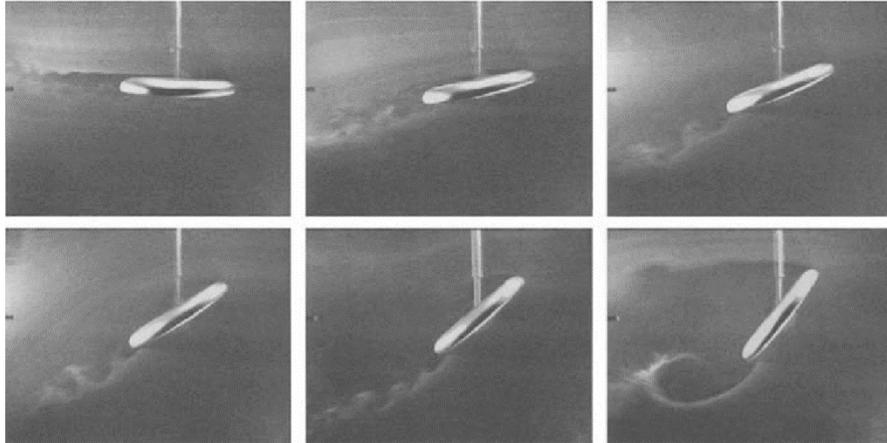


Ilustración 42 Pruebas del *Frisbee* en el túnel de viento. Foto tomada de [57]

Desde 1972 se ha intentado obtener un modelo de la aerodinámica del Frisbee usando el túnel de viento. Las primeras pruebas dieron como resultado, que el giro del disco dentro del túnel de viento, no influía de forma significativa en las fuerzas de sustentación y arrastre. Posteriormente en 1999 se realizaron pruebas para medir la fuerza de arrastre y de sustentación variando la velocidad de avance y de giro del *Frisbee*. [57] [52]

En el año 2000 se empezaron a hacer experimentos, en los que se pudo conocer las fuerzas de arrastre y sustentación en función del número de *Reynolds* y el giro del *Frisbee*. Usando esta última fórmula, se han realizado varias simulaciones, para saber cómo influye el ángulo de ataque en la trayectoria, la distancia recorrida y el tiempo que permanece en el aire el disco. [57] [52]

Gravedad

La fuerza de gravedad es constante y no depende del ángulo de ataque, velocidad de movimiento o velocidad de giro. Esta fuerza siempre actúa sobre el centro de masa del *Frisbee* y apunta en dirección del suelo. [52]

Lo primero que se debe considerar para empezar a modelar el lanzamiento de un disco, es que el centro de masa (COM, por sus siglas en inglés) y el centro de presión (COP, por sus siglas en inglés) no necesariamente se encuentran alineados. Esto se puede observar en la Ilustración 43 “Fuerzas y momentos de un disco en el aire”, donde a) representa la suma total de las fuerzas de los puntos COP y COM, b) se representan las fuerzas de sustentación como **L** y el arrastre se representa con la letra **D**. En la figura c) se representan los ángulos en los ejes xyz del disco donde el giro en *Roll* se representa con la letra **R**, el giro de *Pitch* con la letra **P** y el momento del giro del *Frisbee* con la

letra **N**. La velocidad de *Roll* se representa con la letra **p**, de pitch con **q** y la velocidad de giro en yaw con **r**. [52]

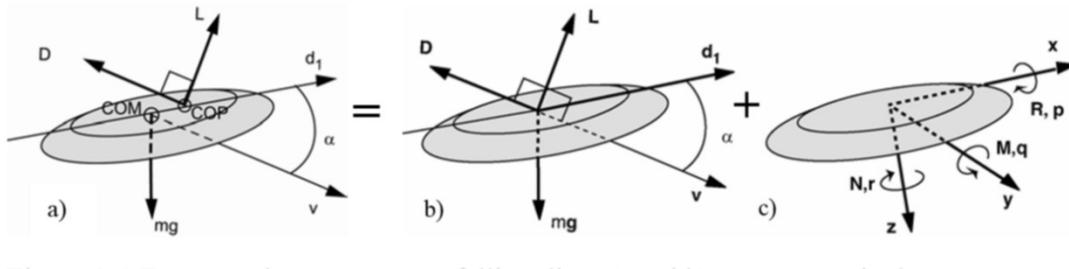


Ilustración 43 Fuerzas y momentos de un disco en el aire. Foto tomada de [52]

Fuerzas aerodinámicas

Las fuerzas aerodinámicas que influyen en el lanzamiento, son la fuerza de arrastre y de sustentación, las cuales tienen una fuerte relación con la velocidad y el ángulo de ataque (α), y actúan sobre COP. Como el COP y el COM no se encuentran alineados y el COP no es constante, se genera un momento, el cual genera una aceleración angular, la cual se puede observar como un tambaleo¹ durante el vuelo del disco. [52]

Arrastre

La fuerza de arrastre, es paralela a la velocidad de movimiento del disco y de sentido contrario. La magnitud disminuye a lo largo del movimiento, pero nunca llega a cero. La magnitud de la fuerza de arrastre se calcula con la siguiente fórmula:

$$D = \frac{1}{2} * \rho * v^2 * A * C_D$$

donde:

$\frac{1}{2} * \rho * v^2$ Es la presión dinámica,

- $\rho = 1.23 \left[\frac{kg}{m^3} \right]$ es la densidad del aire,
- v es la velocidad de disco,
- $A = 0.0568 [m^2]$ es el área plana del Frisbee y
- C_D es el coeficiente de arrastre.

En general para calcular el coeficiente de arrastre se necesitan 3 parámetros:

1. Número de Reynolds, Re,
2. Parámetro de giro, S,
3. Ángulo de ataque α .

¹ En un lanzamiento ideal, se tiene que apreciar un disco estático en el aire. Cuando no se lanza el Frisbee con un giro adecuado empieza a vibrar. En este trabajo se conoce como tambaleo a esta vibración.

El número de Reynolds establece la relación entre las fuerzas inerciales y las fuerzas viscosas de un fluido y se calcula de la siguiente forma:

$$Re = \frac{\rho * v * d}{\mu}$$

donde:

- d es el diámetro y
- μ es la viscosidad dinámica del fluido.

El número de Reynolds puede tomar valores de $1.04 \times 10^5 < Re < 3.78 \times 10^5$, sin embargo se determinó que el valor que toma cuando el disco se desplaza a una velocidad de 20 [m/s] es de $Re = 3.78 \times 10^5$ para ángulos de ataque de -10° a 30° . [52]

El parámetro de giro es la relación que hay entre la velocidad de angular y la velocidad lineal del *Frisbee* y se calcula de la siguiente forma:

$$S = \frac{r * \omega_z}{v}$$

donde:

- r Es el radio y
- ω_z es la velocidad angular.

Como se mencionó antes, este parámetro no influye de forma significativa en las simulaciones, por eso y con la finalidad de reducir el número de cálculos no se considera para este proyecto.

En las pruebas realizadas en el túnel de viento se obtuvo la siguiente ecuación cuadrática para el coeficiente de arrastre: [52] [58]

$$C_D = C_{D0} + C_{D\alpha} (\alpha - \alpha_0)^2$$

donde:

- C_{D0} Es el coeficiente de arrastre para un ángulo de ataque cero,
- $C_{D\alpha} = 2.72$ es el coeficiente de arrastre inducido,
- α es el ángulo de ataque
- α_0 es el ángulo de ataque con sustentación igual a cero y con el mínimo arrastre y se calcula de la siguiente forma

$$\alpha_0 = \frac{C_{L0}}{C_{L\alpha}}$$

donde

- C_{L0} es el valor de C_L cuando α toma un valor de cero,

- $C_{L\alpha} = 1.4$ es el coeficiente de arrastre dependiente de α ,

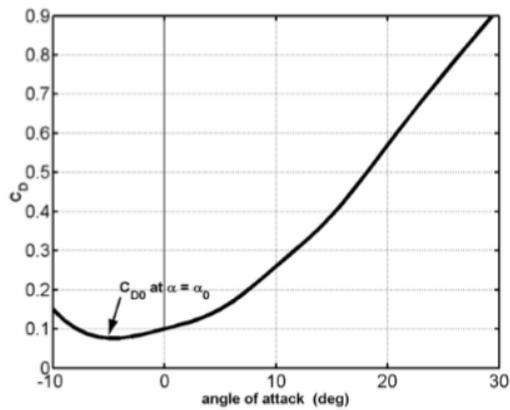


Ilustración 44 Coeficiente CD de arrastre contra el ángulo de ataque. Foto tomada de [52] [58]

Sustentación

La fuerza de sustentación se puede calcular de la siguiente forma: [52] [58]

$$L = \frac{1}{2} \rho v^2 AC_L$$

En las pruebas realizadas en el túnel de viento, se obtuvo la siguiente ecuación para el coeficiente de sustentación: [52] [58]

$$C_L = C_{L0} + C_{L\alpha} * \alpha$$

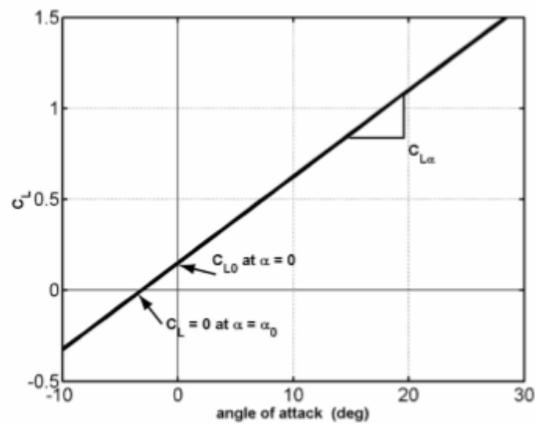


Ilustración 45 Coeficiente CL de sustentación contra el ángulo de ataque. Foto tomada de [52] [58]

Con la finalidad de simplificar los cálculos, debido a la complejidad del modelado y la cantidad de recursos tanto de procesamiento como gráficos que requiere, se consideró que el disco tiene y se mantiene con un giro ideal. Teniendo en cuenta esta suposición, se eliminan los momentos en los giros de *pitch* y de *roll* y se elimina el tambaleo del lanzamiento.

Movimiento y lanzamiento del Frisbee

Para determinar la posición del disco en el entorno virtual se optó por usar el ángulo del brazo. Se consideró una altura y una longitud del brazo constantes, de esta forma, el usuario podrá observar la dirección que le quiere dar, el ángulo de ataque con el que lo va a lanzar y la inclinación para el efecto que tendrá el disco. Esta posición la tendrá el disco siempre y cuando el usuario se encuentre realizando el gesto de “puño cerrado”.

La dirección del lanzamiento de un *Frisbee*, en un tiro del tipo *Backhand* está definido por el punto en el cual se suelta del disco. Por esto, para dar la dirección del lanzamiento se utilizará la posición que se tenga en el momento en el que el usuario deje de hacer el gesto de “puño cerrado”. Esta dirección es normal a la tangente de la trayectoria de la mano. Dirección se debe a que el disco rueda sobre la mano del lanzador, este giro cambia modifica la trayectoria, de una trayectoria tangencial a una radial. Una vez que se deja de hacer el gesto, se aplican las fuerzas obtenidas por el modelado del lanzamiento de un *Frisbee*, para realizar la simulación del vuelo.

Para la velocidad del lanzamiento, se realiza un promedio de la velocidad a la que se mueve el disco antes de ser lanzado, esta velocidad es aplicada en la dirección en la que se lanza el disco como se muestra en las siguientes ecuaciones.

$$\overrightarrow{v_{lanzamiento}} = \frac{\|\overrightarrow{p_1}, \overrightarrow{p_2}, \overrightarrow{p_3}, \overrightarrow{p_4}, \overrightarrow{p_5}\|}{tiempo}$$

donde:

- $\overrightarrow{p_i}, i = 1, 2, 3, 4, 5$ representa cada uno de los puntos en el espacio tomados y
- *tiempo* es el tiempo que transcurrió desde el primer punto en ser tomado hasta el lanzamiento del disco.

En la Ilustración 46 “Diagrama de flujo de la simulación”, se muestran de forma gráfica todos los procesos que deben realizar para hacer la simulación.

Diagrama de flujo

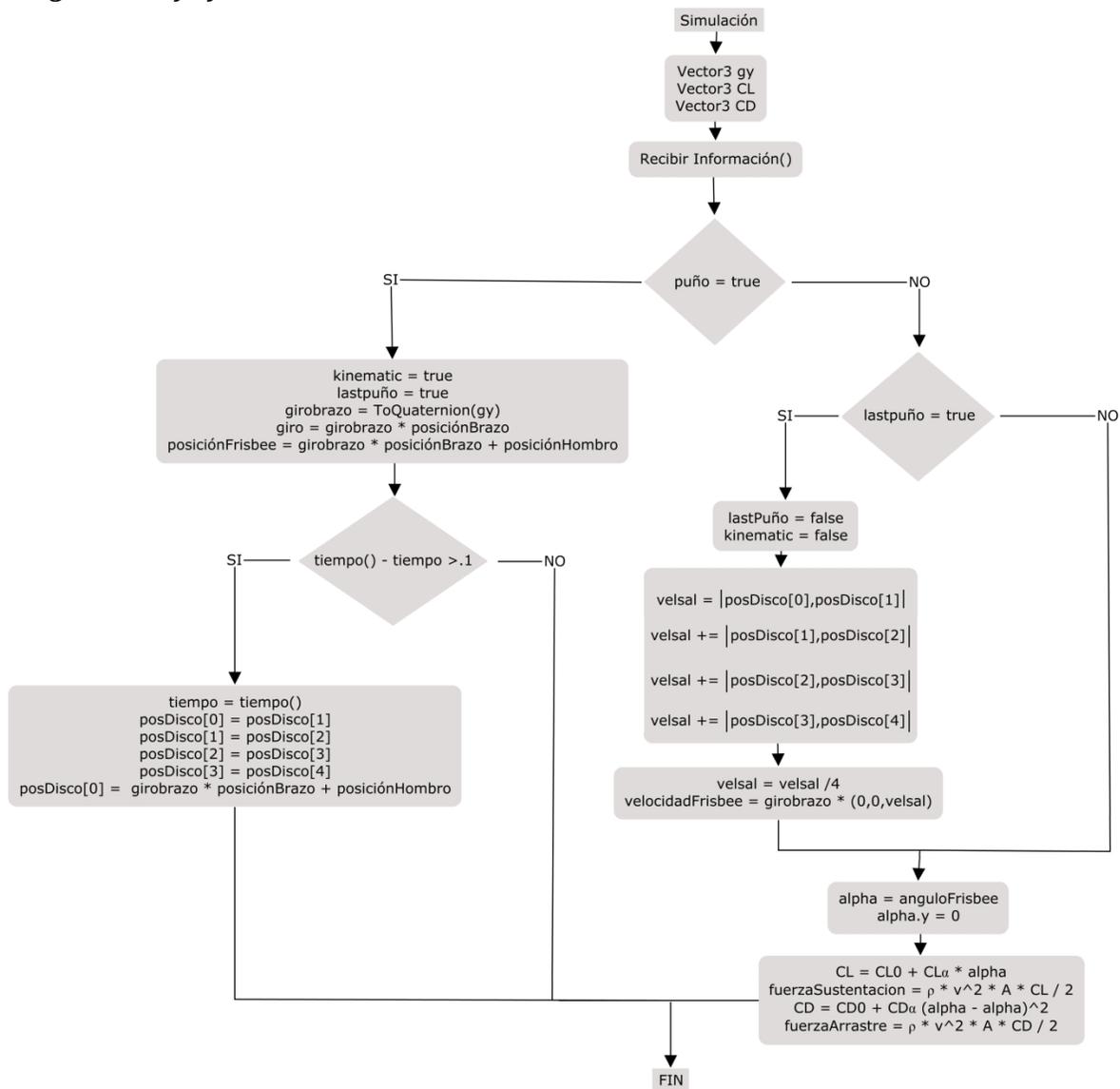


Ilustración 46 Diagrama de flujo de la simulación.

Diseño de la interfaz

Una vez teniendo el modelado del lanzamiento del *Frisbee*, fue necesario crear una interfaz, con la cual interactuaría el usuario. Se optó por una interfaz que contara con tres elementos principales, información del lanzamiento en una esquina, un botón de salida para poder cerrar el programa y el disco con el cual interactúa el usuario. La interfaz final se muestra en la Ilustración 47 “Interfaz del entorno virtual”.

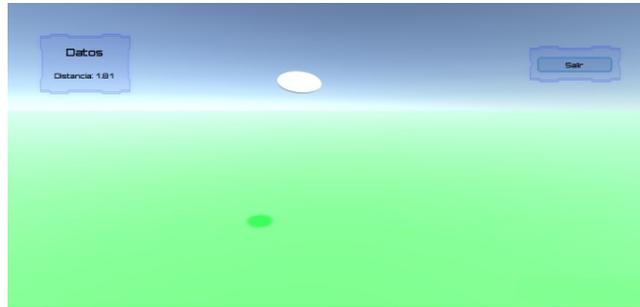


Ilustración 47 Interfaz del entorno virtual

Se realizó el diseño de un *Frisbee* en *Blender* para que el usuario pudiera observar un modelo más realista en la simulación. Las medidas con las que se diseñó el disco fueron las medidas oficiales con dimensiones de 274 [mm] +/- 3 [mm] y una altura de 32 [mm] +/- 2 [mm] como se muestra en el siguiente diagrama. [59]

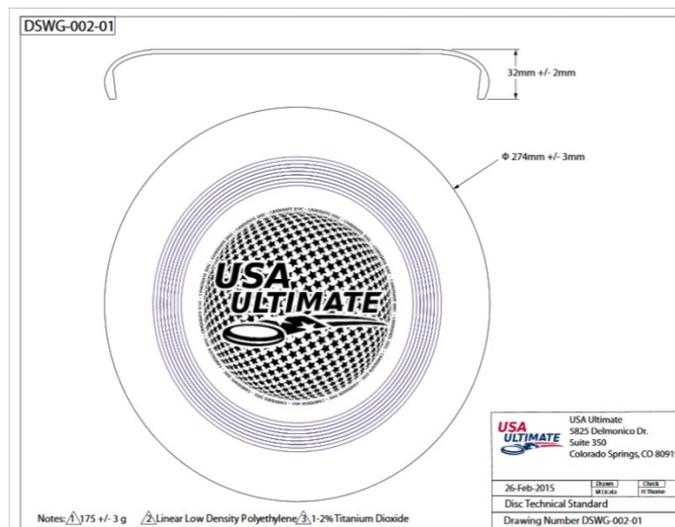


Ilustración 48 Plano de un Frisbee de Ultimate. Foto tomada de [59]

El modelo final creado en Blender se muestra en la Ilustración 49 “Modelo del *Frisbee* en Blender”.

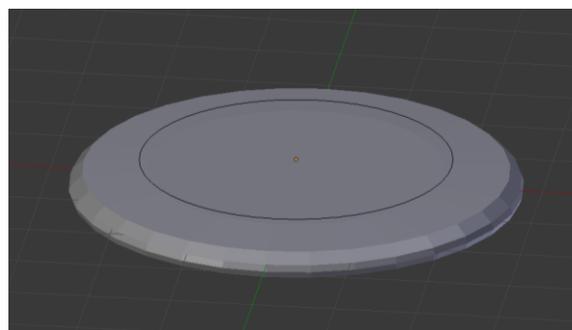


Ilustración 49 Modelo del *Frisbee* en Blender

5 Resultados

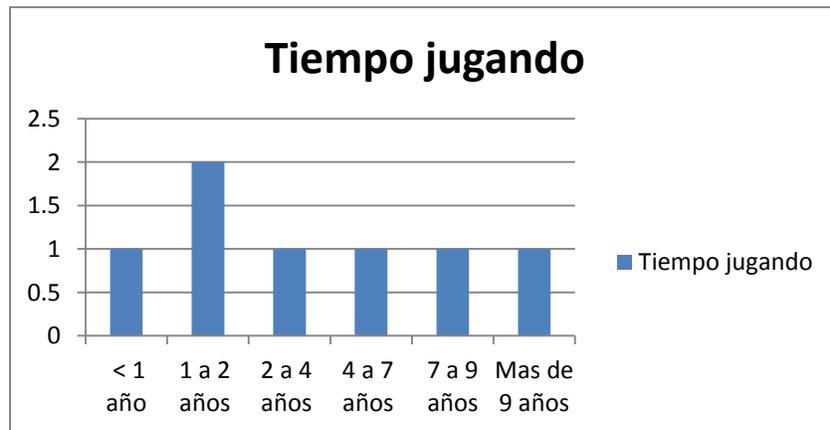
La solución final del proyecto es un software que simula la trayectoria del lanzamiento de un *Frisbee*. El software es del tipo ejecutable y funciona en computadoras con sistema operativo Windows. La computadora en la que funciona correctamente tiene memoria RAM de 16 GB, tarjeta gráfica NVidia 1050 TI y un procesador Intel i7 de 8ª generación. Además del software se hizo un guante para obtener la posición de la mano y los gestos necesarios para que funcione el software. En el apéndice 3 Manual de usuario se explica el funcionamiento de la solución.

Para determinar el espacio en el que funciona la solución planteada, se realizaron mediciones teniendo todo el sistema funcionando. Para obtener las dimensiones máximas del prototipo, se observó el espacio máximo en el cual se puede realizar la actividad. Se midió este espacio y los resultados fueron de 1.7 [m] x 1.7 [m]. De igual manera se pesó el guante para conocer el peso total del sistema y el valor obtenido fue de 82 [g].

Para obtener los resultados de los demás parámetros se hicieron pruebas a siete integrantes del equipo representativo de *Ultimate Frisbee* de la UNAM. El protocolo de pruebas se puede leer en el Apéndice 2. El protocolo de pruebas se dividió en cinco etapas, “Colocar guante”, “Detección de puño cerrado”, “Velocidad de respuesta”, “Lanzamiento del Frisbee” y “Comparación del lanzamiento simulado contra un lanzamiento real”. El objetivo de estas etapas es saber si el guante detecta los gestos del usuario, la velocidad de respuesta es adecuada, saber si el usuario considera que la trayectoria en el entorno virtual es correcta y por último medir si los datos generados por el simulador coinciden con los reales. Posteriormente, se realizó un análisis de los resultados y se compararon los valores obtenidos con los deseados en las especificaciones, para determinar si se cumplieron.

5.1 Pruebas realizadas

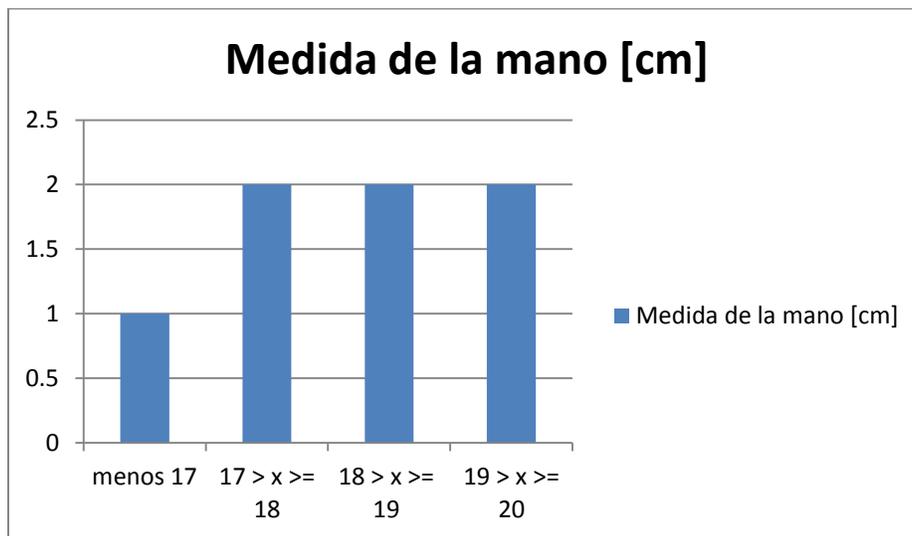
Con la finalidad de tener más información sobre los usuarios se les preguntó el tiempo que llevan jugando, los datos se muestran a continuación.



Gráfica 6 Tiempo jugando

Como se puede observar en la gráfica, el tiempo que cada jugador de la muestra lleva practicando es variado, esto es de utilidad, ya que se busca saber si la solución obtenida funciona para cualquier persona o solo para jugadores con cierta experiencia.

También se midió la mano de cada usuario. Esta medición se realizó de la palma de la mano hasta la punta del dedo medio. Esta medida se eligió porque es la referencia al momento de comprarse un guante de *Ultimate Frisbee*.



Gráfica 7 Medida de la mano

Aquí se puede observar, que el tamaño de la mano de los sujetos de la muestra tomada, también varía, esto será de ayuda para analizar el funcionamiento del guante en usuarios con manos de diferentes tamaños.

A continuación se mencionan las cinco etapas con las que contó el protocolo de pruebas y sus respectivos resultados.

6.1.1 Prueba 1 Colocar guante

En esta prueba se busca observar que tan fácil es para el usuario utilizar el guante y si le representa alguna incomodidad o molestia traerlo puesto.

Durante esta prueba, el evaluador debía de tomar el tiempo que tardaba el usuario en ponerse el guante. Este tiempo, fue de menos de 1 minuto en todos los casos. Después de ponérselo, se les hacían algunas preguntas.

La primera pregunta que se les hizo, fue, qué tan fácil les resultó el ponerse el sensor. La respuesta en todos los casos fue, que el sensor es fácil de colocar. La única observación que se hizo en el 57% de los encuestados fue que conectar por primera vez el cable, les resultó confuso.

La segunda pregunta fue si el guante era incómodo o le causaba alguna molestia. En todas las ocasiones la respuesta fue que no causaba ninguna molestia.

5.1.2 Prueba 2 Detección de “puño cerrado”

La siguiente prueba tiene como finalidad de que los usuarios prueben los gestos del programa. Para probarlo se les pidió que hicieran los gestos mientras se observaba como reaccionaba el programa y si el usuario tenía problemas.

La primera pregunta se hizo, para saber si el sensor les impedía realizar algún movimiento. La respuesta de todos los usuarios fue que no, sólo el 43% de los usuarios consideraron que el movimiento de mover la mano hacia afuera resulta incómodo.

La siguiente pregunta que se les hizo a los usuarios, fue para saber si tenían alguna molestia al hacer los gestos. La respuesta de todas las personas entrevistadas fue que no tenían ninguna molestia utilizando el sensor.

Sin importar el tamaño de la mano, ningún usuario tuvo problemas con la detección del agarre.

5.1.3 Prueba 3 Velocidad de respuesta

Se utilizó para determinar si el programa responde de forma adecuada. Para esto, se le pidió a los usuarios que hicieran el gesto de “puño cerrado” e hicieran algunos movimientos con él. Posteriormente se les preguntó acerca de su experiencia al interactuar con el juego, los movimientos que se ven reflejados en el simulador y el retraso en los movimientos.

Con la primera pregunta se busca conocer la experiencia del usuario. Sólo el 14% tuvo problemas al interactuar por primera vez con el simulador. El problema que se tuvo fue la calibración del sensor, al no realizarla de forma correcta la dirección del lanzamiento cambiaba. Sin embargo, el usuario se acostumbró después de unos pocos intentos.

Se les preguntó, si los movimientos que hacía el simulador reflejaban lo que ellos hacían en la vida real. La mayoría de las personas encuestadas dijo que sí, sin embargo el 19% comentaron que en algunas ocasiones, el *Frisbee* presentaba una rotación.

Por último se les preguntó sobre el retraso del juego. Para esta respuesta el 19% de los usuarios contestaron que notaban un poco de retraso, pero no les afectaba en la experiencia.

5.1.4 Prueba 4 Lanzamiento del *Frisbee*

Esta prueba se hizo con el fin de saber, si el lanzamiento del simulador se asemeja a un lanzamiento real. Para esto, se les pidió que realizaran varios tipos de lanzamientos, rápidos, lentos, usando solo muñeca, etc. De modo que se encontrara el mejor lanzamiento para el simulador.

Se les preguntó si consideraban que el lanzamiento simulado se parecía a un lanzamiento real. La respuesta general es que no siempre se parecen los lanzamientos, lo que más varía es la dirección que se le da. Este problema disminuía tras calibrar el sensor, sin embargo es un problema recurrente. Otro comentario que se hizo sobre el lanzamiento es la distancia en el simulador, la cual es más corta que en la vida real.

Como el lanzamiento simulado no es igual al real, se les preguntó con qué lanzamiento el simulador se asemeja más al real. La respuesta generalizada sobre la velocidad es un lanzamiento lento. Con respecto al movimiento del brazo, el 71% de los usuarios mencionaron que es mejor cuando se ocupa sólo la muñeca, el 29% de los usuarios mencionaron que funciona mejor usando el brazo. Algo que se observó durante la prueba es que los usuarios que mencionaron que funcionaba mejor con el brazo, no tienen mucho movimiento de muñeca.

La siguiente pregunta fue acerca de si los datos que se muestran en el programa, les fueron útiles. La respuesta generalizada fue que sí lo son. El 29% de los encuestados - los cuales son los más experimentados- mencionaron que la distancia no es un dato tan importante para ellos, a menos que estén practicando lanzamientos de distancia.

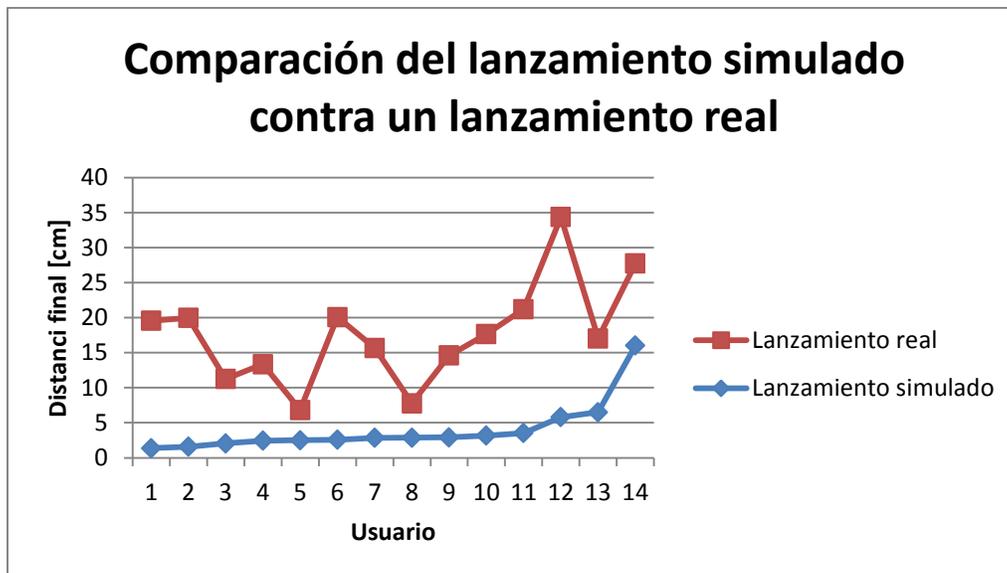
Al preguntarles si utilizarían este programa para practicar, la respuesta fue que sí, aunque el 29% de las personas expresaron, que sería deseable que se aumente la precisión del simulador. Este comentario se hizo porque la dirección a la cual salía el disco no coincidía con la dirección que los usuarios le habían dado.

La última pregunta es para saber si les ayudaría para entrenar, a esta respuesta todos respondieron que sí, principalmente les ayudaría a mejorar la técnica de lanzamiento.

5.1.5 Prueba 5 Comparación del lanzamiento simulado contra un lanzamiento real

En la última prueba se busca comparar los lanzamientos del simulador con los lanzamientos en la vida real. Para saber esto se les pidió que lanzaran en el simulador y que posteriormente lanzaran un *Frisbee* de verdad haciendo el mismo movimiento. Se realizaron dos lanzamientos simulados y dos lanzamientos reales por persona.

Los resultados obtenidos se muestran a continuación.



Gráfica 8 Comparación de lanzamiento simulado contra un lanzamiento real

5.2 Análisis de resultados

Una vez obtenidos los resultados, se analizaron con la finalidad de saber si cumplen con las necesidades establecidas en un principio y con los objetivos planteados. Posteriormente se realizó una comparación con las especificaciones establecidas.

En la primera prueba, en la que se deben colocar el guante, los usuarios pudieron hacerlo sin ningún problema y en un tiempo reducido. A pesar de tener problemas al conectar el cable, se puede considerar como un problema menor ya que fue la primera vez que lo hacen y no se encuentran familiarizados con el sensor.

En la prueba de la detección del agarre, algunos usuarios mencionaron que el cable causaba incomodidad para realizar un movimiento en específico. Este problema no les impedía realizar la actividad pero es un problema del diseño del guante que puede ser mejorado.

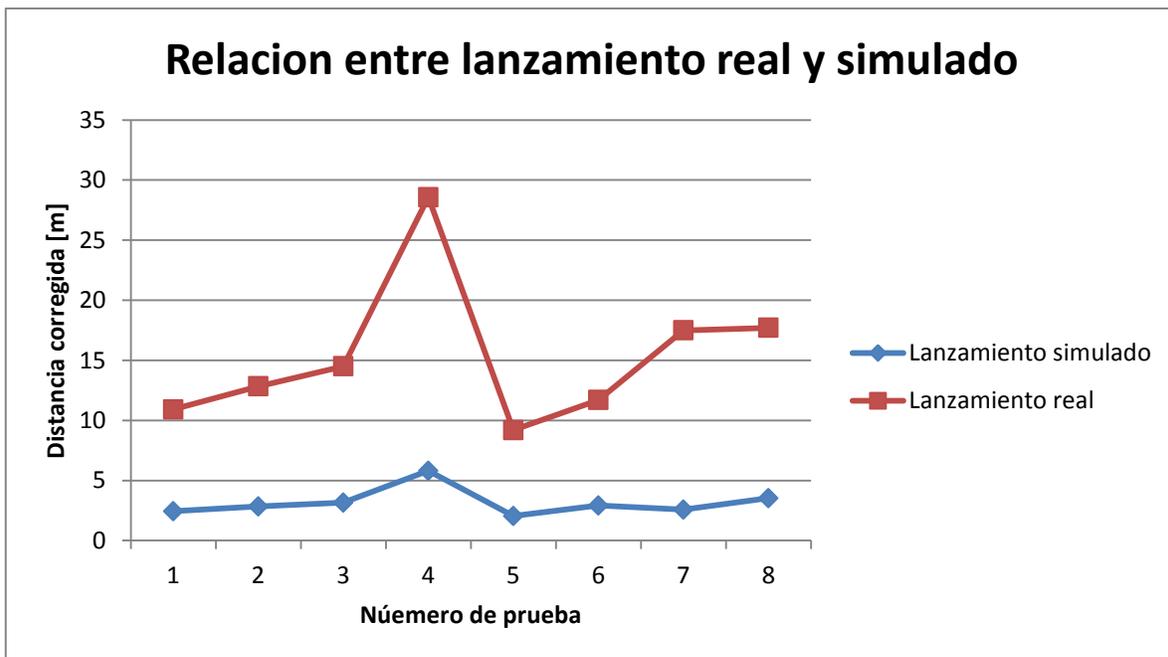
Con la prueba de velocidad de respuesta se determinó que el simulador es amigable con los usuarios y no es difícil ni tardado de utilizar. Algunos usuarios sintieron que el disco se encontraba rotado, esto se debe principalmente al tamaño del guante en comparación con la mano del usuario ya que en algunos casos les quedaba grande o pequeño y cambiaba la posición del usuario. Este problema se puede solucionar poniendo un *offset* al ángulo, sin embargo ese valor depende de cada usuario y el tamaño del guante que utilice.

En la prueba de velocidad de respuesta, algunos usuarios sintieron que tardaba un poco en verse reflejada la posición del disco. Aunque no lo consideraron como un problema grave, sí influye en la simulación. Este problema se debe a la IMU y a los filtros que se usan ya que tardan en obtener la posición.

Para la prueba del lanzamiento en la simulación hubo varios comentarios sobre la precisión de la simulación, estos problemas a los sensores utilizados, la velocidad del movimiento y el movimiento del brazo. El movimiento del cuerpo es muy complejo y puede llegar a ser muy rápido. Al simplificar el modelo del movimiento, se pierde información que puede mejorar la precisión de la simulación. Esto tiene como resultado, que el sensor no sea capaz de obtener información precisa, a esto se añade el retraso que ya tiene la ejecución de toda la solución.

Por los motivos antes mencionados el lanzamiento más preciso es un lanzamiento lento, en el cual el sistema total es capaz de obtener la información completa. Otro punto que ayuda al lanzamiento es que sólo se utilice la muñeca, ya que el modelado que se hizo sobre movimiento de la mano, sólo contempla un giro con un punto de referencia, al utilizar el brazo completo la trayectoria de la mano se vuelve más compleja y el modelo no lo predice a la perfección.

Para analizar los datos obtenidos sobre los lanzamientos real y simulado, se utilizó la constante de Pearson, la cual refleja la correlación que existe entre dos conjuntos de datos y cuyo valor puede ser del -1 al 1. Cuando se realizó el análisis al total de los datos, el resultado dio una relación muy pequeña, sin embargo, se eliminaron los datos que presentaba una relación menor hasta que se quedó con los datos del 57% de la población los cuales se muestran en la Gráfica 9 “Relación entre lanzamiento real y simulado”.

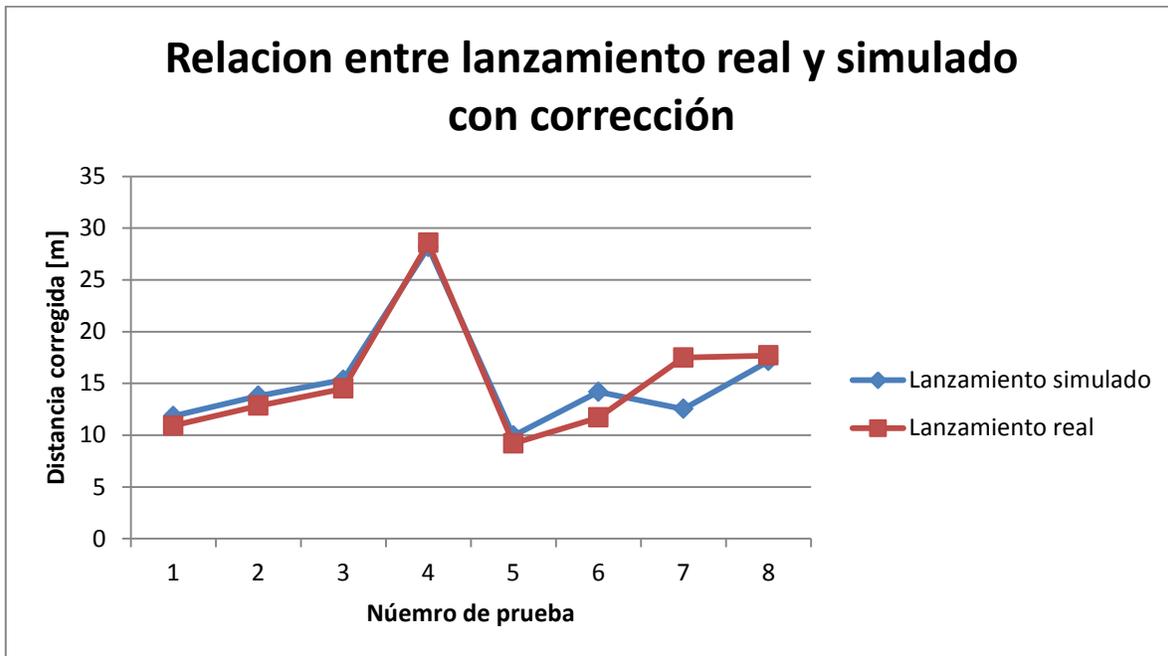


Gráfica 9 Relación entre lanzamiento real y simulado

Como se puede observar en la gráfica, existe una relación entre los datos reales contra los datos simulados. Al hacer un el análisis estadístico, se determinó que la relación entre los dos grupos de datos es del 93.2%.

En los datos antes mencionados se puede observar que aunque los datos tienen relación, no son las mismas magnitudes. Este punto también fue mencionado por los usuarios. Con la información obtenida, se determinó que debe multiplicarse por un factor de corrección de 4.85 para que obtenga datos similares a los de la vida real. Este factor se debe principalmente a la velocidad que se le da al disco al inicio del lanzamiento. El valor obtenido no coincide con el real, por esto la distancia final simulada es menor que la real.

A continuación en la Gráfica 10 “Relación entre lanzamiento real y simulado con factor de corrección”.



Gráfica 10 Relación entre lanzamiento real y simulado con factor de corrección

Al analizar los datos, se observó que las cuatro personas cuyos resultados fueron seleccionados, tienen manos que van de los 17 a los 19 [cm]. Este dato tiene relación con la medida del largo del guante es de 18.5 a 19 [cm] y entre las recomendaciones del vendedor menciona que es preferible que quede grande el guante a utilizar un guante más pequeño.

5.3 Valores obtenidos en las especificaciones

Después de obtener los resultados y de hacer el análisis correspondiente, se realizó una comparación de los datos obtenidos.

Tabla 8 Comparación de especificaciones deseadas contra obtenidas

Especificaciones	Valores deseados	Valores obtenidos
Número máximo de personas requeridas	1 persona	1 persona
Dimensiones mínimas del espacio	1.8 m x 1.8m	1.7m x 1.7m
Porcentaje de semejanza mínimo	90%	93.2%

Peso máximo	200 g	82 g
Número máximo de elementos	1	1
Tiempo máximo de configuración	5 min	< 1 min

El número máximo de personas requeridas, alcanzó el número deseado, ya que una sola persona es capaz de colocarse el sensor y empezar la simulación.

Las dimensiones mínimas requeridas de espacio se encuentran 10 [cm] por debajo de los valores deseados, sin embargo este valor fue considerado para un alcance máximo de una persona alta. Por este motivo el valor puede variar dependiendo de la persona y por lo general no se llega hasta ese punto.

El porcentaje de semejanza mínimo, se alcanzó con un 3.2% de más, esto cumple con los parámetros requeridos, aunque se podría mejorar.

El peso del sensor, se mantuvo muy por debajo del valor máximo establecido y el número de elementos se mantuvo en 1. Por lo cual se considera que se lograron los valores necesarios para estos rubros.

El tiempo máximo de configuración también se cumplió. Aunque el tiempo varía de persona a persona y este valor puede reducirse conforme los usuarios se acostumbren al sistema.

Conclusiones

El proyecto busca utilizar las ventajas de la realidad virtual y de las nuevas tecnologías *wearables* para ayudar a los jugadores *Ultimate Frisbee* a mejorar en su deporte. La implementación de este tipo de tecnologías puede ayudar a deportistas a mejorar al quitarles los problemas a los que se enfrentan de forma tradicional.

Los entornos virtuales permiten a las personas practicar desde su casa, ahorrando tiempo y dinero sin necesidad de transportarse, depender de otras personas, de un espacio amplio o del clima. Además, el resultado obtenido puede asemejarse a un resultado que se observaría en la vida real.

Durante la investigación se pudo observar que a pesar de ser un deporte nuevo y diferente, al compararlo con el resto de los deportes, ha tenido un gran crecimiento alrededor del mundo y principalmente en la UNAM. Sin embargo, no existe mucha información, sobre la cantidad de usuarios en México, historia más detalla sobre la llegada y desarrollo dentro del país, sobre todo referente a estudios acerca de aspectos necesarios para mejorar tales como, forma del disco, elementos que pueden influir en el lanzamiento, como velocidad del viento, temperatura, humedad, etc.

La solución planteada cuenta con un sistema que no requiere de programa específico para funcionar o de configurar los sensores. Cuenta con una interfaz amigable, lo que facilita a los usuarios el uso del simulador y permite que no se requiera de una amplia explicación para los usuarios primerizos.

El prototipo creado en este trabajo, todavía tiene problemas propios de la tecnología ocupada. Uno de estos problemas se encuentra en la velocidad de medición del sensor utilizado, así como los problemas de calibración que presenta. Aunque se utilizaron varios filtros para ello, persiste en el prototipo final.

Éste es un problema que se puede observar en la tecnología *wearable*. Esto se debe a que debe ser: ligera, suave y pequeña para que no cause ninguna molestia al usuario. Sin embargo, esto limita el tipo y la cantidad de elementos que se pueden utilizar a diferencia de tecnologías rígidas, como la de los controles

Otro punto que se observó en el proyecto fue que la tecnología del tipo *wearable* tiene la limitación de las medidas de cada persona. Para que este tipo de tecnología sea precisa, debe de ser diseñada para un grupo de personas con características específicas, al igual que la ropa que usamos. Estos problemas limitan el alcance que puede llegar a tener este tipo de tecnologías.

El proyecto se enfocó a un deporte y un equipo en particular, sin embargo los problemas que se abordaron los comparten todos los equipos que practiquen el *Ultimate Frisbee*. De igual manera, la tecnología y la metodología utilizada, pueden ser adaptadas para que sea de utilidad para otro tipo de deporte.

Trabajos futuros

A partir de los resultados obtenidos y las conclusiones a las que se llegó, se puede decir que se obtuvo un modelo funcional, que cumplió con los objetivos planteados en el proyecto. Sin embargo, se considera que el trabajo puede ser mejorado para futuras pruebas, en los siguientes puntos:

- Mejorar la lectura de la posición de la mano del usuario.
- Realizar sensores de diferentes tamaños para poder validarlo con cualquier tamaño de mano.
- Realizar un modelado más preciso del movimiento de la mano del usuario.
- Realizar un modelado más preciso del lanzamiento del *Frisbee*.
- Aplicar técnicas de diseño de interfaces para mejorar la experiencia en el entorno virtual del usuario.
- Desarrollar una guía para que el usuario pueda utilizar el programa sin necesidad de que alguien le explique.
- Crear un escenario que le permita al usuario saber si el sensor se encuentra bien calibrado.

Referencias

- [1] El Siglo de Torreón (2015, Febrero 5). El Frisbee, datos curiosos sobre su origen y nombre [Online] Hyperlink: <https://www.elsiglodetorreon.com.mx/noticia/1084253.el-frisbee-datos-curiosos-sobre-su-origen-y-nombre.html>
- [2] Ultimate Peixets. (2009). Historia del Ultimate [Online] Hyperlink: <https://peixets.org/peixets/index.php/es/historia-del-ultimate.html>
- [3] History. (2019). FIRST FRISBEES PRODUCED [Online] Hyperlink: <https://www.history.co.uk/this-day-in-history/23-january/first-frisbees-produced>
- [4] WORLD FLYING FEDERATION. (2016, Noviembre 12). SPORTS [Online] Hyperlink: <http://www.wfdf.org/sports/our-disciplines>
- [5] G. Shea. (2010, Febrero 15). RIP Walter Freerick Morrison, inventor of the fisbee [Online] Hiperlink: <https://www.mnn.com/earth-matters/wilderness-resources/blogs/rip-walter-frederick-morrison-inventor-of-the-frisbee>
- [6] WORLD FLYING DISC FEDERATION. (Fecha de consulta, abril 2019) Ultimate [Online] Hyperlink: <http://www.wfdf.org/sports/ultimate>
- [7] Dirección General del Deporte Universitario (2019) Ultimate [Online] Hyperlink: <http://deporte.unam.mx/disciplinas/ultimate.php>
- [8] Pumas Ultimate UNAM oficial (Fecha de consulta, 2019, octubre) Torneo Regional Centro, UNAM. [Online] Hiperlink: <https://www.facebook.com/ultimate.unam.oficial>
- [9] Ultimate Frisbee HQ. (Fecha de consulta, 2019, mayo). All Ultimmate Frisbee Throws [Online] Hyperlink: <http://ultimatefrisbeehq.com/ultimate-frisbee-throws/>
- [10] DiscStore. (2017, Octubre 9). 10 MUST.THROWS FOR ULTIMATE FRISBEE [Online] Hyperlink: <https://www.discstore.com/protips/musthavethrows/>
- [11] APRENDE ULTIMATE FRISBEE. (2015, Diciembre 25) ¿Qué es ultimate frisbee? [Online] Hyperlink: <https://aprendeultimatefrisbee.es/historia>
- [12] Ultimate México. (Fecha de consulta, 2019, Mayo) Los Primeros 20 Años [Online] Hyperlink: <http://ultimatemexico.org/history> [Fecha de consulta, mayo 2019]
- [13] M. Trejo Clemente. (Comunicación privada), 2019.
- [14] D. Aguilar Lopez. (Comunicación privada), 2019.

- [15] M. Mitchell. (2018, Julio 12). Ultimate Frisbee is likely to fly into the 2024 or 2028 Olympic Games [Online] Hyperlink: <https://www.cincinnati.com/story/sports/olympics/2018/07/12/could-ultimate-become-next-olympic-sport/713604002/>
- [16] C. Eisenhood. (2019, Febrero 21). Ultimate Misses Out On Paris 2024 Olympic Games [Online] Hyperlink: <https://ultiworld.com/livewire/ultimate-misses-paris-2024-olympic-games/>
- [17] LOS40. (2015, Marzo 9). WINDJAMMERS NOS HIZO AMAR EL FRISBEE [Online] Hyperlink: https://los40.com/los40/2015/03/09/videojuegos/1425908946_911706.html
- [18] Layout Ultimate 2006. (2006). The Ultimate Frisbee computer game [Online] Hyperlink: <http://ultimatefrisbee.sourceforge.net/main.html>
- [19] STRATEGYWIKI. (Fecha de consulta, 2019, Mayo). Wii Sports Resort/Frisbee [Online] Hyperlink: https://strategywiki.org/wiki/Wii_Sports_Resort/Frisbee
- [20] R. Alvarez (2019, agosto 23) TODOS los dispositivos a los que puedes conectar un mando de la PS4 [Online] Hiperlink: <https://www.xataka.com/videojuegos/todos-dispositivos-a-que-puedes-conectar-mando-ps4>
- [21] Educalingo (Fecha de consulta, 2019, Agosto) Inmersión [Online] Hiperlink: <https://educalingo.com/es/dic-es/inmersion>
- [22] Manus VR. (Fecha de consulta, 2019, julio). Manus Prime One [Online] Hyperlink: <https://manus-vr.com/>
- [23] DextaRobotics (2018) Dexmo [Online] Hyperlinks: <https://www.dextarobotics.com/en-us>
- [24] EurekAlert!. (2019, Julio 23). Stretch-sensing glove captures interactive hand poses accurately [Online] Hyperlink: https://www.eurekalert.org/pub_releases/2019-07/afcm-sgc072319.php
- [25] A. Pérez Tirado. "SISTEMA LÚDICO PARA EJERCICIOS DE TERAPIA DE LA ZONA CARPIANA Y FALANGES". Tesis de licenciatura. UNAM. Ciudad de México, México, 2014.
- [26] S. D. Eppinger & K. T. Ulrich, *Diseño y desarrollo de productos*. Quinta ed. México: Mc Graw Hill, 2013.
- [27] K. Szpunar, S. Moulton & D. Schacter, "Mind wandering and education: from the classroom to online learning", *Frontiers in Psychology*, vol. 4, pp. 495, Agosto 2013
- [28] Innovaforum. (2000). "Técnica de creatividad: Análisis morfológico". [Online] Hyperlink: http://www.innovaforum.com/tecnica/morfolog_e.htm
- [29] V. G. Arnez Paniagua. "INSTRUMENTACIÓN DE UN GUNTE Y ADQUISICION DE DATOS DE LA POSTURA DE LAMANO HUMANA PARA LA TELEOPERACIÓN". Tesis de maestria. UNAM. Ciudad de México, México, 2012.

- [30] K. Hartman. *Make: Wearable Electronics*. Primera ed. Canadá: Maker Media, 2014.
- [31] M. R. Díaz Tribaldos, J. M. Escobar Ocampo & Ó. A. Vivas Albán. “INTERFAZ HÁPTICA TIPO GUANTE CON REALIMENTACIÓN VIBRATORIA”, *ELA*, vol. 12, no. 23, pp. 29-39, enero-junio 2015.
- [32] coparoman. (2013, Diciembre 14). Apagador de escalera [Online] Hiperlink: <https://coparoman.blogspot.com/2013/12/apagador-de-escalera.html>
- [33] Sparkfun. (Fecha de consulta, 2019, Agosto). SparkFun Triple Axis Accelerometer Breakout - ADXL345 [Online] Hiperlink: <https://www.sparkfun.com/products/9836>
- [34] CDMX Electrónica. (Fecha de consulta, 2019, Agosto) Gy-87 Modulo Sensor imu 10 dof (Online) Hiperlink: https://www.cdmxelectronica.com/nuevos_productos/sensores/imus/gy-87-modulo-sensor-imu-10dof/
- [35] SanDoRobotics. (2019). Acelerometro Analogico ADXL335 – GY-61 [Online] Hiperlink: <https://sandorobotics.com/producto/hr0150/>
- [36] Pololu. (2019) AltIMU-10 Gyro, Accelerometer, Compass, and Altimeter (L3GD20, LSM303DLHC, and LPS331AP Carrier) [Online] Hiperlink: <https://www.pololu.com/product/1269>
- [37] InvenSense Inc. MPU-6000 and MPU-6050 Product Specification Revision 3.4, 2013.
- [38] V. E. Vélez Vargaz, C. A. Heanao Baena & A. F. Calvo Salcedo. “Diseño e Implementación de un Prototipo de Intercomunicación por Cable para el Cuidado en Hospitales” *INGE CUC*, vol 14, no. 1, pp. 101-112, Enero – Junio 2018.
- [39] N. G. Forero Saboya. “NORMAS DE COMUNICACIÓN EN SERIE: RS-232, RS-422 YRS 485” *Ingenio Libre* 2012.
- [40] R. García Ortega. “TECNOLOGÍA INALAMBRICA BLUETOOTH”, Tesis de licenciatura, Universidad Lasallista Benavente, Celaya, Gto. 2007.
- [41] Espressif Systems. “ESP32 Series Datasheet”. Versión 3.1, 2019.
- [42] DIGI International Inc. (2017). Digi XBee Family Features Comparison. [Online] Hiperlink: https://www.digi.com/pdf/chart_xbee_rf_features.pdf
- [43] Adafruit (Fecha de consulta, 2019, Agosto). Adafruit Feather M0 Basic Proto - ATSAM21 Cortex M0 [Online] Hiperlink: <https://www.adafruit.com/product/2772>
- [44] Particle. (Fecha de consulta, 2019, Agosto). PHOTON DATASHEET (V016) [Online] Hiperlink: <https://docs.particle.io/datasheets/wi-fi/photon-datasheet/>
- [45] Arduino (2019) ARDUINO NANO EVERY WITH HEADERS [Online] Hiperlink: <https://store.arduino.cc/usa/nano-every-with-headers>

- [46] 330 Ohms (2016, Abril 5) Arduino Mini, Micro y Nano, ¿qué tan diferentes son? [Online] Hiperlink: <https://www.330ohms.com/blogs/blog/114183172-arduino-mini-micro-y-nano-que-tan-diferentes-son>
- [47] BaboonLab. (Fecha de consulta, 2019, Agosto) Unreal Engine 4, el motor gráfico que ofrece realismo al máximo [Online] Hiperlink: <http://www.baboonlab.com/blog/noticias-de-marketing-inmobiliario-y-tecnologia-1/post/unreal-engine-4-el-motor-grafico-que-ofrece-realismo-al-maximo-23>
- [48] Friction GLoVES (2019) Friction 2 Ultimate Frisbee Gloves [Online] Hiperlink: <https://www.frictiongloves.com/store/c8/Ultimate.html>
- [49] Arduino (2019) Arduino nano [Online] Hyperlink: <https://store.arduino.cc/usa/arduino-nano>
- [50] 330 Ohms. (2019). Bobina de Hilo Conductor [Online] Hyperlink: <https://www.330ohms.com/products/bobina-de-hilo-conductor-30ft?variant=10486186692>
- [51] M. E. Aranda Romasanta “Estudio y aplicación del Filtro de Kalman en fusión en UAVs”. Tesis de licenciatura. Universidad de Sevilla, Sevilla, 2017.
- [52] S. A. Hummel “Frisbee Flight Simulation and Throw Biomechanics”. Tesis de maestría, University of California, California, California, 2003.
- [53] G. Welch & G. Bishop. “An Introduction to the Kalman Filter” Department of Computer Science, University of North Carolina, Chapel Hill, 2001.
- [54] F. P. Beer, E. R. Jhonston & P. J Cornwell, *Mecánica Vectorial para Ingenieros*. Novena ed. México: McGraw Hill 2010
- [55] M. A. Riu Galvez “SISTEMA PARA CALCULAR DE TIEM-LAPSE Y ESTABILIZACIÓN DE IMAGEN” Tesis de licenciatura, UNAM. Ciudad de México, México, 2015
- [56] P.J. Van de Mele. (2013, Abril). Reading a IMU Without Kalman: The Complementary Filter [Online]. Hiperlink: <http://www.pieter-jan.com/node/11>
- [57] R. D. Lorenz *Spinning Fight Dynamics of Frisbee, Boomerangs, Samaras, and Skipping Stones*. Tucson: Springer, 2006.
- [58] A. J. Valderrama & J. O. Valderrama “Trabajo Semestral Guiado: un Buen Complemento al Estudio y Aprendizaje en Cursos de Ciencias y de Ingeniería” Centro de Información Tecnológica, La Serena Chile, Vol. 7 No. 3, pp. 3 -10, 2014.
- [59] Usa Ultimate (2019), Disc Standart [Online] Hiperlink: <https://www.usultimate.org/discstandards/>

Índice de ilustraciones

Ilustración 1 Walter Frederick Morrison. Foto tomada de [5]	2
Ilustración 2 Juego de Ultimate Frisbee. Foto tomada de [8]	3
Ilustración 3 Dirección General del Deporte Universitario. Foto tomada de [7]	4
Ilustración 4 Equipo representativo de la UNAM 2019, rama varonil. Foto tomada de [8]	4
Ilustración 5 Juego “Frisbee Dog”. Foto tomada de [19]	6
Ilustración 6 Forma común de un control para consola. Foto tomada de [20]	6
Ilustración 7 Guante Manus ONE waerable. Foto tomada de [22]	7
Ilustración 8 Manus VR. Foto tomada de [22]	7
Ilustración 9 Dexmo. Foto tomada de [23]	8
Ilustración 10 Guante de ETH Zurich y NYU. Foto tomada de [24]	8
Ilustración 11 Diagrama de caja negra con entradas y salidas	18
Ilustración 12 Interacción entre subsistemas	19
Ilustración 13 Gestos de la mano, a) puño cerrado, b) mano abierta, c) y d) doble toque	20
Ilustración 14 Agarre de <i>backhand</i> de un <i>Frisbee</i>	21
Ilustración 15 Circuito del sensor óptico. Foto tomada de [29]	22
Ilustración 16 Esquema de variables en un sensor óptico. Foto tomada de [29]	22
Ilustración 17 Sensor Flex. Foto tomada de [31]	23
Ilustración 18 Sensor de contacto. Foto tomada de [32]	24
Ilustración 19 SparkFun ADXL345 SRN-09836. Foto tomada de [33]	25
Ilustración 20 IMU GY-87. Foto tomada de [34]	26
Ilustración 21 IMU GY-61. Foto tomada de [35]	26
Ilustración 22 IMU L3GD20 [36]	27
Ilustración 23 MPU-6050 Foto tomada de [37]	27
Ilustración 24 Adafruit Feather M0 Basic Proto. Foto tomada de [43]	30
Ilustración 25 Particle Photon Wifi. Foto tomada de [44]	30
Ilustración 26 Arduino NANO. Foto tomada de [45]	31
Ilustración 27 Unity. Foto tomada de [47]	32
Ilustración 28 Unreal Engine. Foto tomada de [47]	33
Ilustración 29 Friction Gloves. Foto tomada de [48]	34
Ilustración 30 Bobina de hilo conductivo. Foto tomada de [50]	34
Ilustración 31 Sensores de contacto en el guante	35
Ilustración 32 Esquema sensor de dedos	35
Ilustración 33 Circuito IMU	36
Ilustración 34 Movimiento circular. Foto tomada de [54]	38
Ilustración 35 Movimiento de la muñeca en el lanzamiento de un <i>Frisbee</i> . Foto modificada de [52]	38
Ilustración 36 Diagrama de flujo del filtro de Kalman	41
Ilustración 37 Proyecciones de la gravedad. Foto tomada de [55] [56]	42
Ilustración 38 Diagrama de flujo del filtro complementario	44
Ilustración 39 Diagrama de flujo de la calibración	46

Ilustración 40 Diagrama de flujo de los datos enviados	49
Ilustración 41 Diagrama de flujo de recepción de datos en Unity.....	50
Ilustración 42 Pruebas del <i>Frisbee</i> en el túnel de viento. Foto tomada de [57]	51
Ilustración 43 Fuerzas y momentos de un disco en el aire. Foto tomada de [52]	52
Ilustración 44 Coeficiente CD de arrastre contra el ángulo de ataque. Foto tomada de [52] [58]...	54
Ilustración 45 Coeficiente CL de sustentación contra el ángulo de ataque. Foto tomada de [52] [58]	54
Ilustración 46 Diagrama de flujo de la simulación.	56
Ilustración 47 Interfaz del entorno virtual	57
Ilustración 48 Plano de un <i>Frisbee</i> de Ultimate. Foto tomada de [59]	57
Ilustración 49 Modelo del <i>Frisbee</i> en Blender	57

Índice de gráficas

Gráfica 1 Aspectos importantes para mejorar en el deporte	9
Gráfica 2 Información útil para mejorar en <i>Ultimate Frisbee</i>	10
Gráfica 3 Motivos que impiden mejorar	10
Gráfica 4 Frecuencia de práctica	11
Gráfica 5 Tiempo de práctica	12
Gráfica 6 Tiempo jugando	58
Gráfica 7 Medida de la mano	59
Gráfica 8 Comparación de lanzamiento simulado contra un lanzamiento real	62
Gráfica 9 Relación entre lanzamiento real y simulado.....	63
Gráfica 10 Relación entre lanzamiento real y simulado con factor de corrección	64

Índice de tablas

Tabla 1 Necesidades y requerimientos	14
Tabla 2 Requerimientos y especificaciones de la solución	15
Tabla 3 Especificaciones con valores.....	16
Tabla 4 Matriz de sensor de los dedos.....	25
Tabla 5 Matriz de sensor de posición.....	28
Tabla 6 Matriz de subsistema de comunicación	29
Tabla 7 Matriz de subsistema de procesamiento	31
Tabla 8 Comparación de especificaciones deseadas contra obtenidas	64

Apéndice

Apéndice 1 Encuesta de la justificación

Encuesta a integrantes del equipo representativo de Ultimate Frisbee de la UNAM para conocer sus necesidades al entrenar.

1.- ¿Cuánto tiempo llevas practicando el deporte?

- 1) Menos de 2 años ___ 2) de 2 a 4 años ___ 3) más de 4 a 6 años ___ 4) más de 6 años ___

2.- ¿Cuáles consideras que son las dos cosas más importantes para mejorar en el Ultimate Frisbee?

- 1) lanzar bien ___ 2) condición ___ 3) fuerza ___ 4) estrategia ___ 5) otro _____

3.- ¿Qué información te serviría saber para practicar el aspecto de la pregunta 2?

- 1) tiempo ___ 2) distancia ___ 3) velocidad ___ 4) otros _____

4.- ¿Cuáles son los problemas que tienes para poder mejorar estos aspectos?

- 1) tiempo ___ 2) espacio ___ 3) clima ___ 4) compañía ___ 5) otros _____

5.- ¿Con que frecuencia practicarías esto si no tuvieras los problemas antes mencionado?

- 1) 1 vez a la semana ___ 2) 2 a 3 veces a la semana ___ 3) 3 a 5 veces a la semana ___
4) 6 o 7 veces a la semana ___

6.- ¿Cuánto tiempo por día le dedicarías a realizar esta actividad?

- 1) Menos de 30 min ___ 2) de 30 min a 1 hora ___ 3) de 1 hora a 2 horas ___
4) más de 2 horas ___

Apéndice 2 Protocolo de pruebas

Este protocolo se aplicará a los integrantes del equipo representativo de Ultimate Frisbee de la UNAM. El objetivo de este protocolo es saber si el guante y el simulador cumplen con las necesidades que se determinaron al principio del proyecto.

La prueba se realizará en el campo de usos múltiples ubicado en la Ciudad Universitaria a las 5 pm en el horario de entrenamiento del equipo representativo de Ultimate Frisbee de la UNAM.

Preguntas generales del usuario.

Tiempo que lleva jugando. _____

Medida de la mano _____

Prueba 1 Colocar guante

El usuario colocará la banda para sujetar el cable, posteriormente se colocará el guante en su mano derecha y realizará la conexión del cable con el guante. El evaluador deberá tomar el tiempo que le toma al usuario todo el proceso de colocar y conectar el guante y posteriormente hará la conexión entre el guante y la computadora.

Observaciones durante la prueba

Preguntas al usuario

¿Qué tan fácil le resultó colocarse el sensor?

¿El sensor le causa alguna molestia o incomodidad?

Prueba 2

Detección del agarre

Se debe de observar si cada vez que el usuario hace el agarre el software detecta lo mismo, en caso de que no se debe de anotar. Si el software no detecta el agarre se le debe de pedir al usuario que repita el movimiento pero esta vez hay que asegurarse de que se detecte el agarre. Esto se debe de repetir cinco veces.

Observaciones durante la prueba

Preguntas al usuario

¿El guante impide que realice le movimiento de alguna forma?

¿El guante resulta incomodó?

En caso de que el software no haya detectado el agarre

¿Sintió que la forma en que se le pidió que cerrara la mano es diferente a la que haría con un disco normal?

Prueba 3

Velocidad de respuesta

El usuario colocará el guante en su mano derecha y el evaluador hará la conexión entre el guante y la computadora. En este caso se le pedirá que realice el gesto de agarre, mueva el disco y lo lance. El usuario realizará estas acciones durante 1 minuto. En este tiempo se observará si el usuario tiene algún problema al interactuar con el programa.

Observaciones

Preguntas

¿Tuvo algún problema al interactuar con el programa?

¿Siente que el software hace los mismos movimientos que usted?

¿Considera que el programa reacciona de forma adecuada a su movimiento? ¿Por qué?

Prueba 4

Lanzamiento del Frisbee

La persona se colocará el guante en su mano derecha y el guante se conectará a la computadora. Para esta prueba se le pedirá al usuario que realice 10 lanzamientos. Se le dará una realimentación para que realice un mejor lanzamiento de igual manera se le pedirá que realice lanzamientos variados, más lentos, más rápidos, utilizando solo la muñeca, utilizando solo el brazo. Se observará la forma en la que el usuario interactúa con el programa y si tiene alguna complicación con él.

Observaciones

Preguntas

¿Notó alguna diferencia entre los tipos de lanzamiento?

¿Cuál es el lanzamiento que considera que se asemeja más a uno real?

¿Los datos son útiles?

¿Utilizaría este programa?

¿Le sería de utilidad para entrenar?

Prueba 5

Comparación del lanzamiento simulado contra un lanzamiento real

Se le pedirá al usuario que realice un lanzamiento en el simulador y se tomarán los datos resultantes. Posteriormente se le pedirá que realice el mismo movimiento pero con un Frisbee real y se medirán los datos del lanzamiento para compararlos.

Observaciones:

Datos de la simulación	
Numero de lanzamiento	Distancia [unidades]
1	
2	

Datos de reales	
Numero de lanzamiento	Distancia [m]
1	
2	

Apéndice 3 Manual de usuario

Manual para usar el simulador del lanzamiento de un Frisbee.

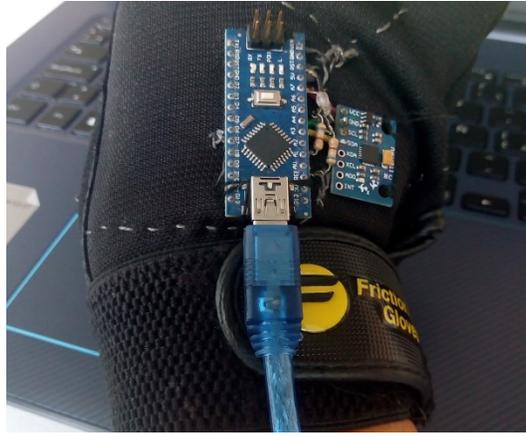
1. Colocar guante

Primero hay que ponerse el guante en la mano derecha y ajustarlo usando el velcro.



2. Conectar cables

Se conecta el cable azul a la tarjeta en la parte posterior del guante.



Se conecta el conecta el cable azul con el cable negro.



El cable negro se conecta a la computadora por el puerto USB

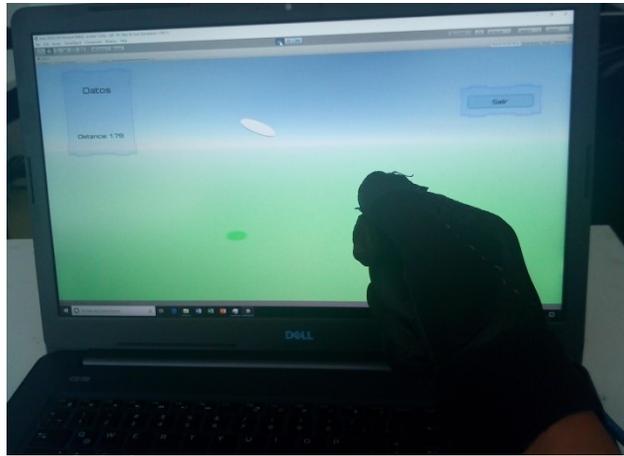
3. Calibración

Para tener una mejor precisión en la simulación se recomienda calibrar el sistema antes de cada lanzamiento. Para calibrarlo es necesario ponerse enfrente a la pantalla, apuntar al frente con la mano y hacer el gesto de “doble toque”, se debe de tocar dos veces seguidas el dedo índice con el dedo pulgar en menos de 1.5 [s].



4. Agarre y lanzamiento del *Frisbee*

Para empezar mover el disco es necesario hacer el gesto de “Puño cerrado”, para eso es necesario cerrar el puño pero el dedo pulgar se debe de colocar sobre el dedo índice.



Al momento de dejar de hacer el gesto de “Puño cerrado” se lanzará el disco automáticamente.

