



VNIVERSITAT^Ů DE VALÈNCIA

TESIS DOCTORAL

Doctorado en Tecnologías de la Información, Comunicaciones y Computación

**Mejoras basadas en heurísticas para la
percepción de estímulos de movimiento en
simuladores de realidad virtual y realidad
aumentada**

D. José Vicente Riera López

Dirigida por:

Dr. Marcos Fernández Marín

Dr. Sergio Casas Yrurzum

Valencia, enero de 2023

El **Dr. D. Marcos Fernández Marín** y el **Dr. D. Sergio Casas Yrurzum**, ambos, profesores titulares de Ciencias de la Computación e Inteligencia Artificial del Departamento de Informática de la Universitat de València, CERTIFICAN que la presente memoria

“Mejoras basadas en heurísticas para la percepción de estímulos de movimiento en simuladores de realidad virtual y realidad aumentada”

ha sido realizada bajo su dirección, en el Departamento de Informática y en el Instituto de Robótica y Tecnologías de la Información y de la Comunicación (IRTIC) de la Universitat de València, por **D. José Vicente Riera López**, y constituye su tesis para optar al grado de **Doctor en Informática**, correspondiente al programa de doctorado **“Tecnologías de la Información, Comunicaciones y Computación”**.

Y para que conste, en cumplimiento de la legislación vigente, la presentamos ante la Escuela Técnica Superior de Ingeniería (ETSE) de la Universitat de València, a 10 de enero de 2023.

LOS DIRECTORES:



Digitally signed by
FERNANDEZ
MARIN MARCOS -
52806270H
Date: 2023.01.10
14:00:28 +01'00'

SERGIO|
CASAS|
YRURZUM

Firmado
digitalmente por
SERGIO|CASAS|
YRURZUM
Fecha: 2023.01.10
17:08:23 +01'00'

A mi padre.

**Estés donde estés,
espero que te sientas orgulloso.**

D.E.P.

Agradecimientos

A todos mis compañeros del IRTIC que, en mayor o menor medida, han colaborado y ayudado a realizar este trabajo: Jesús, Manolo, Lisardo, Paco Vegara, Pablo, Pedro Juan, Inma García, Lucía, Inma Coma, Bibi, y un largo etc.

Al Dr. Pedro Morillo, que hace ya unos cuantos años fue el primero en apostar por un estudiante, no demasiado aplicado, que ahora será Doctor.

Al Dr. Sergio Casas, codirector de esta Tesis. Juntos empezamos, en el IRTIC, esta línea de trabajo en plataformas de movimiento. Sin su mente brillante y analítica, hoy en día esta Tesis no sería una realidad. Gracias por tu tiempo, dedicación y paciencia.

Al Dr. Marcos Fernández. Gracias por confiar en mí y en mi trabajo durante todos estos años. Gracias por darme la oportunidad de ser realizar esta Tesis. Y gracias, como no, por la amistad que nos une.

A mi familia: mamá, Quique, Sonia, Martín y Nicolás. Gracias por empujarme y ayudarme día a día. Gracias por haberme dado la mejor educación que habéis podido.

A mi mujer y mi hijo. Sois el motor que me mueve cada día. Perdón por todas las horas que este trabajo os ha robado. Simplemente gracias. José, algún día leerás esto... Os quiero!

Resumen

Los simuladores basados en realidad virtual y realidad aumentada están cada día más introducidos en nuestras vidas. Hace tan solo dos décadas, este tipo de sistemas únicamente estaba al alcance de los ejércitos de algunos países y de grandes compañías aéreas o automovilísticas, pero hoy es posible comprar simuladores y recibirlos en casa por muy poco dinero.

Todos los simuladores tratan de hacer creer a los usuarios que están viviendo una situación ajena a su realidad y, dependiendo del objetivo del simulador, el usuario realizará una serie de acciones encaminadas al entretenimiento, a la formación o incluso a la superación de pruebas selectivas.

Para medir la calidad de los simuladores existe una gran variedad de métodos. Uno de los aspectos clave en todos estos métodos es saber cuántos sentidos del cuerpo humano es capaz de estimular el simulador. Generalizando, a más sentidos estimulados de mejor simulador se tratará.

Habitualmente los sentidos estimulados son el visual, el auditivo y el táctil, este último mediante la instalación de elementos con los que el usuario interactúa, como un volante, un joystick o incluso una cabina de control completa. Otros sentidos, como el olfato, la propiocepción

o el vestibular (sentido del movimiento), suelen estimularse menos habitualmente, pero no son menos importantes.

La conjunción adecuada de estos estímulos en el usuario hará que su sensación de presencia en la simulación sea más elevada y, si el usuario se concentra en lo que se está simulando y no en el entorno real en el que se encuentra, se alcanzarán mejor los objetivos de la simulación.

Por otro lado, una conjunción inadecuada de estos estímulos en el cerebro humano puede ocasionar el efecto contrario, llegando incluso a generar una sensación de incomodidad tan elevada que impida que el usuario finalice la simulación.

De todos los sentidos, la presente tesis doctoral se focaliza en el sentido del movimiento y cómo éste puede hacer que los usuarios de simuladores aumenten considerablemente su sensación de presencia y, por lo tanto, se cumpla mejor el objetivo con el que se diseñó un simulador.

La manera habitual de introducir estímulos de movimiento en usuarios de simuladores es mediante plataformas de movimiento, pero, como se verá en los capítulos posteriores, no son la única alternativa.

Las plataformas de movimiento son aparatos mecánicos que, gracias a una serie de actuadores, son capaces de generar movimientos rotacionales o traslacionales en uno o más Grados de Libertad (GdL).

Generalmente se instalan ancladas al suelo y constan de dos partes, una base fija donde están los actuadores y una parte móvil donde se instala el usuario. A veces, las plataformas portan cabinas complejas para recrear la realidad de lo que quiera simular y otras veces únicamente portan un simple asiento.

Cuando se desarrolla una simulación, principalmente si se trata de simular un vehículo (avión, coche, barco, bote de rescate, motocicleta, etc), se implementa un modelo físico del que se extraen las aceleraciones y velocidades angulares que se están produciendo y éstas son las que se intentan reproducir en la plataforma de movimiento. La traducción de estas aceleraciones y velocidades angulares a señales para la plataforma pasan a través de varias capas de software entre las que destaca el algoritmo de generación de claves de movimiento o *Motion Cueing Algorithm* (MCA por sus siglas en inglés).

Los MCA intentan trasladar a movimiento de la plataforma todo lo que ocurre en el modelo simulado, pero esto no siempre es posible debido a las limitaciones intrínsecas de tener un sistema mecánico (anclado al suelo) con rangos de movimiento delimitados en el espacio. Por lo tanto, parte de la tarea a realizar por los MCA consiste el discernir qué señales se reproducirán (y cómo) y qué señales se omitirán por ser imposible reproducirlas.

Para poder configurar cómo el MCA realiza esta tarea, generalmente, existen decenas de parámetros a ajustar. Con una correcta configuración se puede llegar a recrear la mayoría de movimientos generados en el modelo físico, pero siempre habrá alguno que, bien por su amplitud o bien por la situación en que se encuentre la mecánica en el momento en que se debe recrear, no se pueda recrear.

Esto puede ser un problema si parte de los movimientos que se pierden son importantes para el correcto cumplimiento del objetivo del simulador. Es decir, si la información que el MCA elimina le debía transmitir al usuario ciertos estímulos a partir de los cuales tomar una decisión (aumentar o disminuir altura en un simulador de avión, frenar cuando se pasa por unas bandas reductoras de velocidad en un simulador de conducción de coche, etc) las acciones que realice el usuario no serán las adecuadas.

Con todo esto, la hipótesis de que se parte es que, aun siendo imperfectas las claves de movimiento generadas por las plataformas de movimiento en los simuladores, sabiendo el objetivo y el uso concreto para el que se diseña el simulador, mediante la implementación de determinadas heurísticas que resalten los elementos que se consideren más importantes, es posible generar un movimiento útil, aunque no fidedigno.

Actualmente no existen alternativas para resolver este problema, por lo que la presente tesis doctoral lo analiza en

profundidad, evaluando diversas alternativas para solucionarlo y proponiendo, de manera novedosa, un sistema capaz de solucionar parte de esta problemática.

En base a los resultados de los experimentos realizados y a los análisis de los datos obtenidos, se puede confirmar que, gracias a la incorporación de heurísticas, se mejora la percepción que tienen los usuarios sobre lo que está ocurriendo en cada momento concreto en un simulador.

El documento comienza con una revisión del estado del arte de las tecnologías involucradas en todo lo referente a simulación, realidad virtual y realidad aumenta. Poco a poco esta revisión se focaliza en la generación de movimiento, las plataformas de movimiento, los diversos tipos de MCA que existen en la actualidad y algunas posibles soluciones que han puesto a prueba otros investigadores.

A continuación, se muestra un experimento en el que se pone en valor la importancia del sentido de movimiento en los simuladores formativos. Para ello se analiza un simulador de vuelco de coche basado en realidad virtual que tiene por objetivo la concienciación respecto al uso del cinturón de seguridad. Este sistema se ha utilizado para comprobar que el nivel de concienciación se ha incrementado notablemente gracias, precisamente, a la sensación de movimiento generada.

Seguidamente se muestra el experimento llevado a cabo con un sistema de simulación altamente inmersivo que cuenta con una plataforma de movimiento 3DOF capaz de soportar a 12 usuarios simultáneos, destinado a la concienciación en seguridad vial. Este sistema mezcla imágenes reales e imágenes generadas por ordenador (virtuales) por lo que la generación de claves de movimiento para la plataforma era extremadamente complicada. Se propone una solución novedosa para este tipo de sistemas visuales.

Vista la importancia de transmitir adecuadamente el movimiento a los usuarios de simuladores, se continúa identificado las aceleraciones que se pierden con una configuración estándar de MCA para un simulador de conducción de coche formativo que consta de una plataforma de movimiento 6DOF. Para ello se caracteriza, mediante un sistema de sensores, el movimiento de un coche real y se sincroniza con lo que ocurre en cada momento en la conducción. Estos datos se introducen en un MCA y se compara la entrada contra la salida para resaltar las pérdidas y a qué situaciones de conducción corresponden.

Por último y visto que las pérdidas producidas pueden ser muy relevantes en los simuladores formativos, se propone un método heurístico, modificando ligeramente la configuración clásica de un MCA, que puede garantizar que

ciertas señales que antes se perdían lleguen debidamente a los usuarios.

El trabajo aquí plasmado ha dado lugar a diversas publicaciones científicas, una licencia de propiedad intelectual en explotación y ha tenido un impacto social (transferencia tecnológica) de gran relevancia, como se muestra en el último capítulo.

Índice de Capítulos

Resumen	1
Índice de Capítulos	9
Índice de Figuras.....	15
Índice de tablas	21
Motivación	23
Objetivo	27
Estructura del documento.....	29
CAPÍTULO 1: Introducción y estado de la tecnología	31
1.1.- Realidad Virtual y Realidad Aumentada	31
1.2.- Sensación de presencia e inmersión	33
1.2.1.- La vista.....	34
1.2.2.- El oído.....	37
1.2.3.- El tacto	39
1.2.4.- El olfato	40
1.2.5.- El gusto	41
1.2.6.- Otros sentidos humanos	42
1.3.- Simulación	42
1.3.1.- La formación mediante la simulación	45
1.4.- El sentido del movimiento	49
1.5.- Plataformas de movimiento.....	57
1.5.1.- Plataformas 2 DOF	58

1.5.2.- Plataformas 3 DOF	60
1.5.3.- Plataformas 6 DOF	62
1.5.4.- Otras plataformas	62
1.6.- Funcionamiento conceptual de las plataformas de movimiento	64
1.7.- Los algoritmos de washout	71
1.7.1.- Algoritmo clásico.....	73
1.7.2.- Algoritmo adaptativo	75
1.7.3.- Algoritmo óptimo.....	76
1.7.4.- Algoritmo predictivo	77
1.6.5.- ¿Cómo saber cuál es el mejor filtro para un simulador?	78
1.8.- Heurísticas.....	81
1.9.- Problemática e hipótesis de partida	84
1.10.- Metodología de trabajo	88
CAPÍTULO 2: Simulador de vuelco	89
2.1.- Motivación y contexto	89
2.2.- Contexto actual.....	90
2.2.1.- Sobre el uso del cinturón de seguridad	90
2.2.2.- Gamificación, <i>serious games</i> y <i>edutainment</i>	92
2.2.3.- Simuladores de vuelco	93
2.3.- Descripción del aparato	94
2.3.1.- Sistema mecatrónico 1DOF.....	94
2.3.2.- Aplicación RV/RA para simulador de vuelco	98
2.3.3.- Comunicaciones y sincronización	101
2.4.- Descripción de las pruebas	102

2.5.- Resultados.....	106
2.6.- Conclusiones	108
2.7.- Meta-análisis de resultados	110
CAPÍTULO 3: Heurísticas híbridas de generación de movimiento .	113
3.1.- Contexto.....	113
3.2.- Planteamiento del problema a resolver	116
3.3.- Estado de la tecnología	118
3.3.1.- Soluciones previas para generar claves gravito-inerciales en imagen real.....	119
3.3.2.- Solución propuesta en el estudio.....	121
3.4.- Plataformas de 3DOF	122
3.4.1.- Principios constructivos de plataformas 3DOF	124
3.4.2.- Diseño alternativo de plataforma 3DOF	137
3.5.- Descripción del aparato del experimento.....	139
3.6.- Descripción de las pruebas	144
3.7.- Señales gravito-inerciales y características del pregrabado	149
3.8.- Desarrollo de un software de edición del movimiento basado en Wideband Delphi.....	152
3.9.- Desarrollo del experimento	158
3.10.- Resultados.....	163
3.11.- Conclusiones	168
3.12.- Implicaciones prácticas	171
CAPÍTULO 4: Caracterización de la pérdida de fidelidad	173
4.1.- Introducción y contexto	173
4.2.- Planteamiento del problema a resolver	174

4.3.- Recogida de datos	176
4.4.- Simulador de plataforma 6DOF	178
4.5.- Resultados	184
4.5.1.- Evento 1	187
4.5.2.- Evento 2	188
4.5.3.- Evento 3	189
4.6.- Discusión de los resultados	190
4.7.- Conclusiones	196
CAPÍTULO 5: Mejoras en la generación de claves gravito-inerciales basadas en heurísticas	199
5.1.- Introducción y contexto	199
5.2.- Planteamiento del problema a resolver	202
5.3.- Materiales y métodos	205
5.3.1.- Aparato	205
5.3.1.1.- Plataforma de movimiento	212
5.3.1.1.1.- Motores eléctricos	213
5.3.1.1.2.- Variadores de frecuencia	214
5.3.1.1.3.- Principales características	214
5.3.1.1.4.- Elementos mecánicos de la plataforma	217
5.3.1.2.- Software	218
5.3.3.- Heurísticas aplicadas	221
5.3.4.- Eventos heurísticos	223
5.3.5.- Método de las pruebas	225
5.4.- Participantes	230
5.5.- Medidas	234

5.6.- Procedimiento.....	235
5.7.- Resultados	238
5.7.1.- Análisis estadístico	238
5.7.1.1.- Muestras independientes	242
5.7.1.2.- Muestras emparejadas	245
5.7.1.3.- Análisis ANOVA	248
5.7.1.4.- Correlación estadística	251
5.7.1.5.- Muestras emparejadas contrabalanceadas	253
5.7.2.- Análisis numérico de datos registrados en tiempo real	255
5.8.- Conclusiones	258
CAPÍTULO 6: Conclusiones y trabajo futuro	263
6.1.- Conclusiones y aportaciones.....	263
6.2.- Implicaciones prácticas	267
6.3.- Trabajo futuro	268
6.4.- Publicaciones científicas	270
6.5.- Impacto social	271
Bibliografía	283

Índice de Figuras

Figura 1: Sensorama - Radio Televisión Española.....	44
Figura 2: estructura del órgano vestibular. Fuente: Ricardo Blanco Paz. Fisiólogo	51
Figura 3: plataforma de movimiento Stewart y explicación gráfica de DOFs	53
Figura 4: métodos alternativos de generación de movimiento. Izq (producto comercial) – Der (interior del Butt kicker). Fuente: www.simracer.es	54
Figura 5: plataforma de movimiento basada en cables. Fuente: Max Planck Institute for Biological Cybernetics (MPI), Fraunhofer IPA.....	56
Figura 6: ejemplo de manipulador serie. Fuente: [Sens19].....	57
Figura 7: ejemplo de plataforma 2 DOF. Fuente: www.ckas.com.au	59
Figura 8: plataforma 3DOF con muelle central.....	61
Figura 9: plataforma 3DOF con actuadores lineales.....	61
Figura 10: Simulador de Mercedes Benz. Fuente: Mercedes-Benz ...	64
Figura 11: flujo habitual de señales en las plataformas de movimiento	65
Figura 12: diagrama de flujo del algoritmo clásico	74
Figura 13: partes del hardware en que se divide la estructura principal del simulador de vuelco. Izquierda: estructura de soporte con el motor eléctrico. Centro: estructura giratoria sobre la que se coloca el coche real. Derecha: estructura auxiliar para facilitar el acceso al coche....	95

Figura 14: instantánea de la simulación vista desde la posición del conductor.	99
Figura 15: sistema antivuelco con el coche al revés (giro de 180°). 100	
Figura 16: arquitectura de comunicación.	101
Figura 17: dos simuladores de vuelco instalados dentro de la campaña de seguridad vial en Dammam, KSA.....	103
Figura 18: registro/mostrador de bienvenida (izquierda) y Tablet utilizada para rellenar los cuestionarios (derecha).	104
Figura 19: respuestas positivas anteriores y posteriores al cuestionario.....	108
Figura 20: cilindro exterior del cine inmersivo (denominado cine 5D por razones de marketing).	114
Figura 21: esquema clásico de flujo de datos para la generación de señales de movimiento en un simulador basado en el movimiento.	117
Figura 22: plataforma 3DOF con actuadores lineales (arriba) y rotacionales (abajo).....	123
Figura 23: geometría de la plataforma de 3DOF	125
Figura 24: explicación recorrido máximo del heave.	126
Figura 25: explicación recorrido heave en una plataforma 3DOF. ..	127
Figura 26: plataforma 3DOF con heave=0, pitch=0, roll=0.	128
Figura 27: plataforma 3DOF con heave=0, pitch=0, roll=-15.....	128
Figura 28: plataforma 3DOF con heave=0, pitch=0, roll=20.	129
Figura 29: plataforma 3DOF con heave=0, pitch=0, roll=0.	130

Figura 30: plataforma 3DOF con heave=0, pitch=30, roll=0.	131
Figura 31: plataforma 3DOF con heave=0, pitch=-20, roll=0.	131
Figura 33: explicación del comportamiento de un muelle elástico.	135
Figura 34: mecanismo de pretensado del muelle.	136
Figura 35: diseño de piezas para evitar el yaw en plataformas 3DOF sin eje central.	139
Figura 36: diseño y grados de libertad de la plataforma de movimiento T1R2 3-DOF.	141
Figura 37: colocación del motor y diseño de la base.	143
Figura 38: vista frontal del diseño de la plataforma de movimiento.	143
Figura 39: captura de pantalla de la imagen generada por el gráfico	146
Figura 40: captura de pantalla de un par estereoscópico real capturado con el dispositivo de grabación.	147
Figura 41: dispositivos de grabación instalados en un coche mientras se filma.	147
Figura 42: pantalla proyectada en una escena virtual de la película con una pregunta para los usuarios.	148
Figura 43: software de edición de movimiento - modificando el paso desde un archivo guardado.	154
Figura 44: software de edición de movimiento - creación de un nuevo archivo de movimiento.	154
Figura 45: método de ajuste basado Wideband Delphi.	158

Figura 46: usuarios en la plataforma de movimiento durante uno de los experimentos	160
Figura 47: resultados de la pregunta 9 (valoración global).	167
Figura 48: resultados de la pregunta de satisfacción.	167
Figura 49: esquema de las pruebas a realizar	175
Figura 50: instalación de sensor, cámara y laptop para recogida de muestras reales	177
Figura 51: datos recogidos por el sensor	178
Figura 52: esquema de funcionamiento del classical whasout	180
Figura 53: respuesta del software de simulación de plataforma ante entradas bien conocidas	182
Figura 54: línea de tiempo de eventos más destacables ocurridos en un trayecto en la recogida de datos.....	183
Figura 55a: resultados de entrada/salida en DOFs traslacionales...	185
Figura 55b: resultados de entrada/salida en DOFs rotacionales.....	186
Figura 56: detalle de Evento 1	188
Figura 57: detalle de Evento 2	189
Figura 58: detalle de Evento 3	190
Figura 59: esquema de washout propuesto con control heurístico de eventos.....	204
Figura 60: (izq) Exterior de la Gamezone del circuito de Montmeló. (der) Sébastien Buemi tras testar el simulador.....	206
Figura 61: distribución de simuladores en instalación ECI	207
Figura 62: proceso de calibrado de pantallas y resultado final	208

Figura 63: descripción gráfica de FOV y situación de altavoces en simulador.....	209
Figura 64: pedales y volante integrados en el simulador de conducción	210
Figura 65: (arriba) diseño de simulador de conducción. (abajo) simulador real construido	211
Figura 66: motores utilizados en plataforma 6DOF de simulador de conducción	215
Figura 67: despiece de simulador de conducción.....	217
Figura 68: detalles constructivos de plataforma 6DOF del simulador de conducción	218
Figura 69: software desarrollado parra el registro de sensaciones mediante joystick	220
Figura 70: ejemplo de fragmento del fichero almacenado	221
Figura 71: representación esquemática del classical washout con introducción de heurísticas.....	222
Figura 72: momento en que una de las ruedas del vehículo simulado pasa por encima de un piano.	224
Figura 73: sentido de movimiento de joystick para la grabación de feedback en tiempo real	226
Figura 74: edad de los usuarios participantes en el estudio.....	231
Figura 75: años de experiencia en conducción de los usuarios participantes en el estudio.....	232
Figura 76: profesión de los usuarios participantes en el estudio	233

Figura 77: uno de los participantes en el estudio con el joystick para registro de datos en tiempo real.....	236
Figura 78: uno de los participantes rellenado una encuesta.....	237
Figura 79: registro de sensaciones vestibulares registradas por usuarios en tiempo real durante el experimento	257
Figura 80: nuevos Roll Over Simulators desarrollados recientemente por el IRTIC. (arriba) diseño. (abajo) sistema real construido.....	273
Figura 81: artículo “House of knowledge”	274
Figura 82: artículo RV en Arabia Saudí.....	275
Figura 83: artículo “Alta tecnología UV para Aramco”	276
Figura 84: artículo “House of knowledge” + Ing. Multimedia	277
Figura 85: artículo RV para Arabia Saudí	278
Figura 86: artículo “Simulador F1”	279
Figura 87: artículo “Gamezone”	280
Figura 88: artículo “Simulador ECI”	281

Índice de tablas

Tabla 1: comparativa entre filtros de washout. Fuente: Sartori et al., en 2016.....	79
Tabla 2: cuestionarios previos (izquierda) y posteriores (derecha) relacionados con el uso del cinturón de seguridad.....	105
Tabla 3: Resultados de los cuestionarios	106
Tabla 4: resultados de campañas de concienciación sobre el uso del cinturón de seguridad publicados en revista científicas.	111
Tabla 5: principales características de la plataforma de movimiento 3DOF.....	142
Tabla 6: cuestionario utilizado en los experimentos.	161
Tabla 7: preguntas relevantes en la encuesta de salida	163
Tabla 8: resultados de las pruebas estadísticas aplicadas a los conjuntos de datos de longitud 36.....	166
Tabla 9: especificaciones de plataforma de movimiento 6DOF del simulador de conducción	212
Tabla 10: especificaciones de motores de plataforma de movimiento 6DOF del simulador de conducción	213
Tabla 12: especificaciones de variadores de frecuencia de plataforma de movimiento 6DOF del simulador de conducción.....	214
Tabla 13: cuestiones realizadas a los usuarios (Witmer)	229
Tabla 14: cuestiones realizadas a los usuarios (SSQ).....	229

Tabla 15: resultados de t-test para muestras independientes agrupados por factores de Witmer	243
Tabla 16: resultados de t-test para muestras independientes SSQ.	243
Tabla 17: resultados de t-test para muestras emparejadas (grupo A)	247
Tabla 18: resultados de t-test para muestras emparejadas (grupo B)	247
Tabla 19: tabla de correlación de factores Witmar para pruebas “sin heurísticas”	251
Tabla 20: tabla de correlación de factores Witmer para pruebas “con heurísticas”	252
Tabla 21: tabla de medias de muestras emparejadas contrabalanceadas de todos los participantes en el estudio.....	254

Motivación

La evolución que está teniendo el mundo audiovisual en los últimos años puede ser comparable, en cierta manera, a la revolución industrial que comenzó en 1760 y que cambió por completo el día a día de la sociedad. Los principales factores que están influyendo en esta rápida evolución son el abaratamiento de los dispositivos hardware y el amplio acceso a internet, hoy en día desplegado a nivel global.

De entre las muchas áreas que están sufriendo cambios sustanciales destaca la de los gráficos por computador, que han pasado de meras interfaces basadas en texto plano visualizadas en un monitor de tubo de rayos catódicos a entornos virtuales donde se puede interactuar en tiempo real con cualquier persona del mundo mediante gestos, voz o vídeo en los conocidos como metaversos.

Esta evolución también se está manifestando en los simuladores, basados históricamente en entornos de Realidad Virtual y más recientemente sumando los entornos de Realidad Aumentada. Los simuladores, cuyo objetivo es extraer al usuario de la realidad e

introducirlo en un nuevo contexto, ya sea para el aprendizaje o para la diversión, además de la parte gráfica, cuentan con muchos otros estímulos que se trasladan al usuario. Sonido, movimiento, tacto u olor, son solo algunos ejemplos de estímulos que hoy en día se pueden utilizar en el ámbito de la simulación.

De entre todos ellos, en el año 2008, el IRTIC de la Universidad de Valencia comenzó una nueva línea de investigación basada en plataformas de movimiento para simuladores con el Dr. Marcos Fernández como investigador principal y con el Dr. Sergio Casas y el autor como investigadores participantes. En el año 2011 el autor escribió su trabajo de fin de máster basado en resultados obtenidos en esta línea. En el año 2014, estas investigaciones derivaron en la tesis doctoral de Sergio Casas. Desde entonces, el autor continuó en la línea hasta la fecha de redacción de la presente tesis.

Esta línea, además de la parte de diseño y construcción de cada una de las muy distintas plataformas desarrolladas, tiene un reto común que radica en ser capaces de intentar reproducir aceleraciones, de un vehículo que no tiene limitación, mediante un sistema de actuadores que sí está limitado en el espacio. Para

resolver este reto existen los algoritmos de generación de claves de movimiento o MCA, por sus siglas en inglés, que reciben como inputs aceleraciones y velocidades angulares del modelo físico simulado y generan como outputs las posiciones en que debe situarse en cada momento la plataforma de movimiento para generar estímulos gravito-inerciales a los usuarios, pero estos outputs no siempre son capaces de trasladar al usuario el estímulo deseado.

Durante los últimos años, muchos grupos de investigación alrededor del mundo han hecho propuestas sobre cómo lograr que los usuarios de estas plataformas obtengan el estímulo adecuado en cada momento y a este reto se sumó el autor de la presente tesis.

Objetivo

El objetivo principal de esta tesis doctoral es demostrar que, mediante el uso de ciertas heurísticas, se puede mejorar la percepción de movimiento de los usuarios en simuladores, basados en realidad virtual y/o realidad aumentada, gracias a la introducción de estímulos mediante el sistema vestibular.

El autor hipotetiza que, mediante el uso de heurísticas, es posible mejorar el movimiento de las plataformas utilizadas en simuladores de manera que, aun no siendo fidedigno, sí puede proporcionar al usuario los estímulos necesarios para el objeto del simulador.

Para cumplir el objetivo, se comienza analizando, de manera subjetiva mediante el uso de encuestas, un simulador de vuelco de coche que consta de un único grado de libertad y cuyo objetivo es la concienciación en el uso del cinturón de seguridad.

En segundo lugar, se demuestra, nuevamente mediante el uso de encuestas, la mejora producida en un sistema híbrido, en el que la simulación se basa, por una parte, en información obtenida tiempo real y, por otra parte, en información pregrabada. Esto se consigue gracias a la

introducción de un novedoso método heurístico de generación de claves gravito-inerciales.

A continuación, se caracteriza la pérdida de fidelidad en la reproducción de movimiento de los simuladores ejemplarizando con el análisis de un coche donde se comparan los movimientos producidos en trayectos reales con los movimientos generados por una plataforma de movimiento 6DOF.

Por último, se incluyen ciertas heurísticas de generación de claves gravito-inerciales en un simulador *full mission* que consta de plataforma de movimiento 6DOF y se realiza una comparación con y sin estas heurísticas.

Estructura del documento

La presente tesis doctoral se organiza de siguiente forma:

En primer lugar, se contextualizará el uso de los simuladores de realidad virtual y aumentada, los estímulos que se presentan a sus usuarios y se focalizará en las claves gravito-inerciales, explicando los problemas actuales. Se hará una revisión del estado del arte de la literatura referente a estímulos en simuladores, generación de claves gravito-inerciales y todo lo referente a plataformas de movimiento.

Se continuará, en los capítulos 2 y 3, exponiendo dos casos de uso de simuladores, los estímulos generados y cómo lograr mejorarlos, haciendo énfasis en la presentación de un sistema híbrido para generación de claves gravito-inerciales cuando se tiene información en tiempo real junto a otra pregrabada.

El capítulo 4 pondrá de manifiesto la relevancia de perder ciertos estímulos inerciales en función del uso al que se destine el simulador. Se expondrá el trabajo realizado con la caracterización de los movimientos de un coche real y las pérdidas en movimiento que ocasionan los MCA, y más concretamente, los filtros de washout.

En el capítulo 5 se explicará las heurísticas propuestas para conseguir que el usuario no pierda ciertos estímulos

inerciales que se consideran importantes para el uso de un determinado simulador.

Por último, en el capítulo 6 se enumeran las conclusiones obtenidas y los resultados avalados por la comunidad científica que se han generado. Se concluirá trazando las líneas de trabajo futuro.

CAPÍTULO 1: Introducción y estado de la tecnología

El presente capítulo introducirá la problemática que se intenta resolver con la presente tesis doctoral, explicando los diferentes conceptos que envuelven la generación de estímulos en los simuladores y centrándose en las plataformas de movimiento y las claves gravito-inerciales. En cada una de las áreas implicadas, se describirá su evolución y estado actual.

1.1.- Realidad Virtual y Realidad Aumentada

Ambos conceptos, realidad virtual y realidad aumentada, tienen varias cosas en común. Una de ellas es que se basan en técnicas de gráficos por computador para generar objetos y/o entornos plenamente realistas con el objetivo de hacer creer al usuario que está viendo algo que físicamente no existe. En la realidad virtual, lo que ve el usuario, suele ser un entorno completamente digital, mientras que la realidad aumentada permite al usuario visualizar el mundo real, a la vez que integra ciertos elementos digitales que aportan información al entorno.

La realidad virtual, apareció mucho antes que la aumentada. El concepto se acuñó sobre los años 80 por Jaron Lanier, junto con el de realidad artificial. El objetivo de esta tecnología es lograr que el usuario se abstraiga por completo del mundo que le rodea y crea que está dentro del mundo digital que se está generando mediante gráficos por computador. La evolución del hardware de procesamiento gráfico y su abaratamiento, junto con la creación de entornos de desarrollo muy intuitivos, ha logrado que sea una tecnología cada vez más extendida y prácticamente al alcance de cualquier persona en los países desarrollados.

Por su parte, la realidad aumentada, tiene el objetivo de ampliar al usuario la información que está percibiendo del mundo real que le rodea. Esto se logra mediante el uso de dispositivos con pantallas semitranslucidas o mediante el uso de cámaras que capten el mundo que rodea al usuario. Sea cual sea la opción, se generarán elementos virtuales, referenciados en la pantalla respecto a las coordenadas de los elementos reales, que se mezclarán en una única imagen que es la que percibirá el usuario.

En ambas tecnologías, la calidad gráfica que se puede conseguir hoy en día es capaz de hacer dudar a los usuarios sobre si lo que se está visualizando es una imagen grabada del mundo real o si, por el contrario, se trata de imágenes sintéticas completamente generadas por ordenador. En gran

parte, el lograr este objetivo dependerá del nivel de inmersión de los usuarios sobre lo que se está visualizando. Esta inmersión depende de muchos otros factores además de las imágenes generadas, o lo que es lo mismo, además de los estímulos visuales.

1.2.- Sensación de presencia e inmersión

Según la comunidad científica, la sensación de presencia en el ámbito tecnológico se define como “un estado de conciencia en el que el usuario se involucra en la tarea que está desarrollando sin percibir la tecnología que se lo permite” [1] [2] [3] [4].

Este concepto está directamente relacionado con el de nivel de inmersión, que según la bibliografía es “la impresión subjetiva de un usuario de estar participando en una experiencia completa y realista en un contexto alternativo al que se encuentra realmente y durante un tiempo prolongado” [5]. Según [6] [7] [8], el nivel de inmersión de los usuarios en cualquier entorno generado por ordenador está directamente relacionado con su sensación de presencia respecto de lo que se considera la realidad que lo rodea. Lograr altos niveles de abstracción de la realidad, y, por tanto, inmersión en el entorno generado, pasa por hacer creer al usuario que se encuentra en otro entorno, momento,

lugar y haciendo algo diferente de lo que está haciendo en la realidad sin ser consciente de los aparatos tecnológicos que esté usando para ello.

Para conseguir este objetivo se debe llegar al cerebro del usuario de la única forma posible, mediante el uso de los sentidos. El cuerpo humano dispone (históricamente hablando [9]) de cinco sentidos: el tacto, la vista, el oído, el olfato y el gusto. Históricamente la vista y el oído han sido los dos sentidos más explotados para lograrlo, pero los avances tecnológicos han posibilitado el desarrollo de nuevos aparatos que han permitido llegar a todos ellos.

Los siguientes apartados describen la tecnología actual para cada uno de ellos.

1.2.1.- La vista

El órgano del cuerpo que sirve de entrada para este sentido es el ojo. Su funcionamiento (muy simplificado) consiste en captar la luz que recibe del exterior y convertirla en señales eléctricas que se transmiten al cerebro para su interpretación.

En el ámbito de la computación este sentido se alimenta mediante monitores y/o proyectores. Los monitores pueden estar situados a una cierta distancia del usuario o, por el contrario, muy próximos a los ojos mediante los conocidos

como *Head Mounted Displays* (HMD). Por el contrario, los proyectores suelen necesitar una cierta distancia de tiro y una superficie que reciba la luz emitida. Se han creado aparatos para proyectar directamente sobre la retina, pero su uso es extremadamente limitado y se trata básicamente de proyectos científicos actualmente en desarrollo.

Los avances tecnológicos y la capacidad de hacer componentes cada vez más pequeños y con mayor capacidad de procesamiento han conseguido alcanzar un nivel de calidad de imagen muy elevado. Un concepto clave para esto es el tamaño con que el usuario percibe cada porción de imagen generada y la profundidad de color de cada porción. A estas porciones se les denomina píxeles.

El tamaño de los píxeles ha ido disminuyendo conforme a los avances tecnológicos, pero a su vez, para cubrir un determinado tamaño de pantalla, la cantidad de píxeles que había que generar era cada vez mayor. Inicialmente los ordenadores se comunicaban a través de la vista mediante pequeñas luces que se encendían o apagaban para mostrar ciertos resultados, pero con la evolución llegaron los monitores CRT y los proyectores DLP. Los monitores evolucionaron hasta lo que ahora se conocen como pantallas LCD o plasma. Por su lado, los proyectores actualmente utilizan tecnología láser en lugar de lámparas.

Tanto los sistemas de visualización como el hardware para calcular las imágenes que hay que generar, es decir, las tarjetas gráficas, van evolucionando en paralelo y actualmente se cuenta con sistemas que fácilmente alcanzan resoluciones de hasta 7680x4800 píxeles, con una profundidad de color de 32 bits.

Cuando en lugar de ver imágenes estáticas se quiere ver imágenes cambiantes (vídeo o gráficos en tiempo real), otro aspecto importante es la velocidad de refresco o frecuencia con que se modifica la imagen que se está visualizando. Actualmente los sistemas alcanzan velocidades de 120Hz, lo que se considera el doble de lo que es capaz de captar el ojo humano [10].

Esta tasa de refresco de imagen abre la puerta a poder cubrir otro factor de vital importancia en cuanto al sentido de la visión y es el poder estimar la profundidad a la que se encuentran los objetos. El hecho de tener 2 ojos separados unos centímetros uno de otro hace que la luz que capta cada uno de ellos sea muy parecida, pero con pequeñas diferencias dado que cada uno tiene un punto de vista distinto del entorno. El cerebro es capaz de interpretar esta diferencia para lograr estimar la distancia a la que se encuentra cada objeto. Esto es lo que se conoce como sensación de profundidad.

En los gráficos por computador esta sensación se intenta conseguir mediante el uso de sistemas estereoscópicos. De entre los diferentes existentes, destaca el conocido como *frame sequential*, que consiste en aprovechar la alta tasa de refresco que proporcionan los sistemas gráficos para mostrar cada frame la imagen correspondiente a uno de los ojos y, gracias a unas gafas sincronizadas por frame que opacan o transparentan cada ojo, el usuario de un sistema percibe imágenes diferentes en cada ojo, que es precisamente lo que ocurre en la realidad, logrando así sensación de profundidad.

1.2.2.- El oído

El oído es el órgano a través del cual una persona es capaz de escuchar los sonidos que ocurren en su entorno. Su funcionamiento básico consiste en que la oreja, con forma de embudo, recoge las ondas sonoras del ambiente y las traslada hasta el tímpano, membrana capaz de convertir estas ondas en impulsos eléctricos que se trasladan al cerebro para ser interpretados.

Los humanos tenemos dos oídos, lo que nos permite tener audición binaural. Igual que con los ojos se perciben imágenes distintas con cada uno, con los oídos, gracias a la separación y orientación entre ellos, se perciben sonidos

distintos. Esto permite mejorar la calidad del sonido percibida y, sobre todo, permite ubicar en el espacio las fuentes generadoras del mismo.

En el ámbito de la computación el sonido se proporciona al usuario mediante altavoces, amplificadores y tarjetas de sonido. El sonido generado por las tarjetas pasa al amplificador, el cual le proporciona suficiente amplitud como para poder mover la membrana de los altavoces, los cuales producen ondas sonoras que llegan hasta los oídos del usuario.

Inicialmente los sistemas de sonido generado por computadores eran mono, es decir, para una fuente de sonido se generaba un único canal de audio que se trasladaba a tantos altavoces como hubiera. Posteriormente se desarrollaron los sistemas estéreo, mediante los cuales una misma fuente de sonido generaba dos canales de audio, generalmente uno para cada oído. Con el avance de la capacidad de cómputo se ha aumentado el número de canales de audio que genera una misma fuente, estableciéndose actualmente en 9, con los sistemas que se conocen como sonido envolvente.

En estos sistemas el usuario se encuentra rodeado por altavoces y cada uno de ellos es capaz de generar un sonido distinto para lograr que cada oído escuche lo que corresponde en base a lo que esté ocurriendo en una

película, juego o simulación. Existen también sistemas basados únicamente en 2 altavoces que son capaces de interpretar distintos canales de audio para lograr transferir al usuario un sonido envolvente. Estos últimos son los utilizados por los dispositivos HMD.

1.2.3.- El tacto

Este sentido es el que permite a los seres humanos percibir cualidades como la dureza de los objetos, las diferentes texturas, la temperatura o la presión. Se basa en receptores nerviosos que están distribuidos por todo el cuerpo humano. Principalmente se encuentran en la piel, ya que es la capa más externa del cuerpo y nos permite percibir lo que ocurre en el exterior. Pero también los hay dentro del organismo y permiten percibir parte de lo que ocurre en el interior del cuerpo.

En el ámbito de la computación, este sentido no está tan desarrollado como los anteriores. Existe diversa tecnología que permite transmitir al usuario retroalimentación de fuerza sobre lo que está ocurriendo en un entorno virtual. Estos sistemas se conocen como dispositivos hápticos y se basan en una serie de micromotores que reproducen fuerza cuando lo indica el ordenador en función de lo que ocurre en el mundo virtual. De este tipo existen guantes, que

proporcionan sensación a los dedos, dispositivos para la mano completa y exoesqueletos.

Lo habitual cuando se mezclan los conceptos de simulación y sensación táctil es, dentro de las posibilidades económicas, intentar reproducir lo más fielmente posible el entorno o los objetos utilizados en el mundo virtual. Si por ejemplo se trata de un juego de batalla, el usuario puede interactuar con la escena virtual mediante un arma sensorizada. Si se trata de un simulador de avión, se puede sensorizar una cabina de avión real y que ésta sea el medio de interacción con la simulación. De esta manera, gran parte de la sensación táctil la proporciona el propio medio de interacción.

1.2.4.- El olfato

Este sentido está directamente relacionado con la nariz y, más concretamente, con el epitelio olfativo, un tejido constituido por células que se encuentra en la profundidad de las fosas nasales. Este tejido es el encargado de captar las pequeñas partículas aromáticas y odoríferas que se encuentran en el aire y transmiten la información al cerebro, el cual la interpreta y relaciona con vivencias anteriores en las que haya notado la misma información; por ejemplo, cuando se huele a rueda quemada.

En lo referente a la estimulación de este sentido desde un ordenador, existen aparatos que tienen precargados una serie de olores, de manera que cuando se quiere transmitir uno de ellos, como en [11], se libera una pequeña cantidad de concentrado de esa fragancia y se distribuye gracias a un ventilador para que pueda acabar dentro de las fosas nasales de los usuarios.

1.2.5.- El gusto

Existe amplia discusión entre los anatomistas [12] sobre cuántos son los receptores que contiene la lengua del ser humano. Hasta la fecha, hay consenso en que son al menos cinco (dulce, salado, amargo, ácido y umami). Cuando se introduce un alimento, cada uno de ellos envía una serie de señales a regiones diferentes del cerebro, el cual las interpreta y relaciona con el sabor en base a la información ya conocida de ocasiones anteriores de algún alimento.

En cuanto a su aplicación en el ámbito de la computación para introducir estímulos a un usuario a través de este sentido hay muy poco desarrollado. Recientemente, en 2022 [13], desarrollaron un dispositivo capaz de imitar sabores. Este dispositivo cuenta con 5 tubos, cada uno de ellos cargado con uno de los sabores capaces de ser identificados por la lengua humana y, liberando una cantidad determinada

de cada uno de ellos, logra que el sabor resultante sea el solicitado.

1.2.6.- Otros sentidos humanos

Derivados de los sentidos anteriores, los anatomistas [14] establecen la existencia de 4 sentidos más. 3 de ellos están directamente relacionados con el sentido del tacto:

- Nocicepción: también conocido como sentido del dolor.
- Propiocepción: conocimiento del propio cuerpo y sus partes.
- Termorrecepción: percepción del calor.

Por último, derivado del sentido del oído, el sentido sobre el que versa el grueso de este documento es el sentido del equilibrio. Se hablará extensamente de ello más adelante.

1.3.- Simulación

Entendemos como simulación al proceso mediante el cual se intentan recrear situaciones de la vida real, en base al modelado matemático, físico y gráfico, en un programa de ordenador. En muchas ocasiones las simulaciones se desarrollan para llevar a cabo estudios sobre algún

fenómeno. En el caso que nos centra, se entenderá por simulación aquella que se desarrolla para recrear situaciones en las que un usuario participa de manera activa y cuyo objetivo es la formación en algún ámbito concreto de la vida real. El concepto de simulación va plenamente ligado con el de inmersión y, por lo tanto, con el de realidad virtual y/o aumentada.

El desarrollo de un simulador formativo es un proceso muy costoso. Cuando se lleva a cabo suele ser para recrear situaciones muy arriesgadas para el usuario o porque, por motivos económicos, realizar formaciones similares en la vida real sería mucho más costoso que hacerlo en un simulador.

Los primeros simuladores fueron desarrollados por el ejército de los Estados Unidos en la década de 1940 con el objetivo de entrenar a sus pilotos de avión. Inicialmente no contaban con ordenadores ni pantallas. Se trataba de cabinas que recreaban los aviones en los que luego los pilotos realizarían vuelos reales [15]. Algunos más avanzados tenían sistemas de motores que reproducían movimientos similares a los que tenía un avión en vuelo. Era, por tanto, un proceso de familiarización entre el usuario y el vehículo en que se estaba entrenando.

En los años 50, Morton Heiling presentó al mundo Sensorama, que puede apreciarse en la Figura 1. Se trata de

una cabina de simulación que contaba altavoces y pantallas estereoscópicas [16] [17], una silla con vibración y hasta generadores de olores. Durante los años 60, Heiling volvió a sorprender con la presentación de un visor estereoscópico pero esta vez incorporado en la cabeza. Fue el primer aparato desarrollado con lo que hoy en día conocemos como “Head Mounted Display” o HMD.



Figura 1: *Sensorama - Radio Televisión Española*

En los años 80, con la revolución de la microelectrónica comenzaron a desarrollarse simuladores que tenían una base de gráficos por computador que permitía a los usuarios interactuar y hacerse una idea de lo que estaban haciendo en cada momento. Dada la altísima inversión económica que implicaba estos desarrollos, únicamente las Administraciones eran capaces de acometerlos. Fue nuevamente el ejército de Estados Unidos, junto diversas universidades, los que encabezaron estos desarrollos. Por su parte, la Administración nacional de Aeronáutica y el

Espacio (NASA, por sus siglas en inglés) desarrolló dispositivos HMD [17] a través de los que entrenaban a los astronautas.

En aquellos momentos los desarrolladores buscaban, igual que ahora, conseguir la máxima inmersión posible para los usuarios, pero la tecnología tenía un alcance bastante más limitado que hoy en día. Los estímulos que se proporcionaban a los usuarios se basaban en el sentido visual, el sentido del oído y el sentido del movimiento (se explica extensamente en secciones posteriores).

1.3.1.- La formación mediante la simulación

Hace varias décadas que los simuladores basados en gráficos por computador están en nuestro día a día. Los primeros simuladores que se crearon fueron simuladores de avión, desarrollados por el ejército de EE.UU. Desde aquel entonces todas las tecnologías involucradas en los simuladores (gráficos, audio, proyección, movimiento, volantes, sensorización, etc) han evolucionado de una manera extraordinaria. Fue en los años 60 y 70 cuando, con la llegada de ordenadores digitales aparecieron los simuladores conocidos como *full mission* [18], que además de recrear un escenario virtual, simulaban las aceleraciones que se producían.

Con el abaratamiento de los costes, comenzaron a surgir simuladores de todo tipo de vehículos: vuelo [19], barco [20] [21], coche [22] [23], camión [24] [25], submarino [26] [27], etc. En la actualidad, los simuladores tienen dos grandes usos: entretenimiento y formación. El nexo común en ambos usos es que el diseñador del simulador intenta siempre lograr el máximo nivel de reproducción de la realidad para el usuario y para conseguirlo, debe introducir estímulos por cuantos más sentidos mejor: vista, sonido, equilibrio, olfato, tacto, etc.

La mayoría de los simuladores se basan en aplicaciones de RV, que utilizan información visual y acústica para generar una sensación de inmersión en sus usuarios. Aunque está ampliamente aceptado que la mayor parte de la información perceptiva que recibe el cerebro humano llega a través de estos dos sentidos [28], también es cierto que, para lograr una experiencia virtual completa y altamente inmersiva, es necesario incluir en el sistema otras señales perceptivas.

Una de las evoluciones que ha tenido lugar en los últimos años respecto a los usos de la RV ha sido su aplicación a lo que se conoce como “*edutainment*”. Existen muchas definiciones de edutainment, pero una de las más aceptadas es la aportada por Corona en varios de sus trabajos [29] [30], donde lo define como “la combinación de educación y entretenimiento en un proceso de aprendizaje”. Makarius [31]

afirma en su trabajo que "el proceso de educar de forma entretenida se ha facilitado enormemente para los educadores gracias a las nuevas tecnologías". Buckingham y Scanlon [32] afirman que "el edutainment se basa en atraer y mantener la atención de los alumnos mediante el uso de pantallas o animaciones para que el aprendizaje sea divertido". De hecho, se ha demostrado [33] que gracias al uso de estas nuevas tecnologías, que suelen incluir diversos estímulos como imágenes, sonidos o vídeos, los alumnos son más propensos a prestar atención a los contenidos y acaban transfiriéndolos de la memoria a corto plazo a la de largo plazo, quedando así más afianzados en sus conocimientos.

Son muchos los educadores, en diversas áreas, que apuestan cada vez más por el uso del edutainment para la transferencia de conocimientos. Ma y Oikonomou publicaron un libro [34] del que se extrae la gran proximidad entre el edutainment y los llamados *serious games*. Como ejemplo del aumento del uso de estos sistemas de formación, Dejaouti [35] especifica el número de *serious games* desarrollados desde los años 80 hasta 2009, mostrando que los últimos 3 años multiplicaron por 4 el ritmo de los anteriores. Además, especifica los sectores a los que están enfocados, destacando principalmente la educación general, la publicidad, la salud y las acciones gubernamentales o políticas.

Aksakal [36] y Simon [37] incluyen en sus trabajos el concepto de utilizar el edutainment para la concienciación. En este sentido, los juegos serios, la gamificación y el edutainment, se han utilizado históricamente para concienciar sobre buenas prácticas medioambientales, salud nutricional, etc. [38].

Centrándose en el uso de los juegos serios, la gamificación y el edutainment para concienciar sobre las buenas prácticas de conducción, Riaz [39] realizó un estudio para evaluar el aprendizaje basado en el e-learning gamificado para mejorar la seguridad vial en los alumnos de primaria. En él concluyen, al igual que Klawe [40], que las estrategias basadas en la gamificación son muy positivas para la motivación en el aprendizaje. Vera [41] desarrolló un juego serio basado en un sistema híbrido con Realidad Virtual y Realidad Aumentada, con el objetivo de concienciar sobre la seguridad vial, concluyendo que el juego serio era una herramienta eficaz para aumentar la concienciación sobre la seguridad al volante, especialmente para los más jóvenes. Esto es una muy buena noticia para el futuro.

1.4.- El sentido del movimiento

El movimiento ha sido, históricamente hablando, uno de los sentidos que antes se empezó a introducir en los simuladores [42]. Proporcionar una sensación de movimiento muy básica es relativamente sencillo, ya que únicamente con ciertos elementos mecánicos y un motor que los accione, es posible mover la cabina donde se esté produciendo una simulación.

Que los usuarios alcancen niveles de percepción de movimiento acorde a lo que se produce en la simulación, es decir, que perciban sensaciones similares a las que tendrían en la vida real llevando a cabo cierta acción, es lo que es realmente complejo. Hay que tener en cuenta que, además de toda la parte mecánica que se requiere, es imprescindible su control correcto y preciso.

El movimiento no es calificado por los anatomistas como un sentido más del cuerpo humano. El más relacionado es el sentido extendido conocido como “sentido vestibular”. Pero varios estudios [43] [44] han concluido que el aparato vestibular no es el único que proporciona al ser humano la sensación de movimiento. El cuerpo humano recibe sensación de movimiento mediante tres tipos distintos de “sensores”: los propioceptores, las claves visuales y el sistema vestibular. Se explican a continuación:

- Los propioceptores son receptores localizados en los músculos, los tendones, las articulaciones y el oído interno, que envían señales al cerebro sobre la posición del cuerpo o la presión que se está recibiendo en determinadas zonas. Cuando un ser humano está sentado, nota que tiene las posaderas con cierta presión, las piernas dobladas, etc. De igual manera, si circulando con un coche se produce una aceleración en el sentido de la marcha, los propioceptores avisarán a cerebro de que ha aumentado la presión en los músculos de la espalda contra el respaldo del coche.
- Las claves visuales llegan a los seres humanos a través del sentido de la vista. Los ojos son la fuente de entrada de datos más importante que tiene el cerebro [45]. De manera similar al funcionamiento de un ratón óptico, el cerebro es capaz de interpretar si se está produciendo movimiento o no. Es decir, se compara la imagen anterior con la actual y se determina si estamos quietos (la imagen es la misma) o, en caso de haber variado, en qué dirección y sentido lo ha hecho. Esto se conoce como flujo óptico.
Como ejemplo conocido se puede poner el caso en el que alguien está parado en un semáforo con la vista fija en un camión enorme que tiene parado a su derecha. Si no existe otra referencia más que la del

camión, cuando éste se ponga en marcha, aunque nosotros sigamos parados, el cerebro interpretará que nos estamos moviendo.

- El sistema vestibular, cuya composición puede apreciarse en la Figura 2, es el llamado sistema del equilibrio. Se encuentra dentro del oído interno y se compone de tres canales semicirculares, o tubos, dispuestos en ángulo recto entre sí. Cada canal está lleno de un líquido que está en constante contacto con una fina capa de cabello. Cuando el cuerpo sufre algún tipo de movimiento, este líquido se mueve variando así la posición de los cabellos. Esa posición es la que llega al cerebro, que es el encargado de interpretar qué movimiento se acaba de producir. Cada uno de los canales se encarga de detectar el movimiento en cada uno de los planos del sistema cartesiano.

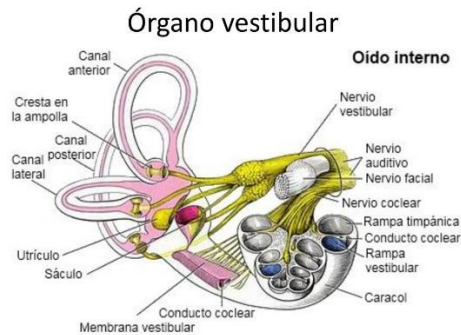


Figura 2: estructura del órgano vestibular. Fuente: Ricardo Blanco Paz, Fisiólogo

A través de cada uno de estos sistemas el cuerpo humano es capaz de percibir las aceleraciones que se producen en cualquiera de los Grados de Libertad (en adelante DOF – *Degree of freedom*) existentes, que son 6. Existen 3 DOF traslacionales y 3 rotacionales. En la Figura 3 se pueden observar junto con el nombre que recibe cada uno de ellos.

El tener muchas fuentes de información para percibir el movimiento es algo realmente extraordinario en el ser humano, pero en lo referente al ámbito de la simulación esto puede ser un hándicap muy importante [46].

La información recogida por cada una de las fuentes acaba llegando al cerebro, que es el encargado de interpretarla y de ser consciente de lo que está ocurriendo en cuanto a movimiento se refiere.

En la vida real toda esta información llega al cerebro de una manera sincronizada, pero en el mundo de la simulación esto no siempre es así y tiene una repercusión directa, en función de lo sensible que sea cada usuario, en la sensación de mareo que se puede sufrir.

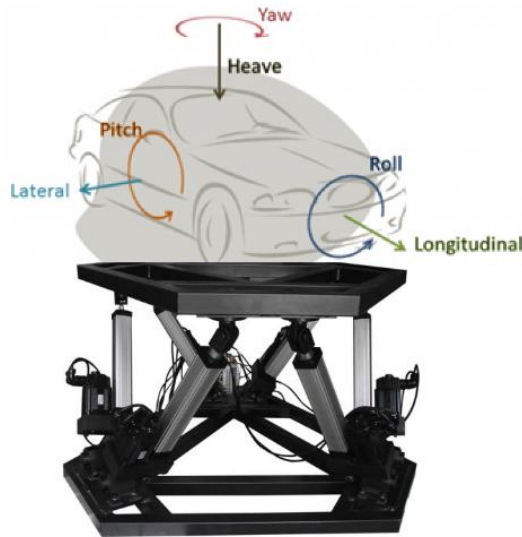


Figura 3: plataforma de movimiento Stewart y explicación gráfica de DOFs

Un caso habitual de este hándicap es cuando se desarrollan simuladores y, generalmente por motivos económicos, se obvia la incorporación de sistemas generadores de movimiento. Esto tendrá una repercusión directa sobre los propioceptores y el sistema vestibular. Es decir, las claves visuales trasladarán información respecto a un determinado movimiento, mientras que el sistema vestibular y los propioceptores trasladarán que no se está produciendo ningún movimiento. Además de repercutir en la posible sensación de mareo esto menguará significativamente la sensación de inmersión en la simulación [47], lo que a su vez repercutirá en la calidad de los aprendizajes [48].

Por lo tanto, parece obvio que lo adecuado para poder desarrollar un buen simulador pasa, entre otras muchas cosas, por incorporar algún sistema que genere sensaciones de movimiento y que éste esté debidamente sincronizado con lo que el usuario está percibiendo a través del resto de sentidos.

Por lo general, el movimiento se transmite a los usuarios a través de los sistemas conocidos como plataformas de movimiento (se verá extensamente en el siguiente apartado), pero existen sistemas alternativos, como el que se puede observar en la Figura 4, conocido como Buttkicker [49] y que están disponibles en el mercado por unos 300€.



Figura 4: métodos alternativos de generación de movimiento.
Izq (producto comercial) – Der (interior del Buttkicker). Fuente:
www.simracer.es

Se trata de un sistema que no requiere de ningún tipo de software adicional para su funcionamiento. Se basa en imanes y membranas de altavoces para generar una vibración

que se transmite al usuario a través del asiento del simulador.

Este sistema recibe como entrada el audio que se está generando en la simulación y, mediante un sistema de filtros básicos que incorpora, amplifica una señal que se transmite a los altavoces para que vibren y lo transmitan por contacto hasta el asiento. Está especialmente diseñado para transmitir al usuario la vibración de los motores en simuladores de vehículos.

Varias universidades [50] [51] también han desarrollado sistemas de movimiento que, en lugar de estar anclados al suelo, como ocurre generalmente con las plataformas de movimiento, se basan en sistemas de cables y poleas, de manera que el usuario se sitúa encima de una base móvil que está suspendida en el aire.

Estos sistemas son menos utilizados que las plataformas de movimiento por su coste y por la gran cantidad de espacio que requieren. Un ejemplo puede observarse en la Figura 5.

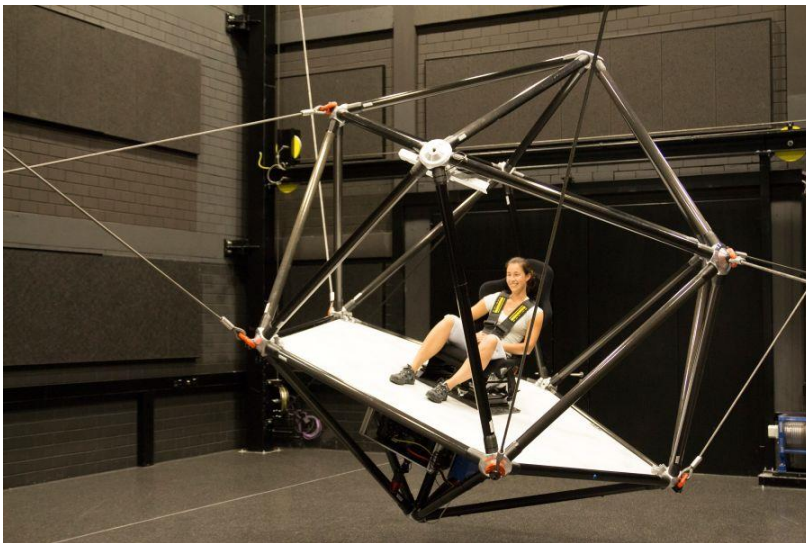


Figura 5: *plataforma de movimiento basada en cables.*
*Fuente: Max Planck Institute for Biological Cybernetics (MPI),
Fraunhofer IPA*

También a modo de investigación, y rara vez utilizados en simuladores comerciales, se pueden encontrar las plataformas de movimiento basadas en manipuladores en serie. Es lo que comúnmente se conoce como “brazo robótico” y puede observarse en la Figura 6. En estos casos, la cabina donde se sitúa el usuario está en un extremo del manipulador, mientras el otro está anclado al suelo. Dado que no existe un número definido de actuadores que se puedan situar en serie uno detrás de otro, no hay un número máximo de DOFs. Por ejemplo, Katliar desarrolló [52] uno con 8DOF, los 6 existentes y 2 de ellos, repetidos, generados de diversas maneras para aumentar los rangos.

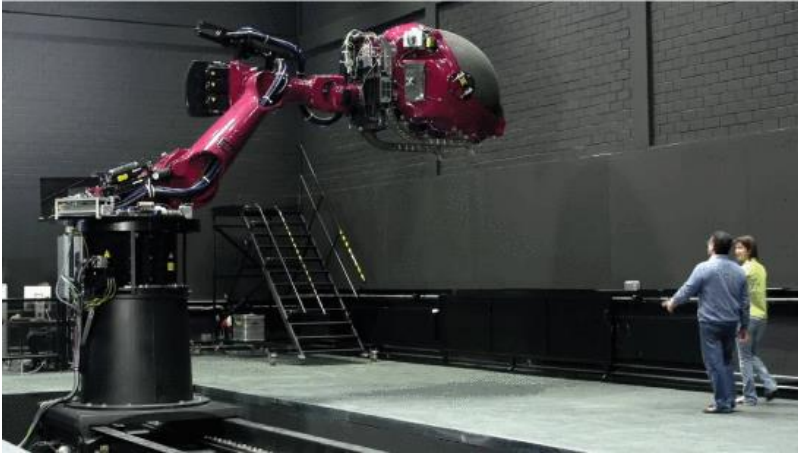


Figura 6: ejemplo de manipulador serie. Fuente: [Sens19]

1.5.- Plataformas de movimiento

Las plataformas de movimiento llevan varias décadas implantándose en simuladores de todo tipo [53] y son fuente de una gran cantidad de publicaciones. Se trata de manipuladores paralelos basados en una serie de actuadores, dispuestos en configuraciones muy determinadas, cuyo movimiento sincronizado es capaz de desplazar la base sobre la que se encuentra el usuario de un simulador.

Gracias a las plataformas, los simuladores logran, en primer lugar, ser más realistas y obtener mayor nivel de inmersión, ya que es posible reproducir aceleraciones similares a las que sentiría un usuario que estuviera conduciendo realmente el

vehículo de la simulación [54] [55]; y, en segundo lugar y con una correcta configuración del sistema, reduce una posible descoordinación de los sentidos y minimiza que esto se traduzca en mareo o sensación de náuseas [56].

Las plataformas de movimiento habitualmente son de 2, 3 (bajo coste [57] [58] [59] [60] [61]) o 6 grados de libertad (DOF), aunque existen prototipos de plataformas con otros DOFs [62] [63] [64]. Los sistemas de 1DOF son extremadamente raros y sólo se utilizan para situaciones muy específicas. Uno de los tipos de plataforma más utilizados de 6 DOFs son las conocidas como plataformas Stewart [65]. Se han hecho modelos evolucionados de estas plataformas [66], pero la más extendida sigue siendo la original de Stewart. El principal motivo de construir plataformas que no sean de 6 grados de libertad es el coste, ya que cuantos más grados de libertad más actuadores y controladores son necesarios.

1.5.1.- Plataformas 2 DOF

Las plataformas de dos grados de libertad son las más simples de las fabricadas actualmente. Los dos grados de libertad que se suelen implementar en este tipo de plataformas son el pitch y el roll (ver Figura 3). Se implementan estos dos grados por sencillez de construcción y porque únicamente requieren dos actuadores para poder obtenerlos, lo que abarata enormemente el coste. En la Figura 7 se puede observar un ejemplo de plataforma de 2

grados de libertad, concretamente, pitch y roll, o lo que es lo mismo, rotaciones sobre el eje X y el eje Y respectivamente.



Figura 7: *ejemplo de plataforma 2 DOF. Fuente: www.ckas.com.au*

Como puede observarse, la plataforma (igual que el resto de las que se explicarán) consta de una base sobre la que descansan los actuadores y una parte móvil. Sobre la parte móvil es sobre la que se producirán los movimientos deseados. En el caso de esta plataforma, se puede observar que también consta de un pilar central. Como se verá en capítulos posteriores, este pilar tiene el objetivo de marcar los ejes de giro, es decir, los ejes X e Y del sistema cartesiano, a la vez que alivia gran parte del peso del sistema que se sitúa encima.

Este tipo de plataformas suelen realizarse con actuadores eléctricos y, más concretamente, con motorreductores de corriente alterna.

1.5.2.- Plataformas 3 DOF

Como su propio nombre indica, este tipo de plataformas se caracterizan por tener 3 grados de libertad. Estas plataformas también se suelen conocer como 2R1T o 2 rotacionales y 1 traslacional. Los tres grados que se suelen implementar en estas plataformas son el pitch, el roll y el heave. La novedad de esta plataforma es el heave, que consiste en una traslación sobre el eje Z.

Al igual que la plataforma de 2DOF, puede construirse utilizando actuadores lineales o actuadores circulares. La Figura 8 muestra un ejemplo de 3 DOF. En esta plataforma pueden observarse varios elementos nuevos respecto a la 2DOF. Por un lado, se puede observar que, en lugar de utilizar 2 actuadores, necesita 3.

Respecto a su construcción, las hay con y sin pilar central. Las que lo incorporan lo hacen, en primer lugar, para evitar el yaw (rotación sobre el eje Z) que tiende a producirse al mover cualquier motor y, en segundo lugar, para evitar parte del peso a los motores. Este pilar central debe ser retráctil para poder permitir el heave, pero a su vez tener algo que

evite el yaw, por lo que suelen utilizarse ejes estriados. Para evitar cargar de peso a los motores se suele incorporar un muelle central que absorba parte de la carga.



Figura 8: *plataforma 3DOF con muelle central*

Las que no lo incorporan (el pilar central) tienen un diseño constructivo más sencillo, pero requieren de motores más potentes y de alguna unión en cada motor que evite el yaw en la plataforma móvil. La Figura 9 muestra un ejemplo de este tipo de plataformas.

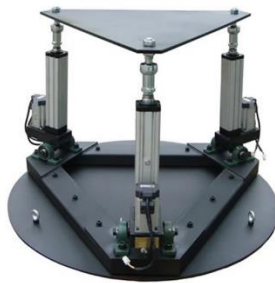


Figura 9: *plataforma 3DOF con actuadores lineales*

1.5.3.- Plataformas 6 DOF

Estas plataformas son coloquialmente conocidas como plataformas Stewart debido a su creador, que en el año 65 publicó “*Un mecanismo con 6 grados de libertad controlado por cualquier combinación de 6 motores anclados en el suelo*” [65]. Tienen 6 actuadores y permiten reproducir aceleraciones rotacionales y traslacionales en los 3 ejes.

Son las plataformas que habitualmente se incorporan en los simuladores de alta gama, donde se intenta fidelizar al máximo los movimientos que se producen.

Como es lógico, son las más caras de todas y no existe posibilidad, hoy en día, de habilitar ningún elemento que absorba parte de la carga para poder reducir la potencia necesaria en los motores.

Constructivamente las hay con motores rotacionales y con actuadores lineales, ya sea hidráulicos/neumáticos o basados en servomotor actuando sobre un tornillo sin fin.

La Figura 3 muestra una configuración clásica de plataforma 6DOF.

1.5.4.- Otras plataformas

A partir de los modelos anteriores, la literatura muestra decenas de ejemplos de plataformas híbridas en las que se combinan actuadores para conseguir añadir DOFs sin llegar

a la de 6, o incluso para mejorar la de 6. Gran parte de estas combinaciones se llevan a cabo como meros estudios y no llegan a aplicarse a simuladores.

Lo más habitual, dado que únicamente requiere de un actuador más, no necesita mayor espacio y los mecanismos son sencillos, suele ser añadir el yaw a plataformas de 2 o 3 DOF. Esto se consigue situando la plataforma completa encima de una base giratoria actuada por un motor. Además, dado que el peso lo soporta por completo el rodamiento que se instale o incluso un sistema de ruedas, el motor a instalar no requiere demasiada potencia, por lo que suelen ser soluciones bastante económicas. Si por ejemplo se está haciendo un simulador de sobreviraje y no se dispone de demasiados recursos económicos, esta puede ser una solución de consenso.

En la otra cara de la moneda están los simuladores de muy alta gama, en los que a plataformas de movimiento tienen unas prestaciones muy elevadas, pero se quieren seguir mejorando.

Es el caso de desarrollos como el llevado a cabo por Mercedes-Benz donde a una plataforma de movimiento 6DOF, con una cabina de proyección embarcada y con un coche real sensorizado en su interior, se le ha añadido unos carriles motorizados para poder disponer de un rango muy

amplio de surge (traslación sobre el eje X). La Figura 10 muestra este simulador.

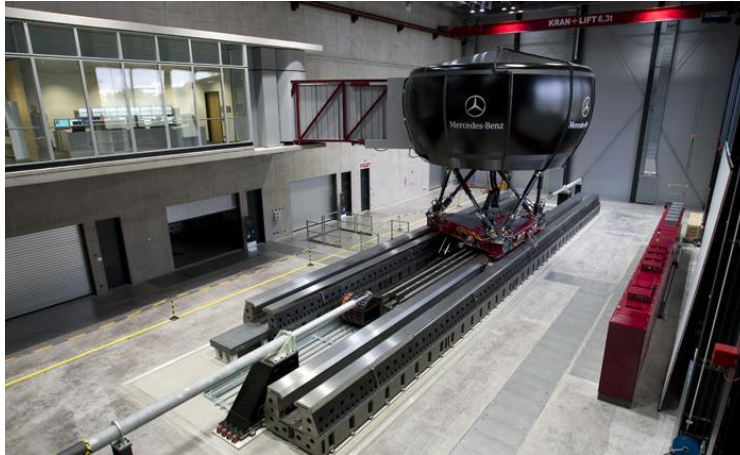


Figura 10: *Simulador de Mercedes Benz. Fuente: Mercedes-Benz*

1.6.- Funcionamiento conceptual de las plataformas de movimiento

Como se ha explicado, las plataformas de movimiento son el aparato más utilizado en los simuladores para transferir claves de movimiento a los usuarios. Se han explicado los distintos tipos que existen, teniendo como elemento común que todas constan de una serie de actuadores, lineales o rotacionales, cuyo movimiento desplaza al usuario a determinadas posiciones. Pero claro, ¿cómo se calculan las posiciones a las que debe desplazarse cada actuador en cada

momento para lograr transferir al usuario las aceleraciones que corresponden en función de lo que esté ocurriendo con la simulación?

Esta pregunta ha sido fuente de muchos estudios en los últimos años y existe amplia literatura sobre posibles respuestas, pero todavía no se ha logrado llegar a un consenso sobre cuál es la mejor manera. La mayoría de las plataformas de movimiento, actualmente, funcionan tal y como se muestra en la Figura 11.

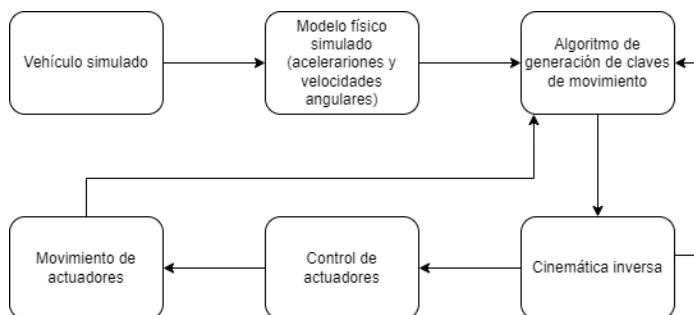


Figura 11: *flujo habitual de señales en las plataformas de movimiento*

En ella puede apreciarse que el origen de los movimientos procede de lo que esté ocurriendo en la simulación y, más concretamente, de cómo se esté comportando físicamente el vehículo que se está simulando. Gracias a la gran potencia de cálculo de las CPUs y GPUs de que se dispone hoy en día, la calidad del comportamiento de los modelos físicos

suele ser muy alta y fiel a la realidad. Concretamente, del vehículo simulado se espera extraer aceleraciones longitudinales y velocidades angulares en los 3 ejes. Estos datos son enviados a los algoritmos de generación de claves de movimiento o *Motion Cueing Algorithm* (MCA). El primer MCA se diseñó para los simuladores de vuelo, y el diseño de Stewart-Gough [67] ha sido la solución preferida para este tipo de aplicaciones desde que se añadieron señales de movimiento a las aplicaciones de RV.

En cuanto a los algoritmos de movimiento, los primeros estudios sobre la generación de señales de movimiento en aplicaciones de RV fueron publicados por Schmidt y Conrad a finales de los años 60 y principios de los 70 [68] [69] [70] como parte de su trabajo en la NASA. Sin embargo, la investigación más acreditada es la realizada por los investigadores del Instituto de Estudios Aeroespaciales de la Universidad de Toronto (UTIAS) [71] [72] [73] que estudiaron en detalle el llamado *algoritmo clásico*, un tipo de MCA. Este algoritmo se ha utilizado en innumerables aplicaciones con diferentes plataformas de movimiento y objetivos [58] [74] [75] [76].

No obstante, se han propuesto otras soluciones para mejorar algunos de los inconvenientes de este algoritmo. Parrish et al. propusieron una versión modificada del algoritmo clásico [77] que se conoce como *algoritmo adaptativo*. Este algoritmo

trata de explotar el espacio de trabajo de la plataforma de movimiento de una manera más eficiente, ya que los parámetros del algoritmo clásico tienen que establecerse para, en el peor de los casos, garantizar que no se alcancen los límites del dispositivo de movimiento. Unos años más tarde, se propuso el *algoritmo óptimo* en un intento de obtener un algoritmo de generación de movimiento que pueda considerarse óptimo con respecto a la teoría de control [78] [79]. Esta solución incluye un modelo de percepción humana, pero su optimidad es discutida ya que sólo es óptima para el modelo de percepción y las condiciones hipotéticas establecidas en la derivación matemática del algoritmo.

Recientemente, Dagdelen et al. han propuesto un MCA basado en el control predictivo basado en modelos [80]. Este enfoque ha recibido mucha atención últimamente [81] [82] [83] [84] ya que los algoritmos clásico, adaptativo y óptimo se han utilizado durante más de treinta años, sin que ninguno de ellos haya demostrado ser considerablemente superior a los demás. De hecho, el algoritmo clásico sigue siendo el más utilizado porque es simple, eficaz y relativamente fácil de implementar, aunque es limitado.

Actualmente los algoritmos de generación de claves de movimiento y sus configuraciones son una de las grandes fuentes de discusión entre los investigadores de la materia. En la mayoría de los casos, para implementar estos

algoritmos se utilizan los conocidos como algoritmos de washout. Estos algoritmos se encargan de, en función de la posición de la plataforma y las aceleraciones recibidas del modelo físico, estimar en qué nueva posición debe situarse la plataforma para lograr trasladar al usuario la aceleración deseada. La salida de estos algoritmos es la orientación y posición (en aquellas plataformas que permitan movimientos longitudinales) de la base móvil de la plataforma sobre la que está el usuario.

Estos datos llegan al módulo de cinemática inversa que es el encargado de inferir, en base a la posición deseada en la base móvil, hasta qué posición debe trasladarse cada uno de los actuadores. Por ejemplo, si en una plataforma 6DOF deseamos (0.001m, 0.003m, 0.005m, 8.323°, 2.433°, 0.003°) siendo (sway, surge, heave, pitch, roll, yaw), podríamos obtener como salida en caso de usar actuadores rotacionales (182.23°, 89.52°, 192.32°, 4.87°, 243.65°, 332.49°) correspondiendo a los grados en que debe posicionarse el eje de cada actuador (del 1 al 6).

El módulo de control de actuadores es el encargado de generar los comandos de comunicación necesarios para enviarlos a los controladores de cada actuador, que generalmente son variadores de frecuencia, los cuales implementan el lazo cerrado para el posicionamiento. Finalmente, los actuadores se mueven trasladando la

plataforma móvil hasta la posición deseada. Por último, tanto las posiciones solicitadas por la cinemática inversa como las posiciones reales en las que se encuentran los motores en cada momento se envían al MCA para calcular el siguiente movimiento.

Como es de esperar, si este proceso se realiza a baja frecuencia, el resultado obtenido en la plataforma móvil y, por tanto, el trasladado al usuario, no será el deseado, ya que, para llegar de una posición a otra, la mayor parte del tiempo se estaría en posiciones (y para llegar a ellas se producirían aceleraciones) no deseadas. Según [10] es necesario funcionar a un mínimo de 60Hz para que los movimientos percibidos sean los adecuados.

Todos estos algoritmos se aplican en tiempo real utilizando el estado físico de la entidad cuyo movimiento hay que simular. Sin embargo, también pueden aplicarse con entradas que no son de tiempo real. Este puede ser el caso de las montañas rusas, algunos simuladores de trenes o aplicaciones de RV, como los dispositivos hápticos [85] que no utilizan la simulación de la física en tiempo real, pero tienen la posibilidad de calcular el estado de movimiento de la entidad simulada y, por tanto, aplicar un MCA como si estuvieran funcionando en tiempo real. En este caso, el movimiento de salida podría estudiarse y refinarse para adaptarse a las necesidades del usuario, lo que representa

una importante ventaja en comparación con los sistemas que obtienen la entrada del estado físico en tiempo real.

Uno de los problemas de los MCA es que carecen de un mecanismo estándar para compararlos y evaluarlos. Por lo tanto, es difícil afirmar que un algoritmo es el mejor. Dado que el problema es subjetivo, la evaluación más común se basa en cuestionarios con diferentes grupos de pilotos/conductores. Sin embargo, recientemente se ha despertado el interés por valorar la generación de movimientos mediante métodos de evaluación objetivos [85] [86], pero aún queda mucho trabajo por hacer para obtener un sistema de evaluación objetiva estandarizado.

Pese a lo complejo que puede parecer el sistema completo, la mayor parte de los módulos aquí esbozados están muy testados y probados, habiendo pocas variaciones en ellos de un simulador a otro, al margen obviamente de la configuración según cada plataforma. Sin duda, la parte más compleja y que sigue generando cientos de estudios es el módulo de generación de claves de movimiento y su configuración. El cómo ajustar de forma óptima estos algoritmos para que su rendimiento sea el mejor posible es crucial porque estos algoritmos suelen tener una gran cantidad de parámetros que modifican el comportamiento de la plataforma de movimiento. Estos parámetros se utilizan para alcanzar un equilibrio adecuado entre la fidelidad del

movimiento y el cumplimiento de los límites físicos de la plataforma de movimiento. Lamentablemente, el uso de métodos de evaluación subjetivos ha hecho que el ajuste de estos algoritmos sea menos estudiado, ya que el procedimiento no suele ser sistemático. Uno de los primeros y escasos estudios sobre este tema fue el realizado por Grant [87] que propuso un sistema experto para ayudar a afinar los algoritmos de washout [88]. Grant optó por no utilizar métodos de evaluación objetiva, a pesar de que permiten evaluar el rendimiento de la MCA de forma más sistemática [89]. Sin embargo, la dificultad de obtener una función objetiva adecuada para medir la idoneidad de la generación de movimiento hace que sean difíciles de aplicar en algunas situaciones.

Dado que la implementación más habitual de MCA es aquella basada en algoritmos de washout, y más concretamente en el algoritmo clásico (también conocido como *classical washout*), esta Tesis y todos los experimentos que se irán explicando en ella, se basan en este sistema.

1.7.- Los algoritmos de washout

Como se ha comentado, los llamados algoritmos de washout son el tipo de MCA más utilizados en la industria de la simulación. Se comenzaron a desarrollar a finales de los

años 60 para la industria aeroespacial y posteriormente se aplicaron a simulación de todo tipo de vehículos. Según [90] los algoritmos de washout siempre se han basado en las siguientes máximas:

- Maximizar la generación de movimiento en la plataforma en base a lo que ocurre en la simulación,
- La máxima limitación proviene de la velocidad de desplazamiento de los actuadores y los límites de sus carreras.
- Es imposible reproducir los movimientos generados por el simulador uno a uno, de manera que hay que filtrarlos y escalarlos.
- Se debe llegar a un compromiso entre lo que se pierde y lo que se reproduce. Cuando se arregla un aspecto, generalmente, se perjudica otro.

En base a estas máximas, desde sus inicios, han surgido diversos métodos para implementar algoritmos de generación de claves de movimiento y la literatura los clasifica en 4 bloques:

- Algoritmo clásico [91]
- Algoritmo adaptativo [77] [92] [93] [94]
- Algoritmo óptimo [95]
- Algoritmo predictivo [96]

Los siguientes apartados describen los elementos comunes de los algoritmos de cada uno de estos bloques.

1.7.1.- Algoritmo clásico

Estos algoritmos fueron publicados por primera vez por Schmidt y Conrad en 1970 [97] y no fue hasta 16 años después, en 1986, cuando se produjo la siguiente evolución del algoritmo, esa vez de la mano de Reid&Nahon [72], que volvieron a cambiarlo y mejorarlo en 1990 [75].

En su versión más utilizada, este algoritmo se basa en una serie de filtros lineales, sumadores y de escalados. Las entradas del algoritmo son la fuerza específica (aceleración sufrida sin contar el vector gravedad) y la velocidad angular en cada DOF del vehículo simulado. Como salida del algoritmo se obtiene, para cada delta de tiempo, la posición en la que debe encontrarse la plataforma de movimiento para, en el intervalo de movimiento entre un delta y otro, producir al usuario la sensación que tendría si viajase dentro del vehículo que se está simulando.

Como puede observarse en la Figura 12, el algoritmo está dividido en 3 canales. El superior es el canal traslacional, encargado de las aceleraciones lineales. El inferior es el canal rotacional, encargado de las aceleraciones rotacionales. En el medio, conocido como canal de coordinación (*tilt coordination*), se encuentra el encargado de

generar pitch y roll en la plataforma para lograr recrear en el usuario las aceleraciones de baja frecuencia que se están produciendo en el vehículo simulado.

Este canal central, utiliza el concepto de ilusión somatográvica, que se basa en que el usuario percibe una cierta aceleración (por ejemplo cuando un avión despegue y hay una aceleración hacia delante muy prolongada en el tiempo), que es falsa, gracias a variar la dirección con la que el usuario percibe la gravedad sin que se percate de esto.

La Figura 12 muestra de manera descriptiva el esquema de funcionamiento del algoritmo. En ella se han incluido entre paréntesis la nomenclatura utilizada de manera general en la literatura para referirse a cada una de las partes del algoritmo.

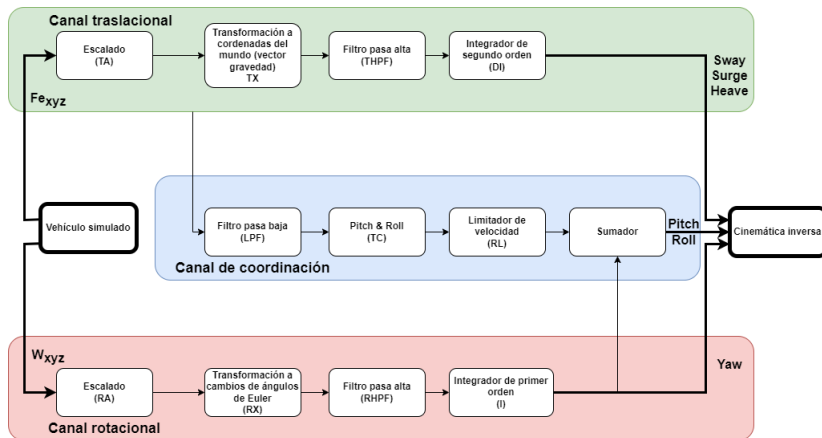


Figura 12: diagrama de flujo del algoritmo clásico

Este algoritmo tiene dos grandes ventajas. Por un lado, es computacionalmente simple, lo que hace que pueda funcionar a una alta frecuencia. Por otro lado, es relativamente sencillo de configurar por gente experta en la materia. Sin embargo, tiene la gran desventaja de que no explota todas las capacidades perceptivas del cuerpo humano en cuanto a su sistema vestibular.

1.7.2.- Algoritmo adaptativo

Las primeras versiones de estos algoritmos fueron presentadas por [77]. La diferencia más significativa respecto a la implementación clásica es que estos varían las ganancias de los filtros con el objetivo de minimizar el coste de una función que penaliza el error (velocidades y aceleraciones de modelo físico simulado VS plataforma) y la magnitud de movimientos.

Existen implementaciones de este tipo de algoritmos que permiten hacer adaptativos muchos otros parámetros de los filtros, pero hay que recordar que, a mayor número de parámetros, mayor será la complejidad para realizar el ajuste, tanto en base al dispositivo físico de plataforma como al simulador del que se trate.

Gracias a esta implementación, según [81], se reducen los errores en falsos movimiento, se obtienen movimientos más

realistas en las zonas cercanas a la posición de reposo de la plataforma y se permite introducir modelos vestibulares. Como contrapartida, computacionalmente estos algoritmos son más costosos que los clásicos.

El ajuste de estos filtros se realiza variando pesos y ganancias, pero inicialmente hay que configurar todos los filtros de manera similar al algoritmo clásico. Esto supone que un usuario no experto, únicamente modificando los pesos, podría ser capaz de hacer un ajuste del sistema, pero para profundizar más en el ajuste se requeriría de un usuario experto que cambiase las características de los filtros.

1.7.3.- Algoritmo óptimo

Este algoritmo tiene como objetivo reducir el error perceptivo entre lo que la plataforma genera y lo que el usuario siente. Fue propuesto por [79] en 1982 e implementado por [75] en el 90. La clave de su funcionamiento radica en un regulador lineal cuadrático (LQR por sus siglas en inglés) que minimiza una función de coste que tiene en cuenta la diferencia perceptiva teórica del usuario gracias a la introducción de modelos vestibulares.

Además, tanto en las rotaciones como en los movimientos longitudinales, minimiza los desplazamientos, estando siempre más cerca de la posición de reposo, lo que conlleva

que en caso de necesitar generar una aceleración grande dispondrá de más carrera en cada DOF.

Por otro lado, [75] observaron que el límite de inclinación del canal de coordinación (el utilizado para ilusión somatográfica), no se incluye en este tipo de filtros, lo cual redundaba en un efecto negativo para el usuario. Además, los parámetros que definen el filtro son fijos, similares a los del algoritmo clásico, lo que hace que su ajuste únicamente pueda ser ejecutado por expertos en la materia y que, además, tenga que configurarse para sobrellevar la peor de las posibles situaciones que se pudiesen dar.

A. Mohamadi [83] propuso en 2016 un algoritmo óptimo basado en LQR que se implementaba utilizando algoritmos genéticos. Esto solucionaba gran parte de las deficiencias de la implementación habitual de estos algoritmos y a su vez mantenía las ventajas, principalmente la de minimizar los desplazamientos respecto a la zona de reposo.

1.7.4.- Algoritmo predictivo

Ante los problemas de las anteriores implementaciones de los filtros de washout, cuyo mayor problema radica en intentar disponer siempre de los rangos de movimiento completos en todos los DOF, varios investigadores intentaron “adelantarse” a lo que iba a ocurrir en la

simulación y en base a ello, preparar la posición de la plataforma para disponer del recorrido necesario. En esta línea, Su-Chiun Wang [98] presenta en 2004 un trabajo donde introducía en una implementación clásica del algoritmo un bloque “predictivo” que, teniendo en cuenta la trayectoria del vehículo simulado, su física y el entorno, intuía cuales iban a ser los próximos movimientos requeridos para la plataforma, intentando situarla para maximizar los recorridos sin que el usuario lo percibiese.

No fue hasta 2009 cuando Dagdelen [96] propuso la primera implementación de filtros de washout predictivos. Este algoritmo, que se considera el primero publicado de este tipo, a diferencia de los óptimos, sí tiene en cuenta los límites máximos de movimiento de cada DOF de la plataforma y a su vez, minimiza la función de error de percepción del usuario y elimina la necesidad de configurarla para la peor de las situaciones. Desde entonces se han desarrollado innumerables trabajos en este línea, entre los cuales destacan [99], [100], [101] y [102] en los últimos años.

1.6.5.- ¿Cómo saber cuál es el mejor filtro para un simulador?

La Tabla 1 muestra una comparativa sobre las diversas implementaciones aquí comentadas teniendo en cuenta los 4 factores que se analizan.

Tipo de filtro de washout / Valor analizado	Tiempo bajo de computación	Fácil de ajustar por usuarios no expertos	Consideración de los errores perceptivos	Calidad equivalente en todo el espacio de trabajo
Clásico	V	X	X	X
Adaptativo	X	V	X	V
Óptimo	X	V	V	V
Óptimo robusto	X	V	V	V
Predictivo	X	V	V	V

Tabla 1: comparativa entre filtros de washout. Fuente: Sartori et al., en 2016

Ninguno de ellos parece ser el perfecto para usar en un simulador, ya que ninguno cumple con todas las características evaluadas, sin embargo, a priori, parece ser que los tres últimos sí serían mejores que los primeros. Pese a ello, y debido a la inercia de las grandes compañías de simulación, a día de hoy la implementación más utilizada sigue siendo la clásica.

En cualquier caso, saber si un washout es mejor que otro no es tan simple como mirar la tabla comparativa, ya que cada una de las implementaciones tiene infinitas configuraciones y, en función de la plataforma de movimiento utilizada (sistema hardware) y del uso que se le dé al simulador (formación, entretenimiento, concienciación sobre aspectos concretos, etc), una configuración será mejor que otra.

Según Casas [103], si se opta por una evaluación objetiva, ésta puede realizarse de dos maneras:

- Medición directa: esta evaluación consiste en introducir señales bien conocidas al filtro de washout y observar cómo se desplaza la plataforma físicamente. Sergio Casas realizó un estudio [104] de estas características para definir como influyen los DOF solicitados al espacio de trabajo de la plataforma.

Estos estudios pueden realizarse de dos maneras. La primera y más económica es mediante el uso de sensores basados en acelerómetros y giróscopos, capaces de recoger aceleraciones y velocidades angulares en todos los DOF. La segunda manera, que habitualmente es más precisa, pasa por el uso de sistemas de tracking de altas prestaciones (precisión y frecuencia) y la instalación de un tracker en la base móvil de la plataforma.

- Medición indirecta: se trata de medir aspectos en los que interviene el usuario. Ejemplos de estas mediciones podemos observarlas en [105] [106], donde con un mismo sistema hardware y diversas configuraciones de filtros evaluaban la correcta trazada de las curvas en un simulador de coche.

Por otra parte, la evaluación subjetiva, se basa en preguntas a los usuarios. Estas preguntas pueden ir destinadas a aspectos concretos de la simulación, con el objetivo de modificar ciertos parámetros del filtro o, por el contrario, basarse en valoraciones globales. Hay ejemplos en [107] [108] [109] [110] y las llevadas a cabo por el autor en los trabajos que se explican en los siguientes capítulos.

1.8.- Heurísticas

Se conoce como heurística a una serie de métodos que, en base a la experiencia previa o a la creatividad, aplicados a ciertos problemas concretos, generan soluciones no estandarizadas para resolverlos. Inconscientemente, cada uno de nosotros, aplicamos heurísticas en nuestro día a día de manera constante para resolver (o mejorar) las acciones cotidianas.

Gerd Gigerenzer [111] estudió el uso de las heurísticas en el pensamiento en base a la certidumbre de un resultado ante un problema. Concretamente plateaba dos cuestiones. En una situación de riesgo en la que se conocen las diversas alternativas y el resultado de cada una de ellas en base a la probabilidad, el pensamiento humano funciona de manera matemática, sin embargo, cuando la misma situación es de incertidumbre y no se conocen las consecuencias de las

acciones, Gigerenzer afirma que comienza a surgir el pensamiento heurístico, es decir, aquel que se basa en nuevos métodos basados en la experiencia previa de cada usuario.

En este punto surge el concepto de meta-heurística. Mientras que las heurísticas están pensadas para la resolución de un problema concreto, las meta-heurísticas, según la mayor parte de bibliografía al respecto, plantean un método que, aplicado a una serie de problemas, plantea soluciones a cualquiera de ellos. Se podría expresar como la localización de un patrón mediante el cual se puede resolver una amplia gama de problemas. Por su parte, D.F Jones [112] define las meta-heurísticas como las soluciones que se proponen para problemas en los que existe una amplia gama de criterios a ser satisfechos y el conseguir cualquiera de ellos entra en conflicto con los demás. Éstas, se clasifican en “métodos de frontera eficiente” [113], “programación por objetivos” [114] [115] [116] y “programación por compromiso” [117] [118].

Como es de esperar, los métodos heurísticos/meta-heurísticos, se plantean en todos los ámbitos de la sociedad. En el ámbito industrial [119] [120] [121] [122], en las áreas de recursos humanos [123] [124], medicina [125] [126] [127] [128], monitoreo de agua [129] [130] [131], en ingeniería [132] [133]

[134], electrónica [135] [136], gestión de empresas [137] [138] [139].

En este último ámbito destaca el trabajo sobre la asignación óptima de activos de Harry Markowitz, Premio Nobel de Economía, donde planteaba la duda sobre qué hacer con el dinero ahorrado, si invertirlo para lograr obtener más o por el contrario guardarlo para la jubilación. Markowitz demostró que existe una cartera óptima que maximiza la rentabilidad y minimiza el riesgo. Sin embargo, para sus propias inversiones de jubilación, no usó su técnica de optimización ganadora de premios, sino que se basó en una simple heurística, la regla $1/N$, que establece: "Asigne su dinero por igual a cada uno de los N fondos". Otros estudiosos en la materia tacharon esta forma de invertir como "simple y básica", sin embargo, [140] comparó resultados de 12 políticas consideradas óptimas para invertir activos, concluyendo que ninguna de ellas supera la heurística $1/N$ de Markowitz.

En lo referente a simulación y más concretamente a generación de movimiento para simuladores, el uso de heurísticas no es algo demasiado extendido. El hecho de introducirse en el núcleo de los MCA y realizar cambios significativos suele generar temor a "romper más que arreglar". Sin embargo, en los últimos años han surgido varias investigaciones [141] [142] al respecto, siendo la más

interesante [143], donde se analiza, mediante la comparativa de 4 modelos diferentes, la introducción de heurísticas en la generación de movimiento en simuladores para reducir la sensación de mareo.

1.9.- Problemática e hipótesis de partida

Las plataformas de movimiento tienen un gran problema para poder reproducir aceleraciones y es que, como es lógico, tienen los movimientos limitados a ciertos rangos. En función del diseño constructivo cada DOF dispondrá de mayor o menor rango. Proporcionar mayores rangos suele redundar en necesitar actuadores más potentes y esto en el mayor coste económico del sistema. Aun así, incluso teniendo fondos económicos ilimitados, sería imposible diseñar una plataforma de movimiento que siempre pueda alcanzar la posición requerida para ejecutar determinada aceleración proveniente del módulo físico del simulador.

Esto ocurre porque, como muy acertadamente dijo Stewart en el título de su estudio: “... *por cualquier combinación de 6 motores anclados en el suelo*”. Es decir, si los motores están anclados, cuando se quiere realizar diversas aceleraciones consecutivas longitudinales en X (supongamos que hacia delante), constructivamente habrá un momento en que no se podrá acelerar más en ese eje ya que el rango de movimiento se habrá “saturado”. Sin embargo, si se supone un simulador

de avión, el modelo físico es capaz de mantener una aceleración constante en ese mismo eje durante varios minutos, algo imposible de realizar con ninguna plataforma de movimiento existente en la actualidad.

Este problema se ve agravado por el hecho de que, con el diseño de Stewart (el más ampliamente utilizado), el rango de movimiento de cada DOF se ve condicionado por el resto de DOFs. Dicho de otra forma, la posición en la que se encuentre uno solo de los actuadores limita considerablemente los rangos de movimiento de la plataforma, de manera que cuando la plataforma está en el extremo de un DOF, el resto quedan invalidados ya que cualquier movimiento de cualquier actuador haría que la plataforma saliese del extremo del DOF. Esto se conoce como rango de trabajo y está ampliamente explicado en [144].

Estos problemas son los que en parte tratan de solventar los filtros de washout. Por un lado, filtran y escalan las aceleraciones producidas en el modelo físico en función de las características constructivas de cada plataforma de movimiento. Por otro lado, con el objetivo de volver a mantener el rango de movimiento de cada DOF lo más amplio posible y tras alguna aceleración, deben volver a posicionarse en 0 sin que el usuario perciba este reposicionamiento.

Para modelar este comportamiento y adaptarlo a cada plataforma y cada simulador, los filtros de washout suelen tener decenas de parámetros con los que ser configurados. La configuración de estos filtros está ampliamente descrita en la bibliografía existente, pero ninguna de ellas es la idónea. En función del simulador que se esté desarrollando, de la plataforma de movimiento utilizada y del uso concreto que se le dé al simulador, habrá siempre ciertos eventos que la plataforma no alcance a reproducir. Hoy en día sigue sin estar consensuada cuál es la mejor manera de generar movimiento en los simuladores.

Por otro lado, las heurísticas llevan aplicándose desde hace largo tiempo a prácticamente todos los ámbitos de la sociedad, pero hay muy poca bibliografía sobre la aplicación de heurísticas a los algoritmos de generación de movimiento para simuladores.

Con todo esto, la **PROBLEMÁTICA** que pretende resolver esta tesis doctoral es:

Es imposible que las plataformas de movimiento reproduzcan fielmente todos los movimientos que ocurren en un simulador como si de los movimientos en la vida real se tratase.

Y ante esto se presenta la siguiente **HIPÓTESIS**:

Mediante la implementación de determinadas heurísticas que resalten los elementos que se consideren más importantes en una simulación, es posible generar un movimiento útil, aunque no fidedigno mediante el uso de plataformas de movimiento.

1.10.- Metodología de trabajo

El presente trabajo se basa en la metodología propuesta por el método científico. El primer lugar se procede a la observación sistemática del comportamiento de los usuarios y sus sensaciones en los simuladores y más concretamente en las plataformas de movimiento. Esto además de empíricamente se ha contrastado con la bibliografía existente. Tras el proceso de observación y medición, se pasa a la fase de formulación de hipótesis y experimentación, volviendo a analizar los resultados, obteniendo conclusiones y publicándolas para que cualquier otro grupo de investigación pueda replicar los experimentos y contrastar la información publicada.

En este sentido, el autor lleva trabajando desde 2010 en más de 15 proyectos de investigación y desarrollo basados en simulación, generación de estímulos para lograr mayor inmersión y, por supuesto, todo lo relacionado con la generación de movimiento en los simuladores. Los resultados de los primeros años concluyeron con la tesis doctoral de Dr. Sergio Casas, cuyo relevo continuó el autor desde 2015, generando como resultados diversas publicaciones científicas, una patente y la satisfacción de la mayoría de los usuarios de todos los simuladores diseñados y desarrollados.

CAPÍTULO 2: Simulador de vuelo

2.1.- Motivación y contexto

El primero de los casos de uso presentados se basa en un proyecto llevado a cabo en el año 2016 para la compañía Saudí Aramco, petrolera estatal del Reino de Arabia Saudí y una de las empresas más grandes del mundo.

Esta compañía, dentro de sus actuaciones en cuanto a responsabilidad social corporativa, incluye la realización de campañas para la concienciación en seguridad vial. El IRTIC, gracias a sus relaciones en el país, se presentó al concurso público y consiguió ser adjudicatario del proyecto, comenzando con la presentación de un concurso de ideas.

Uno de los ámbitos en que Saudí Aramco quería hacer hincapié era el del uso del cinturón de seguridad como medida para evitar muertes. Inicialmente, su idea consistía en la realización de una aplicación basada en cascos de realidad aumentada que, de alguna manera, lograra concienciar a los usuarios sobre la importancia del uso del cinturón de seguridad.

Por parte del IRTIC y concretamente del autor, surgió la idea de aumentar la sensación de presencia en esta campaña

concreta logrando que los usuarios, además de mediante el sistema visual y sonoro, percibiesen mediante un “simulador de vuelco” (propiocepción incluida), la sensación de un vuelco real y, posteriormente, poder evaluar el efecto de este sistema sobre la concienciación de los usuarios. La idea tuvo gran acogida por parte de la empresa y se comenzó su investigación y desarrollo.

En primer lugar, se comenzó estudiando los trabajos relacionados con el uso del cinturón de seguridad y las campañas realizadas previamente para la concienciación sobre su uso, haciendo hincapié en aquellos sistemas que utilizasen simuladores o sistemas de RA, RV y/o estímulos de movimiento.

2.2.- Contexto actual

2.2.1.- Sobre el uso del cinturón de seguridad

El cinturón de seguridad de tres puntos fue inventado por Nils Ivar Bohlin, un ingeniero mecánico sueco de Volvo, en 1959. Antes de esa fecha, algunos coches incluían sistemas de retención para los pasajeros, pero no como los que conocemos hoy en día. Hace poco se cumplió el LX aniversario de la invención del cinturón de seguridad y Volvo afirma que su invento ha salvado más de un millón de

vidas [145]. Estudios sobre la materia, como el presentado en [146], parten de la base de que el cinturón de seguridad tiene una eficacia de alrededor del 45 % (estimación óptima) para salvar la vida de una persona en un accidente de tráfico.

Los países más avanzados del mundo han incluido en su legislación el uso obligatorio de los cinturones de seguridad, tanto delanteros como traseros. A pesar de la legislación, los índices de uso del cinturón de seguridad son muy diferentes según qué país. En 2003, la Unión Europea informó que, en sus Estados miembros, sólo el 76% de los ocupantes de los asientos delanteros y el 46% de los ocupantes de los asientos traseros utilizan el cinturón de seguridad [147]. En Australia, estos porcentajes ascienden al 92% [148].

Desde que el uso del cinturón de seguridad se hizo obligatorio, es habitual que los países desarrollen campañas destinadas a aumentar el índice de uso del cinturón. También se han aplicado soluciones técnicas para imponer su uso. Uno de los primeros intentos en este sentido se llevó a cabo en los Estados Unidos de América, que en 1973 introdujo en su legislación que los coches no debían arrancar si no llevaban abrochados los cinturones de seguridad, pero la medida se encontró con una fuerte oposición pública y fue retirada sólo 6 meses después.

Las técnicas más recientes para aumentar el uso del cinturón de seguridad se basan en la idea de implementar

recordatorios inteligentes (SBR – *Seat Belt Reminder*) en los coches, emitiendo alguna luz o sonido mientras no se utiliza el cinturón de seguridad. Esta técnica ha tenido bastante éxito, como se indica en [148], donde se informa de que solo el 82,3% de los usuarios de coches sin SBR utilizan el cinturón de seguridad, aumentando al 93,0% en los coches con SBR.

2.2.2.- Gamificación, *serious games* y *edutainment*

La evolución de la tecnología también ha aportado nuevos métodos y técnicas para desarrollar campañas cuyo objetivo es aumentar la concienciación sobre el uso del cinturón de seguridad, tratando de conseguir un uso del 100%. En este sentido, los juegos serios (*serious games*) y las aplicaciones de entretenimiento educativo (*edutainment*) se han convertido en herramientas muy eficaces para la concienciación en diversos ámbitos, no sólo en el de la seguridad vial [149]. Los juegos serios se han utilizado con frecuencia con fines educativos, formativos y sanitarios, pero son especialmente útiles para aumentar la conciencia social [150]. Son los llamados "juegos para el bien", que se caracterizan por abordar temas sociales de relevancia pública como la religión, las epidemias, el sexismo y el racismo, el cambio climático, etc.

Una explicación más detallada sobre este aspecto, puede observarse en el apartado “1.3.1.- La formación mediante la simulación”.

2.2.3.- Simuladores de vuelco

En lo que respecta a los simuladores de vuelco (*roll-over simulators*), existen varios trabajos en la literatura académica en los que se simulan accidentes, incluidos los vuelcos simulados (es decir, pruebas simuladas de maniobras de vuelco), pero no se han encontrado simuladores de vuelco "reales" (en los que se vuelca físicamente un coche de verdad) documentados. Se pueden encontrar algunos en el ámbito comercial [151], pero, por lo que sabemos, ningún especialista ha propuesto nunca una aplicación basada en la RV de edutainment sincronizada con una simulación de vuelco, con la intención de ser utilizada para concienciar sobre la seguridad vial. Así pues, nuestra propuesta era innovadora y original.

El sistema desarrollado incluye un simulador de vuelco de coche, mejorado con RV, en el que cada uno de los 4 pasajeros tiene una vista diferente, proporcionada por un casco tipo *Head Mounted Display* (HMD).

El objetivo es mostrar cómo un coche virtual sufre un accidente y vuelca, mientras el coche real en el que están

montados los pasajeros da la vuelta, impulsado por un potente motor sincronizado con la escena de RV.

Aunque la aplicación tiene una apariencia lúdica y la escena virtual está configurada como un simulador de conducción de entretenimiento, el simulador de vuelco da a los ocupantes del coche la desagradable sensación de estar en un coche volcado, para que entiendan inmediatamente que llevar el cinturón de seguridad es necesario para garantizar su seguridad.

2.3.- Descripción del aparato

Los siguientes apartados muestran los desarrollos que se llevó a cabo poder construir un sistema con el que poder desarrollar el experimento.

2.3.1.- Sistema mecatrónico 1DOF

Dado que no existen publicaciones previas respecto a simuladores de vuelco, el sistema completo fue analizado, diseñado y construido por completo en el IRTIC de la Universidad de Valencia.

La parte más compleja y que mayor riesgo contemplaba, pero por otro lado la que se preveía más relevante para una alta concienciación de los usuarios, era el desarrollo del sistema mecatrónico para el vuelco del coche.

El sistema de simulación de vuelco se basa en una estructura de acero dividida en tres partes (véase la Figura 13). La primera (Figura 13, izquierda) está fijada al suelo e incluye un potente motor eléctrico, que se utilizará para hacer volvar el coche. La segunda parte (Figura 13, centro) se apoya en dos grandes rodamientos y es la parte móvil (giratoria) del sistema sobre la que se coloca el coche real. Para dar una apariencia estética correcta y facilitar la entrada y salida de los usuarios al coche (que queda elevado del suelo), toda la estructura de acero está rodeada por una estructura de aluminio (Figura 13, derecha).

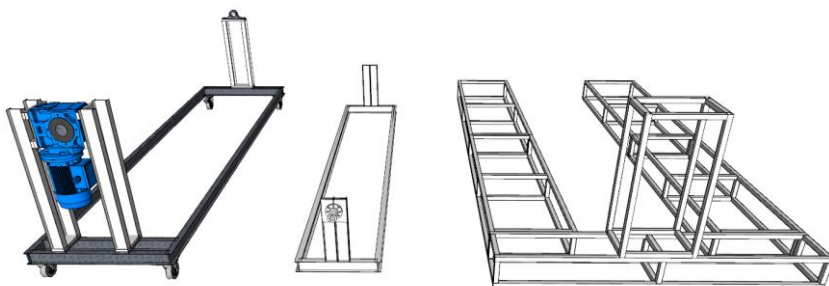


Figura 13: partes del hardware en que se divide la estructura principal del simulador de vuelco. Izquierda: estructura de soporte con el motor eléctrico. Centro: estructura giratoria sobre la que se coloca el coche real. Derecha: estructura auxiliar para facilitar el acceso al coche.

La parte móvil integra el mecanismo de sujeción del coche. En concreto, este mecanismo se diseñó para anclar un *Kia Picanto* 2016. Este modelo de coche se seleccionó en función de sus dimensiones, su peso, la facilidad de acceso a los

pernos de fijación del chasis y porque se trata de un utilitario que entra en la gama media y, por tanto, ejemplifica perfectamente gran parte del mercado de vehículos existente.

La parte móvil del sistema está accionada por un motor eléctrico de 1,5 kW y una caja reductora 1:750 (en realidad, había dos cajas de cambios conectadas en serie, haciendo un sistema de caja reductoras 1:750). Para hacer girar la parte móvil y el coche con este motor eléctrico, se realizaron cálculos muy precisos para tener en cuenta el centro de masa resultante con 4 usuarios (promedio) dentro del vehículo, y así situar el motor y el eje de rotación en el lugar óptimo.

Este aspecto es especialmente relevante, ya que, al tratarse de mover una gran masa (la del vehículo junto con sus ocupantes), cualquier desviación implica que el motor deba realizar mucho más par del necesario. El par, también conocido como momento (M), es proporcional a la fuerza (F) que hay que realizar, la distancia (r) y en ángulo entre la posición de la “biela” y la gravedad, como se muestra en la siguiente fórmula.

$$|\vec{M}| = |\vec{r}| * |\vec{F}| * \sin(\theta)$$

Con una masa aproximada del vehículo cargado con 4 ocupantes de unos 1500kg, cada centímetro que se errase en este cálculo implica un incremento del par motor necesario

de 147Nm para el peor de los casos, es decir, cuando el coche se encontrase volcado 90° o 270°.

El motor seleccionado tenía una velocidad angular nominal de 1.500 revoluciones por minuto (rpm). Por lo tanto, una caja reductora 1:750 amplifica básicamente el par de salida por un factor de 750, a costa de reducir la velocidad angular de salida a un máximo de $1.500/750 = 2$ rpm. Esto significa que se necesitan 30 segundos para girar el coche completamente (360°), y 15 segundos para girar completamente el coche al revés (180°). Por supuesto, esto es más lento que la velocidad angular a la que vuelca un coche real cuando sufre un accidente. Sin embargo, por razones de seguridad, la velocidad de rotación debe mantenerse baja en el simulador.

El motor se controló mediante un variador de frecuencia que utiliza señales analógicas amplificadas proporcionadas por una placa electrónica Arduino Uno, que incluye un módulo de conexión Ethernet que, a través de un router, permite el envío de comandos mediante sockets UDP.

Además, para los casos en los que fuese necesario el control manual del giro del motor, se dispuso de un sistema de control con dos botones (hacia delante y hacia atrás) y un pulsador de parada de emergencia conectado directamente al sistema de freno del motor. De este modo, el simulador podía detenerse inmediatamente en caso de emergencia.

2.3.2.- Aplicación RV/RA para simulador de vuelco

Para aumentar la inmersión de los usuarios, además del propio movimiento de vuelco que sufren gracias al sistema mecatrónico, cada usuario lleva un HMD. En concreto, se utilizó unas Samsung Gear VR con un smartphone LG G4 en su interior. Dado el elevado consumo de energía que necesita la aplicación de RV, los smartphones permanecieron siempre conectados a la red eléctrica. Además, se numeraron según el asiento que les corresponde en el vehículo, ya que la perspectiva visual es diferente para cada uno de los asientos.

La aplicación de RV incluía una recreación del interior de un Kia Picanto (coche real utilizado en el simulador), posicionando la cámara virtual en función del asiento que ocupa cada usuario. También se creó una carretera y un paisaje virtuales, de modo que el coche virtual se muestra recorriendo una carretera de dos carriles. El coche es conducido por un piloto automático. Así, la persona que ocupa el asiento del conductor experimenta las mismas sensaciones que el resto de los pasajeros.

En un determinado momento aleatorio, la aplicación produce un sonido muy direccional (que sugiere un pinchazo o la rotura de una pieza mecánica) que provoca confusión en los usuarios. Suelen dejar de mirar hacia delante y tratan de localizar el origen del sonido, como si se tratara de un

juego de descubrimiento. En ese momento, tras unos segundos, el vehículo se sale de la carretera, cae en un terraplén de arena irregular y vuelca.

En cuanto el vehículo virtual sale de la carretera, se produce el vuelco real del coche. Esto se consigue sincronizando el coche virtual con el motor eléctrico del simulador de vuelco. La Figura 14 muestra una instantánea de la aplicación de RV.



Figura 14: *instantánea de la simulación vista desde la posición del conductor.*

Cuando el coche (real) ha girado 180°, el motor eléctrico se detiene, manteniendo así a los usuarios durante 15 segundos boca abajo (véase la Figura 15), para que puedan experimentar a través de la aplicación de *edutainment* basada en la RV lo que ocurre con los objetos del coche. Todos los objetos virtuales colocados en el interior del vehículo (unas gafas de sol, un paquete de pañuelos, un refresco y una mochila) se caen (virtualmente). Además, si los usuarios

tienen pequeños objetos reales en sus bolsillos, como monedas, pañuelos o caramelos, estos objetos suelen caer también, aumentando el peligro percibido. No obstante, no se permitía a los usuarios probar el simulador de vuelco con objetos pesados o peligrosos que puedan caerse y causar lesiones.

Tras estos 15 segundos manteniendo a los pasajeros boca abajo, la simulación virtual termina y se envía una orden al Arduino Uno para que gire el coche otros 180°. Por lo tanto, el coche vuelve a su posición original, terminando la experiencia.



Figura 15: sistema antivuelco con el coche al revés (giro de 180°).

2.3.3.- Comunicaciones y sincronización

La comunicación entre el sistema mecánico y los teléfonos móviles que muestran la aplicación de RV se realiza a través de un router WiFi al que se conectan también la Arduino Uno (utilizando el Ethernet Shield de Arduino) que controla los motores eléctricos.

También hay una tablet de control, utilizada por el operador del sistema, que se conecta vía WiFi con el resto de los elementos. Esta tablet controla la simulación, permitiendo iniciar y reiniciar la aplicación de edutainment. También permite realizar una parada de emergencia y el control directo de la rotación del motor eléctrico. Esto último es especialmente útil por si se produjese alguna desincronización del sistema y la posición de 0° no fuese tal en la realidad. La Figura 16 muestra la arquitectura de comunicación.

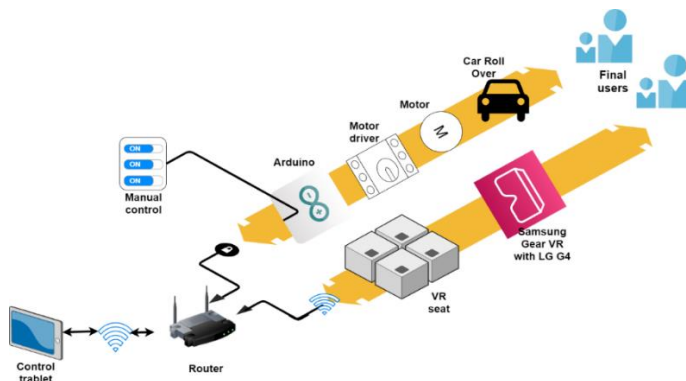


Figura 16: *arquitectura de comunicación.*

El operador es la persona que controla la experiencia del vuelco. Una vez que los usuarios están en el coche y con el cinturón de seguridad bien abrochado, lanza la simulación. Si alguna persona sufre algún problema, aborta inmediatamente la simulación y devuelve el coche a la posición de reposo con extrema cautela.

2.4.- Descripción de las pruebas

El sistema se instaló y comenzó la campaña, que se organizó para que los conductores acudieran junto a su familia. Así, tanto los mayores como los jóvenes pudieron aumentar su concienciación sobre la seguridad vial. Los jóvenes son esenciales, ya que se convertirán en los principales conductores en la próxima década y son propensos a los accidentes.

La campaña se organizó en un circuito de seis actividades de *edutainment*, siendo una de ellas dos simuladores de vuelco como los aquí descritos. Esta experiencia fue la única de las seis actividades centrada en la concienciación sobre el uso del cinturón de seguridad. La Figura 17 muestra los dos simuladores de vuelco instalados.

Cuando las familias llegaban al recinto, primero se registraban en un mostrador de bienvenida (Figura 18). A continuación, debían rellenar un cuestionario en una de las 10 tablets habilitadas para ello. Una vez registrados, se les proporcionaba un código de seguimiento que utilizaban durante las distintas actividades. También utilizaron este código para rellenar un segundo cuestionario antes de abandonar el recinto. Gracias a éste se sabe que ambos cuestionarios, el anterior y el posterior a la visita, pertenecen a la misma persona de manera que es fácil ver las diferencias entre el cuestionario *anterior* (pre) y el *posterior* (post).

Todo el sistema que permitía el seguimiento de los usuarios durante toda la visita fue también desarrollado por el IRTIC-UV.



Figura 17: dos simuladores de vuelco instalados dentro de la campaña de seguridad vial en Dammam, KSA.



Figura 18: registro/mostrador de bienvenida (izquierda) y Tablet utilizada para rellenar los cuestionarios (derecha).

La Tabla 2 muestra las preguntas realizadas sobre el uso del cinturón de seguridad antes (pre) y después (post) de realizar el conjunto de seis actividades. El cuestionario completo incluía otras preguntas relacionadas con la seguridad vial.

Es importante señalar que ninguna de las otras cinco actividades de la campaña estaba relacionada con el cinturón de seguridad.

Por lo tanto, es de esperar que todas las diferencias relativas a la concienciación sobre el uso del cinturón de seguridad se deban a la experiencia de la aplicación de *edutainment* del simulador de vuelco mejorada con RV aquí presentada.

#	Preguntas sobre el cinturón de seguridad (pre)	Preguntas sobre el cinturón de seguridad (post)
A	Cuando subes al coche como conductor, ¿te pones siempre el cinturón de seguridad?	A partir de ahora, cuando subas al coche como conductor, ¿te pondrás siempre el cinturón de seguridad?
B	Cuando subes al coche en el asiento del copiloto, ¿llevas siempre puesto el cinturón de seguridad?	A partir de ahora, cuando subas al coche en el asiento del copiloto, ¿te pondrás siempre el cinturón de seguridad?
C	Cuando subes al coche en los asientos traseros, ¿te pones siempre el cinturón de seguridad?	A partir de ahora, cuando subas al coche en los asientos traseros, ¿te pondrás siempre el cinturón de seguridad?
D	¿Cree que el cinturón de seguridad ayuda a salvar vidas?	¿Cree que el cinturón de seguridad ayuda a salvar vidas?
E	¿Conoce a alguien que haya salvado su vida gracias al cinturón de seguridad?	¿Crees que el cinturón de seguridad podría haber salvado la vida de algún conocido?
F	¿Crees que es importante llevar el cinturón de seguridad aunque no seas el conductor?	¿Crees que es importante llevar el cinturón de seguridad aunque no seas el conductor?

Tabla 2: cuestionarios previos (izquierda) y posteriores (derecha) relacionados con el uso del cinturón de seguridad.

La campaña se desarrolló durante 4 semanas consecutivas, estando abierta al público 6 días a la semana (de sábado a jueves ambos inclusive). En total, pasaron por el recinto de la campaña de seguridad vial unas 5.000 personas, sin contar los menores de 8 años, que no contestaron a los

cuestionarios. Algunos de ellos no contestaron de forma coherente y fueron descartados del estudio. Por ejemplo, algunos usuarios eligieron siempre la primera o la última opción que se les mostraba. Otros rellenaron todas las respuestas con "Sí" o "No", contradiciéndose en muchas ocasiones. Se descartaron los cuestionarios en los que era evidente que no se había interiorizado las respuestas dadas. Finalmente, se consideraron válidos 561 cuestionarios.

2.5.- Resultados

Los resultados pueden observarse en la Tabla 3.

Pregunta	Pre			Post		
	Sí	No	% de Sí	Sí	No	% de Sí
A	223	238	57.58%	524	37	93.40%
B	286	275	50.98%	522	39	93.05%
C	130	431	23.17%	486	75	86.63%
D	351	210	62.57%	546	15	97.33%
E	29	532	5.17%	149	412	26.56%
F	298	263	53.12%	520	41	92.69%

Tabla 3: Resultados de los cuestionarios

Como puede apreciarse en la Figura 19 y en la tabla 3, en todas las cuestiones hay un aumento considerable de las respuestas positivas al comparar los cuestionarios anteriores y posteriores.

En cuanto a las preguntas A, B y C, muy orientadas al uso del cinturón de seguridad en los distintos asientos del coche, cabe destacar que inicialmente sólo el 23,17% de los usuarios percibía como importante el uso del cinturón de seguridad en los asientos traseros del vehículo y, tras utilizar el simulador de vuelco y la aplicación de edutainment, esta cifra aumentó hasta el 86,63%. A pesar del gran aumento de la concienciación, sigue habiendo una variación significativa entre la concienciación del uso del cinturón de seguridad en los asientos delanteros y en los traseros. En el cuestionario posterior, el 93,40% (asiento del conductor) y el 93,05% (asiento del pasajero) de los usuarios percibieron como importante el uso del cinturón de seguridad en los asientos delanteros, frente al 86,63% ya mencionado para los asientos traseros.

Por otro lado, las preguntas D y F reflejan dos conceptos importantes: si se considera importante el uso del cinturón de seguridad y si su uso depende o no del asiento del coche. Estas preguntas muestran unas variaciones desde el 62,57% y el 53,12% en el precuestionario, hasta un 97,33% y un 92,69%, respectivamente, en el postcuestionario. Se trata de

aumentos muy significativos. Dada la gran cantidad de respuestas obtenidas (N=561), estos aumentos son estadísticamente significativos.

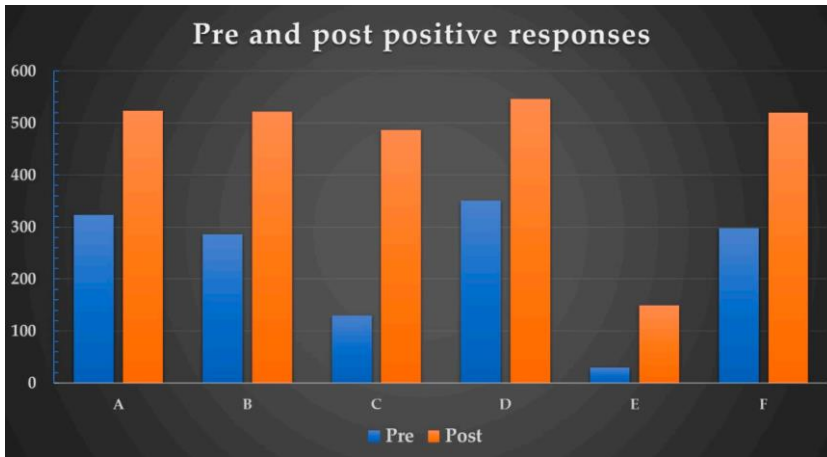


Figura 19: respuestas positivas anteriores y posteriores al cuestionario.

2.6.- Conclusiones

De los resultados obtenidos se desprende que los usuarios tenían una concienciación inicial muy baja respecto a la necesidad de utilizar el cinturón de seguridad en los coches, especialmente en los asientos traseros.

Tras la experiencia en el simulador de vuelco, se observa que esta concienciación ha aumentado de forma muy

significativa, no sólo en relación con los asientos traseros, sino también con el uso del cinturón de seguridad en general.

Por lo tanto, la aplicación de *edutainment* presentada, que combina la RV, un aspecto lúdico y el movimiento real, es capaz de cumplir sus objetivos, ya que proporciona un aumento significativo en la concienciación del uso del cinturón de seguridad, mostrando el potencial que este tipo de aplicaciones puede ofrecer.

Cabe señalar que este aumento de la concienciación se produce tras el uso de un simulador que sólo gira a 2 rpm, lo que está muy lejos de la velocidad angular que los usuarios sentirían en un accidente real. Las aceleraciones y velocidades angulares de los accidentes reales son varios órdenes de magnitud superiores. Por supuesto, no queríamos herir a nadie. Por lo tanto, se implementó un sistema de “cámara lenta”. En cualquier caso, la sensación de estar atrapado boca abajo en un coche que ha volcado es lo más real que puede haber en un accidente de verdad (sangre y heridas aparte). El autor ha probado por sí mismo el simulador, y aunque el movimiento de vuelco es divertido al principio, la sensación de estar boca abajo en un coche es ciertamente desagradable. En esa posición, te das cuenta de que el cinturón de seguridad puede evitar que te golpees contra el interior del coche cuando sufres un accidente.

2.7.- Meta-análisis de resultados

Lo ideal para poder obtener conclusiones analíticas sobre la influencia de incluir el movimiento en los resultados sobre la concienciación habría sido el poder realizar diversos grupos de usuarios diferenciando el vivir la experiencia con y sin movimiento, es decir, con y sin vuelco del coche real. En los términos en que se llevó a cabo el experimento y con la gran afluencia de gente que acudió a la campaña, esto resultaba inviable, por lo que no se pudo obtener una muestra significativa de personas que hubiesen participado en la experiencia sin movimiento.

Pese a ello, se ha realizado una comparativa con los resultados de concienciación obtenidos en campañas de concienciación sobre el uso del cinturón de seguridad publicadas en revistas científicas en las que se evaluaba el porcentaje de usuarios concienciados antes y después de la campaña. Algunas de estas campañas se basaban en aplicaciones de realidad virtual.

La Tabla 4 sintetiza los resultados. En ella se aprecia que la mejor de las campañas fue la G, en la que se pasó de un 49% de usuarios que veían importante el uso del cinturón de seguridad a un 77%, aumentando por tanto la cifra tras la campaña en 28 puntos porcentuales.

Trabajo	Antes	Después	Diferencia	Tipo	Ref.
A.- Increasing seat belt use in North Carolina	64%	80%	16%	Campañas mediáticas	[152]
B.- Effects of a selective traffic enforcement program on seat belt usage.	58%	80%	22%	Refuerzo de controles policiales	[153]
C.- Long-term effectiveness of selective traffic enforcement programs for increasing seat belt use.	66%	84%	18%	Programas selectivos de control de tráfico	[154]
D.- Effectiveness of a selective traffic enforcement program combined with incentives for seat belt use in Quebec	85%	90%	5%	Programas selectivos de control de tráfico	[155]
E.- Enforcement or incentives? Promoting safety belt use among military personnel in the Netherlands	63%	81%	18%	Campaña de incentivos	[156]
F.- Increasing safety belt use in a secondary enforcement state: evaluation of a three-county special enforcement program	57%	65%	8%	Campañas mediáticas	[157]
G.- Results of a seat belt use law enforcement and publicity campaign in Elmira, New York	49%	77%	28%	Campañas mediáticas	[158]
H.- Development and evaluation of pilot programs to increase seat belt use in North Carolina	59%	79%	20%	Campañas mediáticas y controles policiales	[159]
I.- Driving Simulators – More than a Video Game!	77%	87%	10%	Aplicación de RV	[160]

Tabla 4: resultados de campañas de concienciación sobre el uso del cinturón de seguridad publicados en revista científicas.

Los resultados de nuestro experimento muestran en la pregunta D del cuestionario (¿Cree que el cinturón de seguridad ayuda a salvar vidas?) unos valores de 62.54% de respuestas afirmativas antes de la experiencia frente a un 97.33% de respuestas afirmativas tras la experiencia, o lo que es lo mismo, un incremento de más de 35 puntos porcentuales en la concienciación sobre el uso del cinturón de seguridad.

Cogiendo como ejemplo el trabajo I, que se basaban en una aplicación de realidad virtual, la diferencia más significativa con nuestro aparato radica precisamente en el aumento de la presencia del usuario gracias al movimiento (poner a las personas boca abajo).

De todo esto se puede intuir que la mejor concienciación de los usuarios en esta campaña de seguridad vial frente a las otras, cuyos datos se han publicado previamente, se debe al uso del *edutainment* y las nuevas tecnologías como herramienta para concienciar, y más concretamente, a la incorporación de la sensación de movimiento que aporta el aparato desarrollado.

CAPÍTULO 3: Heurísticas híbridas de generación de movimiento

3.1.- Contexto

El segundo caso de uso presentado se basa en un sistema desarrollado en el contexto de otra campaña de concienciación sobre accidentes de tráfico y seguridad vial, también en Arabia Saudí.

En este caso, se presenta un sistema que consiste en un *teatro 5D* cilíndrico con una pantalla proyectada total de 33 metros cuadrados en un cilindro de 7 metros de diámetro con un campo de visión horizontal de 180°. La parte exterior del cilindro puede apreciarse en la Figura 20.

Para lograr una mayor sensación de inmersión de los usuarios, en el centro del cilindro se colocó una plataforma de movimiento de 3DOF. La plataforma de movimiento se diseñó para 12 usuarios distribuidos en dos filas. La Figura 36 muestra el sistema y la base de movimiento.



Figura 20: cilindro exterior del cine inmersivo (denominado cine 5D por razones de marketing).

La lista completa de características del sistema incluye:

- Una pantalla de 450".
- Un sistema de audio THX 7.1, que incluye un sistema de micrófonos.
- 2 proyectores DLP 2K HD de 5500 lúmenes.
- Un sistema de mezcla y deformación.
- Una cámara de vídeo Full HD utilizada para algunas escenas de realidad aumentada.
- Un ordenador con un procesador Intel Xeon con 16 GB de memoria RAM.
- Un par de gafas estéreo activas.
- Una máquina de humo.
- Una máquina de olores.

- 12 tabletas Samsung Galaxy S7 -una para cada usuario- para hacer la película interactiva.
- 12 válvulas de agua y 12 de aire para incluir la retroalimentación de aire y agua para cada usuario.

El sistema en sí, gracias a la gran cantidad de elementos que incluye, es muy inmersivo y permite la interacción de los usuarios, pero por exigencias del cliente, que solicitó que el flujo visual estuviese formado por dos tipos de imágenes. Por un lado, había imágenes 3D creadas por ordenador y, por otro lado, imágenes grabadas mediante una cámara en las calles de Riyadh, la capital de Arabia Saudí. Esto supuso un gran reto en lo que a generación de movimiento se refiere.

La generación de movimiento para los momentos en que se estaba visualizando imagen sintética no suponía ningún gran desafío. Esto es gracias a que, al tener un modelo físico de vehículo circulando en una escena virtual, se pueden obtener de manera sencilla las aceleraciones y velocidades angulares necesarias como entradas al MCA.

Por el contrario, obtener estas entradas cuando se visualiza imagen real grabada en las calles de Riyadh era sumamente complejo.

Las siguientes secciones de este capítulo muestran cómo se diseñó y construyó el sistema, haciendo hincapié en todo lo referente a la generación de movimiento y su posterior validación.

3.2.- Planteamiento del problema a resolver

Como se ha comentado en el Capítulo 1, el objetivo principal de las plataformas de movimiento es reproducir las aceleraciones que deben sentir los usuarios de RV, pero siempre teniendo en cuenta los límites físicos de los actuadores[65] [58] [59]. Sin embargo, los rangos de movimiento de estos mecanismos robóticos suelen ser mucho más limitados que el movimiento real del objeto simulado.

Por esta razón, cuando se utilizan plataformas de movimiento en una simulación en tiempo real, es imposible reproducir fielmente de las aceleraciones que sufre el vehículo simulado. Para superar este problema, un enfoque clásico consiste en filtrar las aceleraciones de entrada mediante los filtros de washout [57] [59] [60] [61] [62].

Los filtros basados en washout son la forma más común de implementar un algoritmo de generación de claves de movimiento (MCA), que como se ha comentado, no es más

que un algoritmo que calcula los comandos de movimiento apropiados para recrear las señales gravito-inerciales.

Los movimientos generados por el MCA pasan a la capa de cinemática inversa, que los transforma en posiciones de los actuadores para, finalmente, generar el movimiento real a través del control de los mismos.

La Figura 21 muestra, a modo de recordatorio y de una manera muy simple, el proceso más común utilizado en la generación de señales de movimiento.

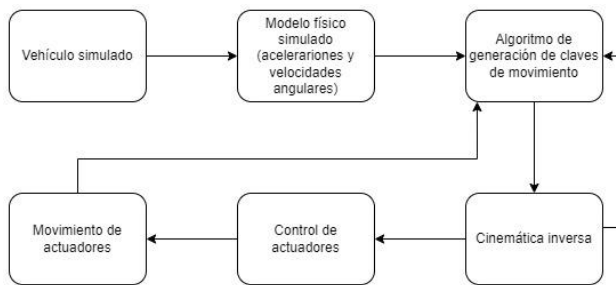


Figura 21: *esquema clásico de flujo de datos para la generación de señales de movimiento en un simulador basado en el movimiento.*

Como puede observarse, en un enfoque clásico, el vehículo simulado proporciona las entradas necesarias para el proceso. El estado físico de este vehículo simulado -por lo general, su aceleración y velocidad angular- es calculado por la aplicación de RV para proporcionar un movimiento visual adecuado, pero también se utiliza para alimentar el MCA de manera que se generen señales de movimiento.

Sin embargo, ¿qué ocurre si queremos mover la plataforma de movimiento según un flujo de imágenes en el que no tenemos un vehículo simulado? ¿Y si queremos combinar imágenes generadas por ordenador -con información física- e imágenes grabadas -sin ella-? Esta es la pregunta a la que trataremos de resolver con el estudio mostrado en este capítulo.

3.3.- Estado de la tecnología

La mayoría de las aplicaciones de RV utilizan información visual y acústica para generar una sensación de inmersión en sus usuarios. Las aplicaciones de RV que se ocupan del movimiento basado en la física necesitan encontrar una forma de incluir las señales de movimiento en el sistema. Esto se suele conseguir mediante una plataforma de movimiento electromecánica y un MCA.

El problema de las plataformas de movimiento es que el espacio de trabajo suele ser muy reducido debido a la interdependencia entre las diferentes cadenas cinemáticas.

En cuanto a los MCA, una explicación bastante detallada puede encontrarse en la sección “1.5.- Funcionamiento conceptual de las plataformas de movimiento”.

Sin embargo, el movimiento no es el único indicio extra-audiovisual que hay que tener en cuenta en las aplicaciones de RV para lograr una gran inmersión de los usuarios. Actualmente existen cines donde se reproducen películas que incluyen al espectador estímulos por muchos sentidos: tacto, olor, etc.

Este concepto de cine mejorado está presente en algunas soluciones que a veces se comercializan como cine 4D o 5D [161] [162]. Algunas de estas soluciones ofrecen películas estereoscópicas junto con movimiento pregrabado. Sin embargo, por lo que sabemos, estos dispositivos y los algoritmos que los controlan no se han presentado a la comunidad académica.

3.3.1.- Soluciones previas para generar claves gravito-inerciales en imagen real

El desarrollo de nuevos dispositivos de captura y nuevas formas de reproducir escenas de RV hace que la forma clásica de generar señales de movimiento para las plataformas de movimiento sea inaplicable si se carece de información del modelo físico simulado, como suele ocurrir, por ejemplo, con los vídeos de 360°, de mayor uso cada día. Una situación similar se da en las escenas de Realidad Aumentada (RA), donde los objetos virtuales y las imágenes reales se mezclan [61] [163]. En este caso, las aceleraciones de

los objetos virtuales podrían calcularse fácilmente aplicando un modelo basado en la física. Sin embargo, si queremos mover la plataforma de movimiento de acuerdo con las imágenes reales, tenemos que identificar soluciones alternativas [64].

En una primera aproximación, esto puede verse como un problema de seguimiento visual (*tracking*), resuelto, por ejemplo, mediante la segmentación espacio-temporal del vídeo, pero no siempre es así. En la mayoría de las aplicaciones de RV, la información visual se presenta en una vista en primera persona [59] [60] [164]. En estos casos, no basta con realizar el seguimiento de un objeto porque lo que queremos es calcular las aceleraciones de la cámara, que representa la vista del usuario [163]. Las señales de movimiento deben coincidir con el movimiento visual, pero sin las entradas adecuadas el MCA no puede funcionar.

Por otro lado, otra posible solución a este problema puede ser la instalación de acelerómetros en el objeto cuyo movimiento hay que extraer. Aunque esto parece perfectamente aplicable, hay una serie de inconvenientes. En primer lugar, hay un impacto económico en el proyecto. En segundo lugar, algunas imágenes pueden estar ya grabadas y, por tanto, esta solución puede ser inaplicable. Por último, la mayoría de las cámaras utilizadas para estos fines incorporan estabilizadores de imagen por hardware. Así, las

aceleraciones que sufre el objeto no se representarían fielmente en la imagen obtenida, lo que podría repercutir negativamente en la percepción de los usuarios.

3.3.2.- Solución propuesta en el estudio

Teniendo en cuenta todos estos problemas, se decidió modelar un método que permita definir las claves inerciales para las plataformas de movimiento en los casos en los que toda o parte de la información física que corresponde a la información visual de movimiento no está presente, como ocurre con las imágenes grabadas con cámaras de vídeo en el mundo real.

Este nuevo, por peculiaridad de mezcla de imágenes reales y virtuales, método es híbrido; trata la combinación de señales de movimiento *clásicas* -generadas a partir de vehículos simulados- y señales de movimiento *no clásicas* -generadas a partir de imágenes pregrabadas-. Para probar el método propuesto, se utilizó un sistema altamente inmersivo en tiempo no real, basado en una pantalla inmersiva cilíndrica proyectada en forma estereoscópica (3D) y con una plataforma de movimiento de 12 asientos, en la que el flujo visual se divide en escenas generadas por gráficos de ordenador y escenas de vídeo reales pregrabadas. En las primeras, las señales de movimiento proceden del modelo físico que se simula en el mundo virtual. En las segundas,

las señales de movimiento proceden del resultado de la aplicación del método presentado.

La combinación de claves de movimiento clásicas y no clásicas fue posible gracias a varias herramientas desarrolladas por el autor y al uso del método ajuste basado en el método Wideband Delphi que se explicará más adelante.

Por lo que se ha indagado, la aplicación de este método basado en el consenso a las plataformas de movimiento no se ha descrito anteriormente en la literatura académica.

3.4.- Plataformas de 3DOF

Como se ha comentado anteriormente, este tipo de plataformas se caracterizan por tener 3 grados de libertad. Estas plataformas también se suelen conocer como 2R1T o 2 rotacionales y 1 traslacional. Los tres grados que se suelen implementar en estas plataformas son el pitch, el roll y el heave. La novedad de esta plataforma respecto a la 2DOF es el heave, que consiste en una traslación sobre el eje Y. Igual que la plataforma de 2DOF puede construirse utilizando actuadores lineales o actuadores rotacionales (motores), con los beneficios y los perjuicios ya comentados. La Figura 22 muestra ambos ejemplos.

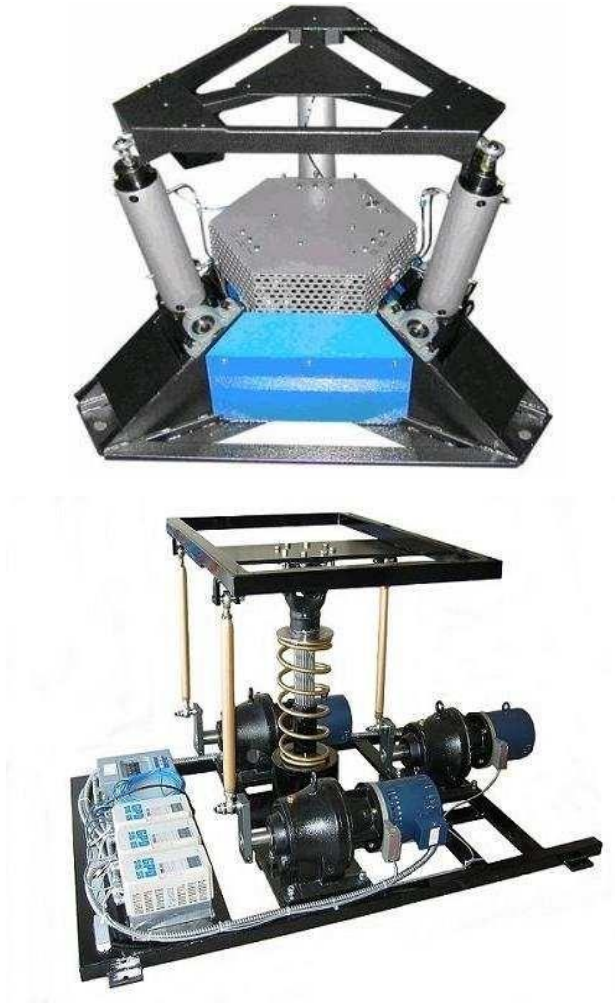


Figura 22: plataforma 3DOF con actuadores lineales (arriba) y rotacionales (abajo).

En distintos proyectos desarrollados por el IRTIC ha sido necesaria la construcción de este tipo de plataformas. Concretamente, la plataforma utilizada en el presente

experimento es la cuarta 3DOF construida. Como en las anteriores, se comenzó su análisis y diseño partiendo de una plataforma con motores rotacionales y un pilar central, ayudado de un eje estriado y un muelle que ayudase a aliviar a los motores de parte del peso de la base móvil.

3.4.1.- Principios constructivos de plataformas 3DOF

La geometría de la plataforma es algo distinta a la de 2 grados de libertad, en la que generalmente, cada motor se encarga de generar un DOF, no ocasionando movimientos dependientes y simplificando enormemente la cinemática. En esta plataforma, los ejes de rotación y la dependencia de movimientos de los motores y los DOFs, vienen marcados por la distancia entre los actuadores. Esta geometría puede observarse en la Figura 23.

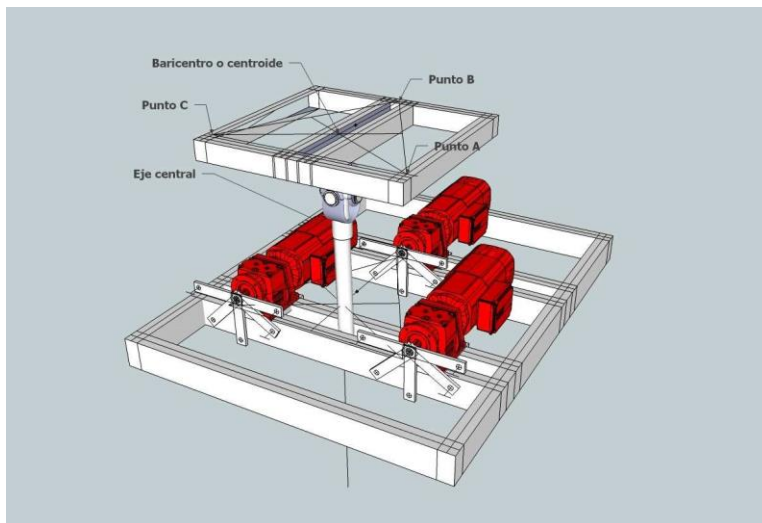


Figura 23: geometría de la plataforma de 3DOF

Como puede apreciarse, los puntos de aplicación de fuerza de los actuadores son los marcados como puntos *A*, *B* y *C*.

Igual que ocurría en la plataforma anterior, la posición *Y* (la altura) de los actuadores vendrá marcada por la altura final de la plataforma.

El pilar central, a diferencia de la plataforma 2DOF habitual, no tiene la función de marcar en centro de rotación de la plataforma. Esta vez no se trata de un pilar fijo, sino que se trata de una unión telescópica con una junta cardan en su parte superior.

Si se aplica el mismo movimiento a las 3 bielas (la pieza mecánica anclada al eje del motor) que forman el sistema

simultáneamente, se logra realizar un heave puro cuyo máximo recorrido es el mismo que el del desplazamiento de las bielas en el eje Y, es decir $2 * L_b$. Puede apreciarse en la Figura 24.

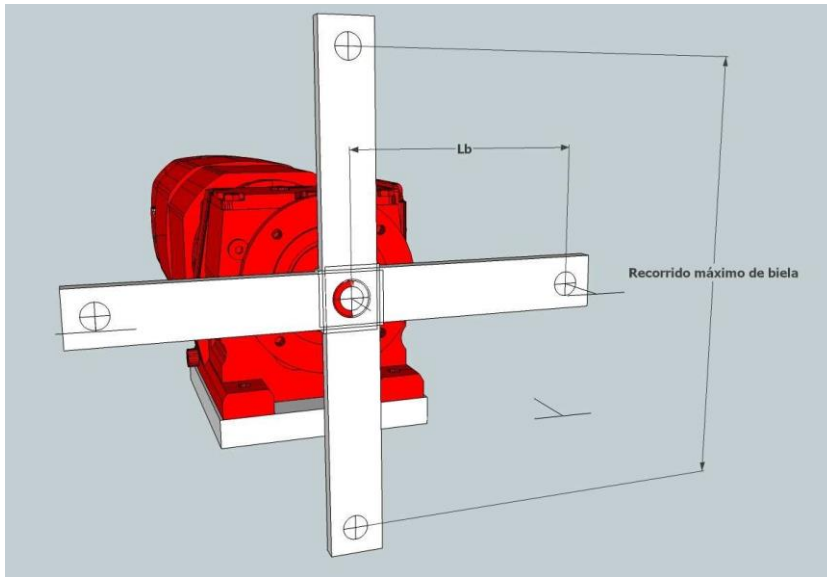


Figura 24: explicación recorrido máximo del heave.

Por otro lado, hay que tener en cuenta que el heave no es simétrico a ambos lados respecto de su posición de equilibrio (heave=0). Las configuraciones de estos extremos pueden observarse en la Figura 25. En ella se aprecia, de izquierda a derecha, la posición de equilibrio, la posición de máximo heave y la de mínimo heave.

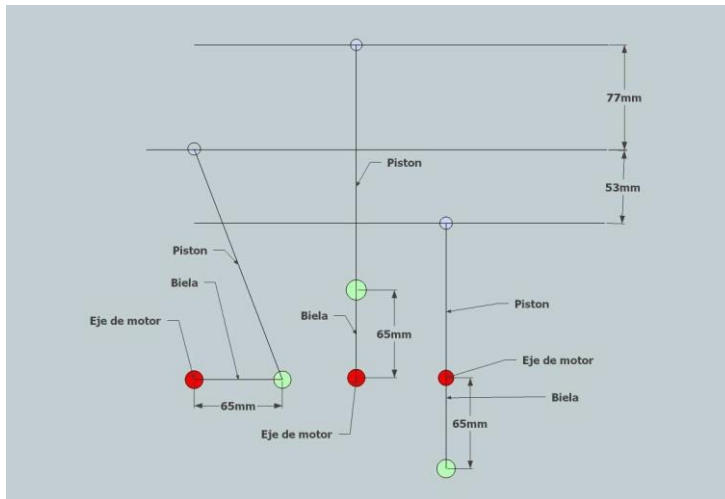


Figura 25: explicación recorrido heave en una plataforma 3DOF.

Por otro lado, hay que tener en cuenta, al igual que ocurre con el resto de plataformas de movimiento (2 y 6 DOFs), que cuanto más biela se le ponga a cada actuador, mayor será la fuerza y el par motor necesario para lograr las aceleraciones deseadas.

El grado de libertad roll es el segundo en cuanto a complejidad de movimiento en este tipo de plataforma. Para lograr un “roll puro” en este tipo de plataformas únicamente es necesario mover los dos motores delanteros en sentidos opuestos y con igual velocidad y rampas de aceleración, obviamente, de forma sincronizada. Algunas posibles combinaciones de bielas para generar el movimiento del roll pueden apreciarse en las Figuras 26, 27 y 28.

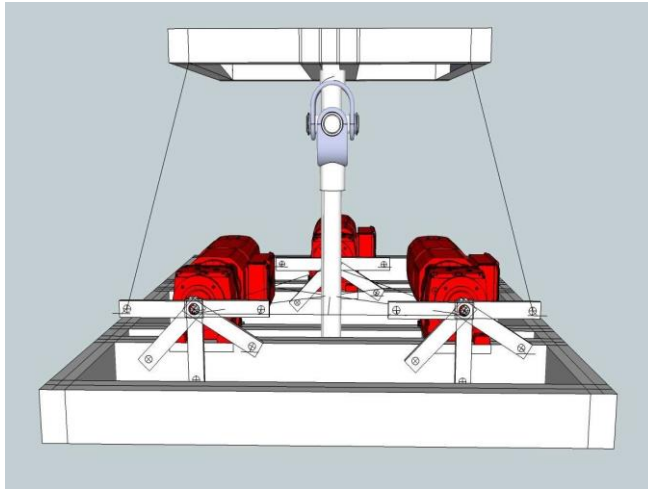


Figura 26: plataforma 3DOF con $heave=0$, $pitch=0$, $roll=0$.

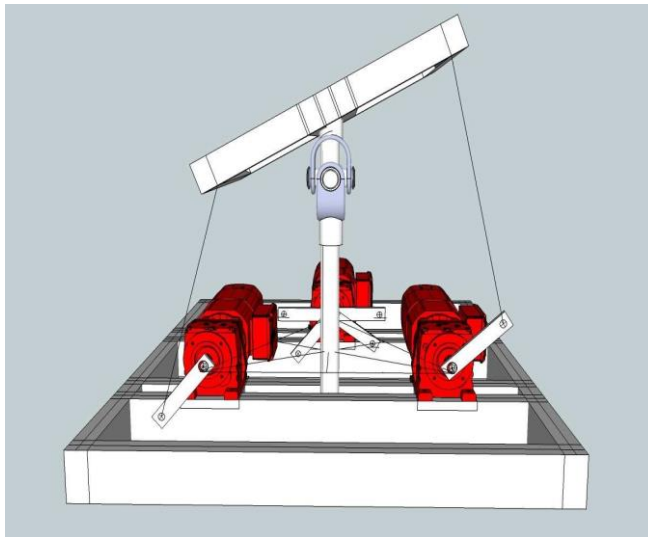


Figura 27: plataforma 3DOF con $heave=0$, $pitch=0$, $roll=-15$.

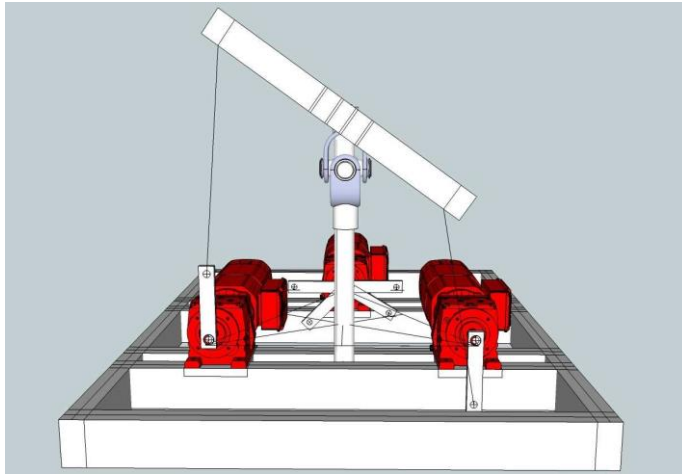


Figura 28: *plataforma 3DOF con $heave=0$, $pitch=0$, $roll=20$.*

Este grado de libertad no se ve afectado en ningún momento (excepto en el rango) por la posición en la que se encuentre el tercero de los actuadores, ya que el punto de aplicación de fuerza del tercero de los actuadores está situado exactamente en el eje de rotación del roll.

Ocurre exactamente lo mismo con el pilar central. Al estar situado en el eje de rotación y estar unido a la parte móvil de la plataforma mediante una junta cardan, el roll es independiente de su posición. De hecho, este grado de libertad no afecta para nada la posición del eje telescópico del pilar.

Por otro lado, con el grado de libertad pitch no ocurre lo mismo. En primer lugar, para poder realizar “pitch puro” los tres actuadores deben moverse, y además de manera sincronizada.

Partiendo de la posición de equilibrio, si se quiere realizar pitch positivo, el actuador situado en la parte trasera debería de bajar, y los dos situados en la parte delantera, deberían subir. Si se quiere realizar pitch negativo, sería al revés. Las Figuras 29, 30 y 31 muestran un ejemplo de movimiento en el grado de libertad pitch.

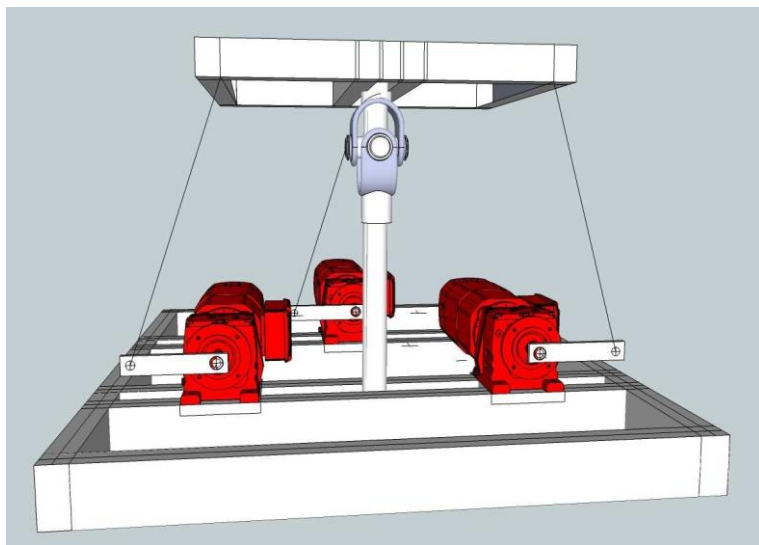


Figura 29: *plataforma 3DOF con $heave=0$, $pitch=0$, $roll=0$.*

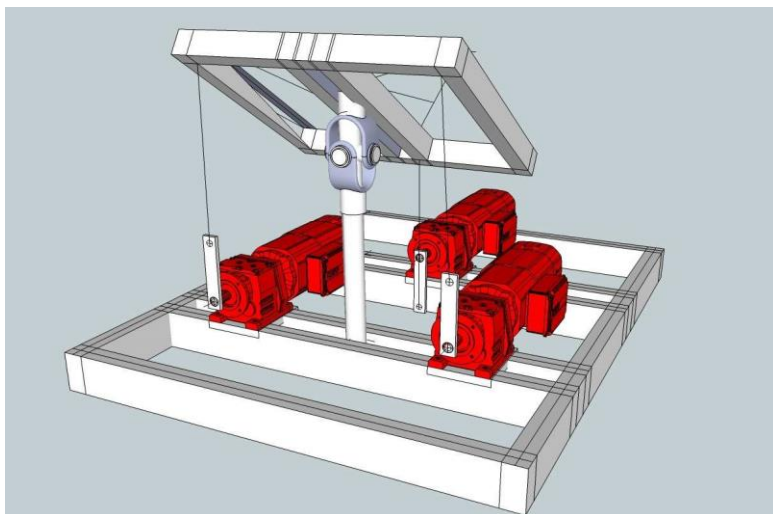


Figura 30: *plataforma 3DOF con heave=0, pitch=30, roll=0.*

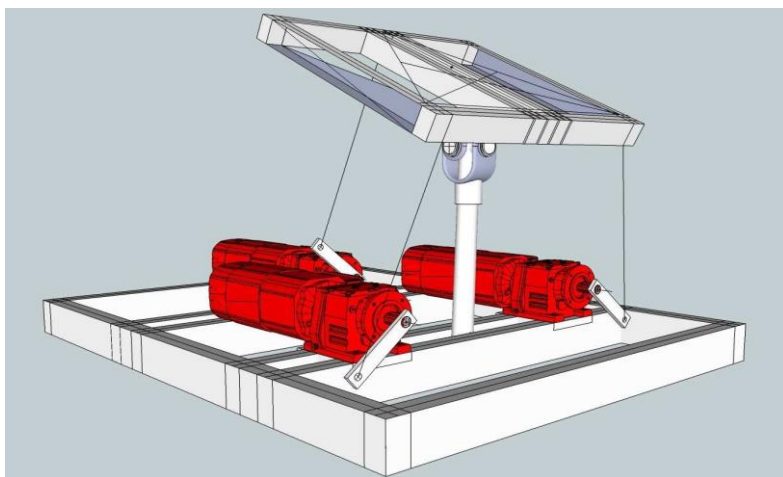


Figura 31: *plataforma 3DOF con heave=0, pitch=-20, roll=0.*

Además, con este grado de libertad sí que se produce un desplazamiento en el telescópico del pilar central. Esto es debido a que el eje de rotación del pitch no tiene por qué estar situado en el baricentro del triángulo delimitado por los puntos de aplicación de fuerza de los motores (punto donde está situado la junta cardan que une el pilar central. La Figura 32 muestra el desplazamiento del pilar central respecto al eje de rotación.

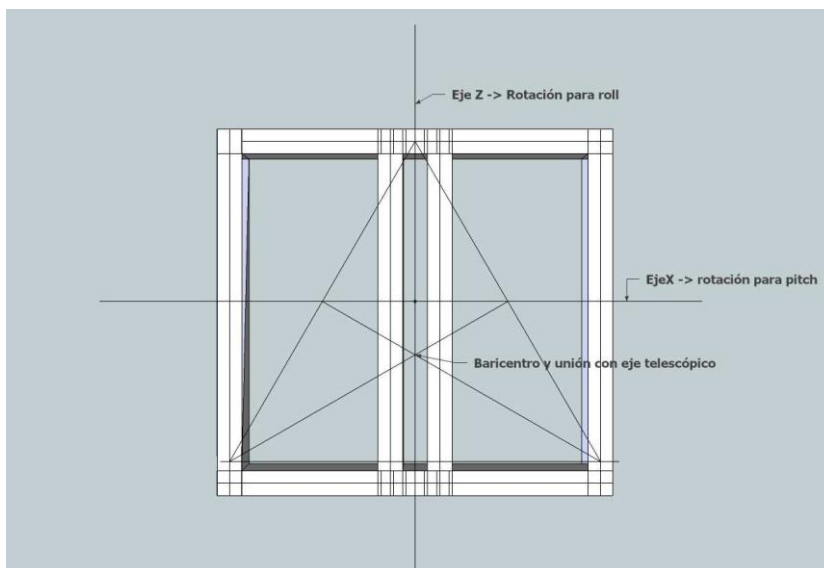


Figura 32: eje de rotación para pitch en plataforma 3DOF

En este ejemplo de triángulo, se ha seleccionado un triángulo equilátero para la distribución de los puntos de fuerza. Esto no tiene por qué cumplirse siempre. El triángulo también puede ser isósceles en caso de que para la aplicación

a la que se vaya a destinar la plataforma se necesite más fuerza para el grado de libertad pitch o que se necesiten más grados para el grado de libertad roll.

Al variar la longitud de los lados del triángulo y el tipo de triángulo (equilátero o isósceles), se están variando las palancas que influyen en la fuerza y el par motor necesario para cada grado de libertad. De igual manera se está variando el desplazamiento (o la rotación) dentro de cada uno de los grados de libertad.

Por último, tal y como se ha estado comentando hasta ahora, el pilar central debe estar situado en el baricentro de dicho triángulo. Como es de esperar, el centro de masas debe estar situado justo encima de este pilar.

Con la incorporación de este pilar telescópico se está logrando solucionar dos grandes problemas de este tipo de plataformas. En primer lugar, el pilar central es un eje estriado telescópico. La parte telescópica ya se ha explicado (es necesaria para el grado de libertad heave y para el pitch cuando el baricentro no coincide con el eje de giro). La parte del estriado es imprescindible para poder evitar un grado de libertad que aparece pero que no es controlable: el yaw o rotación alrededor del eje Y.

Este grado de libertad aparece debido a que las fuerzas que se aplican no lo hacen en la misma dirección en la que se

desea que gire la plataforma. Siempre se aplican con un ángulo de incidencia distinto.

Por otro lado, tal y como se muestra en la Figura 22 (abajo), este tipo de plataformas suelen llevar un muelle alrededor del eje central. Este muelle tiene el único objetivo de ayudar a los actuadores a soportar el peso de la masa que se sitúe arriba.

En la plataforma de 2DOF, al tener el eje central solidario con la base de la plataforma, éste aguantaba la mayor parte del peso, limitando a los actuadores a acelerar/frenar en cada grado de libertad. En la plataforma de 3DOF, al tener el eje telescópico (sube y baja), aunque esté el centro de masas bien situado, si no se añade el muelle, todo el peso recae sobre los actuadores.

La elección del muelle adecuado para cada plataforma no es trivial y hay que tener en cuenta diversos factores:

- Constante K : constante de elasticidad del muelle medida en $kg*mm$.
- Recorrido deseado.
- Masa que va a soportar.

Con estos factores y aplicando la ley de Hooke $|\vec{F}| = K * \Delta x$, que dice que si el muelle se estira o se comprime una pequeña distancia Δx respecto a su estado de equilibrio (no

deformado), la fuerza que hay que ejercer es proporcional a x (ver Figura 33). Se puede obtener la tabla 4: en ella se está haciendo un supuesto de un muelle con una constante de $K=0.907kg*mm$ y una masa de 140kg encima de la plataforma.

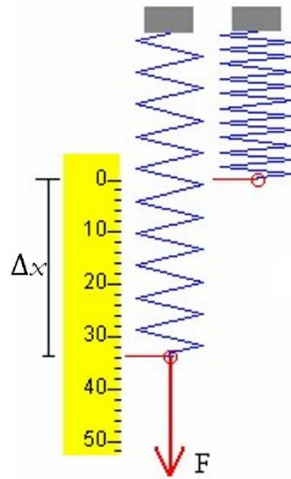


Figura 33: explicación del comportamiento de un muelle elástico.

Si se conoce el tamaño de las bielas que se van a poner (basándose en el par de los motores que se tienen o en los recorridos deseados para cada grado), se sabe el recorrido máximo para el grado de libertad heave. Con estos datos resulta fácil encontrar la zona en la que los actuadores deben realizar el mínimo trabajo.

Para lograr trabajar siempre dentro de esa zona, una vez obtenido el muelle que se necesita, se debe realizar algún mecanismo para poder pretensar o precargar el muelle. El mecanismo más utilizado consiste en introducir el muelle entre dos bridas que corren a través de un tornillo sin fin. La brida inferior es solidaria con el pilar mientras que la brida superior, que es solidaria al tornillo sin fin que a su vez forma parte del pilar telescópico, permite girar para desplazarla arriba o abajo y pretensar así el muelle, quedando fijada mediante otra contratuerca situada arriba de la brida. El mecanismo puede apreciarse en la Figura 34.

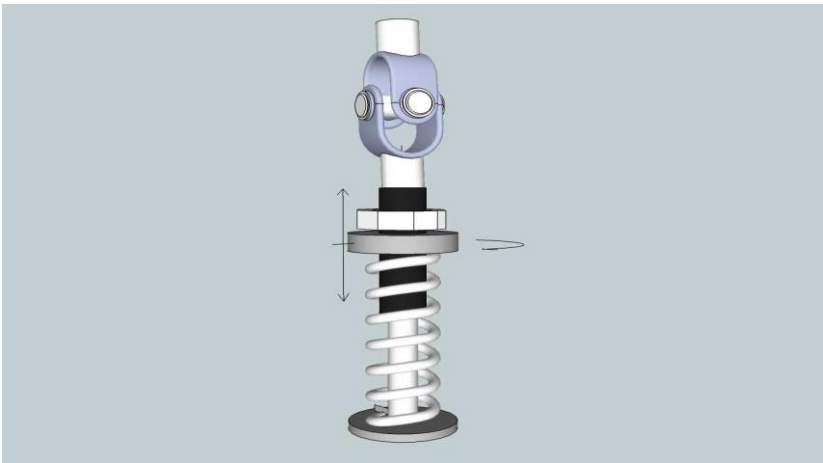


Figura 34: *mecanismo de pretensado del muelle.*

Otro de los aspectos a tener en cuenta es que el muelle, en su posición más comprimida, nunca debe superar la posición más baja de la plataforma, es decir, aquella en la que el heave

sea el mínimo alcanzable. Por otro lado, para que el muelle trabaje en el rango que se ha calculado, es posible que se deba levantar un poco respecto de la base fija de la plataforma.

3.4.2.- Diseño alternativo de plataforma 3DOF

Como se ha comentado en la sección anterior, este tipo de plataformas ha sido ampliamente utilizado por el equipo investigador del que el autor forma parte en muy diversos proyectos. Desde simuladores de tractor, hasta simuladores de bote de rescate marítimo.

Sin embargo, en el estudio actual, partiendo de que la plataforma a desarrollar debe tener capacidad para movilizar 1500kg, el hecho de incluir un eje telescópico central y un muelle no suponía una gran aportación, ya que una vez introducidos en determinada gama de productos en cuanto a motorreductores (los necesarios para mover estas masas), mover 1500kg o 2500kg no supone un sobreesfuerzo económico para el proyecto. Más bien al contrario, es decir, el sobreesfuerzo proviene precisamente de la incorporación del eje telescópico y todas las piezas a mecanizar para poder ajustar debidamente la pretensión del muelle central.

Es decir, una vez finalizado el diseño “clásico”, en base a nuestra experiencia, de la plataforma 3DOF para este

experimento y consultados los presupuestos del material requerido, se observó que las piezas mecanizadas y el muelle (muy específico y que requería una fabricación *ad hoc*) necesarios para el pilar central, costaban mucho más dinero que poner motores mucho más potentes y realizar un nuevo diseño de plataforma que evitase ese gasto.

Por todo esto, se tuvo que diseñar un nuevo sistema que evitase uno de los problemas que lograba evitar el muelle central: tener un yaw involuntario cuando se producía movimiento en cualquiera de los motores y reducir el peso soportado por éstos gracias al muelle.

Este sistema se basó en proporcionar un doble eje de salida a la reductora y diseñar una serie de mecanismos que fuesen capaces de evitar el movimiento indeseado, pero permitiendo los pequeños grados de libertad necesarios en cada articulación. La siguiente Figura 35 muestra el diseño conseguido.

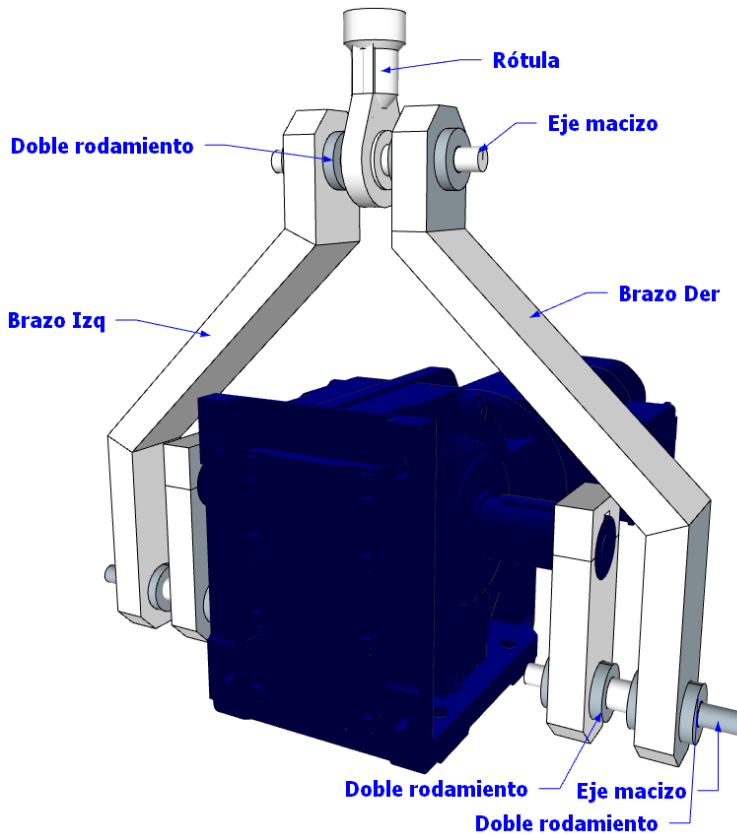


Figura 35: *diseño de piezas para evitar el yaw en plataformas 3DOF sin eje central*

3.5.- Descripción del aparato del experimento

Como se ha mencionado anteriormente, se diseñó y construyó ad-hoc una plataforma de movimiento paralelo de 3DOF para esta aplicación. Este mecanismo robótico utiliza tres motores eléctricos para generar movimientos de

rotación y traslación para los 12 usuarios simultáneos del sistema. Este dispositivo proporciona movimiento vertical traslacional -denominado *heave*- y dos tipos de movimiento rotacional -frontal y lateral, conocidos como *pitch* y *roll* respectivamente- que permiten a la parte móvil del mecanismo inclinarse alrededor de los ejes longitudinal y lateral, respectivamente, como se ve en la Figura 36. Como puede verse, se trata de una plataforma de movimiento paralelo 3DOF denominada como T1R2 (un movimiento de traslación y dos de rotación).

Los motores están dispuestos como se ve en la Figura 37 y la Figura 38. Con esta configuración, podemos utilizar la formulación de cinemática inversa de 3DOF descrita en [165] ya que este dispositivo utiliza las mismas cadenas cinemáticas, aunque con una estructura mecánica reforzada para sostener y mover el peso de 12 personas sin el uso de un pilar central para evitar el yaw (rotación alrededor del eje Y) indeseado.

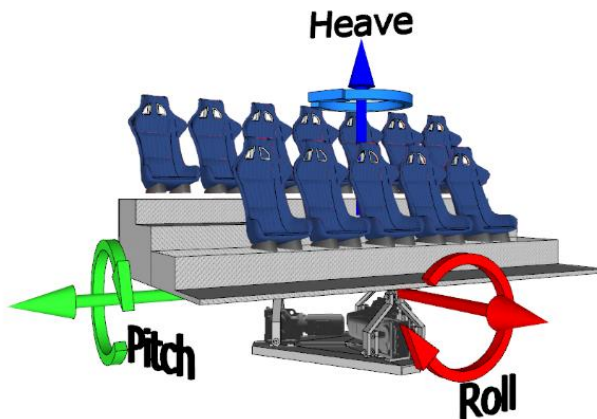


Figura 36: *diseño y grados de libertad de la plataforma de movimiento T1R2 3-DOF.*

En la Tabla 5 se muestran las principales características que describen la plataforma T1R2 3-DOF diseñada. Como puede observarse, los rangos de movimiento de la plataforma son pequeños. Sin embargo, es lo suficientemente potente como para crear grandes aceleraciones lineales y angulares.

Además del diseño, los motores seleccionados son un aspecto esencial para conseguir aceleraciones relativamente grandes. Es muy importante que el dispositivo alcance altas aceleraciones para que el software pueda introducir ciertos efectos según las peticiones de los usuarios. De lo contrario, podría ser necesario realizar movimientos cortos y de alta frecuencia, y los motores no serían capaces de reproducirlos mecánicamente. El dispositivo se diseñó para mover hasta

1500 kg (100 kg por usuario con 12 usuarios, más 300 kg para la estructura, los asientos, la tableta, etc.). Por tanto, se necesitaban motores muy potentes.

Para cumplir estos requisitos, se instalaron tres motores SEW-EuroDrive de 2,2 kW. Estos motores incluían una caja de cambios con una reducción de 58,34. Su velocidad nominal era de 1.400 rpm y el par nominal de salida era de 880 Nm. También estaban equipados con frenos incorporados y encoders de alta precisión. La biela incorporada al eje del motor -la que actúa directamente sobre la plataforma de movimiento- era de 12 cm entre ejes. Esto es mecánicamente equivalente a la biela descrita en [165].

Movimiento	Gama	Max. Aceleración
Pitch	$\pm 12.89^\circ$	$400 \text{ }^\circ/\text{s}^2$
Roll	$\pm 10.83^\circ$	$400 \text{ }^\circ/\text{s}^2$
Heave	$\pm 12.5 \text{ cm}$	$0.5 \text{ g} \approx 5 \text{ m}/\text{s}^2$

Tabla 5: *principales características de la plataforma de movimiento 3DOF*

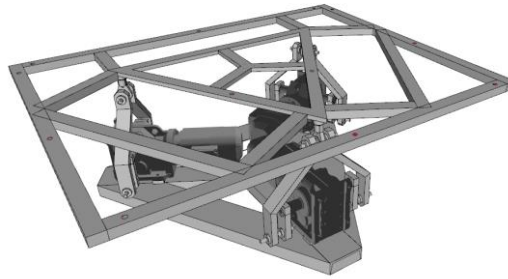


Figura 37: *colocación del motor y diseño de la base.*

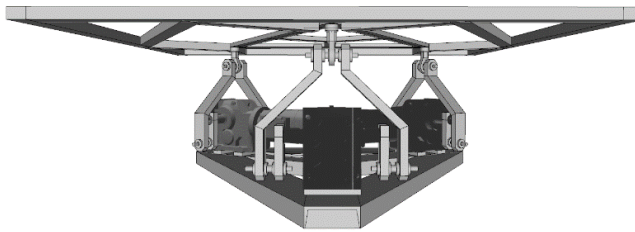


Figura 38: *vista frontal del diseño de la plataforma de movimiento.*

En cuanto a los límites de los movimientos de la plataforma, éstos vienen dados por el diseño constructivo y se cargan en los archivos de configuración de la cinemática, que es la capa de software que indica a cada motor la posición concreta que debe adoptar para conseguir una determinada combinación de grados de libertad.

Una vez conocido el espacio de trabajo de la plataforma, otro problema es la combinación de los distintos grados de libertad. Esto significa que, si, por ejemplo, se solicita que la plataforma esté a su máxima altura, el cabeceo y el balanceo que se pueden proporcionar en ese momento son nulos. En nuestro caso, la estrategia utilizada para llegar a un consenso entre los grados de libertad solicitados consiste en escalar hacia abajo cada grado de libertad en función - proporcionalmente- de lo solicitado y del máximo disponible.

3.6.- Descripción de las pruebas

Como se ha mencionado anteriormente, el sistema formaba parte de una campaña de educación vial [166]. El teatro 5D, donde estaba instalada la plataforma de movimiento, fue una de las actividades principales. El objetivo de este teatro interactivo 5D era mostrar diferentes escenarios de seguridad vial a 12 usuarios, utilizando la Realidad Mixta. Estos escenarios incluían accidentes y situaciones potencialmente peligrosas. Para ello, la aplicación consistía en una película interactiva de 10 minutos.

La película se creó utilizando tanto escenas virtuales generadas por ordenador en 3D como vídeos pregrabados con imágenes reales. La película se dividió en 14 secciones,

cada una de las cuales tenía un contenido educativo concreto que transmitir a los usuarios. En algunas secciones se utilizaron imágenes reales obtenidas con cámaras reales y en otras, escenas 3D generadas por ordenador.

Algunas escenas son generadas por ordenador porque recrean accidentes y no es deseable provocar accidentes reales para mostrarlos. Otras escenas se graban porque muestran carreteras peligrosas/defectuosas o muestran ejemplos de comportamientos temerarios reales grabados en vídeo.

Las escenas 3D consistían en animaciones creadas con Unity 3D. Se modeló una parte de la ciudad de Dammam, en Arabia Saudí, y se incluyó en la aplicación. Además, se incluyeron personas, tráfico y vehículos -con su correspondiente modelo físico-. Para aumentar la sensación de inmersión, se empleó una perspectiva en primera persona para mostrar el contenido virtual.

Las escenas de vídeo reales se grabaron mediante dos cámaras GoPro 4K. Estas cámaras se colocaron en un coche real y captaron vídeos de la ciudad de Dammam. Estas imágenes se editaron posteriormente y se adaptaron a las diferentes partes de la película en las que era conveniente dar una visión 100 % realista de diferentes riesgos o actitudes peligrosas durante la conducción. La Figura 39 y la Figura 40 muestran un ejemplo de una imagen virtual

generada por ordenador y una imagen real, respectivamente. La Figura 41 muestra las cámaras GoPro, utilizadas para grabar imágenes reales, instaladas en un coche.

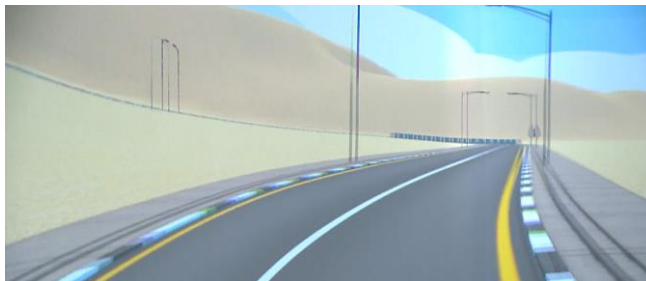


Figura 39: *captura de pantalla de la imagen generada por el gráfico*

Durante la película, se hacían preguntas a los usuarios mediante las tablets instaladas cerca de los asientos. Para ello, el servidor de simulación de la película estaba en comunicación con las tablets de los usuarios. Según las respuestas, el sistema se comportaba de formas diferentes. Si la mayoría de las respuestas eran correctas, se entendía que el concepto a enseñar en esa parte de la película estaba aprendido. Por lo tanto, no era necesario ningún comportamiento del sistema especialmente brusco para captar la atención de los usuarios.

Por el contrario, si la mayoría de las respuestas eran erróneas, el sistema se comportaba de forma algo más brusca, intentando que los usuarios fueran conscientes de sus errores. La Figura 42 muestra un ejemplo de una

pregunta formulada a los usuarios. La pregunta aparece en la pantalla del teatro y se muestra una tablet virtual para pedir a los usuarios que respondan a la pregunta en su propia tablet.



Figura 40: *captura de pantalla de un par estereoscópico real capturado con el dispositivo de grabación.*



Figura 41: *dispositivos de grabación instalados en un coche mientras se filma.*

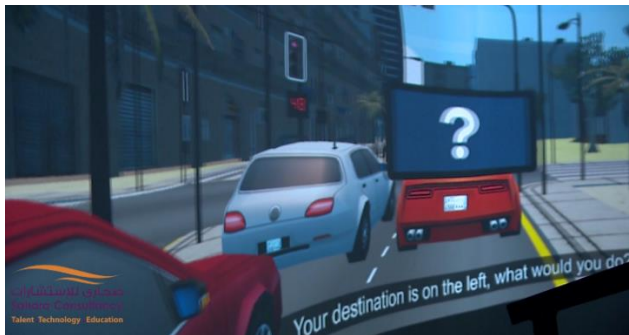


Figura 42: pantalla proyectada en una escena virtual de la película con una pregunta para los usuarios.

Además, cuando un usuario concreto fallaba una pregunta, se activaba una válvula controlada por el servidor de simulación, que lanzaba un poco de agua vaporizada al usuario para que se sintiera brevemente incómodo y consciente del fallo. Del mismo modo, cuando la respuesta era correcta, el usuario recibía un suave soplo de aire (a través de otra válvula), generando una sensación agradable.

Además, en función del contenido que representaba la escena, una máquina de olores liberaba diferentes aromas por el teatro para aumentar la sensación de inmersión. Asimismo, cuando se producía un accidente en el vehículo simulado, una máquina de humo se activaba durante 100 ms y liberaba una cantidad notable de humo. Tras cada activación de la máquina, unos ventiladores extraían automáticamente el humo del recinto de simulación para evitar problemas respiratorios.

En este punto, es importante destacar el papel de la participación del usuario en el sistema. Por un lado, el usuario puede considerarse activo a la hora de responder a las preguntas planteadas a través de las tabletas y, en función de su respuesta, recibirá, o no, determinados estímulos. Por otro lado, cuando se trata de la propia película y de las aceleraciones de la plataforma de movimiento, el usuario final es completamente pasivo, ya que sus acciones no modifican el contenido.

3.7.- Señales gravito-inerciales y características del pregrabado

Los usuarios del cine se colocaron en sus asientos sobre la plataforma de movimiento mientras el mecanismo robótico se movía según las órdenes enviadas por el software de simulación. Para crear señales de movimiento adecuadas y coherentes con el contenido de la película, ésta se dividió en 14 escenas de menos de 45 segundos cada una. La frecuencia de muestreo se fijó en 50 Hz, ya que esta frecuencia era varias veces superior a la frecuencia de movimiento prevista. Cada una de estas escenas fue controlada por un archivo separado, donde se almacenó el conjunto deseado de DOF para la plataforma de movimiento y se indexó a intervalos de 20 ms. Esto también ayuda a garantizar que se produzca

un movimiento continuo en cada DOF, lo que aumenta la inmersión de la experiencia del usuario.

Estos archivos se generaron originalmente de dos maneras, según la forma en que se generó la alimentación visual correspondiente. Por lo tanto, la aplicación proporciona señales de movimiento clásicas -generadas a partir de escenas de animación basadas en la simulación- y señales de movimiento no clásicas -procedentes de escenas de vídeo reales-:

- *Escenas de animación basadas en la simulación:* los archivos correspondientes a las escenas de animación se grabaron utilizando el algoritmo de washout clásico. Estas escenas incluyen la simulación del movimiento virtual, lo que permite utilizar un MCA para generar claves de movimiento. La implementación utilizada en nuestros experimentos sigue el esquema mostrado en Reid-Nahon [71].
- *Escenas de vídeo reales:* estos archivos se generaron de forma semimanual, para que el movimiento de la plataforma fuera similar al movimiento visual que mostraba la película. Para ello, se desarrolló un pequeño software que permitía mapear los movimientos de un joystick con 3 ejes analógicos combinados a las posiciones deseadas de la plataforma de movimiento. Este mapeo se producía

en tiempo real mientras se reproducía la película, sin almacenar los valores en el archivo final. Esto significa que el mapeo del joystick se envió a la cinemática inversa de la plataforma de movimiento y también a una estructura de datos de memoria temporal simultáneamente. Esta estructura de datos permitía cargar los comandos de movimiento y reproducirlos de nuevo mientras se visualizaba la película, sobrescribiendo posteriormente los comandos de movimiento si no se consideraban satisfactorios. Este proceso se repitió hasta que los archivos de movimiento se consideraron aceptables.

Una vez grabados los 14 archivos de movimiento, se aplicaron dos procesos de perfeccionamiento. En primer lugar, los diseñadores preparamos una versión inicial de los archivos de movimiento y, a continuación, un conjunto de expertos preparó la versión final.

En cuanto al primer proceso, se realizó una instalación completa en el laboratorio y los diseñadores llevaron a cabo los primeros experimentos con todo el sistema una vez grabados los archivos. Estos archivos representan los movimientos que los diseñadores consideraron individualmente aceptables en cada escena.

A continuación, se realizó una reproducción completa de toda la película, incluidos los movimientos de la plataforma

de movimiento, para comprobar si la sensación transmitida era aceptable, especialmente en las diferentes transiciones entre los distintos archivos de movimiento. Si el resultado no era el esperado, se editaban los archivos con el software explicado en el apartado siguiente. Se tuvo especial cuidado con las transiciones. Si una transición no era suave o el movimiento de las dos partes diferentes no se consideraba coherente, se editaban las escenas implicadas. Este proceso se repitió hasta obtener un resultado inicialmente satisfactorio en opinión de los diseñadores.

3.8.- Desarrollo de un software de edición del movimiento basado en Wideband Delphi

Con el fin de facilitar la edición de los archivos de movimiento, se creó una herramienta informática que permitía la creación de nuevos archivos de movimiento, pero también la carga y manipulación de los ya existentes de forma muy sencilla. Las Figuras 43 y 44 muestran algunas capturas de pantalla de la herramienta.

La aplicación permitía editar y controlar cada DOF de forma independiente y también controlar todos ellos de forma conjunta, de modo que era posible, por ejemplo, escalar todos los movimientos en caso de que los diseñadores quisieran transmitir sensaciones más bruscas o suavizarlos.

También era posible modificar el tiempo en que se pedía un determinado movimiento a la plataforma, adelantando o retrasando las señales de movimiento. Esto fue especialmente útil para ajustar los movimientos con lo que ocurría en cada momento de la película.

En algunas escenas, la grabación inicial se realizó con un joystick. Por lo tanto, el movimiento del manipulador robótico estaba algo retrasado en muchos de los eventos con respecto a la película, debido al tiempo de reacción humano y a la inercia mecánica de la plataforma de movimiento. Esto también ocurre con las señales de movimiento clásicas generadas con un MCA, en las que el retardo causado por la inercia y el retardo de recorrido de la plataforma de movimiento provocan pequeñas pero notables desincronizaciones entre las señales visuales y las inerciales, pudiendo ocasionar sensación de mareo a parte de los usuarios. Como los diseñadores ya conocen la inercia y los tiempos de reacción del mecanismo robótico, pueden anticiparse a algunas señales de movimiento para conseguir una perfecta sincronización entre el movimiento visual y el real.

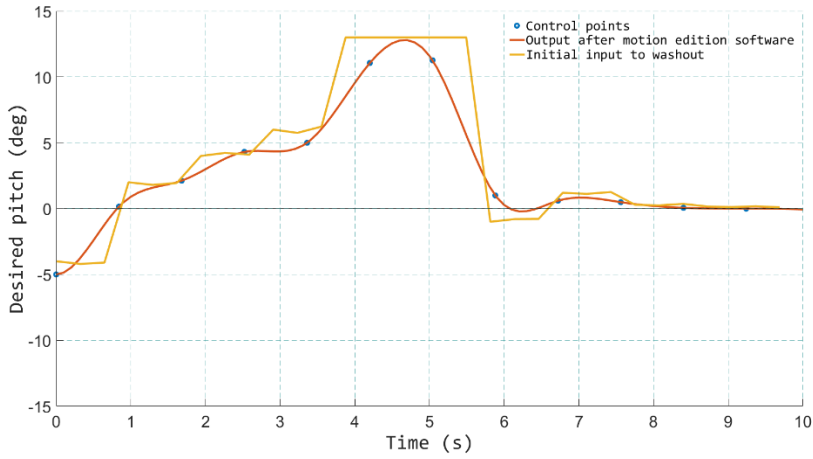


Figura 43: *software de edición de movimiento - modificando el paso desde un archivo guardado.*

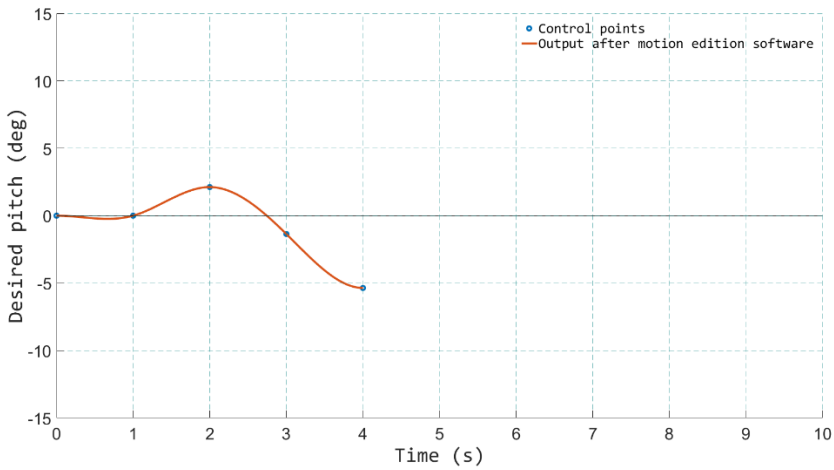


Figura 44: *software de edición de movimiento - creación de un nuevo archivo de movimiento.*

Para ello, la interfaz del software de edición de movimiento permite al usuario mover los puntos de control de una curva paramétrica NURBS (Non-Uniform Rational Basis Spline) que describe la curva de tiempo/posición de cada DOF. Esta NURBS se crea a partir de los datos almacenados en los archivos de movimiento y simplifica enormemente el proceso de edición de las señales de movimiento. Moviendo los puntos de control de las NURBS, los diseñadores pueden hacer fácilmente correcciones en el comportamiento de la plataforma de movimiento. Esta herramienta se utilizó en la fase inicial de validación por parte de los diseñadores y también en la validación por parte de los expertos, que fueron los que más modificaciones introdujeron.

Al llevar a cabo esta configuración inicial, la parte más difícil fue sin duda ajustar en tiempo y magnitud las claves de movimiento, no habiendo pleno consenso entre los diseñadores. Por ello, se consideró necesario un proceso de perfeccionamiento basado en expertos, ya que los diseñadores no estaban seguros de que el movimiento grabado fuera lo suficientemente bueno. Para ello, se seleccionaron tres expertos en RV y sistemas inmersivos (con más de una década de experiencia en simuladores) que pasaron tres días completos, junto a los diseñadores, para validar el movimiento de la plataforma.

El método utilizado para llegar a un acuerdo sobre el mejor conjunto de señales de movimiento para cada una de las secuencias se basó en la técnica Wideband Delphi. El *modus operandi* se describe en la Figura 45. Los expertos tuvieron acceso tanto a los parámetros del MCA como al software de edición de movimiento, de modo que pudieron apoyarse en estas dos fuentes de información/acción para ajustar el sistema de movimiento.

Puntuación global = 0.0

Mientras (PuntuaciónTotal < 8.0) do

{

para cada escena hacer

{

Reproduce la escena con los movimientos de la plataforma de movimiento

PuntuaciónMediaEscena = 0.0

Mientras (PuntuaciónEscena < 8.0) do

{

Para cada experto hacer

{

Comentarios para la escena general

{

Puntos fuertes

Puntos débiles

Casos individuales (choque de vehículos, rotura de la fuerza, etc.)

```

    }

    // 0 == los movimientos no se corresponden con la escena
    // 10 == movimientos perfectamente integrados en la escena
    PuntuacionesEscenas[expert] = valorado de 0 a 10
}

PuntuacionMediaEscena = PuntuacionesEscenas [ ] promedio
Si (PuntuacionMediaEscena < 8.0)
    Modificar los movimientos según los comentarios
}

Si (escena == 1)
    PuntuaciónGlobal = PuntuacionMediaEscena;
Si no
{
    Reproducir la transición entre cada escena y la anterior
    Media de transición = 0.0
    while (PuntuacionMediaTransicion < 8.0) do
    {
        Para cada experto hacer
        {
            Comentarios para la escena general
            PuntuacionesTransiciones[expert] = valorado de 0 a 10
        }
        PuntuacionMediaTransicion=PuntuacionesTransiciones [ ] promedio
        Si (PuntuacionMediaTransicion < 8.0)

```

```

    }
  }
}
Reproducir la película completa
para cada experto hacer
{
  PuntuaciónPelícula[experto] = valorado de 0 a 10
  Si (PuntuaciónPelícula [expert] < 8.0)
    Comentario para la experiencia general
}
PuntuacionTotal = PuntuaciónPelícula [ ] promedio
}

```

Figura 45: método de ajuste basado Wideband Delphi.

3.9.- Desarrollo del experimento

Una vez guardados todos los archivos correspondientes al ajuste final de los expertos, los experimentos con usuarios estaban listos para comenzar. Dadas las diferencias socioculturales entre los habitantes de Arabia Saudí y España, los autores consideraron que los experimentos con usuarios debían realizarse con personas saudíes locales.

Para completar los experimentos, se seleccionaron 3 grupos de 12 participantes. Dos de ellos estaban compuestos exclusivamente por hombres, y otro por mujeres y niños (por restricciones culturales locales). En la selección de los usuarios para los experimentos se tuvo en cuenta una amplia gama de edades, de 10 a 75 años, trabajos (personas que trabajan en oficinas, otras en el transporte, etc.) y niveles socioeconómicos.

Una vez instalado el sistema en Arabia Saudí y formados los grupos, los usuarios pudieron responder a las diferentes preguntas que se les plantearon para la validación del sistema. Esto se realizó mediante una pequeña aplicación instalada en las tabletas que tenían los usuarios en sus asientos. La Figura 46 muestra el experimento con uno de los grupos compuesto exclusivamente por hombres.

Los experimentos consistieron en realizar una sesión completa con cada uno de los grupos, reproduciendo la película antes y después de las modificaciones realizadas por los expertos. Se reprodujo primero la película con el ajuste inicial (el de los diseñadores) de los tres grupos y luego con el ajuste validado por los expertos. Hubo una diferencia de una hora entre las dos sesiones. Por lo tanto, el experimento analiza y compara la configuración de movimiento inicial (condición de referencia) y la configuración de movimiento basada en los expertos (condición final).

Al final de cada ronda, los 12 usuarios de cada grupo respondieron a una serie de preguntas sobre la percepción que tenían de los movimientos de la plataforma de movimiento.

Hay que tener en cuenta que, dada la diversidad de las personas seleccionadas, las preguntas tenían que ser muy sencillas de entender y responder. En la Tabla 6 se describe el cuestionario que todos los usuarios tuvieron que responder dos veces.



Figura 46: *usuarios en la plataforma de movimiento durante uno de los experimentos*

Tesis doctoral:
Mejoras basadas en heurísticas para la percepción de estímulos de movimiento en simuladores de Realidad Virtual y Realidad Aumentada

#	Pregunta	Criterios de respuesta
1	¿Sintió mareos?	0 = ninguno
		10 = sí, mucho
2	¿Ha sido capaz de distinguir entre una aceleración lenta y una fuerte?	0 = nada
		10 = sí, perfectamente
3	¿Fue capaz de saber si el vehículo giraba a la derecha o a la izquierda con los ojos cerrados?	0 = nada
		10 = sí, perfectamente
4	¿Se ha sentido alterado durante las tres colisiones?	0 = nada
		10 = sí, mucho
5	¿Cree que los movimientos de la plataforma son adecuados para todos los públicos?	0 = nada
		10 = sí
6	Valora de 0 a 10 si la plataforma de movimiento te ha proporcionado sensaciones extra.	0 = nada
		10 = muchos
7	¿Ha experimentado previamente un simulador?	Sí
		No
8	¿Recomendarías esta experiencia a tus amigos?	Sí
		No
9	Califique la experiencia general de 0 a 10.	0 = muy malo
		10 = muy bueno

Tabla 6: cuestionario utilizado en los experimentos.

Una vez completados los experimentos por estos 36 usuarios, el sistema estaba listo para ser utilizado por todos los asistentes a la exposición.

También se realizó una evaluación rápida con el público en general. Los usuarios podían acceder a las instalaciones de la exposición en grupos de 50 personas, y cada uno de ellos debía registrarse a la entrada (check-in) y a la salida (check-out) de la exposición, por medio de tablets.

A cada usuario se le entregó una tarjeta con un código QR que servía de identificador en los diferentes sistemas de la exposición, incluida la Tablet incorporada en los asientos del teatro 5D. La encuesta de entrada solicitaba información general sobre el usuario y un breve cuestionario sobre conceptos de seguridad vial. La encuesta de salida tenía 40 preguntas.

Algunas se utilizaron para comprobar si los conocimientos y la concienciación sobre la seguridad vial habían mejorado con la exposición. Otras fueron utilizadas por los autores de cada sistema de la exposición para tener una rápida evaluación global de la aceptación de cada uno de estos elementos por parte del público en general. Concretamente, en referencia al teatro 5D, se hicieron tres preguntas que se pueden observar en la Tabla 7.

#	Pregunta	Criterios de respuesta
1	¿Te pareció adecuado incorporar el movimiento en Cinema 5D para dotarlo de mayor realismo?	Sí
		No
2	¿Te has mareado en el Cine 5D?	Sí
		No
3	Valoración global de 5D Cinema de 0 a 10.	0 = muy pobre
		10 = muy bueno

Tabla 7: *preguntas relevantes en la encuesta de salida*

3.10.- Resultados

Una de las cuestiones más críticas para evaluar, dado el perfil de los usuarios a los que se dirige el sistema, era si se sentían mareados o no. Otra fuente importante de información procede de la valoración global (última pregunta de la Tabla 6). Sin embargo, para obtener una imagen más clara de la percepción de los 36 usuarios de la prueba, creamos una variable de *satisfacción* que resumía las respuestas dadas a las preguntas de 0 a 10 de la Tabla 6. Esta variable de satisfacción es una media ponderada de las siete

preguntas (contestadas de 0-10) de este cuestionario, teniendo la primera y la última pregunta el doble de peso que el resto dada su relevancia.

Para analizar los datos recogidos en los experimentos, aplicamos pruebas estadísticas a los conjuntos de datos. Se utilizó el programa SPSS 26 para realizar estos análisis. En primer lugar, es importante comprobar si los conjuntos de datos siguen una distribución normal.

La prueba de Kolmogorov-Smirnov, la prueba de Anderson-Darling y la prueba de Shapiro-Wilk indicaron que todos los conjuntos de datos de longitud 36 seguían una distribución normal y, por lo tanto, podemos utilizar pruebas paramétricas como pruebas t de datos emparejados [167] para analizar estos conjuntos de datos. En aras de la concreción, sólo mostramos los resultados de la prueba de normalidad de la variable de satisfacción: Kolmogorov-Smirnov $D = 0,15451$ y valor $p = 0,5610$; Anderson-Darling $A = 0,25912$ y valor $p = 0,1209$; Shapiro-Wilk $W = 0,89542$ y valor $p = 0,3125$.

Los resultados de aplicar una prueba t pareada a estos conjuntos de datos se resumen en la Tabla 8. Como puede observarse, casi todas las variables -seis de las ocho- reportan valores estadísticamente mejores en el post-test (condición final) con respecto al pre-test (condición inicial). Por ejemplo, la variable satisfacción, que resume el

experimento, mejora de 7,556 a 8,727, con un valor t de -7,146 y un valor p inferior a 10^{-3} . Otro cambio importante se produce en el valor de la percepción general del simulador, que pasa de 8,361 a 9,639, un aumento importante. El mareo se reduce de 2,722 a 0,306. La percepción de la aceleración ha mejorado desde el pre-test hasta el post-test, aunque sus valores están lejos de 10. La percepción de la sensación en los giros parece aumentar ligeramente, pero sin un resultado estadísticamente significativo.

La percepción de los accidentes también aumentó ligeramente tras las modificaciones manuales, ya que pasa de 6,306 a 6,528. Estos valores también están lejos de ser 10, ya que las altas aceleraciones de una colisión son imposibles de reproducir con una plataforma de movimiento; de hecho, no es en absoluto aconsejable reproducirlas aunque fuera posible ya que los usuarios podrían sufrir daños. Por último, cuando se les preguntó en el pre-test si recomendarían el simulador a sus conocidos, encontramos que el 86,1 % de los usuarios lo harían, pero este valor cambia al 100 % en el post-test, incluso teniendo en cuenta que algunas personas se habían sentido ligeramente mareadas.

En las Figuras 47 y 48 se muestran desgloses detallados de las dos variables más importantes analizadas en la Tabla 8.

Pregunta/ variable	Línea base (pre-test)		Final (post-test)		Valor t	Valor p
	Media	D. estándar	Media	D.estándar		
1	2.722	2.972	0.306	0.856	5.506	< 10 ⁻³
2	6.361	1.988	7.417	2.048	-5.012	< 10 ⁻³
3	7.056	2.042	7.333	1.957	-1.616	.115
4	6.306	2.713	6.528	2.823	-2.092	.044
5	8.111	1.894	9.694	0.951	-5.202	< 10 ⁻³
6	9.167	1.082	9.389	0.964	-1.348	.186
9	8.361	1.839	9.639	0.867	-4.154	< 10 ⁻³
Satisfacción	7.556	1.234	8.727	0.700	-7.146	< 10 ⁻³
Grados de libertad = 35						

Tabla 8: resultados de las pruebas estadísticas aplicadas a los conjuntos de datos de longitud 36.

Además, la preprueba muestra a 13 usuarios por encima de la media de mareos, fijados en una puntuación de 2,722, con siete de ellos por encima de la desviación estándar. Sin embargo, en el posttest, sólo cinco usuarios por encima de la media se sintieron mareados, fijados en una puntuación de 0,306.

A esto hay que añadir que casi todos los que se califican por encima de la media en lo referente al mareo, tanto en el pre-test como en el post-test, están encuadrados en el grupo de mujeres y juniors. Por otro lado, cabe destacar que, de los cinco usuarios que habían probado previamente un

simulador, sólo uno de ellos mostró signos de mareo en el pre-test. Este signo desapareció en el post-test.

Dada la consistencia de los datos, podemos deducir con seguridad que las mejoras se deben a las modificaciones introducidas por los expertos. Esto demuestra que la condición final es una condición mejorada con respecto a la línea de base y, por lo tanto, podemos concluir que el método propuesto es útil.

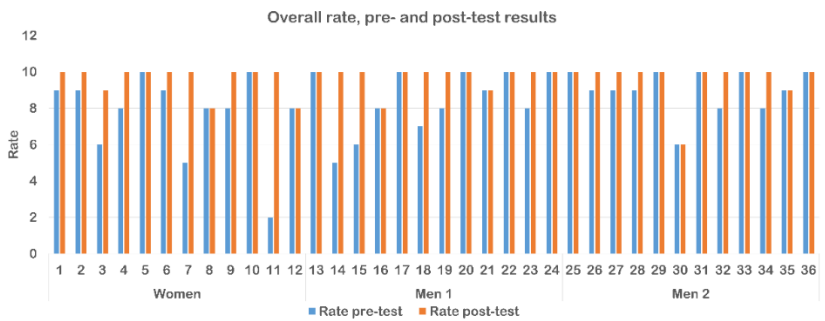


Figura 47: resultados de la pregunta 9 (valoración global).



Figura 48: resultados de la pregunta de satisfacción.

Por último, y en cuanto a los resultados de las tres preguntas realizadas a los usuarios que han pasado por el cine5D, el 98 % de los usuarios considera correcto haber incorporado una plataforma de movimiento. Sólo el 2,5 % se sintió mareado (no sabemos en qué grado porque es una pregunta de sí/no). La valoración media general es de 8.95 puntos sobre 10.

3.11.- Conclusiones

Tras un análisis exhaustivo de los resultados obtenidos, se pueden sacar varias conclusiones que se dividirán en dos bloques: expertos y usuarios habituales.

En primer lugar, analizaremos los comentarios más significativos realizados por los expertos que realizaron la parametrización de los movimientos de la plataforma de movimiento. Posteriormente, se extraerán las conclusiones sobre la validez de dicha parametrización en base a los resultados aportados por los usuarios de prueba.

El primer problema señalado por los expertos fue que los movimientos generados por la MCA eran, en muchos casos, demasiado bruscos o demasiado suaves, es decir, la plataforma tenía o bien movimientos prácticamente imperceptibles o movimientos demasiado radicales. No había equilibrio entre ellos durante la película. La solución

a este problema se consiguió limitando aún más los parámetros de los filtros de pasa baja y pasa alta en la configuración del MCA y reconstruyendo los archivos de generación de movimiento. De este modo, se evitó que la plataforma de movimiento intentara reproducir las aceleraciones de frecuencia muy baja o muy alta, dejando sólo las de frecuencia media.

Por otro lado, y en contradicción con lo que habían comentado anteriormente, los expertos consideraron que sería interesante, desde un punto de vista pedagógico y de simulación, enfatizar ciertos eventos con movimientos específicos de la plataforma de movimiento. Para poder resolver esta cuestión -al no ser un método en tiempo real- colocamos un marcador temporal en cada una de las escenas. Con ello, teníamos una referencia precisa del momento en el que debíamos introducir un determinado evento. En concreto, se nos pidió que hiciéramos modificaciones en las tres colisiones que se produjeron a lo largo de la película, todas ellas situadas en escenas generadas a partir de animaciones, como es lógico por motivos de seguridad. Al haber delimitado los filtros pasa baja y pasa alta, el impacto del vehículo pasaba casi desapercibido.

Esta modificación se realizó, mediante el software de edición implementado, añadiendo varios puntos de control a la zona temporal correspondiente en los gráficos de pitch

y roll para poder generar un movimiento muy corto (de alta frecuencia) y una relativamente alta amplitud.

Por otro lado, los expertos coincidieron en que las transiciones de una escena a otra debían ser lo más suaves posibles, evitando, por ejemplo, que una escena termine con un roll de 10° y la siguiente comience con un pitch de -10° . Esto es algo que ocurre de forma recurrente, ya que había muchos cambios entre las escenas virtuales y las reales. Según los expertos, esos saltos entre escenas provocarían mareos a los usuarios.

En lo referente a los usuarios, tras las pruebas realizadas con los tres grupos, se puede concluir que, en general, las personas prefieren el movimiento de la plataforma tras los ajustes realizados por los expertos. Un claro ejemplo de ello es la importante disminución que se produjo en la cantidad de personas que se marearon en el simulador. Cabe destacar que Hancock [168] establece que, en general, las mujeres son susceptibles de marearse en los simuladores. Esto concuerda con los resultados de la primera prueba (los movimientos originales de los diseñadores), pero no con los resultados de la segunda (con los movimientos refinados por los expertos), donde la disminución de los mareos en las mujeres ha sido mucho más significativa que en los hombres.

3.12.- Implicaciones prácticas

Gracias a las modificaciones introducidas por los expertos, casi todos los usuarios coinciden en que su percepción de los accidentes es mucho más impactante que en las primeras pruebas. Esto es muy importante desde el punto de vista formativo.

En general, y teniendo en cuenta los resultados y las limitaciones de este estudio, podemos concluir que el MCA funciona generalmente bien, pero hay ocasiones en las que su uso debe restringirse o modificarse, bien porque no se pueden obtener sus inputs, o bien porque es muy importante reforzar ciertos movimientos, reduciendo otros. Este conjunto de resultados invita a seguir trabajando en estas tecnologías mediante nuevos desarrollos y estudios.

Concretamente, en el ámbito de la conducción, aportaría mucho poder conocer exactamente qué aceleraciones son las que se pierden en una configuración clásica de un MCA y qué configuraciones se reproducen de manera fidedigna.

Además, de cara a futuros trabajos, sería muy interesante probar la generación de ciertas heurísticas para simuladores en tiempo real que, obviando el MCA, pudieran introducir ciertos movimientos directamente en la plataforma de movimiento. Por supuesto, estas heurísticas deben ser personalizables en función del público objetivo: la

plataforma de movimiento debería comportarse de forma diferente si el usuario es un experto piloto de carreras entrenando con un complejo simulador o si el usuario es simplemente un niño jugando a un juego de coches.

CAPÍTULO 4: Caracterización de la pérdida de fidelidad

4.1.- Introducción y contexto

Partiendo de la base de que los simuladores cada vez están más presentes en nuestra vida cotidiana, cientos de investigadores en todo el mundo están trabajando para intentar hacerlos cada vez más inmersivos, prácticos y fáciles de utilizar. Desde los primeros simuladores desarrollados hace ya varias décadas hasta los de hoy en día, la evolución ha sido sorprendente. Parte de esta evolución se ha basado en la introducción de plataformas de movimiento que reproduzcan, lo más fielmente posible, las aceleraciones de los vehículos simulados y esto pasa por las mejoras tanto en el hardware como en el software que las controla y los MCA que generan las claves de movimiento para enviar a la plataforma.

En cuanto a la parte hardware, las plataformas de movimiento tienen un gran reto que consiste en intentar reproducir aceleraciones, de un vehículo que no tiene limitación, mediante un sistema de actuadores que sí está limitado en el espacio.

Respecto a la parte software, existen infinidad de implementaciones de estos MCA, pero el más extendido es el conocido como *classical washout*, cuyo esquema básico se reproduce en la Figura 52. Una de las partes más complejas en el desarrollo de un simulador con plataforma de movimiento radica en configurar adecuadamente los filtros utilizados por este tipo de algoritmos. Existe amplia documentación en el estado del arte a este respecto, pero es raro que se den detalles concretos sobre las distintas configuraciones utilizadas, ya que, dado lo costoso proceso de configuración de estos filtros, las empresas y centros de investigación suelen ser recelosos de publicar los resultados. De la configuración de estos filtros dependerá qué aceleraciones serán reproducidas por la plataforma de movimiento y qué aceleraciones no. De lo que no hay duda es que es difícil que se reproduzcan todas debido a las limitaciones físicas de los actuadores de las plataformas.

4.2.- Planteamiento del problema a resolver

En función de las aceleraciones que se pierdan en un simulador debido a las restricciones constructivas de una plataforma de movimiento, habrá detalles de la simulación que se esté produciendo que no serán percibidos por el usuario. Según el uso del simulador, estas aceleraciones

perdidas (y por tanto el evento que las ha producido) serán de mayor o menor relevancia.

En el caso que nos ocupa, se va a intentar localizar las aceleraciones que se pierden con una configuración estándar de washout para un simulador formativo de conducción de coche que consta de una plataforma de movimiento 6DOF.

Para ello se va a sensorizar un coche real, concretamente un BMW 325Xi AUT y se van a introducir los datos recogidos a un software que simula el comportamiento de una plataforma de movimiento 6DOF y todo el software que la rodea, incluyendo el MCA. El esquema puede observarse en la Figura 49.

En función de los resultados obtenidos se evaluará la importancia o no de los datos que se pierden, estudiando si es posible implementar alguna solución.

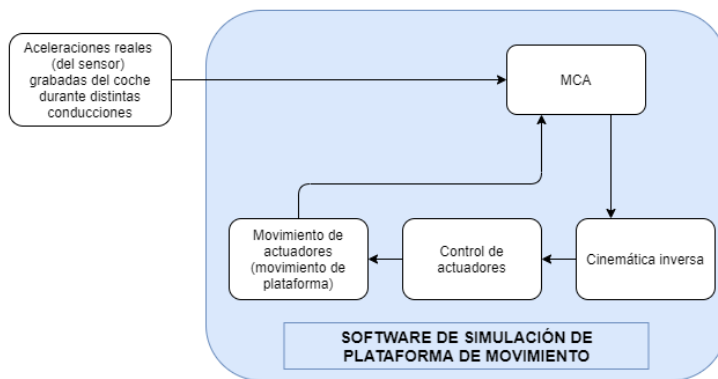


Figura 49: *esquema de las pruebas a realizar*

4.3.- Recogida de datos

Lo primero necesario fue obtener las aceleraciones reales de un coche en distintas circunstancias. Para ello se utilizó un sensor de 10 ejes llamado “*10 Axis High Precision Inertial Navigation*”. Este sensor registra aceleraciones (X,Y,Z), velocidades angulares (rotX, rotY, rotZ), ángulos (X, Y, Z) y posición GPS, de ahí el ser de 10 ejes (3+3+3+1). El sensor seleccionado tiene unos márgenes de error inferiores a 0.05° en ángulos, 0.05°/s en velocidades angulares y 0.1g en aceleraciones, lo que se considera suficiente precisión para las pruebas a realizar.

El sensor tiene diversos modos de funcionamiento. Se seleccionó el modo en el que se guardan los datos en tiempo real en un fichero .dat, cada uno de ellos con marca temporal, a una frecuencia de 100Hz. Tras la calibración del sensor en todos los ejes y medidas, se realizaron pruebas iniciales para asegurar que los datos obtenidos eran fiables y se instaló el sensor en la zona central del salpicadero de un BMW 325XI AUT de 225CV, de manera que los datos obtenidos puedan servir como referencia para la caracterización del movimiento del vehículo.

Para poder sincronizar temporalmente los datos registrados por el sensor con lo que ocurre en cada momento en la conducción, se instaló una cámara GoPro que grabó todo el

recorrido realizado. En cada pequeño evento que se producía (pasar por encima de un badén, cambiar de tipo de asfalto, chafar con una rueda algo de arena del borde de la carretera, etc) se describía verbalmente para dejarlo registrado en el vídeo. La Figura 50 muestra la instalación realizada en el coche y unas capturas de los vídeos grabados con la cámara.



Figura 50: *instalación de sensor, cámara y laptop para recogida de muestras reales*

Se obtuvo varias horas de grabaciones (datos y vídeo) en 3 tipos de firme (tierra, asfalto en mal estado, asfalto en buen estado), distintos tipos de vía (urbanización y autovía) y con muy diversos eventos.

La Figura 51 muestra el aspecto de los datos de entrada recogidos desde el sensor. Como puede observarse, el grueso

de los datos corresponde a la propia vibración que se produce al conducir en función de la velocidad y del tipo de firme, pero destacan muchas aceleraciones que precisamente corresponden temporalmente con los eventos que se pretende evaluar.

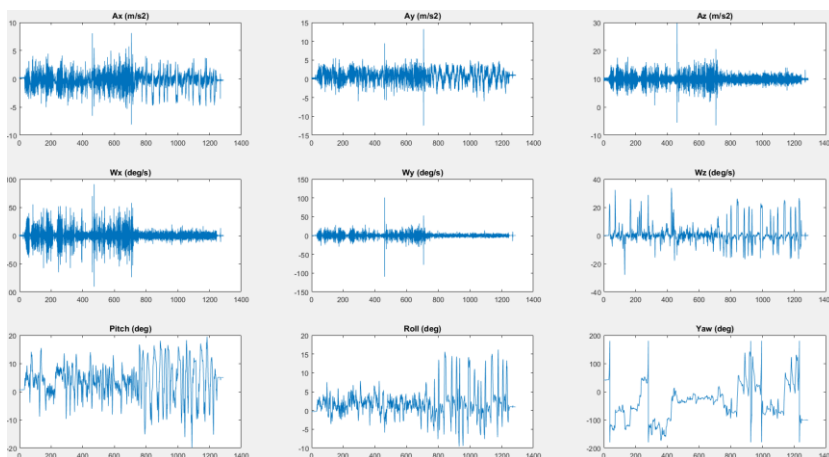


Figura 51: datos recogidos por el sensor

4.4.- Simulador de plataforma 6DOF

Con los datos registrados, el siguiente paso consistió en observar cómo se comporta una plataforma de movimiento con los datos de entrada registrados por el sensor en las pruebas realizadas. Para ello, en lugar de utilizar una plataforma de movimiento 6DOF real, que incrementaría considerablemente el coste de este estudio a la vez que

dificultaría la medición de las aceleraciones obtenidas, se ha utilizado el simulador de plataforma descrito en [169].

Este simulador tiene un comportamiento muy similar al de una plataforma real, pero está basado en cálculos numéricos realizados en tiempo real por ordenador. De esta forma, ante las mismas entradas que una plataforma real, el simulador genera señales de salida similares, que es precisamente lo que se pretende evaluar.

Este software puede configurarse mediante unos ficheros XML donde se describe por completo el modelo físico de plataforma real (tipo de motores y características físicas, posición, tamaños de base móvil y fija, retrasos mecánicos, etc). Además, también es posible configurar la fuente de datos de entrada, que en nuestro caso fueron los ficheros con los datos recogidos por los sensores, la frecuencia (paso) de simulación, la duración de la prueba en función de la cantidad de datos de entrada disponibles y dónde se deben recoger los datos de salida de la simulación, que en nuestro caso fue en ficheros .dat separados para cada uno de los DOFs.

La plataforma simulada se ha configurado para comportarse como una plataforma de movimiento 6DOFs estándar, diseñada para soportar 500kg, con unos límites de movimiento de $\pm 0.15\text{m}$ para longitudinales (Sway, Surge y Heave) y de $\pm 20^\circ$ para los rotacionales (pitch, roll, yaw).

Respecto al washout utilizado, para intentar objetivar al máximo el estudio, se ha optado por utilizar el conocido como *Classical Washout*, basado en los trabajos iniciales de la NASA [70] y modificado y publicado por [71]. Se trata del algoritmo de washout más utilizado en la actualidad, pese al tiempo que lleva desarrollado. La Figura 52 muestra esquemáticamente el flujo de datos que se produce en el washout.

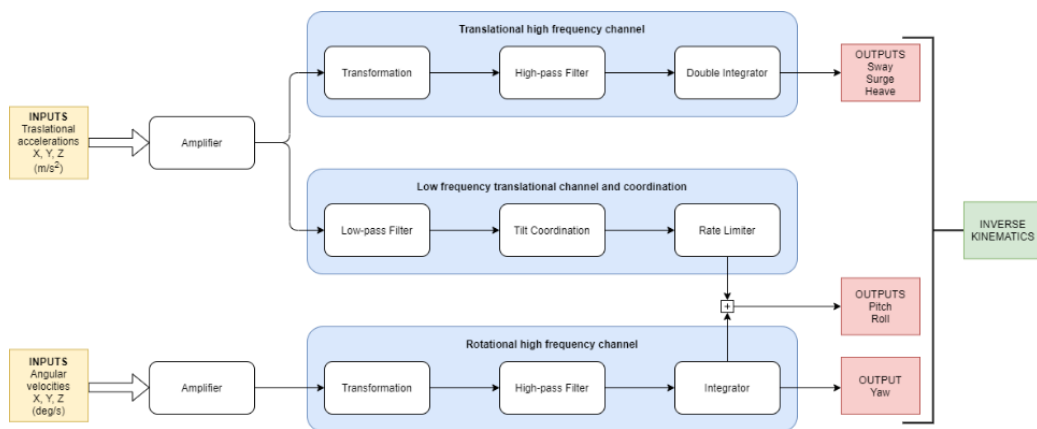


Figura 52: esquema de funcionamiento del classical whasout

Como se ha explicado en el Capítulo 1, este algoritmo consiste en dividir las entradas en 3 canales principales. Dos para la alta frecuencia (traslacional y rotacional), que siempre debemos intentar que se reproduzca teniendo presentes los límites físicos de la plataforma, y otro para la

baja frecuencia, que a la vez convierte parte de las aceleraciones de baja frecuencia en inclinaciones (pitch y roll) de la plataforma.

Cada uno de los pasos dentro de estos canales consta de una serie de configuraciones, que, en nuestro simulador, se pueden modificar dentro de otro fichero XML, permitiendo así realizar los ajustes deseados en función de las entradas. La configuración final utilizada para la prueba fue la misma que en [170] en el modelo T3R3.

Con el fin de asegurar la correcta configuración del software (algoritmo de washout + cinemática + plataforma virtual matemática), se introdujeron señales bien conocidas, de manera individual, en cada uno de los canales de entrada (A_x , A_y , A_z , W_x , W_y , W_z), dejando el resto a 0.

Concretamente se introdujo una señal cuadrada y otra de diente de sierra, ambas con frecuencia 5Hz y amplitud 2 para observar las salidas. Estas señales se introdujeron de manera individual en cada uno de los ejes, observando que el resultado en el canal traslacional era igual en los tres ejes y lo mismo ocurre en el canal rotacional. Los resultados obtenidos, que pueden observarse en la Figura 53, muestran el comportamiento de los 3 ejes traslacionales y 3 ejes rotacionales ante estas señales bien conocidas.

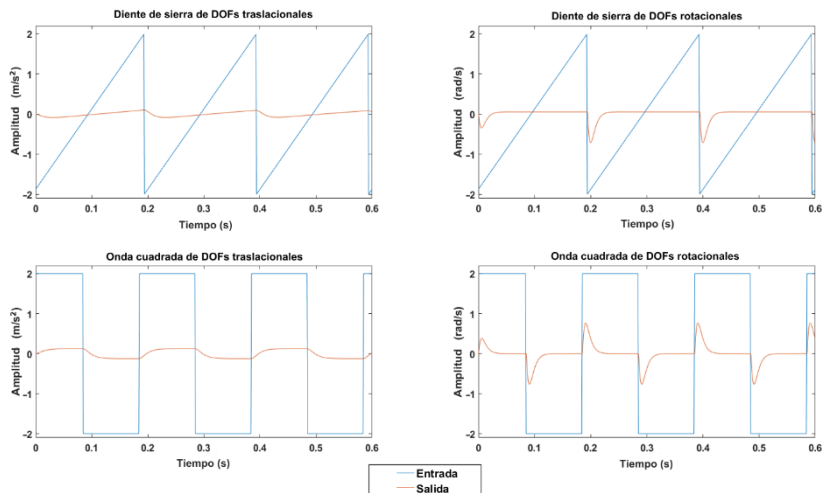


Figura 53: respuesta del software de simulación de plataforma ante entradas bien conocidas

Una vez comprobado el funcionamiento del simulador de plataforma de movimiento se procede a introducir los datos registrados en el punto 2.1, comparando las formas de onda de entrada con las de salidas.

El objetivo del análisis es observar pequeños detalles que puedan perderse debido al uso del MCA. Para evaluar esto, se ha realizado una línea de tiempo con lo acontecido durante una de las sesiones de recolección de datos. El timeline, que puede observarse con detalle en la Figura 54, muestra el tipo de vía por el que se circula y los eventos más significativos que se han recogido.



Figura 54: línea de tiempo de eventos más destacables ocurridos en un trayecto en la recogida de datos

4.5.- Resultados

Los resultados obtenidos se basan en la comparación de los datos de entrada al software, recogidos del vehículo real mediante el sensor, con los datos de salida del simulador de la plataforma de movimiento. Lo habitual en este tipo de evaluaciones es filtrar los datos de entrada obtenidos desde el sensor, de esa manera, las gráficas quedan más “limpias”. En este caso se ha preferido no hacerlo con el objetivo de no perder ningún dato y observar claramente la respuesta del MCA y el comportamiento de la plataforma de movimiento.

Este estudio, en lugar de observar de manera numérica las entradas con respecto a las salidas, se hace un análisis comparando las formas de las señales. Como puede apreciarse en las gráficas siguientes, en general, la forma de la señal de salida del washout se corresponde, con un mínimo retraso, con la forma de la señal de entrada. Por ejemplo, se ve reflejado claramente el tipo de carretera por el que se está circulando (asfalto en buen/mal estado, tierra, etc). También se aprecian los momentos en que se está acelerando/frenando con el coche.

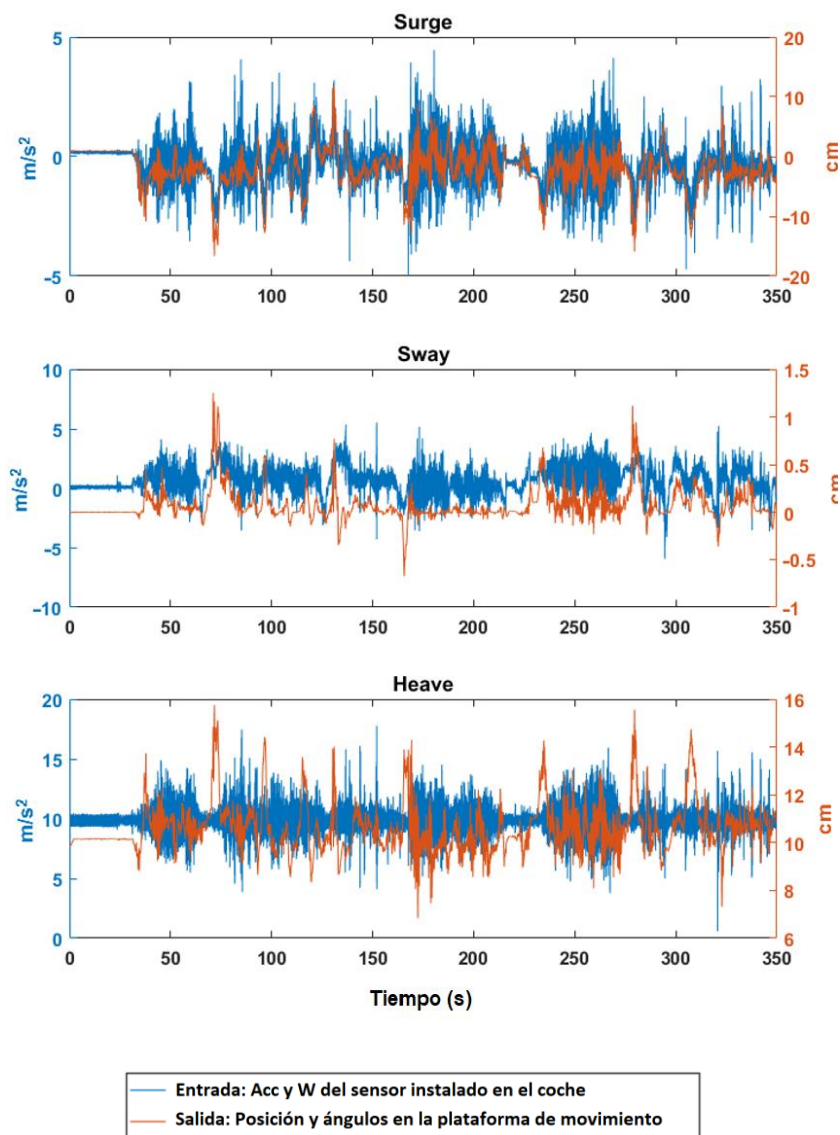


Figura 55a: *resultados de entrada/salida en DOFs traslacionales*

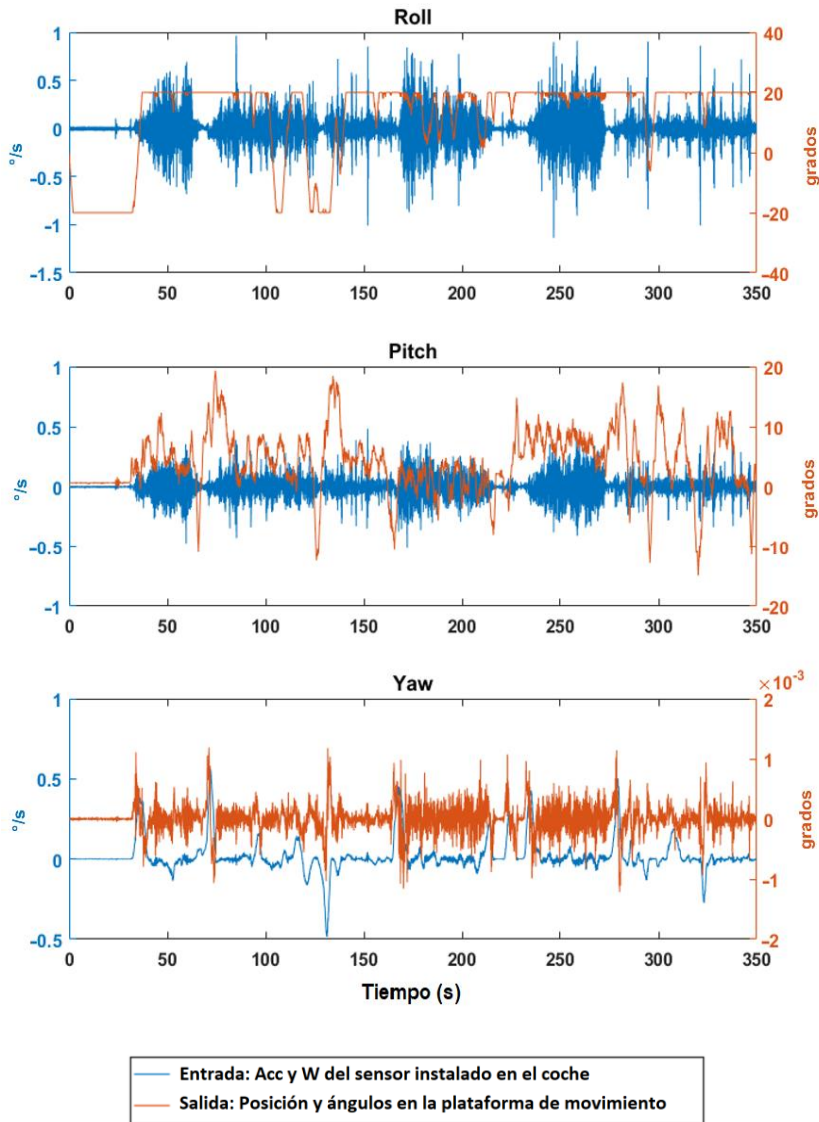


Figura 55b: resultados de entrada/salida en DOFs rotacionales

De entre todos los eventos señalados en la Figura 54 y tras un análisis exhaustivo de cada uno, en las Figuras 55a y 55b se observa (se ve con más detalle en la siguiente sección) que la mayoría de ellos se reflejan adecuadamente en las diferentes salidas de los filtros, pero se detectan 3 que no lo hacen. Concretamente se trata de una salida de la carretera en la que las ruedas derechas circularon durante unos segundos por una zona de arena (evento 1), bandas sonoras para reducir la velocidad debido a la proximidad de un ceda el paso cogidas únicamente por las ruedas izquierdas (evento 2) y una piedra de un tamaño considerable en uno camino de tierra (evento 3). Estos eventos se produjeron en los segundos 120, 155 y 220 respectivamente. A continuación de analiza en detalle cada uno de ellos.

4.5.1.- Evento 1

Las ruedas derechas salen de la carretera y circulan durante 10 segundos por una superficie lisa de arena a unos 60Km/h. En la Figura 56, se observa una entrada con movimientos de alta frecuencia (vibración de las ruedas) pero de baja amplitud, correspondiente al tramo de arena. Esto implicaría una gráfica de salida del mismo estilo (alta frecuencia), aunque escalada (a menos) en amplitud, por lo que la plataforma no se movería prácticamente. Sin embargo, lo que se observa es todo lo contrario: el pitch se dispara

porque en ese momento el coche estaba en aceleración, por lo que el sumador del *tilt cordination*, encargado de hacer uso de la ilusión somatográfica para reproducir aceleraciones de baja frecuencia, le dice al pitch que simule la aceleración en Y, generando el resultado contrario.

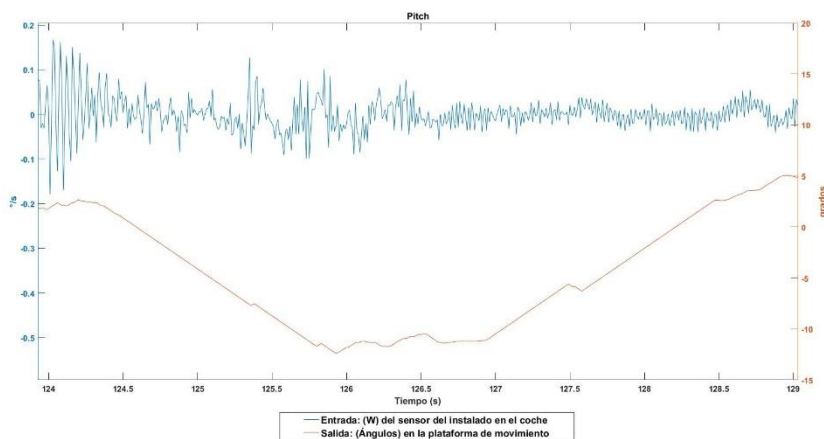


Figura 56: detalle de Evento 1

4.5.2.- Evento 2

Las ruedas izquierdas pasan por encima de bandas sonoras para reducir la velocidad por un ceda el paso. En la Figura 57 se observa las 3 bandas sonoras en la entrada en velocidad angular sobre el eje X, pero la salida del roll, que debería ser la encargada de reproducir esto, estaba saturada debido al *tilt cordination*, por lo que la información de las bandas sonoras se pierde por completo. Este mismo comportamiento (o

similar) se observa en el resto de DOFs. Ninguno de ellos refleja las bandas sonoras.

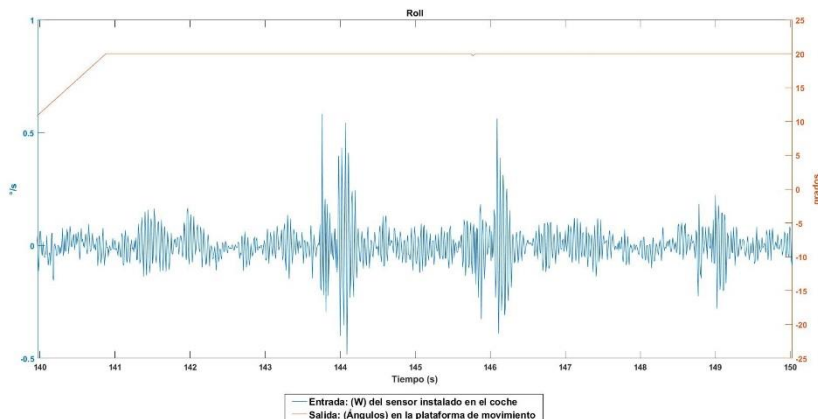


Figura 57: detalle de Evento 2

4.5.3.- Evento 3

Circulando por un camino de tierra se pasa por encima de una roca saliente a unos 20Km/h. En la Figura 58, en las entradas AccZ y Wx (por haberlo pasado con una rueda), se aprecia en el segundo 220,5 el paso por la piedra. Como puede observarse en las salidas de la plataforma, ni el heave ni el roll, reflejan en absoluto el obstáculo, pasando, por tanto, a no ser apreciado por el usuario.

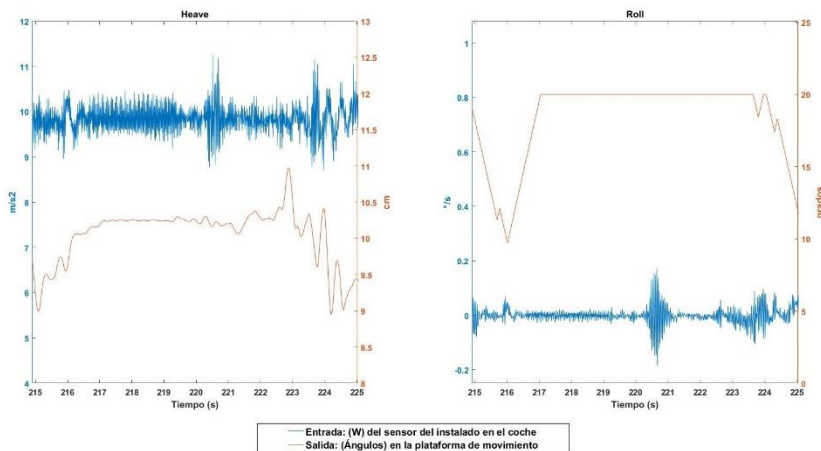


Figura 58: detalle de Evento 3

4.6.- Discusión de los resultados

La bibliografía existente y la evidencia científica demuestra la utilidad de los simuladores tanto para entrenamiento como para diversas áreas de la educación. Así mismo, también está demostrada la importancia de desarrollar simuladores lo más realistas posible [171].

En este trabajo se ha caracterizado los movimientos y aceleraciones de un vehículo real en entornos de circulación cotidianos, en distintos tipos de entornos y carreteras. Gracias a la grabación de vídeo en tiempo real, se han clasificado y secuenciado temporalmente los distintos

eventos que han ido ocurriendo durante esta caracterización (durante la conducción).

Estos datos, basados en velocidades angulares y aceleraciones, se han introducido en un simulador de plataforma de movimiento cuyo funcionamiento ha sido previamente testado mediante la observación del comportamiento de señales bien conocidas.

De estos datos, se ha observado que la mayor parte del tiempo, el MCA y la plataforma de movimiento tienen el comportamiento esperado, transmitiendo correctamente las claves de movimiento esperadas al supuesto usuario del simulador, pero como es lógico, con menor magnitud.

Sin embargo, se han observado tres eventos concretos en los que la información transmitida al usuario, en cuanto a claves de movimiento, no es la esperada y, por tanto, el usuario no llegará a percibir los eventos que están ocurriendo o a interpretarlos como tal. La información vestibular de estos eventos se ha perdido por completo.

Estos datos no difieren de otras investigaciones, ya que parece demostrado que, debido a los MCA y a las limitaciones físicas de las plataformas de movimiento, es inevitable que parte de la información vestibular está se pierda [172].

Esta pérdida de información puede deberse a varias causas:

- Los límites físicos/constructivos de la plataforma de movimiento son muy restringidos.
- Se establecen prioridades en los DOFs que hacen que parte de la información (DOFs menos prioritarios) se pierda
- Los MCA no permiten que ciertas aceleraciones pasen a la plataforma.

En el caso que nos ocupa, hemos comprobado que hay 3 eventos concretos que la plataforma de movimiento no transmite al usuario, perdiendo este parte de la información que debería recibir. Con otra configuración distinta de los MCA o con otra plataforma de movimiento, posiblemente estos movimientos podrían haberse reproducido, pero siempre habrá alguno que se pierda y que, por tanto, no perciba el usuario.

Existen trabajos previos [173] [174] [175] en los que se ha intentado aumentar la percepción del usuario mediante la aplicación de escalados a los diferentes canales que conforman la implementación de MCA basada en filtros de washout. En general se concluye que la aplicación de escalados a ciertos canales del MCA implementado con filtros de washout, siempre dentro de unos límites, suele ser positiva [176] ya que aumenta el nivel perceptivo del usuario, pero no existe consenso en cómo aplicarlos.

Tras analizar la literatura existente en la materia [177] [178] [179], se observa que muchos autores afirman que la información que perciben los conductores de vehículos a través de su sistema vestibular afecta directamente al proceso de toma de decisiones o tiempos de reacción, entre otros. Por lo tanto, si se ha comprobado que hay ciertos eventos que no se transmiten a través de claves de movimiento, parece obvio que el usuario no va a percibirlos a través de su sistema vestibular.

Si estos eventos son importantes para la conducción, como, por ejemplo, ser plenamente consciente de por qué tipo de carretera se está circulando (asfalto o tierra) o de si una rueda se ha salido ligeramente de la carretera, el usuario no reaccionará de la manera esperada en un proceso formativo y esto afecta directamente a la calidad del aprendizaje.

La percepción por parte del usuario de lo que está ocurriendo, ya sea en la conducción real o en una simulación, está demostrado [180] que es clave para la reducción de tiempos de reacción, desvíos en la trayectoria de la carretera o el aumento del nivel de alerta, entre otros.

Las evidencias muestran que una percepción no real de lo que acontece es uno de factores clave en los accidentes de tráfico [181]. Los bajos niveles de percepción de riesgo están relacionados con la sobreestimación de las capacidades de conducción y, en consecuencia, con conductas

irresponsables como el consumo de alcohol mientras se conduce, las distracciones o el hecho de viajar a una velocidad superior a la permitida [182].

En este sentido, para lograr una correcta percepción del riesgo, es necesario que el usuario tenga una conciencia adecuada, así como una percepción de las condiciones de la carretera ajustada a la realidad [183]. Este aspecto podría potenciarse y entrenarse mediante el uso de simuladores.

En algunos países, existe una normativa muy estricta a la hora de obtener el permiso de conducir con el uso de simuladores. Se trata del Reino Unido [184], los Países Bajos [185], Singapur [186] y Finlandia [187], donde los simuladores de conducción se utilizan ampliamente para la formación de nuevos conductores e incluso para la obtención del permiso de conducir, para lo cual deben superar analíticamente determinadas pruebas. Si las sensaciones percibidas por el usuario no son adecuadas, ¿las reacciones del usuario y, por tanto, el resultado obtenido de estas simulaciones será adecuado?

Según Kemeny y Panerai [188], disponer de información vestibular (claves de movimiento) en los simuladores de conducción disminuye los tiempos de reacción a los eventos que ocurren en la simulación. Por otra parte, Reymond et al. [189] afirman que los conductores en carreteras con curvas, para establecer sus estrategias de control del coche, utilizan,

no sólo el sistema visual, sino también del sistema vestibular.

En el caso de los simuladores de entrenamiento, como los que se comentan para las autoescuelas, en opinión de los autores, es de vital importancia que el usuario perciba las aceleraciones de cualquiera de los eventos que se ha demostrado que se pierden. De lo contrario, su percepción y reacción de lo que está ocurriendo en la simulación se verá distorsionada. Además, para poder evaluar correctamente a los usuarios, éstos deben tener una percepción real de todas las condiciones de la carretera y del vehículo.

El estudio realizado no está exento de limitaciones. En primer lugar, dado que los datos recogidos por los sensores y los datos extraídos por el algoritmo MCA no son numéricamente comparables, el estudio se basó en la observación de la forma de los gráficos, de forma independiente, de cada DOF en presencia de determinadas entradas.

A partir de la información analizada y basándose en la experiencia del equipo de investigadores y en la evidencia bibliográfica, se han extraído las conclusiones que se resumen en el siguiente apartado.

En segundo lugar, el lector puede pensar que este estudio podría haberse realizado comparando los datos registrados

por varios vehículos. Sin embargo, dado que es evidente que la comunidad científica asegura que es imposible reproducir el 100% de las aceleraciones que se producen en un vehículo real utilizando una plataforma de movimiento, lo único que se conseguiría es detectar otros eventos diferentes que producirían pérdidas. El único impacto que esto tendría es el de ratificar los resultados aquí presentados.

4.7.- Conclusiones

Dada la importancia del factor humano en los accidentes de tráfico, deben establecerse medidas preventivas para ayudar a reducir los errores de los conductores, las infracciones y, en consecuencia, la siniestralidad. En este sentido, el desarrollo de herramientas de formación y educación válidas y eficaces es fundamental para el correcto aprendizaje y concienciación del conductor.

Los dispositivos tecnológicos pueden ser muy útiles para este fin, especialmente los relacionados con realidad virtual y los simuladores de conducción [11]. Sin embargo, estas herramientas cambian constantemente adaptándose a las necesidades de los usuarios y aumentando su nivel de realismo. Principalmente, los aspectos perceptivos de los simuladores deben mejorarse. En particular, la evidencia indica que la percepción de movimiento es muy importante

para conseguir sensaciones de conducción realistas para el usuario.

Este estudio indica que las plataformas de movimiento transmiten, en general, las aceleraciones que un usuario espera percibir en un simulador. Sin embargo, se ha demostrado que hay pequeños eventos que no son reproducidos adecuadamente por las plataformas de movimiento. Hay pocas opciones para garantizar que una plataforma de movimiento siempre reproduzca ciertas aceleraciones que se consideran importantes, ya que esto dependerá de cómo se configuren los algoritmos de generación de claves de movimiento (MCA) y de cómo se sitúe físicamente la plataforma en cada instante o de lo que ocurra en la simulación.

Por todo lo anterior, parece evidente que para intentar reproducir esas aceleraciones que no queremos que se pierdan en eventos “destacados”, necesitamos implementar una solución *ad-hoc*.

En este sentido, el siguiente trabajo mostrará ciertas pruebas que permiten mitigar este escenario (pérdida de ciertos eventos que pueden ser importantes para el usuario). Estos hallazgos son interesantes desde la perspectiva del uso de simuladores para investigar el propio comportamiento de los usuarios, especialmente en lo que respecta el proceso de toma de decisiones diferenciales [190].

CAPÍTULO 5: Mejoras en la generación de claves gravito- inerciales basadas en heurísticas

5.1.- Introducción y contexto

De los estudios previos planteados y de la bibliografía existente, queda patente que las nuevas tecnologías son una herramienta muy útil para todo lo referente a la formación y/o concienciación sobre determinadas materias.

Esta afirmación se puede precisar todavía más focalizándola en los simuladores de RV. En ellos, se traslada al usuario a entornos digitales completamente ajenos a la realidad. En este punto se comienza a medir el nivel de inmersión (presencia) que tiene el usuario en el simulador. A mayor nivel de inmersión, mejores serán los resultados formativos que se pretende transmitir.

Para lograr un alto nivel de inmersión se debe introducir estímulos al usuario mediante los diferentes sentidos (visual, auditivo, táctil, vestibular, etc.) de manera que se minimice la percepción de la realidad en el usuario.

Si estos estímulos no se introducen correctamente o no están bien sincronizados entre sí, el resultado puede ser completamente opuesto al que se pretende conseguir. Es decir, en lugar de mejorar la captación de conocimientos gracias al uso de la simulación y la realidad virtual, lo que se conseguirá es producir mareo y malestar en el usuario.

Centrando todavía más la materia, todos los estudios presentados en este documento se focalizan en la introducción de estímulos mediante el sistema vestibular, es decir, mediante el principal mecanismo que tiene el cuerpo humano para detectar que se está en movimiento, que se está boca abajo, o que se está produciendo un cambio de velocidad en alguno de los ejes cartesianos (aceleración), entre otros.

En los simuladores estos estímulos se introducen mediante las plataformas de movimiento. Estas plataformas tienen el gran hándicap de ser aparatos mecánicos con sus rangos de movimiento limitados. A diferencia de la realidad, en la que si, por ejemplo, te encuentras en un avión que está despegando y es capaz de mantener una aceleración durante un largo periodo de tiempo, en los simuladores únicamente se puede reproducir aceleraciones o velocidades angulares dentro de un cierto rango. Existen, por tanto, dos grandes limitaciones: la potencia y el espacio físico.

En este punto hay que lidiar con transformar las aceleraciones que se producen en la vida real, o en nuestro caso en los modelos físicos de los vehículos que se están simulando, de manera que las plataformas de movimiento sean capaces de reproducir cuanto más (y más fidedigno) mejor; o por lo menos, eso es lo que se intenta habitualmente.

Como ya se ha visto previamente, los algoritmos encargados de producir esta transformación son los MCA. Existen diversos tipos de MCA pero los más extendidos son los algoritmos de washout, que se basan en una serie de filtros que delimitan qué frecuencias y amplitudes de movimiento se van a reproducir o no en las plataformas. Se han desarrollado muy diversas de versiones de estos algoritmos (ver capítulo 1.6), pero actualmente el más utilizado es el algoritmo clásico.

Este método tiene una gran ventaja que a su vez es también un problema. Se trata de que es ampliamente configurable, por lo que cada implementación se puede ajustar para determinar qué aceleraciones se quiere reproducir y cuáles no. El hecho de ser ampliamente configurable implica que tiene una cantidad ingente de parámetros que ajustar y esto hace que únicamente los expertos en la materia e incluso los propios implementadores de los algoritmos sean los únicos

que sepan modificarlos, al margen, por supuesto, de la gran cantidad de tiempo y pruebas que requiere este proceso.

Por otro lado, existe otra problemática relacionada con este proceso de configuración y es precisamente saber qué configuración es buena o qué configuración no lo es. Actualmente existen intentos [103] de objetivar esta comprobación pero son muy poco utilizados por los expertos en la materia, siendo la evaluación subjetiva basada en cuestionarios el método genérico.

5.2.- Planteamiento del problema a resolver

Pese a que los MCA intentan reproducir todas las aceleraciones que se producen en los modelos físicos, esto es imposible (por las causas comentadas previamente), por lo que hay que seleccionar cuáles de ellas se reproducen y cuáles no.

Gracias a las distintas configuraciones que se apliquen en los MCA, es posible elegir qué tipo de claves se transmiten a la plataforma de movimiento y cuáles no. Por ejemplo, con un mismo MCA, la configuración entre un simulador de avión o un simulador de coche tendría grandes diferencias. En la primera, existe una gran cantidad de bajas frecuencias que suponen un gran porcentaje de los movimientos que

debe reproducir la plataforma, mientras que, en la segunda, estas bajas frecuencias no producirán una buena sensación en los usuarios.

Cuando se realizan estas configuraciones siempre se intenta que los filtros permitan, dentro de los límites constructivos y mecánicos de la plataforma de movimiento, reproducir cuantos más eventos mejor, pero el hecho de estar reproduciendo un cierto movimiento en un determinado momento puede ocasionar que otro no se reproduzca.

Dependiendo de los elementos que se pierdan, es posible la percepción del usuario de lo que está ocurriendo en la simulación se vea relativamente afectada. Si se trata, por ejemplo, de simuladores formativos, se podría dar el caso de eliminar eventos que son importantes para el aprendizaje del usuario.

En este punto, se especula con la posibilidad de estudiar qué señales son importantes para el uso al que se destina un simulador y tratar de, en lugar de reproducir todo tipo de señal que provenga desde el modelo físico, reproducir cuantas más mejor, pero siempre asegurando que las señales importantes para el uso del simulador se transfieran al usuario.

En este sentido y de manera novedosa, se va a tratar de agregar de manera artificial, señales de movimiento en los

momentos concretos de una simulación en la que se produzcan estas señales seleccionadas como importantes. Estas señales estarán escaladas para garantizar que, aunque no se corresponda con la escala del resto de elementos de la simulación, sean percibidas por el usuario.

Por lo tanto, en este trabajo se investiga cómo un MCA estándar se compara con una versión modificada del MCA en la que estos eventos especiales se resaltan artificialmente en términos de claves de movimiento. Más concretamente, nuestra novedosa propuesta consiste en modificar la salida del algoritmo de washout clásico sumando una señal escalada de la clave de movimiento generada por cierto evento de la simulación.

La Figura 59 muestra el esquema propuesto como posible solución a la problemática planteada.

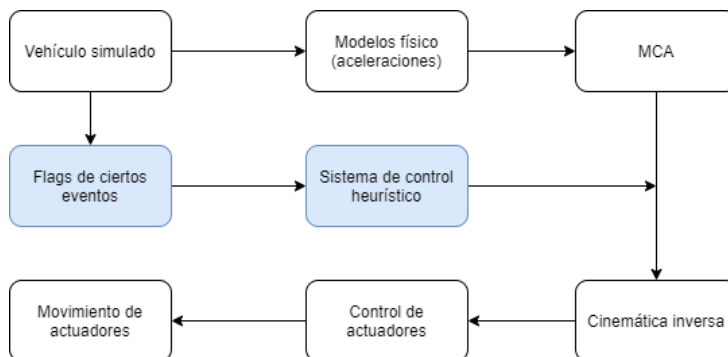


Figura 59: *esquema de washout propuesto con control heurístico de eventos.*

Para poner a prueba el método propuesto se utilizará un simulador de coche en el que diversos usuarios evaluarán un mismo circuito con un mismo coche utilizando el algoritmo clásico y el algoritmo clásico modificado.

5.3.- Materiales y métodos

A continuación, se describen los materiales y métodos utilizados para poner a prueba la hipótesis propuesta.

5.3.1.- Aparato

Para la realización del experimento se utilizó un simulador de vehículo que diseñó y construyó íntegramente el grupo de investigación ARTEC.

Se trata de uno de los simuladores *full mission* más completos que ha desarrollado el IRTIC y que consta de una plataforma de movimiento 6DOF (se describe con detalle en el siguiente apartado) con pantalla cilíndrica de grandes dimensiones embarcada.

El simulador se construyó en el año 2016 para ser utilizado como simulador principal en un centro de simulación de carreras de Valencia (Motrix). Además, fue contratado por Formula 1, para ser expuesto en la primera GameZone del

circuito de Montmeló en el año 2016 y fue testado por pilotos titulares de McLaren, Ferrari y Red Bull (ver Figura 60).



Figura 60: (izq) Exterior de la Gamezone del circuito de Montmeló. (der) Sébastien Buemi tras testar el simulador

Posteriormente fue trasladado a un nuevo centro de simulación situado en El Corte Inglés de la Av. De Francia de Valencia, donde se utilizó como reclamo de clientes durante más de un año. El simulador estaba acompañado de 8 simuladores más pequeños (y modestos en prestaciones), también diseñados y desarrollados íntegramente por el IRTIC. La Figura 61 muestra la distribución de estos simuladores en la instalación.

siempre en cuenta la complejidad de por sí de proyectar sobre una pantalla cilíndrica y no sobre paredes planas.

La Figura 62 muestra parte del proceso de calibración llevado a cabo y el resultado final.

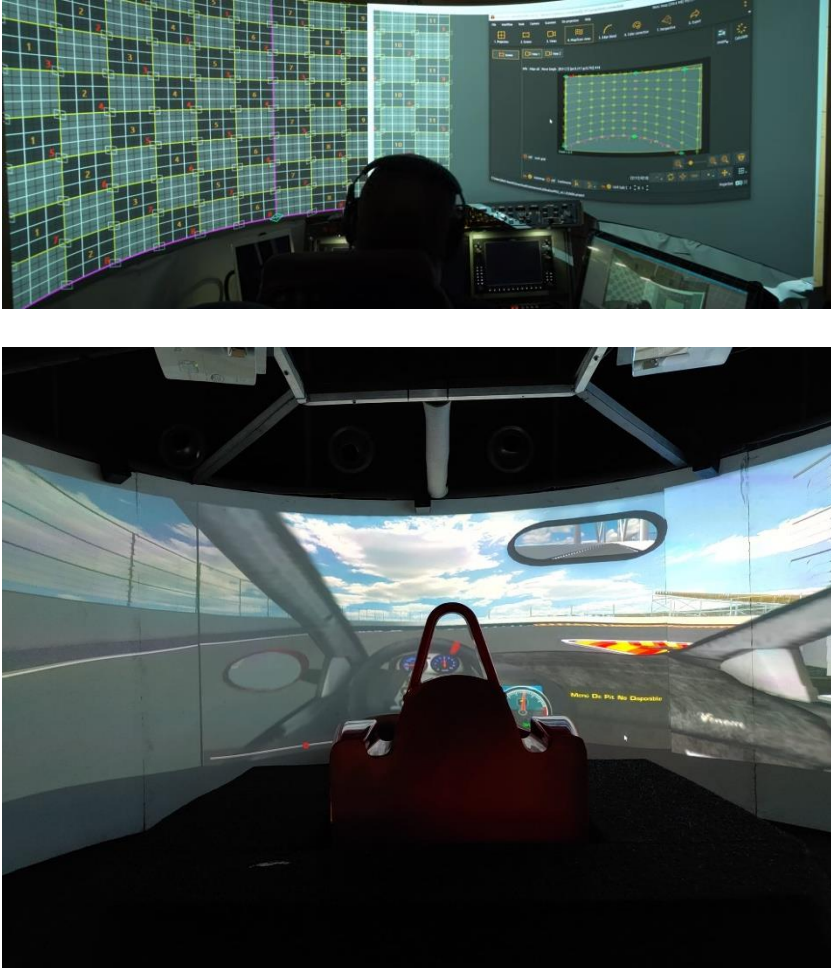


Figura 62: proceso de calibrado de pantallas y resultado final

La percepción sonora se basa un sistema de sonido envolvente 7.1, donde el subwoofer se sitúa debajo de la plataforma, mientras que los 7 altavoces se distribuyen alrededor de los 360° de la pantalla. Esta distribución puede apreciarse en la Figura 63.

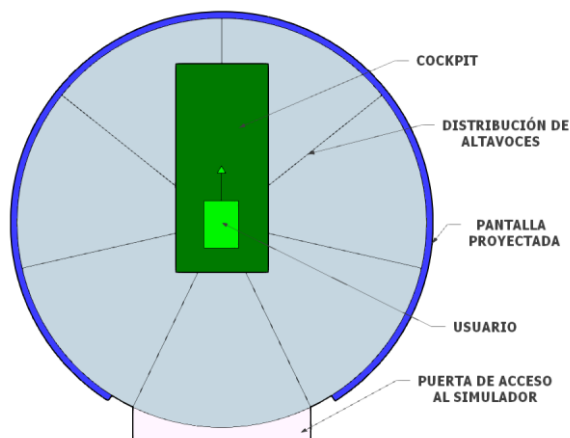


Figura 63: descripción gráfica de FOV y situación de altavoces en simulador

El usuario cuenta con un cockpit de conducción que integraba el asiento, la pedalera y el volante. Por motivos de coste y poco impacto en el resultado final del estudio, se optó por mantener el cockpit original (cockpit de F3) con el que se había diseñado el simulador, en lugar de cambiarlo por un salpicadero y asiento de conducción de un coche comercial (como el que se iba a simular).

La pedalera cuenta con un sistema hidráulico que recrea fielmente la sensación de apretar el acelerador o freno de un vehículo. Por su parte, el volante seleccionado es un Fanatec de altas prestaciones con un muy buen sistema de *force feedback*. Ambos elementos pueden observarse en la Figura 64.



Figura 64: *pedales y volante integrados en el simulador de conducción*

La Figura 65 muestra los diseños iniciales del simulador y el resultado final una vez construido.

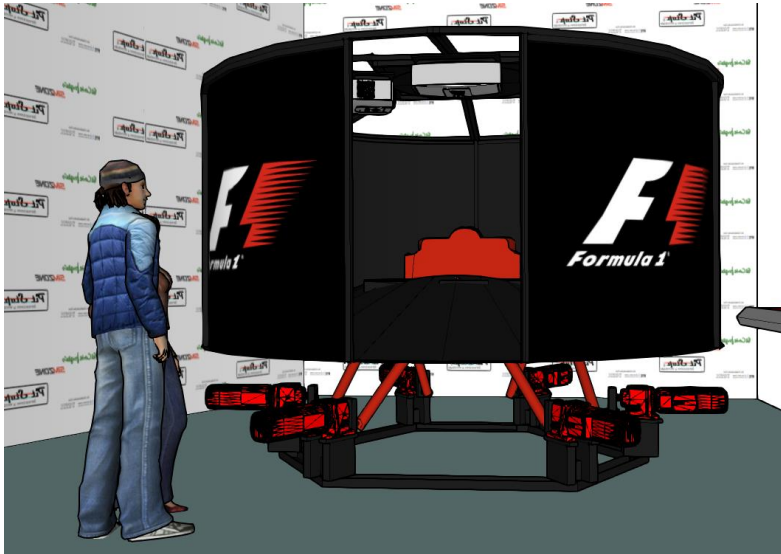


Figura 65: (arriba) diseño de simulador de conducción.
(abajo) simulador real construido

5.3.1.1.- Plataforma de movimiento

Para poder comparar de manera perceptiva el comportamiento de un MCA, es necesario el uso de una plataforma de movimiento. La Tabla 9 describe las especificaciones de la plataforma 6DOF diseñada y construida.

Característica	Valor
Tipo de plataforma	6 DOF Eléctrica
Ancho base inferior	1950 mm
Largo base inferior	1800 mm
Ancho base superior	1180 mm
Largo base superior	1000 mm
Altura en posición de reposo	
Base superior	800 mm
Masa máxima soportada	750 kg
Tara (aprox)	
Base inferior	250 kg
Base superior	100 kg
Movimiento	
Pitch, Roll	$\pm 20^\circ$
Yaw	$\pm 45^\circ$
Sway, Surge, Heave	± 150 mm
Velocidad	
Pitch, Roll, Yaw	$\pm 50^\circ/\text{s}$
Sway, Surge, Heave	± 300 mm/s
Aceleración	
Pitch, Roll, Yaw	$\pm 300^\circ/\text{s}^2$
Sway, Surge, Heave	$\pm 0,5$ G
Especificaciones eléctricas	
Alimentación	380 VAC - 3 fases
Comunicación con PC	Gigabit Ethernet TCP/IP
Frecuencia variadores de frecuencia	400 Hz

Tabla 9: especificaciones de plataforma de movimiento 6DOF del simulador de conducción

5.3.1.1.1.- Motores eléctricos

Los motorreductores de corriente alterna propuestos para poder cumplir con las características anteriormente descritas pueden observarse en la Tabla 10.

MOTOR	
Velocidad nominal del motor [1/min]	1410
Velocidad de salida [1/min]	41
Índice de reducción total	34,73
Par de salida [Nm]	260
Factor de servicio SEW-FB	1,15
Eje de salida [mm]	30x60
Salida permitida con carga radial n=1400 [N]	4650
Potencia del motor [kW]	1,1
Tensión del motor [V]	0,58
Frecuencia [Hz]	50
Corriente nominal [A]	4,15 / 2,4
Cos Phi	0,84
Aislamiento térmico	155(F)
Tipo protección del motor	IP54
Peso neto [kg]	30
Par de frenado [Nm]	10
Voltaje del freno [V]	400
Aislamiento térmico clase	155(F)
AS7W- Encoder rotativo absoluto	
BE1- SEW - freno de disco	
TF- 3 sondas térmicas PTC p/aislami. térm. 155(F)	

Tabla 10: especificaciones de motores de plataforma de movimiento 6DOF del simulador de conducción

5.3.1.1.2.- Variadores de frecuencia

Las características de los variadores de frecuencia desde los que se controlarán los motorreductores pueden observarse en la Tabla 12.

Peso	2,5kg
Tipo de variador	Vectorial
Tensión de red	3x380-500VAC
Frecuencia de red	50/60Hz
Potencia	1,1KW
Intensidad de red	2,8A
Frec. Máx de salida	400Hz
Intensidad salida	3,1A
Filtro de red integrado	Tipo A

Tabla 12: *especificaciones de variadores de frecuencia de plataforma de movimiento 6DOF del simulador de conducción*

5.3.1.1.3.- Principales características

- Todo el material es de la marca SEW-Eurodrive, marca alemana líder a nivel mundial en motores eléctricos, reductores y electrónica de control. La Figura 66 muestra uno de los motores junto al despiece interior de la caja reductora.



Figura 66: *motores utilizados en plataforma 6DOF de simulador de conducción*

- A diferencia de muchas de las plataformas de movimiento comercializadas actualmente, los motores propuestos cuentan con freno incorporado. Esto quiere decir que la plataforma de movimiento es capaz de quedarse completamente parada en una determinada posición si así se desea o en caso de interrupción de la alimentación.
- Estos motores cuentan con ventilación forzada y sondas térmicas, tratando de que el motor no se sobrecaliente por encima de sus posibilidades.
- Otra gran diferencia respecto a los motores que suelen incluir las plataformas comerciales es el encoder que los aquí ofertados incorporan. Se trata de encoders absolutos (no hay necesidad de

referenciado) con una resolución de 2048 pulsos por vuelta.

- El sistema cuenta con muchas medidas de autoprotección:
 - o Temperatura
 - o Sobrecarga de algún motor
 - o Sobrealimentación de alguno de los motores
 - o Fallo de comunicaciones durante el funcionamiento
- Como medida de seguridad por si produjese alguna emergencia no deseada, el sistema se entrega junto a dos pulsadores de seguridad, uno para el usuario que está subido en la plataforma de movimiento y otro para el personal que esté encargado de controlar la simulación. En caso de que cualquiera de los pulsadores de seguridad fuese accionado, los variadores se inhibirían automáticamente bloqueando la plataforma de movimiento por completo.

5.3.1.1.4.- Elementos mecánicos de la plataforma

Todas las partes mecánicas que componen la plataforma de movimiento han sido diseñadas, desarrolladas, construidas y probadas por la Universidad de Valencia: bielas, pistones, juntas cardan modificadas y adaptadas, ejes de cada uno de los brazos actuados, rodamientos, estructura de plataforma (soldaduras y tornillería), etc. Los despieces y la ubicación de los motores pueden apreciarse en las Figura 67 y 68.

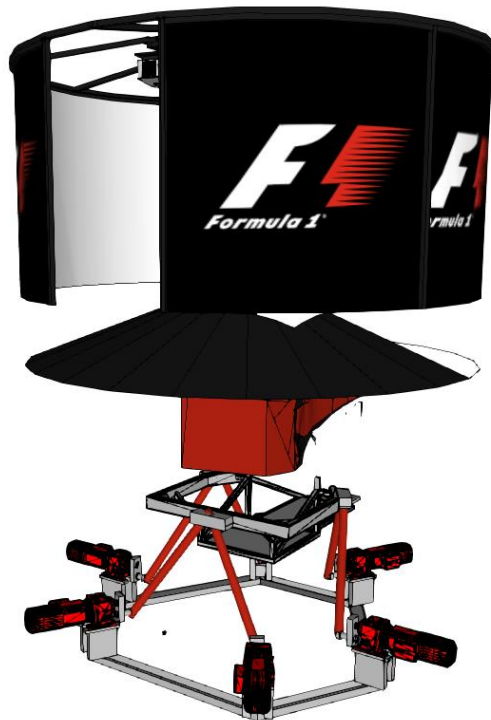


Figura 67: *despiece de simulador de conducción*

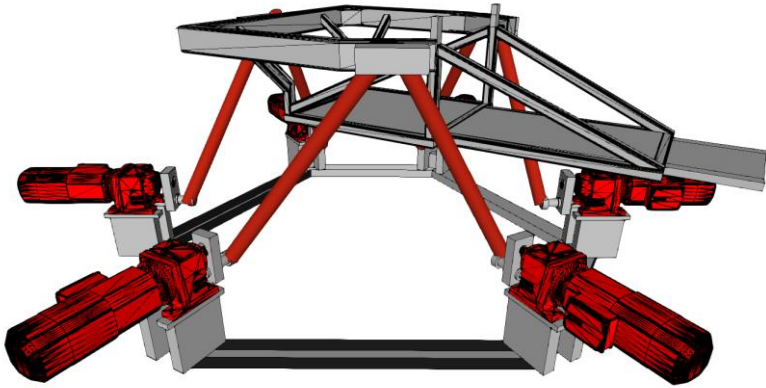


Figura 68: *detalles constructivos de plataforma 6DOF del simulador de conducción*

5.3.1.2.- Software

Para la realización del experimento se utilizó un servidor gráfico de altas prestaciones con un sistema operativo Windows 10 instalado.

Respecto al software de simulación utilizado, se optó por un motor gráfico que primase el modelo físico simulado respecto a la alta calidad gráfica. En esta línea, y tras una búsqueda del estado del arte, se optó por utilizar el simulador rFactor [191].

De entre los muy diversos recorridos que se podían seleccionar, con el objetivo de asemejar las pruebas a los resultados de investigación previamente publicados

(capítulo 5), se optó por el circuito urbano de Valencia, conocido como “Valencia Street Circuit”. Respecto a los diversos coches, siguiendo la misma línea, se optó por un Codi modelo 61 [192]. Se trata de un coche con cambio de marchas automático, tracción a las 4 ruedas y unos 250CV de potencia, prestaciones muy similares a las del BMW 325XI AUT (automático, 4x4 y 240CV) con el que se realizó el experimento descrito en el Capítulo 5.

La comunicación entre rFactor y el resto de software, principalmente el relacionado con la generación de movimiento de la plataforma, se llevó a cabo mediante la generación una .dll (un plugin) que se insertó en el software original. Este plugin permite extraer información sobre lo que está ocurriendo en el modelo simulador y enviarla, en este caso vía sockets, al software que la requiera (MCA).

El MCA (se hablará extensamente en el siguiente apartado) utilizado se basa en filtros de washout con su configuración clásica. Éste recibe las aceleraciones provenientes del plugin y genera las posiciones que debe alcanzar la plataforma a una frecuencia de 50Hz, que son enviadas a la cinemática que genera las órdenes para los variadores de frecuencia que finalmente genera las corrientes eléctricas necesarias para alcanzar las posiciones.

En paralelo, como se observa en la Figura 69, de manera similar a la realizada por Cleij en [193], se desarrolló un

pequeño software que permite registrar, de manera síncrona con lo que está ocurriendo en la simulación, el valor analógico de un joystick inalámbrico que se proporcionaba al usuario para que transmitiese en tiempo real la sensación que percibía de la plataforma de movimiento.

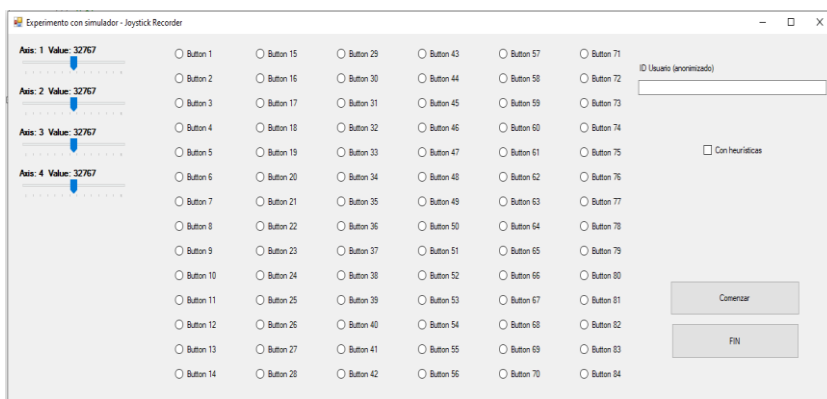


Figura 69: *software desarrollado parra el registro de sensaciones mediante joystick*

Los datos, que se sincronizaban con el inicio y fin de cada vuelta del circuito, se almacenaban en un fichero .dat cuyo nombre era ID de usuario (anonimizado) y si contenía o no la modificación heurística de la que se habla en el siguiente apartado.

La estructura del fichero, como se observa en la Figura 70, comenzaba con el texto “INICIO”, indicando el inicio de cada vuelta al circuito y los valores leídos de uno de los ejes del joystick junto con su marca temporal respecto del inicio

de la vuelta, finalizando con la palabra FIN cuando se alcanzaba la línea de meta.

INICIO
32703;-00:00:00.1137135
32703;-00:00:00.2224304
32703;-00:00:00.3330566
32703;-00:00:00.4429514
...
...
...
32703;-00:00:08.5624359
32703;-00:00:08.6707049
32703;-00:00:08.7797101
32703;-00:00:08.8891091
32703;-00:00:08.9992529
FIN

Figura 70: ejemplo de fragmento del fichero almacenado

5.3.3.- Heurísticas aplicadas

Como se ha comentado, el MCA utilizado está basado la implementación del *classical washout* cuyo esquema de funcionamiento puede observarse en la Figura 52.

Este algoritmo, acepta como entradas las aceleraciones y velocidades angulares en los 3 ejes. Para poder poner a prueba las heurísticas se implementaron dos versiones del plugin que extrae las aceleraciones del vehículo simulado.

La primera de ellas es la implementación habitual, donde las aceleraciones y velocidades angulares que está sufriendo el vehículo son enviadas, tal cual, al MCA.

La segunda de las versiones es muy similar a la primera, pero diferenciándose en lo que ocurría en ciertos momentos concretos de la simulación, en lo que denominaremos “eventos”.

Cuando se producía un determinado evento (se explican en secciones posteriores), se generaba una señal que se enviaba al MCA pero que, a diferencia del resto, se sumaba íntegramente a la salida del algoritmo, consiguiendo que la plataforma generase una sensación vestibular muy remarcada.

Mediante ficheros XML se podía configurar de manera sencilla los eventos que se querían destacar y qué señal se producía con cada evento, permitiendo su configuración en tiempo y amplitud. La Figura 71 muestra de manera esquemática la implementación llevada a cabo.

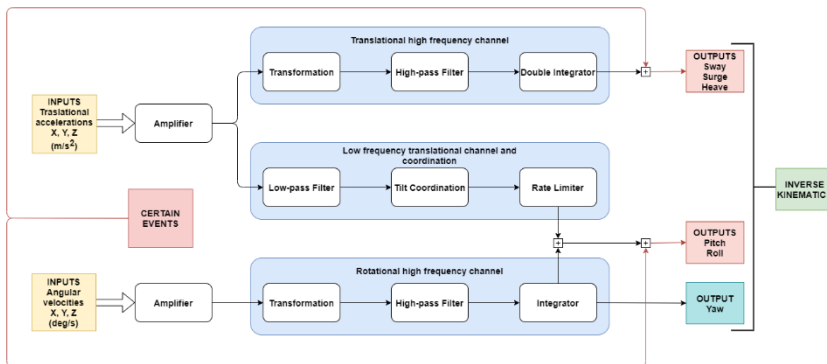


Figura 71: representación esquemática del classical washout con introducción de heurísticas

Este simple desarrollo permite que, ante determinados eventos ocurridos durante la conducción del vehículo, la plataforma de movimiento tenga un comportamiento diferente de lo que cabe esperar ya que se dispone a introducir señales que no serán atenuadas mediante los filtros de washout y que, por tanto, si la plataforma de movimiento no se encuentra saturada por la limitación del rango de movimiento, se transmita con toda seguridad al usuario.

5.3.4.- Eventos heurísticos

Siguiendo la línea de investigación explicada en el Capítulo 5, uno de los eventos que se consideró importante era saber cuándo alguna rueda salía de la calzada. En el caso del simulador de coches utilizado para este experimento, ese evento coincidía con el momento en que alguna rueda del vehículo simulado pasaba por encima de algún piano. Además, la sensación proporcionada por el piano puede considerarse similar (una alta frecuencia de corta duración) a otro de los eventos detectados en el Capítulo 5, concretamente al de las bandas sonoras.

Cuando alguna rueda del vehículo pisaba un piano (ver Figura 72), se enviaba al sumador heurístico una señal escalón al roll, con fin de simular una vibración lateral, de

$\pm 5\text{mm}$ de amplitud y una frecuencia de 10Hz durante el tiempo en que la/s rueda/s estaban encima del piano.



Figura 72: momento en que una de las ruedas del vehículo simulado pasa por encima de un piano.

Por otro lado, y con el objetivo de conseguir algún evento que se repitiese en muchas ocasiones durante el recorrido, a fin de que los usuarios percibiesen un cambio en los movimientos de la plataforma más allá de momentos muy puntuales, se decidió implementar como evento los cambios de marcha.

De esta manera, cuando se producía un cambio de marcha positivo (se sube de marcha) se le enviaba al sumador heurístico un pitch positivo de 1° durante 0.1s. Cuando el cambio de marchas era negativo (se bajaba marcha), se le

enviaba un pitch negativo de 1° durante 0.1s. Se seleccionó este DOF por ser el que simula (en parte) las aceleraciones longitudinales, que son las que se producen en un coche real cuando hay cambios de marcha bruscos.

Como puede entenderse, en ambos casos se trata de efectos con muy poca relevancia en el grueso del movimiento de la plataforma, pero que persiguen el objetivo de transmitir ciertas sensaciones heurísticas en los momentos en que se supone que el cuerpo humano espera recibirlas en base a lo que el resto de los sentidos (no el vestibular) están observando.

5.3.5.- Método de las pruebas

Para la realización de las pruebas y evaluación de prestaciones, se preparó el simulador instrumental y todo el software necesario en un laboratorio de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería de la Universidad de Valencia.

Dado que se trataba de pruebas perceptivas, se escogió una evaluación basada en pruebas subjetivas a los usuarios reales. Para ello se concertaron visitas al simulador con 42 usuarios mayores de 18 años (con edad de tener carné de conducir), intentando que estuviesen representados ambos sexos y que hubiese una diversidad de profesiones.

A cada participante se le explicaba que iba a realizar dos pruebas perceptivas en un circuito donde iba a dar varias vueltas. La primera prueba consistía en dos vueltas al circuito “Valencia Street Circuit” con el vehículo conducido por un módulo de conducción automática basado en una inteligencia artificial que garantizaba que la trazada del coche era siempre la misma. La primera vuelta era de familiarización con el simulador, el entorno y el recorrido.

La segunda vuelta se le pedía al usuario que, mientras se ejecutaba la simulación fuese transmitiendo su sensación a través del joystick inalámbrico que se le proporcionaba. La Figura 73 muestra los movimientos que tenía que hacer el usuario para registrar esta información.



Figura 73: *sentido de movimiento de joystick para la grabación de feedback en tiempo real*

Una vez finalizada la prueba, el usuario salía del simulador y contestaba un cuestionario. La primera sección del cuestionario se destinaba a los datos demográficos para el estudio.

A continuación, había un cuestionario basado en una adaptación del cuestionario validado por la comunidad científica en Witmer [194]. En términos generales, este cuestionario integra el concepto de presencia y agrupa valores en 5 factores:

- Implicación
- Fidelidad sensorial
- Adaptación
- Inmersión
- Calidad de interfaz

El cuestionario original de Witmer, conocido como *presence questionnaire* consta de 29 preguntas, pero los mismos autores proponen una versión reducida a solo 19 que también garantiza validez, objetividad y confianza. Esta versión se amplió con 3 preguntas más muy centradas en los movimientos de la plataforma, generando un cuestionario con 22 preguntas en total.

Además, el cuestionario contaba con una última sección en la que los usuarios contestaban un SSQ (del inglés “*simulator sickness questionnaire*”) basado en contestar de 0 a 6 lo

afectado o no que está el usuario con cada uno de los 15 síntomas descritos.

Las Tablas 13 y 14 muestran las cuestiones realizadas a los usuarios. La segunda columna de la Tabla 13 muestra los valores correspondientes a los factores Witmer: realismo, posibilidad de actuar, calidad de la interfaz, posibilidad de examinar autoevaluación, sistema háptico y sistema de sonido. La nomenclatura para estos factores es REAL, INT, ACT, SOUND, EXAM, HAPTIC y SELF, respectivamente.

CUESTIONES REALIZAS A LOS USUARIOS TRAS FINALIZAR CADA PARTE DEL EXPERIMENTO			
Q1	ACT	Pude entender todos los eventos y situaciones durante mi conducción en el simulador	CUESTIONES RELATIVAS AL NIVEL DE INMERSIÓN DEL USUARIO DURANTE EL EXPERIMENTO
Q2	INT	El simulador siempre respondía como era de esperar en cada situación	
Q3	REAL	La interacción con los elementos visuales del simulador me ha parecido muy natural	
Q4	REAL	Los elementos visuales del simulador me involucraron en una conducción virtual	
Q5	REAL	La sensación de movimiento de los elementos visuales me ha parecido convincente	
Q6	REAL	Las experiencias de conducción en el entorno virtual coinciden con las del mundo real	
Q7	ACT	Mi visión exploraba activamente todo el entorno a medida que usaba el simulador	
Q8	REAL	La sensación de moverte dentro del entorno virtual era convincente	
Q9	HAPTIC	Pude mover o manipular objetos en el entorno virtual	
Q10	SOUNDS	En todo momento puede identificar los sonidos procedentes del simulador	
Q11	SOUNDS	Pude localizar la procedencia (origen) de los sonidos que escuché durante la conducción	
Q12	HAPTIC	Podrías explorar o buscar activamente en el entorno virtual utilizando el tacto	
Q13	EXAM	Pude examinar los elementos de la simulación desde múltiples puntos de vista	
Q14	ACT	Fui capaz de saber lo que iba a suceder tras determinados eventos ocurridos	

Tesis doctoral:
Mejoras basadas en heurísticas para la percepción de estímulos de movimiento en simuladores de Realidad Virtual y Realidad Aumentada

Q15	SELF	Me adapté con rapidez a la experiencia de conducir en un simulador virtual	
Q16	SELF	Me sentí integrado en la simulación al final del recorrido	
Q17	EXAM	Me concentré en la pura conducción y no elementos tipo mandos, plataforma, etc.	
Q18	REAL	Mis sentidos se involucraron en esta experiencia de conducción	
Q19	EXAM	Durante todo momento me sentí completamente concentrado en la conducción o el entorno	
Q20		He percibido correctamente mediante la plataforma de movimiento los cambios de marcha	CUESTIONES RELATIVAS A LAS HEURÍSTICAS INTRODUCIDAS
Q21		He percibido correctamente mediante la plataforma de movimiento cuando alguna rueda pisaba un plano de la carretera	
Q22		Estos dos últimos estímulos han ayudado a percibir mejor lo que estaba ocurriendo en la simulación	

Tabla 13: *cuestiones realizadas a los usuarios (Witmer)*

S1	Nauseas	POSIBLES SÍNTOMAS ADVERSOS EXPERIMENTADOS POR LOS USUARIOS TRAS CADA PARTE DEL EXPERIMENTO
S2	Incomodidad general	
S3	Estómago revuelto	
S4	Transpiración	
S5	Incremento en salivación	
S6	Vértigo	
S7	Eructos	
S8	Dificultad de concentración	
S9	Dificultad de enfoque	
S10	Fatiga generalizada	
S11	Fatiga solo visual	
S12	Dolor de cabeza	
S13	Visión borrosa	
S14	Mareo (ojos abiertos)	
S15	Mareo (ojos cerrados)	

Tabla 14: *cuestiones realizadas a los usuarios (SSQ)*

Una vez contestado el cuestionario el usuario volvía a entrar en el simulador y realizaba una nueva prueba, donde volvía a recorrer 2 vueltas al circuito con el mismo protocolo

exacto que la primera vez. Una vez finalizada la prueba el usuario volvía a contestar un nuevo cuestionario.

La diferencia entre la primera prueba y la segunda radicaba en que una de las dos contenía la aplicación de las heurísticas y la otra no. Si las heurísticas estaban aplicadas en la primera o segunda prueba era aleatorio, por lo que se garantiza la uniformidad de resultados en los cuestionarios y el tratamiento como estudios “doble ciego”, es decir, que el investigador desconoce quiénes eran los participantes de cada grupo experimental, asegurando la imparcialidad del observador.

5.4.- Participantes

El grupo de estudio inicial estaba formado por 42 participantes, número suficiente como para poder obtener unos resultados significativos. De ellos, había 21 hombres y 21 mujeres, por lo que tuvo una paridad plena eliminando así el posible sesgo de género, aspecto fundamental a la hora de medir sensaciones y mareo en los simuladores [195].

Respecto a las edades de los participantes, la Figura 74 muestra la agrupación realizada por décadas de la edad de los participantes en el estudio. Como puede apreciarse, el

75% de los usuarios están en el rango de los 40 a los 60 años, siendo el más joven de 20 y el más mayor de 58 años.

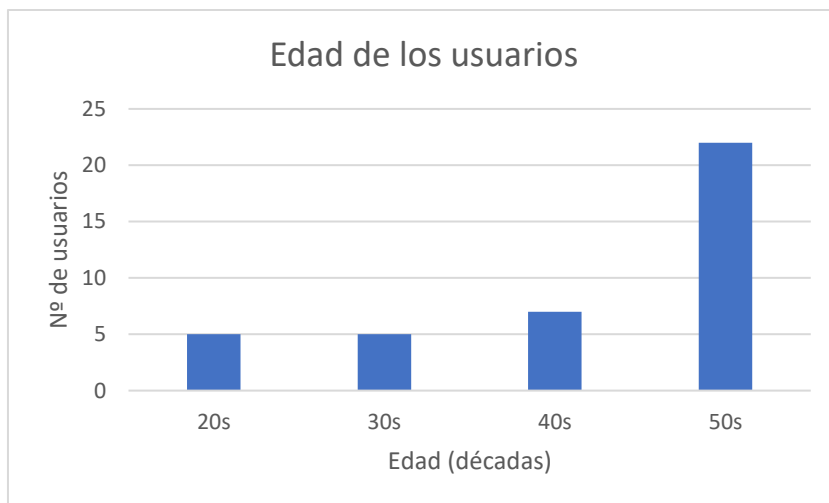


Figura 74: *edad de los usuarios participantes en el estudio*

Consecuentemente con estos datos y con la costumbre en España de obtener el carné de conducción en edades próximas a la de obtención de la mayoría de edad, se observa que el 62% de los usuarios tienen una experiencia en conducción superior a los 30 años. Los datos pueden observarse en la Figura 75.

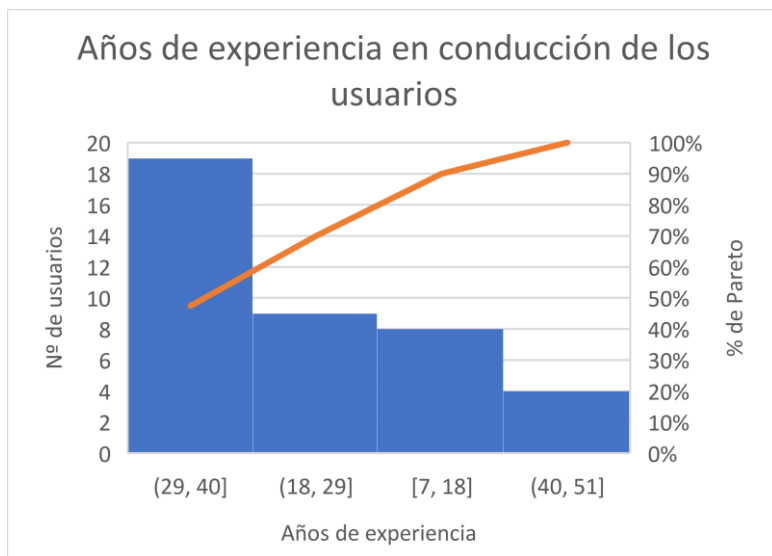


Figura 75: años de experiencia en conducción de los usuarios participantes en el estudio

Respecto a las profesiones de los participantes, la Figura 76 muestra los datos completos, pero se observa un predominio de profesores universitarios y de ingenieros en informática. Esto se justifica por el entorno en el que se llevaron a cabo las pruebas: la Escuela Técnica Superior de Ingeniería.



Figura 76: profesión de los usuarios participantes en el estudio

Durante las pruebas realizadas, hubo 2 usuarios que no pudieron finalizar el experimento debido a la enorme sensación de mareo que sufrieron. Concretamente, estas dos personas tuvieron que detenerse a los 10 segundos (aprox.) después de haber comenzado la primera de las vueltas, la de familiarización. Por lo tanto, estos dos usuarios se han eliminado de la muestra, quedando un total de pruebas válidas de 40 usuarios.

5.5.- Medidas

Se tomaron diversas medidas sobre cada uno de los usuarios, durante y después de cada una de las pruebas. Concretamente se realizaron las siguientes medidas:

- Registro en tiempo real 1 (RTR1): corresponde al valor en tiempo del de la satisfacción del usuario en la primera prueba, sea con o sin heurística. Desde que el usuario se subía al simulador se registró el valor del eje X de un joystick inalámbrico que el usuario portaba en todo momento. Valores positivos indican satisfacción con el movimiento de la plataforma. Valores negativos indican la percepción de sensaciones descoordinadas o poco realistas por parte de la plataforma de movimiento.

El software genera un ID_Usuario anonimizado a los datos que es el que se asignaba a cada cuestionario.

- Cuestionario 1 (C1): al finalizar la primera prueba (con o sin heurísticas) se rellenaba un cuestionario que constaba de los datos demográficos, las preguntas Q1-Q22 de Witner y la sintomatología S1-S15 del SSQ. El operario que realizaba los test

asignaba el ID_Usuario creado anteriormente a la encuesta.

- Registro en tiempo real 2 (RTR2): corresponde al valor en tiempo del de la satisfacción del usuario en la segunda prueba, sea con o sin heurística. Se realizaba un registro similar a RTR1 pero en la segunda prueba, que consistía en la misma que la primera pero con la condición contraria a la primera prueba.

- Cuestionario 2 (C2): al finalizar la segunda prueba los usuarios contestaban Q1-Q22 y S1-S15.

5.6.- Procedimiento

Las pruebas fueron llevadas a cabo durante la primera y segunda semana de septiembre de 2022, como se ha comentado, en un laboratorio de la ETSE-UV. Cada participante tardaba aproximadamente 1 hora desde su llegada hasta la finalización del experimento. Para la correcta coordinación se fueron asignando citas a cada participante, de manera que no llegaban a coincidir para intercambiar información sobre el experimento.

A la llegada, se recibía al participante y se le explicaba en qué consistía el experimento: dos pruebas con dos vueltas al

circuito en cada prueba, un registro en tiempo real mediante un joystick de las sensaciones de la plataforma y un cuestionario al finalizar cada prueba, sin hacerle referencia a nada relativo a la diferencia entre ambas pruebas ni a heurísticas ni variaciones en el control de la plataforma.

Tras este proceso, el asistente acompañaba al usuario al interior del simulador y lo acomodaba en el *cockpit*. Se le entregaba el *joystick* para el registro en tiempo real de los datos y se le explicaba que a través del joystick registrábamos las sensaciones que iba sintiendo respecto de la plataforma de movimiento. La Figura 77 muestra uno de los usuarios del experimento.



Figura 77: uno de los participantes en el estudio con el joystick para registro de datos en tiempo real

El asistente se bajaba del simulador y preguntaba al usuario si estaba listo, tras lo que se lanzaba la primera prueba. Durante las pruebas el asistente estaba debajo de la cabina de simulación, pero lo suficientemente cerca como para escuchar los comentarios de los usuarios, de manera que, si percibía algún problema o era necesario parar por algún motivo, el asistente pulsaba el botón de parada de emergencia y toda la simulación y el movimiento de la plataforma se detenía instantáneamente.

Al finalizar la prueba el operario proporcionaba al usuario una carpeta con una encuesta, de manera que el usuario podía contestarla (por comodidad) sin necesidad de salir del cockpit y bajar del simulador. La Figura 78 muestra uno de los usuarios en el momento de contestar una encuesta.



Figura 78: uno de los participantes rellenando una encuesta

Una vez contestada, el operario bajaba del simulador con la encuesta y comenzaba la segunda prueba, previamente consultado al usuario si estaba listo, en cuyo momento se lanzaba.

Al finalizar la prueba el operario volvía a subir al simulador con una nueva hoja de encuesta, que el usuario rellenaba en el mismo lugar. Tras esto, el operario animaba al usuario a salir del cockpit y bajar del simulador, momento en que el experimento con el usuario se daba por finalizado.

5.7.- Resultados

El análisis de los resultados se ha dividido en dos secciones. Por un lado, se ha realizado un análisis estadístico mediante el uso de la herramienta “Statistical Package for the Social Sciences (SPSS)” en su versión 28.0.1.1. Por otro lado, se realiza un análisis numérico sobre los resultados obtenidos con la recopilación de datos en tiempo real mediante el joystick.

5.7.1.- Análisis estadístico

En cuanto a los datos estadísticos, se seleccionó el nivel de significancia de 0.05 con dos colas. Se crearon dos grupos de estudio denominados “grupo A” y “grupo B”. El grupo A

corresponde a aquellos usuarios que primero realizaron la prueba “sin heurística” aplicada y luego la prueba “con heurística”. El grupo B corresponde a aquellos que primero realizaron la prueba “con heurística” y luego “sin heurística”.

En primer lugar, se realizaron las pruebas correspondientes de normalidad y homocedasticidad de los diferentes conjuntos de datos que formaron parte de los resultados obtenidos. En todos los conjuntos de datos se cumplieron ambos supuestos.

Abundando en las pruebas de normalidad comentadas anteriormente, se seleccionó el procedimiento de prueba de Kolmogorov-Smirnov [196], recomendado para medir el grado de concordancia existente entre la distribución de un conjunto de datos y una distribución teórica específica en tamaños de muestra relativamente pequeños (50 unidades), como era el caso. A modo de ejemplo, el resultado del estadístico de Kolmogorov-Smirnov para los conjuntos de datos REAL, INT, ACT, SOUND, EXAM y SELF, ha sido de 0.476, 0.721, 0.571, 0.698, 0.361 y 0.399, respectivamente.

Tras confirmar la normalidad se procedió a la selección de pruebas paramétricas para los diferentes procedimientos de contraste de hipótesis mostrados a lo largo de este capítulo:

- T-Student para muestras independientes
- T-Student para muestras emparejadas (grupo A y grupo B)
- Pruebas ANOVA
 - o Cuestiones Q1-Q19 agrupados por valores de Witmer: REAL, INT, SOUND, EXAM, ACT, SELF
 - o Cuestiones Q20, Q21 y Q22, es decir, de las relativas a los eventos seleccionados.
 - o Suma de los síntomas del SSQ agrupados por “con heurística” y “sin heurística”.
- Correlaciones de participantes que usaron la primera vez el sistema “con heurística” y “sin heurística”.
- T-Student para muestras emparejadas contrabalanceadas de todos los participantes

Respecto a la nomenclatura utilizada durante las siguientes secciones, se lista a continuación:

- REAL: agrupación de cuestiones Q3, Q4, Q5, Q6, Q8 y Q18 relativas al “realismo del simulador” según Witmer.
- INT: cuestión Q2, representativa de la “posibilidad de interacción” según Witmer.

- ACT: agrupación de cuestiones Q1, Q7 y Q14 relativas a la “posibilidad de actuación” según Witmer.
- SOUND: agrupación de cuestiones Q10 y Q11 relativas a los “sonidos” según Witmer.
- EXAM: agrupación de cuestiones Q13, Q17 y Q19 relativas a la “posibilidad de examinar el entorno” según Witmer.
- SELF: agrupación de cuestiones Q15 y Q16 relativas a la “autoevaluación de sí mismo” según Witmer.
- Q20, Q21 y Q22: cuestiones concretas relativas a las heurísticas introducidas
- S1 a S15: sintomatología de mareo según SSQ.

Cuando la nomenclatura aparece tal cual se ha listado, siempre hace referencia a la primera prueba, mientras que, si se acompaña de una X al final de la abreviatura, hace referencia a la segunda prueba. Por ejemplo, SELF corresponde a la agrupación de respuestas Q15 y Q16 contestadas tras la primera prueba, mientras que SELFX corresponde a la agrupación de respuestas Q15 y Q16 contestadas tras la segunda prueba.

5.7.1.1.- Muestras independientes

Se han creado dos grupos de estudio, con 20 participantes en cada uno, denominados “A” y “B”. El grupo A corresponde a los participantes que realizaron la primera prueba SIN heurísticas. El grupo B corresponde a los participantes que realizaron la primera prueba CON heurísticas. Se trata, por tanto, de grupos independientes, ya que cada uno está formado por participantes diferentes.

La Tabla 15 y Tabla 16 muestran los resultados numéricos de las preguntas de Witmer y las añadidas *ad hoc* para el experimento. Se observa para cada valor analizado el resultado de la primera prueba y de la segunda (con terminación en “X”).

En lo referente al t-student para muestras independientes, en la Tabla 16, se observa que hay 3 datos considerados como relevantes. Por un lado, las respuestas a Q21/Q21X (*He percibido correctamente mediante la plataforma de movimiento cuando alguna rueda pisaba un piano de la carretera*) y Q22/Q22X (*Estos dos últimos estímulos han ayudado a percibir mejor lo que estaba ocurriendo en la simulación*) y por otro lado S3X (*Estómago revuelto*).

Tesis doctoral:
Mejoras basadas en heurísticas para la percepción de estímulos de movimiento en simuladores de Realidad Virtual y Realidad Aumentada

Medida	REAL	REALX	INT	INTX	ACT	ACTX	SOUND	SOUNDX	EXAM	EXAMX	SELF	SELFx
Media (SINH)	4,91	5,17	4,76	5,24	5,11	5,16	5,07	4,98	4,84	5,11	5,31	5,38
DE (SINH)	0,61	0,67	0,62	0,62	0,50	0,66	0,78	0,90	0,90	0,74	0,68	0,67
Media (CONH)	4,89	4,85	4,84	4,84	5,05	5,16	4,92	5,08	5,00	4,96	5,26	5,34
DE (CONH)	0,74	0,69	0,90	1,01	0,81	0,76	1,02	1,15	0,90	0,79	0,93	0,78
T-student	0,13	1,46	-0,33	1,50	0,28	0,00	0,53	-0,32	-0,56	0,60	0,18	0,17
p	0,45	0,08	0,37	0,07	0,39	0,50	0,30	0,38	0,29	0,28	0,43	0,43
df (n+m-2 en tstudent)	38,00	38,00	38,00	38,00	38,00	38,00	38,00	38,00	38,00	38,00	38,00	38,00
Cohen's d	0,04	0,46	-0,11	0,48	0,09	0,00	0,17	-0,10	-0,18	0,19	0,06	0,05
Valor máximo	6,00	6,00	6,00	6,00	6,00	6,00	6,00	6,00	6,00	6,00	6,00	6,00

Tabla 15: resultados de t-test para muestras independientes agrupados por factores de Witmer

Medida	Q20	Q20X	Q21	Q21X	Q22	Q22X
Media (SINH)	4,48	4,90	3,62	5,48	3,95	5,43
DE (SINH)	1,97	1,51	1,86	1,12	1,83	1,33
Media (CONH)	4,95	4,47	5,63	3,84	5,58	4,42
DE (CONH)	1,27	1,02	0,76	1,71	0,77	1,22
T-student	-0,89	1,05	-4,40	3,61	-3,60	2,50
p	0,18	0,15	0,00	0,00	0,00	0,01
df (n+m-2 en tstudent)	38,00	38,00	38,00	38,00	38,00	38,00
Cohen's d	-0,29	0,34	-1,54	1,15	-1,25	0,79
Valor máximo	6,00	6,00	6,00	6,00	6,00	6,00

Tabla 16: resultados de t-test para muestras independientes Q20, Q21 y Q22

Respecto a las cuestiones Q20 y Q21, se observa que ambas poblaciones afirman que, gracias a la incorporación de la heurística, han percibido mejor los pianos que sin ellas.

La cuestión Q20 (*He percibido correctamente mediante la plataforma de movimiento los cambios de marcha*), aunque la p haya dado superior a 0.05, se aprecia un valor bastante inferior al del resto de las p del cuestionario (0.18 y 0.15) y se puede intuir que los usuarios han percibido mejor los cambios de marcha con heurística que sin ella.

Por lo tanto, analizando el contenido de las cuestiones Q20/Q20X y Q21/Q21X, se puede justificar el resultado observado en Q22/Q22X, donde se afirma que los usuarios han percibido que los estímulos (cambio de marchas y pianos) han ayudado a integrarse mejor en la simulación que estaba ocurriendo.

De lo anterior, se puede concluir ha habido ciertos estímulos que los usuarios han percibido mejor con la heurística aplicada que sin ella.

Respecto a los resultados arrojados por el SSQ, que se observan en la Tabla 17, no se han observado datos significativos que destacar.

Medida	Media (SINH)	DE (SINH)	Media (CONH)	DE (CONH)	T-student	p	df (n+m-2 en tstudent)	Cohen's d	Valor máximo
S1	0,19	0,51	0,32	0,58	-0,72	0,24	38	-0,23	2,00
S1X	0,38	0,86	0,42	1,02	-0,14	0,45	38	-0,04	4,00
S2	0,57	1,08	0,47	0,90	0,31	0,38	38	0,10	4,00
S2X	0,57	1,03	0,42	0,77	0,52	0,30	38	0,17	4,00
S3	0,24	0,54	0,21	0,54	0,16	0,44	38	0,05	2,00
S4X	0,62	1,36	0,21	0,71	1,17	0,12	38	0,39	5,00

S5	0,14	0,48	0,00	0,00	1,30	0,10	38	0,60	2,00
S5X	0,33	0,86	0,05	0,23	1,38	0,09	38	0,52	3,00
S6	0,05	0,22	0,05	0,23	-0,07	0,47	38	-0,02	1,00
S6X	0,00	0,00	0,05	0,23	-1,05	0,15	38	-0,46	1,00
S7	0,00	0,00	0,00	0,00			38		0,00
S7X	0,00	0,00	0,00	0,00			38		0,00
S8	0,19	0,68	0,11	0,32	0,50	0,31	38	0,17	3,00
S8X	0,29	0,90	0,21	0,42	0,33	0,37	38	0,11	3,00
S9	0,14	0,36	0,32	0,58	-1,14	0,13	38	-0,37	2,00
S9X	0,14	0,48	0,32	0,58	-1,03	0,16	38	-0,33	2,00
S10	0,10	0,30	0,05	0,23	0,50	0,31	38	0,16	1,00
S10X	0,10	0,30	0,00	0,00	1,38	0,09	38	0,63	1,00
S11	0,10	0,44	0,11	0,32	-0,08	0,47	38	-0,03	2,00
S11X	0,10	0,44	0,21	0,42	-0,85	0,20	38	-0,27	2,00
S12	0,00	0,00	0,00	0,00			38		0,00
S12X	0,10	0,30	0,00	0,00	1,38	0,09	38	0,63	1,00
S13	0,10	0,44	0,21	0,42	-0,85	0,20	38	-0,27	2,00
S13X	0,05	0,22	0,11	0,32	-0,68	0,25	38	-0,22	1,00
S14	0,52	1,17	0,37	0,68	0,51	0,31	38	0,17	5,00
S14X	0,57	1,25	0,47	1,12	0,26	0,40	38	0,08	5,00
S15	0,10	0,30	0,05	0,23	0,50	0,31	38	0,16	1,00
S15X	0,10	0,30	0,05	0,23	0,50	0,31	38	0,16	1,00

***Tabla 17:** resultados de t-test para muestras independientes SSQ*

5.7.1.2.- Muestras emparejadas

En lo referente a los resultados del t-test para muestras emparejadas, en primer lugar, se analizó el grupo A, comparando la primera prueba contra la segunda, es decir, “SIN heurísticas” contra “CON heurísticas”. En segundo

lugar, se analizó el grupo B, comparando la primera prueba contra la segunda, es decir, “CON heurística” contra “SIN heurísticas”.

Los resultados se pueden observar en la Tabla 17 y Tabla 18. En ambas, coinciden los resultados con los obtenidos en las Tablas 15 y 16, basada en prueba ciega. Este hecho refuerza la validez del estudio presentado y la fiabilidad de los datos recogidos.

Observando las tablas y más concretamente los valores Witmer para el grupo A, se aprecia que los usuarios perciben mayor realismo y una mejor interacción con el simulador en las pruebas en las que se incluyeron las heurísticas frente a aquellas en las que no se incluyeron.

Que sólo pase en el grupo A y no en el B, pone de manifiesto que el orden es importante. Teniendo en cuenta que la mayoría de usuarios nunca había probado un simulador, es muy probable que al primero de los cuestionarios respondan con valores relativamente altos (efecto sorpresa). En el grupo A (primera prueba sin heurística), los valores del segundo cuestionario mejoraron significativamente, mientras que en grupo B (primero con heurística), aunque también mejoraron, la mejora no fue significativa.

SINH + CONH	REAL/X	INT/X	ACT/X	SOUND/X	EXAM/X	SELF/X	Q20/X	Q21/X	Q22/X
SINH (AVG)	4,91	4,76	5,11	5,07	4,84	5,31	4,48	3,62	3,95
SINH (SD)	0,61	0,62	0,50	0,78	0,90	0,68	1,97	1,86	1,83
CONH (AVG)	5,17	5,24	5,16	4,98	5,11	5,38	4,90	5,48	5,43
CONH (SD)	0,67	0,62	0,66	0,90	0,74	0,67	1,51	1,12	1,33
t	-2,46	-2,91	-0,43	0,53	-1,97	-0,65	-1,53	-4,81	-3,93
p	0,01	0,00	0,34	0,30	0,32	0,26	0,07	0,00	0,00
df	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00
Cohen's d	-0,39	-0,76	-0,08	0,11	-0,33	-0,11	-0,25	-1,25	-0,94

Tabla 17: resultados de t-test para muestras emparejadas (grupo A)

CONH + SINH	REAL/X	INT/X	ACT/X	SOUND/X	EXAM/X	SELF/X	Q20/X	Q21/X	Q22/X
CONH (AVG)	4,89	4,84	5,05	4,92	5,00	5,26	4,95	5,63	5,58
CONH (SD)	0,74	0,90	0,81	1,02	0,90	0,93	1,27	0,76	0,77
SINH (AVG)	4,85	4,84	5,16	5,08	4,97	5,34	4,47	3,84	4,42
SINH (SD)	0,69	1,01	0,76	1,15	0,79	0,78	1,02	1,71	1,22
t	0,32	0,00	-1,10	-1,84	0,26	-0,62	1,25	4,10	3,54
p	0,38	0,50	0,14	0,41	0,40	0,27	0,11	0,00	0,00
df	18,00	18,00	18,00	18,00	19,00	18,00	18,00	18,00	18,00
Cohen's d	0,05	0,00	-0,13	-0,15	0,04	-0,09	0,41	1,45	1,17

Tabla 18: resultados de t-test para muestras emparejadas (grupo B)

Además, llama la atención las respuestas dadas en Q21 y Q22, con una $p < 10^{-3}$, en las que se observa que la percepción del piano y los cambios de marcha han sido mucho mejor con las heurísticas que sin ellas. En este sentido, Q20 muestra una $p = 0.071$, que, aunque no es inferior a los 0.05 establecidos para considerarla representativa, sí se aproxima mucho.

5.7.1.3.- Análisis ANOVA

Se han realizado un total de 11 análisis ANOVA con las siguientes variables:

- Variables dependientes: REAL, INT, ACT, SOUND, EXAM, SELF, Q20, Q21, Q22, suma de variables del SSQ tras la primera prueba, suma de variables del SSQ tras la segunda prueba.
- Variables independientes para cada dependiente:
 - o Variable que engloba la primera prueba (sin heurísticas) del Grupo A y la primera prueba (con heurísticas) del Grupo B (GRUP)
 - o Sexo (HM)
 - o Edad
 - o Canet de conducir (B1)
 - o Año de obtención del B1 (AñoB1)
 - o GRUP*HM
 - o GRUP*Edad
 - o GRUP*B1
 - o GRUP*AñoB1
 - o HM*Edad
 - o HM*B1
 - o HM*AñoB1
 - o Edad*B1
 - o Edad*AñoB1
 - o B1*AñoB1

De entre todas las combinaciones de factores evaluados, llama la atención la diferencia entre hombres y mujeres, donde su significancia es muy relevante en la posibilidad de examinar el entorno (EXAM) y en la autoevaluación del usuario (SELF) durante la prueba en el simulador. En ambos casos los hombres se ven más capacitados que las mujeres. En este grupo llama también la atención que, tanto en el grupo de estudio A como en el B, hay coincidencia en que las mujeres se marean más que los hombres. Posiblemente esta sensación de mareo en las mujeres sea precisamente la que dificulte respecto a los hombres el examinar el entorno y su propia autoevaluación en la prueba. Estos resultados ratifican lo publicado por Hancock [2], que establece que, en general, las mujeres se marean más que los hombres en los simuladores.

Otros dos factores relevantes son el año de obtención del permiso de circulación y la edad de los conductores. Estos factores están directamente relacionados y se ha observado, según los datos demográficos, que la medida de edad de obtención del carné de conducir de los usuarios se sitúa en los 19 años. Por ello, trataremos ambos factores como uno solo para afirmar, en base a los resultados, que cuanto más joven es el usuario mayor es su autoevaluación respecto a su desempeño (SELF) de la simulación y su capacidad de examinar el entorno recreado (EXAM). Este resultado no es de extrañar, ya que la relación diaria de los usuarios con las

nuevas tecnologías y lo familiarizados que se sienten con ellas está directamente relacionado con su edad. Cuanto más jóvenes mayor influencia han tenido en su día a día las pantallas digitales, videoconsolas, etc, y, por lo tanto, mejor desempeño realizan en un simulador basado en gráficos por computador.

En lo referente a la variable dependiente Q22, destaca la unión de personas que han recibido cursos formativos y que previamente habían probado simuladores de conducción con plataforma de movimiento. Los usuarios de este grupo destacan que han percibido mucho mejor los estímulos de los pianos y los cambios de marcha con las heurísticas que sin ellas. Cabe destacar que este dato tiene especial relevancia para los investigadores, ya que se parte de que este grupo es el que se presupone más experto tanto en simulación como en conducción.

Por último, en lo referente a las cuestiones relacionadas con el mareo, además de la afirmación de que las mujeres se marean más, también destaca que, a menos edad, menor es la sensación de mareo en el simulador. Para los autores, esto ocurre nuevamente por la relación entre la edad de los usuarios y su familiarización con todo lo relacionado con las nuevas tecnologías.

5.7.1.4.- Correlación estadística

En este apartado se estudiarán las correlaciones existentes entre las diferentes variables que se han ido analizando. Para cada una de ellas se evalúa el coeficiente de correlación de Pearson y la significancia. Se considerarán como valores que correlan aquellos con valor de Pearson <-0.7 o >0.7 y con una significancia <0.05 .

Concretamente, se han analizado las correlaciones para el Grupo A, es decir, para aquellos que la primera prueba era sin heurísticas y la segunda con heurísticas. La Tablas 19 y 20 muestran los resultados.

		SIN HEURÍSTICA					
		REAL	INT	ACT	SOUND	EXAM	SELF
REAL	Pearson		0,769	0,479	0,441	0,404	0,188
	Sig.		0,001	0,028	0,046	0,069	0,415
INT	Pearson	0,769		0,571	0,293	0,195	0,064
	Sig.	0,001		0,007	0,197	0,397	0,781
ACT	Pearson	0,479	0,571		0,344	0,386	0,336
	Sig.	0,028	0,007		0,127	0,084	0,136
SOUND	Pearson	0,441	0,293	0,344		0,100	0,121
	Sig.	0,046	0,197	0,127		0,067	0,600
EXAM	Pearson	0,404	0,195	0,386	0,100		0,409
	Sig.	0,069	0,397	0,084	0,668		0,065
SELF	Pearson	0,188	0,064	0,336	0,121	0,409	
	Sig.	0,415	0,781	0,136	0,600	0,065	

Tabla 19: tabla de correlación de factores Witmar para pruebas “sin heurísticas”

		CON HEURÍSTICA					
		REAL	INT	ACT	SOUND	EXAM	SELF
REAL	Pearson		0,046	0,635	0,457	0,636	0,719
	Sig.		0,047	0,003	0,049	0,003	0,001
INT	Pearson	0,461		0,597	0,441	0,320	0,119
	Sig.	0,047		0,007	0,058	0,182	0,629
ACT	Pearson	0,635	0,597		0,780	0,717	0,666
	Sig.	0,003	0,007		0,001	0,001	0,002
SOUND	Pearson	0,457	0,441	0,780		0,776	0,652
	Sig.	0,049	0,058	0,001		0,001	0,002
EXAM	Pearson	0,636	0,320	0,717	0,776		0,725
	Sig.	0,003	0,182	0,001	0,001		0,001
SELF	Pearson	0,719	0,119	0,666	0,652	0,725	
	Sig.	0,001	0,629	0,002	0,002	0,001	

Tabla 20: tabla de correlación de factores Witmer para pruebas “con heurísticas”

En la primera de las tablas puede observarse una clara correlación entre el realismo y la calidad de la interfaz. Concretamente y en base a las preguntas agrupadas en el factor “INT” según Witmer, los autores entienden INT como cuestiones relacionadas con el entorno gráfico y la calidad visual. Esta correlación parece obvia, ya que, a mejor calidad visual, mayor realismo. La parte sorprendente de esta correlación es que no se manifiesta en la segunda de las tablas, que mide los valores con la heurística aplicada.

De igual manera, en la segunda tabla aparecen una serie de correlaciones que no se manifiestan en la primera. Esta singularidad se podría interpretar debido al gran entrelazamiento existente entre las diversas preguntas que forman parte de las agrupaciones de Witmer. Por ejemplo, Q7 – “Mi visión exploraba activamente todo el entorno a medida que usaba el simulador”, perteneciente al grupo ACT

y Q13 – “Pude examinar los elementos de la simulación desde múltiples puntos de vista”, perteneciente al grupo EXAM, para el autor son preguntas que están plenamente ligadas, ya que ambas se relacionan con el sistema visual del simulador (FOV y calidad gráfica) y por lo tanto, su correlación parece evidente.

El hecho de que existan muchas más variables con una alta correlación en la segunda de las tablas, la que engloba los resultados “con heurísticas” aplicadas, pone de manifiesto que los usuarios han contestado de manera más coherente cuando hay heurísticas que cuando no las hay.

5.7.1.5.- Muestras emparejadas contrabalanceadas

Otro de los análisis realizados ha sido el de observar la diferencia de las medias de los resultados con y sin heurística aplicada con las respuestas de todos los participantes en el estudio. La Tabla 21 muestra estos resultados de las medias y su diferencia.

		Promedio SIN Heurística (0-6)	Promedio CON Heurística (0-6)	Diferencia (0-6)
Pude entender todos los eventos y situaciones durante mi conducción en el simulador	Q1	5,55	5,6	0,05
El simulador siempre respondía como era de esperar en cada situación	Q2	4,8	5,05	0,25
La interacción con los elementos visuales del simulador me ha parecido muy natural	Q3	4,875	4,925	0,05
Los elementos visuales del simulador me involucraron en una conducción virtual	Q4	5	5,2	0,2
La sensación de movimiento de los elementos visuales me ha parecido convincente	Q5	4,875	4,975	0,1

Tesis doctoral:
Mejoras basadas en heurísticas para la percepción de estímulos de movimiento en simuladores de Realidad Virtual y Realidad Aumentada

Las experiencias de conducción en el entorno virtual coinciden con las del mundo real	Q6	4,475	4,65	0,175
Mi visión exploraba activamente todo el entorno a medida que usaba el simulador	Q7	4,925	4,75	-0,175
La sensación de moverte dentro del entorno virtual era convincente	Q8	4,9	5,025	0,125
Pude mover o manipular objetos en el entorno virtual	Q9	---	---	---
En todo momento puede identificar los sonidos procedentes del simulador	Q10	5,275	5,175	-0,1
Pude localizar la procedencia (origen) de los sonidos que escuché durante la conducción	Q11	4,875	4,725	-0,15
Podría explorar o buscar activamente en el entorno virtual utilizando el tacto	Q12	---	---	---
Pude examinar los elementos de la simulación desde múltiples puntos de vista	Q13	4,425	4,55	0,125
Fui capaz de saber lo que iba a suceder tras determinados eventos ocurridos	Q14	4,925	4,975	0,05
Me adapté con rapidez a la experiencia de conducir en un simulador virtual	Q15	5,3	5,3	0
Me sentí integrado en la simulación al final del recorrido	Q16	5,35	5,35	0
Me concentré en la pura conducción y no elementos tipo mandos, plataforma, etc.	Q17	5,05	5,25	0,2
Mis sentidos se involucraron en esta experiencia de conducción	Q18	5,175	5,425	0,25
Durante todo momento me sentí completamente concentrado en la conducción o el entorno	Q19	5,225	5,375	0,15
He percibido correctamente mediante la plataforma de movimiento los cambios de marcha	Q20	4,5	4,925	0,425
He percibido correctamente mediante la plataforma de movimiento cuando alguna rueda pisaba un plano de la carretera	Q21	3,725	5,55	1,825
Estos dos últimos estímulos han ayudado a percibir mejor lo que estaba ocurriendo en la simulación	Q22	4,175	5,5	1,325

Tabla 21: *tabla de medias de muestras emparejadas contrabalanceadas de todos los participantes en el estudio*

Los valores referentes al cuestionario Witmer no han arrojado resultados significativos. Tampoco lo han hecho los valores del SSQ, donde se confirma que la versión con heurísticas no interfiere en si la gente se marea más o menos durante el uso del simulador.

Por otro lado, y tal y como se puede observar, los 3 valores que han arrojado resultados significativos son Q20, Q21 y

Q22, es decir, las preguntas que inferían directamente sobre los eventos en los que estaban aplicadas las heurísticas. Los análisis *t-test* para estos valores han arrojado resultados $p=0.049$, $p<10^{-6}$ y $p<10^{-5}$ respectivamente.

Como se observará más adelante, los datos registrados en tiempo real concuerdan con los resultados de la diferencia de las medias mostrados en la tabla anterior.

De esto se puede extrapolar que los usuarios han percibido perfectamente los dos eventos que se pretendía que percibiesen; es decir, los cambios de marcha y las salidas de rueda de la calzada, por lo que el objetivo de la aplicación de heurísticas parece satisfecho.

5.7.2.- Análisis numérico de datos registrados en tiempo real

Para cada usuario del experimento se generaban dos ficheros .dat con la información registrada en tiempo real por el usuario respecto a la sensación (buena o mala) que le estaba transmitiendo la plataforma de movimiento.

Como se ha comentado, de los 42 usuarios que realizaron las pruebas, únicamente 40 de ellos se consideraron como usuarios válidos, ya que dos no pudieron estar más de 10s subidos al simulador debido a la sensación de mareo.

La generalidad en los datos registrados es que los usuarios no tocaban el joystick excepto en momentos concretos de la simulación. Es decir, la mayor parte del tiempo el valor transmitido era 0, mientras que cuando los usuarios detectaban algo que les llamaba la atención, para bien o para mal, movían el joystick y el valor registrado era proporcional a la buena o mala sensación que tenían.

Los datos obtenidos se mediaron, primero los “sin heurística” y luego los “con heurística. Posteriormente se restaron “sin”-“con”, para finalmente pasarlos a través de un filtro adaptativo, con el objetivo de eliminar ruido, y poder obtener la gráfica que se observa en la Figura 79.

Tras observar el resultado, que muestran claramente 5 picos que difieren de la normalidad, se etiquetó, gracias a las marcas temporales, lo que ocurría en esos 5 instantes de la simulación. Para esto se ha tenido en cuenta el ligero retraso de los usuarios a la hora de transmitir la sensación una vez ocurrido cierto evento.

Se observa que los eventos se enmarcan en frenadas que conllevan unos cambios de marchas muy rápidos en poco tiempo (cuando se reduce bruscamente para hacer freno motor) y, sobre todo, llama la atención el piano.

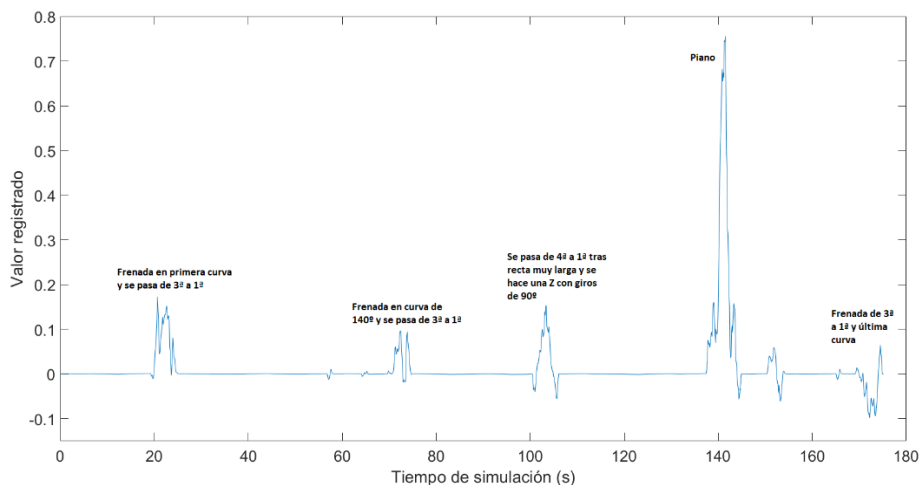


Figura 79: registro de sensaciones vestibulares registradas por usuarios en tiempo real durante el experimento

El último de los picos corresponde al final del circuito, que concatena una serie de curvas en zigzag, con gran reducción de velocidad y posterior aceleración una vez pasada la curva. En conversaciones con los usuarios, transmitían que en ese momento exacto tenían sensación de estar más en una barca o un avión que en un coche.

Del resto de picos observados en la gráfica, se pone de manifiesto que ambos efectos introducidos mediante heurísticas, tanto los cambios de marcha como el piano, han tenido un efecto muy satisfactorio en lo referente a la percepción vestibular de los usuarios.

5.8.- Conclusiones

El presente estudio parte de las conclusiones del Capítulo 4, donde se observó que los MCA que generan las señales de movimiento para las plataformas, teniendo en cuenta sus límites constructivos, la mayor parte del tiempo reproducen adecuadamente el movimiento que un usuario espera recibir, pero hay ciertas señales que el propio MCA elimina. Estas señales, que se acabarían convirtiendo en sensaciones vestibulares que recibiría el usuario, es muy posible que contengan información muy útil respecto de lo que esté ocurriendo en cierto momento en una simulación.

Si esta información se pierde y el momento en que se produce la pérdida es relevante para el objetivo que cumple el simulador, por ejemplo, para simuladores formativos de conducción, el usuario no estará recibiendo unos estímulos adecuados y, por tanto, actuará en consecuencia de lo que reciba.

Para tratar de resolver esta problemática el autor hipotetiza sobre la introducción en los MCA de ciertas señales que vayan en paralelo a los cálculos internos del MCA y que aseguren que se transmitirán adecuadamente al usuario.

Para poder poner a prueba esta hipótesis se ha utilizado un simulador de conducción, altamente inmersivo, que consta de una plataforma de movimiento 6DOF con pantalla de

proyección (FOVH 300°) y cockpit de conducción embarcados, el cual ha sido probado por 40 usuarios.

Cada uno de los usuarios probaba el simulador en dos ocasiones, una utilizando un MCA basado en el classical washout y otra utilizando el mismo MCA pero modificado con unas pequeñas heurísticas que sumaban señales en ciertos DOFs en momentos muy determinados de una misma simulación. El orden de estas pruebas era aleatorio, de manera que unas veces el algoritmo original era el primero en probarse, mientras que otras veces era el modificado con las heurísticas.

El MCA con heurísticas remarcaba dos eventos que ocurrían durante la simulación. El primero de ellos era los cambios de marchas, para los que se generaba una señal de baja amplitud y alta frecuencia en pitch, positivo o negativo según si se incrementaba o decrementaba la marcha. El segundo de ellos trataba de dar continuidad a uno de los eventos detectados en el Capítulo 4 como “importantes” para un simulador de conducción y era el hecho de saber cuándo alguna rueda del coche salía de la calzada o, lo que es lo mismo, pisaba un plano del circuito.

Al finalizar cada una de las pruebas, los usuarios contestaban una encuesta que se dividía en tres bloques. Un bloque inicial sobre datos demográficos, un segundo bloque basado

en el cuestionario de Witmer sobre presencia en simuladores y un último bloque SSQ para medir la sensación de mareo.

Además, se monitorizó en tiempo real en cada una de las pruebas la sensación que tenían los usuarios sobre los movimientos que estaba generando la plataforma y los inputs vestibulares que generaba.

Los resultados de Witmer y SSQ fueron analizados y validados estadísticamente, haciendo uso del SPSS, mediante muestras independientes, muestras emparejadas, ANOVA, correlaciones y muestras emparejadas contrabalanceadas. De estos análisis se concluye que los usuarios no tienen diferente sensación de presencia y de mareo con la implementación del MCA con y sin heurísticas.

Por otro lado, y en base a las preguntas concretas relacionadas con los eventos en los que en los que se producían señales heurísticas, se concluye que los usuarios percibieron mejor los cambios de marcha y las salidas de ruedas de la calzada en la versión con heurísticas que sin ellas. Además, se concluye que estos eventos han ayudado a los usuarios a percibir mejor lo que estaba ocurriendo en cada instante en la simulación.

Por lo tanto, parece demostrado que el uso de heurísticas para eventos concretos que generalmente son filtrados por los MCA parece una buena alternativa cuando el

desarrollador de un simulador quiere asegurarse de que no se pierden las sensaciones vestibulares de esos eventos.

Hay que remarcar que, si esos eventos son importantes para el uso que se le da al simulador, como es el caso ejemplificativo en el que se ha basado este experimento y que consiste en los simuladores formativos de conducción, mediante el uso del tipo de heurísticas implementadas en este experimento se asegura la percepción vestibular por parte de los usuarios.

CAPÍTULO 6: Conclusiones y trabajo futuro

En este último capítulo resumiremos las conclusiones más significativas del trabajo previamente expuesto, sugeriremos las líneas de investigación futuras y enumeraremos las aportaciones científicas resultantes de estos estudios.

6.1.- Conclusiones y aportaciones

El objetivo principal con el que se comenzó esta tesis era demostrar que, mediante el uso de ciertas heurísticas, se puede mejorar la percepción de movimiento de los usuarios, a través de su sistema vestibular, en simuladores basados en realidad virtual y/o realidad aumentada. Llegados a este punto y tras toda la exposición previa, se puede afirmar que este objetivo ha quedado relativamente satisfecho por los motivos que se exponen a continuación.

El objetivo principal con el que se comenzó esta tesis era demostrar que el sistema vestibular es un sentido clave en los simuladores basados en realidad virtual/aumentada y que, mediante el uso de ciertas heurísticas, se puede mejorar la percepción de movimiento de los usuarios en estos simuladores. Llegados a este punto y tras toda la exposición

previa, se puede afirmar que este objetivo ha quedado relativamente satisfecho por los motivos que se exponen a continuación.

En primer lugar, se ha comenzado valorando la importancia del sentido de movimiento en los simuladores formativos. Para ello se ha analizado, diseñado y construido un simulador de vuelco de coche basado en realidad virtual que tenía por objetivo la concienciación respecto al uso del cinturón de seguridad. El gran esfuerzo de desarrollo de este simulador consistía en que el usuario está situado, portando un casco de realidad virtual, dentro de un vehículo real, que es el que da vueltas y, por tanto, hace que el usuario sienta realmente la sensación de un vuelco de coche.

Este sistema se ha utilizado para, mediante encuestas a usuarios, comprobar que el nivel de concienciación se ha incrementado notablemente achacando este incremento precisamente a poner a los usuarios “boca abajo” (con el cinturón puesto) dentro de un coche real.

En segundo lugar, el estudio ha continuado mediante la introducción de plataformas de movimiento. Para ello se ha analizado, diseñado y desarrollado un sistema altamente inmersivo, que cuenta con una plataforma de movimiento 3DOF capaz de soportar a 12 usuarios simultáneos, destinado a la concienciación en seguridad vial.

Este sistema tiene la particularidad de integrar una pantalla de proyección de gran formato sobre la que se proyectan imágenes generadas digitalmente junto a otras grabadas de la vida real. Esto hace que la generación de movimiento de la plataforma sea muy compleja y el autor ha propuesto, de manera novedosa, un método heurístico, basado en un algoritmo, mediante el cual se puede modificar y validar el movimiento generado. Este sistema fue validado mediante encuestas por más de 500 usuarios, poniendo de manifiesto, gracias a un metaanálisis de los resultados, la importancia de la percepción de movimiento, esta vez generado mediante un sistema complejo como es una plataforma de movimiento 3DOF, en el nivel de concienciación alcanzado por los usuarios.

En tercer lugar y vista la importancia de transmitir adecuadamente el movimiento a los usuarios de simuladores, se han identificado las aceleraciones que se pierden con una configuración estándar de MCA para un simulador de conducción de coche formativo que consta de una plataforma de movimiento 6DOF.

Para ello se ha sensorizado un coche real y se han registrado las aceleraciones y velocidades angulares que se sufren según lo que se esté haciendo en cada momento de la conducción. Estos datos se han introducido en un software que simula el comportamiento de una plataforma de movimiento 6DOF

configurada con un MCA estándar (classical washout), analizando los datos introducidos y los generados por la plataforma.

Como conclusión de este experimento se ha determinado que hay ciertos movimientos que se pierden al ser filtrados y que, si estos movimientos ocurren en situaciones de conducción importantes, como puede ser pasar por encima de unas bandas sonoras reductoras de velocidad, el usuario perderá una información vital para saber cómo debe reaccionar ante esa situación y, por lo tanto, el proceso formativo se verá mermado.

Por último, y vista la imposibilidad, debido a las características constructivas de las plataformas de movimiento, de que los MCA reproduzcan todas las aceleraciones correspondientes a lo que ocurre en los vehículos simulados, el autor propone que, gracias a la introducción de ciertas heurísticas en los MCA, será posible asegurar que aquellas aceleraciones que se consideren importantes para el objetivo del simulador no se pierdan.

Para demostrar esta hipótesis se ha utilizado un simulador de conducción altamente inmersivo que consta de una plataforma de movimiento 6DOF con pantalla y cockpit de conducción embarcados. 40 usuarios probaron la plataforma con y sin el sistema de heurísticas desarrollado de manera novedosa por el autor, concluyendo que los dos eventos que

se pretendía remarcar se han transmitido de forma exitosa al usuario y, por tanto, se ha demostrado la hipótesis inicial.

6.2.- Implicaciones prácticas

Teniendo en cuenta la época en la que nos encontramos, donde cada vez se tiende más al uso de simuladores como alternativa segura, económica y amigable para cualquier tipo de proceso formativo, cualquier avance en este campo puede tener grandes implicaciones. A continuación, se enumeran dos ejemplos prácticos.

En el mundo audiovisual y del cine cada vez existen más salas 4D, 5D, 6D...nD, donde una de las D (dimensiones) que no suele faltar es la del movimiento. Algunas salas de cine cuentan ya con asientos que incorporan plataformas de movimiento debajo, de manera que, en función de lo que ocurra en la película, el asiento de cada usuario (o una plataforma que engloba a varios usuarios) se mueve de una manera u otra. En este campo, el algoritmo de generación y validación de movimiento desarrollado en el Capítulo 4 puede tener un gran impacto, ya que puede ayudar a los desarrolladores del software para este tipo de salas a mejorar enormemente la percepción de movimiento que tienen los espectadores.

Si nos trasladamos al ejemplo de los simuladores de autoescuela, queda patente que su uso se está extendiendo día a día, siendo raro encontrar alguna autoescuela cuyas primeras lecciones prácticas no se desarrollen en simuladores. Si estos simuladores no transmiten adecuadamente el movimiento del coche virtual que el alumno está manejando, es imposible que el alumno reaccione de manera adecuada. Ahora imaginemos algo que ya se realiza en otros países y que tal vez veamos en unos años en España; es decir, imaginemos que ese mismo simulador, en lugar de servir para enseñar sirve para evaluar, es decir, para poder medir de manera analítica si un usuario debe obtener o no el carné de conducir. ¿Qué nos parecería suspender porque no hemos percibido adecuadamente lo que está ocurriendo en la simulación? Gracias al sistema basado en heurísticas desarrollado en el Capítulo 6, se puede afirmar que la plataforma de movimiento transmitirá aquellos movimientos que los desarrolladores (o los profesores de autoescuela) consideren importantes.

6.3.- Trabajo futuro

En primer lugar, en el Capítulo 1, se ha mostrado la importancia del movimiento en el uso final del simulador desarrollado, en nuestro caso, la concienciación sobre el uso

del cinturón de seguridad. Este simulador constaba únicamente de 1DOF, concretamente de roll. Convendría analizar para otros usos si, moviendo a los usuarios en otros DOFs de manera independiente, es decir, utilizando un solo DOF, el resultado sigue siendo similar.

Respecto a la caracterización del movimiento del coche y las pruebas en la pérdida de movimientos en el MCA, se ha demostrado en 3 eventos muy concretos. Sería conveniente ampliar este estudio con nuevos vehículos y nuevas situaciones en carretera que pusiesen de manifiesto la pérdida de movimiento.

Además, otro aspecto fundamental en lo referente a los simuladores de conducción formativos radica en enumerar en qué situaciones se considera importante que nunca se produzca una pérdida de sensación de movimiento. Esto servirá para hacer más fidedignos los movimientos generados en los simuladores.

Por último, el autor ha propuesto un método heurístico que ha dado buenos resultados, pero es consciente de que, de buen seguro, existen otros muchos métodos heurísticos que, aplicados a los MCA lograrán también transmitir las sensaciones vestibulares consideradas como importantes.

6.4.- Publicaciones científicas

El presente trabajo ha dado fruto a diversas publicaciones científicas que se enumeran a continuación por orden cronológico:

- **J.V. Riera**, Sergio Casas, Francisco Alonso y Marcos Fernández - **A VR-Enhanced Rollover Car Simulator and Edutainment Application for Increasing Seat Belt Use Awareness** - April 2021 - Computers 10(5):55 - DOI: 10.3390/computers10050055
- **J.V. Riera**, Sergio Casas, Marcos Fernández, Francisco Alonso y Sergio Useche - **Development of a Hybrid Method to Generate Gravito-Inertial Cues for Motion Platforms in Highly Immersive Environments** - December 2021 - Sensors 21(23):8079 - DOI: 10.3390/s21238079
- **J.V. Riera**, Sergio Casas, Marcos Fernández y Francisco Alonso - **A Case Study on Vestibular Sensations in Driving Simulators** - August 2022 - Sensors 22(15):5837 - DOI: 10.3390/s22155837
- **J.V. Riera**, Sergio Casas, Pedro Morillo y Marcos Fernandez - **Evaluation of a novel heuristic system for MCA based on washout filters** – En redacción.

Además, el simulador utilizado para el experimento llevado a cabo en el Capítulo 6 ha dado lugar a:

- Licencia de **Propiedad Intelectual en explotación**, bajo el nombre “**Simulador de Formula 1**” – Sergio Casas, Marcos Fernández, Jesús Gimeno, Manuel Pérez y **J.V. Riera**.

6.5.- Impacto social

La primera muestra de relevancia del impacto social de los presentes trabajo se pone de manifiesto con la nueva contratación que ha recibido el IRTIC hace escasos meses para el desarrollo de dos nuevos simuladores de vuelco de coche (*Roll Over Simulator*) como los utilizados en el experimento explicado en el Capítulo 2.

Estos nuevos sistemas, a diferencia de los anteriores, se han diseñado como un único conjunto perteneciente a un remolque, de manera que el sistema es fácilmente transportable con cualquier vehículo y no requiere más de 15 minutos después de cada transporte para su puesta en funcionamiento. La Figura 80 muestra el diseño (arriba) y el sistema real construido (abajo).

Una incorporación respecto a los anteriores rollovers desarrollados es que, esta vez, el sistema es capaz de grabar

un vídeo de lo que está ocurriendo dentro del coche mientras gira. Cuando algún usuario finaliza la experiencia, el sistema le envía a la dirección de email proporcionado un enlace desde el que se puede descargar el vídeo.

Para el autor, esta nueva incorporación redundará en el que el usuario pueda observarse a sí mismo “boca abajo”, como si fuese en tercera persona, y sea más consciente de la importancia de ponerse siempre en cinturón de seguridad.

Muchos de los trabajos expuestos en esta tesis doctoral han sido fruto de proyectos realizados como personal investigador del IRTIC. Como tal y con el afán de investigar y transferir para que toda la sociedad se acabe beneficiando, estos proyectos han tenido un impacto social y mediático que no debe pasar desapercibido en este documento. A continuación, se muestran algunas imágenes sobre publicaciones en distintos medios de comunicación sobre el impacto social de los proyectos.

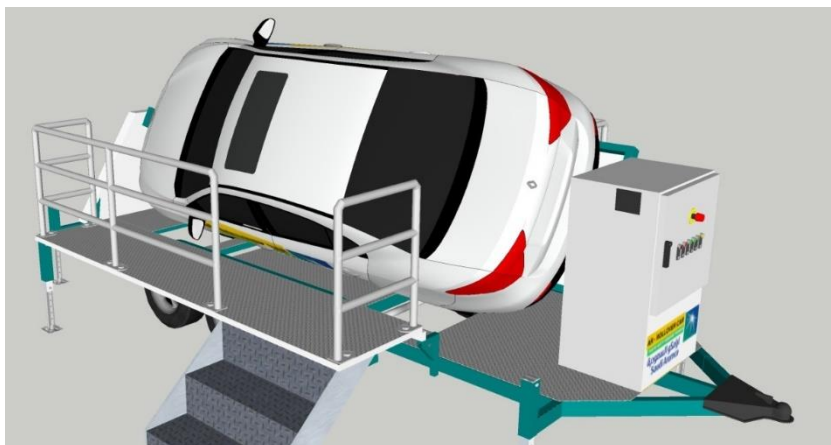


Figura 80: nuevos Roll Over Simulator desarrollados recientemente por el IRTIC. (arriba) diseño. (abajo) sistema real construido.

Tesis doctoral:
Mejoras basadas en heurísticas para la percepción de estímulos de movimiento en simuladores de Realidad Virtual y Realidad Aumentada



Inicio > HOUSE OF KNOWLEDGE

HOUSE OF KNOWLEDGE

8 septiembre de 2016



El grupo ARTEC, presentará en octubre en la ciudad de Damman (Arabia Saudita), un proyecto interactivo de Seguridad Vial.

El grupo de investigación de gráficos 3D para Tiempo Real, ha desarrollado tanto el hardware como el software de todas las aplicaciones que formarán parte de una feria de edutainment (educación y entretenimiento) centrada en la seguridad vial, con un recorrido que hará que los visitantes puedan participar, interactuar y aprender a través de las aplicaciones desarrolladas con tecnologías de realidad aumentada, realidad virtual y cine 5D.



Para el evento se han desarrollado: un cine 5D (imágenes 3D, sonidos, sensaciones, olores..), un simulador de vuelo, un juego de la oca en realidad aumentada con contenidos de seguridad vial y una aplicación de realidad aumentada sobre un vehículo real.

Las imágenes corresponden a tres de las aplicaciones, antes de ser transportadas a Arabia Saudi: Roll Over, Cine 5d y Juego AR.



Figura 81: artículo “House of knowledge”

EL DIARIO DE LA VANGUARDIA

Sociedad

L / BIG WAG / TECNOLOGÍA / SALUD / QUÉ ESTUDIAR / UNIVERSO JR / FORMACIÓN / VIVO SEGURO / PROGRESO / VIVO / CATALUNYA RELAJADO

CVA-TECNOLOGÍA TRÁFICO

UV desarrolla realidad virtual por una conducción segura en Arabia Saudí

REDACCIÓN
14/12/2016 15:27

Escuchar este artículo ahora

00:00 Suscríbete para escuchar 04:18

Valencia, 14 dic (EFE).- La Universitat de València (UV) ha Valencia, 14 dic (EFE).- La Universitat de València (UV) ha desarrollado diversos sistemas de realidad virtual y aumentada y simulación de colisiones y vuelcos para su implantación en una campaña de concienciación ciudadana que la petrolera Saudi Aramco llevará a cabo en Arabia Saudí.

El Instituto de Robótica y Tecnologías de la Información y la Comunicación (IRTIC), en colaboración con el Instituto de Tráfico y Seguridad Vial (INTRAS), ambos de la UV, han realizado un proyecto de I+D+i de "potente base tecnológica" para la mayor petrolera del mundo, ha informado la universidad en un comunicado.

Saudi Aramco desarrollará la campaña "House of Knowledge" para la concienciación de la sociedad, mediante tecnologías de última generación, en los valores de una conducción segura y un comportamiento adecuado.

Arabia Saudí cuenta con un parque automovilístico menor que el español, pero registra más de 7.000 muertos anuales en sus carreteras.

El proyecto pretende concienciar y educar de manera entretenida a través de tecnologías de última generación (realidad virtual/realidad aumentada, simulación, etc.) en los valores de una conducción segura y un comportamiento adecuado relacionado con el tráfico.

En este sentido, se han desarrollado también como los simuladores de vuelco de coche (RollOver Simulator), donde se pone de manifiesto la importancia del uso del cinturón de seguridad ante una colisión con vuelco, un CineSD, donde se materializa a los visitantes sobre las buenas prácticas que deben llevar a cabo para realizar una conducción más segura, y diversas aplicaciones para teléfonos inteligentes y tabletas donde también aprenden los más pequeños de la familia.

Este proyecto destaca de entre el resto de los desarrollados en el IRTIC por tratarse del primero con gran carga tecnológica española y de un importante volumen económico que se exporta íntegramente al país del medio oriente, según ha asegurado Marcos Fernández, investigador principal del proyecto.

"Tras varios años explorando el mercado extranjero hemos logrado establecer las relaciones comerciales y científicas adecuadas para poder comenzar a exportar tecnología a diversos países árabes", ha comentado.

La campaña de Saudi Aramco, enmarcada dentro de la acción social de la compañía, se inició el pasado 8 de diciembre y tiene previsto realizar diferentes exposiciones en las principales ciudades del país durante los dos próximos años. EFE

Colaboradora de la policía Nacional de la comunidad autónoma de Madrid participa en una experiencia de realidad virtual en el centro de formación de conductores de la Guardia Civil.

Los marcos van no van en Ferrari: así ha caído 'El Matador' mientras simulaba un viaje en carretera

Una ventena de inmigrantes se fugan de un avión en El Prat tras forzar un aterrizaje de emergencia

NUEVO ABONO DE BIENVENIDA

Tarjeta Gold American Express®

Antes ~~99€~~
Ahora

Solicita tu Tarjeta

*Sújetos a condiciones

Figura 82: artículo RV en Arabia Saudí

Alta tecnología de la Universitat para la mayor empresa petrolera del mundo

16 diciembre de 2016



La Universitat de València, a través del IRTIC y el INTRAS, ha llevado a cabo un proyecto de I+D+i basado en el desarrollo de diversos sistemas de potente base tecnológica, para su implantación en la campaña 'House of Knowledge' de la mayor empresa petrolera del mundo, Saudi Aramco. Se trata de una iniciativa para la concienciación de la sociedad, mediante tecnologías de última generación, en los valores de una conducción segura y un comportamiento adecuado.



El Instituto de Robótica y Tecnologías de la Información y la Comunicación (IRTIC), en colaboración directa con el Instituto de Tráfico y Seguridad Vial (INTRAS), ambos de la Universitat de València, han llevado a cabo un proyecto de I+D+i, basado en el desarrollo de diversos sistemas con una potente base tecnológica, para su implantación en la campaña 'House of Knowledge' de la mayor empresa petrolera del mundo, Saudi Aramco.

El proyecto pretende concienciar y educar de manera entretenida a través de tecnologías de última generación (Realidad Virtual/Realidad Aumentada, Simulación, etc.) en los valores de una conducción segura y un comportamiento adecuado relacionado con el tráfico. Esto es muy necesario en un país como Arabia Saudí con un parque automovilístico menor que el español, pero con más de 7000 mil muertos anuales en sus carreteras.

En este sentido, en un esfuerzo encaminado a acercar la tecnología a la sociedad saudí, siempre de una manera muy llamativa para causar interés y de esa forma lograr concienciar debidamente a los visitantes, se han desarrollado sistemas como los simuladores de vuelco de coche (RollOver Simulator), donde se pone de manifiesto la importancia del uso del cinturón de seguridad ante una colisión con vuelco, un Cine5D, donde se mentaliza a los visitantes sobre las buenas prácticas que deben llevar a cabo para realizar una conducción más segura y diversas aplicaciones para smartphones y tablets donde también aprenden los más pequeños de la familia.



Este proyecto destaca de entre el resto de los desarrollados en el IRTIC por tratarse del primero con gran carga tecnológica española y de un importante volumen económico que se exporta íntegramente al país del medio oriente, tal como asegura Marcos Fernández, investigador principal del proyecto y secretario del IRTIC. "Tras varios años explorando el mercado extranjero hemos logrado establecer las relaciones comerciales y científicas adecuadas para poder comenzar a exportar tecnología a diversos países árabes", comenta.

La campaña de Saudi Aramco, enmarcada dentro de la acción social de dicha compañía, se inició el pasado jueves 8 de diciembre y tiene previsto realizar diferentes exposiciones en las principales ciudades del país durante los dos próximos años.



Figura 83: artículo "Alta tecnología UV para Aramco"

Tesis doctoral:
Mejoras basadas en heurísticas para la percepción de estímulos de movimiento en simuladores de Realidad Virtual y Realidad Aumentada



Figura 84: artículo “House of knowledge” + Ing. Multimedia

Empresas

UV desarrolla realidad virtual por una conducción segura en Arabia Saudí

La Universitat de València (UV) ha desarrollado diversos sistemas de realidad virtual y aumentada y simulación de colisiones y vuelcos[...]

FINANZAS.COM 14 DIC 2016 / 14:25

La Universitat de València (UV) ha desarrollado diversos sistemas de realidad virtual y aumentada y simulación de colisiones y vuelcos para su implantación en una campaña de concienciación ciudadana que la petrolera Saudi Aramco llevará a cabo en Arabia Saudí.

El Instituto de Robótica y Tecnologías de la Información y la Comunicación (IRTIC), en colaboración con el Instituto de Tráfico y Seguridad Vial (INTRAS), ambos de la UV, han realizado un proyecto de I D I de "potente base tecnológica" para la mayor petrolera del mundo, ha informado la universidad en un comunicado.

Saudi Aramco desarrollará la campaña "House of Knowledge" para la concienciación de la sociedad, mediante tecnologías de última generación, en los valores de una conducción segura y un comportamiento adecuado.

Arabia Saudí cuenta con un parque automovilístico menor que el español, pero registra más de 7.000 muertos anuales en sus carreteras.

El proyecto pretende concienciar y educar de manera entretenida a través de tecnologías de última generación (realidad virtual/realidad aumentada, simulación, etc.) en los valores de una conducción segura y un comportamiento adecuado relacionado con el tráfico.

En este sentido, se han desarrollado sistemas como los simuladores de vuelco de coche (RollOver Simulator), donde se pone de manifiesto la importancia del uso del cinturón de seguridad ante una colisión con vuelco, un Cine5D, donde se mentaliza a los visitantes sobre las buenas prácticas que deben llevar a cabo para realizar una conducción más segura, y diversas aplicaciones para teléfonos inteligentes y tabletas donde también aprenden los más pequeños de la familia.

Figura 85: artículo RV para Arabia Saudí

Fórmula 1.- La Universidad de Valencia desarrolla un simulador para pilotar coches de Fórmula 1 y GT

VALENCIA, 21 Jun. (EUROPA PRESS) - El Instituto de Robótica y Tecnologías de la Información de las Comunicaciones de la Universitat de València (IRTIC), coincidiendo con la semana del Gran Premio de Europa de Fórmula 1-2012 (Valencia Street Circuit), ha presentado un simulador de conducción de carreras para Formula 1 y GT, para la formación y entrenamiento de pilotos profesionales. El simulador ha sido bautizado como SI Mouvi i333.

El sistema ha sido diseñado y fabricado íntegramente desde el IRTIC con componentes 'off-the-shell', en colaboración con la empresa Motrix. Centro de Simulación, constituye un gran avance al integrar un sistema de plataforma de movimiento, con seis grados de libertad y capacidad de producción de aceleraciones de hasta 0.8G, junto con una pantalla cilíndrica embarcada de 3,15 metros de diámetro.

Esta pantalla ofrece 333 grados de visión horizontal por 55° en vertical, con una superficie equivalente a una pantalla de 360°, ofreciendo al piloto una sensación completamente inmersiva muy similar a la sensación del estar en el circuito real. El puesto de conducción es una recreación del puesto de conducción de vehículo F1 o GT –según el modo de configuración– y los reglajes pueden ajustarse a distintos modelos de vehículos.

Con este sistema se posibilita una formación avanzada en conducción de vehículos de carreras, tanto para pilotos profesionales como para aficionados al mundo del motor, con unos niveles de realismo similares a los de un circuito real, pero con unos costes y riesgos sensiblemente inferiores.

"Esto es un ejemplo de transferencia de tecnología", ha señalado Marcos Fernández, director del Instituto de Robótica. "El SI Mouvi i333 recoge veinte años de experiencia en desarrollo de sistemas de simulación de conducción. Hemos integrado tecnologías corrientes de la calle, consiguiendo simuladores incluso superiores a los que utilizan las grandes escuderías de Fórmula 1, pero con un coste inferior", ha aseverado.

Por su parte, el director de desarrollo de la empresa Motrix, Leo Tachdjian, ha transmitido su "satisfacción" tanto con el producto desarrollado por el IRTIC como con las expectativas de colaboración entre ambas entidades. "La idea es crear simuladores propios y únicos. El SI Mouvi i333 puede igualar cualquier movimiento de vehículos. Esperamos que haya muchos más convenios con el IRTIC", ha dicho.



What's your power? endesa

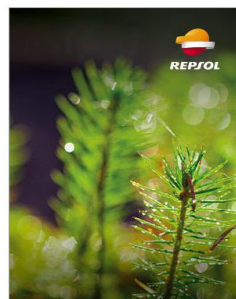


Figura 86: artículo "Simulador F1"

LAS PROVINCIAS

La UV crea la primera 'Gamezone' de simulación del circuito de Montmeló

Estas tecnologías aplicadas en la F-1, hasta hace poco, tan sólo estaban reservadas a pilotos profesionales

EUROPA PRESS
VALENCIA



El Institut de Robòtica i de Tecnologies de la Informació i la Comunicació (IRTIC) del Parc Científic de la Universitat de València (UV) ha creado, junto con la empresa valenciana Motrix, la primera F1 GameZone de simulación

El Institut de Robòtica i de Tecnologies de la Informació i la Comunicació (IRTIC) del Parc Científic de la Universitat de València (UV) ha creado, junto con la empresa valenciana Motrix, la primera F1 GameZone de simulación en el Circuito de Montmeló dirigido al público asistente al Gran Premio.

El simulador fue presentado el pasado fin de semana con un importante éxito de participación, pues fue visitado por más de 700 personas y 200 de ellas tuvieron la oportunidad de utilizarlo, ha informado la institución académica en un comunicado.

La Fórmula 1 ha confiado para esta primera experiencia en el ámbito mundial en el tándem formado por el IRTIC y Motrix por su dilatada trayectoria en investigación y desarrollo de sistemas de simulación para entornos de Racing.

Marcos Fernández, investigador principal del proyecto por parte del IRTIC, comenta que las tecnologías aplicadas en la F1 GameZone "hasta hace muy poco estaban reservadas a los pilotos profesionales, pero gracias a la investigación y el desarrollo realizado por el IRTIC en esta línea ya pueden desarrollarse simuladores profesionales de F1 con costes asumibles que puedan ser disfrutados por el público en general".

"Esto es un claro ejemplo de transferencia en I+D+i entre la universidad y la sociedad para acercar la tecnología a usos cotidianos", insiste Fernández.

Por su parte, Lionel Vizioso responsable de la empresa Motrix, indica que "gracias a esta accesibilidad de los simuladores de alta calidad podemos emplear estos sistemas para ofrecer a los conductores amateurs herramientas que permitan disfrutar a la gente de experiencias nuevas, además, pueden servir para descubrir a futuros campeones del mundo, ya que con estas herramientas es más fácil evaluar el talento real de los jóvenes pilotos en un entorno controlado y con un coste razonable".

El "éxito" logrado este fin de semana por el prototipo hace que la Fórmula 1 esté planificando extender este tipo de propuestas para espectadores a otros grandes premios e incrementar el número de puestos de simulación disponibles para que las plataformas sean utilizadas por la máxima cantidad posible de participantes, han añadido.

Figura 87: artículo "Gamezone"

Aprende a conducir un Fórmula 1 en El Corte Inglés

Un contenido de:
ElDesmarque

🕒 Miércoles, 15 de Julio de 2015, 09:20
Actualizado: 15/07/2015 14:47



Publicidad

Una producción de: VidaCana



DALE AL PLAY ▶



Marcos Fernández, investigador del IRTIC; Pilar Campins, vicerrectora de Investigación y Política Científica de la Universitat de València; Ernesto Leonidas Tachéjun, gerente de PitStop, Centros de Simulación; y Joaquín Carveiro, director de El Corte Inglés Avenida de Francia.

PARA TI



Nueve valencianos disputan la Copa Baleares tras los pasos de Jon

Un remero valenciano, en el equipo español de remo que cruzará el atlántico

La Nucia, sede del CESA Costa Blanca 2023

Más noticias de
Deporte Valenciano

Los clientes de **El Corte Inglés Avenida de Francia** pueden disfrutar de la última tecnología en simuladores gracias a la colaboración del **Instituto de Robótica y Tecnologías de la Información y las Comunicaciones (IRTIC)** de la **Universitat de València** y **PitStop, Centros de Simulación**.

La vicerrectora de Investigación y Política Científica de la Universitat de València, Pilar Campins, ha presentado el fruto de esta colaboración en el PitStop de la 8ª Planta de El Corte Inglés de la Avenida Francia.

Un total de nueve simuladores de altas prestaciones conforman este espacio, donde se pueden experimentar las mejores sensaciones a los mandos de un fórmula 1 ó un fórmula GT y competir con otros usuarios de todo el mundo. El realismo de la conducción alcanza su máximo exponente con el simulador SIMOVF1, prototipo único en el

mundo por el tamaño de su pantalla curva de 280º e imagen FullHD y de los seis grados de movimiento.

Para la **Universitat de València**, esta colaboración se enmarca en la dinámica de divulgación de la ciencia, la tecnología y la innovación que la institución académica lleva a cabo desde diferentes ámbitos. Según la vicerrectora Pilar Campins, "el proyecto pretende acercar las tecnologías empleadas en los sistemas de simulación profesionales –simuladores de vuelo o militares– al gran público, siguiendo el concepto americano de "Edutainment" o entretenimiento educativo, combinando diversión y aprendizaje en temas como, por ejemplo, la conducción y la seguridad vial".

El grupo ARTEC del Instituto de Robótica lleva más de veinte años desarrollando sistemas de simulación para la formación y el entrenamiento profesional en diferentes campos y principalmente en el entorno de la Simulación de la Conducción. "Acercar estas tecnologías al público en general de una forma muy accesible, amena y divertida, al tiempo que se mantiene el rigor y la calidad en los contenidos simulados, pensamos que es una buena manera de dar a conocer a la sociedad los alcances de la tecnología desarrollada desde la Universitat", añadió Campins.

El sistema de simulación Full-Mission se corresponde con las prestaciones de los simuladores de conducción y entrenamiento profesionales y ofrece una plataforma de 6 grados de libertad para generar las sensaciones de aceleración e inercia que se producen en la conducción de un vehículo de fórmula 1, y además añade una pantalla embarcada con un ángulo de visión superior a los 250º que transmite sensaciones de conducción muy próximas a la realidad. "El puesto de conducción es un cockpit real de fórmula 3", señala el investigador Marcos Fernández (IRTIC). "En este sentido el simulador tiene unas características técnicas similares a las del simulador utilizado por el equipo RedBull para la práctica de sus pilotos de F1".

Figura 88: artículo "Simulador ECI"

Bibliografía

- [1] 'M. Lombard, Resources for the study of presence: Presence explication, 2000. Online: <http://nimbus.temple.edu/~mlombard/presence/explicat.htm>'.
- [2] 'Barfield, W., & Hendrix, C. (1995). The effect of update rate on the sense of presence within virtual environments. *Virtual Reality*, 1(1), pp.3-15. DOI: 10.1007/BF02009709'.
- [3] 'Heeter, C. (1992). Being there: the subjective experience of presence. *Presence: Teleoperators and virtual environments*, 1(2), pp.262-271. DOI: 10.1162/pres.1992.1.2.262'.
- [4] 'Mantovani, F., & Castelnuevo, G. (2003). The sense of presence in virtual training: enhancing skills acquisition and transfer of knowledge through learning experience in virtual environments. In G. D. F. Riva (Ed.), *Being there: concepts, effects and measurement of user presence in synthetic environments* (pp. 167-182). Amsterdam: IOS Press.'.
- [5] 'Buchanan, K. (2006). Beyond attention-getters: Designing for deep engagement (Unpublished doctoral dissertation). Michigan: Michigan State University. Retrieved from http://education.uwsp.edu/publications/buchanan_2006_beyond_attention.pdf'.

- [6] 'M. Usoh, E. Catena, S. Arman, & M. Slater, Presence questionnaires in reality, Presence: Teleoperators and Virtual Environments, 9, 497-503, 2000.'
- [7] 'J. V. Draper, D. B. Kaber, & J. M. Usher, Speculations on the value of telepresence. Cyberpsychology & Behavior. 2, 349-362, 1999.'
- [8] 'Schubert, T., Friedmann, F., & H. Regenbrecht, Embodied presence in virtual environments. In R. Paton & I. Neilson (Eds.), Visual representations and interpretations, pp. 268-278. London: Springer-Verlag, 1999.'
- [9] 'Greathouse, Lisa (15 de enero de 2011). Los sentidos (Senses). Teacher Created Materials. ISBN 9781433397318. Consultado el 10 de febrero de 2018.'
- [10] M. F. Deering, 'The Limits of Human Vision', p. 6.
- [11] 'Riera, J.V.; Casas, S.; Fernández, M.; Alonso, F.; Useche, S.A. Development of a Hybrid Method to Generate Gravito-Inertial Cues for Motion Platforms in Highly Immersive Environments. Sensors 2021, 21, 8079. <https://doi.org/10.3390/s21238079>'.
- [12] A. Vasilaki, E. Panagiotopoulou, T. Koupantsis, E. Katsanidis, and I. Mourtzinos, 'Recent insights in flavor-enhancers: Definition, mechanism of action, taste-enhancing ingredients, analytical techniques and the potential of utilization', *Critical Reviews in*

- Food Science and Nutrition*, vol. 62, no. 32, pp. 9036–9052, Nov. 2022, doi: 10.1080/10408398.2021.1939264.
- [13] H. Miyashita, 'TTTTV2 (Transform the Taste and Visual Appearance):Tele-eat virtually with a seasoning home appliance that changes the taste and appearance of food or beverages', in *Proceedings of the 28th ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology*, New York, NY, USA, Nov. 2022, pp. 1–2. doi: 10.1145/3562939.3565663.
- [14] 'Pallasmaa, J. (1994). An architecture of the seven senses. ARCHITECTURE AND URBANISM-TOKYO-, 27-38'.
- [15] L. C. V. Rico, E. J. A. Rodríguez, and J. A. T. Melo, 'Simuladores de vuelo: una revisión', *Ciencia y poder aéreo*, vol. 13, no. 2 (Julio-Diciembre), pp. 138–149, 2018, Accessed: Dec. 08, 2022. [Online]. Available: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=6655393>
- [16] 'Drummond K.H, Houston T, Irvine T, et al. (2014). The rise and fall and rise of virtual reality. Vox Media.'.
- [17] 'Virtual reality systems. San Diego, CA: Academic Press Limited; 1993, ISBN: 0-12-227748-1'.
- [18] 'Full Mission Simulation in Undergraduate Pilot Training: An Exploratory Study'. Accessed: Dec. 09, 2022. [Online]. Available: <https://apps.dtic.mil/sti/citations/ADA039267>

- [19] J. M. Rolfe and K. J. Staples, *Flight Simulation*. Cambridge University Press, 1988.
- [20] Z. Xiufeng, J. Yicheng, Y. Yong, and L. Zhihua, 'Ship simulation using virtual reality technique', in *Proceedings of the 2004 ACM SIGGRAPH international conference on Virtual Reality continuum and its applications in industry*, New York, NY, USA, Jun. 2004, pp. 282–285. doi: 10.1145/1044588.1044648.
- [21] T. Okazaki, T. Koike, Y. Hirai, and J. Kayano, 'Development of ship simulator system for designing auto-pilot', in *2010 World Automation Congress*, Sep. 2010, pp. 1–5.
- [22] R. W. Allen, H. R. Jex, D. T. McRuer, and R. J. Dimarco, 'Alcohol Effects on Driving Behavior and Performance in a Car Simulator', *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, vol. SMC-5, no. 5, pp. 498–505, Sep. 1975, doi: 10.1109/TSMC.1975.5408372.
- [23] B. Wymann, C. Dimitrakakis, A. Sumner, E. Espie, and C. Guionneau, 'TORCS: The open racing car simulator', p. 5.
- [24] J. L. Robin, R. R. Knipling, S. A. Tidwell, L. Derrickson, C. Antonik, and J. McFann, 'Truck simulator validation ("SimVal") training effectiveness study', presented at the International Truck and Bus Safety and Security Symposium, 2005, Alexandria, Virginia, USA, 2005. Accessed: Dec. 09, 2022. [Online]. Available: <https://trid.trb.org/view/1156437>

- [25] M. Gillberg, G. Kecklund, and T. Åkerstedt, 'Sleepiness and performance of professional drivers in a truck simulator—comparisons between day and night driving', *Journal of Sleep Research*, vol. 5, no. 1, pp. 12–15, 1996, doi: 10.1046/j.1365-2869.1996.00013.x.
- [26] H.-M. Huang and R. Hira, 'A submarine simulator driven by a hierarchical real-time control system architecture', National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD, NIST IR 4875, 1992. doi: 10.6028/NIST.IR.4875.
- [27] Z. Lin, S. Feng, and L. Ying, 'The design of a submarine voyage training simulator', in *SMC'98 Conference Proceedings. 1998 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (Cat. No.98CH36218)*, Oct. 1998, vol. 4, pp. 3720–3724 vol.4. doi: 10.1109/ICSMC.1998.726664.
- [28] D. Burr and D. Alais, 'Chapter 14 Combining visual and auditory information', in *Progress in Brain Research*, vol. 155, S. Martinez-Conde, S. L. Macknik, L. M. Martinez, J.-M. Alonso, and P. U. Tse, Eds. Elsevier, 2006, pp. 243–258. doi: 10.1016/S0079-6123(06)55014-9.
- [29] 'F. Corona, F. Perrotta, E. T. Polcini y C. Cozzarelli, "The New Frontiers of Edutainment: The Development of an Educational and Socio-Cultural Phenomenon Over time of Globalization", J.

- Soc. Sci. , vol. 7, no. 3, Art. no. 3, Jul. 2011, doi: 10.3844/jssp.2011.408.411.'.
- [30] F. Corona, C. Cozzarelli, C. Palumbo, and M. Sibilio, 'Information Technology and Edutainment: Education and Entertainment in the Age of Interactivity', *International Journal of Digital Literacy and Digital Competence*, vol. 4, pp. 12–18, Jun. 2013, doi: 10.4018/jdlcdc.2013010102.
- [31] E. E. Makarius, 'Edutainment: Using Technology to Enhance the Management Learner Experience', *Management Teaching Review*, vol. 2, no. 1, pp. 17–25, Mar. 2017, doi: 10.1177/2379298116680600.
- [32] 'D. Buckingham y M. Scanlon, "Edutainment", *J. Early Child. Lit.* , vol. 1, pp. 281-299, enero de 2001.'.
- [33] 'K. Backhaus y J. P. Liff, "Cognitive Styles and Approaches To Studying in Management Education", 2007, doi: 10.1177/1052562905284674.'.
- [34] M. Ma, A. Oikonomou, and L. C. Jain, Eds., *Serious Games and Edutainment Applications*. London: Springer London, 2011. doi: 10.1007/978-1-4471-2161-9.
- [35] 'LudoScience - Origins of Serious Games (Broacasting our studies)'. <https://www.ludoscience.com/EN/diffusion/551-Origins-of-Serious-Games.html> (accessed Dec. 09, 2022).

- [36] N. Aksakal, 'Theoretical View to The Approach of The Edutainment', *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, vol. 186, pp. 1232–1239, May 2015, doi: 10.1016/j.sbspro.2015.04.081.
- [37] R. L. Simon, 'The Game of Life: College Sports and Educational Values By James L. Shulman and William G. Bowen. Published 2001 by Princeton University Press, 41 William Street, Princeton, NJ 08540. (447 pp.)', *Journal of the Philosophy of Sport*, vol. 29, no. 1, pp. 87–95, Apr. 2002, doi: 10.1080/00948705.2002.9714625.
- [38] 'Evaluating the Effectiveness of Serious Games for Cultural Awareness: The Icura User Study', *springerprofessional.de*. <https://www.springerprofessional.de/en/evaluating-the-effectiveness-of-serious-games-for-cultural-aware/2303590> (accessed Dec. 09, 2022).
- [39] M. S. Riaz, A. Cuenen, D. Janssens, K. Brijs, and G. Wets, 'Evaluation of a gamified e-learning platform to improve traffic safety among elementary school pupils in Belgium', *Personal and Ubiquitous Computing*, vol. 23, Nov. 2019, doi: 10.1007/s00779-019-01221-4.
- [40] M. Klawe, 'Computer Games, Education And Interfaces: The E-GEMS Project', Dec. 2000.
- [41] 'A Hybrid Virtual-Augmented Serious Game to Improve Driving Safety Awareness', *springerprofessional.de*.

<https://www.springerprofessional.de/en/a-hybrid-virtual-augmented-serious-game-to-improve-driving-safet/15501204>
(accessed Dec. 09, 2022).

- [42] J. SINACORI, 'A practical approach to motion simulation', in *Visual and Motion Simulation Conference*, American Institute of Aeronautics and Astronautics. doi: 10.2514/6.1973-931.
- [43] 'J. Laurens and J. Droulez, "Bayesian Processing of Vestibular Information," *Biological Cybernetics*, vol. 96, no. 4, pp. 389-404, 2006'.
- [44] J. S. Butler, S. T. Smith, J. L. Campos, and H. H. Bühlhoff, 'Bayesian integration of visual and vestibular signals for heading', *Journal of Vision*, vol. 10, no. 11, p. 23, Sep. 2010, doi: 10.1167/10.11.23.
- [45] 'P. R. McNeilage, M. S. Banks, D. R. Berger and H. H. Bühlhoff, "A Bayesian Model of the Disambiguation of Gravitoinertial Force by Visual Cues," *Experimental Brain Research*, vol. 179, no. 2, pp. 263-290, 2007'.
- [46] 'E. M. Kolasinski, "Simulator Sickness in Virtual Environments," Alexandria, VA, USA, 1995'.
- [47] A. F. Seay, D. M. Krum, L. Hodges, and W. Ribarsky, 'Simulator sickness and presence in a high FOV virtual environment', in *Proceedings IEEE Virtual Reality 2001*, Mar. 2001, pp. 299–300. doi: 10.1109/VR.2001.913806.

- [48] 'Effects on User Experience in an Edutainment Virtual Environment | Proceedings of the European Conference on Cognitive Ergonomics'.
https://dl.acm.org/doi/abs/10.1145/3121283.3121284?casa_token=5wwwqaPjzTqUAAAAA:izjjkubz-w_RJXspofKAMSBa-03odTMQhi2oWFdrVL1VvKgwB6-BNXQ4aA4VWP-OF_x7f8JTSTV (accessed Dec. 09, 2022).
- [49] 'ButtKicker - The Leader in Haptics', *ButtKicker Haptics*.
<https://thebuttkicker.com/> (accessed Dec. 27, 2022).
- [50] S. Qian, B. Zi, W.-W. Shang, and Q.-S. Xu, 'A Review on Cable-driven Parallel Robots', *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, vol. 31, no. 1, p. 66, Aug. 2018, doi: 10.1186/s10033-018-0267-9.
- [51] 'An Overview of the Development for Cable-Driven Parallel Manipulator - Xiaoqiang Tang, 2014'.
<https://journals.sagepub.com/doi/10.1155/2014/823028>
(accessed Dec. 09, 2022).
- [52] M. Katliar, F. Drop, H. Teufel, M. Diehl, and H. Bülthoff, *Real-Time Nonlinear Model Predictive Control of a Motion Simulator Based on a 8-DOF Serial Robot*. 2018. doi: 10.23919/ECC.2018.8550041.

- [53] J. A. Boldovici, 'Simulator Motion':, Defense Technical Information Center, Fort Belvoir, VA, Sep. 1992. doi: 10.21236/ADA257683.
- [54] 'S. Casas, I. Coma, J. V. Riera and M. Fernández, "On the Characterization of a Speed-boat Motion for Real-time Motion Cueing," in Proceedings of the International Conference on Computer Graphics Theory and Applications (GRAPP 2013), Barcelona, Spain, 2013'.
- [55] J. V. Riera, S. Casas, F. Alonso, and M. Fernández, 'A Case Study on Vestibular Sensations in Driving Simulators', *Sensors*, vol. 22, no. 15, Art. no. 15, Jan. 2022, doi: 10.3390/s22155837.
- [56] J. O. Brooks *et al.*, 'Simulator sickness during driving simulation studies', *Accident Analysis & Prevention*, vol. 42, no. 3, pp. 788–796, May 2010, doi: 10.1016/j.aap.2009.04.013.
- [57] 'H. Arioui, S. Hima, and L. Nehaoua, "2 DOF Low Cost Platform for Driving Simulator: Design and Modeling", in The 2009 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics, SINGAPOUR, Singapore, Jul. 2009, pp. 1206–1211. Accessed: Nov. 06, 2021. [Online]. Available: <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00420879>'.
- [58] 'L. Nehaoua, A. Amouri, and H. Arioui, "Classic and Adaptive Washout Comparison for a Low Cost Driving Simulator", in 13th IEEE Mediterranean Conference on Control and Automation

- (MED 2005), Limassol, Cyprus, Jun. 2005, pp. 586–591. doi: 10.1109/.2005.1467080’.
- [59] ‘L. Nehaoua, H. Mohellebi, A. Amouri, H. Arioui, S. Espié, and A. Kheddar, “Design and Control of a Small-Clearance Driving Simulator.”, IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 57, no. 2, pp. 736–746, 2008, doi: 10.1109/TVT.2007.905336’.
- [60] ‘S. Mauro, L. Gastaldi, S. Pastorelli, and M. Sorli, “Dynamic Flight Simulation with a 3 d.o.f. Parallel Platform”, International Journal of Applied Engineering Research, vol. 11, pp. 9436–9442, Jan. 2016’.
- [61] ‘E. Izaguirre Castellanos, L. Hernández, E. Rubio, P. Prieto, and A. Hernández, “Decoupled Control of a 3-DOF Pneumatic Platform used as Motion Simulator”, Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial RIAI, vol. 8, pp. 345–356, Oct. 2011, doi: 10.1016/j.riai.2011.09.003’.
- [62] ‘J.J. Slob, “State of the Art Driving Simulators”, DCT report; Eindhoven University of Technology, Eindhoven, The Netherlands, 107, 2008, August., p. 19’.
- [63] ‘A. R. W. Huang and C. Chen, “A low-cost driving simulator for full vehicle dynamics simulation”, IEEE Trans. Veh. Technol., 2003, doi: 10.1109/TVT.2002.807157’.

- [64] 'L. Nehaoua, S. Hima, H. Arioui, N. Seguy, and S. Espie, "Design and Modeling of a New Motorcycle Riding Simulator", in 2007 American Control Conference, Jul. 2007, pp. 176–181. doi: 10.1109/ACC.2007.4283070'.
- [65] 'D. Stewart, "A Platform with Six Degrees of Freedom", *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*, vol. 180, no. 1, pp. 371–386, Jun. 1965, doi: 10.1243/PIME_PROC_1965_180_029_02'.
- [66] H. Shen, T. Yang, and L. Ma, 'Synthesis and structure analysis of kinematic structures of 6-dof parallel robotic mechanisms', *Mechanism and Machine Theory*, vol. 40, no. 10, pp. 1164–1180, Oct. 2005, doi: 10.1016/j.mechmachtheory.2004.12.020.
- [67] D. Stewart, 'A Platform with Six Degrees of Freedom', *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*, vol. 180, no. 1, pp. 371–386, Jun. 1965, doi: 10.1243/PIME_PROC_1965_180_029_02.
- [68] 'B. Conrad and S. F. Schmidt, "A study of techniques for calculating motion drive signals for flight simulators", NASA, Palo Alto, CA, USA, 1971'.
- [69] 'B. Conrad and S. F. Schmidt, "Motion drive signals for piloted flight simulators", NASA, Palo Alto, CA, USA, 1970., 1970'.

- [70] 'B. Conrad and S. F. Schmidt, "The calculation of motion drive signals for piloted flight simulators", NASA, Palo Alto, CA, USA, 1969'.
- [71] 'L. D. Reid and M. A. Nahon, "Flight simulation motion-base drive algorithms: part 1. Developing and testing equations", UTIAS Report, No. 296, 1985, Accessed: Nov. 06, 2021. [Online]. Available:
<https://repository.tudelft.nl/islandora/object/uuid%3A45b071c0-0568-4e8f-948f-dfa52d350665>'.
- [72] 'L. Reid and M. A. Nahon, "Flight simulation motion-base drive algorithms: part 2. Selecting the system parameters", UTIAS report, No. 307, 1986, Accessed: Nov. 06, 2021. [Online]. Available:
<https://repository.tudelft.nl/islandora/object/uuid%3A4faf3129-88c9-4117-82e9-f9819601dafd>'.
- [73] 'L. Reid and M. A. Nahon, "Flight simulation motion-base drive algorithms: part 3. Pilot Evaluations", UTIAS report, No. 307, 1986, Accessed: Nov. 06, 2021. [Online]. Available:
<https://repository.tudelft.nl/islandora/object/uuid%3A4faf3129-88c9-4117-82e9-f9819601dafd>'.
- [74] 'O. Stroosma, M. van Paassen, M. Mulder, R. J. Hosman, and S. K. Advani, "Applying the objective motion cueing test to a classical

- washout algorithm”, in AIAA Modeling and Simulation Technologies (MST) Conference, 2013, p. 4834’.
- [75] ‘M. A. Nahon and L. D. Reid, “Simulator motion-drive algorithms- A designer’s perspective”, Journal of Guidance, Control, and Dynamics, vol. 13, no. 2, pp. 356–362, 1990’.
- [76] ‘S. Casas, I. Coma, C. Portalés, and M. Fernández, “Towards a simulation-based tuning of motion cueing algorithms”, Simulation Modelling Practice and Theory, vol. 67, pp. 137–154, 2016’.
- [77] ‘R. V. Parrish, J. E. Dieudonne, R. L. Bowles, and D. J. Martin Jr, “Coordinated adaptive washout for motion simulators”, Journal of aircraft, vol. 12, no. 1, pp. 44–50, 1975’.
- [78] ‘M. Kurosaki, “Optimal washout for control of a moving base simulator”, IFAC Proceedings Volumes, vol. 11, no. 1, pp. 1311–1318, 1978’.
- [79] ‘R. Sivan, J. Ish-Shalom, and J.-K. Huang, “An optimal control approach to the design of moving flight simulators”, IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, vol. 12, no. 6, pp. 818–827, 1982’.
- [80] ‘M. Dagdelen, G. Reymond, A. Kemeny, M. Bordier, and N. Maïzi, “Model-based predictive motion cueing strategy for vehicle

- driving simulators”, *Control Engineering Practice*, vol. 17, no. 9, pp. 995–1003, 2009’.
- [81] ‘N. J. Garrett and M. C. Best, “Model predictive driving simulator motion cueing algorithm with actuator-based constraints”, *Vehicle System Dynamics*, vol. 51, no. 8, pp. 1151–1172, 2013’.
- [82] ‘I. G. Salisbury and D. J. Limebeer, “Optimal motion cueing for race cars”, *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, vol. 24, no. 1, pp. 200–215, 2015’.
- [83] ‘A. Mohammadi, H. Asadi, S. Mohamed, K. Nelson, and S. Nahavandi, “MPC-based motion cueing algorithm with short prediction horizon using exponential weighting”, in *2016 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC)*, 2016, pp. 000521–000526’.
- [84] ‘M. Bruschetta, F. Maran, and A. Beghi, “A fast implementation of MPC-based motion cueing algorithms for mid-size road vehicle motion simulators”, *Vehicle system dynamics*, vol. 55, no. 6, pp. 802–826, 2017’.
- [85] ‘F. Danieau, A. Lécuyer, P. Guillotel, J. Fleureau, N. Mollet, and M. Christie, “A Kinesthetic Washout Filter for Force-Feedback Rendering”, *IEEE transactions on haptics*, vol. 8, no. 1, pp. 114–118, 2014’.

- [86] 'R. Hosman and S. Advani, "Design and evaluation of the objective motion cueing test and criterion", *The Aeronautical Journal*, vol. 120, no. 1227, pp. 873–891, 2016'.
- [87] 'P. R. Grant, University of Toronto, and Institute for Aerospace Studies, "The development of a tuning paradigm for flight simulator motion drive algorithms", Graduate Dept. of Aerospace Science and Engineering, University of Toronto, North York, Ont., 1996'.
- [88] 'P. Grant and Reid LD, "Motion Washout Filter Tuning: Rules and Requirements | *Journal of Aircraft*", p. 34(2): 145-151., 1997, doi: 10.2514/2.2158'.
- [89] 'P. R. Grant and L. D. Reid, "PROTEST: An expert system for tuning simulator washout filters", *Journal of Aircraft*, vol. 34, no. 2, pp. 152–159, 1997'.
- [90] 'Study of the influence of different washout algorithms on simulator sickness for a driving simulation task Barış Aykent1 , Damien Paillot, Frédéric Mérienne Arts et Métiers ParisTech, CNRS, Le2i Institut Image, 2 rue T. Dumorey, 71100 Chalon-sur-Saône, France'.
- [91] O. Stroosma, M. van Paassen, M. Mulder, R. J. Hosman, and S. K. Advani, 'Applying the Objective Motion Cueing Test to a Classical Washout Algorithm', in *AIAA Modeling and Simulation*

- Technologies (MST) Conference, American Institute of Aeronautics and Astronautics. doi: 10.2514/6.2013-4834.*
- [92] 'False cue reduction in moving flight simulators | IEEE | XanEdu Customization Platform'.
<http://www.academicpub.com/map/items/2671191.html>
(accessed Dec. 09, 2022).
- [93] L. Nehaoua, H. Arioui, H. Mohellebi, and S. Espié, *Restitution Movement for a Low Cost Driving Simulator*, vol. 2006. 2006. doi: 10.1109/ACC.2006.1656614.
- [94] P. Ioannou and S. Baldi, 'Robust Adaptive Control', 2010, pp. 1–22. doi: 10.1201/b10384-41.
- [95] M.-C. Han, H.-S. Lee, S. Lee, and M. Lee, 'Optimal Motion Cueing Algorithm Using the Human Body Model', *Jsmc International Journal Series C-mechanical Systems Machine Elements and Manufacturing - JSME INT J C*, vol. 45, pp. 487–491, Jun. 2002, doi: 10.1299/jsmec.45.487.
- [96] M. Dagdelen, G. Reymond, A. Kemeny, M. Bordier, and N. Maïzi, 'Model-based predictive motion cueing strategy for vehicle driving simulators', *Control Engineering Practice*, vol. 17, pp. 995–1003, Sep. 2009, doi: 10.1016/j.conengprac.2009.03.002.
- [97] 'S. F. Schmidt and B. Conrad, "The Calculation of Motion Drive Signals for Piloted Flight Simulators," Palo Alto, CA, USA, 1969'.

- [98] 'Su-Chiun Wang and L. -C. Fu, "Predictive washout filter design for VR-based motion simulator," 2004 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics (IEEE Cat. No.04CH37583), 2004, pp. 6291-6295 vol.7, doi: 10.1109/ICSMC.2004.1401387'.
- [99] 'M. R. Chalak Qazani, H. Asadi and S. Nahavandi, "A Decoupled Linear Model Predictive Control-based Motion Cueing Algorithm for Simulation-based Motion Platform with Limited Workspace," 2019 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT), 2019, pp. 35-41, doi: 10.1109/ICIT.2019.8755051'.
- [100] 'Auto-tuning Prediction and Control Horizon of Model Predictive Control Approach to Motion Cueing Algorithm Applied in Robocoaster Motion Platform Duc An Pham & Duc Toan Nguyen Conference paper First online: 04 May 2022 111 Accesses Part of the Lecture Notes in Mechanical Engineering book series (LNME)'.
- [101] 'Miunske, T., Pradipta, J., and Sawodny, O. (October 10, 2018). "Model Predictive Motion Cueing Algorithm for an Overdetermined Stewart Platform." ASME. J. Dyn. Sys., Meas., Control. February 2019; 141(2): 021006. <https://doi.org/10.1115/1.4041504>'.

- [102] 'Zhou Fang, Andras Kemeny - An efficient Model Predictive Control-based motion cueing algorithm for the driving simulator - First Published October 19, 2016 Research Article <https://doi.org/10.1177/0037549716667835>'.
- [103] S. Casas, 'Mejoras en la Generación de Claves Gravito-inerciales en Simuladores de Vehículos No Aéreos', *Tesis Doctoral*, Jul. 2014.
- [104] 'Optimization of 3-DOF parallel motion devices for low-cost vehicle simulators'. https://www.jstage.jst.go.jp/article/jamdsm/11/2/11_2017jamdsm0023/_article (accessed Dec. 27, 2022).
- [105] 'M. Bruenger-Koch, S. Briest and M. Vollrath, "Do You Feel the Difference? A Motion Assessment Study," in Proceedings of the 2006 Driving Simulation Conference Asia/Pacific, Tsukuba, Japan, 2006'.
- [106] 'A. T. van Wieringen, D. M. Pool and M. N. van Paassen, "Effects of Heave Washout Filtering on Motion Fidelity and Pilot Control Behavior for a Large Commercial Airliner," in AIAA Modeling and Simulation Technologies Conference, Portland, OR, 2011'.
- [107] 'J. Guttridge, Three Degree-of-Freedom Simulator Motion Cueing Using Classical Washout Filters and Acceleration Feedback, 2004'.

- [108] 'T. H. Go, J. Bürki-Cohen, W. H. Chung, J. A. Schroeder, G. Saillant, S. Jacobs and T. Longridge, "The Effects of Enhanced Hexapod Motion on Airline Pilot Recurring Training and Evaluation," in AIAA Modeling and Simulation Technologies Conference and Exhibit, Austin, TX, USA, 2003'.
- [109] 'J. A. Schroeder, W. W. Y. Chung and R. A. Hess, "Evaluation of a Motion Fidelity Criterion with Visual Scene Changes," Journal of Aircraft, vol. 37, no. 4, pp. 580-587, 2000'.
- [110] 'M. Bruenger-Koch, "Motion Parameter Tuning and Evaluation for the DLR Automotive Simulator," in Proceedings of the 2005 Driving Simulation Conference North America (DSC-NA 2005), Orlando, FL, USA, 2005'.
- [111] G. Gigerenzer and W. Gaissmaier, 'Heuristic Decision Making', *Annual Review of Psychology*, vol. 62, no. 1, pp. 451–482, 2011, doi: 10.1146/annurev-psych-120709-145346.
- [112] 'D.F Jones, S.K Mirrazavi, M Tamiz, Multi-objective meta-heuristics: An overview of the current state-of-the-art, *European Journal of Operational Research*, Volume 137, Issue 1, 2002, Pages 1-9, ISSN 0377-2217, [https://doi.org/10.1016/S0377-2217\(01\)00123-0](https://doi.org/10.1016/S0377-2217(01)00123-0)'.
- [113] 'R. Steuer. Multiple Criteria Optimization, Theory, Computation, and Applications, Wiley, New York (1986)'.

- [114] 'A. Charnes, W.W. Cooper. Management Models and Industrial Applications of Linear Programming, Wiley, New York (1961)'.
- [115] 'J.P. Ignizio, T.M. Cavalier. Linear Programming, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ (1994)'.
- [116] 'C. Romero. Handbook of Critical Issues in Goal Programming, Pergamon Press, Oxford (1991)'.
- [117] 'P.L. Yu. A class of solutions for group decision problems - Management Science, 19 (1973), pp. 936-946'.
- [118] 'M. Zeleny. Multi-Criteria Decision Making, McGraw-Hill, New York (1982)'.
- [119] 'A. Aatmeeyata, S.K. Gupta - Simulation and optimization of an industrial nylon 6 reactor: A review - Polymer-Plastics Technology and Engineering, 37 (2) (1998), pp. 201-239'.
- [120] 'C. AzzaroPantel, L. BernalHaro, P. Baudet, S. Domenech, L. Pibouleau - A two-stage methodology for short-term batch plant scheduling: Discrete-event simulation and genetic algorithm. Computers and Chemical Engineering, 22 (10) (1998), pp. 1461-1481'.
- [121] 'C.S. Chang, J.S. Huang - Optimal multiobjective SVC planning for voltage stability enhancement - IEE Proceedings – Generation Transmission and Distribution, 145 (2) (1998), pp. 203-209'.

- [122] 'A. Chipperfield, P. Fleming. Multiobjective gas turbine engine controller design using genetic algorithms. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 43 (5) (1996), pp. 583-587'.
- [123] 'Y. Chen, M. Narita, M. Tsuji, S. Sa. A genetic algorithm approach to optimization for the radiological worker allocation problem. Health Physics, 70 (2) (1996), pp. 180-186'.
- [124] 'P. Lucic, D. Teodoravic. Simulated annealing for the multi-objective aircrew rostering problem. Transportation Research Part A – Policy and Practice, 33 (1) (1999), pp. 19-45'.
- [125] 'D.C. Chin. Simultaneous perturbation method for processing magnetospheric images - Optical Engineering, 38 (4) (1999), pp. 606-611'.
- [126] 'O.C.L. Haas, K.J. Burnham, J.A. Mills. Optimization of beam orientation in radiotherapy using planar geometry. Physics in Medicine and Biology, 43 (8) (1998), pp. 2179-2193'.
- [127] 'M.A. Kupinski, M.A. Anastasio. Multiobjective genetic optimization of diagnostic classifiers with implications for generating receiver operating characteristic curves. IEEE Transactions on Medical Imaging, 18 (8) (1999), pp. 675-685'.
- [128] 'M. Lahanas, D. Baltas, N. Zamboglou. Anatomy based three-dimensional dose optimization in brachytherapy using

- multiobjective genetic algorithm. *Medical Physics*, 26 (9) (1999), pp. 1904-1918'.
- [129] 'S.E. Cieniawshi, J.W. Eheart, S. Ranjithan. Using genetic algorithms to solve a multiobjective groundwater monitoring problem. *Water Resources Research*, 31 (2) (1995), pp. 399-409'.
- [130] 'D. Halhal, G.A. Walters, D. Ouazar, D.A. Savic. Water network rehabilitation with structured messy genetic algorithm. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 123 (3) (1997), pp. 137-146'.
- [131] 'P.D. Meyer, A.J. Valocchi, J.W. Eheart. Monitoring network design to provide initial detection of groundwater contamination. *Water Resources Research*, 30 (9) (1994), pp. 2647-2659'.
- [132] 'F.Y. Cheng, D. Li. Genetic algorithm development for multiobjective optimization of structures. *AIAA Journal*, 36 (6) (1998), pp. 1105-1112'.
- [133] 'C.A.C. Coello, A.D. Christiansen. MOSES: A multiobjective optimization tool for engineering design. *Engineering Optimization*, 31 (3) (1999), pp. 337-368'.
- [134] 'C.A.C. Coello, A.D. Christiansen, F.S. Hernandez. A simple genetic algorithm for the design of reinforced concrete beams. *Engineering with Computers*, 13 (4) (1997), pp. 185-196'.

- [135] 'S.M. Gowda, B.J. Sheu, R.C.H. Chang. Effective parameter extraction using multiple objective function for VLSI circuits. Analog Integrated Circuits and Signal Processing, 5 (2) (1994), pp. 121-133'.
- [136] 'N.V. Queipo, J.A.C. Humphrey, A. Ortega. Multiobjective optimal placement of convectively cooled electronic components on printed wiring boards. IEEE Transactions on Components Packaging and Manufacturing Technology Part A, 21 (1) (1998), pp. 142-153'.
- [137] 'K. Iwamura, B.D. Liu. Dependent-chance integer programming applied to capital budgeting - Journal of the Operations Research Society of Japan, 42 (2) (1999), pp. 117-127'.
- [138] 'W.S. Jung, N.Z. Cho. Determination of design alternatives and performance criteria for safety systems in a nuclear power plant via simulated annealing. Reliability Engineering and System Safety, 41 (2) (1993), pp. 71-94'.
- [139] 'G. Suresh, S. Sahu. Multiobjective facility layout using simulated annealing. International Journal of Production Economics, 32 (2) (1993), pp. 239-254'.
- [140] 'Garlappi, L., Uppal, R. (2006, August). 1/N. Paper presented at the 2006 European Financial Association Meeting, Zurich, Switzerland. Retrieved November 7, 2007, from <http://ssrn.com/abstract=911512>'.

- [141] ‘Heuristics for motion-based control in games. Minna Hara, Saila Ovaska. NordiCHI ’14: Proceedings of the 8th Nordic Conference on Human-Computer Interaction: Fun, Fast, Foundational October 2014 Pages 697–706 <https://doi.org/10.1145/2639189.2639246>’.
- [142] ‘D. Moutinho, P. Rebelo, C. Costa, L. Rocha and G. Veiga, “Force control heuristics for surpassing pose uncertainty in mobile robotic assembly platforms,” 2021 IEEE International Conference on Autonomous Robot Systems and Competitions (ICARSC), 2021, pp. 130-136, doi: 0.1109/ICARSC52212.2021.9429818’.
- [143] ‘Charles M. Oman (1982) A Heuristic Mathematical Model for the Dynamics of Sensory Conflict and Motion Sickness, *Acta Otolaryngologica*, 94:sup392, 4-44, DOI: 10.3109/00016488209108197’.
- [144] S. Casas-Yrurzum, I. Coma, C. Portalés, and M. Fernández, ‘Optimization of 3-DOF parallel motion devices for low-cost vehicle simulators’, *Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing*, vol. 11, pp. JAMDSM0023–JAMDSM0023, May 2017, doi: 10.1299/jamdsm.2017jamdsm0023.
- [145] ‘A million lives saved since volvo invented the three-point safety belt. <https://www.media.volvocars.com/uk/en-gb/media/pressreleases/20505/> (accessed Aug. 22, 2022)’.

- [146] 'S. C. Partyka, Lives Saved by Seat Belts from 1983 Through 1987. Mathematical Analysis Division, National Center for Statistics and Analysis], National Highway Traffic Administration, 1988'.
- [147] 'European Transport Safety Council, Cost effective EU transport safety measures. Brussels: European Transport Safety Council, 2003'.
- [148] 'B. Fildes, M. Fitzharris, P. Vulcan, and S. Koppel, "Benefits of Retrofitting Seat Belt Reminder Systems to Australian Passenger Vehicles", p. 48'.
- [149] 'G. Rebolledo-Mendez and K. Avramides, "Societal impact of a serious game on raising public awareness: the case of FloodSim", p. 8'.
- [150] 'R. Dörner, S. Göbel, W. Effelsberg, and J. Wiemeyer, Eds., Serious Games. Cham: Springer International Publishing, 2016. doi: 10.1007/978-3-319-40612-1'.
- [151] "'Roll Over Simulator", indiamart.com. <https://www.indiamart.com/proddetail/roll-over-simulator-19330511112.html> (accessed Feb. 26, 2022)'.
- [152] A. F. Williams, D. Reinfurt, and J. K. Wells, 'Increasing seat belt use in North Carolina', *Journal of Safety Research*, vol. 27, no. 1, pp. 33–41, Mar. 1996, doi: 10.1016/0022-4375(95)00027-5.

- [153] B. A. Jonah, N. E. Dawson, and G. A. Smith, 'Effects of a selective traffic enforcement program on seat belt usage', *Journal of Applied Psychology*, vol. 67, pp. 89–96, 1982, doi: 10.1037/0021-9010.67.1.89.
- [154] B. A. Jonah and B. A. Grant, 'Long-term effectiveness of selective traffic enforcement programs for increasing seat belt use', *J Appl Psychol*, vol. 70, no. 2, pp. 257–263, May 1985.
- [155] C. Dussault, 'Effectiveness of a selective traffic enforcement program combined with incentives for seat belt use in Quebec', *Health Education Research*, vol. 5, no. 2, pp. 217–223, 1990, Accessed: Dec. 11, 2022. [Online]. Available: <https://www.jstor.org/stable/45111361>
- [156] M. P. Hagenzieker, 'Enforcement or incentives? Promoting safety belt use among military personnel in the Netherlands', *J Appl Behav Anal*, vol. 24, no. 1, pp. 23–30, 1991, doi: 10.1901/jaba.1991.24-23.
- [157] F. M. Streff, L. J. Molnar, and C. Christoff, 'Increasing safety belt use in a secondary enforcement state: evaluation of a three-county special enforcement program', *Accident Analysis & Prevention*, vol. 24, no. 4, pp. 369–383, Aug. 1992, doi: 10.1016/0001-4575(92)90050-S.
- [158] A. F. Williams, A. K. Lund, D. F. Preusser, and R. D. Blomberg, 'Results of a seat belt use law enforcement and publicity

- campaign in Elmira, New York', *Accident Analysis & Prevention*, vol. 19, no. 4, pp. 243–249, Aug. 1987, doi: 10.1016/0001-4575(87)90059-5.
- [159] A. F. Williams, W. L. Hall, W. G. Tolbert, and J. K. Wells, 'Development and evaluation of pilot programs to increase seat belt use in North Carolina', *Journal of Safety Research*, vol. 25, no. 3, pp. 167–175, Sep. 1994, doi: 10.1016/0022-4375(94)90073-6.
- [160] W. D. McQuilken and J. M. Schultz, 'Driving Simulators – More than a Video Game!', p. 2.
- [161] '4DX VR. 4DX's Motion Seat Technology Meets Virtual Reality in Cinema Available online: <http://cj4dx.com/> (accessed on 6 November 2022)'.
- [162] '5D Cinema Extreme. Fedezze fel Most a Mozi új Dimenzióját! Available online: <http://www.5dcinema.hu/> (accessed on 6 November 2022)'.
- [163] 'Huang, A.R.W.; Chen, C. A Low-Cost Driving Simulator for Full Vehicle Dynamics Simulation. *IEEE Trans. Veh. Technol.* 2003, doi:10.1109/TVT.2002.807157'.
- [164] 'L. Nehaoua, S. Hima, H. Arioui, N. Seguy, and S. Espie, "Design and Modeling of a New Motorcycle Riding Simulator", in 2007

- American Control Conference, Jul. 2007, pp. 176–181. doi: 10.1109/ACC.2007.4283070’.
- [165] S. Casas, I. Coma, C. Portales, and M. Fernandez, ‘Optimization of 3-DOF parallel motion devices for low-cost vehicle simulators’, *Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing*, vol. 11, no. 2, pp. JAMDSM0023–JAMDSM0023, 2017.
- [166] ‘Riera, J.V.; Casas, S.; Alonso, F.; Fernández, M. A VR-Enhanced Rollover Car Simulator and Edutainment Application for Increasing Seat Belt Use Awareness. *Computers* 2021, 10, 55, doi:10.3390/computers10050055’.
- [167] ‘Walpole, R.E.; Myers, R.H.; Myers, S.L.; Ye, K. *Probability & Statistics for Engineers & Scientists: MyStatLab Update*; 2017; ISBN 978-1-292-16141-9’.
- [168] ‘Hancock, P.A.; Vincenzi, D.A.; Wise, J.A.; Mouloua, M. *Human Factors in Simulation and Training*; CRC Press, 2008’.
- [169] S. Casas-Yrurzum, R. Olanda, M. Fernández, and J. Riera, *A faster than real-time simulator of motion platforms*. 2012, p. 302.
- [170] S. Casas, I. Coma, J. V. Riera, and M. Fernández, ‘Motion-Cuing Algorithms: Characterization of Users’ Perception’, *Hum Factors*, vol. 57, no. 1, pp. 144–162, Feb. 2015, doi: 10.1177/0018720814538281.

- [171] 'Asadi, H.; Lim, C.P.; Mohamed, S.; Nahavandi, D.; Nahavandi, S. Increasing motion fidelity in driving simulators using a fuzzybased washout filter. *IEEE Trans. Intell. Veh.* 2019, 4, 298–308. <https://doi.org/10.1109/TIV.2019,2904388>'.
- [172] 'Hummel, S.R.; Chassapis, C. Configuration design and optimization of universal joints. *Mech. Mach. Theory* 1998, 33, 479–490'.
- [173] 'Wynne, R.A.; Beanland, V.; Salmon, P.M. Systematic review of driving simulator validation studies. *Saf. Sci.* 2019, 117, 138–151. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2019,04.004>'.
- [174] 'Van Leeuwen, T.D.; Cleij, D.; Pool, D.M.; Mulder, M.; Bülthoff, H.H. Time-varying perceived motion mismatch due to motion scaling in curve driving simulation. *Transp. Res. Part F Traffic Psychol. Behav.* 2019, 61, 84–92. <https://doi.org/10.1016/j.trf.2018,05.022>'.
- [175] 'Chen, S.H.; Fu, L.C. An optimal washout filter design for a motion platform with senseless and angular scaling maneuvers. In *Proceedings of the 2010 American Control Conference, Baltimore, MD, USA, 30 June–2 July 2010*; IEEE: Piscataway, NJ, USA, 2010; pp. 4295–4300. <https://doi.org/10.1109/ACC.2010,5530820>'.
- [176] 'Berthoz, A.; Bles, W.; Bülthoff, H.H.; Grácio, B.C.; Feenstra, P.; Filliard, N.; Wentink, M. Motion scaling for high-performance

- driving simulators. *IEEE Trans. Hum.-Mach. Syst.* 2013, 43, 265–276. <https://doi.org/10.1109/TSMC.2013.2242885>’.
- [177] A. W. Ellis, M. P. Klaus, and F. W. Mast, ‘Vestibular cognition: the effect of prior belief on vestibular perceptual decision making’, *J NeuroI*, vol. 264, no. 1, pp. 74–80, Oct. 2017, doi: 10.1007/s00415-017-8471-6.
- [178] N. Preuss, F. Mast, and G. Hasler, ‘Purchase decision-making is modulated by vestibular stimulation’, *Frontiers in Behavioral Neuroscience*, vol. 8, 2014, Accessed: Dec. 29, 2022. [Online]. Available: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fnbeh.2014.00051>
- [179] E. R. Ferrè and P. Haggard, ‘Vestibular cognition: State-of-the-art and future directions’, *Cognitive Neuropsychology*, vol. 37, no. 7–8, pp. 413–420, Nov. 2020, doi: 10.1080/02643294.2020.1736018.
- [180] ‘Zöller, I.; Abendroth, B.; Bruder, R. Driver behaviour validity in driving simulators—Analysis of the moment of initiation of braking at urban intersections. *Transp. Res. Part F Traffic Psychol. Behav.* 2019, 61, 120–130. <https://doi.org/10.1016/j.trf.2017.09.008>’.
- [181] ‘Li, Y.; Zheng, Y.; Wang, J.; Kodaka, K.; Li, K. Crash probability estimation via quantifying driver hazard perception. *Accid. Anal.*

- Prev. 2018, 116, 116–125.
<https://doi.org/10.1016/j.aap.2017.05.009>’.
- [182] ‘MacLeod, K.E.; Karriker-Jaffe, K.J.; Ragland, D.R.; Satariano, W.A.; Kelley-Baker, T.; Lacey, J.H. Acceptance of drinking and driving and alcohol-involved driving crashes in California. *Accid. Anal. Prev.* 2015, 81, 134–142.
<https://doi.org/10.1016/j.aap.2015.04.035>’.
- [183] ‘Horswill, M.S.; Hill, A.; Wetton, M. Can a video-based hazard perception test used for driver licensing predict crash involvement? *Accid. Anal. Prev.* 2015, 82, 213–219.
<https://doi.org/10.1016/j.aap.2015.05.019>’.
- [184] ‘Straus, S.H. New, Improved, Comprehensive, and Automated Driver’s License Test and Vision Screening System; No. FHWA-AZ-04- 559 (1)); Arizona Department of Transportation: Phoenix, AZ, USA, 2005’.
- [185] ‘Sætren, G.B.; Pedersen, P.A.; Robertsen, R.; Haukeberg, P.; Rasmussen, M.; Lindheim, C. Simulator training in driver education— Potential gains and challenges. In *Safety and Reliability—Safe Societies in a Changing World*; CRC Press: Boca Raton, FL, USA, 2018; pp. 2045–2049’.
- [186] ‘Upahita, D.P.; Wong, Y.D.; Lum, K.M. Effect of driving inactivity on driver’s lateral positioning control: A driving simulator study.

- Transp. Res. Part F Traffic Psychol. Behav. 2018, 58, 893–905.
<https://doi.org/10.1016/j.trf.2018,07.007>’.
- [187] ‘Bro, T.; Lindblom, B. Strain out a gnat and swallow a camel?— Vision and driving in the Nordic countries. *Acta Ophthalmol.* 2018, 96, 623–630. <https://doi.org/10.1111/aos.13741>’.
- [188] ‘Kemeny, A.; Panerai, F. Evaluating perception in driving simulation experiments. *Trends Cogn. Sci.* 2003, 7, 31–37. <https://doi.org/10.1016/S1364-661300011-6>’.
- [189] ‘Reymond, G.; Droulez, J.; Kemeny, A. Visuo-vestibular perception of self-motion modeled as a dynamic optimization process. *Biol. Cybern.* 2002, 87, 301–314. <https://doi.org/10.1007/s00422-002-0357-7>’.
- [190] ‘Machado-León, J.L.; de Oña, J.; de Oña, R.; Eboli, L.; Mazzulla, G. Socio-economic and driving experience factors affecting drivers’ perceptions of traffic crash risk. *Transp. Res. Part F Traffic Psychol. Behav.* 2016, 37, 41–51. <https://doi.org/10.1016/j.trf.2015,11.010>’.
- [191] ‘rFactor Simulations’. <https://www.rfactor.net/> (accessed Dec. 29, 2022).
- [192] ‘rFactor: Special Edition 2008 Screenshots for Windows’, *MobyGames*.
<https://www.mobygames.com/game/windows/rfactor-special->

- edition-2008/screenshots/gameShotId,511468/ (accessed Dec. 29, 2022).
- [193] D. Cleij, J. Venrooij, P. Pretto, D. M. Pool, M. Mulder, and H. H. Bülthoff, 'Continuous Subjective Rating of Perceived Motion Incongruence During Driving Simulation', *IEEE Transactions on Human-Machine Systems*, vol. 48, no. 1, pp. 17–29, Feb. 2018, doi: 10.1109/THMS.2017.2717884.
- [194] B. G. Witmer, C. J. Jerome, and M. J. Singer, 'The Factor Structure of the Presence Questionnaire', *Presence*, vol. 14, no. 3, pp. 298–312, Jun. 2005, doi: 10.1162/105474605323384654.
- [195] M. Vivanco, *Muestreo Estadístico. Diseño Y Aplicaciones*. Editorial Universitaria.
- [196] 'Goodman, L. A. (1954). Kolmogorov-Smirnov tests for psychological research. *Psychological bulletin*, 51(2), 160'.

