

Universidad de Almería

Escuela Superior de Ingeniería

Ingeniería Técnica Industrial, especialidad en Mecánica



Proyecto Fin de Carrera

**Estudio del impacto de un brazo robot sobre una
cabeza humana**

Autor: Rubén Fernández Moya

Directores: Javier López Martínez, Antonio Giménez Fernández

Almería, Septiembre 2012

A mi querido abuelo, que en paz descansa.

Índice

I.	Intereses y objetivos.....	5
I.1	Intereses.....	6
I.2	Objetivos.....	7
II.	Revisión bibliográfica.....	8
II.1	Estado del arte robótico.....	9
II.1.1	Historia de los robots.....	9
II.1.2	Definición y clasificación de los robots.....	10
II.1.3	Interacción hombre-robot.....	11
II.2	Criterios de daño en impactos.....	12
II.2.1	Criterio de lesión encefálica (CLE).....	14
II.2.2	Criterio de fractura craneal por fuerza en el impacto.....	16
II.3	Péndulo.....	18
II.3.1	Introducción al péndulo y al movimiento pendular.....	18
II.3.2	Tipos de péndulos.....	19
II.4	Sistemas de adquisición de datos.....	27
II.4.1	Introducción a los sistemas de adquisición de datos.....	27
II.4.2	Sensores para adquisición de datos.....	28
II.4.3	Tarjetas de adquisición de datos.....	29
II.4.4	Filtros.....	33
II.5	LabVIEW.....	35
II.5.1	Introducción al entorno de programación de LabVIEW.....	35
II.5.2	Bloques de adquisición y tratamiento de datos.....	37
II.6	MATLAB.....	40
II.6.1	Introducción a MATLAB y Simulink.....	40
II.6.2	Programación con SimMechanics.....	43
III.	Material y métodos.....	45
III.1	Introducción.....	46
III.2	Instrumentación y material utilizado.....	46
III.2.1	Acelerómetro 352C03 de PCB Piezotronics.....	46

III.2.2	Sensor de fuerza 200B04 de PCB Piezotronics.....	48
III.2.3	Acondicionador de señales 482C05 de PCB Piezotronics.....	50
III.2.4	Tarjeta de adquisición de datos NI USB-6251 Screw Term.....	51
III.2.5	Mesa de ensayos fabricación UAL.....	52
III.2.6	Sistema mecánico cabeza-cuello humana fabricación UAL.....	55
III.2.7	Barras de acero de distintas propiedades físicas.....	62
III.3	Proceso de adquisición de datos.....	69
III.3.1	Características del código empleado en LabVIEW.....	69
III.4	Método de realización de los ensayos experimentales.....	79
III.5	Modelado y simulación en SimMechanics.....	83
III.5.1	Modelado del sistema cabeza-cuello.....	84
III.5.2	Modelado del brazo mecánico.....	86
III.5.3	Modelado del bloque de impacto.....	91
III.5.4	Simulación de la situación de impacto.....	95
IV.	Resultados y discusión.....	99
IV.1	Introducción.....	100
IV.2	Resultados obtenidos en la fase experimental.....	100
IV.2.1	Influencia de la cobertura en el impacto.....	104
IV.2.2	Influencia de la inercia en el impacto.....	119
IV.2.3	Observaciones.....	133
IV.3	Resultados obtenidos en las simulaciones.....	134
IV.3.1	Influencia de la cobertura en el impacto.....	136
IV.3.2	Influencia de la inercia en el impacto.....	146
IV.3.3	Observaciones.....	156
V.	Conclusiones.....	157
V.1	Conclusiones y futuros proyectos.....	158
VI.	Bibliografía.....	161
VI.1	Libros.....	162
VI.2	Proyectos fin de carrera.....	162
VI.3	Normas.....	163
VI.4	Páginas web.....	164
VI.5	Artículos científicos.....	164
VI.6	Manuales.....	164

I. Intereses y objetivos

I.1 - Intereses

La interacción entre las personas y los robots es cada vez mayor, cada día aumenta el número de máquinas y elementos robóticos que están en contacto directo o indirecto con todos nosotros. La utilización de los robots en tan diversas áreas se debe principalmente a que son capaces de realizar tareas de forma más rápida, precisa y con menor coste que si las hiciera una persona, además son capaces de realizar tareas arriesgadas o imposibles para nosotros, por lo que el uso de estas máquinas parece esencial e inevitable.



Esta creciente interacción entre los humanos y los robots también trae consigo unos riesgos, ya que el continuo contacto entre ambos posibilita que se produzcan choques o impactos fortuitos de alguna parte de un robot con una zona de nuestro cuerpo, pudiendo darse el caso de que el choque se produzca contra la cabeza, que es la zona más peligrosa de nuestro cuerpo a la hora de recibir cualquier tipo de impacto, y por lo tanto podría causar grandes daños a la persona golpeada.

Los movimientos de las partes de los robots están controlados por sensores y software de control que se adaptan a las condiciones del entorno, por lo que parece sencillo evitar situaciones no deseadas en la interacción persona-robot, pero a su vez esto crea la dependencia de que en el software no se produzca ningún fallo, ya que si ocurre, la seguridad de las personas que están en el entorno del robot correría peligro, debido a que los brazos o elementos de los robots están fabricados con materiales de gran rigidez para

darle a éstos la precisión deseada en cada trabajo que desarrollen. Además en el desarrollo de su actividad se están moviendo con distinta aceleración y velocidad, lo que hace variar los niveles de riesgo y de daño en función de estos parámetros.

Entonces, el grado de peligrosidad de los posibles impactos por parte de un elemento de un robot varía en función de diversos factores como la rigidez, la velocidad o la aceleración del elemento robot que entre en contacto con la persona, entre otros.

Estos riesgos y situaciones hicieron que se desarrollara una normativa a nivel internacional para la seguridad en la utilización de los robots en entornos industriales, la normativa EN ISO 10218-1:2008 *Robots para entornos industriales. Requisitos de seguridad*, la cual determina los requisitos de seguridad a establecer a la hora de trabajar e interactuar con robots en situaciones de trabajo en la industria.

Por lo tanto, el interés de este tema queda justificado, primero por la gran interacción entre las persona y los robots en el presente, y el creciente uso de las máquinas robóticas en el futuro, y segundo por el interés que supone conocer las fuerzas aplicadas a nuestro cuerpo, y su consecuente reacción, en caso de producirse un impacto, en relación con diversos factores que influyen en ellas, y los daños causados en las personas al golpear una parte de un robot en una zona tan importante de nuestro cuerpo como es la cabeza.

I.2 -Objetivos

El objetivo que se persigue en la elaboración de este proyecto es el de estudiar de forma precisa la influencia de distintos parámetros que influyen en las fuerzas resultantes en un impacto entre un brazo robot y una cabeza humana y en la aceleración que experimenta esta última al producirse el choque. El estudio va a consistir en determinar la influencia de la velocidad en el momento en que se produce la colisión, la rigidez que posea el brazo, y la inercia del mismo. También vamos a introducir distintos tipos de coberturas en el punto en el que se produce el impacto, de modo que se amortigüen los golpes y, así, poder ver cómo afecta este último parámetro en las citadas fuerzas que se producen en el impacto y en la aceleración que sufre la cabeza al darse el mismo.

II. Revisión bibliográfica

II.1-.Estado del arte robótico

II.1.1-.Historia de los robots

Durante mucho tiempo el ser humano ha construido diversos tipos de máquinas que trataban de reproducir los movimientos de las distintas partes y articulaciones de los seres humanos.

Empezaron los antiguos egipcios uniendo brazos mecánicos a las estatuas de los dioses. También los griegos construyeron estatuas que operaban con sistemas hidráulicos, los cuales se utilizaban para fascinar a los oradores de los templos. Pero el origen de la robótica actual puede fijarse en la industria textil del siglo XVIII, cuando Joseph Jacquard inventa en 1801 una máquina textil programable mediante tarjetas perforadas. La revolución industrial impulsó el desarrollo de estas máquinas, entre las cuales se destacaron el torno mecánico motorizado de Babbitt y el mecanismo programable para pintar con espray de Pollard y Roselund. Además durante los siglos XVII y XVIII en Europa se construyeron muñecos mecánicos muy ingeniosos que tenían algunas características de robots. En 1805, Henri Maillardert construyó una muñeca mecánica que era capaz de hacer dibujos, mediante una serie de levas, utilizadas como programa para el dispositivo a la hora de escribir y dibujar.

En 1964 se abren laboratorios de investigación en inteligencia artificial en el MIT (Massachusetts Institute of Technology), el SRI (Stanford Research Institute) y en la universidad de Edimburgo. Y poco después los japoneses que anteriormente importaban su tecnología robótica, se sitúan como pioneros del mercado.

A partir de esta fecha se empezó a juntar la mecánica con la electrónica formando la robótica, una rama muy amplia de estudio en la ciencia, ya que la robótica abarca todo lo referente con dispositivos electrónicos y movimiento a través de recursos mecánicos.

Pero centrándonos más en nuestra rama, la industria, podemos decir que aquí la evolución ha sido vertiginosa, ya que en poco más de 30 años, las investigaciones y desarrollos sobre la robótica industrial han permitido que los robots tomen fuerza en casi todas las áreas productivas. Destacamos cinco momentos claves en el desarrollo de la robótica industrial:

1. En 1950 se desarrolló el primer manipulador.
2. En 1958 se realizaron los primeros proyectos de robots, con la fundación de Unimation.
3. En 1970 los laboratorios de Stanford y Massachusetts se proponen controlar un robot mediante un computador.
4. 1975, la aplicación del microprocesador transforma la imagen y las características del robot hasta entonces grande y tosco.
5. Y por último, en 1980, el fuerte impulso de la investigación potencia la configuración del robot inteligente.

II.1.2-Definición y clasificación de los robots

A la hora de definir formalmente lo que es un robot existen algunas dificultades. La primera de ellas surge en la diferencia conceptual entre el mercado japonés y el euro-americano de lo que es un robot y lo que es un manipulador. Mientras que para los japoneses un robot industrial es cualquier dispositivo mecánico dotado de articulaciones móviles destinado a la manipulación, el mercado occidental es más restrictivo, exigiendo una mayor complejidad, sobre todo en lo relativo al control.

La definición más comúnmente aceptada es la de la RIA (Asociación de Industrias Robóticas), la cual define un robot industrial como un manipulador multifuncional reprogramable, capaz de mover materias primas, piezas, herramientas o dispositivos especiales, según trayectorias variables, programadas para realizar tareas diversas.

Esta misma definición, pero ligeramente modificada, ha sido adoptada por la ISO (Organización Internacional de Estándares), que define al robot industrial como un manipulador multifuncional reprogramable con varios grados de libertad, capaz de manipular materias, piezas, herramientas o dispositivos especiales, según trayectorias variables, programadas para realizar tareas diversas.

La IFR (Federación Internacional de Robótica) define a un robot industrial de manipulación como una máquina de manipulación automática, reprogramable y multifuncional con tres o más ejes que pueden posicionar y orientar materias, piezas, herramientas o dispositivos especiales para la ejecución de trabajos diversos en las diferentes etapas de la producción industrial, ya sea en una posición fija o en movimiento.

Vemos que es común en todas las definiciones anteriores la aceptación de robot industrial como un brazo mecánico con capacidad de manipulación y que incorpora un control más o menos complejo. Sin embargo el concepto de sistema robotizado es más amplio y complejo y engloba todos aquellos dispositivos que realizan tareas de forma automática en sustitución de un ser humano y que pueden incorporar o no a uno a varios robots.

Por otra parte, también resulta difícil realizar una clasificación de los tipos de robots existentes, debido a la multitud de parámetros sobre los que se puede realizar. De una forma general, los robots se suelen dividir en:

Robot industrial o manipulador

Sistemas mecánicos y electrónicos destinados a realizar de forma automática determinados procesos de fabricación o manipulación.

Robots móviles

Estos robots están provistos de algún tipo de mecanismo que les permite desplazarse de lugar autónomamente, como pueden ser patas, ruedas u orugas, y reciben la información del entorno con sus propios sistemas sensores.

Androides o humanoides

Son un tipo de robot que intentan reproducir de manera total o parcial la forma y el comportamiento del ser humano. Actualmente no tienen una utilidad práctica por sus propias limitaciones y por su precio de fabricación.

Zoomórficos

Los robots zoomórficos reproducen con mayor o menor grado de realismo los sistemas de locomoción de diversos seres vivos, por lo que en un futuro se prevé desarrollar auténticos vehículos de transporte capaces de desplazarse por superficies muy accidentadas.

II.1.3- Interacción robots-humanos

Como ya comentamos en el capítulo de intereses y objetivos, los ambientes y entornos en los que los humanos y los robots están en contacto directo son cada vez más frecuentes, debido a que nuevos modelos de robots se están diseñando para prestar servicios a las personas, de forma que nos ayuden en tareas que nosotros no podemos realizar. Estos robots que interactúan con

las personas humanas se clasifican en dos tipos, los robots asistenciales y los robots de servicio. Definimos ambos a continuación.

- Robots de servicio: son aquellos robots que operan de manera semi o totalmente autónoma para realizar servicios útiles a los humanos y equipos, excluidas las operaciones de manufactura. Dentro de sus aplicaciones se encuentran, entre otras, ayudar a realizar cuidados médicos, uso en oficinas, educación, intervención en ambientes peligrosos, aplicaciones espaciales o submarinas, etc.
- Robots asistenciales: son los robots destinados a ser usados por humanos sin formación técnica, con el objetivo de servirles como ayudantes y colaboradores en las actividades diarias. Las principales tareas de estos robots están enfocadas a ayudar a personas discapacitadas, enfermas, ancianos, etc.

Estos nuevos escenarios, en los que los robots comparten el espacio de trabajo con nosotros, traen consigo algunos riesgos que hay que tener muy en cuenta y considerar a la hora de diseñar las partes que constituyen los robots. Nos hacemos eco especialmente del riesgo de que se produzca un impacto accidental entre un brazo robot y una persona, concretamente la zona de nuestro cuerpo que más riesgos entraña, la cabeza. De aquí la razón de que tengamos que tener alguna forma de poder medir estos daños que pueden producir un impacto, a través de algún valor significativo recogido del propio choque, lo que nos conduce al siguiente apartado de este capítulo.

II.2-.Criterios de daño en impactos

Los daños que pueden sufrir las personas a consecuencia de un impacto pueden ser muy variados, dependiendo de diversos factores que intervienen en ellos, algunos de los cuales estudiamos en este proyecto. Por ello, para determinar el daño sufrido, vamos a tener en cuenta dos tipos de criterios distintos que nos cuantifiquen el daño que provoca ese impacto sobre una persona, rigiéndose cada uno de ellos por parámetros distintos, y así realizar un diseño adecuado a la seguridad de las mismas.

Existen diversos criterios a la hora de cuantificar el daño sufrido por una persona en un impacto, dependiendo de la zona del cuerpo en la que se produzca este. La mayoría de estos criterios han sido adaptados del mundo

del automóvil, ya que aquí han sido ampliamente estudiados y han logrado una buena aceptación. Algunos ejemplos de criterios son el Thoracic Trauma Index (TTI), el Viscous Injury Response (VC), el Gadd Severity Index (GSI), el Head Injury Criterion (HIC), el Head Protection Criterion (HPC), el 3 ms criterion o el Generalise Acceleration Model for Brain Injury Threshold (GAMBIT).

Aunque haya distintos tipos de criterios para cada zona del cuerpo donde puede producirse un impacto, la mayoría de ellos se centran en el daño que se puede provocar si el impacto se produce en la cabeza, ya que es la zona de cuerpo humano más peligrosa a la hora de recibir un golpe. De hecho, las lesiones en la cabeza son las que más muertes y discapacidades provocan, por lo que el interés sobre esta parte está más que justificado.

La mayoría de estos criterios están basados en la curva de tolerancia límite de la Wayne State University, la cual relaciona la aceleración de la cabeza con el tiempo de duración de esa aceleración. Este criterio establece, basándose en datos experimentales, que las combinaciones de aceleración y duración de esta por encima de la curva, exceden la tolerancia de la cabeza humana, y provocan daños severos e irreversibles, y los valores por debajo de la curva no exceden la tolerancia de la cabeza humana, pero pueden causar algún daño reversible. Como podemos ver en la gráfica de la figura 1, donde se representa esta curva de tolerancia límite, altas aceleraciones son soportables si las duraciones de estas son pequeñas (menos de 10 milisegundos).

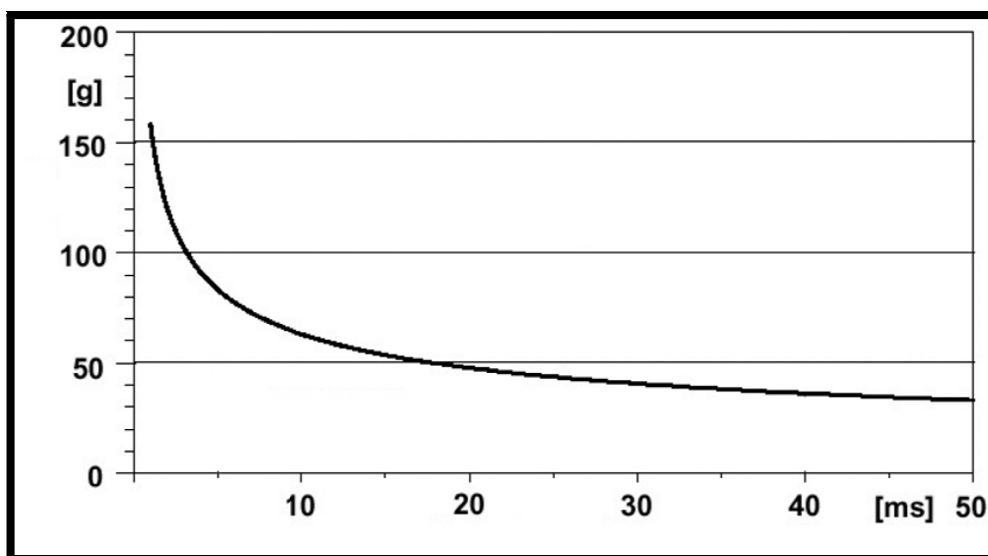


Figura 1. Curva de tolerancia límite de la Wayne State University.

A pesar de haber un gran número de criterios que pueden ser usados, actualmente uno de ellos es el que se encuentra más extendido y el que más

se utiliza a la hora de analizar las lesiones cerebrales, este es el Head Injury Criterion (HIC), conocido en España como el Criterio de Lesión Encefálica (CLE), y que se basa en la curva de tolerancia límite de la Wayne State University, es decir, para determinar el daño que puede sufrir la cabeza en un impacto utiliza el parámetro de aceleración sufrida por la misma en el choque. Por ello será este uno de los que tendremos en cuenta en nuestro proyecto a la hora de analizar los daños producidos en los impactos. El otro criterio en el cual nos basaremos para determinar los daños sufridos ante el posible impacto del brazo robot sobre una cabeza humana está basado en la fuerza límite que puede soportar la parte frontal de la cabeza según diversos estudios y ensayos experimentales realizados.

II.2.1-.Criterio de lesión encefálica (CLE)

Este criterio, más conocido como Head Injury Criterion (HIC), es un índice estándar usado para predecir posibles daños encefálicos a consecuencia de algún tipo de impacto en la cabeza.

Este criterio tiene su historia basada en el trabajo inicial de Gadd [16] en 1961, quien usó la curva límite de tolerancia de la universidad de Wayne para desarrollar un índice de severidad llamado Gadd Severity Index (GSI) y que se definía mediante la siguiente fórmula:

$$GSI = \int_0^t a^{2.5} dt$$

donde a es la aceleración del centro de gravedad de la cabeza en G's (equivaliendo una G a la aceleración de la gravedad). Según Gadd un valor de GSI superior a 1000 indica una alta probabilidad de daño grave.

Pero finalmente la versión actual del HIC que se utiliza, ya que está mejor adaptada al mundo de la robótica, fue propuesta por la US National Highway Traffic Safety Administration (NHTSA), y cuya expresión es la siguiente:

$$HIC = \max \left[\frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} a(t) dt \right]^{2.5} (t_2 - t_1)$$

siendo a la aceleración del centro de gravedad de la cabeza en G's, t el tiempo medido en segundos y t_1 y t_2 dos puntos arbitrarios de tiempo en la medida de la aceleración en el que se evalúa el HIC. Cuando estos puntos

están separados menos de 36 milisegundos se denomina HIC_{36} , y es el valor más representativo de este criterio junto al HIC_{15} , cuyos puntos están separados 15 milisegundos.

Para obtener una relación entre el índice HIC y los daños producidos en una cabeza humana, establecemos una escala de lesión, de forma que ofrecemos una manera de cualificar el daño que puede causar un choque entre un brazo robot y esta.

Utilizamos para ello una escala de lesiones conocida como Escala Abreviada de Lesiones (AIS), desarrollada por la Asociación para el Avance de la Medicina de Automoción (AAAM) y la Asociación Médica Americana (AMA). En ella se divide el nivel de lesión observado en 7 categorías, proporcionando una clasificación muy intuitiva, que podemos verla en la siguiente figura.

AIS	SEVERIDAD	TIPO DE LESION
0	Ninguno	Ninguno
1	Menor	Superficial
2	Moderado	Recuperable
3	Serio	Posiblemente recuperable
4	Severo	No es recuperable sin atención
5	Critico	No es totalmente recuperable
6	Máxima lesión	Mortal

Figura 2. Escala Abreviada de Lesiones.

La administración de seguridad de tráfico de autopistas nacionales de los estados unidos (NHTSA) especifica la ampliación de curvas de Prasad y Mertz [22], que relacionan estadísticamente los valores medidos de HIC a la gravedad y probabilidad de una lesión en la cabeza. El uso de estas curvas, en combinación con los valores evaluados de HIC, hace posible definir el nivel de una lesión en función a la aceleración de la cabeza. En la figura 3 mostramos estas curvas.

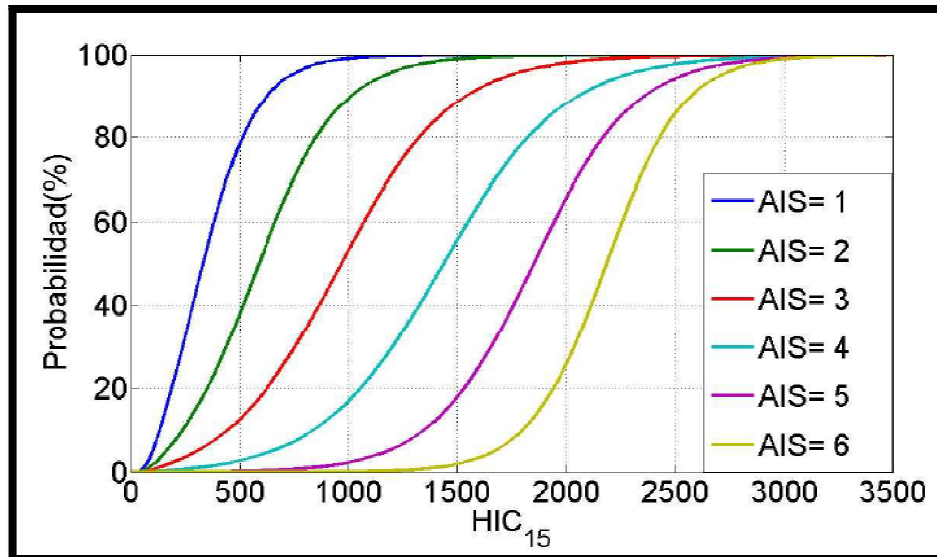


Figura 3. Relación del HIC con la probabilidad de pertenencia a un nivel de la AIS.

Por ejemplo, si consideramos que un impacto en particular ocasiona un índice HIC (utilizando el criterio de impacto de 15 ms) igual a 2000, según esta figura la probabilidad que este impacto cause una lesión fatal (AIS 6) es cercana al 25%.

II.2.2.-Criterio de fractura craneal por fuerza en el impacto

A diferencia del criterio anterior, desarrollado a partir del trabajo inicial de Gadd, que se basó en las aceleraciones que sufría la cabeza en el impacto para determinar el riesgo de daño encefálico, este segundo criterio que vamos a usar está basado en los datos obtenidos de diferentes ensayos y estudios [3], realizados por distintos científicos acerca de las fuerzas límite que puede soportar el cráneo en un impacto y a partir de las cuales se produce una rotura en el mismo, dependiendo de la zona de la cabeza en la que se produzca el impacto.

En estos ensayos se realizaron pruebas con una gran cantidad de cráneos humanos, variando las fuerzas de los impactos hasta que se conseguía fracturarlos, obteniendo finalmente una media del valor de la fuerza de impacto para producir esta rotura de los cráneos. En la siguiente tabla se recogen las zonas de la cabeza para las que se han realizado ensayos, las fuerzas límite que se han obtenido con las cuales se produce fractura craneal, y los nombres de los autores que se han encargado de dirigir cada una de las pruebas.

Tabla 1. Fuerza máxima para la fractura en diferentes zonas craneales.

Área de impacto	Fuerza [kN]	Referencia
Frontal	4.2	Nahum et al. 1968 [21]
	5.5	Hodgson et al. 1971 [19]
	4.0	Schneider and Nahum 1972 [24]
	6.2	Advani et al. 1975 [12]
	4.7	Allsop et al. 1988 [14]
Lateral	3.6	Nahum et al. 1968 [21]
	2.0	Schneider and Nahum 1972 [24]
	5.2	Allsop et al. 1991 [13]
Occipital	12.5	Advani et al. 1982 [1]

Como vemos, hay distintas variaciones en cuanto a los picos de fuerza que provocan rotura craneal se refiere, incluso dentro de la misma zona de impacto, por lo que nosotros sólo tendremos en cuenta uno de estos valores límite a la hora de analizar si se produciría rotura craneal en la zona frontal en los ensayos realizados en nuestros proyecto.

Hemos decidido escoger el caso más desfavorable, es decir, el ensayo en el cual la fuerza límite de rotura craneal en la zona frontal sea la menor, ya que de esta manera tendremos en cuenta las posibles fracturas de las estructuras craneales más débiles. Además, la zona frontal de la cabeza es en la que basamos el estudio, ya que lo hemos decidido así por ser la zona de la cabeza en la que se encuentran elementos como los ojos, la nariz o la boca, todos ellos de suma importancia para nuestra vida cotidiana y que pueden ser dañados ante un golpe fortuito.

Por lo tanto, el valor escogido es el que tiene una fuerza pico de 4 kN, correspondiente con los estudios realizados por Schneider y Nahum [24]. Entonces, todos los datos de nivel de fuerza producidos en el impacto que recojamos en los ensayos experimentales de nuestro proyecto por los sensores que superen el valor de 4000 N serán los que consideremos que producirían una rotura craneal en caso de producirse en un entorno real.

II.3-. El péndulo

II.3.1-. Introducción al péndulo y al movimiento pendular

Debido a que nuestro estudio se va a basar en la aplicación del movimiento pendular a través de una barra rígida ensamblada en uno de sus extremos a un eje, se nos hace necesaria la explicación detallada de toda la parte física y teórica de lo que representa un péndulo y su movimiento. Por todo ello lo vamos a tratar de explicar con el mayor detalle posible y de la manera más concisa para su buena comprensión.

Empezaremos definiendo el concepto de un péndulo, siendo este un sistema físico que puede oscilar bajo la acción de la fuerza de la gravedad u de otra característica física, tal como la elasticidad, y que está formado por una masa suspendida de un punto o de un eje horizontal, y cuya masa puede estar fijada mediante un hilo, una varilla, o algún otro elemento físico.

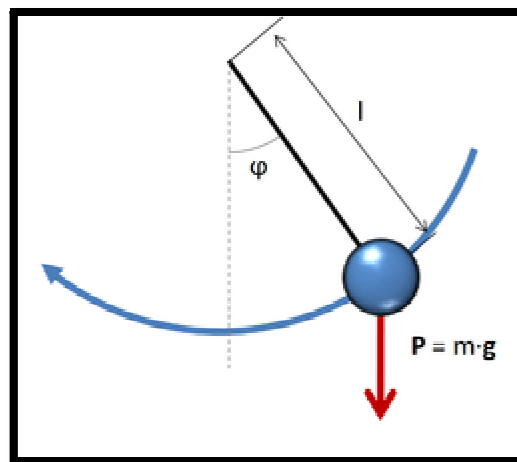


Figura 4. Ejemplo de un péndulo

Si consideramos que no existe rozamiento ninguno, ni de aire ni de fricción entre los elementos físicos, es decir, no existe disipación de energía y el movimiento se mantiene invariable, el movimiento que describen estos sistemas pendulares se denomina movimiento armónico simple. Este movimiento es de tipo periódico, un movimiento oscilatorio que se repite en intervalos iguales de tiempo, describiendo una trayectoria circular. Pero como veremos más adelante el movimiento que describen los péndulos, generalmente, no es exactamente armónico simple.

Este primer ejemplo, del que vamos a partir para la explicación del movimiento pendular, para que su explicación sea más comprensiva, es de un tipo de péndulo en concreto, el péndulo simple, también llamado en física péndulo ideal.

Se trata de un hilo de masa despreciable, inextensible, sostenido por su extremo superior de un punto fijo, y con una masa puntual sujeta en su extremo inferior, que oscila libremente en un plano vertical fijo sin ningún tipo de rozamiento. El modelo del péndulo simple es un modelo idealizado únicamente para el estudio teórico del movimiento pendular y de las leyes físicas que lo rigen, ya que no es posible la realización práctica de un péndulo simple sin ningún tipo de rozamiento, o con un hilo completamente inextensible.

En el siguiente apartado nos adentraremos más en el estudio de este tipo de péndulo ideal y de las leyes que rigen su movimiento, así como de otros tipos de péndulos que son de interés para el estudio que hemos llevado a cabo.

II.3.2-. Tipos de péndulo

Analizamos en este apartado cada uno de los tipos de péndulo relacionados con el objeto de estudio de este proyecto, adentrándonos en las explicaciones teóricas y físicas de cada uno, para así obtener una mayor visualización y comprensión de los movimientos que desarrolla y los factores que influyen en el movimiento del péndulo con el que llevamos a cabo la parte experimental de nuestro trabajo.

Además haremos una pequeña introducción de todos y cada uno de los tipos de péndulos de los que se dispone en la actualidad para cualquier tema de investigación, pero haciendo sólo hincapié en los de nuestro interés como hemos dicho.

1. Péndulo Simple o Matemático

Como ya hemos descrito brevemente en la introducción, un péndulo simple se define como una partícula de masa m , suspendida de un punto O por un hilo inextensible de longitud l cuya masa es despreciable.

Este tipo de péndulo no es real, ya que no puede ser fabricado, pero sirve como base de estudio a la hora de analizar el movimiento pendular y las leyes físicas por las que se rige.

Vamos ahora a adentrarnos en el análisis de su movimiento y en las fuerzas que actúan sobre la masa para que se desarrolle ese tipo de oscilación.

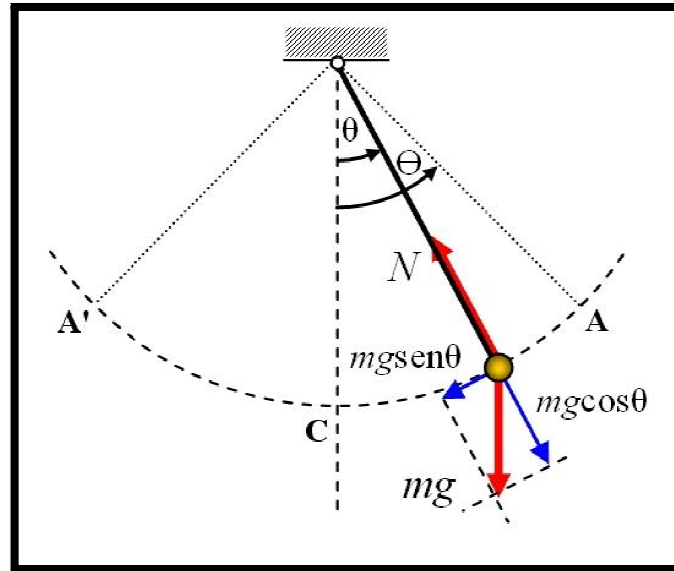


Figura 5. Fuerzas que actúan en un péndulo simple

Como podemos intuir, si se desplaza la partícula de su posición de equilibrio un ángulo θ (ángulo que hace el hilo con la vertical), y luego se suelta, el péndulo comienza a oscilar describiendo una trayectoria circular, un arco de circunferencia de radio l , debido a la acción de la gravedad.

Vemos que las fuerzas que actúan sobre la partícula de masa m son dos: la tensión N del hilo y el peso de la propia partícula, cuya fuerza la descompondremos en la acción simultánea de dos componentes, una en la dirección radial ($mg \cos\theta$), y otro en la dirección tangencial ($mg \sin\theta$), para un estudio más sencillo de la componente.

- *Ecuación del movimiento en la dirección radial:*

Tenemos que la aceleración normal de la partícula es $a_n = v^2/l$, y está dirigida radialmente hacia el centro de su trayectoria circular.

Por otra parte, a partir de la segunda ley de Newton tenemos

$$F_N = ma_n = T - mg \cdot \cos\theta$$

Sustituyendo nos queda: $m \cdot v^2/l + mg \cdot \cos\theta = T$

Como cuando el péndulo pasa por la posición de equilibrio la velocidad es máxima, la tensión de la cuerda T en ese punto será también máxima:

$$T = m \cdot v^2/l + mg$$

Y como al llegar a un extremo de la oscilación la velocidad del péndulo es mínima, la tensión de la cuerda alcanzará por tanto su valor mínimo:

$$T = mg \cdot \cos\theta$$

Por tanto, conociendo el valor de la velocidad v en la posición θ , podremos obtener la tensión del hilo. Para obtener este valor de la velocidad aplicamos el principio de conservación de la energía, con el que relacionamos la energía potencial que posee el péndulo en su posición más alta, con la energía cinética que tiene al pasar por la posición de equilibrio o en cualquier otro punto que no sea ninguno de los dos extremos del recorrido.

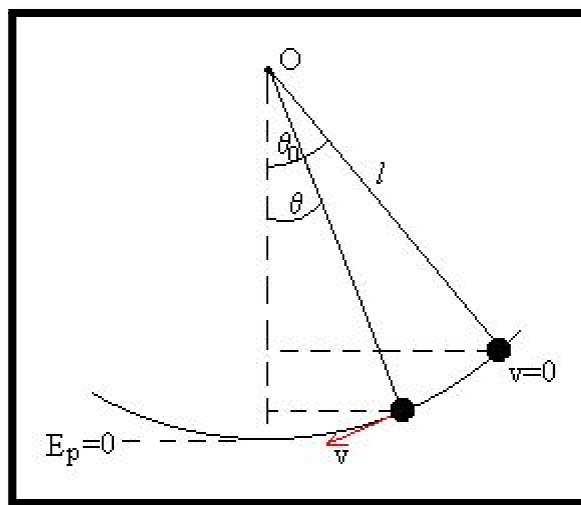


Figura 6. Energía y velocidad en el péndulo

Como hemos dicho, en la posición extrema $\theta=\theta_0$, la energía es solamente potencial:

$$E_p = mg(l - l \cdot \cos\theta_0)$$

Y en un punto intermedio, entre la posición más alta que alcanza el péndulo y la posición de equilibrio, que en este caso está a un ángulo θ de la posición de equilibrio, la energía que posee el péndulo es parte cinética y parte potencial, de la forma:

$$E = \frac{1}{2}mv^2 + mg(l - l \cdot \cos\theta)$$

Puesto que la energía ni se crea ni se destruye, sino que se transforma, igualamos ambas expresiones para obtener una que nos permita obtener el valor de la velocidad:

$$v^2 = 2gl(\cos\theta - \cos\theta_0)$$

Que nos permite obtener una expresión de la tensión del hilo tal como:

$$T = mg(3\cos\theta - 2\cos\theta_0)$$

A partir de la cual podemos observar como la tensión de la cuerda no es constante, sino que varía con la posición angular θ del péndulo, siendo esta máxima cuando $\theta=0$ (el péndulo pasa por la posición de equilibrio y la velocidad es máxima), y mínima cuando $\theta=\theta_0$ (el péndulo alcanza su altura máxima y la velocidad es nula).

- *Ecuación del movimiento en la dirección tangencial:*

La aceleración tangencial de la partícula es $a_t = l \cdot d^2\theta/dt^2$, y con la ecuación de la segunda ley de Newton que para este caso se plantea de la siguiente forma:

$$F_t = ma_t = -mg \cdot \text{sen}\theta$$

Sustituyendo nos queda la ecuación del movimiento, que en este caso se escribe en forma de ecuación diferencial:

$$d^2\theta/dt^2 + \frac{g}{l}\text{sen}\theta = 0$$

Esta ecuación diferencial no corresponde a un movimiento armónico simple (m.a.s.), debido a la presencia de la función seno. Por lo tanto podemos asegurar que el movimiento del péndulo simple no es armónico simple, en general.

El caso en el que el movimiento del péndulo simple es de tipo armónico simple es en el supuesto de que las oscilaciones que lleva a cabo en su movimiento son lo suficientemente pequeñas de amplitud como para aproximar $\text{sen}\theta \approx \theta$, medido el ángulo en radianes, quedando de esta manera la ecuación diferencial del movimiento en la dirección tangencial de la siguiente forma:

$$l \cdot \frac{d^2\theta}{dt^2} + g\theta = 0$$

Que es idéntica a la ecuación diferencial correspondiente al movimiento armónico simple.

2. Péndulo Físico o Compuesto

Este tipo de péndulo es, precisamente, con el que nosotros vamos a llevar a cabo el estudio. Es de la forma de un péndulo simple pero trasladado a la realidad, es decir, con una barra rígida de una determinada longitud, inercia, y demás factores físicos, en lugar de un hilo inextensible y de peso despreciable, o sujeto a un eje, en lugar de suspenderse de un punto.

Para ser más concretos, un péndulo físico se define como un sólido rígido, de forma arbitraria, que puede oscilar en un plano vertical alrededor de un eje perpendicular a un plano que contenga a su centro de masas. El punto en el que estará suspendido el sólido rígido es el punto de intersección del eje con dicho plano. Y la posición de equilibrio será aquella en la que el centro de masas se encuentra por debajo del punto de suspensión y en la misma vertical.

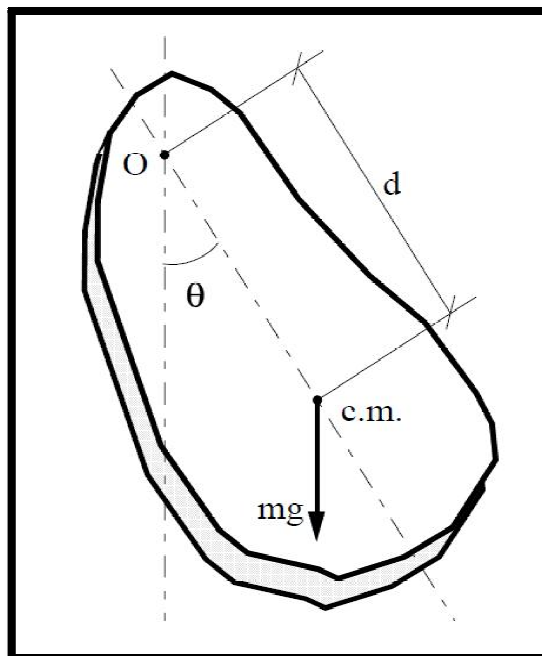


Figura 7. Péndulo físico con forma arbitraria

El péndulo físico o compuesto representado en la figura x podemos observar que tiene una forma completamente asimétrica y arbitraria, y está desplazado de su posición de equilibrio, por lo que al dejar de aplicar la

fuerza para mantenerlo fuera de la posición de equilibrio, este comenzará a oscilar alrededor del punto de intersección O , debido a que el peso del cuerpo, aplicado en el centro de masas, produce un momento respecto a dicho punto de suspensión que tiende a restaurar la posición de equilibrio.

El momento respecto del punto de suspensión O es:

$$\tau = d \times m \cdot g$$

siendo d la distancia entre el centro de masas y el punto de suspensión, m la masa del cuerpo y g el valor de la gravedad.

El módulo de este momento se escribe como:

$$\tau = -mgd \cdot \text{sen}\theta$$

donde θ es el ángulo de desviación del centro de masas del cuerpo de su posición de equilibrio. El signo negativo significa que es un momento recuperador, actúa en sentido opuesto a las variaciones angulares.

A partir de la ecuación fundamental de la dinámica de rotación podemos relacionar este momento con la aceleración angular α del péndulo y su momento de inercia I respecto al punto de suspensión:

$$\tau = I \cdot \alpha$$

igualando ambas ecuaciones nos queda:

$$I \cdot \alpha + mgd \cdot \text{sen}\theta = 0$$

Puesto que la aceleración angular α es la derivada segunda del ángulo θ respecto al tiempo, vamos a expresar la ecuación de la dinámica de rotación en forma de ecuación diferencial:

$$\frac{d^2\theta}{dt^2} + \frac{mgd}{I} \cdot \text{sen}\theta = 0$$

Pero esta ecuación no corresponde a la de un movimiento armónico simple, por lo que tomaremos el caso de que en el péndulo sólo existan oscilaciones muy pequeñas de manera que el ángulo de oscilación sea tan pequeño que podamos aproximar el ángulo medido en radianes a su seno: $\text{sen}\theta \approx \theta$

De esta manera la ecuación será:

$$\frac{d^2\theta}{dt^2} + \frac{mgd}{I} \cdot \theta = 0$$

que ahora sí es una ecuación diferencial de segundo orden correspondiente a un movimiento armónico simple.

La frecuencia angular de este movimiento armónico simple es:

$$\omega = \sqrt{\frac{mgd}{I}}$$

Y su periodo de oscilación:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{I}{mgd}}$$

3. Péndulo de Charpy

El péndulo de Charpy guarda una estrecha relación con nuestro estudio, ya que la función que tiene este péndulo es la de hacer ensayos de impacto para determinar la tenacidad de distintos materiales, por tanto en ambos ensayos nos interesa recoger y procesar algunos tipos de datos similares o iguales, tales como la fuerza del impacto, la velocidad del péndulo o la posición del brazo pendular en el punto de partida, la cual determina la velocidad con la que impacta el propio brazo.

El péndulo de Charpy consiste en un brazo que gira alrededor de un eje como lo hace el péndulo compuesto, con la diferencia que en el extremo del brazo de longitud L se encuentra acoplada una masa M que es con la que se realiza el impacto. La masa se deja caer desde distintas alturas para conseguir distintas velocidades en el momento del impacto.

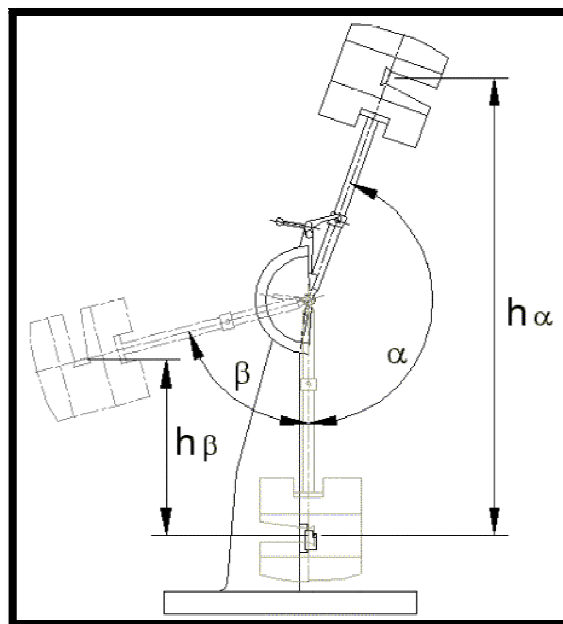


Figura 8. Péndulo Charpy

Como hemos dicho, el péndulo cae e impacta contra una probeta que se coloca bajo el punto de apoyo del péndulo, su posición de equilibrio. El material de la probeta es para el que se desee calcular su tenacidad.

En este tipo de ensayos, el objetivo es determinar la energía absorbida por la probeta, para determinar así la fragilidad o resistencia que opone un material a la rotura.

Para medir dicha energía, lo que se hace es comprobar la diferencia entre la altura inicial del péndulo y la altura final después del impacto, esto es, determinar la diferencia de energía potencial del péndulo antes y después del impacto. Por lo que una vez conocido el ángulo inicial de aplicación de la carga α y el ángulo final β al que se eleva el péndulo después de la rotura completa de la probeta, se puede calcular la energía absorbida mediante la expresión:

$$E_a = MgL(\cos\beta - \cos\alpha)$$

siendo g la aceleración de la gravedad.

4. Péndulo de torsión:

El péndulo de torsión es un dispositivo que consiste en un hilo o alambre de sección recta circular, el cual se encuentra suspendido verticalmente con su extremo superior sujeto a un punto fijo y en cuyo extremo inferior se le acopla un cuerpo de momento de inercia conocido o fácil de calcular, por ejemplo un cilindro.

Si al cuerpo que cuelga se le hace girar un determinado ángulo, éste comenzará a oscilar en un plano horizontal. El momento de torsión aplicado es directamente proporcional al desplazamiento angular.

$$\tau = -k \cdot \theta$$

Este tipo de péndulo guarda relación con la adaptación realizada al sistema mecánico cabeza-cuello que veremos en el capítulo correspondiente a la descripción de material utilizado. Decir que, al colocar un resorte alejado una distancia del eje de giro de una barra, para representar la constante de amortiguación que posee el cuello, la ecuación que sigue el sistema creado es la misma ecuación que la del péndulo de torsión.

II.4-.Sistemas de adquisición de datos

II.4.1-.Introducción a los sistemas de adquisición de datos

El proceso de adquisición de datos consiste en tomar muestras del mundo real (sistema analógico), para generar datos que puedan ser manipulados por un ordenador (sistema digital), esto es, tomar un conjunto de variables físicas, convertirlas en tensiones eléctricas y digitalizarlas de manera que se puedan procesar por una computadora.

Un sistema de adquisición de datos consta de varios elementos, entre los cuales debe de haber sensores, hardware de medida y una computadora con software programable. Al estar basados en un PC, aprovechan la potencia de procesamiento, la productividad, la visualización y la conectividad de éste. Para detallar mejor todos los componentes que forman el sistema, hemos recurrido a la documentación aportada en el libro del autor M. Pérez [5]

En general, un sistema de adquisición de datos presenta el diagrama de bloques que se muestra en la figura 9. En la mayoría de los casos la señal digital finalmente obtenida termina en un PC donde posteriormente se trabaja con ella.

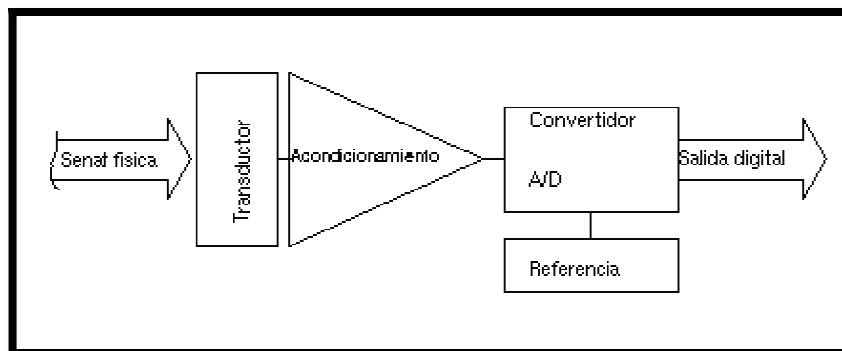


Figura 9. Diagrama de bloques de un sistema de adquisición de datos

Normalmente los sistemas de adquisición de datos constan de cinco elementos básicos:

- Sensores: los sensores son los elementos que se encargan de convertir un fenómeno físico en una magnitud eléctrica. También son denominados transductores.

- Acondicionador de señal: el acondicionador de señal lleva a cabo la tarea de amplificar las señales de bajo nivel, aislarlas y filtrarlas, para así tomar mediciones más precisas.
- Convertidor analógico/digital: este puede ser cualquier sistema de adquisición que sea capaz de convertir una señal analógica de entrada en una señal digital a su salida, realizando las funciones de cuantificación y codificación. En general suele ser una tarjeta de adquisición de datos.
- Sistema de tratamiento: suelen ser computadoras, donde se transforma la información digital que se recibe del convertidor, en información útil para el usuario.
- Sistema de visualización: será el software, y con él se puede interactuar con la información procesada.

Vamos ahora a describir más profundamente dos de estos elementos, los sensores y el convertidor analógico/digital (generalmente tarjetas de adquisición de datos), ya que algunos aspectos técnicos son de gran importancia, sobre todo a la hora de escoger el dispositivo más conveniente para realizar nuestro trabajo.

II.4.2- .Sensores para adquisición de datos

Los sensores, al igual que los transductores, son dispositivos capaces de transformar magnitudes físicas o químicas, llamadas variables de instrumentación, en magnitudes eléctricas. Las magnitudes físicas pueden ser, por ejemplo, la temperatura, la intensidad luminosa, la aceleración, etc. Y las magnitudes eléctricas que obtenemos pueden ser una resistencia eléctrica, una tensión eléctrica o una corriente eléctrica.

Conociendo su comportamiento estático y dinámico, podemos establecer características como linealidad, tiempo de respuesta, etc., que son precisas de valorar para poder seleccionar el tipo que mejor se adapte a unas necesidades específicas.



Figura 10. Sensores de diversos tipos.

Lo que diferencia un sensor de un transductor, es que el sensor está siempre en contacto con la variable a medir o controlar. El transductor, por otra parte, es un dispositivo capaz de transformar o convertir un determinado tipo de energía de entrada, en otra diferente de salida. El transductor obtiene información de entornos físicos y químicos, y los transforma en señales o impulsos eléctricos o viceversa. Estos elementos siempre consumen algo de energía, por lo que la señal medida resulta debilitada.

Algunos tipos de sensores y transductores:

- De posición: su función es medir o detectar la posición de un determinado objeto en el espacio.
- De temperatura: este tipo de sensores se utilizan para conocer la temperatura y su evolución de los lugares donde estén situados.
- De contacto: se trata de un interruptor que se activa o desactiva si se encuentra en contacto con un objeto, así determina la presencia de algún objeto en un determinado lugar. Son los sensores más simples.
- De ultrasonido: estos sensores emiten una señal de tipo ultrasónica, la cual es recibida por un receptor.
- De esfuerzos: su funcionamiento se basa en el empleo de galgas extensiométricas, que son unos dispositivos que al aplicarle una fuerza varía su resistencia eléctrica, y, calibrándolos de la forma correcta, podemos medir la fuerza aplicada sobre un determinado objeto.
- De movimiento: este tipo de sensores es uno de los más importantes en robótica. El sensor de movimiento nos da información sobre las evoluciones de las distintas partes del robot, para de esta manera poder controlarlo con un grado de precisión elevada. A su vez, dentro de los sensores de movimiento, podemos encontrar los siguientes tipos:
 - o De deslizamiento: indican al robot la fuerza con la que coger un objeto para que ni se rompa ni se caiga al agarrarlo.

- De velocidad: con este dispositivo podemos detectar la velocidad de un objeto, ya sea lineal o angular.
- De aceleración: al igual que con el de velocidad, podemos obtener la aceleración lineal y angular. Este valor es de gran importancia, ya que al experimentar un objeto una aceleración, se producirá una fuerza que pondrá al objeto en movimiento.

II.4.3- Tarjetas de adquisición de datos

Las tarjetas de adquisición de datos (TAD) son dispositivos que digitalizan las señales analógicas entrantes para que un PC pueda interpretarlas. Actúan como una interfaz entre el mundo real y el ordenador, y están conectadas a éste a través de ranuras de expansión o de otra clase de bus como que puede ser USB o Ethernet, aunque en la actualidad también se ha llegado a conectar de manera inalámbrica mediante Wi-Fi.

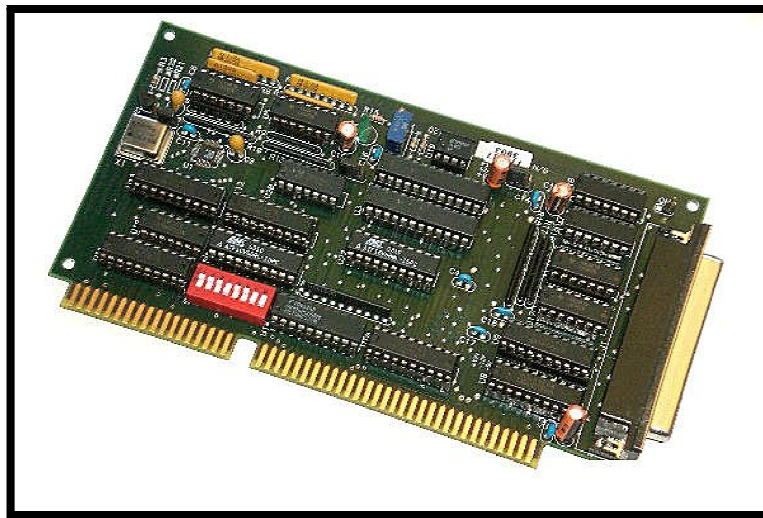


Figura 11. Tarjeta de adquisición de datos

Una tarjeta de adquisición simple consiste en un hardware de adquisición cuya única operación es la conversión de la señal analógica de entrada, en una señal digital de salida, la cual es enviada al ordenador sin realizar ningún procesamiento adicional.

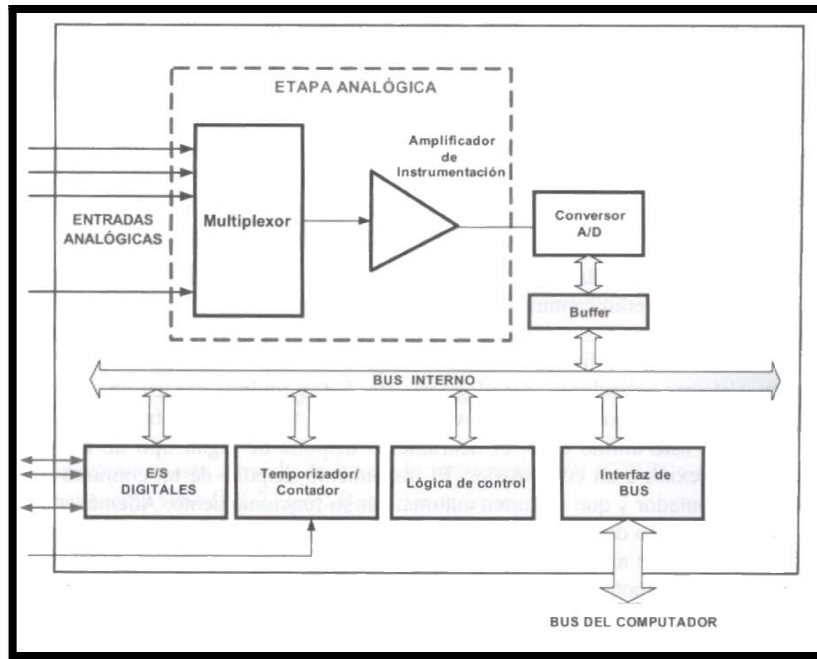


Figura 12. Esquema general de una tarjeta de adquisición de datos

Como podemos observar en la figura 12, una tarjeta de adquisición de datos se compone esencialmente de un multiplexor y un convertidor A/D.

El multiplexor es un circuito que permite seleccionar en cada momento que canal de entrada analógico es el que está conectado al convertidor A/D, de manera que el multiplexor da paso únicamente al canal analógico que queramos convertir, mediante canales de selección, así no hace falta disponer de un convertidor A/D para cada canal al que esté conectado un sensor.

El convertidor analógico-digital es un circuito que proporciona una salida en forma de palabra binaria, que corresponde a la cuantificación de la señal analógica de la entrada. Esta conversión se realiza mediante diversas técnicas, teniendo cada una características y campos de aplicación específicos. Entre estas técnicas podemos mencionar la conversión por contador, por aproximaciones sucesivas, o por transformación de voltaje a frecuencia entre otras.

Vamos ahora a estudiar algunas características fundamentales que se tienen en cuenta a la hora de seleccionar las tarjetas de adquisición de datos, para poder tener la certeza de que la adquisición se llevará a cabo de la manera más fiable y eficiente posible.

- Tipo de sistema operativo de la computadora y tipo de conector para la tarjeta: aunque estos aspectos pueden ser menos significativos, es importante conocer el sistema operativo con el que trabaje el ordenador por el tema de compatibilidad de hardware, así como el conector que nos hará falta a la hora de conectar la tarjeta con el PC.
- Número de entradas analógicas o digitales: este parámetro nos indica el número de canales disponibles en la tarjeta, de esta forma sabremos el máximo de entradas con el que podremos trabajar.

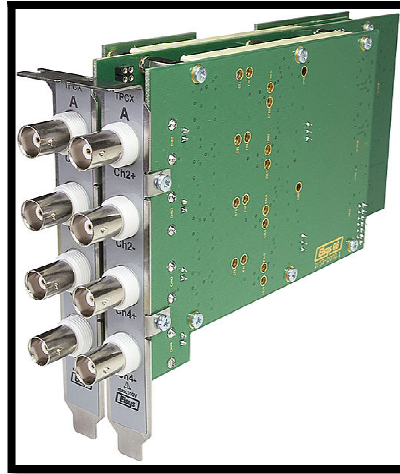


Figura 13. Canales disponibles en una TAD.

- Configuración de las entradas analógicas: las entradas de las tarjetas de adquisición de datos suelen soportar dos configuraciones básicas, entradas referidas a masa (single-ended inputs) y entradas en modo diferencial (diferencial inputs).
- Mecanismo de inicio de captura (triggering): si la tarjeta tiene o no la posibilidad de realizar la adquisición sincronizada con algún evento externo es una característica importante. Un ejemplo sería la captura de datos cuando una señal sobrepasa un valor determinado.
- Resolución: esto es el número de bits de resolución necesarios para que la adquisición de datos no se vea distorsionada.
- Frecuencia de muestreo de señales: esta característica se refiere al número de muestras necesarias a realizar para que la adquisición de datos sea representativa.

II.4.4- Filtros

La función que tienen los filtros en la adquisición de datos, es la de separar aquellas señales que no nos interesan de las que si queremos registrar, para ello, con los filtros, variamos las frecuencias de las señales de entrada para quedarnos únicamente con las que nos interesan.

Los filtros que vamos a describir son los eléctricos o electrónicos, ya que son los que se simulan en el software que utilizaremos para la adquisición de datos. Podemos encontrar prácticamente todas las características de éstos, y su funcionalidad, en dicho programa.

Por tanto nos vamos a ceñir a la definición propia de filtro eléctrico o electrónico, siendo éste un elemento que discrimina una determinada frecuencia o gama de frecuencias de una señal eléctrica que pasa a través de él, pudiendo modificar tanto su amplitud como su fase.

Estos filtros pueden clasificarse de diversas formas, dependiendo de a qué característica nos referimos. Pero la clasificación más importante que se puede realizar es la que hacemos atendiendo a sus componentes constitutivos, naturaleza de las señales que tratan, respuesta en frecuencia y método de diseño.

Según estos criterios, los filtros se clasifican en:

- Filtros pasa bajo: los filtros pasa bajo solo dejan pasar la parte baja de la frecuencia, desde frecuencia 0 o continua hasta una determinada.
- Filtros pasa alto: son aquellos que permiten el paso de frecuencias desde una determinada frecuencia de corte hacia arriba, sin que exista un límite superior especificado.
- Filtros pasa banda: estos filtros permiten el paso de componentes de frecuencia contenidos en un determinado rango de frecuencias, una de corte superior y otra de corte inferior.
- Filtros elimina banda: los filtros elimina bandas dificultan el paso de componentes de frecuencia contenidos en un determinado rango de frecuencias, comprendido entre una de corte superior y otra de corte inferior. Es igual que el filtro pasa banda, solo que, en lugar de dejar pasar el rango de frecuencias, las elimina.
- Filtros multibanda: es el que presenta varios rangos de frecuencias en los cuales hay un comportamiento diferente.

- Filtro variable: es aquel que puede cambiar sus márgenes de frecuencia.

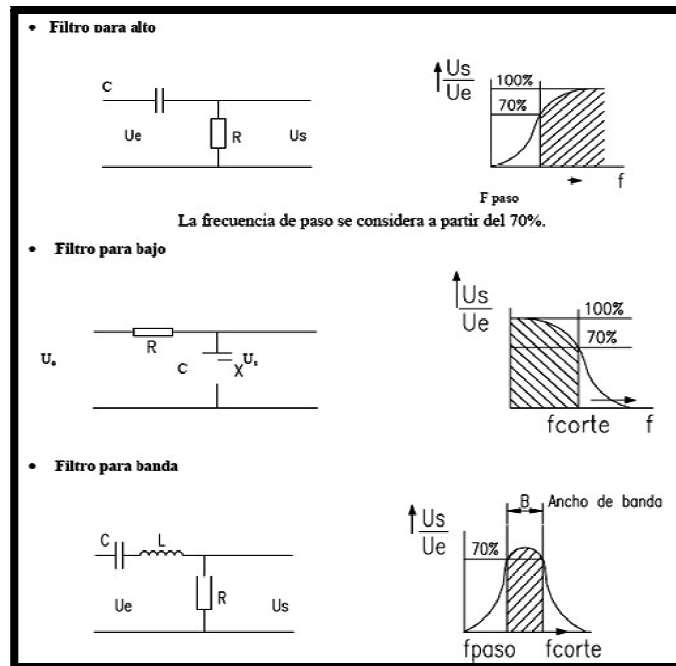


Figura 14. Esquemas representativos de los filtros pasa bajo, alto y banda.

Otra clasificación a tener en cuenta de los filtros es la que se realiza atendiendo al método de diseño, aquí los filtros se dividen en:

- Filtro de Butterworth: produce la respuesta más plana posible hasta la frecuencia de corte.
- Filtro de Chevyshev: tiene un corte agudo pero una banda de paso con ondulaciones.
- Filtros elípticos: produce oscilaciones en todas sus bandas, consiguiendo una zona de transición más abrupta.
- Filtro de Bessel: tiene una banda pasante plana y una banda eliminada monotónica.

II.5-.LabVIEW

II.5.1-.Introducción el entorno de programación de LabVIEW

Resulta de gran importancia la introducción a este software para comprender su entorno y método de programación, ya que con él vamos a llevar a cabo la adquisición y tratamiento de los datos, procedentes de los sensores, que queremos obtener en la realización de nuestro proyecto. Para ayudarnos a realizar la comprensión del programa, nos hemos apoyado en el libro de A. Manuel [2], y en el soporte web oficial [27].

El software LabVIEW (Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench) constituye un entorno de programación gráfica para el diseño de sistemas de adquisición de datos, instrumentación y control. Este programa brinda a científicos e ingenieros una integración con el hardware sin precedentes y amplia compatibilidad. El lenguaje que usa se llama lenguaje G, que quiere decir lenguaje gráfico. Está disponible para las plataformas Windows, UNIX, MAC y GNU/Linux.

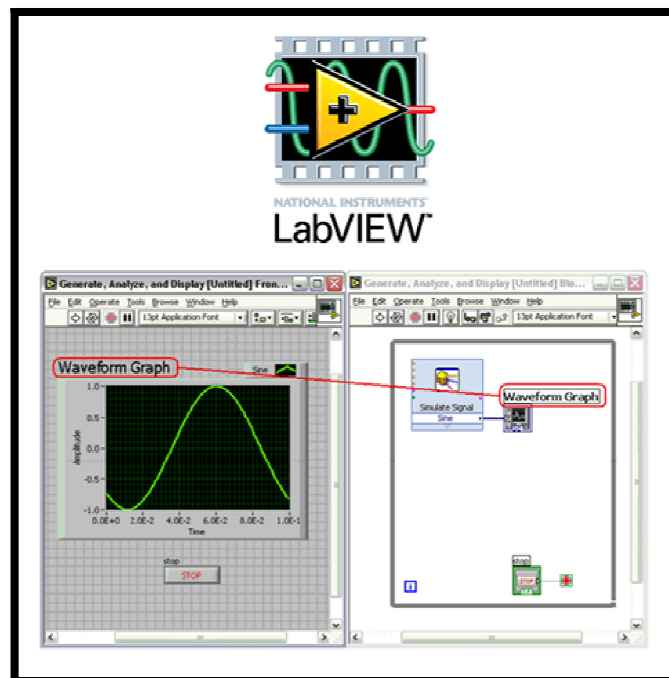


Figura 15. Entorno de LabVIEW

En LabVIEW el diseño lo puedes realizar especificando el sistema funcional que desees, así como el diagrama de bloques, o una notación de diseño de ingeniería. Es a la vez compatible con herramientas de desarrollo similares, y puede trabajar con programas de otra área de aplicación, como por ejemplo MATLAB. Otra parte positiva es que permite una fácil integración con hardware, específicamente con tarjetas de medición, adquisición y procesamiento de datos, algo que particularmente a nosotros nos interesa bastante.

Los programas que se realizan en LabVIEW se denominan instrumentos virtuales (“VI”), ya que su apariencia y operación imitan a los instrumentos físicos, como osciloscopios y multímetros. LabVIEW contiene una extensa variedad de herramientas para adquirir, analizar, visualizar y almacenar datos.

Al crear o abrir un programa, la interfaz que interactúa con el usuario se denomina panel frontal, y es la ventana con la que controlamos el programa realizado, en ella se sitúan las terminales interactivas de entrada y salida del VI, estas son las de control y las de indicación. Pero donde realmente se hace la programación es en el diagrama de bloques. En esta ventana se lleva a cabo la realización del código fuente de forma gráfica, mediante las distintas funciones, constantes, terminales, cables o subVIs. Podemos ver ambas ventanas en la figura 16.

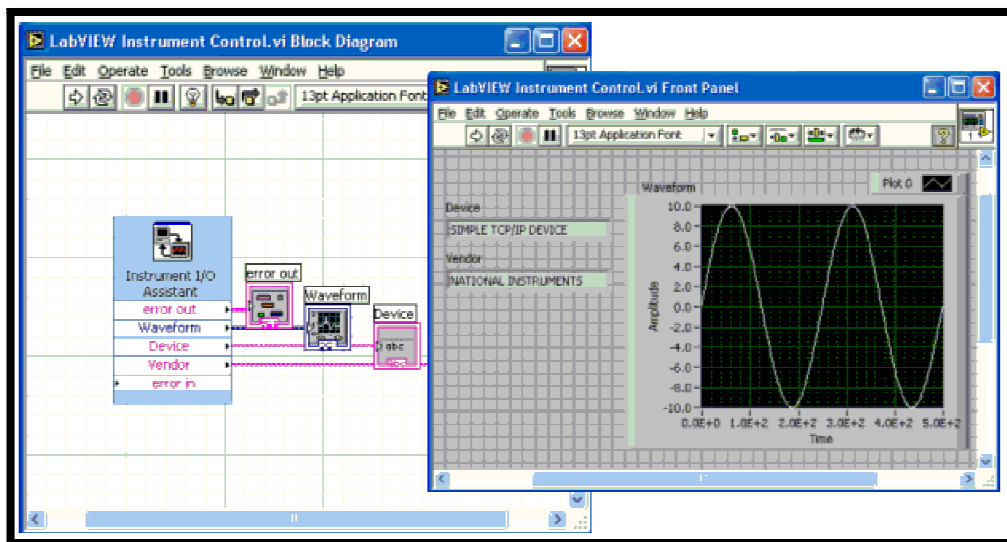


Figura 16. Diagrama de bloques (izquierda) y Panel frontal (derecha)

Colocando de manera óptima las distintas funciones de las que se dispone en la paleta de funciones del diagrama de bloques, lograremos realizar el código de un programa para que éste realice la misión que nosotros deseemos. Y para presentar en pantalla los tipos de datos que queremos

ver, en la paleta de controles disponemos de una amplia variedad de controles e indicadores.

Una vez realizado el código del programa y construido el VI, se debe proceder a su ejecución, de esta manera se llevará a cabo el mismo y se realizarán las operaciones que nosotros hayamos programado.

En el siguiente apartado vamos a profundizar en las funciones de más interés para nosotros en este proyecto, que son las funciones de adquisición y tratamiento de datos. Con ellas obtendremos los datos que queramos de los distintos sensores de los que disponemos y los trataremos para presentarlos en la forma correcta.

II.5.2-.Bloques de adquisición y tratamiento de datos

LabVIEW es un software de diseño de sistemas que acelera la productividad al automatizar distintas medidas de varios sensores. Con este programa se pueden conectar más de 200 dispositivos de adquisición de datos. Además, gracias a su gran flexibilidad, se puede personalizar la funcionalidad y visualización de los sistemas de medida.

Este programa posee una gran variedad de librerías con funciones básicas de programación, pero además cuenta con muchas otras más especializadas en campos concretos, con funciones matemáticas, de procesamiento de señales, de adquisición de datos o de comunicación de datos entre otras, habiendo librerías para casi todo tipo de aplicaciones.

Nos centraremos en las librerías con funciones de adquisición y tratamiento de señales que contiene este software de programación gráfica.

Las funciones de adquisición de datos las podemos encontrar fácilmente abriendo la paleta de funciones en el diagrama de bloques, en la subpaleta de adquisición de datos (“data acquisition”). Esta a su vez contiene seis subpaletas más que contienen diferentes tipos de Vis de adquisición de datos. Se clasifican de la siguiente manera:

- VIs para entradas analógica.
- VIs para salidas analógicas.
- VIs para entradas y salidas digitales.
- VIs con contadores
- VIs de configuración y calibración.
- VIs para condicionar la señal.

Además también podemos encontrar librerías para adquirir señales mediante distintos puertos, como por ejemplo vía GPIB para dispositivos externos de distinto fabricante, o por USB, PCI o PXI para dispositivos de National Instruments.

Pero sin lugar a dudas la función más usada y fácil de manejar es el DAQ Assistant. Lo podemos encontrar en la paleta de funciones, en la subpaleta Express como se observa en la figura 17.

Con esta función podemos controlar o medir entradas y salidas analógicas, entradas y salidas digitales y operaciones de conteo.

Además, podemos controlar la frecuencia de muestreo, el número de muestras o el rango de medidas que queremos tomar, así como la ganancia de la señal muestreada para amplificarla y poder ajustar mejor el rango de medida.

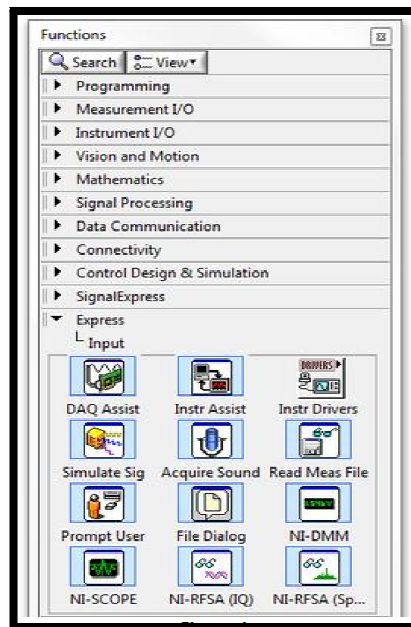


Figura 17. Paleta de funciones. Subpaleta Express

Al abrir esta función se inicia un asistente en el que primero debemos seleccionar el tipo de medida que queremos realizar, si es de adquisición o de control, a continuación se selecciona el tipo de señal, si es analógica o digital, y seguidamente escogeremos si la señal es de tensión, temperatura, de aceleración, a de algún otro tipo. En la siguiente etapa se configura el canal físico para el que creamos esta tarea. Y finalmente podemos ajustar especificaciones como la frecuencia de muestreo, los límites de entrada o el número de medidas a tomar. Podemos ver la apariencia de ésta última pantalla en la figura 18.

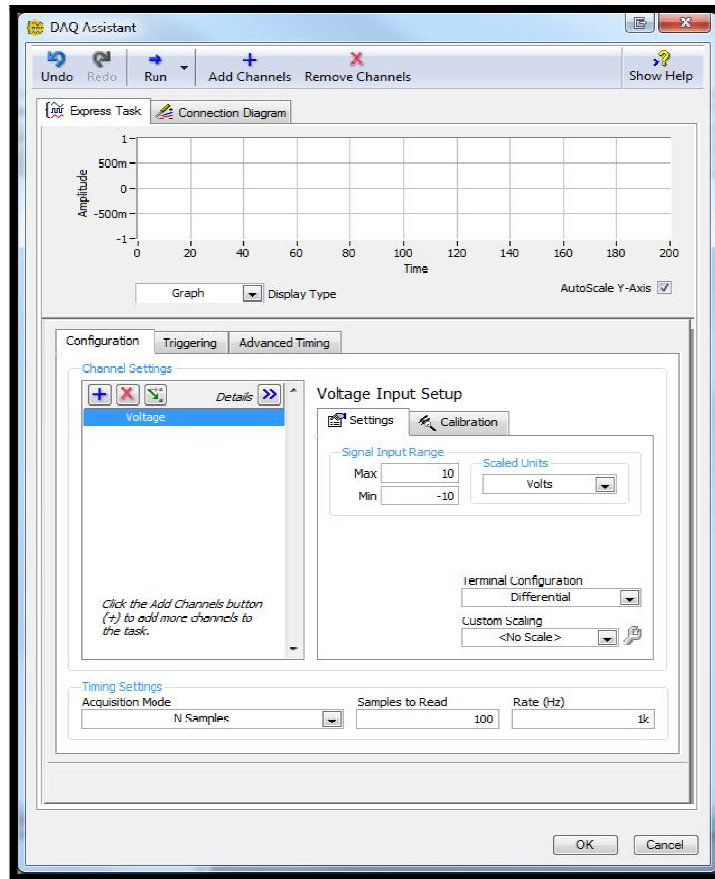


Figura 18. Pantalla de ajuste de variable para muestreo del DAQ Assistant

En cuanto al tratamiento y procesamiento de datos en el software LabVIEW, podemos encontrar una gran variedad de funciones con las que efectuar tareas tales como:

- Filtrar la señal: con esta operación lo que hacemos es intentar eliminar el ruido que acompaña a la señal que queremos obtener, para ello restringimos las frecuencias de entrada de la señal y dejamos que entren únicamente las deseadas.
- Escalado de la señal: se realiza para modificar la amplitud de la señal de entrada y que de esta manera quede definida en la escala que nosotros queramos.
- Obtener resultados estadísticos: con esta función podemos presentar en pantalla una gran variedad de valores estadísticos relativos a nuestra señal de entrada.

La mayoría de las funciones de procesamiento de señal las podemos encontrar en la subpaleta Signal Processing o Signal Analysis, pero hay otras muchas en diversas subpaletas como Express o File I/O.

En la figura 19 se muestra la subpaleta Signal Analysis en la que podemos ver algunas funciones de tratamiento y análisis de la señal.

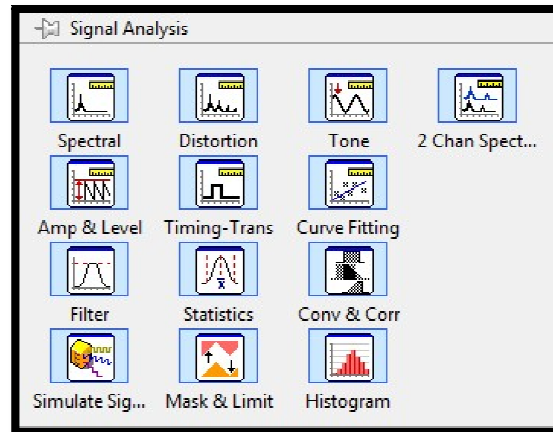


Figura 19. Subpaleta Signal Analysis.

II.6-.MATLAB

II.6.1-.Introducción a MATLAB y Simulink

La herramienta virtual de la que vamos a precisar en nuestro trabajo para llevar a cabo la simulación virtual del estudio es el software matemático MATLAB, acrónimo de MATrix LABoratory (laboratorio de matrices). En este caso, también nos apoyaremos en el soporte web oficial [26] para comprenderlo y explicarlo de una forma más apropiada.

Esta herramienta tiene un lenguaje de programación de alto nivel, que posee un lenguaje propio (lenguaje M), con un entorno interactivo para el desarrollo de algoritmos, visualización y análisis de datos, cálculo numérico, etc. El software, permite la gestión del código en forma de funciones y archivos que estructuran y agilizan la tarea de programación.

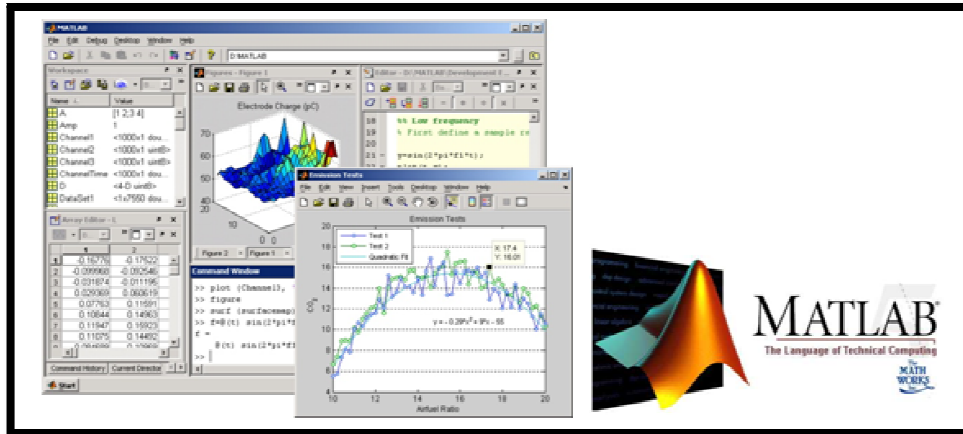


Figura 20. Entorno de MATLAB

Algunas de las funcionalidades que podemos nombrar son, por ejemplo, la inclusión de herramientas interactivas para exploración, diseño y resolución de problemas iterativos, funciones matemáticas para algebra lineal, estadística, optimización e integración numérica, funciones graficas bidimensionales y tridimensionales para, por ejemplo, visualizar los datos, creación de interfaces de usuario, etc. Además, el programa está disponible para las plataformas Unix, Windows y Apple Mac y permite la comunicación con otros dispositivos hardware y con programas en otros lenguajes.

MATLAB incorpora también unos grupos de funciones para aplicaciones específicas llamadas toolboxes, con las cuales podemos solucionar problemas particulares de alguna materia en concreto. Estas toolboxes incluyen funciones con las que podemos adquirir y analizar datos, herramientas para conectar el programa con dispositivos externos, etc.

Para nuestro caso particular nos centraremos en el manejo de una toolbox en concreto, ya que es la que contiene las funciones y herramientas necesarias para resolver nuestro problema, esta toolbox se llama Simulink.

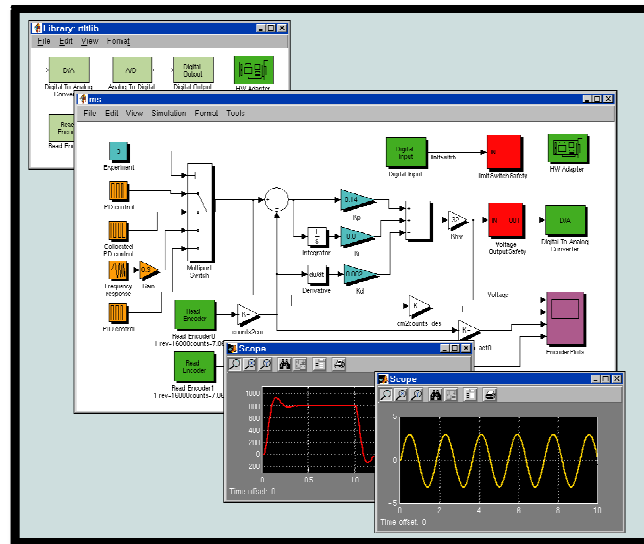


Figura 21. Entorno de Simulink

Simulink es una aplicación que permite construir y simular modelos físicos y sistemas de control mediante diagramas de bloques. Es un entorno para la simulación y el diseño basado en modelos para sistemas dinámicos y embebidos. El comportamiento de dichos sistemas se define mediante funciones de transferencia, operaciones matemáticas, elementos de MATLAB y señales predefinidas de todo tipo. Simulink presenta un entorno gráfico interactivo y un conjunto personalizable de bibliotecas de bloques con las que simular, implementar y probar una serie de sistemas variables con el tiempo, incluido comunicaciones, controles y procesamiento de señales, video e imagen.

Esta toolbox está integrada con MATLAB y ofrece acceso inmediato a una amplia gama de herramientas que permiten desarrollar algoritmos, analizar y visualizar simulaciones, crear series de procesamiento de lotes, personalizar el entorno de modelaje y definir señales, parámetros y datos de prueba. Por nombrar alguna de las muchas funciones principales que tiene Simulink, diremos que posee herramientas de análisis de modelos y diagnosis para garantizar la coherencia de los modelos e identificar errores de modelaje.

A su vez, Simulink se divide en bloques que poseen funciones específicas para distintas aplicaciones, como aeroespaciales, comunicaciones, mecánicas, radiofrecuencia, etc.

El bloque que nos interesa a nosotros para llevar a cabo el desarrollo del trabajo se llama SimMechanics.

SimMechanics nos proporciona un entorno de simulación en 3D para los sistemas mecánicos, como los robots, las suspensiones de vehículos, equipos de construcción, etc. La modelación de los sistemas se lleva a cabo mediante bloques que representan las partes de los mismos, como los cuerpos, las articulaciones o los elementos de fuerza, a los que SimMechanics les formula y, posteriormente, les resuelve las ecuaciones de movimiento para el sistema mecánico completo.

Además, podemos importar modelos de sistemas CAD, incluyendo en ellos incluso parámetros como la masa, la inercia, la geometría o la restricción de las articulaciones.

A continuación se describe cómo llevar a cabo la elaboración de sistemas mecánicos con las herramientas y funciones que nos proporciona SimMechanics.

II.6.2- Programación con SimMechanics

El software de SimMechanics se organiza en un conjunto de bibliotecas de bloques estrechamente relacionados. En total son seis el número de librerías, a partir de las cuales podemos definir todos los elementos de un modelo mecánico. Las representamos en la figura 22.

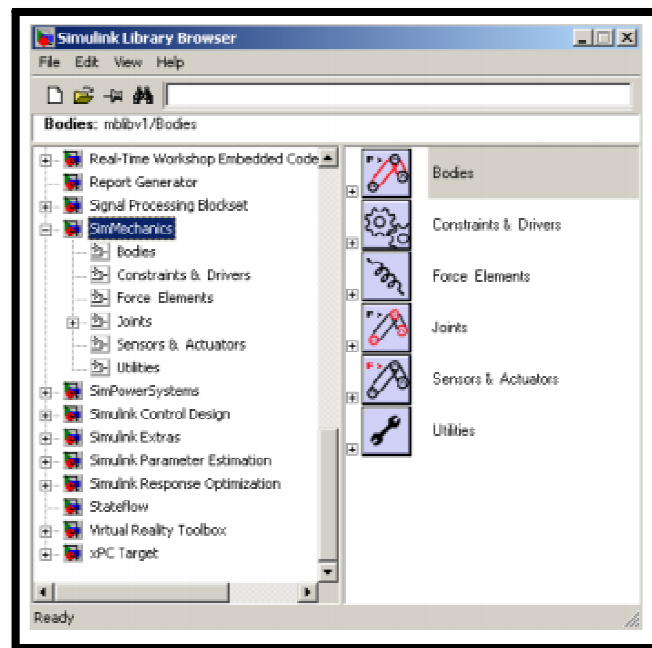


Figura 22. Bibliotecas de bloques en SimMechanics

- Cuerpos (“Bodies”): aquí se encuentran los bloques básicos para modelar un cuerpo rígido, incluyendo en ellos los valores de su geometría, la inercia y las propiedades básicas. Existen dos tipos de cuerpos, el primero es “Ground”, el cual representa un cuerpo de masa infinita en el espacio y hace de referencia para las articulaciones y cuerpos en movimiento. El segundo tipo es “Body”, que representa un cuerpo rígido mediante sus propiedades y su configuración en el espacio.
- Limitadores y manejadores (“Constraints & Drivers”): esta biblioteca proporciona bloques para restringir el movimiento relativo entre dos cuerpos. Esto se hace para mantener una distancia específica o un ángulo específico entre ellos.
- Elementos de fuerza (“Force elements”): la biblioteca de elementos de fuerza modelan un amortiguador y un muelle entre dos cuerpos, determinando parámetros tales como la longitud natural del muelle o la constante de rigidez o amortiguamiento.
- Articulaciones (“Joints”): las articulaciones representan los grados de libertad que un cuerpo puede tener con respecto a otro. En esta biblioteca se muestran una gran variedad de articulaciones posibles entre dos cuerpos.
- Sensores y actuadores (“Sensors & Actuators”): los sensores son bloques que permiten monitorizar y medir el movimiento y la fuerza o par sobre un cuerpo o articulación, y los actuadores permiten suministrar movimientos, fuerzas o pares a los cuerpos y articulaciones.
- Utilidades (“Utilities”): la librería de utilidades contiene bloques extra para la creación de subsistemas y para la utilización de la realidad virtual.

Los bloques que contienen cada una de estas librerías se arrastran hasta la ventana del editor de SimMechanics, previamente abierta, y se colocan en la disposición que queramos, conectándolos entre sí a sus puertos de entrada y salida, como muestra la figura x.

Para llevar a cabo el proceso de modelización de un sistema mecánico, primeramente hay que crear un modelo idealizado a partir del sistema real, con el mayor número de simplificaciones posibles. En segundo lugar se tiene que identificar los componentes básicos que constituyen el modelo, como los cuerpos, las uniones, los grados de libertad, etc. Y, por último, se definen las coordenadas naturales y relativas de los cuerpos y los grados de libertad, para así definir completamente la posición del sistema.

III. Material y métodos

III.1 -.Introducción

El capítulo en el que nos encontramos definimos los elementos con los que vamos a llevar a cabo el proyecto, así como las propiedades, características y peculiaridades de los mismos. Detallaremos tanto la parte experimental como la virtual, en la que realizamos las simulaciones virtuales de los ensayos desarrollados experimentalmente.

Comenzamos definiendo los materiales utilizados en la fase experimental en primer lugar, seguidamente el proceso de adquisición de datos que aplicamos, y a continuación detallamos el método de realización de los ensayos experimentales. Por último definimos el apartado de simulaciones, en el que detallaremos los modelos realizados en el software, así como la simulación de los impactos y el método utilizado para llevar a cabo las mismas.

III.2 -.Instrumentación y material utilizado

En los siguientes apartados vamos a explicar cada uno de los instrumentos que utilizamos en la realización de la parte experimental de nuestro proyecto, detallando las características más importantes de cada uno de ellos, así como las peculiaridades de los mismos o algún otro rasgo que creamos que sea de importancia su aclaración.

III.2.1 -.Acelerómetro 352C03 PCB Piezotronics

Este primer sensor de aceleración que describimos y del que disponemos en el laboratorio para llevar a cabo las mediciones de aceleración, es un acelerómetro de tipo cerámico cuyo funcionamiento está basado en la compresión de elementos piezocerámicos por una masa, la cual está sujeta a un muelle por su cara opuesta, todo dentro de un compartimento de titanio cerrado herméticamente. Cuando el sensor se ve sometido a vibración, el

elemento piezocerámico se ve sometido a una fuerza de compresión variable, que es proporcional a la aceleración de la masa. Debido al efecto piezocerámico, se desarrolla un potencial variable que es proporcional a la aceleración.

A continuación mostramos en la figura 23 la apariencia del acelerómetro correspondiente al modelo 352C03 PCB de Piezotronics.



Figura 23. Acelerómetro 352C03 PCB de Piezotronics

Características del sensor de aceleración disponible en el laboratorio:

Tabla 2. Características del acelerómetro 352C03 PCB de Piezotronics

Acelerómetro 352C03 PCB Piezotronics	
Sensibilidad	1.02 mV/(m/s ²)
Rango de medida	± 4900 m/s ² pk
Rango de frecuencias	0.5 – 10 000 Hz (±5%)
	0.3 – 15 000 Hz (±10%)
No linealidad	≤ 1%
Intensidad constante de excitación	1 – 20 mA
Impedancia de salida	≤ 100 Ω
Elemento sensor	Cerámica
Material de la carcasa	Titanio
Sellado	Hermético
Conector eléctrico	10 – 32 Coaxial, hembra
Frecuencia de resonancia	≥ 50 kHz

Cabe destacar el primer parámetro de características de este sensor, la sensibilidad, en donde se nos proporciona a su vez el valor de proporcionalidad entre la tensión medida con la aceleración sufrida. En primera instancia el acelerómetro nos dará unos valores de tensión eléctrica, y si lo que queremos es obtener los valores de aceleración del mismo, debemos tener en cuenta esta constante de proporcionalidad, que relaciona el voltaje, en milivoltios, y la aceleración, en m/s^2 . A pesar de que en la hoja de características de este acelerómetro venga reflejada una constante de proporcionalidad de 1.02, es decir, que cada valor de 1.02 milivoltios que obtengamos del sensor equivaldrá a $1 m/s^2$, tendremos más en cuenta el valor que nos proporciona el certificado de calibración de este sensor en concreto, el cual es suministrado por el fabricante del mismo. Por lo tanto, a la hora de realizar la conversión de mili voltios a valores de aceleración, la constante de proporcionalidad a la que nos ceñiremos es de 1.03, lo cual significa que cada milivoltio registrado equivale a una aceleración de $0.971 m/s^2$. Este factor lo tenemos en cuenta a la hora de realizar la toma de datos, como se detalla en el capítulo correspondiente.

III.2.2-.Sensor de fuerza 200B04 PCB de Piezotronics

Como ya sabemos, en nuestro proyecto queremos obtener un valor de fuerza en el impacto entre las barras y el sistema mecánico cabeza-cuello en la parte experimental del proyecto, y para ello vamos a utilizar un sensor de fuerza que hay disponible en el laboratorio, el cual nos dará unos valores en Newton, que corresponderá a la fuerza aplicada sobre la cabeza en el impacto.

Este tipo de sensores de fuerza basa su funcionamiento en unos cristales de cuarzo que llevan en su interior, dentro de un pequeño compartimento de acero inoxidable con sellado hermético. De esta manera, cuando se le aplica algún tipo de fuerza o presión al sensor, los cristales de cuarzo generan una carga electrostática proporcional a la carga aplicada, la cual es recogida por unos electrodos intercalados entre los cristales de cuarzo, y que puede conducirse hacia un amplificador externo o convertirse en una señal de impedancia de baja tensión dentro del sensor.

En la siguiente figura se puede apreciar la apariencia del sensor de fuerza disponible en el laboratorio correspondiente al modelo 200B04 PCB de Piezotronics.



Figura 24. Sensor de fuerza 200B04 PCB de Piezotronics

Exponemos a continuación en la tabla 3 las características asociadas al sensor de fuerza con el que vamos a trabajar:

Tabla 3. Características del sensor de fuerza 200B04 PCB Piezotronics

Sensor de Fuerza 200B04 PCB Piezotronics	
Sensibilidad	1.124 mV / N
Rango de medida (Compresión)	0 – 4448 kN
Máxima fuerza estática (Compresión)	22.24 kN
Frecuencia baja de respuesta	0.0003 Hz (-5%)
Límite superior de frecuencia	75 kHz
No linealidad	≤ 1%
Intensidad constante de excitación	2 – 20 mA
Impedancia de salida	≤ 100 Ω
Elemento sensor	Cuarzo
Material de la carcasa	Acero Inoxidable
Sellado	Hermético
Conector eléctrico	10 – 32 Coaxial, hembra

Como ya hemos hecho con el anterior sensor, hacemos referencia a la constante de proporcionalidad que relaciona el voltaje, en mili voltios, con la fuerza, medida en Newton. De nuevo el valor proporcionado por el certificado de calibración de este sensor en concreto difiere en pequeña medida del valor que nos suministra la hoja de características de este modelo de sensores, que podemos apreciar en la tabla. Por lo tanto, teniendo en cuenta el valor que viene reflejado en el certificado de calibración, a la hora de hacer la conversión de voltaje a fuerza, por cada 1.154 milivoltios que obtengamos en la salida del sensor, supondrá que se le está aplicando el valor de 1 Newton de fuerza.

III.2.3 - Acondicionador de señales 482C05 PCB Piezotronics

Este instrumento se hace bastante necesario, puesto que los sensores necesitan un sistema capaz de acondicionar la señal antes de que sea registrada por un sistema de adquisición de datos.

El acondicionamiento de la señal previo a la adquisición de los datos supone la linealización de la señal, el filtrado de la misma, la amplificación de la salida eléctrica y, en general, mejorar la señal de entrada de forma que su posterior lectura sea más eficiente.



Figura 25. Acondicionador de señal

Características principales del acondicionador de señal que hay disponible en el laboratorio:

Tabla 4. Características acondicionador de señal

Acondicionador de señal 482C05 PCB Piezotronics	
Canales	4
Ganancia de tensión	1:1 ($\pm 1\%$)
Rango de salida	± 10 V
Impedancia de salida	50 Ω

III.2.4- Tarjeta de adquisición de datos NI USB-6251 Screw Term

La adquisición de datos o adquisición de señales, como ya hemos explicado en la revisión bibliográfica, consiste en la toma de muestras del mundo real (sistema analógico) para generar datos que puedan ser manipulados por un ordenador u otras electrónicas (sistema digital). Su función es la de tomar un conjunto de señales físicas, las del acelerómetro en este caso, convertirlas en tensiones eléctricas y digitalizarlas de manera que se puedan procesar en una computadora.

En nuestro caso utilizaremos el modelo que tenemos a disposición en el laboratorio, el cual es un dispositivo DAQ multifunción USB de alta velocidad de la Serie M optimizado para una precisión superior a velocidades de muestreo muy altas.

Está diseñado específicamente para aplicaciones móviles o con restricciones de espacio. La instalación plug-and-play minimiza el tiempo de configuración y montaje mientras que la conectividad directa con terminal de tornillo simplifica las conexiones de señal.



Figura 26. Tarjeta de adquisición de datos

Las principales características de la tarjeta de adquisición de datos de la que disponemos son:

Tabla 5. Características de la tarjeta de adquisición de datos

Tarjeta de Adquisición de Datos NI USB-6251 Screw Term		
Entrada Analógica	Canales	16
	Resolución	16 bits
	Frecuencia de muestreo	1.25 MS/s
	Rango de tensión máximo	-10 V – 10 V
	Rango de tensión mínimo	-100 mV – 100 mV
Salida Analógica	Canales	2
	Resolución	16 bits
	Frecuencia de actualización	2,86 MS/s
	Rango de tensión máximo	-10 V – 10 V
	Rango de tensión mínimo	-5 V – 5 V
Entrada/Salida Digital	Canales bidireccionales	24
	Máxima velocidad del reloj	1 MHz
	Sincronización	Hardware, Software
Entrada/Salida Digital	Rango de E/S	0 V – 5 V

III.2.5.-Mesa de ensayos fabricación UAL

En sustitución de un brazo robot, lo que hemos hecho ha sido utilizar una serie de barras de distintas propiedades físicas a forma de péndulo, con las cuales realizamos el impacto contra el mecanismo que representa una cabeza humana, explicado en el siguiente apartado. Para proporcionarle a estas barras una determinada aceleración, de forma que tuvieran una velocidad en el momento del impacto, las hemos utilizado, como hemos dicho, en forma de péndulo, con lo que dependiendo de la altura desde la que soltemos la barra, es decir, el ángulo de apertura respecto a la posición de equilibrio, estas tendrán una velocidad determinada en el momento del choque contra el otro mecanismo.

Las barras que utilizamos en forma de péndulo deben de tener un punto sobre el que oscilar, un punto de apoyo en el cual descansa su peso mientras gira, por lo que hemos utilizado una mesa de ensayos, fabricada en la Universidad de Almería, en la que poder acoplar las barras, de forma que sea lo suficientemente estable como para que en el momento de los impactos no se desestabilice la estructura y consecuentemente no nos haga tomar unos datos erróneos.

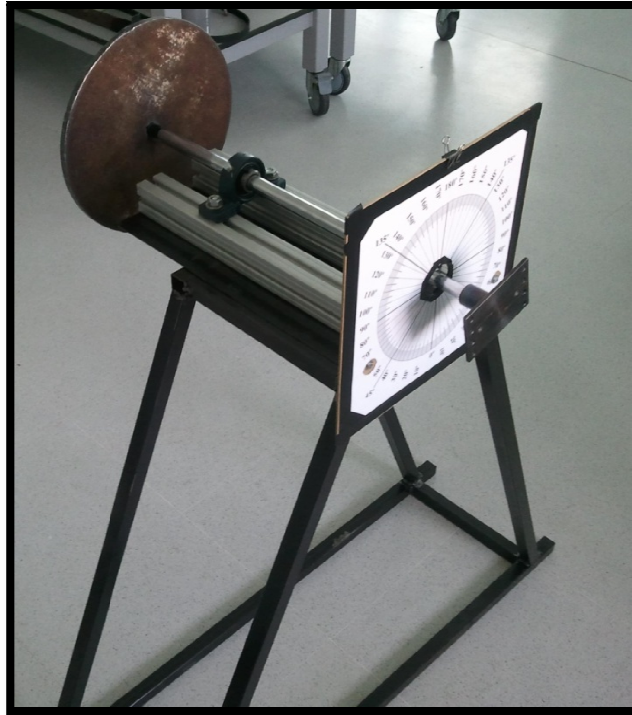


Figura 27. Mesa de ensayos.



Figura 28. Mesa de ensayos.

Como podemos ver en las anteriores figuras, tenemos una estructura sobre la que se sitúa la mesa. A su vez, la mesa posee dos rodamientos dentro de

los cuales va ensamblado un eje sobre el que se acoplan las barras. Los rodamientos están fijados a dos barras con un perfil cuyas características permiten acoplar, mediante un determinado tipo de tornillos, piezas o elementos sin necesidad de practicarle agujeros a las mismas. Las barras, además, están atornilladas a la estructura de la mesa de ensayos, de forma que todas las partes quedan bien fijadas entre sí.

A esta mesa de ensayos le hemos añadido una regla graduada para poder medir los ángulos a partir de los cuales soltaremos las barras, lo cual nos dará una determinada velocidad en el impacto en función del ángulo de partida, como hemos comentado.

Para acoplar las barras que van a representar el brazo mecánico al eje hemos utilizado una pieza mecanizada. La pieza va ensamblada al eje y fijada mediante una chaveta para que sea completamente solidaria durante el movimiento al mismo. Esta posee una serie de agujeros en distintas posiciones, ya que tenemos barras de distintas dimensiones y, de esta manera, podemos atornillarlos en la disposición que mejor nos convenga.

En el otro extremo del eje hemos acoplado un último elemento, el cual se va a encargar de proporcionar al sistema una inercia que represente la que tiene un rotor junto con la reductora. Se trata de un volante de inercia, con las dimensiones apropiadas para que suministre al sistema la inercia del conjunto rotor-reductora. Hemos puesto concretamente este disco tan voluminoso porque debe de representar la inercia que tendría un rotor con las características necesarias para poder mover el tipo de barras que estamos usando. Aunque parezca que el motor debería de ser de unas grandes dimensiones, debido a que el disco es bastante voluminoso, esto no es así, ya que la inercia que tiene un rotor no es muy elevada, pero sí se multiplica en el caso de que esté conectado junto a una reductora, cuya situación es la que queremos representar.

Otro detalle a comentar, son unos agujeros que tiene la estructura en la parte inferior de la misma, concretamente en las dos barras horizontales que están en contacto con el suelo, los cuales nos ayudan a fijar el sistema mecánico cabeza-cuello a la mesa de ensayos, de manera que ambos sistemas queden perfectamente conectados, ya que durante los impactos pueden producirse desplazamientos de un cuerpo con respecto al otro y los ensayos en este caso no serían válidos.

Para finalizar este apartado, en la tabla 6 mostramos algunas de las características más importantes de los elementos que componen la mesa de ensayos fabricada por la Universidad de Almería, principalmente las que

hemos tenido en cuenta a la hora de hacer las simulaciones en SimMechanics.

Tabla 6. Características de los elementos de la mesa de ensayos.

	Eje	Disco de Inercia
Características:		
Masa (kg)	1.42	5.55
L (m)	0.577	0.01
Ø (cm)	2	30
I _z (kg·m ²)	0.00007115	0.06242
Rigidez a la torsión (N·m/rad)	2.396·10 ³	-----

III.2.6-.Sistema mecánico cabeza-cuello humana fabricación UAL

A la hora de representar la cabeza y el cuello de una persona necesitábamos un mecanismo que se adaptase mecánicamente a las características que posee el cuello de una persona, sobre todo en cuanto a su constante de rigidez se refiere, así como la inercia de la cabeza respecto al cuello y la rigidez de los huesos del cráneo. Este último parámetro, el de la rigidez del cráneo, ha quedado representado mediante un disco de acero, lo cual nos da un gran sobredimensionado, pero que no es de mayor importancia puesto que lo que se busca en la realización de este proyecto es cuantificar la relación de las fuerzas aplicadas sobre la cabeza y la aceleración sufrida por esta, con distintos parámetros relacionados con la barra que impacta.

Sin embargo, el parámetro referido al momento de inercia de la cabeza respecto al cuello si merece más atención, ya que las aceleraciones que se produzcan en la representada cabeza durante los impactos dependerán del valor de este momento de inercia. Por ello, tenemos que colocar el centro de gravedad de este disco de acero, que emula el cráneo humano, a una distancia determinada del eje de giro de la barra que representa el cuello, para que coincidan los valores del momento de inercia de la cabeza con respecto al eje de giro de la barra, con los que tomamos como referencia. Obtenemos los datos necesarios para este cálculo del estudio realizado por Martin Simoneau [20]. Calculamos el momento mencionado, que nos proporciona un valor de $I_{\text{cabeza}} = 0,0683 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$. Si conocemos el momento de inercia que queremos obtener, respecto al eje de giro de la barra, y calculando el momento de inercia respecto al centro de gravedad del disco, a partir de su masa ($m=2.3 \text{ kg}$), y de su radio ($r=0.0975 \text{ m}$), cuyo resultado es

$I_{cdgdisco} = 5,466 \cdot 10^{-3}$, resulta sencillo calcular la distancia a la que habrá que colocar el centro de gravedad del disco de acero a partir de la ecuación de Steiner:

$$I_{cabeza} = I_{cdgdisco} + m \cdot d^2$$

Obtenemos finalmente una distancia de $d = 0,165 \text{ m}$.

En las siguientes figuras se muestra el dispositivo mecánico que representa el cuello y la cabeza humana. En primer lugar vemos la base sobre la que se montan los distintos componentes del sistema, entre los cuales se encuentran la barra, que representa el cuello humano, el disco de acero donde se producen los impactos y que representa la cabeza humana, el muelle que, gracias a su constante elástica objeto de estudio posterior, nos proporciona en el sistema una constante de rigidez representativa de un cuello humano, debido a que está instalado a una distancia del eje de giro óptima, la cual calculamos un poco más adelante en este apartado y detallamos con más claridad. En la figura 31 también podemos apreciar una de las coberturas que son objeto de estudio, colocada justamente en el punto donde se produce el impacto entre la barra, representativa del brazo robot, y el disco de acero, que simboliza a la cabeza humana. Además podemos ver el mencionado disco de acero, cuya función es la descrita, y que está colocado también a la distancia calculada.

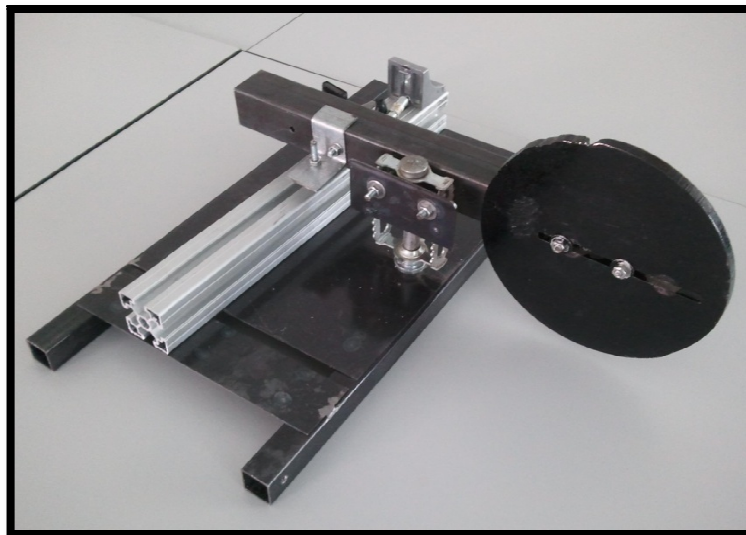


Figura 29. Sistema mecánico cabeza-cuello.

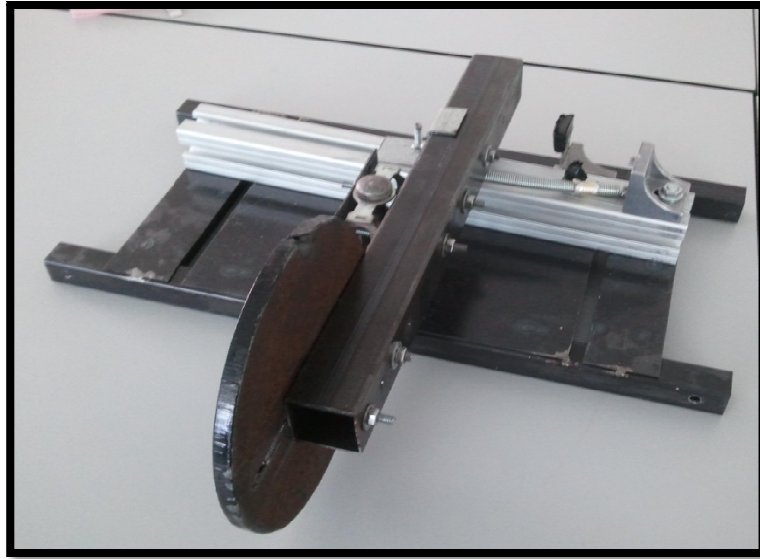


Figura 30. Sistema mecánico cabeza-cuello.

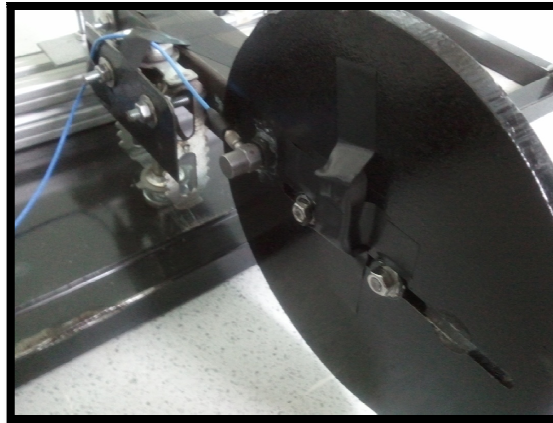


Figura 31. Sistema mecánico cabeza-cuello con cobertura.

Como hemos comentado, para representar la rigidez del cuello en la experimentación, ya que queremos acercarnos en la medida de lo posible a la realidad, hemos decidido acoplar uno resortes que simule la rigidez de éste. Se trata de un muelle cuya longitud es de 144,96 mm, medida obtenida a partir de la media de dos medidas realizadas.

De este resorte en principio no conocíamos el valor de su constante elástica, por lo que hemos tenido que obtenerlo de forma experimental, ya que sin conocer el valor de esta propiedad del muelle, no podíamos saber la distancia a la cual había que colocar el mismo para obtener en el sistema mecánico las características propias de un cuello humano. Para ello hemos realizado un ensayo de caracterización del resorte, el cual lo hemos repetido para verificar que no se han cometido grandes errores, aunque siempre habrá una pequeña variación en los experimentos, ya que se trabaja con unidades

de medida muy pequeñas y las herramientas y el ojo humano cometen algunos errores.

Esta prueba, que se hace para obtener la constante elástica de un muelle, consiste en colocar el muelle vertical u horizontalmente, de manera que podamos sujetarlo de uno de sus extremos, y por el otro podamos aplicarle una carga, de tracción en este caso, que tendremos que medir. Además también hay que tomar nota del incremento de longitud que experimenta el resorte para cada incremento de fuerza que se le aplica. Una vez anotados todos estos valores, empezando por la longitud inicial del resorte cuando no se le aplica fuerza alguna, los representamos en una gráfica, en cuyo eje de abscisas se representan los valores de longitud, y en el de ordenadas los valores de fuerza. Con todos los puntos dibujados, obtendremos una recta de regresión, cuya pendiente nos va a indicar el parámetro que queremos obtener, la constante elástica del muelle.

En nuestro caso particular, la instrumentación con la que hemos llevado a cabo las mediciones de los parámetros de fuerza y longitud ha sido la siguiente:

- **Calibre digital:** en el laboratorio disponemos de un calibre digital con el que podemos realizar medidas de dimensiones muy pequeñas. La sensibilidad de nuestro calibre es de una centésima de milímetro, y gracias a la pantalla que llevan incorporadas los calibres digitales, podemos tomar las medidas más rápidamente y no tener que estar fijándonos en la escala graduada.
- **Dinamómetro digital:** también disponíamos para este ensayo de un dinamómetro digital con el que poder medir las cargas más fácil y rápidamente, además con este instrumento también es más sencillo aplicar dichas cargas gracias a un mosquetón de gran tamaño y resistencia. El dinamómetro con el que se han medido las cargas tiene un rango de medida de 0-20 kg, y una precisión de una centésima de kilogramo. La apariencia de este tipo de dinamómetro queda reflejada en la figura 32.



Figura 32. Dinamómetro digital.

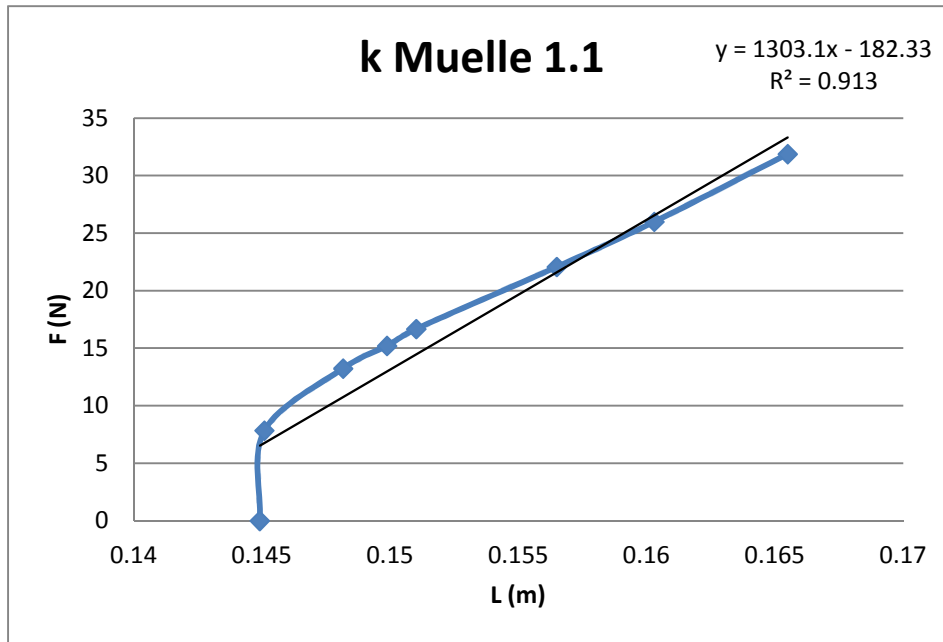
Exponemos ahora los datos obtenidos en los dos ensayos, así como el valor final de la constante de rigidez:

➤ **Ensayo 1:**

$L_0 = 144,92 \text{ mm}$

Long. (mm)	Long. (m)	Fuerza (kg)	Fuerza (N)
144.92	0.14492	0	0
145.1	0.1451	0.8	7.848
148.17	0.14817	1.35	13.2435
149.88	0.14988	1.55	15.2055
151.02	0.15102	1.7	16.677
156.5	0.1565	2.25	22.0725
160.3	0.1603	2.65	25.9965
165.5	0.1655	3.25	31.8825

A partir de los datos de longitud en metros y de fuerza en Newton obtenemos la siguiente gráfica, en la que hemos expuesto en la esquina superior derecha tanto la ecuación de la recta como el valor del coeficiente de determinación R^2 , que mide la bondad del ajuste realizado, y que cuanto más se acerque a la unidad significa que mejor se ha hecho el ajuste.

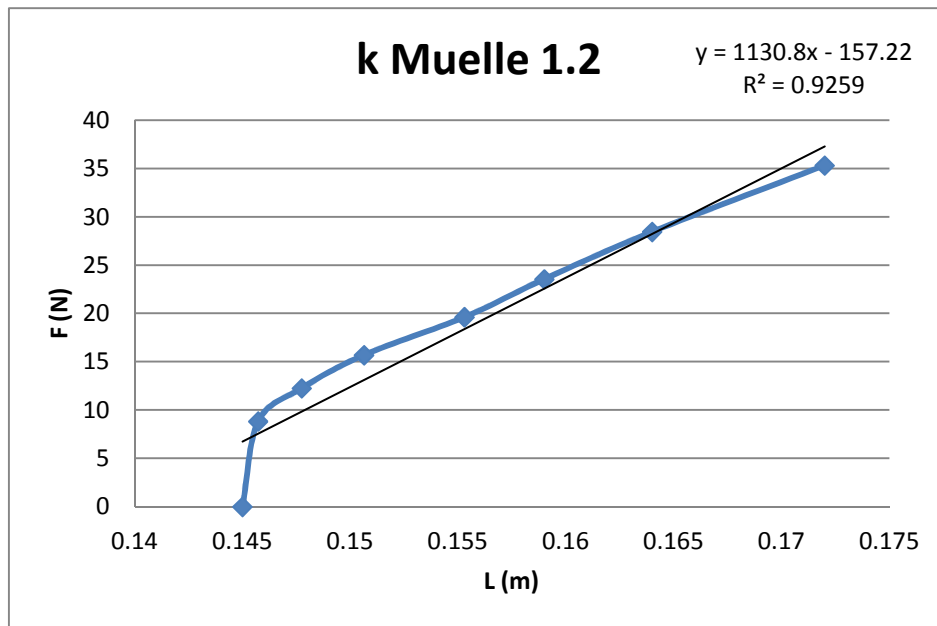


➤ **Ensayo 2:**

$L_0 = 145 \text{ mm}$

Long. (mm)	Long. (m)	Fuerza (kg)	Fuerza (N)
145	0.145	0	0
145.73	0.14573	0.9	8.829
147.75	0.14775	1.25	12.2625
150.64	0.15064	1.6	15.696
155.3	0.1553	2	19.62
159	0.159	2.4	23.544
164	0.164	2.9	28.449
172	0.172	3.6	35.316

De donde obtenemos la siguiente gráfica, utilizando los mismos criterios usados para hacer la gráfica anterior.



Antes de nada, comentar el primer salto en los puntos representados que aparecen en ambas gráficas. Esto se debe a que el resorte que hemos utilizado para el sistema mecánico, posee una tensión inicial, ya que sus espiras están completamente en contacto entre si, por lo tanto, el primer valor de fuerza que hay que aplicar ha de ser mayor que el resto para vencer esta primera tensión comentada. Sin más, pasamos a detallar el ensayo efectuado.

La realización de esta prueba para determinar la constante elástica del resorte nos va a permitir introducir en la simulación los valores exactos de las constantes del muelle que disponemos, con las adaptaciones pertinentes, que detallamos en el apartado correspondiente. De esta manera, dicha simulación se va a ajustar el máximo posible a nuestro experimento real.

Una vez representadas todas las gráficas, a partir de los datos experimentales, y obtenidas las constantes elásticas, vamos a determinar el valor de la constante final por medio del cálculo de la media de los dos resultados obtenidos:

Ensayo 1 → 1303,1 N/m Ensayo 2 → 1130,8 N/m

• Constante elástica k muelle = 1216,95 N/m

Determinamos ahora otro parámetro relacionado con la constante de rigidez del muelle, la distancia de colocación del resorte con respecto al eje de giro de la barra que representa el cuello. A partir de un valor de referencia de esta constante de rigidez que posee el cuello humano, recogido en el estudio

realizado por Anderson and Winters [15], tenemos que calcular esta distancia al eje de rotación de la barra a la que colocar el resorte, de manera que la constante de rigidez que le otorguemos a nuestro sistema mecánico sea la misma que la que posee un cuello humano según el estudio que hemos referenciado anteriormente. Para ello vamos a partir del valor dado en este estudio, $10 \text{ N} \cdot \text{m}/\text{rad}$. Posteriormente simplificamos esta rigidez del cuello a un sistema de un eslabón en cuyo extremo se encuentra un resorte en espiral, cuya constante elástica a la torsión es la misma, $10 \text{ N} \cdot \text{m}/\text{rad}$, y en el cual si le aplicamos una fuerza se producirá un desplazamiento, de tal forma que $T = k_T \cdot \theta$. Además, sabemos que el valor de un par aplicado equivale a $T = F \cdot l$. Ahora trasladamos este sistema al supuesto en que el eslabón se encuentra fijo en un extremo, y en el otro posee un resorte lineal (nuestro muelle). En este caso la ecuación del desplazamiento es $F = \delta \cdot k_L$, donde $\delta = l \cdot d\theta$. Si igualamos las expresiones anteriores nos queda que:

$$T = F \cdot l = l \cdot d\theta \cdot k_L \cdot l = k_T \cdot d\theta$$

Los diferenciales de ángulo se nos van, y nos queda que:

$$k_T = l^2 \cdot k_L$$

Por lo que de esta relación obtenemos el valor de la longitud a la que hay que colocar el resorte lineal para que sea equivalente al resorte helicoidal.

$$l = \sqrt{\frac{k_T}{k_L}} = 0,0906 \text{ m} \quad \lll$$

La distancia al eje de rotación de la barra a la que hay que colocar el resorte lineal para obtener la constante de rigidez deseada de $10 \text{ N} \cdot \text{m}/\text{rad}$, de forma que represente el cuello de una persona, según el estudio citado, es de 9,06 cm.

III.2.7-.Barras de acero con distintas propiedades físicas

En la realización de los ensayos vamos a utilizar una serie de barras de acero, las cuales representan un brazo robot con un grado de libertad, ya que las barras giran únicamente alrededor de uno de sus extremos, acoplado en el eje que compone la mesa de ensayos de fabricación UAL. Para poder estudiar la influencia de los factores de rigidez e inercia de las barras en las fuerzas que se producen en el impacto y la aceleración que sufre la cabeza en el mismo, vamos a utilizar barras con diversas dimensiones, las cuales les otorguen estas distintas propiedades físicas.

Resulta sencillo realizar los cálculos pertinentes con los cuales obtener las configuraciones de dos barras que tengan distintas dimensiones, pero que a su vez posean la misma inercia o rigidez, es decir, obtener las dimensiones de dos barras para que tengan la misma inercia pero distinta rigidez o viceversa. Lo realmente complicado en nuestro caso es poder disponer de una o varias barras con esas determinadas dimensiones calculadas, ya que nuestra fuente de recursos para este proyecto, el taller del CITE IV de la Universidad de Almería, no dispone de una gran variedad de barras, en cuanto a dimensiones de la sección se refiere, como para que entre ellas se encuentren las que necesitamos según los cálculos realizados.

Por esto, la solución que le damos al problema es la de hacer un inventario de las barras de las que disponemos en el taller, anotando las dimensiones de las mismas y calculando para cada una de ellas el valor de su momento de inercia, respecto al eje del que gira, y de la rigidez que poseen, así podremos ver las características de las barras de las que disponemos y seleccionar las que más nos convengan. Las características de cada barra quedan reflejadas en las tablas 7 y 8, en las que se encuentran las barras de sección cuadrada, en un primer caso, y las de sección circular, en un segundo lugar. Decir que todas ellas son barras de acero huecas (módulo de elasticidad de $E = 2.1 \cdot 10^6 \text{ kg/cm}^2$), con un mayor o menor espesor de sus paredes.

Tabla 7. Características y propiedades de las barras de sección cuadrada.

	Barra 1	Barra 2	Barra 3	Barra 4	Barra 5
Lado (cm)	1.4	2	2.5	4.01	8.05
e (cm)	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
V (cm ³)	81.6	122.4	156.4	259.08	533.8
m (kg)	0.64	0.96	1.23	2.03	4.19
I _z (kg m ²)	0.053	0.0801	0.102	0.17	0.353
I _{zz} (cm ⁴)	0.24	0.79	1.63	7.39	64.54
E · I _{zz} (kg m ²)	49.73	165.31	343.25	1552.84	13553.42
K (N/m)	2383.06	7922.06	16449.27	74415.18	649504.71

Tabla 8. Características y propiedades de las barras de sección circular.

	Barra 1	Barra 2	Barra 3
Radio (cm)	1.25	1.51	2.5
e (cm)	0.2	0.16	0.16
V (cm ³)	122.84	122.2	206.79
m (kg)	0.964	0.96	1.62
I _z (kg·m ²)	0.0804196	0.0800345	0.1357524
I _{zz} (cm ⁴)	0.9628196	1.474467	7.1316546
E·I _{zz} (kg·m ²)	202.19	309.64	1497.65
K (N/m)	9689.42	14838.43	71770.02

A partir de aquí, lo que hacemos es seleccionar, para llevar a cabo los ensayos, aquellas barras cuya rigidez o inercia se adapten mejor a las necesidades que tengamos, a fin de poder estudiar cómo influye uno u otro parámetro en las mencionadas fuerzas en el impacto entre las barras y el sistema mecánico cabeza-cuello humano y en la consecuente aceleración que sufre la cabeza.

En primer lugar, enfocaremos los ensayos a estudiar la influencia de la inercia de las barras en la fuerza aplicada sobre la cabeza en el impacto y en la aceleración que sufre esta. Para ello, el planteamiento consiste en seleccionar una barra a utilizar en los ensayos y modificarle la inercia, a fin de poder ver la influencia de este factor en los resultados, ya que no disponemos de dos barras con la misma rigidez que posean distinta inercia. Esto podemos hacerlo agregando una serie de pesos en puntos concretos de la barra, de manera que aumentemos la inercia de la misma un porcentaje determinado, en función del punto de colocación de las pesas y de la masa que estas tengan.

Para realizar este primer estudio acerca de la influencia de la inercia que posean las barras, hemos escogido la barra número 2 de sección cuadrada de la tabla 7, ya que las barras con sección cuadrada son más cómodas a la hora de realizar cualquier tipo de agujeros en las mismas. La razón de esta selección es debido a que esta barra es la segunda barra con la inercia más baja de sección cuadrada, y a la hora de agregarle pesas para aumentar su inercia, estas no serán excesivamente voluminosas. Aunque vemos que la barra número 1 de sección cuadrada posea una menor inercia, y las pesas que habría que acoplarle serían más pequeñas, las dimensiones de la sección de esta primera barra son demasiado reducidas para poder practicarle agujeros con facilidad a la misma, los cuales nos permiten acoplar la barra a

la mesa de ensayos y acoplar también las mencionadas masas. Además, otra razón importante es que esta misma barra la vamos a utilizar de nuevo en el estudio de la influencia de la rigidez, de este modo el factor de ahorro de material también lo hemos tenido en cuenta para seleccionar esta barra número dos y no la número uno.

La barra número 2 seleccionada posee un valor de momento de inercia respecto a su eje de simetría axial (eje z) en su centro de gravedad de $I_{zB2} = 0.080123 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$, y respecto al eje de giro $I_{\text{eje giro}} = 0.25352 \text{ kg} \cdot \text{m}^2 = I_{B1}$. Para lograr alcanzar valores de inercia más elevados, como hemos dicho, colocamos una serie de pesos a una distancia determinada del centro de la barra. La distancia de colocación de estas masas puntuales será de 0.385 m o de 0.3675 m, dependiendo de si el valor de su masa es muy elevado y necesita dos sujeciones o no. Estas distancias concretas las escogemos para aprovechar así los orificios realizados a la barra para colocar el sensor de fuerza, que están a esa distancia. Además, el valor del momento de inercia con respecto al centro de gravedad de las propias pesas podemos despreciarlo debido a que es muy pequeño y apenas si va a influir menos de unas décimas de gramo en el resultado final. Por lo tanto, la ecuación de Steiner se verá reducida en este caso:

$$I_{\text{pesas}} = I_{\text{cdg}} + m \cdot d^2 \quad \rightarrow \quad I_{\text{pesas}} = m \cdot d^2$$

Las pesas de las que disponíamos en el laboratorio tenían dos valores de masa concretos, $m_1 = 0.541 \text{ kg}$ y $m_2 = 1.081 \text{ kg}$, lo cual nos proporciona un aumento de inercia de la barra considerable. La segunda configuración de barra es a la que le añadimos la primera de las masas indicadas, de forma que la proporción en que se logra aumentar la inercia de la misma es de un 2.5 más, un poco más del doble, quedando esta con una inercia respecto al eje de giro de $I_{B2} = 0.6444 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$. La segunda masa añadida nos da la tercera configuración de barra utilizada para estos ensayos, que le proporciona a la barra inicial una inercia respecto al eje de giro de $I_{B3} = 1.034 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$, logrando cuadruplicar la inercia inicial.

Pasamos ahora al segundo punto de estudio, la influencia de la rigidez de las barras en las fuerzas que se producen en el impacto y las aceleraciones que sufre la cabeza en el mismo, para un mismo momento de inercia de estas. Podemos ver en las tablas de propiedades de las barras, que las barras número 2 de sección cuadrada y la barra número 2 de sección circular poseen una inercia muy similar, por lo que podemos considerarlas iguales, y, además, tienen una cierta relación de proporcionalidad en su constante de rigidez, ya que la barra 2 de sección circular posee una rigidez de prácticamente el doble que la de la barra 2 de sección cuadrada, así

podremos apreciar el aumento de los parámetros a medir cuando multiplicamos por dos el valor de la rigidez de un brazo robot. Al tener que seleccionar la barra de sección circular puede que encontremos algún tipo de dificultad a la hora de acoplar el sensor de fuerza durante la realización de los ensayos, y no podamos llevar a cabo la toma de datos, por lo que esperaremos a las pruebas previas realizadas para determinar si finalmente continuamos analizando este factor. Detallamos la decisión final en el apartado de método de realización de las experimentaciones de este capítulo.

Y el último factor influyente objeto de estudio es la cobertura, que podemos colocar en las barras o en la cabeza, pero siempre en el punto en el que se produce el impacto, para determinar su nivel de influencia en los datos.

Utilizamos para este último caso la barra número 4 por la razón principal de que es la segunda barra más rígida disponible en el taller, y por lo tanto, al producirse los impactos, tomaremos unos valores más certeros, debido a que su deformación durante los mismos será menor que si usáramos las barras 2 o 3. También podemos ver en las tablas que la barra 5 es más rígida aún, pero nos encontramos con el problema de que sus dimensiones son demasiado grandes para poder acoplarla a la mesa de ensayos de una forma segura y que nos permitiera tomar los datos correctamente.

En la figura 33 mostramos las tres barras seleccionadas con las que hacemos los ensayos. La barra de la derecha es la barra número dos de sección cuadrada, con la que llevamos a cabo los ensayos de estudio de la influencia de la inercia. La barra del centro es la barra número dos de sección circular, y es, junto con la barra dos de sección cuadrada, con la que realizamos los ensayos para estudiar la influencia de la rigidez. Y por último, la barra de la izquierda es la barra número cuatro de sección cuadrada, que es con la que hacemos los ensayos para estudiar la influencia de la cobertura, el cual detallamos a continuación.



Figura 33. Barras utilizadas en los distintos tipos de ensayos.

Para determinar la influencia de las coberturas, realizamos cinco tipos de ensayos en esta parte, con cinco tipos distintos de coberturas. Usamos dos tipos distintos de polímero termoplástico Etil-Vinil-Acetato (EVA), y utilizamos dos espesores distintos con uno de los tipos y tres con el otro, así tenemos cinco configuraciones de cobertura que podemos comparar para determinar su influencia.

El primer tipo de polímero (un tipo de cobertura que es usado para suelas de zapatos o juguetes entre otros), que llamaremos tipo1, es de un espesor bastante pequeño, de 1.9 mm. En la primera de las configuraciones utilizamos una sola capa de este material, por lo que se puede decir que este primer ensayo lo realizamos sin cobertura alguna, ya que una sola capa de material representa prácticamente la cobertura que le suministra la piel a los huesos de la cabeza. En el segundo tipo de configuración colocamos tres capas de este material, quedando la cobertura con un espesor de 5.7 mm. Y para la tercera configuración que realizamos con el primer tipo de este material usamos seis capas del mismo, lo que nos da un espesor de la cobertura de 11.4 mm. Podemos ver la apariencia que tiene este primer tipo de material, y cómo lo hemos colocado en el disco en el punto donde se producen los impactos, para que realice la amortiguación durante los mismos, en la siguiente figura.



Figura 34. Imágenes del primer tipo de polímero EVA utilizado.

El segundo tipo de polímero (usado este como suelo para la práctica de distintas artes marciales), que llamaremos tipo2, posee un espesor mayor que el anterior, de 11 mm. La primera configuración de este segundo tipo de polímero corresponde con una sola capa de material. Y para la última cobertura a colocar, lo que hacemos es colocar dos capas del segundo tipo de polímero, con lo cual esta tiene un espesor final de 22 mm. También mostramos la apariencia de este segundo tipo de polímero EVA, y su colocación, rodeado de cinta adhesiva, en la siguiente figura.



Figura 35. Imágenes del segundo tipo de polímero EVA utilizado.

III.3-.Proceso de adquisición de datos

Aunque el proceso y los sistemas de adquisición de datos ya han sido explicados en general en este proyecto en el apartado de revisión bibliográfica, ahora nos vamos a centrar en nuestro caso particular, detallando el camino desde que la primera señal es captada por los sensores, al activar la toma de datos, hasta que podemos visualizarla en pantalla.

Estando todos los equipos preparados y conectados entre sí, y una vez iniciemos el programa creado, detallado en el siguiente apartado, soltamos la barra que describirá un movimiento pendular y los sensores de aceleración y fuerza comienzan a registrar una serie de datos en forma de voltaje, estos pasan a través del cable al acondicionador de señal que se encarga de realizar sus funciones características descritas anteriormente. Procesadas las señales eléctricas en el acondicionador, estas son recogidas por la tarjeta de adquisición de datos, que permitirá visualizar las señales en la computadora gracias a un software especializado en esta tarea, en nuestro caso LabVIEW, y que posee una aplicación específica para captar señales procedentes de las tarjetas de adquisición de datos, llamada DAQ Assistant.

Llegados a este punto, en el que las señales son captadas por el elemento primero del proceso se encuentran ya en el ordenador listas para ser visualizadas, debemos tener preparado un programa en LabVIEW que se adapte a nuestras necesidades y características en la toma de datos, el cual explicamos en el siguiente apartado.

III.3.1-.Características del código empleado en LabVIEW

Como bien sabemos, estamos utilizando el software LabVIEW, que es un potente programa con el cual podemos realizar la adquisición de datos, y en el que tenemos una pantalla para visualizar los datos y controlar el programa, y otra donde realizar la programación del mismo a partir de diferentes funciones, de una forma gráfica, llamadas panel de control y diagrama de bloques respectivamente, y que es donde realizaremos nuestro particular programa para adquirir las señales y visualizar las mismas.

Comenzaremos definiendo las funciones que utilizamos para crear el programa deseado en el diagrama de bloques, y posteriormente reflejamos aquellas herramientas que introducimos en el panel de control para poder controlar el programa y visualizar los datos que estamos tomando de la forma que nos convenga. Para definir cada función, primeramente mostramos cada una de ellas en el programa que hemos creado para llevar a cabo la adquisición de datos. Podemos ver el diagrama de bloques del programa en la siguiente figura.

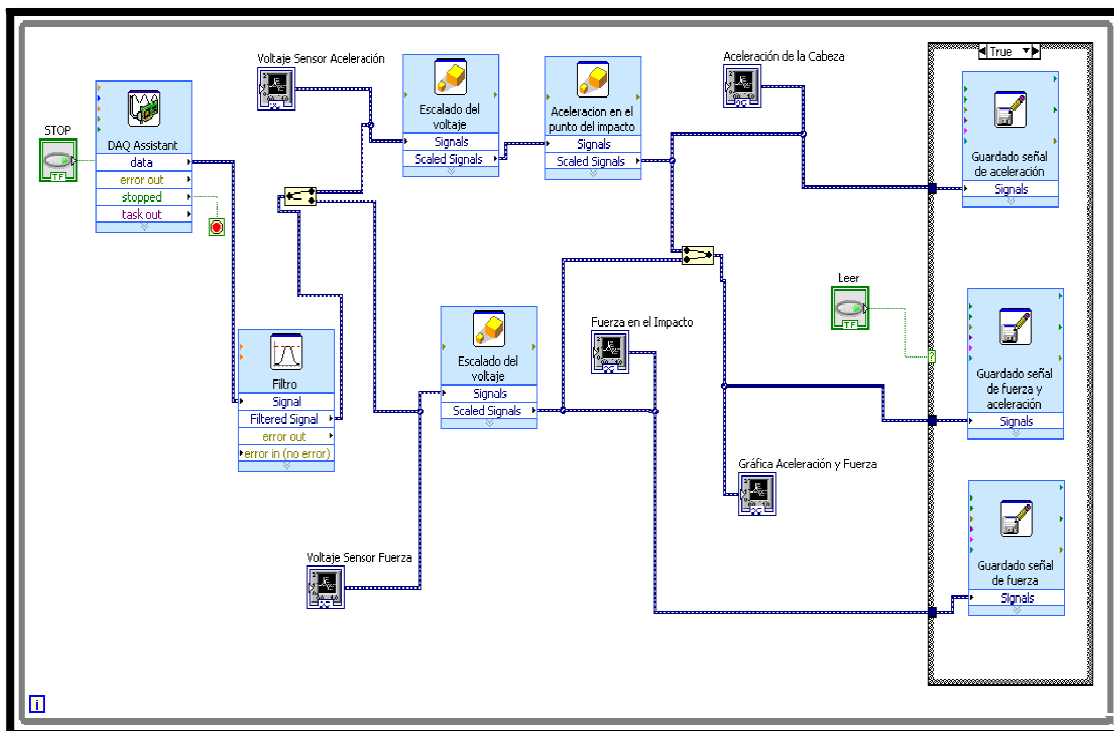


Figura 36. Diagrama de bloques del programa de adquisición de datos.

La principal función que tiene nuestro programa, en el diagrama de bloques, es la del asistente para adquirir los datos de nuestra tarjeta de adquisición de datos, y en la que tendremos que definir el tipo de registro que queremos hacer, de acuerdo con lo previamente explicado en el apartado de revisión bibliográfica, en el punto donde detallamos el software LabVIEW. Al iniciarse la aplicación de la función de adquisición de datos, *DAQ Assistant*, nos aparecen una serie de ventanas en las que debemos definir las diversas características de nuestra adquisición. En primer lugar, seleccionamos la opción de adquirir una señal analógica, como vemos en la figura 37.

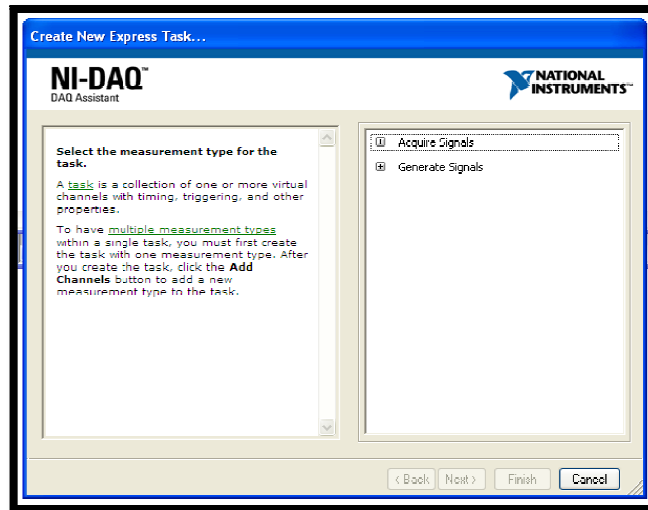


Figura 37. Vista 1 del asistente de adquisición de señales.

Seguidamente escogemos que queremos obtener una señal de voltaje, y a continuación el puerto en el cual hemos conectado el cable del sensor en el acondicionador de señales, como vemos en las figuras 38 y 39.

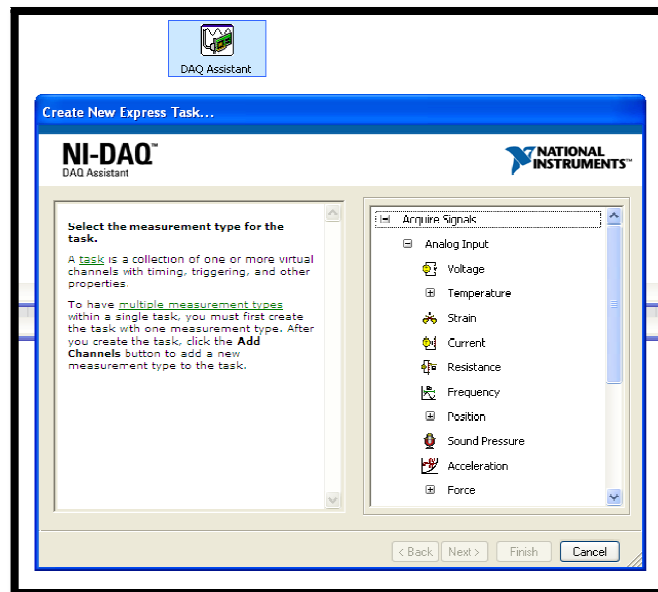


Figura 38. Ventana 2 del asistente de adquisición de señales.

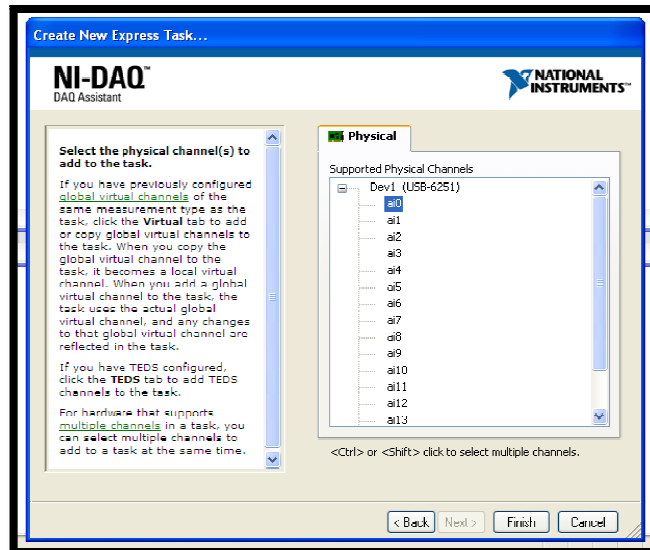


Figura 39. Ventana 3 del asistente de adquisición de señales.

Y finalmente, aparece la pantalla más característica de esta función y en la que más parámetros de la adquisición podemos definir y modificar, que a continuación detallamos. Podemos ver su apariencia en la figura 40.

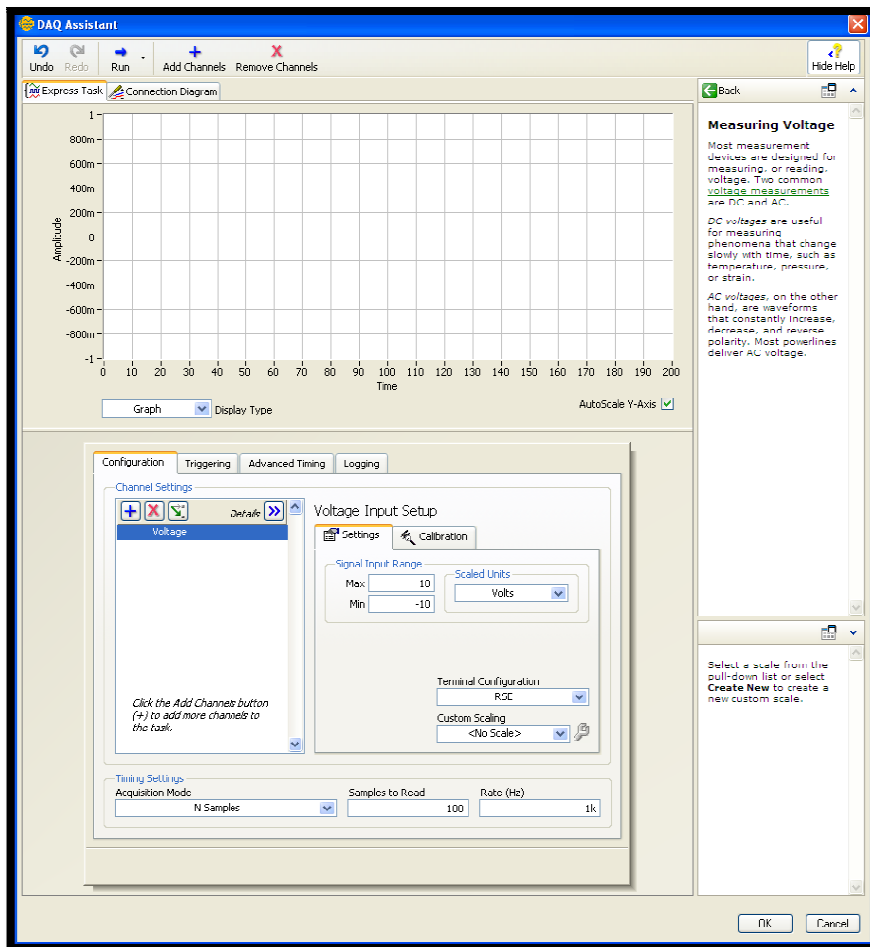


Figura 40. Última ventana del asistente de adquisición de señales

Aquí, indicamos que queremos obtener 10.000 medidas a una velocidad de 10.000 medidas por segundo, es decir, a una velocidad de 10 kHz, y todo ellos de manera continua, con lo que seleccionamos *Continuous Samples* en *Acquisition Mode*. Esta velocidad de toma de datos ha de ser tan elevada porque durante los impactos la velocidad a la que cambia la aceleración es también muy elevada, por lo tanto, para no perder ningún valor importante de aceleración o de fuerza debemos aumentar la velocidad de muestreo. También modificamos en esta última pantalla el rango del voltaje de la señal de entrada, de manera que lo ajustamos al rango de medida de los sensores, siendo en estos ± 5 V. Además, en *Terminal Configuration* escogemos la configuración RSE (Referenced Single Ended), que es el tipo de conexión que hemos realizado (con un cable conectado al punto de tierra común). En cuanto a la escala, dejamos la opción que viene por defecto, que es no aplicar ninguna escala, ya que en el diagrama de bloques usamos una función que nos permite introducirla de manera más cómoda. Por último, decir que desde esta última ventana del asistente podemos añadir otro canal de entrada sin necesidad de iniciar otro asistente, y que es de la forma en que lo hemos hecho, es decir, con un mismo asistente tomamos los datos de los dos sensores que tenemos funcionando, dividiendo la señal posteriormente con una función *Split* como podemos ver en la figura que muestra el código empleado.

Siguiendo con la definición de las funciones que hemos usado para elaborar nuestro programa de adquisición de los datos proporcionados por los sensores, podemos ver las funciones de escalado de la señal, que hemos llamado escalado del voltaje, en un primer caso, y aceleración de la cabeza, en un segundo. En ellas introducimos un valor por el cual se multiplica la señal de entrada, obteniendo una señal escalada a la salida. El valor que introducimos en las funciones de escalado del voltaje, es el que hemos mencionado anteriormente, cuando se han detallado las características de cada uno de los sensores y la constante de proporcionalidad de cada uno de ellos entre el voltaje y la aceleración o la fuerza. Recordamos los valores de esas constantes de proporcionalidad para cada uno de ellos, reseñando que la magnitud de los valores de las señales de entrada de los sensores son obtenidas como voltios, por lo que para el sensor de fuerza, la constante que multiplica la señal de entrada es 866.55, y para el sensor de aceleración, la constante corresponde al valor de 970.87. Y el segundo escalado que le hacemos a la señal dada por el acelerómetro, con la función de escalado llamada aceleración de la cabeza, se debe a que el sensor de aceleración que nos da la aceleración de la cabeza en el punto de impacto, no está colocado exactamente en ese punto, por lo que, a partir de la definición de aceleración angular y aceleración tangencial, obtenemos una relación de la distancia a

la que está colocado y a la que debería estar, $k = \frac{d_{deberia\ estar}}{d_{colocado}}$, siendo este valor de proporcionalidad que introducimos en la función de escalado de 1.65. La razón de que el punto de impacto esté colocado justamente a esa distancia del eje de giro de la barra se debe a razones técnicas en cuanto a la disposición de los utillajes colocados se refiere, pero si quisiéramos obtener la aceleración de cualquier otro punto bastaría con volver a realizar este cálculo con la relación comentada.

Otra función usada en este programa de adquisición de datos, procedentes de los dos sensores, es una función que representa un filtro de señales, en la que podemos restringir la entrada de un rango determinado de frecuencias no deseadas para que no alteren la señal y podamos visualizarla lo más clara y precisa posible.

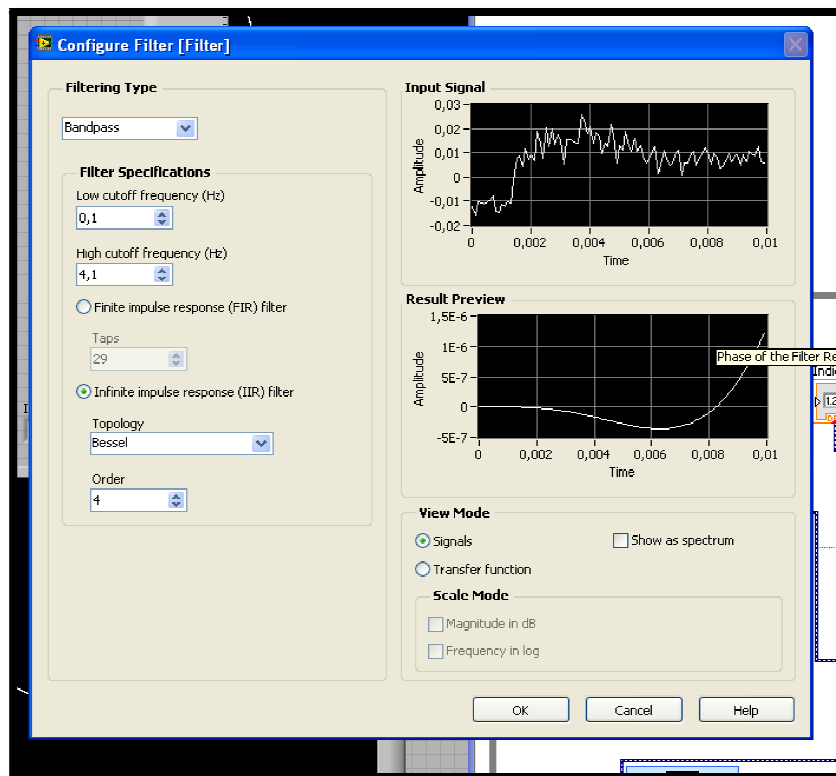


Figura 41. Ventana de diálogo de la función Filter.

En la ventana de diálogo de la función, que podemos apreciar en la figura 41, escogemos el tipo de filtro pasa banda, que, como ya se ha explicado, nos permite seleccionar un rango de frecuencias deseadas a visualizar, escogiendo unas frecuencias de restricción de corte inferior y corte superior, teniendo en nuestro caso los valores de 0,2 Hz y 1600 Hz respectivamente. Estos valores son escogidos por distintas razones, en primer lugar, la frecuencia de corte inferior, que no deja pasar señales con frecuencias inferiores a esta, la escogemos debido a que el rango de trabajo de los

sensores está por encima de 0,2 Hz, por lo que todas las señales que puedan ser leídas o se introduzcan en la adquisición de datos serán señales no deseadas, pertenecientes a ruidos o distorsiones. La frecuencia de corte superior ha de ser elevada, ya que las vibraciones que se producen durante un impacto tienen una alta frecuencia. Exactamente hemos seleccionado el valor de 1600 Hz porque nos hemos basado en el criterio aplicado en la referencia [17], en cuyo artículo se realiza el estudio sobre los riesgos de lesión debidos a un impacto, y en el cual, durante las experimentaciones, se ha utilizado un filtro que restringía las señales superiores a este valor.

El siguiente paso es seleccionar el tipo de funcionamiento del filtro, FIR o IIR. En nuestro caso escogemos el tipo IIR (Infinite Impulse Response), en el cual si su entrada es un impulso la salida será un número ilimitado de términos no nulos, es decir, que nunca volverá a un estado de reposo. La elección de este tipo de filtros en detrimento del tipo de filtro FIR (Finite Impulse Response), se debe a que como los primeros usan el método de la recursividad, permiten obtener una mejor respuesta a la salida, por lo que son muy eficaces.

Seleccionado el tipo de funcionamiento que queremos que lleve a cabo nuestro filtro digital, debemos escoger las dos variables que restan, la topología del filtro, que determina la forma en que la señal aplicada cambia en amplitud y fase al atravesar el filtro, y el orden del mismo, el cual refleja el grado de aceptación o rechazo de frecuencias, por arriba o por debajo, de la respectiva frecuencia de corte. Primeramente seleccionamos que queremos un filtro de orden 1, el cual presenta una atenuación de 10 veces su frecuencia de corte, y un tipo Bessel, que nos asegura una variación de fase constante, por lo que no distorsiona la señal.

La siguiente función a definir, usada en el programa elaborado en el diagrama de bloques de LabVIEW, es la que nos permite almacenar los datos adquiridos durante la realización de los ensayos, la cual se denomina *Write to Measurement File*. Gracias a esta función podemos almacenar los datos en tres tipos distintos de ficheros y posteriormente trabajar con ellos con algún otro software de representación y análisis de datos, en nuestro caso MATLAB y Excel. En la siguiente figura vemos la apariencia que tiene la ventana de diálogo de esta función, y a continuación detallamos cada una de las variables que seleccionamos.

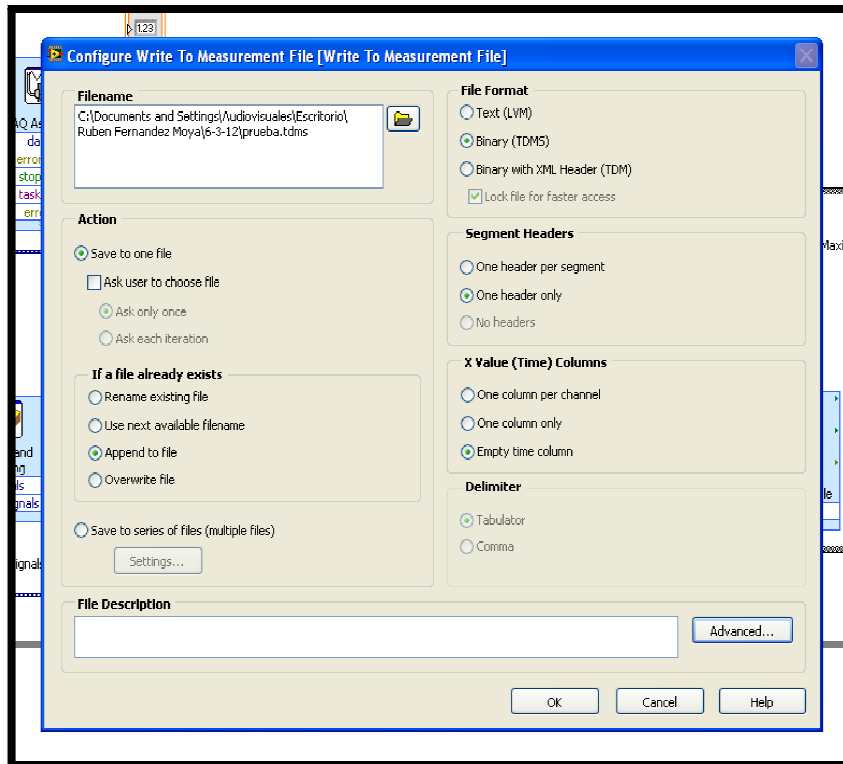


Figura 42. Ventana de diálogo de la función Write To Measurement File.

En primera instancia, indicamos el nombre del archivo que vamos a guardar y el directorio de almacenamiento, en el cuadro Filename o pulsando el icono de la carpeta a la derecha del cuadro. Seguidamente escogemos la opción de guardar en un solo archivo (Save to one file), y si el archivo ya existe, le indicamos que use el siguiente nombre de archivo disponible (Use next available filename). En el apartado donde se selecciona el formato de salida del archivo encontramos tres opciones, y escogemos en este caso la tercera (Binary with XML Header), ya que este formato de archivos podemos abrirlo con la hoja de cálculo Excel, y además nos presenta los datos de forma más ordenada. Y en los dos siguientes apartados, referidos a la forma en que se presentan los datos en el archivo de salida, seleccionamos que solo queremos que nos muestre una cabecera en el archivo (One header only), y que nos presente una columna de tiempo únicamente por archivo (One column only).

Una vez descritas todas las funciones que hemos utilizado para crear el programa, pasamos a describir el resto de elementos que lo componen, citando inicialmente a los iconos que representan a las gráficas que se sitúan en el panel de control, que describiremos a continuación. Gracias a estos iconos podemos apreciar en el panel de control los datos adquiridos que deseamos, ya que los conectamos mediante cables virtuales a las salidas de las funciones de las que queremos visualizar sus datos. En este caso hemos conectado dos indicadores de gráficas a la salida de la función de adquisición

de datos, para poder visualizar los valores de voltaje obtenidos de los sensores y poder compararlos con las gráficas que muestren los valores escalados, apreciando así el trabajo de escalado que llevan a cabo las funciones encargadas de ello. Otros dos indicadores están conectados a las salidas de las funciones de escalado, por lo que muestran los valores reales de fuerza y aceleración medidos por los sensores. Y también hemos introducido otro indicador a la salida de la herramienta de unión de señales, para visualizar estos últimos datos de una manera conjunta en una misma gráfica en el panel de control.

Otros indicadores que aparecen en el programa son los que están conectados a la función de adquisición de datos, uno de stop y otro representado mediante un icono rojo. Estos dos indicadores están relacionados con el recuadro gris que rodea a todos los elementos del programa, el cual representa un bucle, dentro del cual hemos hecho la programación, de manera que una vez se inicie la ejecución del programa para llevar a cabo la toma de datos, este bucle repite dicha ejecución una y otra vez hasta que pulsemos un control de STOP situado en el panel de control, y cuyos indicadores son los que estamos mencionando.

El bucle descrito (bucle *While*) no es la única estructura de condición que hemos utilizado, ya que, como podemos apreciar en la figura x, también hay otro recuadro que limita las funciones de almacenamiento de las medidas tomadas. En este caso se trata de una estructura condicional llamada *if*, en la cual los elementos que hay en su interior solo se ejecutan si se da una condición. Esta condición suele ser verdadero o falso, de modo que si el control adjunto a esta estructura se encuentra en posición de verdadero, y la condición en el interior del bucle también está en la posición de verdadero, se ejecuta el programa que haya en su interior hasta que la condición no cambie. El indicador que representa al control de esta condición en el diagrama de bloques se encuentra conectado a la estructura como podemos ver, y el cual hemos renombrado leer, de manera que solo cuando pulsemos el botón de leer en nuestro panel de control, se realizará la grabación de los datos. Así podremos hacer diversas pruebas antes de llevar a cabo esta grabación sin necesidad de almacenar los datos de las mismas, ya que son datos que no queremos utilizar y que ocupan un considerable espacio en la memoria de la computadora.

Llega el turno de detallar el panel de control de este programa de adquisición de datos que hemos creado. La apariencia del mismo podemos visualizarla en la figura 43.

En la figura del panel de control podemos ver que en él hay cinco indicadores gráficos en los que se muestran una serie de datos, y cada uno de ellos corresponde a un indicador en el diagrama de bloques, los cuales podemos identificar mediante su nombre en la parte superior de los mismos. Las dos primeras gráficas de la izquierda corresponden con los datos obtenidos a la salida de la función de adquisición de datos, de modo que los valores que representan no son muy elevados, ya que no están escalados. Las siguientes dos gráficas de la derecha reflejan los datos de aceleración (la de arriba) y de fuerza (la de abajo) una vez escalados, por lo que, como vemos, los datos que están procesando son bastante más elevados que los de las dos gráficas primeras. Y la última gráfica que queda por describir es la que representa conjuntamente los datos de los dos sensores, insertada la misma en nuestro panel para una mayor comodidad de visualización de los datos, aunque su papel sea irrelevante.

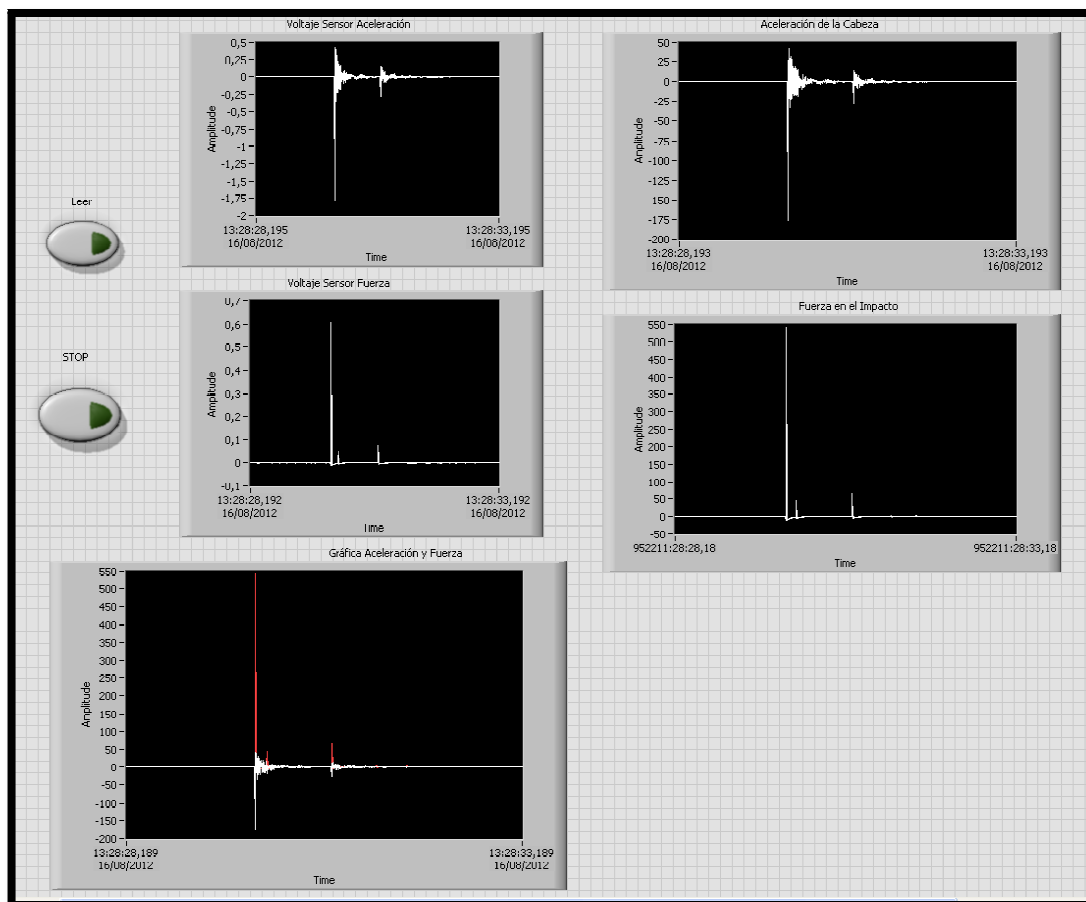


Figura 43. Panel de control del programa de adquisición de datos.

En la parte de la izquierda del panel tenemos colocados los dos controles que utilizamos en el programa. El primero (Leer) nos sirve para iniciar la grabación de los datos cuando lo deseemos, de manera que sólo pulsaremos este botón cuando vayamos a realizar adquisiciones de datos válidas, así se

permitirá la entrada al bucle *If* y las funciones de grabación de datos entrarán en funcionamiento. Y el segundo botón (STOP) es el control del bucle *While*, lo cual quiere decir que si pulsamos este control el bucle dejará de ejecutarse, el programa se parará y, por consiguiente, la adquisición de datos se detendrá.

III.4- Método de realización de los ensayos experimentales

Una vez descritos los materiales con los que vamos a desarrollar nuestro trabajo, y el proceso particular de adquisición de datos que vamos a utilizar, toca explicar la forma en la que vamos a llevar a cabo la realización de los ensayos experimentales, aunque ya hemos dado algunas pinceladas del proceso en los apartados anteriores.

Cada una de las barras utilizadas seguirá el mismo proceso en la realización de los ensayos, y a su vez cada ensayo practicado a cada una de las barras será repetido tres veces para verificar que no se han cometido errores durante el proceso. Lo que hacemos es registrar los datos de los sensores mediante el software, explicado justamente en el apartado anterior, para distintas velocidades en el momento en que se produce el impacto entre cada una de las barras y el disco perteneciente al sistema mecánico cabeza-cuello. Estas velocidades en el impacto van a depender del ángulo en que soltemos las barras, de forma que cuanto mayor sea el ángulo desde el cual soltamos cada barra, mayor será la velocidad que posean estas en el momento en el que se produce la colisión. Por lo tanto, además de estudiar la influencia de los factores de inercia, rigidez y cobertura, también veremos cómo aumentan las fuerzas aplicadas a la cabeza y las aceleraciones de la misma en el impacto en la medida en que aumentemos la velocidad. Para medir el ángulo de partida nos beneficiaremos de la regla graduada que le hemos agregado a la mesa de ensayos, y de un tornillo guía que le acoplamos a cada una de las barras que nos va indicando el ángulo que alcanzan las mismas.

El planteamiento ha sido el de realizar la toma de datos de los impactos, con los sensores, para 5 alturas, las cuales nos proporcionaban otras tantas velocidades en el momento del impacto. Los ángulos que hemos seleccionado para realizar el experimento han comenzado en 10° y han finalizado en 50°, con un incremento de 10°. El límite superior lo hemos establecido en 50°

para no arriesgarnos a superar los límites de medida del sensor de fuerza y provocar algún daño en este durante los ensayos.

Para calcular la velocidad que tiene cada una de las barras en el punto en el que se produce el impacto (extremo de la barra), hemos utilizado las ecuaciones de energía cinética de rotación y de energía potencial. Estas ecuaciones se igualan cuando la barra se encuentra en su punto de equilibrio, que es el punto en el que se produce el impacto, y podemos despejar el valor de velocidad que posee la barra en función de su altura. A continuación mostramos las tres ecuaciones descritas, energía cinética de rotación, energía potencial y velocidad de la barra en el punto de impacto.

$$E_{\text{cinética de rotación}} = \frac{1}{2}I\omega^2$$

$$E_{\text{potencial}} = mgh$$

$$v = 2 \cdot \sqrt{\frac{2mghd^2}{md^2 + I_{cdgbarra}}}$$

siendo d la distancia del punto de rotación al centro de gravedad de la barra.

En la siguiente tabla ilustramos las velocidades que se alcanzan dependiendo del ángulo de partida de la barra con respecto a la posición de equilibrio de la misma. Además, cada una de ellas está referida a una barra en concreto, la primera a las barras número 2 de sección circular y sección cuadrada, la segunda pertenece a los valores que se obtienen cuando utilizamos la segunda configuración de barra para llevar a cabo los ensayos enfocados al estudio de la inercia, es decir, una barra con $2,5 \cdot I_{B2\text{sección cuadrada}}$, la tercera columna de velocidad muestra los valores de la barra que tiene una inercia cuatro veces la inercia de la barra dos de sección cuadrada, que es el tercer tipo de barra utilizada en los ensayos de estudio de la influencia de la inercia, y en la última columna exponemos los valores de velocidad referidos a la barra número 4 de sección cuadrada, para el estudio de la influencia de las coberturas.

Tabla 9. Velocidad en el impacto de cada barra en función de la altura.

Angulo girado (θ en grados)	Angulo en radianes	Altura (h)	Velocidades de las barras			
			Barras 2 (s. cuad. y circ.)	Barra 2,5*1b2	Barra 4*1b2	Barra 4
10	0,17	0,0064	0,59	0,46	0,42	0,59
20	0,34	0,025	1,17	0,92	0,84	1,17
30	0,52	0,056	1,74	1,37	1,26	1,74
40	0,69	0,099	2,31	1,81	1,66	2,31
50	0,87	0,15	2,85	2,23	2,06	2,85

Ayudándonos de la tabla expuesta, podemos ver que la velocidad en el punto de impacto aumenta a razón de 0.57 m/s por cada 10 grados que aumentamos la apertura angular respecto a la posición de equilibrio, aproximadamente, para las barras 2 de sección cuadrada y circular, y la barra 4 de sección cuadrada. En cambio la razón de aumento para la segunda y tercera columna de velocidades es de 0.46 y 0.42 m/s por cada 10° respectivamente.

Para simplificar y hacer más clara y comprensible la exposición de datos, aproximamos los valores de velocidad de todas las barras a unos valores más significativos y fáciles de recordar, de forma que evitamos tener muchos datos de velocidad para cada barra. Los valores de velocidad que representamos son 0.5, 1, 1.5, 2, y 2.5 m/s respectivamente, de forma que de aquí en adelante estos serán los que utilizaremos y a los que no referiremos. De esta manera tenemos una mejor visualización en los resultados, y cuando se precise conocer la velocidad exacta, recurrimos a esta tabla para obtener el valor concreto.

Mostramos en la siguiente figura distintas imágenes donde podemos apreciar la colocación de los sensores, del sistema mecánico cabeza-cuello, la disposición de las coberturas, el acople de las barras a la mesa de ensayos, el acondicionador de señal, la tarjeta de adquisición de datos y el ordenador con el software utilizado abierto, es decir, el montaje de todos la instrumentación utilizada durante la recogida de datos en los ensayos efectuados.



Figura 44. Montaje del sistema durante la realización de los ensayos

Estudio de la influencia de la rigidez

Refiriéndonos a la influencia de la rigidez, debido a que teníamos que seleccionar una barra de sección circular para poder llevar a cabo el estudio, la colocación de la instrumentación no ha sido posible realizarla de un modo eficaz para obtener unos valores veraces de los sensores, por lo que finalmente hemos desestimado la realización de estos ensayos.

III.5- Modelado y simulación en SimMechanics

Llegados a este punto, y una vez descrita toda la parte real y experimental de nuestro proyecto, toca describir el lado virtual del mismo. Vamos a definir con detalle los modelos elaborados en el software de entorno virtual SimMechanics, perteneciente a MATLAB, así como las simulaciones realizadas a través del mismo en la computadora. Estos modelos y simulaciones han de ser lo más parecido posible a la realidad, adaptando, en algunos casos, elementos mecánicos reales difíciles de definir a sistemas virtuales equivalentes.

Para mejorar la comprensión del modelado virtual y de la simulación, y hacerla más sencilla, dividimos estos en diferentes etapas de diseño, comenzando por la descripción del modelo del sistema cabeza-cuello, siguiendo por el del brazo mecánico, y finalizando con los detalles del bloque de impacto. Seguidamente exponemos el modelo elaborado al completo y definimos la situación de impacto que se lleva a cabo en la simulación.

También, para visualizar de una mejor manera el sistema que tenemos y comprender algunas dimensiones del mismo, asociadas a nombres de variables que detallamos más adelante, en la figura 44 mostramos un esquema donde podemos ver algunos detalles.

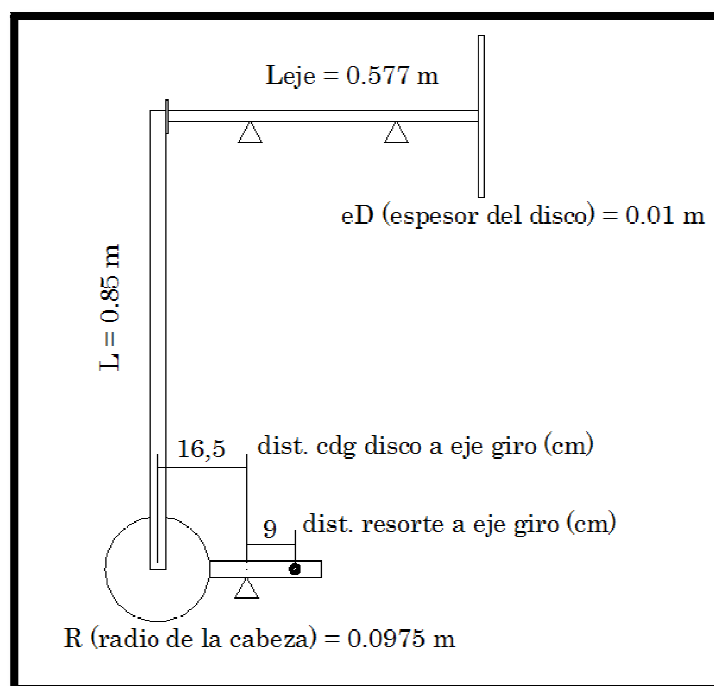


Figura 44. Esquema mesa de ensayos y sistema mecánico

III.5.1-Modelado del sistema cabeza-cuello

Este primer modelo elaborado representa la parte que va a recibir los impactos por parte del brazo mecánico durante las simulaciones. Se trata de la simulación de una cabeza y de un cuello humano. Para ello hemos usado los bloques que se muestran en la siguiente figura, disponibles en las bibliotecas de Simulink, y los cuales describimos a continuación.

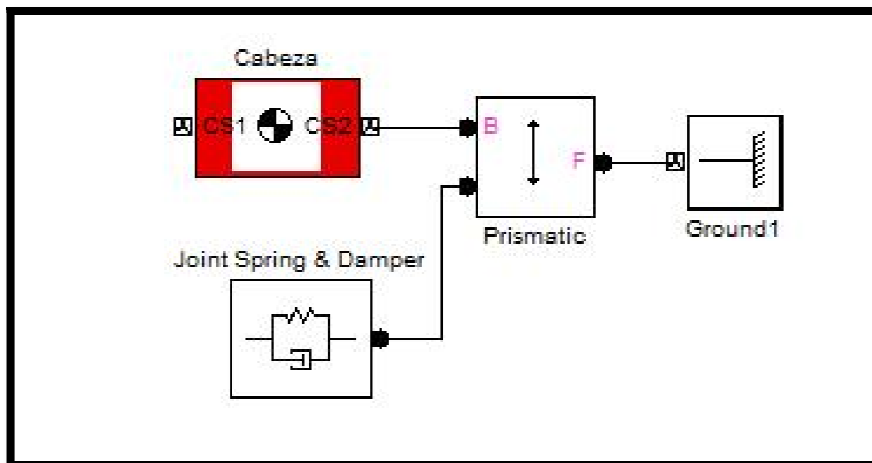


Figura 45. Modelo de la cabeza y el cuello en SimMechanics.

En primer lugar, la cabeza la hemos definido con un bloque *Body* (cuerpo), al cual le suministramos unos valores de masa e inercia correspondientes con los que tengan los elementos usados en las experimentaciones reales. El cuello es representado mediante una articulación prismática, la cual sólo permite el movimiento del cuerpo adjunto en un eje, el eje x en nuestro caso, y a la que se le añade un bloque llamado *Joint Spring & Damper* que actúa como un amortiguador lineal, con una constante de rigidez y una amortiguación determinada. Nos permite restringir dicho movimiento introduciendo los valores de constante de rigidez y amortiguación convenientes, siendo estos en nuestro caso a los que corresponden con los que tenemos en el sistema mecánico cabeza-cuello de fabricación UAL, pero adaptados al modelo realizado. Por último tenemos el bloque *Ground1*, que no es más que un punto fijo en el espacio respecto del que se mueve la cabeza con la restricción de los dos bloques descritos anteriormente. Podemos definir la ubicación de este punto fijo en el espacio introduciendo unas coordenadas determinadas, siendo en nuestro caso distintas de las coordenadas pertenecientes al bloque *Ground* principal, como detallamos más adelante.

Como hemos comentado, los valores que les damos a las variables en cada bloque son las que corresponden en cada caso con los valores que tenemos en nuestro sistema mecánico cabeza-cuello, que hemos utilizado durante los ensayos experimentales. Algunas de estas variables precisan de una adaptación previa, es decir, debemos buscar un valor equivalente que adapte lo que tenemos en la realidad a los sistemas que hayamos modelado en cada caso. A continuación exponemos los cálculos que han sido necesarios realizar para adaptar los valores que definen cada bloque, los datos que no han necesitado adaptación, sino que el modelado ha sido realizado en igualdad con la realidad, y también detallamos todos los parámetros que hemos utilizado para definir cada uno de los bloques de esta parte, indicando el nombre de las variables utilizadas y su valor correspondiente, ya que en los bloques hemos introducido los nombres de las variables, y los valores a estas variables se los hemos asignado en un archivo M-File de MATLAB, para que resultara más cómodo a la hora de realizar cualquier tipo de variación de algún dato determinado.

El valor de rigidez que introducimos necesita una adaptación, debido a que nuestro mecanismo emula un resorte de torsión, y, en la simulación, el valor de la constante de rigidez a introducir debe de ser referido a un resorte lineal, por lo que tendremos que hacer la conversión. Si nuestro mecanismo emula un resorte de torsión con una constante de rigidez de $10 \text{ N} \cdot \text{m}/\text{rad}$, y el impacto se produce a una distancia de 15 cm del punto de giro de la barra, obtenemos de manera sencilla el valor de la constante de rigidez para un resorte lineal aplicando la siguiente fórmula, ya utilizada en cálculos anteriores:

$$k_l = \frac{k_t}{d^2} = \frac{10 \text{ N} \cdot \text{m}/\text{rad}}{(0.15 \text{ m})^2} = 444,44 \text{ N/m}$$

El otro valor que hay que adaptar al sistema que hemos modelado es la masa que posee la cabeza. Nuestro sistema posee una inercia propia, que representa la inercia que tiene una cabeza humana, como se explicó en el apartado que describía el sistema cabeza-cuello en materiales utilizados. Ahora bien, el punto donde se producen los impactos está a 0.15 m del punto de giro de la barra que representa el cuello, esto supone 1.5 cm menos del punto donde tenemos colocado el centro de gravedad del disco que representa la cabeza y cuya masa es de 2.3 kg . Por lo tanto, el valor a introducir de masa en las simulaciones debe de ser el adecuado para que nos proporcione al sistema la misma inercia que posee el sistema real utilizado. A partir de la ecuación de Steiner, sabiendo los valores de inercia respecto al eje de giro que queremos obtener, el que tiene el sistema real, la distancia a la que se produce el impacto respecto al mismo, y el valor de inercia del

propio disco, obtenemos el valor de la masa que tenemos que introducir en las simulaciones.

$$m = \frac{I_{ejegiro} - I_{cdgdisco}}{d^2} = \frac{0.0683 - 0.005466}{(0.15)^2} = 2,793 \text{ kg}$$

Y para finalizar este apartado, exponemos todos los parámetros que hemos introducido para definir los bloques utilizados, con los nombres de las variables utilizadas y su valor en cada caso.

- ❖ Cabeza:
 - Bloque utilizado → *Body*
 - Variables utilizadas → *masacabeza* (2.793 kg)
 - *Izcabeza* (0.0683 kg · m²)
 - Puntos que lo definen → CG [R R-L 0] (m) respecto a Ground ([0 0 0])
 - CS1 [0 R-L 0] (m) respecto a Ground

- ❖ Cuello:
 - Primer bloque utilizado → *Prismatic Joint*
 - Ejes de acción [x y z] → [1 0 0]
 - Segundo bloque utilizado → *Joint Spring & Damper*
 - Variables utilizadas → *kcuello* (444.44 N/m)
 - *dcuello* (10 Ns/m)

- ❖ Punto de referencia:
 - Bloque utilizado → Ground1
 - Localización [x, y, z] → [R -L 0]

III.5.2-Modelado del brazo mecánico

El segundo modelo que vamos a detallar corresponde con el que representa el eslabón con movimiento pendular, acoplado en uno de sus extremos a un eje, sobre el que gira solidariamente, y al cual se le añade en el otro extremo un volante de inercia representando el momento de inercia que posee un rotor de un motor encargado de mover el brazo de un robot de estas características.

Los bloques utilizados los podemos apreciar en la figura 46, y seguidamente describimos los detalles y particularidades de cada uno de ellos.

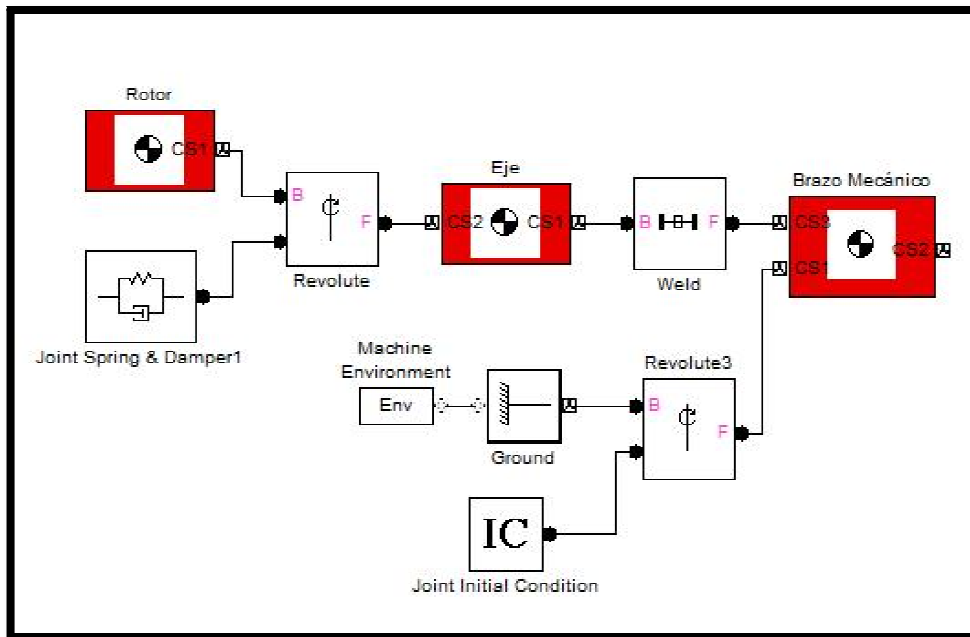


Figura 46. Modelo del brazo mecánico en SimMechanics.

Comenzamos definiendo el eslabón que se encarga de impactar contra el modelo de la cabeza humana. Lo hemos definido introduciendo un bloque *Body*, el cual representa un cuerpo rígido, ya que dos modelos de eslabón flexible disponibles en el software utilizado, no nos proporcionaban resultados certeros en distintas pruebas realizadas, por lo que desestimamos su utilización en el modelo elaborado. Podemos ver la apariencia de los mismos, y los bloques que los forman, en las figuras 47 y 48.

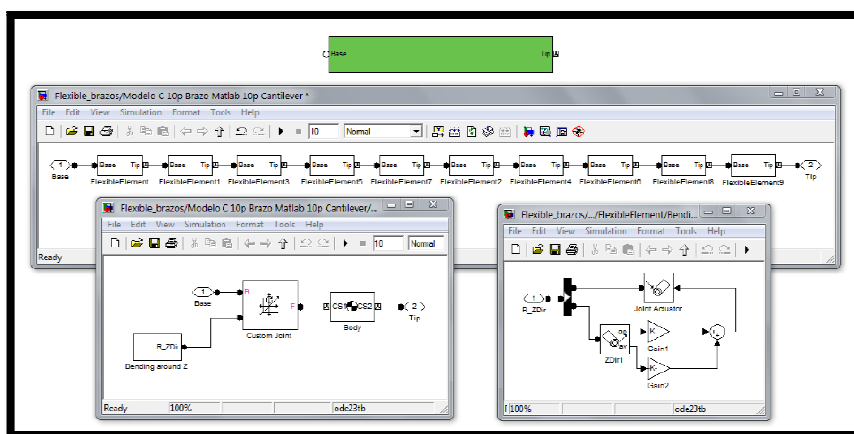


Figura 47. Modelo de eslabón flexible creado por técnicos de MATLAB.

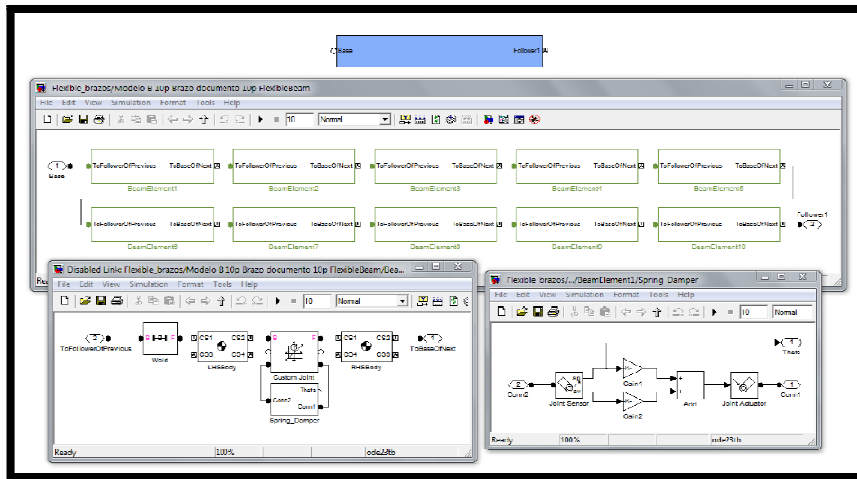


Figura 48. Modelo de eslabón flexible disponible en la web de MATLAB.

Utilizamos por lo tanto un bloque *Body*, el cual tampoco nos da unos resultados que se acerquen a los obtenidos experimentalmente, pero de este bloque sabemos que representa un cuerpo totalmente rígido, sin ningún tipo de amortiguamiento ni de uniones flexibles. Partiendo de esa base, como el objetivo de este proyecto es estudiar la influencia que tienen en los impactos las coberturas que tengamos en el punto del impacto, la inercia de las barras, y la rigidez de las mismas, a pesar de que un brazo rígido nos da unos resultados en las simulaciones más elevados que los obtenidos en las simulaciones, los valores de influencia que estudiaremos de cada uno de los parámetros deberán corresponder con los obtenidos en los ensayos reales. La única restricción que vamos a tener en este estudio es la de simular la influencia de la rigidez de las barras, puesto que si utilizamos un bloque que es totalmente rígido no podremos variar esta rigidez y, por lo tanto, no podremos analizar cómo influye este parámetro en los resultados que obtengamos. Además, tampoco vamos a poder compararlos con los que obtengamos de manera experimental.

Podemos ver en la parte inferior de la figura x cuatro bloques que están unidos a la entrada CS1 del brazo. Lo que representan estos bloques es el punto de referencia a partir del cual gira el brazo, y el ángulo de partida del mismo. El bloque *Machine Environment* se encarga de proporcionarle al sistema la fuerza de la gravedad, aplicando una fuerza constante al sistema en el sentido negativo del eje Y. Este va conectado al bloque *Ground*, que en este caso representa el origen de todo el sistema. A su vez, el bloque *Ground* va conectado a una articulación de revolución, *Revolute3*, que permite el giro del cuerpo al que se conecta respecto al eje indicado, de forma que la barra pueda girar en torno al eje Z respecto a uno de sus extremos, indicado esto en los parámetros a introducir en cada bloque. Y por último, el bloque que resta, llamado *Joint Initial Condition*, que está conectado también a la

articulación, tiene la función de proporcionar un condición inicial de partida, en nuestro caso el ángulo desde el cual se suelta la barra para que golpee con una determinada velocidad a la cabeza, de forma que al iniciar la simulación, la barra se encuentra con la apertura angular indicada en este bloque.

Los bloques situados en la parte superior de la figura x representan el eje donde va acoplada la barra, y que gira de manera solidaria con este, y la inercia que posee un rotor, así como la rigidez que le da al mismo una reductora, simulando un sistema rotor-reductora. El primer bloque que está conectado a la barra se denomina *Weld*, y se utiliza para representar una unión fija entre dos cuerpos, una unión soldada, de forma que el movimiento de ambos sea solidario. El otro cuerpo al que se fija la soldadura es el eje, al que tenemos acopladas las barras en nuestra mesa de ensayos. Lo representamos mediante un bloque *Body*, ya que si queremos simular un rotor, junto con su reductora, que mueva un brazo robot acoplado, el eje no sería necesario, por lo que le aplicamos una rigidez absoluta para que no nos afecte en el diseño, aunque por otra parte si utilizaremos la rigidez que tenga este a la torsión de forma que represente la rigidez característica de una reductora. Esto lo hacemos uniendo, mediante una articulación de revolución con una determinada rigidez, el bloque que representa al eje con el bloque que representa el rotor. Para ello, tenemos colocado *Revolute*, cuya función está descrita, y al cual le hemos unido *Joint Spring & Damper1*, de forma que podamos introducirle la constante de rigidez a la torsión mencionada. Y para finalizar, le agregamos al otro extremo de la revolución el rotor, representado con otro bloque *Body*, que va a tener una inercia característica de un rotor cuyas dimensiones sean las apropiadas para poder mover las barras que estamos utilizando.

A continuación, mostramos los parámetros introducidos que definen los bloques utilizados, con los nombres de las variables utilizadas y su valor en cada caso.

- ❖ Brazo:
 - Bloque utilizado → *Body*
 - Variables utilizadas → *masabarra* *ibarraZ*
 - Valor de las variables: En función de la barra utilizada
 - Puntos que lo definen → CG $[0 \ -L/2 \ 0]$ (m) respecto al mundo ($[0 \ 0 \ 0]$)
 - CS1 $[0 \ 0 \ 0]$ (m) respecto al mundo

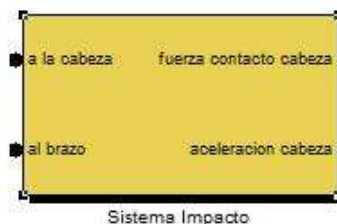
- CS2 [0 -L 0] (m) respecto al mundo
- CS3 [0 0 0] (m) respecto al mundo
- ❖ Eje:
 - Bloque utilizado → *Body*
 - Variables utilizadas → masa eje (1.423 kg)
 - Izeje ($7.11 \cdot 10^{-5} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$)
- Puntos que lo definen → CG [0 0 -Leje/2] (m) respecto al mundo
 - CS1 [0 0 0] (m) respecto al mundo
 - CS2 [0 0 -Leje] (m) respecto al mundo
- ❖ Rotor:
 - Bloque utilizado → *Body*
 - Variables utilizadas → masa rotor (5.55 kg)
 - Izrotor ($0.06242 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$)
- Puntos que lo definen → CG [0 0 -Leje-eD/2] (m) respecto al mundo
 - CS1 [0 0 -Leje] (m) respecto al mundo
 - CS2 [0 0 -Leje-eD] (m) respecto al mundo
- ❖ Reductora:
 - Primer bloque utilizado → *Revolute*
 - Ejes de acción → [0 0 1]
 - Segundo bloque utilizado → *Joint Spring & Damper1*
 - Variables utilizadas → Krotor ($2.28 \cdot 10^3 \text{ Nm/rad}$)
 - Drotor (1Ns/m)
- ❖ Weld:
 - Ejes de acción → [0 0 1]
- ❖ Revolute3:
 - Ejes de acción → [0 0 1]
- ❖ Ground:
 - Punto de referencia del sistema. Localización [0 0 0] (m).
- ❖ Joint Initial Condition:
 - Condición inicial de apertura angular del brazo en radianes.

❖ Machine Environment. -Vector gravedad → [0 -9.81 0] (m/s²)

III.5.3-Modelado del bloque de impacto

Definidos los dos elementos que van a entrar en contacto, toca describir el modelo que simule el comportamiento de estos durante esa situación de impacto. Como sabemos, en el instante del choque la velocidad de ambos cuerpos es nula, y al golpear el brazo contra la cabeza este le aplica un fuerza contra la misma, que es a su vez reciproca pero en sentido opuesto, y desemboca en un desplazamiento por parte de los dos cuerpos, siendo en la dirección del impacto por parte de la cabeza, con una determinada aceleración, y en dirección opuesta por parte del brazo. Por lo tanto, debemos de crear un sistema que recree todas estas situaciones descritas.

Gracias a los ejemplos que incluye MATLAB en su herramienta Simulink, nos vamos a ayudar de uno de ellos que recrea una situación en la que una pelota impacta contra el suelo y rebota, algo que nos facilita en gran medida el trabajo a realizar. Este ejemplo, llamado *Bouncing Ball*, se basa en los mismos principios de acción y reacción que nosotros tenemos en nuestra situación de impacto. A este sistema disponible en las ayudas de MATLAB le hacemos unas pequeñas modificaciones para adaptarlo a las peculiaridades de nuestro caso particular, de forma que la disposición final queda con la apariencia que mostramos en la siguiente figura.



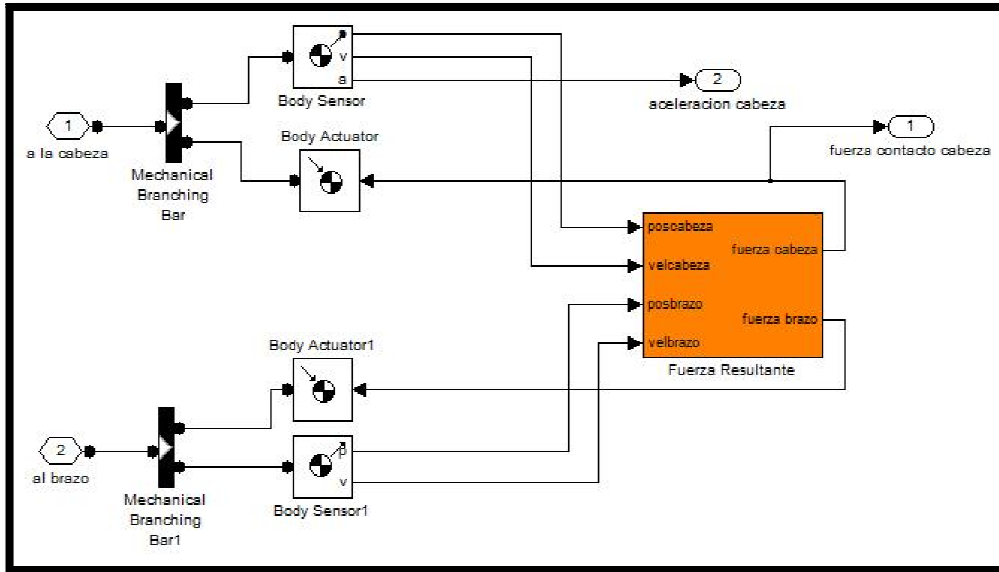


Figura 49. Sistema encargado de simular el impacto. Su icono arriba.

Podemos ver en la parte izquierda de la figura que tanto el modelo de la cabeza como el del brazo se encuentran conectados a este sistema, y, a su vez, también están sensorizados a través de los bloques *Body Sensor*, de manera que el sistema controla los parámetros de posición, velocidad y aceleración de ambos miembros, y se los envía al subsistema *Fuerza Resultante* para que determine la fuerza que se produce durante el choque. Sus dos salidas se conectan a los bloques *Body Actuator* para enviarles los datos de esas fuerzas resultantes y estos puedan proporcionarle a ambos cuerpos un determinado movimiento en función del valor recibido.

Los bloques que se encuentran en el interior del subsistema *Fuerza Resultante* los describimos tras la figura 50, la cual muestra la apariencia del mismo.

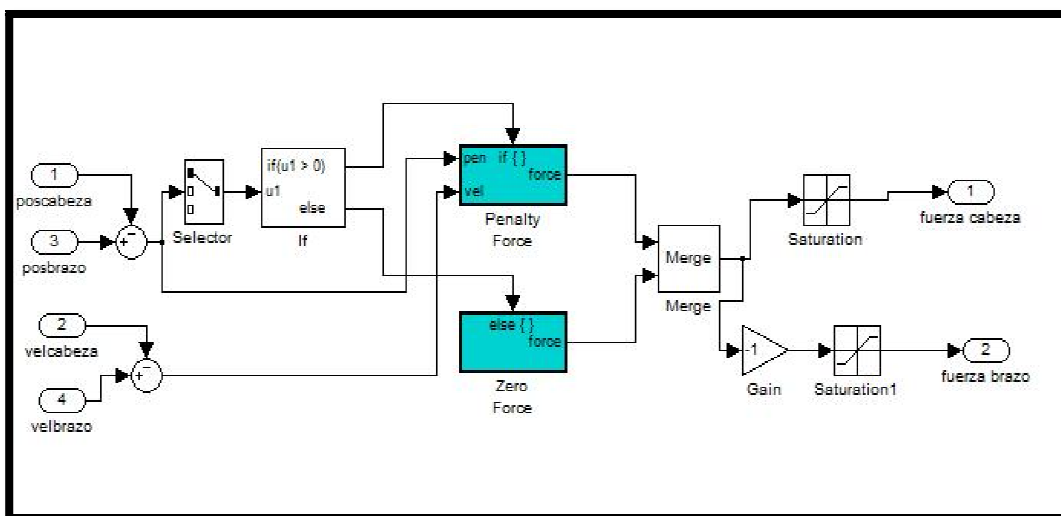


Figura 50. Subsistema *Fuerza Resultante*.

En primer lugar, vemos que este subsistema tiene cuatro entradas, correspondientes a las posiciones de la cabeza y del brazo en todo momento, y a las velocidades de los mismos. Esto es así porque este subsistema lo que hace es comparar las posiciones y las velocidades de cada cuerpo, restando ambos parámetros con el bloque *Sum* para realizar todos sus cálculos. La señal que se obtiene de la resta de las posiciones de los dos cuerpos para el bloque *Selector*, el cual permite seleccionar un elemento de una señal multidimensional, de forma que en este caso lo hace con la señal de posición en el eje X. Esta señal de posición pasa al siguiente bloque, el bloque *If*, cuyo funcionamiento es simple, si se cumple una determinada condición se realiza una acción, si no se ejecuta otra diferente. En nuestro caso, la condición para que la señal se dirija hacia el subsistema *Penalty Force*, es que la diferencia entre las posiciones de la cabeza y el brazo sea mayor de cero, lo cual querría decir que ambos cuerpos han entrado en contacto y hay que determinar la fuerza resultante, ya que tenemos situada la cabeza en el origen del eje X, y el brazo inicia su movimiento en una posición del sentido negativo de este. Si, por el contrario, no se cumple la condición de que la diferencia entre ambas posiciones sea mayor de cero, es decir, el contacto entre ambos cuerpos aún no se ha producido, tenemos que la señal se dirigirá hacia el subsistema *Zero Force*.

El subsistema *Penalty Force* se encarga de determinar la fuerza resultante en el impacto mediante la aplicación de la ley de elasticidad de Hooke, utilizando para ello los parámetros de diferencia de velocidad y posición entre la cabeza y el brazo, e incluyendo en el cálculo unas constantes de rigidez y amortiguación entre los cuerpos en el impacto, que son introducidas a través del bloque *Gain*. Los valores de las constantes a utilizar en nuestro caso las definiremos más adelante, junto con el resto de variables, y su valor, utilizadas en este modelado de la situación de impacto, pero cabe decir que en nuestro proyecto este es un objeto de estudio, como ya sabemos, ya que esas constantes tendrán distintos valores dependiendo de la cobertura que se coloque entre la cabeza y el brazo.

En el caso de no cumplirse la condición detallada anteriormente, la señal se dirige hacia el subsistema *Zero Force*, como hemos comentado, y el cual da como resultado a su salida que la fuerza resultante entre ambos elementos es cero, ya que si la señal se ha dirigido hacia este subsistema quiere decir que aún no se ha producido ningún contacto entre ellos.

La apariencia de ambos subsistemas la podemos ver en la siguiente figura.

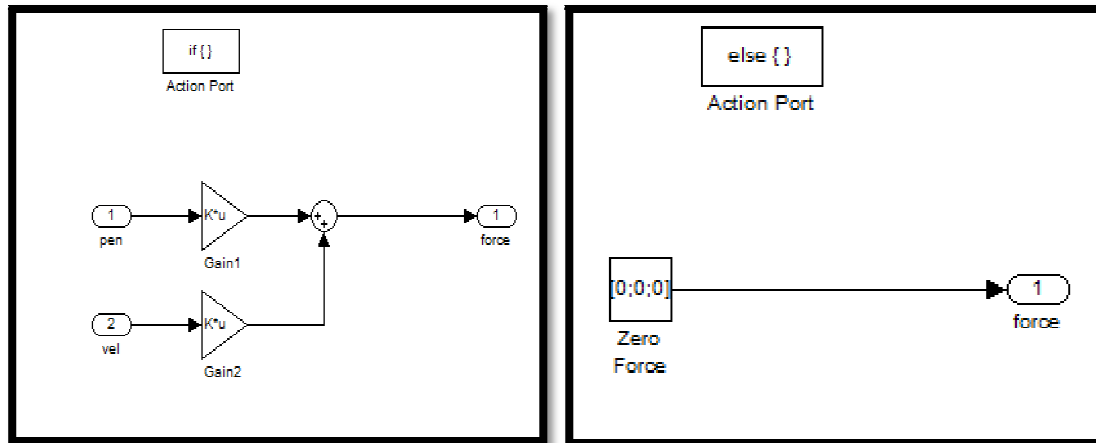


Figura 51. Subsistemas *Penalty Force*, a la izquierda, y *Zero Force*, a la derecha

Siguiendo con la explicación del subsistema *Fuerza Resultante*, vemos que tanto la señal que sale del subsistema *Penalty Force*, como la señal que se obtiene del subsistema *Zero Force*, se dirigen hacia el bloque *Merge*, el cual se encarga de recibir diferentes señales, pero que únicamente transmite la última señal recibida, así, a la salida del subsistema, tendremos la señal adecuada a cada instante. A continuación observamos que la señal se divide en dos ramas, en una prosigue con su valor normal, y en la otra es multiplicada mediante el bloque *Gain* para hacerla negativa. Esto es debido a que la fuerza resultante en el impacto no tiene el mismo sentido para el brazo como para la cabeza, a pesar de que el valor de su magnitud sea la misma. La señal positiva, que se dirige hacia la salida que se conecta al modelo de la cabeza, se encuentra con un último bloque, llamado *Saturation*, y el cual se encarga de limitar la señal a unos determinados valores, de manera que, en nuestro caso, la señal que se dirige a la salida que va hacia la cabeza no pueda tomar unos valores negativos en cuanto a fuerza de impacto se refiere, y la señal que se dirige a la salida que se conecta al modelo del brazo no pueda tomar unos valores positivos de fuerza. Esto lo hemos hecho así debido a que en nuestro modelo no existe ningún elemento que haga posible que los valores de fuerza resultante para aplicar a cada cuerpo sean contrarios a los mencionados.

Las señales de las fuerzas resultantes calculadas por el subsistema *Fuerza Resultante* se conectan cada una al bloque *Body Actuator* correspondiente, mediante otro bloque llamado *Mechanical Branching Bar*, que lo usamos para converger los puertos de conexión en uno solo y simplificar la representación.

Y para finalizar, también comentar que las señales de fuerza resultante sufrida por la cabeza y de aceleración que la cabeza adquiere debido al impacto, son exportadas a unas variables, llamadas *fcontacto* y *acabeza*,

para poder trabajar con los datos que contienen en el espacio de trabajo de MATLAB.

A continuación exponemos cada una de las variables introducidas en los distintos bloques utilizados en este modelado, así como cualquier parámetro de importancia introducido para definirlos o para obtener el resultado deseado.

- ❖ *Body actuator* (ambos) → Fuerza aplicada en Newton
- ❖ *Body sensor* → Parámetros medidos → Posición (m)
→ Velocidad (m/s)
→ Aceleración (m/s²)
- ❖ *Body sensor1* → Parámetros medidos → Posición (m)
→ Velocidad (m/s)
- ❖ *Selector* → Elemento seleccionado del vector entrada → [1]
- ❖ *If* → Condición → $u1 > 0$
- ❖ *Saturation* → Intervalo → [0, inf]
- ❖ *Saturation* → Intervalo → [-inf, 0]
- ❖ *Gain* → -1
- ❖ *Gain1* → [Kcob 0 0;0 0 0;0 0 0]
- ❖ *Gain2* → [Dcob 0 0;0 0 0;0 0 0]

III.5.4- Simulación de la situación de impacto

Definidas y detalladas todas y cada una de las distintas partes que componen el modelo final de nuestra mesa de ensayos con el brazo mecánico, el eje y el volante de inercia, y del sistema mecánico cabeza-cuello, y además también tenemos modelada la situación de impacto, basta con unir todos estos modelos elaborados convenientemente, de manera que podamos simular la situación de impacto conforme lo hemos realizado en los ensayos experimentales.

Mostramos en la figura 52 la apariencia que tiene el modelo completo conectado de forma precisa.

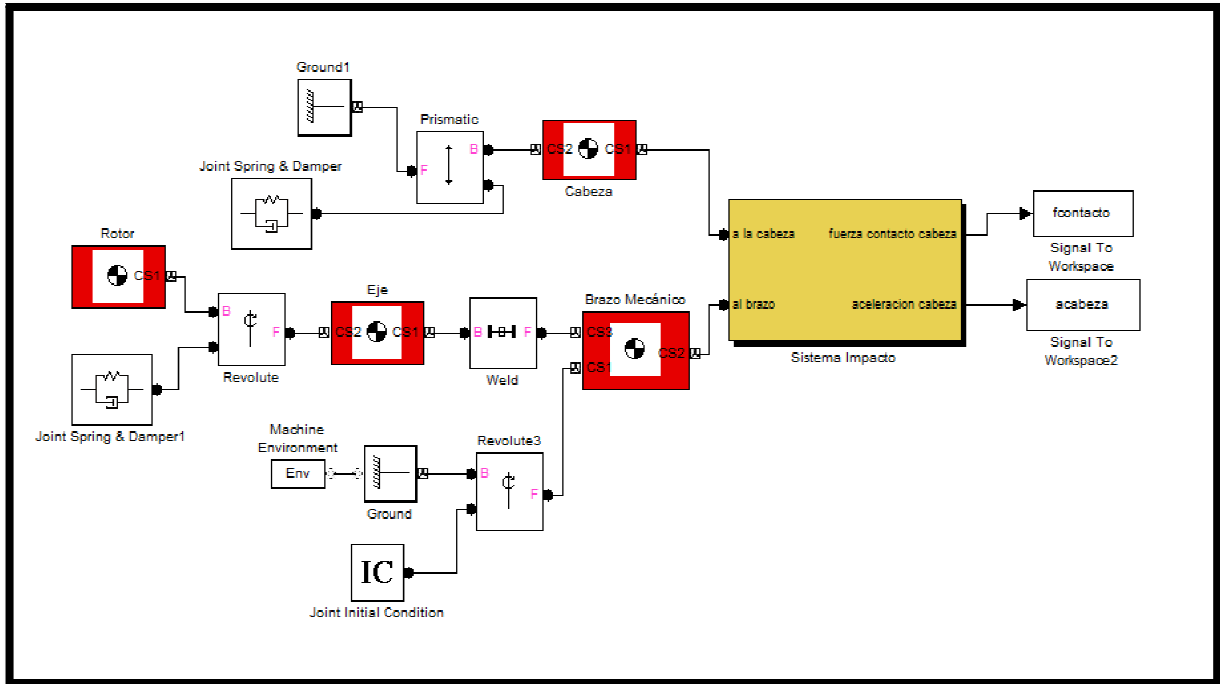


Figura 52. Modelo completo del sistema creado para realizar el estudio.

Vemos en la figura que el sistema impacto es el que se encarga de conectar el modelo de la cabeza con el modelo del brazo, ya que es el responsable de relacionar los parámetros de velocidad y posición de ambos y obtener los resultados que queremos de los impactos, cuando estos llegan a producirse, como hemos comentado con anterioridad. Además, en las salidas del sistema impacto, a las cuales están conectadas las señales finales de aceleración de la cabeza y de fuerza de contacto en el impacto, tenemos los bloques *Signal to Workspace*, los cuales se encargan de almacenar los datos en variables, en nuestro caso las variables *acabeza* y *fcontacto*, nombradas anteriormente.

El modelo final que se muestra en la figura 52 es con el que llevamos a cabo las simulaciones que nos permiten estudiar los factores que son objeto de análisis en este proyecto, y del que obtenemos todos los datos necesarios de las mismas, todo ello en concordancia con la toma de datos que se realiza en los ensayos reales.

Para que se de esta concordancia que hemos nombrado, lo que hacemos en las simulaciones es reproducir de manera virtual justamente los métodos seguidos en los ensayos experimentales. Por lo tanto, en primer lugar llevaremos a cabo el estudio de la influencia de las coberturas existentes en el punto de impacto. Para ello lo que hacemos es modificar el valor de la variable asociada a la constante de rigidez en el punto de impacto, que se encuentra en el sistema impacto. En este punto nos surge un problema, ya que el valor de las constantes de rigidez de la coberturas utilizadas no lo tenemos a nuestro alcance, por lo que en las simulaciones vamos a modificar

el valor de esta variable de acuerdo a otro método. Lo que vamos a hacer es asignar a la variable asociada a la constante de rigidez en el impacto, en un primer lugar, un valor de constante de rigidez alto, que represente el valor de rigidez de un cráneo, al cual creemos que se aproximaba la primera configuración de cobertura utilizada. A partir de aquí, reducimos este valor de acuerdo a lo realizado en las experimentaciones, es decir, si en los ensayos hemos usado tres capas del primer material, consecuentemente hemos reducido el valor de la constante de rigidez de la cobertura en un 66%, lo hemos dividido entre 3. Del mismo modo para el tercer tipo de cobertura, en el que recordamos que utilizamos 6 capas de goma EVA tipo1. Para el cuarto tipo de cobertura a simular nos vuelve a surgir el problema de la constante de rigidez a asignarle, ya que es otro tipo de configuración del mismo material. Para este caso nos basaremos en los resultados obtenidos experimentalmente, de forma que, basándonos en las gráficas obtenidas, vemos que el cuarto tipo de cobertura utilizada es algo más rígida que la tercera. En cuanto a la quinta cobertura a simular, como es del mismo tipo de material usado que en la cuarta, pero con el doble de espesor, hacemos lo mismo que en los casos anteriores, dividimos entre dos el valor que le asignemos a la cobertura número 4.

De todos modos, estas simulaciones nos darán unos datos, de fuerza aplicada sobre la cabeza y aceleración consecuente de la misma, distintos de los experimentales, aunque los valores de influencias si deberían de coincidir, por lo menos entre las tres primeras configuraciones, por un lado, y de las dos restantes, por el otro. Por otra parte, este contratiempo tiene un lado positivo, ya que nos hace ampliar el campo de estudio de coberturas, ya que tendremos datos de parámetros recogidos por los sensores para 5 tipos distintos de coberturas gracias a las experimentaciones, cuyos materiales y espesor son conocidos, y de otros 5 tipos distintos de coberturas obtenidos de las simulaciones, con los valores de constante de rigidez identificados.

Los datos que introducimos en las simulaciones los basamos, como hemos dicho, en un valor de rigidez muy alto, exactamente de 10^6 N/m, que corresponde con el valor de rigidez de un cráneo humano, según el artículo publicado por Sami Haddadin [23]. Obtenido el dato para esa constante específica, correspondiente con el primer tipo de cobertura simulada, iremos reduciendo el valor de la misma, de la forma que hemos detallado, resultando los valores a introducir en la variable de $3,33 \cdot 10^5$ N/m, $1,67 \cdot 10^5$ N/m, $2 \cdot 10^5$ N/m, y 10^5 N/m para los tipos 2, 3, 4 y 5 de coberturas respectivamente.

Y en segundo lugar llevamos a cabo el estudio de la influencia de la inercia que poseen las barras sobre los datos que recogemos. Para estas

simulaciones el procedimiento es sencillo, basta con modificar el valor de la variable asociada a la inercia de la barra, de forma que lo equiparemos a los valores con los que hemos realizado los ensayos, así, a pesar de que en las simulaciones el eslabón es rígido y en las experimentaciones es flexible, lograremos estudiar los niveles de influencia de este parámetro.

A partir de los valores que tenemos calculados en el apartado en el que detallamos las barras a utilizar, así como los aumentos de inercia realizados y los valores de los mismos, obtenemos los datos de inercia respecto del centro de gravedad de cada una de las barras que vamos a simular, aplicando para ello de nuevo el teorema de Steiner. Realizando el sencillo cálculo pertinente, los valores de estos momentos de inercia a introducir en el software para llevar a cabo las simulaciones son, para la primera configuración de barra, $I_{B1}=0,080123 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$, obtenido este primero directamente de la tabla de características de las barras de sección cuadrada, barra 2. Para el segundo tipo de configuración, el valor a introducir en el software, obtenido del cálculo, es $I_{B2}=0,373282 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$. Y para el tercer tipo de barra simulado, el valor del momento de inercia respecto a su centro de gravedad, de forma que multiplique por 4 el momento de inercia respecto al eje de giro de la barra del tipo 1, es $I_{B3}=0,665944 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$.

Cabe concretar que, el parámetro que corresponde con la condición inicial de apertura angular de la barra con respecto a su posición de equilibrio, cuyas unidades están en radianes, también es objeto de modificación, ya que hacemos las simulaciones para las mismas aperturas de ángulos que en los ensayos reales. Entonces, efectuamos las simulaciones que hemos comentado para unos valores de condición inicial de $\frac{\pi}{18}$ rad (10°), $\frac{\pi}{9}$ rad (20°), $\frac{\pi}{6}$ rad (30°), $\frac{4\pi}{18}$ rad (40°), $\frac{5\pi}{18}$ rad (50°). Además, aumentaremos más aún estos valores, ya que en las simulaciones no hay peligro de dañar los sensores o cualquier parte del utillaje, de forma que veamos las velocidades límite a las que se produciría una rotura craneal. Los valores a introducir para aumentar la velocidad los indicaremos en cada caso, ya que en principio no sabemos el nivel máximo de velocidad alcanzada a la que se produciría la rotura para unas barras con las características propias de las que empleamos.

IV. Resultados y Discusión

IV.1-Introducción

En este capítulo vamos a exponer los resultados obtenidos en las experimentaciones llevadas a cabo, en una primera parte, en la que, además de mostrar y detallar todas las gráficas obtenidas en cada uno de los estudios realizados a cada factor, estudiamos la influencia de los distintos factores, calculamos los valores de HIC y analizamos las fuerzas pico que se dan en los ensayos, para determinar los posibles daños que se producirían en una cabeza humana. El análisis de daños, tanto para el cálculo del HIC como para la comparación de las fuerzas aplicadas sobre la cabeza obtenidas con las fuerzas límite de rotura craneal de referencia que tenemos, lo efectuaremos únicamente en los casos más desfavorables de cada estudio de influencia de los factores, que previsiblemente serán los ensayos cuya velocidad de impacto de la barra contra la cabeza sea de 2.5 m/s.

En segundo lugar en este capítulo, realizamos el mismo proceso que hemos detallado para los ensayos experimentales, sólo que en este caso los datos que mostramos son los que nos proporciona el software utilizado. Paralelamente con la exposición de resultados, en la medida de lo posible haremos una comparación de los niveles de influencia de cada parámetro obtenidos virtual y experimentalmente. Además, comentaremos los detalles más importantes que surjan durante esta exposición de resultados en el apartado de observaciones, de manera que todo quede bien clarificado.

IV.2-Resultados obtenidos en la fase experimental

Como bien sabemos, lo que estamos estudiando en este proyecto es la influencia de tres parámetros concretos en los resultados, que obtenemos de los sensores, de fuerza aplicada sobre la cabeza en un impacto y de la aceleración que experimenta esta debido al choque. Por lo tanto, este apartado lo dividiremos en tres partes, coincidiendo cada una con un factor objeto de estudio. En primer lugar exponemos los resultados obtenidos durante los ensayos enfocados a estudiar la influencia de las coberturas en la fuerza aplicada a la cabeza en las colisiones y en la aceleración que experimenta la misma. En un segundo punto, hacemos lo propio con los

resultados obtenidos en cuanto al estudio de la influencia de la inercia de las barras se refiere. Y para finalizar detallamos los datos recogidos enfocados al estudio de la influencia de la rigidez.

El esquema que vamos a seguir en esta presentación de resultados va a ser el de exponer en un primer término una gráfica de cada tipo de datos obtenido (fuerza y aceleración), para cada apartado de estudio de influencia de un parámetro, en la que se reflejen las tres repeticiones realizadas a un ensayo concreto, indicando, en cada caso, los detalles identificativos del mismo. De esta forma vamos a poder ver que los resultados son prácticamente los mismos, para comprobar la correcta realización de los mismos, si bien habrá alguna pequeña variación de los datos, debido a que la precisión con la que soltamos las barras no es perfecta. Además, en todo el sistema que tenemos montado para realizar los ensayos experimentales puede haber algún tipo de vibración o elementos que no estén perfectamente fijados que hagan variar en muy poca cantidad los datos recogidos en cada repetición.

A partir de aquí solo mostraremos en las gráficas los valores de una repetición, la que tenga los valores más altos, para, de esta manera, estudiar el peor de los casos para una cabeza humana, el más desfavorable.

En segunda posición vamos a mostrar una gráfica completa con todos los datos registrados de fuerza o de aceleración, indicando en cada figura el parámetro concreto, en la que se podrán apreciar los impactos posteriores al impacto principal. Esto no lo haremos así nada más que en una ocasión por parámetro estudiado y será a modo de detalle de toda la toma de datos conjunta realizada. Nosotros, en las representaciones, nos centraremos únicamente en el primer impacto, el impacto principal, ya que el resto de impactos son de una considerable menor magnitud, por lo que afectarán en mucha menor medida a los daños que pueda sufrir la cabeza, y además no son objeto de estudio en este proyecto.

Y en tercer lugar reflejamos la influencia de cada uno de los tipos de configuraciones que posean las barras para las velocidades de estudio acordadas.

Por otra parte, como hemos comentado en la introducción a este capítulo, vamos a calcular los valores de HIC para los casos más desfavorables para la cabeza de velocidad de la barra en el momento del impacto en los tres ensayos de influencia de parámetros, para así determinar si la cabeza sufre algún tipo de daño debido a la aceleración sufrida en los impactos. Además, también prestaremos atención a si los valores de fuerza registrados, en los mismos casos que calculamos el HIC, superan los valores límite que tenemos

de referencia, indicando en cada caso si se produciría una rotura craneal o no.

Influencia de la velocidad

Antes de comenzar con los resultados de los factores objeto de estudio, vamos a mostrar la relación que tiene la velocidad de las barras en el impacto con los datos que se registran de fuerza aplicada sobre la cabeza y aceleración de la misma en los citados choques que provocamos. Primero reflejamos esta influencia para en el estudio enfocado a las coberturas, y después la mostramos en los ensayos enfocados a analizar la influencia de la inercia de las barras.

Hemos escogido la primera repetición efectuada a la barra número 4, encargada de realizar los ensayos enfocados al estudio de la influencia de las coberturas, con una configuración de cobertura colocada en el punto de impacto del tipo primero, es decir, de una sola capa de polímero EVA tipo1. En la figura 53 podemos apreciar la evolución que sigue la fuerza aplicada sobre la cabeza a medida que aumenta la velocidad de la barra en el punto de impacto, para la configuración nombrada. Y en la figura 54 podemos ver los mismos detalles explicados pero teniendo en cuenta que el parámetro representado corresponde con la aceleración que sufre la cabeza en cada impacto.

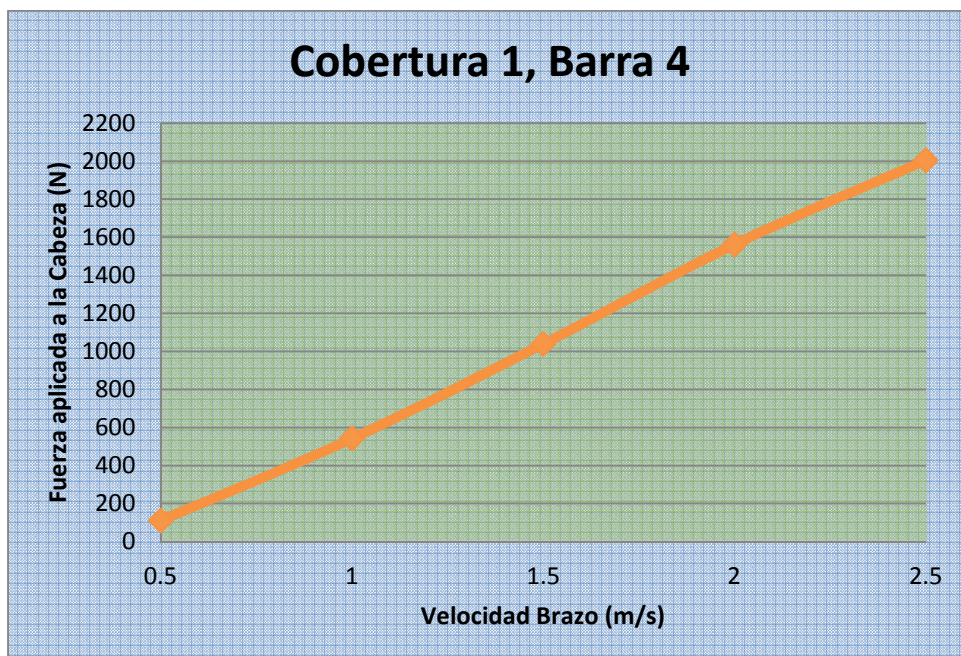


Figura 53. Fuerza en el impacto en función de la velocidad de la barra.

Vemos en esta primera figura que el aumento de la fuerza para las velocidades ensayadas es prácticamente lineal. La aceleración también sigue

por el mismo camino, pero a partir de la penúltima velocidad, parece aumentar la pendiente de la línea, aumentando así la influencia de la velocidad para este parámetro.

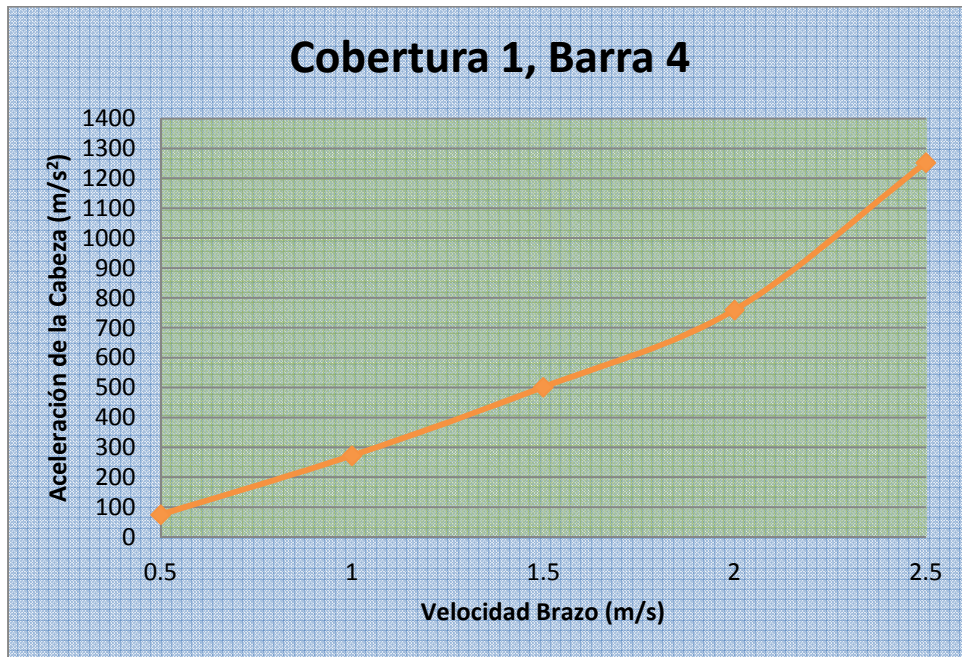


Figura 54. Aceleración sufrida por la cabeza en función de la velocidad de la barra.

La gráfica que mostramos para el caso de la inercia está referida al primer tipo de barra utilizado para estos ensayos. La figura 55 muestra la evolución de la fuerza a medida que aumentamos la velocidad, y la figura 56 la misma situación pero con la aceleración que sufre la cabeza en el impacto.

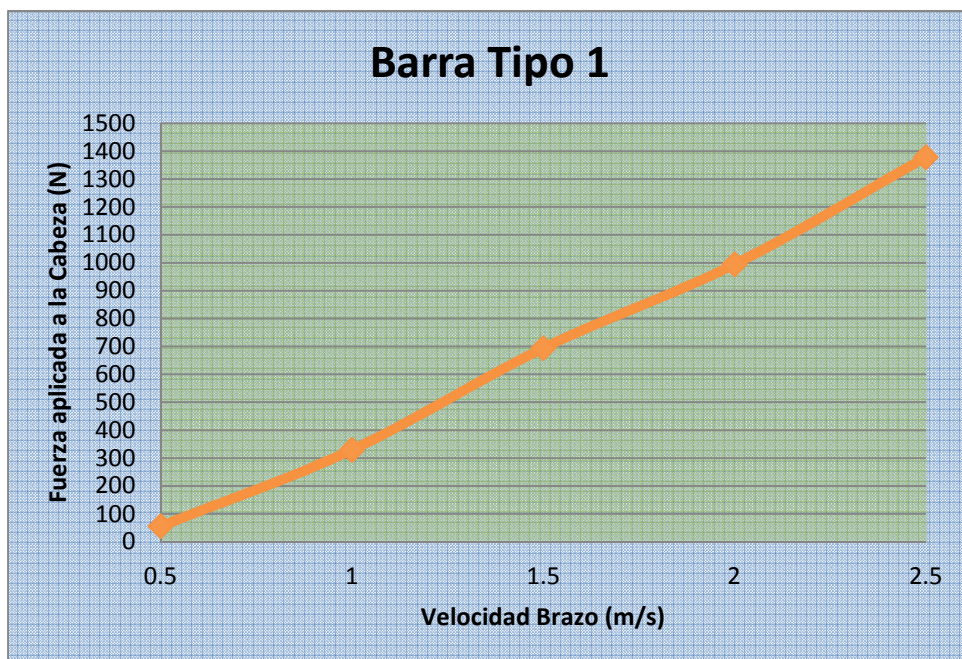


Figura 55. Fuerza en el impacto en función de la velocidad de la barra.

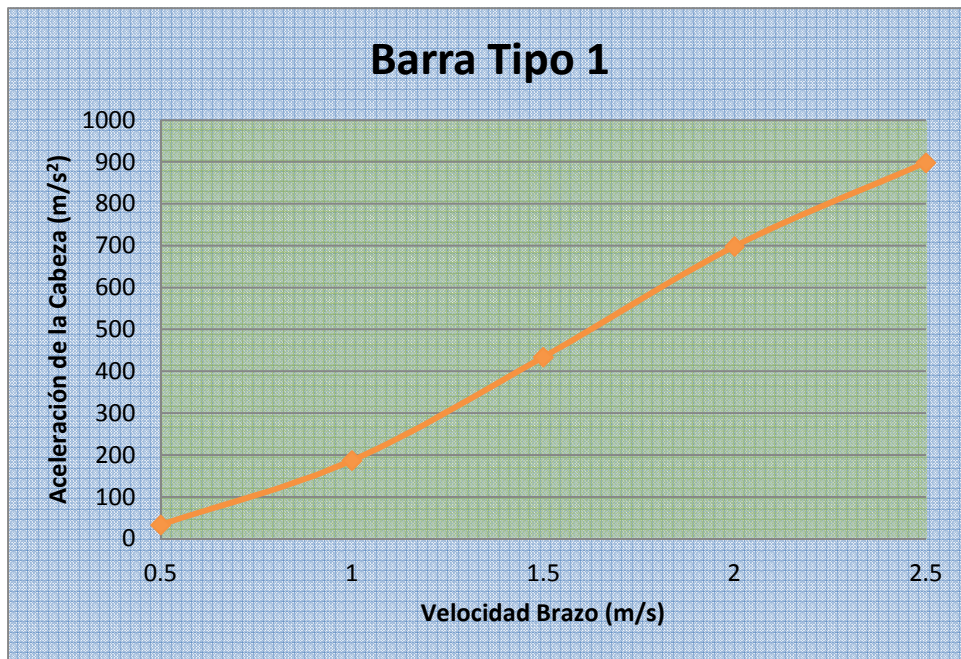


Figura 56. Aceleración sufrida por la cabeza en función de la velocidad de la barra.

Aunque con pequeñas variaciones, pero la tendencia que tienen las líneas de ambas gráficas parece ser similar, un aumento lineal de la fuerza y la aceleración a medida que aumentamos la velocidad de las barras en el punto de impacto.

IV.2.1.-Influencia de la cobertura en el impacto

Comenzamos con los resultados obtenidos en los ensayos que han estado enfocados al estudio de la influencia de las coberturas, que hemos puesto en el punto en el que se produce el choque entre las barras, que representan un brazo robot, y el sistema mecánico cabeza-cuello, que representa una cabeza humana.

Como hemos detallado en el apartado en el que se explican los materiales a utilizar, utilizamos cinco configuraciones distintas de coberturas a colocar en el punto de impacto, tres de ellas con el polímero EVA tipo1, y las dos restantes con el polímero EVA tipo2. Tenemos pues que, la configuración 1 de cobertura corresponde con una sola capa de polímero tipo1, la configuración número 2 es la que tiene 3 capas de polímero tipo1 en el punto de impacto, la configuración 3 posee 6 capas del mismo tipo de polímero EVA, la configuración número 4 corresponde con una capa de polímero tipo2, y la última configuración, la 5, es en la que colocamos dos capas de polímero EVA tipo2 en el punto de impacto.

Empezamos, siguiendo con el esquema planteado, exponiendo los resultados de un ensayo en el que se pueden apreciar las tres repeticiones del mismo, tanto para la fuerza aplicada sobre la cabeza en el impacto, como para la aceleración sufrida por la misma durante el choque. El ensayo escogido es al azar, ya que la función de esta muestra de datos es la de corroborar que hemos realizado tres repeticiones para cada configuración de coberturas. Las gráficas que mostramos en las figuras 57, correspondiente con los datos de fuerza obtenidos, y 58, en la que se representa la aceleración sufrida por la cabeza, pertenecen al ensayo que realizamos con la barra con la configuración número 3 de cobertura, correspondiente a seis capas de polímero EVA tipo1, para una amplitud de ángulo, respecto al punto de equilibrio de la barra, de 40° , lo que a su vez deriva en una velocidad de la misma en el punto de impacto de 2 m/s.

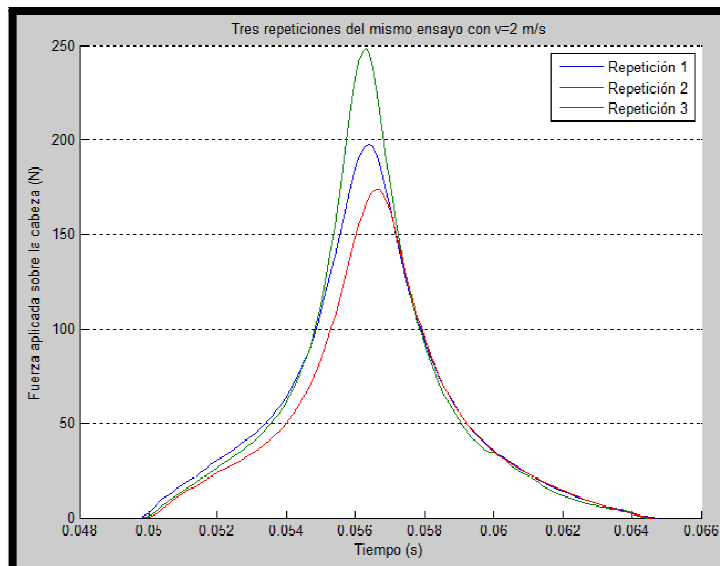


Figura 57. Fuerza aplicada a la cabeza en las tres repeticiones descritas.

Vemos en esta primera figura que las diferencias en los datos registrados en los tres ensayos no son muy elevadas, si bien es cierto que en la repetición número dos nos ha influido algún tipo de factor externo o de falta de precisión en el ensayo, que nos ha provocado una mayor variación de los datos. Como consecuencia, en el análisis de datos, esta repetición concreta es descartada, al igual que otras muchas registradas cuyos valores registrados han sido ligeramente distintos, como en este caso.

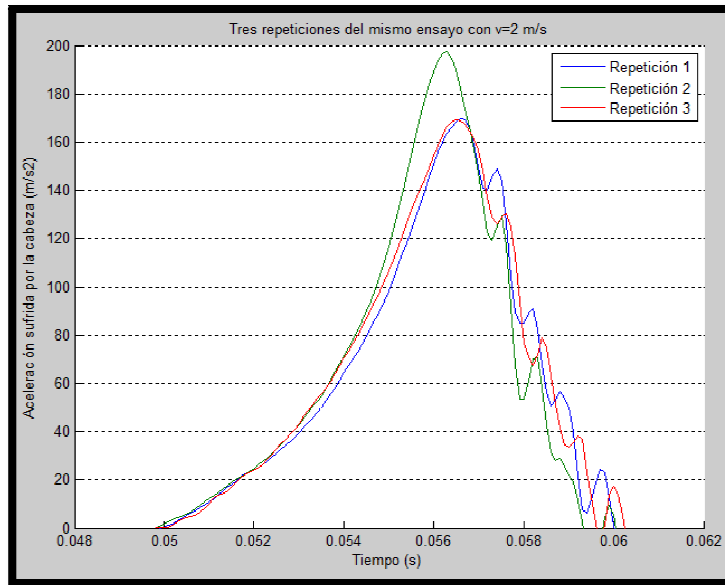


Figura 58. Aceleración sufrida por la cabeza en las tres repeticiones.

La misma consecuencia tienen los datos de aceleración recogidos en la repetición número dos de este ensayo. Destacamos la gran similitud en cuanto a los datos recogidos en las repeticiones número uno y tres.

A continuación enseñamos, también a modo ilustrativo, una gráfica en la que se encuentran todos los datos recogidos de aceleración sufrida por la cabeza durante una repetición de un ensayo específico. En este caso, el ensayo escogido corresponde con la segunda repetición que hemos realizado en el que la cobertura que había en el punto de impacto era de la configuración número 4, y la velocidad que llevaba la barra en el momento de producirse el mismo era de 1.5 m/s.

Observamos en esta gráfica de la figura 59 que la aceleración toma unos valores negativos, esto se debe a la comentada amortiguación y rigidez que posee el cuello, y también la unión de este a la cabeza, por lo que al recibir un impacto la cabeza, esta se moverá en la dirección opuesta al mismo hasta que el cuello, con sus características, se lo permita, de modo que luego provocará una aceleración en el sentido opuesto a la primera, que era consecuencia directa del impacto.

En todas las gráficas que representamos en este capítulo, los valores negativos son ignorados, puesto que su magnitud no es relevante y lo que a nosotros nos interesa en este estudio son las aceleraciones consecuentes del golpe recibido en la cabeza por el brazo, no las aceleraciones derivadas de la constante de rigidez y de amortiguación del cuello, como ya hemos comentado.

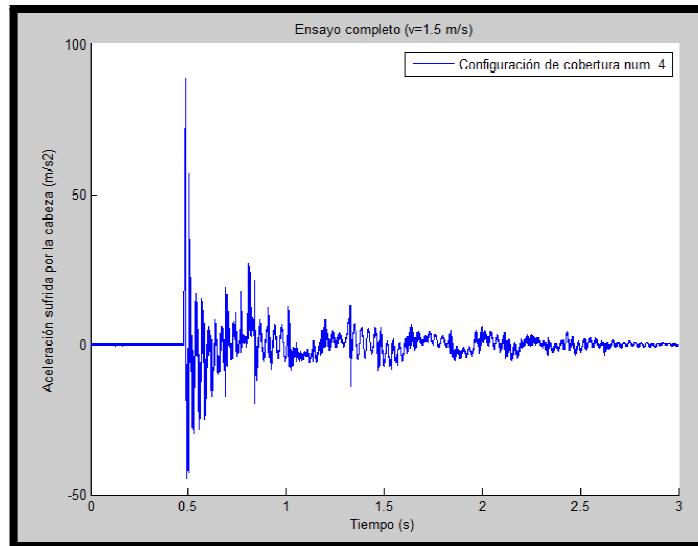


Figura 59. Adquisición de datos completa del ensayo indicado.

Y para concluir con este apartado, mostramos la parte más importante, y la que verdaderamente es objeto de estudio en el proyecto. Las gráficas representadas a continuación corresponden con la influencia que tiene cada una de las configuraciones en las fuerzas aplicadas sobre la cabeza, en una primera parte, y en las aceleraciones sufridas en los impactos por la misma, en un segundo lugar, para cada una de las velocidades estudiadas.

➤ 10° (velocidad del brazo en el impacto de 0.5 m/s)

A simple vista, en la figura 60, se puede ver como la primera configuración de coberturas, que representa la piel que cubre el cráneo humano, se desmarca del resto de configuraciones, que, para una baja velocidad, apenas si hay diferencias entre ellas en los valores de fuerza aplicada sobre la cabeza registrados.

Idéntica situación la que tenemos en la figura 61, donde se representa en este caso la aceleración sufrida por la cabeza como consecuencia del impacto recibido por la barra.

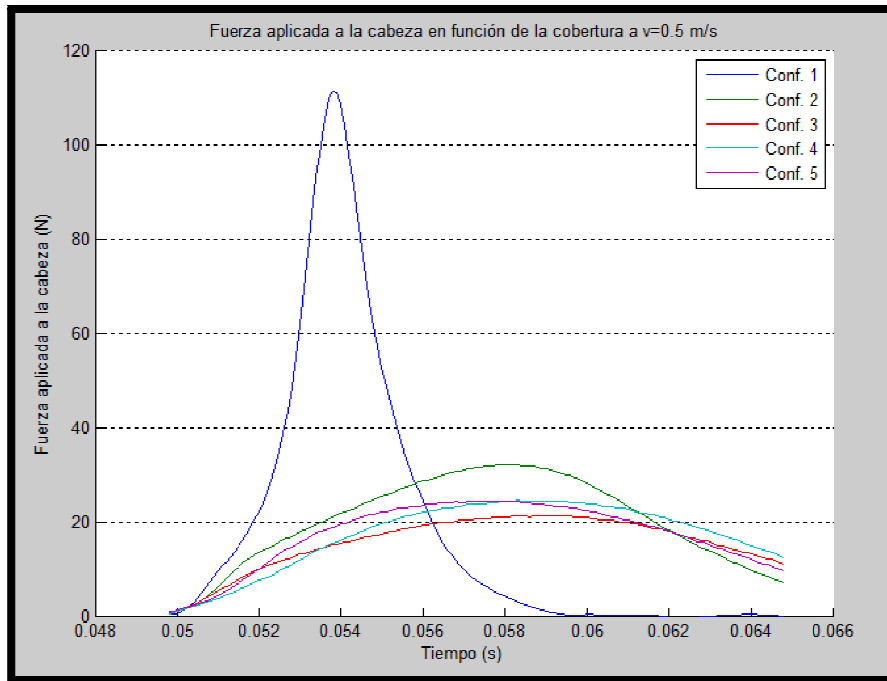


Figura 60. Fuerza aplicada a la cabeza en función de la cobertura.

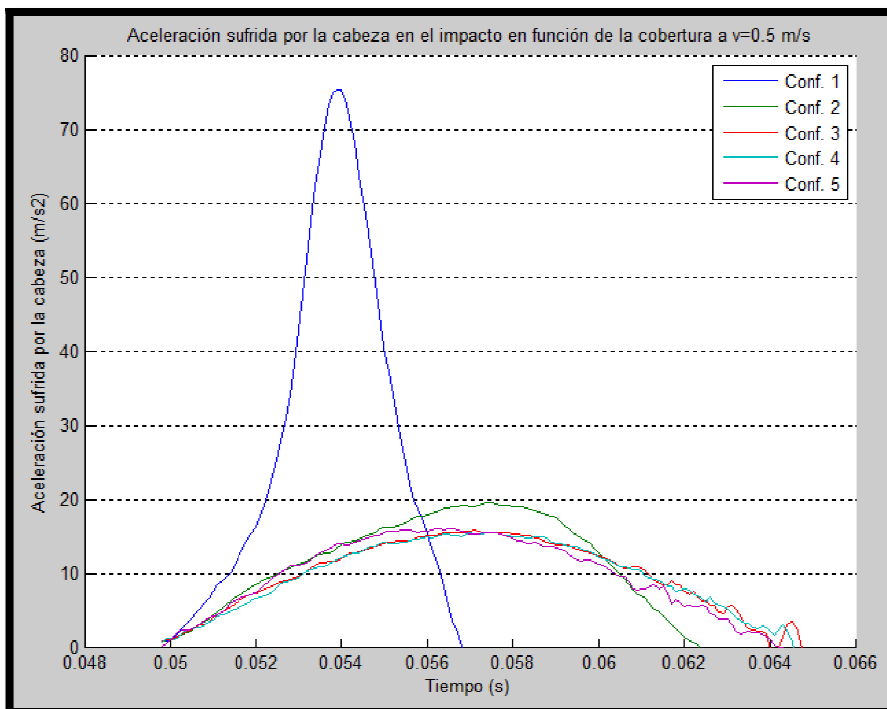


Figura 61. Aceleración sufrida por la cabeza en función de la cobertura.

En la siguiente tabla mostramos los valores pico de fuerza y aceleración registrados por los sensores en este ensayo. Indicamos, además, la influencia que tiene cada una de las coberturas, situadas en el punto en el que se produce el impacto, en la reducción de los valores obtenidos, reflejando el porcentaje en que se ven reducidos los mismos.

Tabla 10. Detalle de valores máximos alcanzados e influencia del factor a estudio.

Configuración de la cobertura	Pico de Fuerza (N)	% disminución	Pico de aceleración (m/s ²)	% disminución
Tipo 1	111,37	—	75,36	—
Tipo 2	31,99	71%	19,51	74%
Tipo 3	21,26	81%	15,77	79%
Tipo 4	24,46	78%	15,42	79%
Tipo 5	24,34	78%	16,05	79%

Para esta baja velocidad, vemos en la tabla que concreta los valores registrados que el tipo 3 de cobertura empleado es la que más reduce los valores de fuerza, aunque la función que desempeñan el resto de coberturas, exceptuando la primera, también es muy buena para estos valores de velocidad. En cuanto a la disminución de los valores de aceleración, prácticamente todos los tipos empleados reducen de igual forma el valor más alto registrado, el obtenido cuando en el punto de ensayo estaba colocada la primera configuración.

➤ 20° (velocidad del brazo en el impacto de 1 m/s)

Como ocurre en los datos reflejados a la velocidad de 0.5 m/s, en estos ensayos también vemos una clara diferencia en los datos registrados de fuerza entre la configuración número 1 de cobertura y el resto, aunque también la número dos ya empieza a desmarcarse ligeramente del resto en este caso. Para esta velocidad el valor máximo de fuerza pico aún está lejos del límite de rotura craneal que hemos tomado de referencia, 4000 N.

De igual manera, en la figura 63 mostramos el alto valor alcanzado por la aceleración sufrida por la cabeza para el tipo primero de configuración de cobertura, y el ligero despunte por parte de la configuración número dos. Otro detalle en esta gráfica que representa la aceleración, es que podemos apreciar a simple vista que los impactos posteriores al principal en las curvas que muestran los datos obtenidos de los ensayos cuando teníamos colocado el primer tipo de cobertura, provocando los segundos dos impactos más aceleración en la cabeza que el impacto principal cuando tenemos colocadas las coberturas tipo 3, 4 y 5.

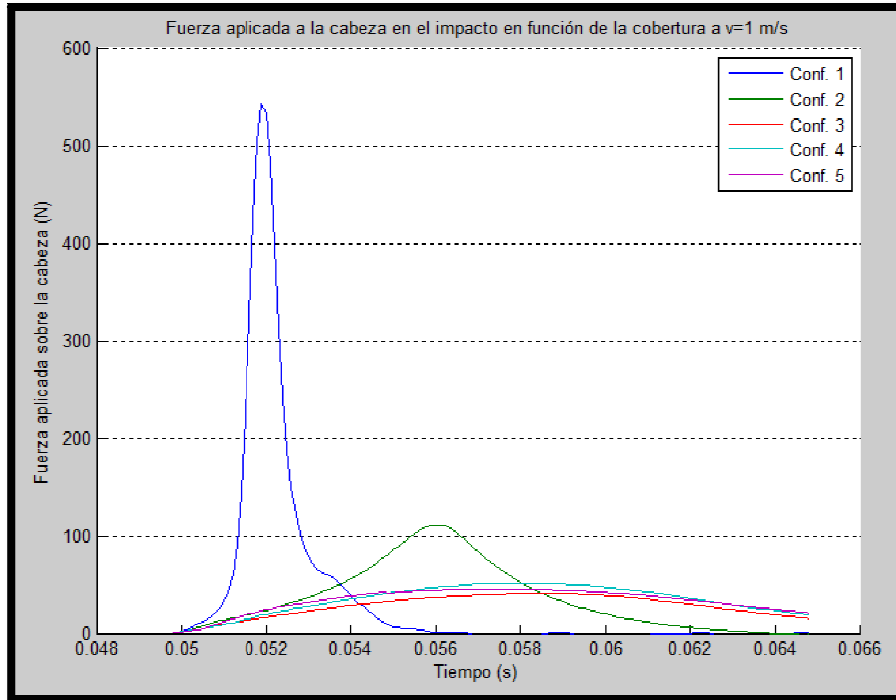


Figura 62. Fuerza aplicada a la cabeza en función de la cobertura.

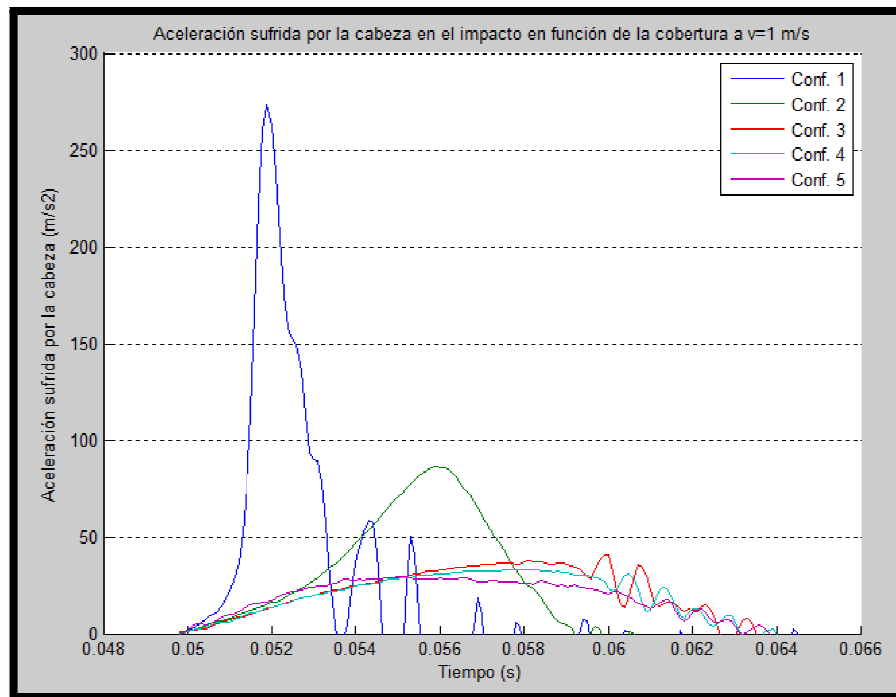


Figura 63. Aceleración sufrida por la cabeza en función de la cobertura.

Mostramos en la tabla 11 los valores pico alcanzados en cada registro y la disminución de los mismos dependiendo de la cobertura colocada.

Tabla 11. Detalle de valores máximos alcanzados e influencia del factor a estudio.

Configuración de la cobertura	Pico de Fuerza (N)	% disminución	Pico de aceleración (m/s ²)	% disminución
Tipo 1	542,19	—	272,98	—
Tipo 2	111,02	79%	86,13	68%
Tipo 3	41,1	92%	40,52	85%
Tipo 4	50,93	91%	33,03	88%
Tipo 5	45,44	92%	29,6	89%

Fijándonos en la tabla 11, podemos ver cómo la labor del tipo 2 de cobertura colocada sigue siendo muy buena para bajas velocidades, aunque se desmarcan del mismo las tres siguiente configuraciones utilizadas, con porcentajes muy altos de reducción, con respecto a los valores obtenidos cuando la cobertura utilizada era del primer tipo, en ambos parámetros recogidos por los sensores.

➤ 30° (velocidad del brazo en el impacto de 1.5 m/s)

En la figura x vemos que al aumentar la velocidad de la barra en el momento en que se produce el impacto un poco más, la fuerza en el mismo ya supera el nivel de los 1000 N para el caso de la primera cobertura utilizada, incluso en su segundo impacto la magnitud alcanzada se encuentra en torno a las registradas con las coberturas tipo 3, 4 y 5. El segundo tipo de configuración también nos comienza a dar unos valores elevados de fuerza, bien desmarcados de las otras tres configuraciones, aunque en menor medida que la primera.

En el caso de la aceleración, este aumento de velocidad ha supuesto un aumento de aproximadamente el doble en la sufrida por la cabeza en el impacto. En este caso, los impactos posteriores al principal con la configuración número uno de cobertura superan a los registrados en todos los demás tipos. Destacamos los bajos niveles de aceleración que se registran cuando tenemos colocada en el punto de impacto la configuración número cinco de coberturas.

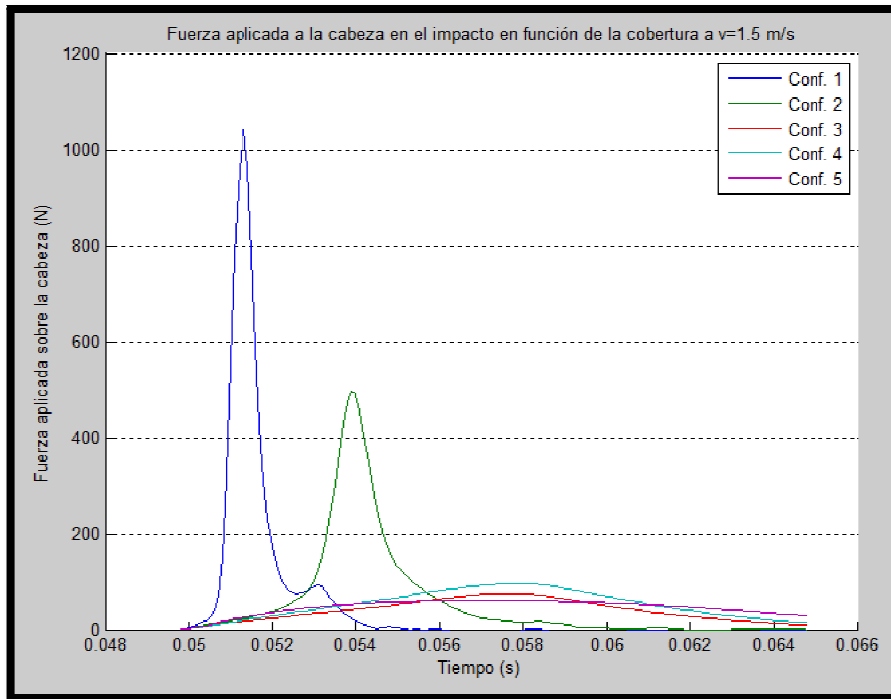


Figura 64. Fuerza aplicada a la cabeza en función de la cobertura.

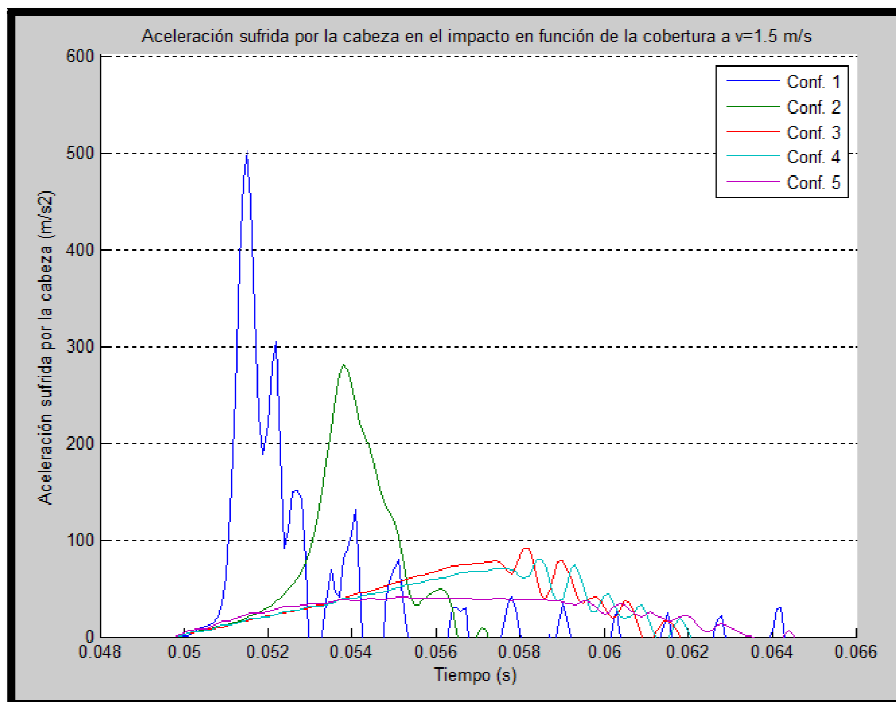


Figura 65. Aceleración sufrida por la cabeza en función de la cobertura.

Detallamos los máximos valores obtenidos en cada caso en la siguiente tabla, así como el nivel de influencia de las coberturas representado en un porcentaje de disminución de esos niveles pico.

Tabla 12. Detalle de valores máximos alcanzados e influencia del factor a estudio.

Configuración de la cobertura	Pico de Fuerza (N)	% disminución	Pico de aceleración (m/s ²)	% disminución
Tipo 1	1039,74	—	502,12	—
Tipo 2	496,37	52%	280,96	44%
Tipo 3	74,61	93%	91,2	82%
Tipo 4	96	91%	80,49	84%
Tipo 5	60,17	94%	40,9	92%

Aunque para esta ya más elevada velocidad de impacto del brazo contra la cabeza el número dos de cobertura utilizada sigue registrando buenos valores de reducción, más para la reducción de fuerza que para la reducción de aceleración, las tres siguientes configuraciones utilizadas poseen unos valores muy superiores, que minimizan el daño que pueda sufrir una cabeza en este caso, en torno al 90%. Destacamos que el tipo número 5 de cobertura reduce, tanto la fuerza en el impacto como la aceleración que pueda sufrir la cabeza, en un porcentaje mayor a este 90%.

➤ 40° (velocidad del brazo en el impacto de 2 m/s)

Aumentamos la velocidad de la barra en el punto de impacto otros 0.5 m/s y, de nuevo, se hace notar en los resultados registrados. En la figura 66 vemos como el máximo valor alcanzado, tipo 1 de configuración de cobertura, alcanza ya casi el nivel de los 1600 N. En este caso queremos destacar de nuevo las bajas magnitudes de los datos de fuerza que obtenemos gracias a la colocación de la cobertura número cinco, haciendo que los golpes se amortigüen en gran medida sin que la cabeza sufra demasiados newtones de fuerza aplicada sobre ella.

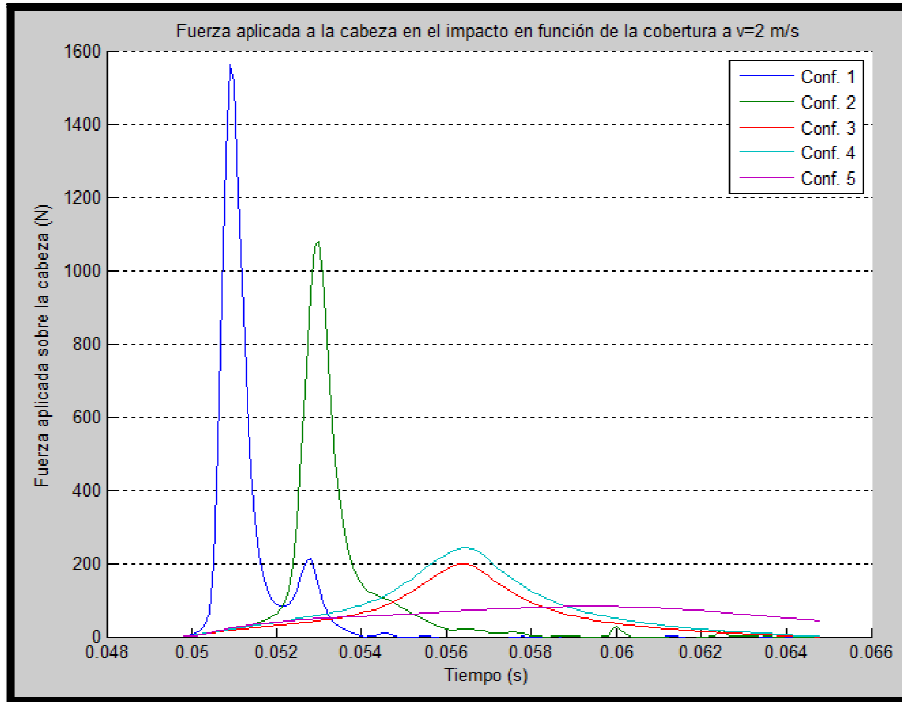


Figura 66. Fuerza aplicada a la cabeza en función de la cobertura.

En la figura 67, también destacamos la gran aportación de la cobertura número cinco, reduciendo en este caso los valores de aceleración en una gran medida. Observamos además que para las configuraciones número tres y cuatro los valores obtenidos son casi idénticos.

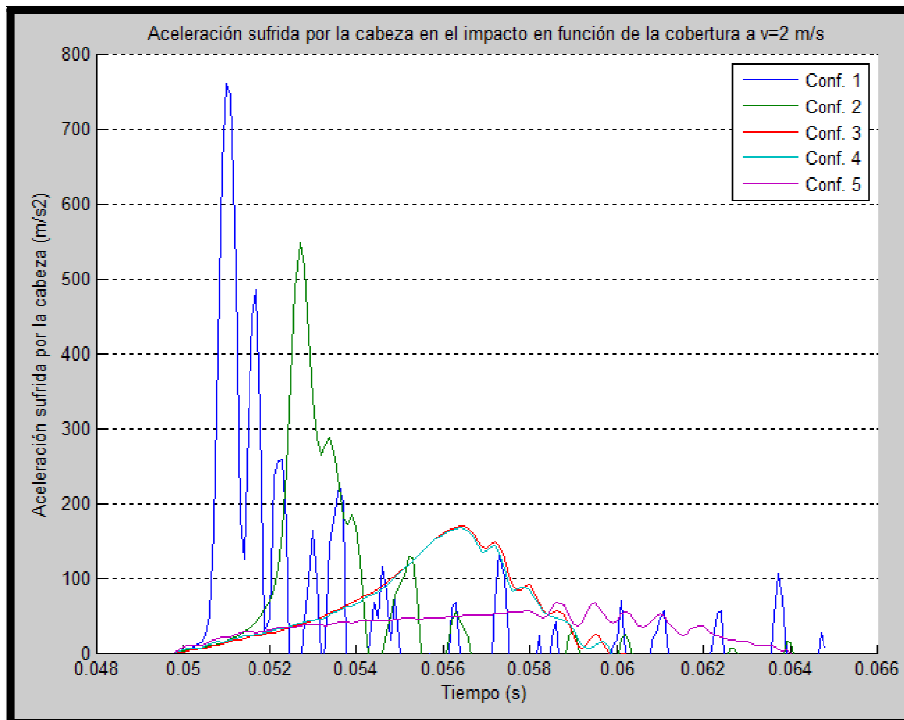


Figura 67. Aceleración sufrida por la cabeza en función de la cobertura.

En la tabla 13 detallamos lo indicadores habituales para este caso en el que la velocidad en el impacto es de 2 m/s.

Tabla 13. Detalle de valores máximos alcanzados e influencia del factor a estudio.

Configuración de la cobertura	Pico de Fuerza (N)	% disminución	Pico de aceleración (m/s ²)	% disminución
Tipo 1	1562,1	—	760,18	—
Tipo 2	1079,29	31%	547,82	28%
Tipo 3	197,68	87%	169,49	78%
Tipo 4	241,19	85%	167,13	78%
Tipo 5	82,27	95%	67,58	91%

Observamos que los porcentajes de reducción, para ambos parámetros medidos, no se mantienen para el tipo 2 de cobertura colocada, de forma que con este penúltimo aumento de velocidad del brazo se han visto reducidos considerablemente, algo que puede deberse a la inestabilidad del material utilizado cuando el espesor del mismo es bajo. Los que si se han mantenido aproximadamente iguales han sido los tres siguientes, consiguiendo todos ellos unos buenos resultados de amortiguación. Merece especial atención el gran amortiguamiento que tenemos en el impacto a la hora de reducir tanto la fuerza como la aceleración cuando utilizamos el quinto tipo de cobertura, manteniendo los porcentajes de reducción por encima del 90%.

➤ 50° (velocidad del brazo en el impacto de 2.5 m/s)

Ya en la última velocidad a la que hemos hecho impactar la barra contra el sistema representativo de la cabeza, para este estudio de la influencia de las coberturas, vemos en esta primera gráfica, figura 68, que el valor máximo alcanzado, por la cobertura habitual, llega a alcanzar los 2000 N, lo que quiere decir que está a la mitad del camino para alcanzar el valor que nos provocaría una fractura craneal. Volvemos una vez más a destacar la gran disminución en las fuerzas aplicadas sobre la cabeza en el impacto que tenemos gracias a la utilización de la cobertura número cinco.

En cuanto a la gráfica de aceleración, figura 69, y la aportación que tiene la cobertura cinco, decir que un gran número de impactos posteriores al principal, no sólo de la cobertura número uno, sino que también de la dos, superan los valores registrados cuando tenemos colocada esta quinta

configuración de cobertura, por lo que nos podemos hacer una idea de su gran influencia en la reducción de los valores pico obtenidos.

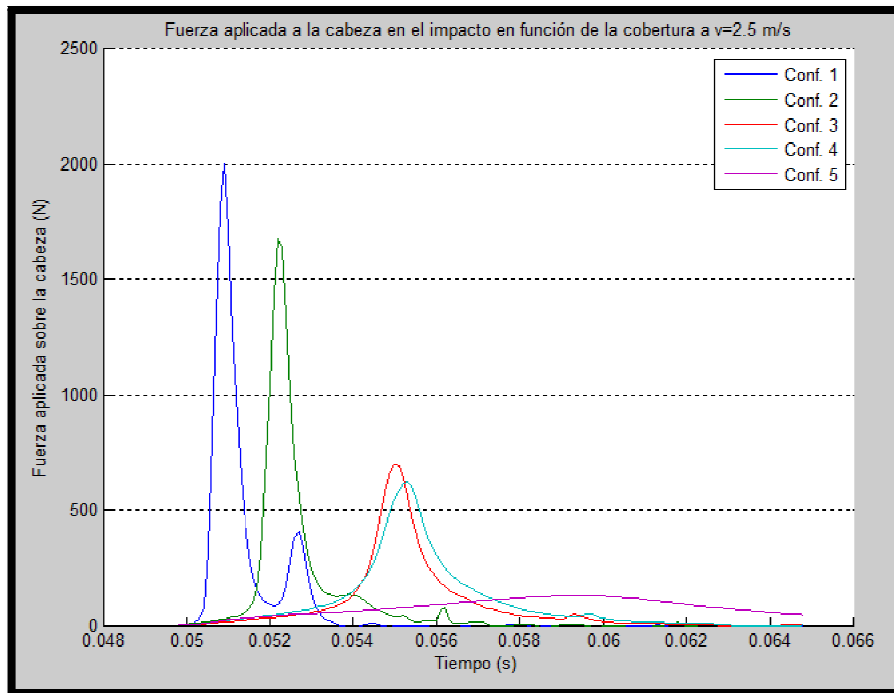


Figura 68. Fuerza aplicada a la cabeza en función de la cobertura.

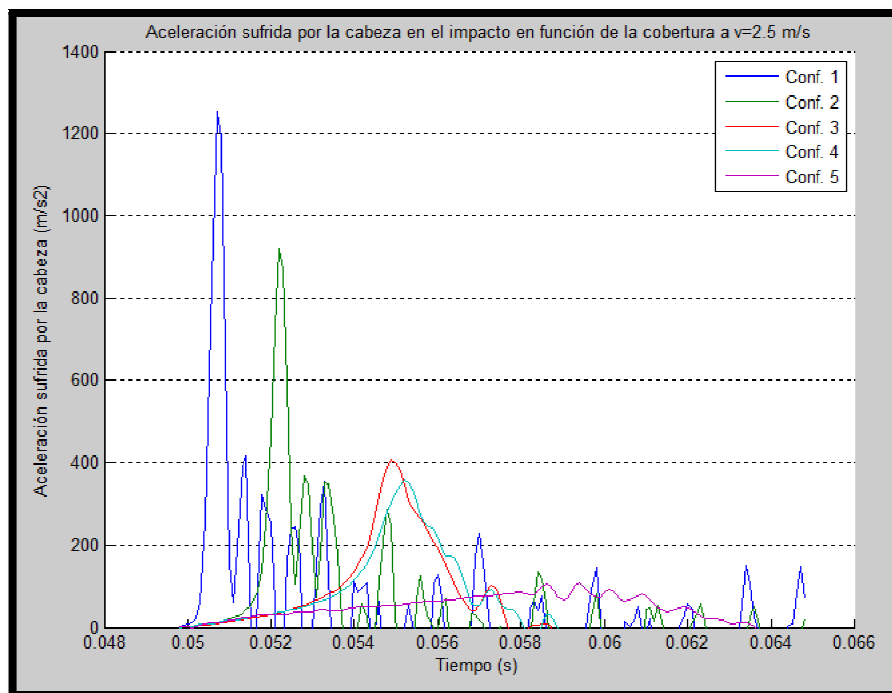


Figura 69. Aceleración sufrida por la cabeza en función de la cobertura.

En esta última tabla que mostramos para el estudio de influencia de la cobertura, vamos a exponer también los resultados obtenidos en el cálculo del índice HIC, y detallamos si los valores pico de fuerza registrada superan

el valor límite que tenemos de referencia (4000 N) para que se produzca rotura craneal. Esto, como dijimos, lo hacemos únicamente para este último ensayo porque es el más desfavorable, ya que es en el que la velocidad en el impacto es más alta y, consecuentemente, en el que registramos los valores más altos tanto de fuerza en el impacto como de aceleración sufrida por la cabeza durante el mismo.

Tabla 14. Detalle de valores máximos alcanzados, influencia del factor e índices.

Configuración de la cobertura	Pico de fuerza (N)	% disminución	Rotura craneal	Pico de aceleración (m/s ²)	% disminución	HIC
Tipo 1	2004,4	—	No	1253,21	—	39,683
Tipo 2	1678,05	16%	No	919,38	27%	20,8663
Tipo 3	699,48	65%	No	405,24	68%	8,9658
Tipo 4	621,14	69%	No	357,01	72%	7,3719
Tipo 5	130,23	93%	No	108,5	91%	1,0947

El primer detalle que comentamos lo referimos al apartado de fuerza, en el que podemos ver que ningún valor máximo alcanzado, para ningún tipo de cobertura empleado, llega al límite que tenemos de referencia, a partir del cual consideraríamos que una estructura craneal podría fracturarse. En cuanto al índice HIC, observamos que los valores obtenidos en el cálculo del mismo son muy pequeños, ya que según los estudios referenciados en la revisión bibliográfica, los valores de este índice por encima de 1000 serían los que tendrían una gran probabilidad de daño, algo que dista mucho de lo obtenido.

En cuanto a las coberturas, vemos que, exceptuando el tipo 5, todas ellas han visto reducidos sus porcentajes de disminución considerablemente, tanto para la fuerza aplicada como para la aceleración sufrida, para esta velocidad, algo que deja entrever la inestabilidad de todas ellas cuando aumentamos la velocidad, salvo para que la quinta configuración empleada, que vuelve a mantener los porcentajes de disminución de valores máximos alcanzados, respecto de la primera, por encima del 90%.

Resumen

Para poder ver la progresión de las fuerzas máximas aplicadas y de las aceleraciones más altas sufridas en cada velocidad, para cada una de las coberturas aplicadas, mostramos en las figuras 70 y 71 dos gráficas donde apreciamos estos valores máximos expuestos durante todo este apartado.

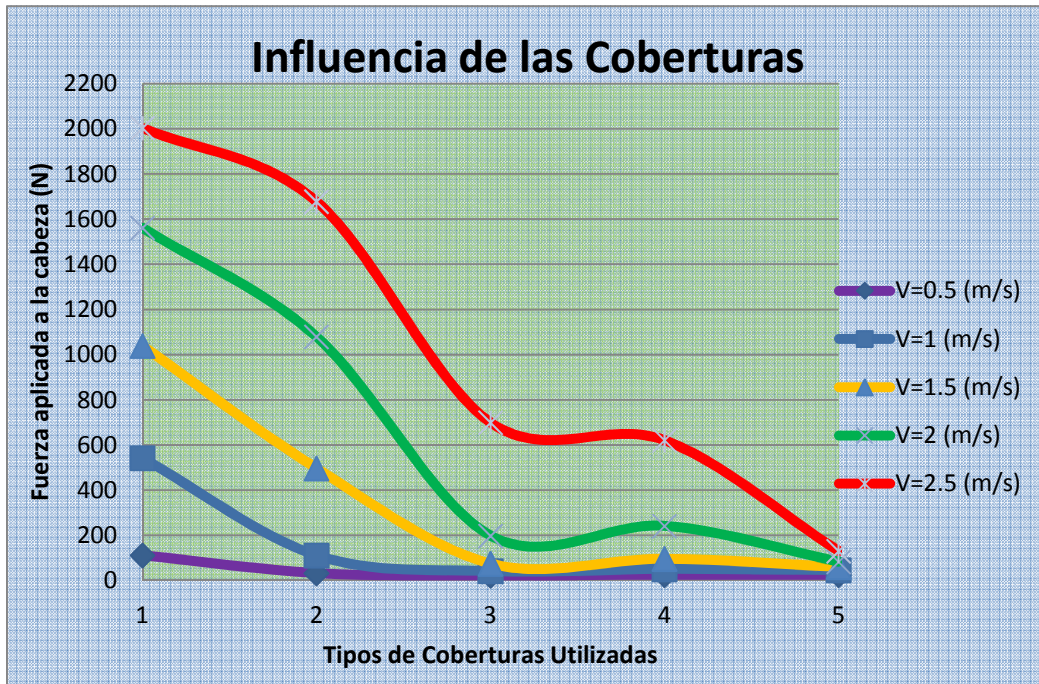


Figura 70. Fuerza aplicada para cada cobertura y velocidad

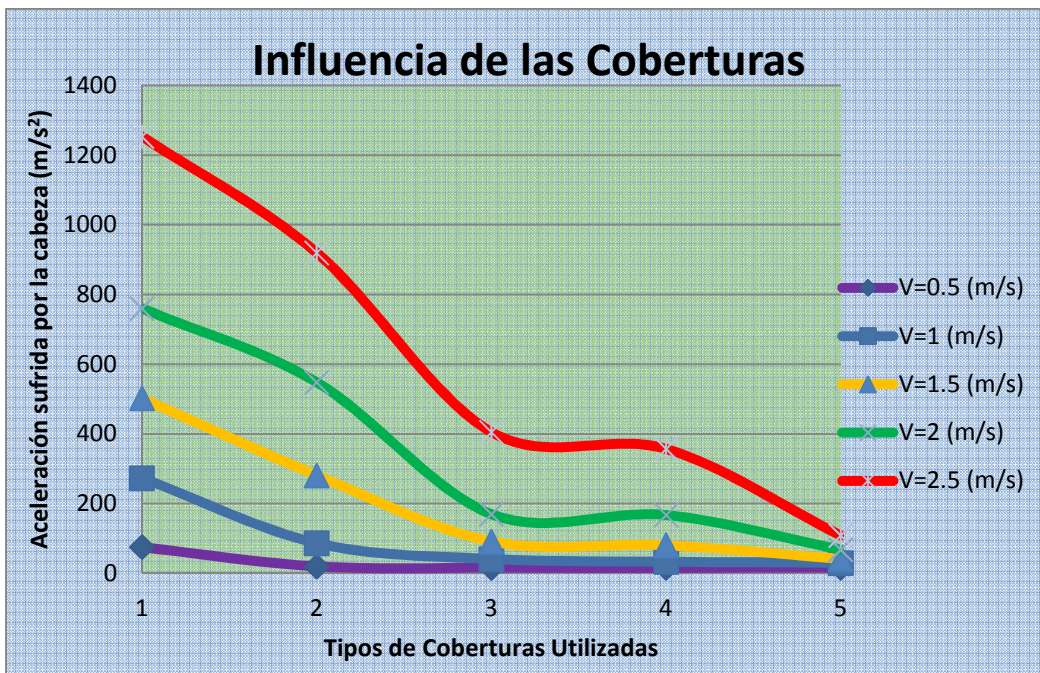


Figura 71. Aceleración sufrida para cada cobertura y velocidad

IV.2.2- Influencia de la inercia en el impacto

Es el turno ahora de exponer y detallar los datos recogidos por los sensores durante los ensayos enfocados al estudio de la influencia de la inercia de las barras.

Las configuraciones que le damos a las barras, como explicamos en el capítulo anterior de materiales y métodos, serán de tres tipos. En primer lugar utilizamos la barra número dos de sección cuadrada, con su inercia correspondiente, que corresponde con el primer tipo de configuración empleado. El segundo tipo de barra utilizada es la propia barra número dos de sección cuadrada, pero en este caso lleva acopladas unas pesas, de forma que aumentamos el valor de la inercia de la misma en un 154% más, es decir, multiplicamos su valor por 2,5. Y el tercer tipo de barra utilizada pertenece también a la misma barra pero acoplándole, en este caso, una serie de pesas que le confieren un aumento a la inercia inicial del 308%, que corresponde a multiplicar el valor inicial de inercia de esta barra por 4.

Para no alterar el esquema inicial planteado, comenzamos exponiendo en las figuras 72 y 73 las gráficas pertenecientes a las tres repeticiones realizadas en el ensayo practicado a la tercera configuración de barra, con una apertura angular de 20°, es decir, con una velocidad en el impacto de 1 m/s. Todo esto mostrando los valores obtenidos tanto de fuerza en el impacto como de aceleración de la cabeza.

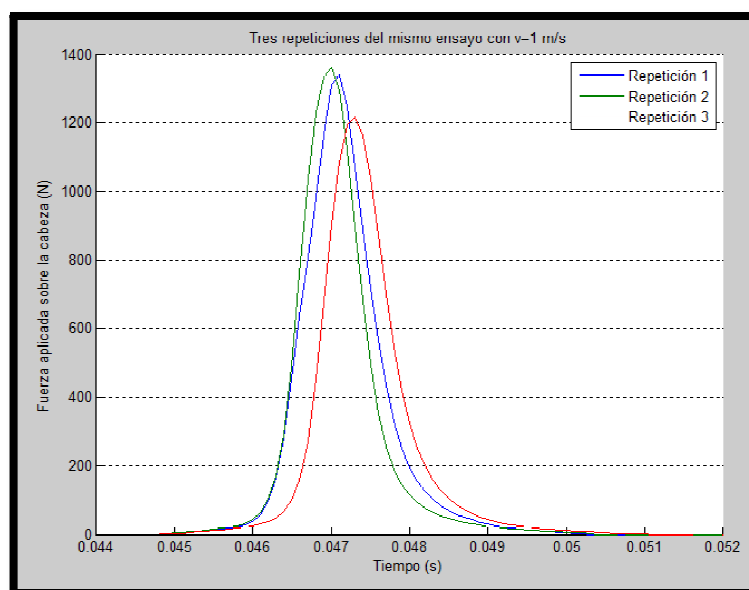


Figura 72. Fuerza aplicada a la cabeza en las tres repeticiones descritas.

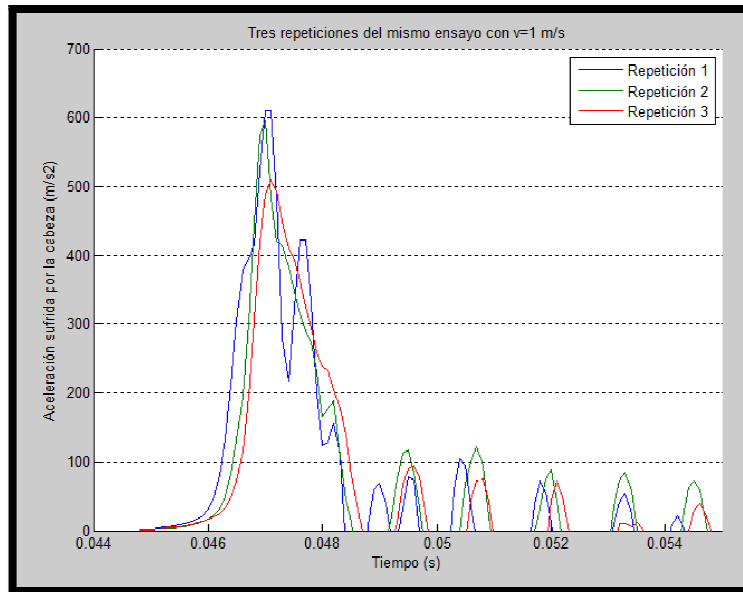


Figura 73. Aceleración sufrida por la cabeza en las tres repeticiones.

Podemos ver en ambas gráficas que los valores de las dos primeras repeticiones son muy parecidos, lo que corrobora la correcta realización de los mismos, sin embargo, en la repetición número tres los datos obtenidos difieren un valor considerable de los otros dos, por lo que los datos correspondientes a esta repetición los descartamos para trabajar con ellos.

Pasamos al siguiente punto del esquema planteado, en el que mostramos de forma ilustrativa una gráfica en la que se muestra una adquisición de datos completa, para poder apreciar los golpes posteriores al impacto principal y la gran diferencia de este último con los que le siguen. En este caso el ensayo escogido ha sido el que hemos realizado con la barra del segundo tipo de configuración, correspondiente a su vez a la primera repetición realizada a una apertura de la barra de 30°, lo que significa que la velocidad que llevaba esta en el impacto era de 1.5 m/s. Los datos que se muestran son valores de fuerza aplicada a la cabeza por la barra en el choque.

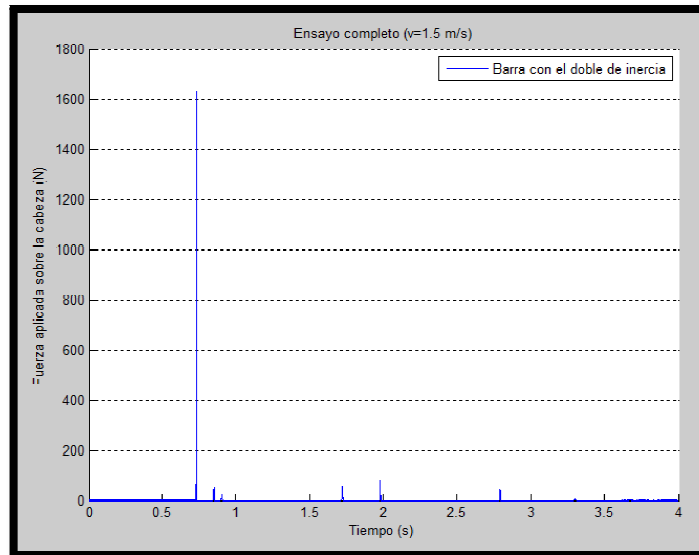


Figura 74. Adquisición de datos completa del ensayo indicado.

Toca ahora dar a conocer todos los valores de fuerza y aceleración registrados por los sensores en cada ensayo enfocado a estudiar la influencia de la inercia de las barras en los mismos. Comenzamos exponiendo las gráficas con los valores citados de fuerza, en un primer caso, y de aceleración, en un segundo, con la velocidad más baja a la que hemos efectuado la toma de datos, para terminar con la más alta.

➤ 10° (velocidad del brazo en el impacto de 0.5 m/s)

Aunque este primer ensayo se haya realizado a una baja velocidad, podemos apreciar en la gráfica que muestra los datos de fuerza aplicada sobre la cabeza, figura 75, que la influencia de la inercia en este parámetro medido es muy grande. Vemos que ya la segunda configuración utilizada se desmarca enormemente de la primera, pero es que el tercer tipo de barra utilizado supera este segundo valor en más del doble de su magnitud, llegando a alcanzar casi el valor de 450 N para esta primera y reducida velocidad.

Lo mismo ocurre en la gráfica que muestra la aceleración sufrida por la cabeza durante el impacto principal. Aquí, los valores aumentan también en gran medida conforme aumentamos la inercia de la barra utilizada para llevar a cabo los impactos. Nos quedamos con el detalle de que en los segundos impactos que tienen lugar con las barras del tipo dos y tres, las magnitudes de las aceleraciones que provocan a la cabeza son mayores que la aceleración provocada por el primer impacto usando la barra del primer tipo de configuración.

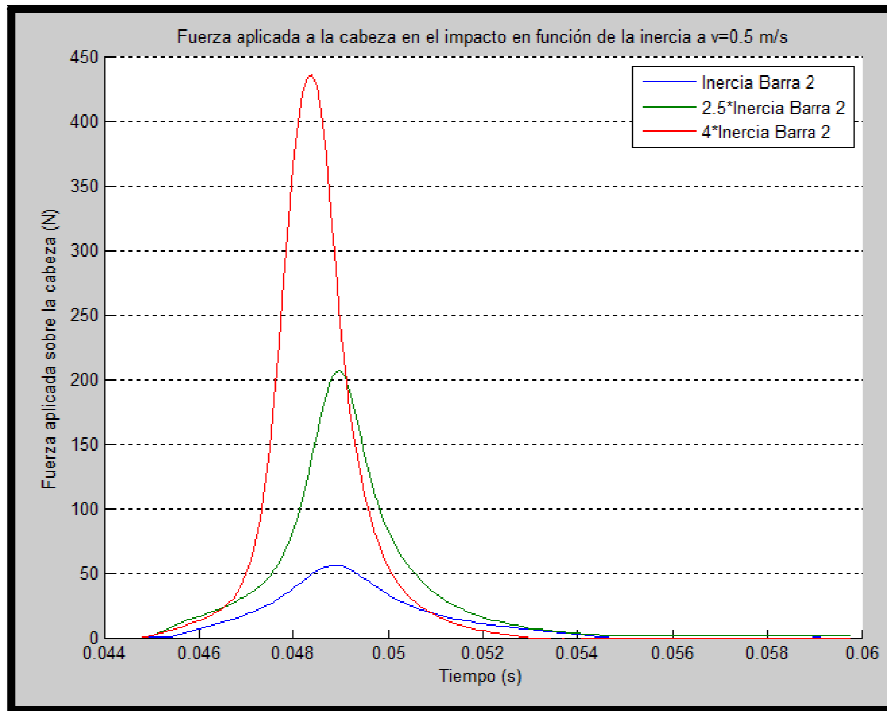


Figura 75. Fuerza aplicada a la cabeza en función de la inercia.

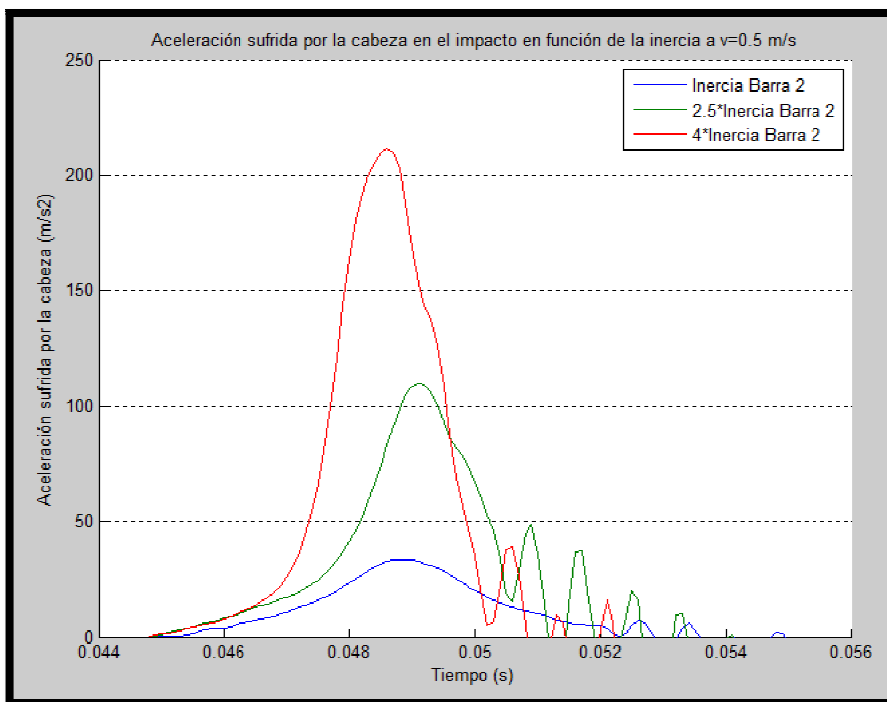


Figura 76. Aceleración sufrida por la cabeza en función de la inercia.

Para poder apreciar con mayor precisión los valores de fuerza y aceleración que llegan a alcanzarse con cada uno de los tipos de barra utilizados, mostramos en la tabla 15 los mismos, incluyendo la influencia que tienen sobre ellos el aumento de la inercia. Para ello, en el estudio de la influencia de este factor, mostramos un porcentaje de aumento de estos valores, fuerza

y aceleración, en los impactos realizados con las configuraciones dos y tres de las barras, respecto de la primera barra utilizada.

Tabla 15. Detalle de valores máximos alcanzados e influencia del factor a estudio.

Configuración de la barra	Pico de Fuerza (N)	% aumento	Pico de aceleración (m/s ²)	% aumento
Tipo 1 (Inercia Barra 2 s.c.)	56,15	—	33,22	—
Tipo 2 (2,5*Inercia Barra 2 s.c.)	206,62	268%	109,9	231%
Tipo 3 (4*Inercia Barra 2 s.c.)	435,93	676%	211,76	537%

Apreciamos que, con esta pequeña velocidad de impacto, los porcentajes en los que aumentan los valores máximos de fuerza y aceleración son muy grandes, más para el caso de la fuerza aplicada, por lo que, para esta velocidad, la influencia de la inercia que poseen las barras es considerable. Veremos si para las siguientes velocidades se mantienen.

➤ 20° (velocidad del brazo en el impacto de 1 m/s)

En este segundo punto de velocidad estudiada, las gráficas, tanto de fuerza como de aceleración, nos siguen mostrando esa gran influencia que tiene la inercia, de forma que a medida que aumentamos esta, los valores crecen en una gran medida. Únicamente hemos alcanzado una velocidad en el impacto de 1 m/s, y los datos que registra el sensor de fuerza, para el caso más desfavorable, alcanzan casi los niveles de 1400 N aplicados sobre la cabeza. En la gráfica de aceleración, mostrada en la figura 78, destacamos que el segundo impacto, derivado del primero, que tiene lugar con la barra del tipo 3, llega a igualar la magnitud de los valores de aceleración registrados en el impacto principal con la barra del segundo tipo de configuración.

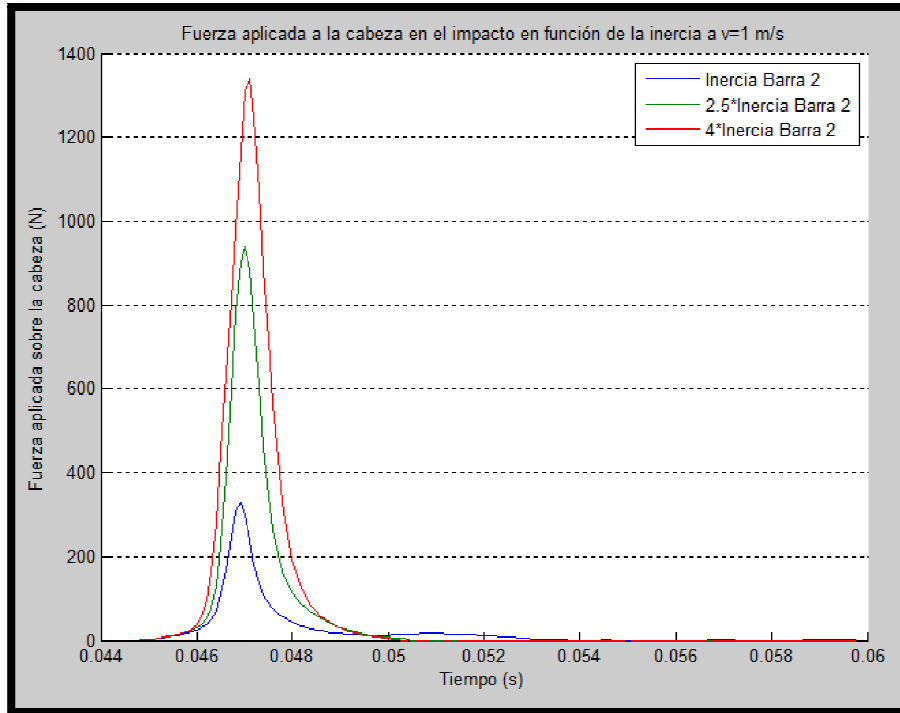


Figura 77. Fuerza aplicada a la cabeza en función de la inercia.

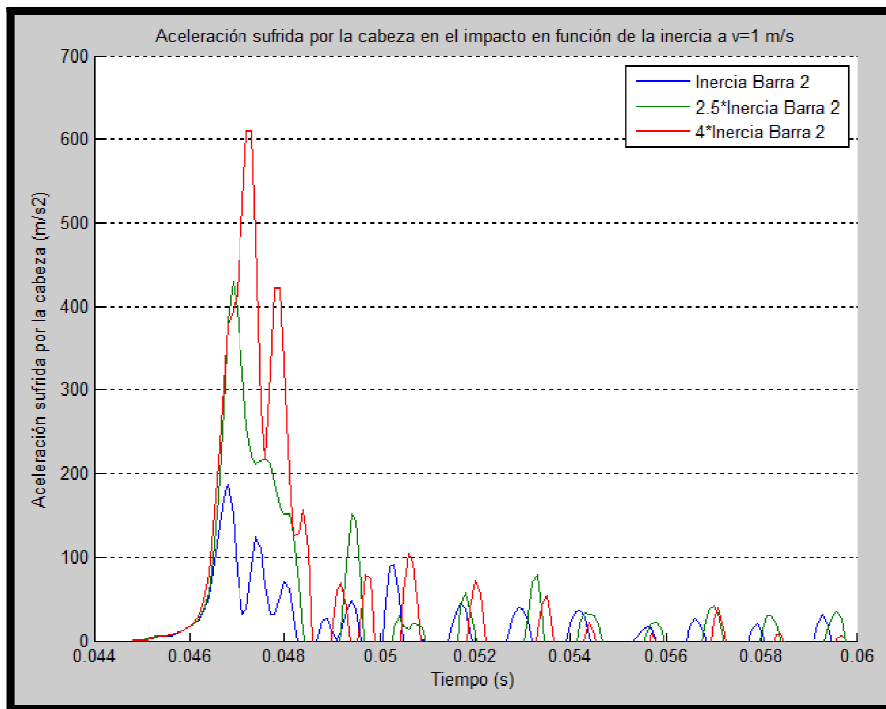


Figura 78. Aceleración sufrida por la cabeza en función de la inercia.

En la tabla 16 detallamos los valores pico registrados por los sensores en este ensayo, además de los porcentajes de aumento de los mismos para las configuraciones dos y tres de barras con respecto a los obtenidos con la primera barra.

Tabla 16. Detalle de valores máximos alcanzados e influencia del factor a estudio.

Configuración de la barra	Pico de Fuerza (N)	% aumento	Pico de aceleración (m/s ²)	% aumento
Tipo 1 (Inercia Barra 2 s.c.)	329,73	—	187,02	—
Tipo 2 (2,5*Inercia Barra 2 s.c.)	937,73	184%	430,54	130%
Tipo 3 (4*Inercia Barra 2 s.c.)	1340,69	307%	610,43	226%

Ya para esta velocidad vemos como los porcentajes en los que aumentan los valores para las barras tipo 2 y 3 con respecto a la primera se ven reducidos considerablemente, casi a la mitad, por lo que podemos intuir que a medida que aumentemos la velocidad, la inercia que posean las barras no será tan influyente, aunque de momento lo es, y en gran medida.

➤ 30° (velocidad del brazo en el impacto de 1.5 (m/s)

En la figura 79, donde se encuentra la gráfica con la fuerza en el impacto, se puede apreciar con gran claridad cómo aumentan las curvas representadas para cada barra casi con la misma proporcionalidad con la que aumentamos la inercia de las mismas. En los ensayos realizados con la barra tipo 3, los valores que registra el sensor sobrepasan con creces el nivel de los 2000 N de fuerza aplicada en la cabeza.

También vemos en la gráfica de la aceleración sufrida por la cabeza, figura 80, que los valores pico obtenidos en los ensayos con cada barra han aumentado considerablemente respecto a la velocidad anterior.

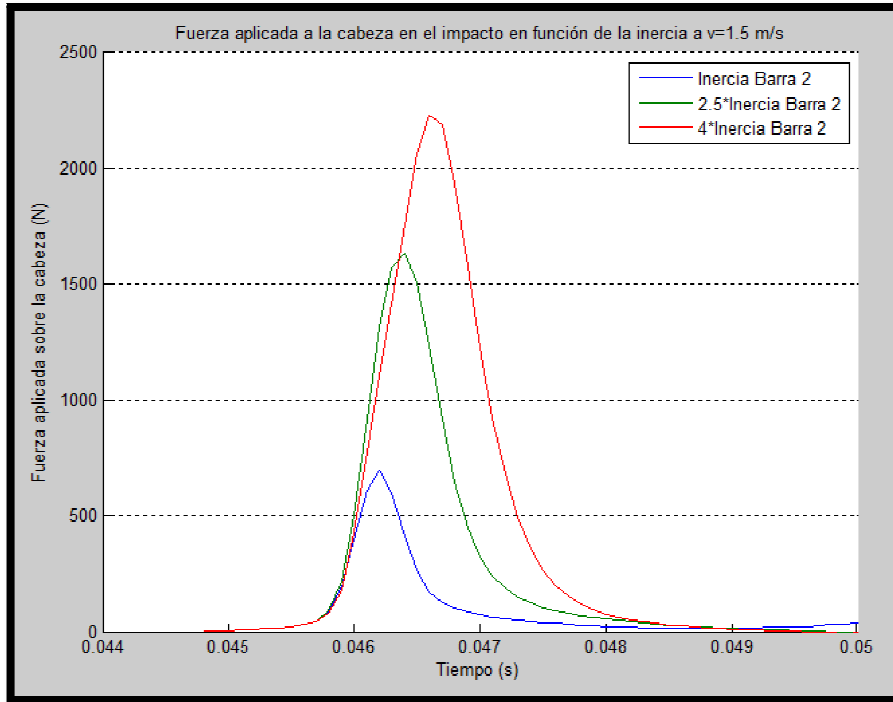


Figura 79. Fuerza aplicada a la cabeza en función de la inercia.

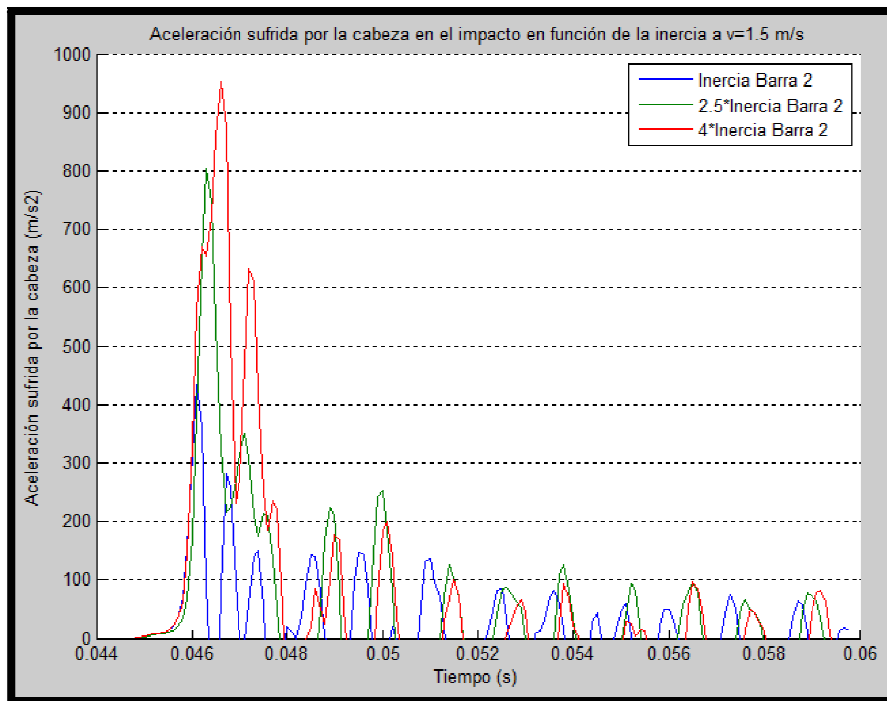


Figura 80. Aceleración sufrida por la cabeza en función de la inercia.

De nuevo detallamos en la siguiente tabla los valores máximos registrados con los sensores, tanto de aceleración como de fuerza, incluyendo también el porcentaje en el que se ven aumentados estos valores con respecto a la barra del primer tipo.

Tabla 17. Detalle de valores máximos alcanzados e influencia del factor a estudio.

Configuración de la barra	Pico de Fuerza (N)	% aumento	Pico de aceleración (m/s ²)	% aumento
Tipo 1 (Inercia Barra 2 s.c.)	694,5	—	433,97	—
Tipo 2 (2,5*Inercia Barra 2 s.c.)	1632,26	135%	805,05	86%
Tipo 3 (4*Inercia Barra 2 s.c.)	2230,86	221%	953,26	120%

Como venimos comentando, ante este nuevo aumento de velocidad, los porcentajes de aumento se han vuelto a reducir de forma considerable, aunque también siguen siendo muy elevados, ya que para el tercer tipo de configuración, los valores pico que se alcanzan de fuerza y aceleración han llegado a niveles hasta ahora desconocidos, en referencia a los alcanzados en los ensayos realizados para estudiar el factor de influencia anterior.

➤ 40° (velocidad del brazo en el impacto de 2 (m/s)

Este ensayo realizado para la cuarta velocidad de la barra en el impacto tiene un detalle a comentar, y cuya explicación se hará en el apartado de observaciones de esta toma de datos experimental.

Como podemos ver, para la tercera configuración de barra utilizada, la velocidad a la que hemos practicado los impactos ha sido ligeramente menor que para las otras dos, por lo que tenemos que saber que los datos reflejados en este apartado corresponden con la velocidad alcanzada para 40° de amplitud angular en los dos primeros tipos de barras, y para el tercero la velocidad alcanzada para una apertura de 35°. Aún así, podemos ver en la figura 81 que los valores de fuerza registrados por el sensor durante los ensayos realizados con el último tipo de barra, han sido sensiblemente superiores a al resto, a pesar de este detalle. De igual forma ocurre en la gráfica de aceleración, donde incluso el segundo impacto sobre la cabeza, derivado del primero, ha superado los valores de aceleración provocados por el tipo primero de barra usado.

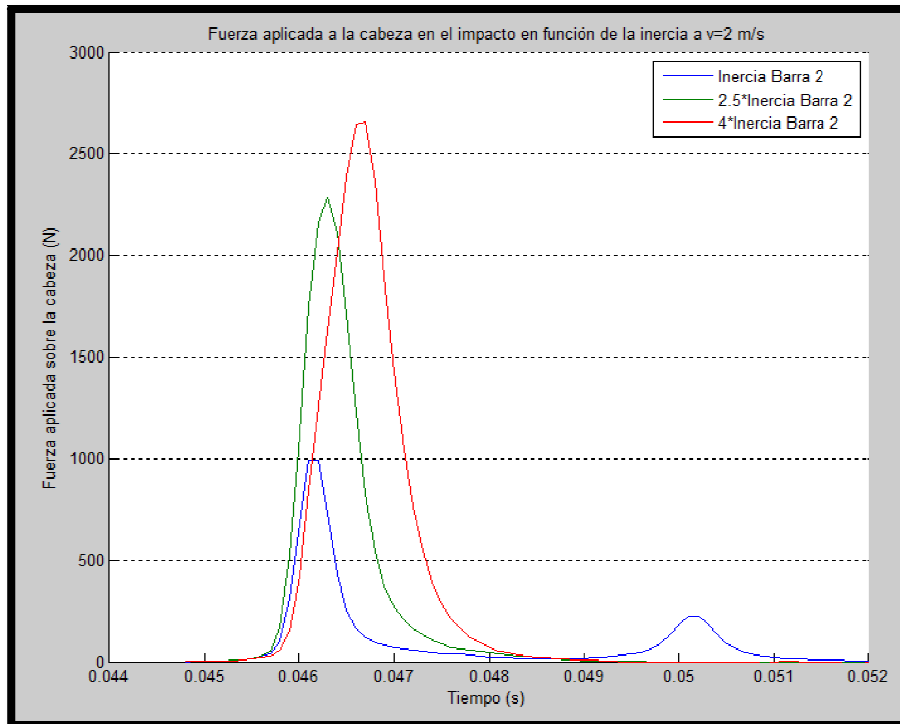


Figura 81. Fuerza aplicada a la cabeza en función de la inercia.

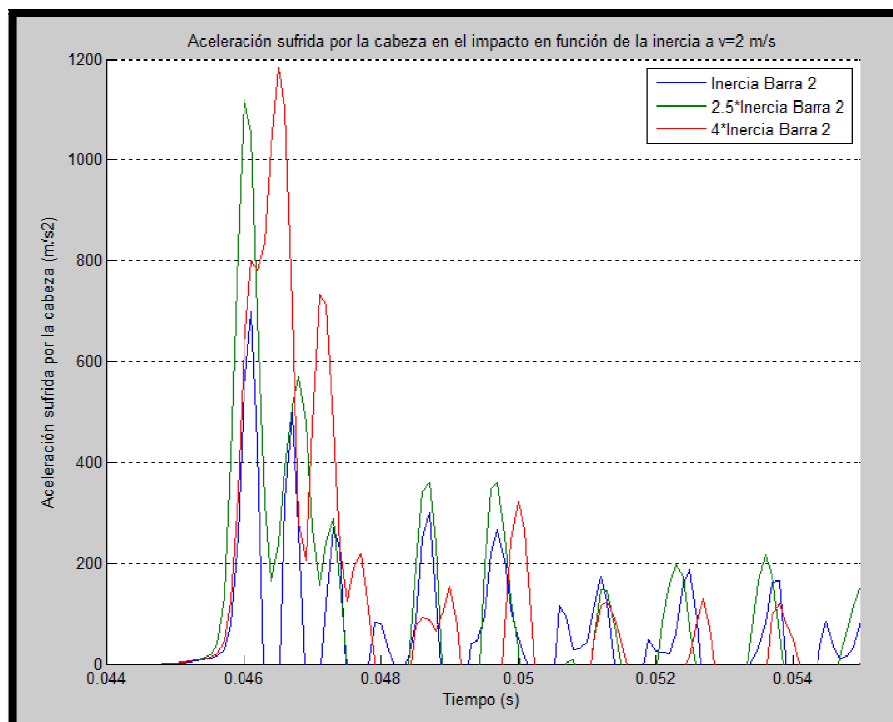


Figura 82. Aceleración sufrida por la cabeza en función de la inercia.

Decir, además, que el ensayo realizado a la barra 3 con la velocidad que corresponde para una apertura angular de 35°, ha sido el último practicado con la misma, razón por la cual en la siguiente tabla mostramos el valor de HIC máximo alcanzado con esta barra, así como la indicación sobre si el

valor de fuerza aplicada sobre la cabeza, obtenido del sensor correspondiente, supera el valor límite que tenemos de referencia, lo que supone una rotura de la estructura craneal. Tampoco nos olvidamos en este caso de incluir en la tabla el porcentaje de aumento de los valores de fuerza y aceleración registrados en las barras con el tipo de configuración número 2 y 3 con respecto a la barra del primer tipo.

Tabla 18. Detalle de valores máximos alcanzados, influencia del factor e índices.

Configuración de la barra	Pico de fuerza (N)	% aumento	Rotura craneal	Pico de aceleración (m/s ²)	% aumento	HIC
Tipo 1	994,63	—	—	698,54	—	—
Tipo 2	2286,53	130%	—	1119,5	60%	—
Tipo 3	2659,47	167%	No	1183,91	69%	60,6

Aunque no podemos hacer una comparación de los resultados obtenidos de los ensayos realizados con la barra 3 con respecto a las otras dos, mostramos en la tabla los datos de esta para poder ver los valores pico alcanzados por la misma en su particular ensayo, y comprobar que aún con una menor velocidad, la barra con más inercia supera en los dos parámetros medidos a las otras dos, de forma que nos podemos hacer una idea de la gran influencia que tiene la inercia que posea una barra en estas situaciones de impacto.

Para esta penúltima velocidad los cambios que sufren los porcentajes de aumento son menos significativos, en cuanto a la barra tipo 2 usada con respecto a la 1 se refiere. Vemos que la influencia de este factor sigue siendo elevada y, como decimos, para esta velocidad no disminuye dicha influencia con respecto a la anterior velocidad ensayada.

Comentar además que la fuerza máxima registrada que aplica la barra 3, en su última velocidad a la que se le han realizado los ensayos, no llega a alcanzar el límite de fuerza referencia que provocaría una rotura craneal. Por otro lado, el valor calculado de HIC también es bastante bajo para producir un daño debido a la aceleración sufrida por la cabeza, de nuevo respecto a los valores de referencia tomados en este caso.

➤ 50° (velocidad del brazo en el impacto de 2.5 (m/s)

Nos encontramos ya en el último estudio realizado en este apartado. Para esta velocidad sólo hemos realizado los ensayos con los dos primero tipos de barras. Como dijimos anteriormente, la explicación de esta ausencia de la

barra tres en este último caso de estudio la hacemos en el apartado de observaciones de esta exposición de datos experimentales.

Destacamos el valor obtenido del sensor de fuerza para el caso más desfavorable, la barra con más inercia, en donde podemos ver que se supera el nivel de los 2500 N de fuerza aplicada sobre la cabeza.

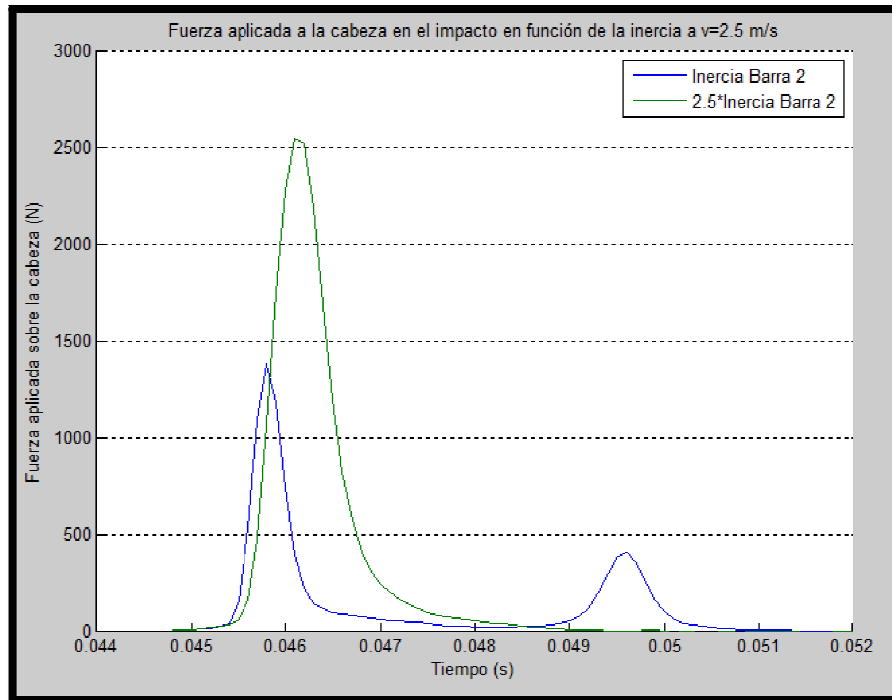


Figura 83. Fuerza aplicada a la cabeza en función de la inercia.

De la gráfica de aceleración también podemos destacar la gran cantidad de picos de aceleración que obtenemos tras el impacto inicial, ya que a esta velocidad la barra rebota varias veces contra la cabeza, debido a las constantes de rigidez y amortiguación del cuello, y se vuelven a producir impactos secundarios, como ya hemos comentado en otra ocasión.

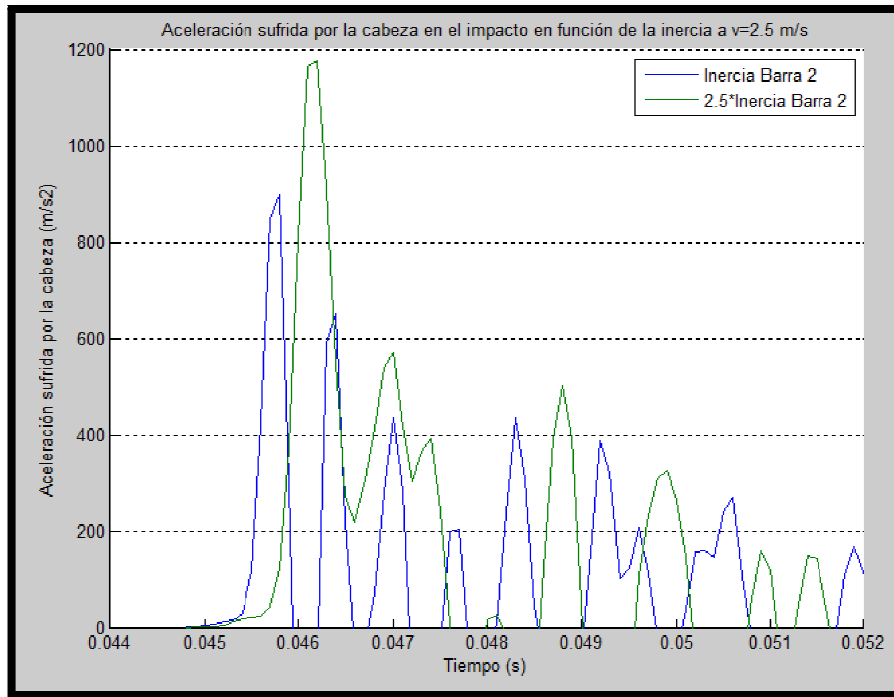


Figura 84. Aceleración sufrida por la cabeza en función de la inercia.

Finalmente, mostramos en la tabla 19 los valores pico obtenidos por los dos sensores, de fuerza y aceleración. Además, como este es el caso de estudio con mayor velocidad, por lo tanto el más desfavorable, toca indicar si los valores de fuerza en los impactos producirían una rotura en el cráneo, siempre en relación con el valor de fuerza fijado como límite. Paralelamente, también indicamos el valor del índice HIC obtenido del cálculo pertinente realizado.

Tabla 19. Detalle de valores máximos alcanzados, influencia del factor e índices.

Configuración de la barra	Pico de fuerza (N)	% aumento	Rotura craneal	Pico de aceleración (m/s^2)	% aumento	HIC
Tipo 1	1378,39	—	No	898,61	—	18,5
Tipo 2	2547,51	85%	No	1176,7	31%	37,04

Comentamos primeramente la nueva reducción de los porcentajes de aumento de los valores medidos con los sensores, algo que también podemos achacar a la inestabilidad de la cobertura introducida en el punto de ensayo, la cual recordamos que tiene una capa de polímero EVA tipo1.

Por otra parte, ninguno de los valores registrados de fuerza llega a alcanzar el límite fijado para romper un cráneo. De igual forma ocurre con los valores de aceleración, obteniendo para ambas barras unos niveles que desembocan

en un valor del índice HIC muy reducido, algo que no entraña probabilidad de daño cerebral alguno.

Resumen

De nuevo mostramos dos gráficas donde resumimos todos los resultados mostrados para el estudio de la influencia de la rigidez, a fin de mejorar la comprensión de este capítulo.

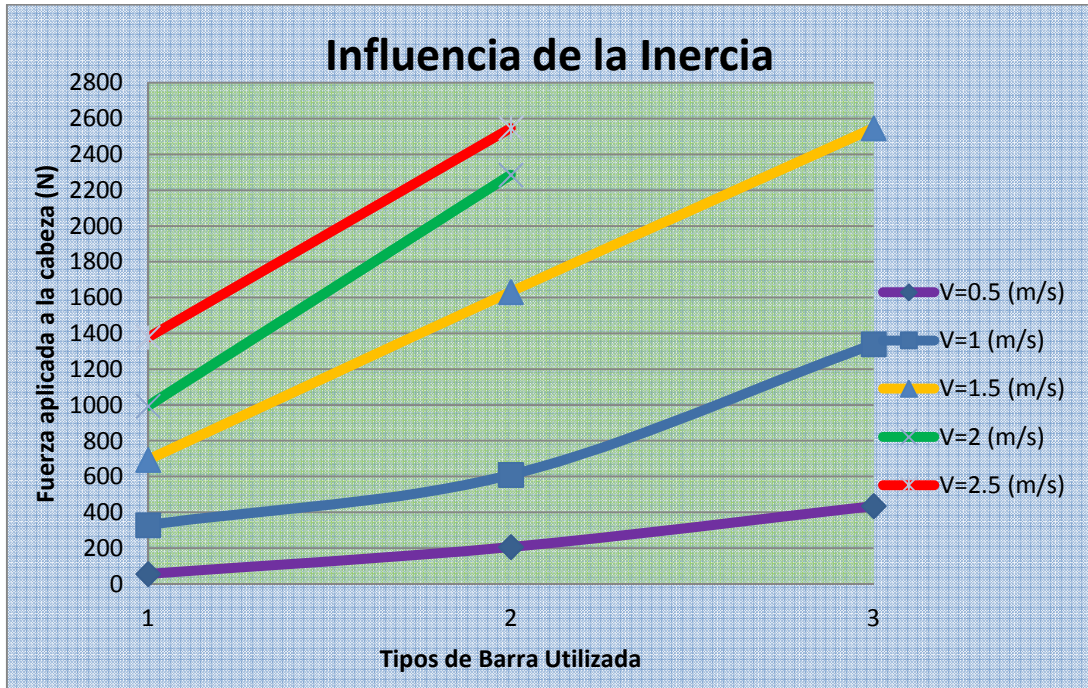


Figura 85. Fuerza aplicada para cada inercia y velocidad

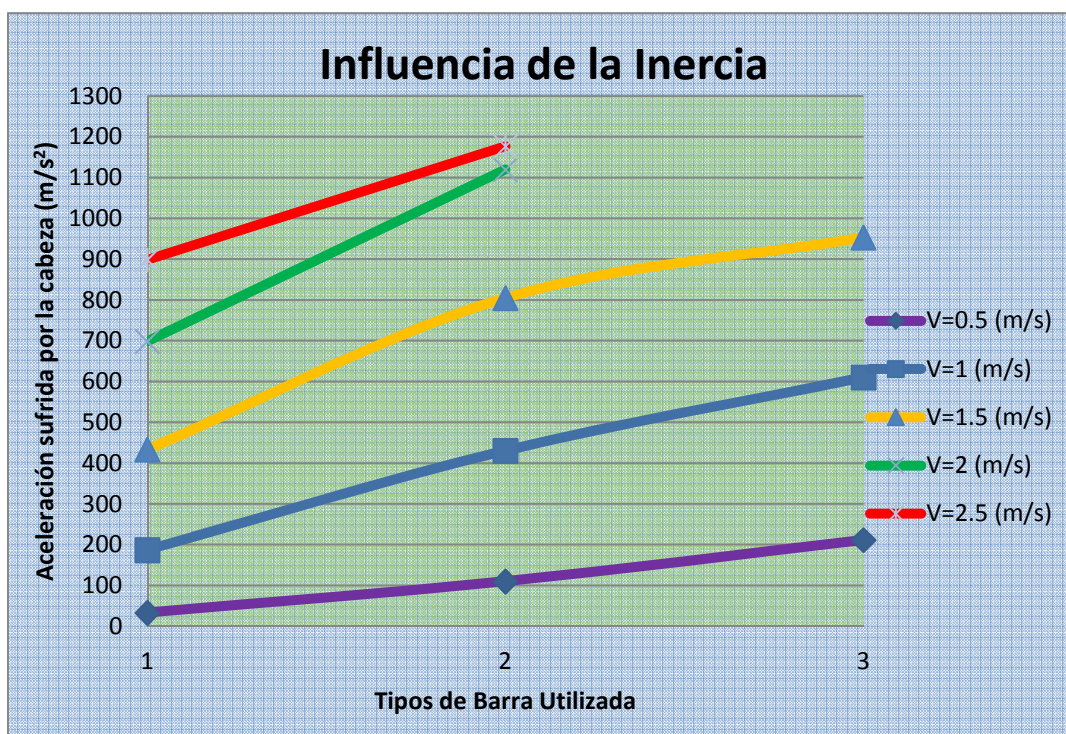


Figura 86. Aceleración sufrida para cada inercia y velocidad

IV.2.4- Observaciones

En este apartado vamos a tratar de explicar algunos detalles que merecen atención, surgidos durante esta exposición de resultados de los ensayos experimentales efectuados.

Comenzamos con los resultados que muestran la influencia de las coberturas. En este caso queremos hacer referencia a los porcentajes de reducción de cada una de las coberturas, concretamente a la variación de los mismos a medida que aumentamos la velocidad. Esto es debido a que la constante de rigidez de las coberturas no es constante, sino que sigue una curva de tipo exponencial. Veremos que este factor no afecta de esta manera en las simulaciones, ya que las coberturas que simulemos serán “ideales”, de forma que su constante de rigidez si es lineal.

El siguiente detalle que merece una explicación lo encontramos en la exposición de resultados que muestran la influencia de la inercia en los impactos. Se trata de justificar el por qué no hemos seguido utilizando la barra tipo 3 de este apartado a medida que hemos aumentado la velocidad a 2 y 2,5 m/s. Esto es sencillo de comentar, puesto que si aumentáramos la velocidad en el impacto con esa configuración de barra empleada, los valores

de fuerza que registraba el sensor alcanzaba unos niveles que hacían peligrar la integridad del propio sensor, y no queríamos arriesgarnos a producir algún tipo de daño en el funcionamiento del instrumento de medición.

Sin más que añadir, decir que en estos ensayos hemos obtenido unos registros importantes, para que a la hora de diseñar un brazo robótico tengamos en cuenta estos parámetros si queremos proteger en mayor o menor medida la parte más importante de nuestro cuerpo, la cabeza.

IV.3-Resultados obtenidos en las simulaciones

Llega el turno, en este apartado, de exponer y detallar los resultados que hemos obtenido en la realización de las simulaciones virtuales, llevadas a cabo con el software MATLAB, como ya sabemos.

En un primer lugar vamos a dar a conocer los resultados obtenidos durante las simulaciones enfocadas al estudio de la influencia de las coberturas, y seguidamente mostraremos todos los datos que recogemos del software pertenecientes a las simulaciones enfocadas a cómo afecta la inercia de las barras en las citadas fuerza y aceleración.

En esta exposición no mostramos ninguna gráfica en la que se muestre la tendencia que siguen los parámetros medidos en función de la velocidad, ya que al producirse las simulaciones en entornos ideales, las gráficas mostrarán unas tendencias completamente constantes. Por la misma razón tampoco hacemos al final de cada apartado una muestra gráfica que resuma todo el contenido expuesto.

El esquema que vamos a seguir en este caso es un poco distinto del que hemos llevado a cabo en el apartado anterior, de exposición de resultados experimentales. En este caso comenzaremos primeramente mostrando los datos obtenidos para cada una de las velocidades estudiadas, las mismas que en la fase experimental. Para cada velocidad exponemos en las gráficas todos los tipos de configuraciones empleados en cada caso, para, de esta manera, poder ver cómo influye cada una de ellas y hacernos una idea a simple vista de la importancia de cada factor. Tras cada muestra de resultados obtenidos en cada gráfica exponemos una tabla donde podemos ver con mayor detalle los valores máximos alcanzados en de cada parámetro,

fuerza y aceleración, detallando además el porcentaje de incremento o de aumento de cada configuración sobre el valor más o menos desfavorable, dependiendo del valor que tomemos como referencia. Además, como hicimos en la anterior exposición de datos, también mostraremos el valor de HIC alcanzado para las aceleraciones medidas a la velocidad más alta a la que hacemos los ensayos, amén de comunicar si los valores máximos de fuerza, obtenidos en estas simulaciones, llegarían a fracturar un cráneo humano, en relación con el ya comentado valor de referencia fijado de 4000 N. Paralelamente iremos comparando los resultados, detallados en cada una de las tablas, obtenidos en estas simulaciones con los recogidos durante los ensayos experimentales, de forma que podamos ver si la influencia real recogida en la realidad concuerda con la influencia teórica que obtengamos virtualmente, para cada uno de los factores influyentes objeto de estudio en estas simulaciones.

Finalizadas la exposición de datos para cada velocidad estudiada, que coincide con las velocidades estudiadas en los ensayos experimentales, hacemos un segundo estudio en las simulaciones, que consiste en elevar la velocidad de las barras en el punto del impacto, para los casos más desfavorables de configuraciones de las barras registrados, de manera que podamos ver cuál es el punto límite de la misma al que podemos llegar para que no produzcamos una rotura craneal debido a las fuerzas aplicadas sobre la cabeza, derivadas de esta velocidad alcanzada. A su vez, hacemos lo propio con la aceleración, intentando comprobar el criterio seguido del índice HIC, de forma que, con las mismas velocidades que hagamos las simulaciones para llegar al punto límite, mediremos la aceleración experimentada por la cabeza y calcularemos este índice, el cual nos indicará si con esos valores obtenidos de fuerza que llegarían a romper un cráneo, nuestra cabeza sufriría daños por la aceleración sufrida durante el impacto.

La razón por la cual estas pruebas no las hemos llevado a cabo en la experimentación ha sido por salvaguardar los materiales utilizados, ya que si provocáramos impactos a más altas velocidades, los sensores, especialmente el sensor de fuerza, corrían el riesgo de llegar a sus puntos límite de medición y, como consecuencia, poder causar algún daño en su funcionamiento, algo ya comentado en el apartado de observaciones anterior.

IV.3.1.-Influencia de la cobertura en el impacto

Como dijimos en el anterior capítulo, no tenemos los valores exactos de las constantes de rigidez y de amortiguación empleadas en los ensayos experimentales, por lo que no podremos comparar los resultados gráficos obtenidos en ambos tipos de ensayos, aunque si lo haremos en las tablas que muestran los porcentajes de aumento o disminución de cada configuración de barra utilizada con respecto a la primera, de modo que podamos comparar los niveles de influencia en función de estos porcentaje.

Lo que hacemos entonces es estudiar, mediante las simulaciones, otros cinco tipos de configuraciones, algo que a su vez nos amplía el abanico de coberturas estudiadas. Los valores de constante de rigidez y de amortiguación usados son los especificados en el apartado donde detallamos el método de realización de estas simulaciones. Teniendo todas ellas el valor de 10 Ns/m en su constante de amortiguación, recordamos que la primera configuración posee una constante de rigidez de 10^6 N/m, la segunda $3.33 \cdot 10^5$ N/m, la tercera $1.67 \cdot 10^5$ N/m, la cuarta $2 \cdot 10^5$ N/m, y la quinta y última configuración empleada corresponde con una constante de rigidez de 10^5 N/m.

Pasamos a mostrar los datos obtenidos, comenzando con el primer valor de velocidad de la barra en el punto empleado simulado, 0.5 m/s, y terminando con el último, 2.5 m/s.

➤ 10° (velocidad del brazo en el impacto de 0.5 m/s)

Sin tener que avanzar en este apartado, para ver los resultados que obtenemos a más altas velocidades, vemos en esta primera gráfica, figura 87, donde se muestra la fuerza aplicada sobre la cabeza en el impacto, la gran diferencia que presenta la utilización del primer tipo de cobertura en los valores obtenidos, con el resto de ellas, especialmente la última, algo que ya sucedía en las experimentaciones. Podemos destacar que, si se aplicara en los impactos una cobertura del tipo quinto, la fuerza aplicada sobre la cabeza se ve reducida muy notablemente, algo que minimizaría en gran medida los posibles daños sufridos por la cabeza.

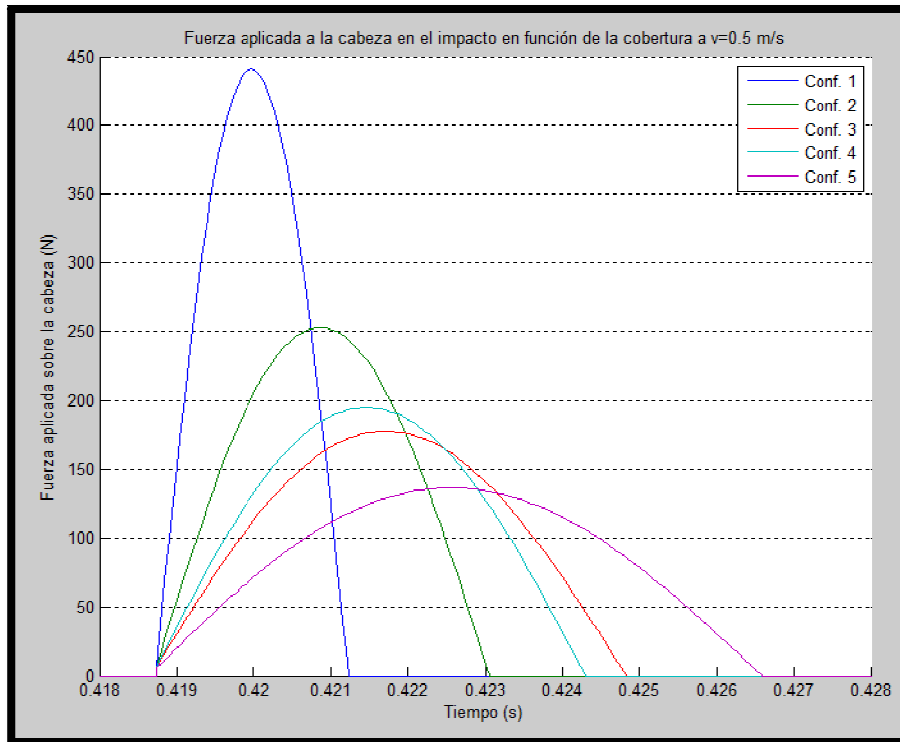


Figura 87. Fuerza aplicada a la cabeza en función de la cobertura.

Exactamente el mismo panorama muestra la figura 88, donde vemos la aceleración sufrida por la cabeza como consecuencia del golpe recibido. La influencia de cada una de las coberturas con respecto a la primera de ellas se mantiene, aparentemente, en la misma medida que con los valores de fuerza, algo que no ocurría en los ensayos experimentales. Veremos mejor estos datos en la tabla 20.

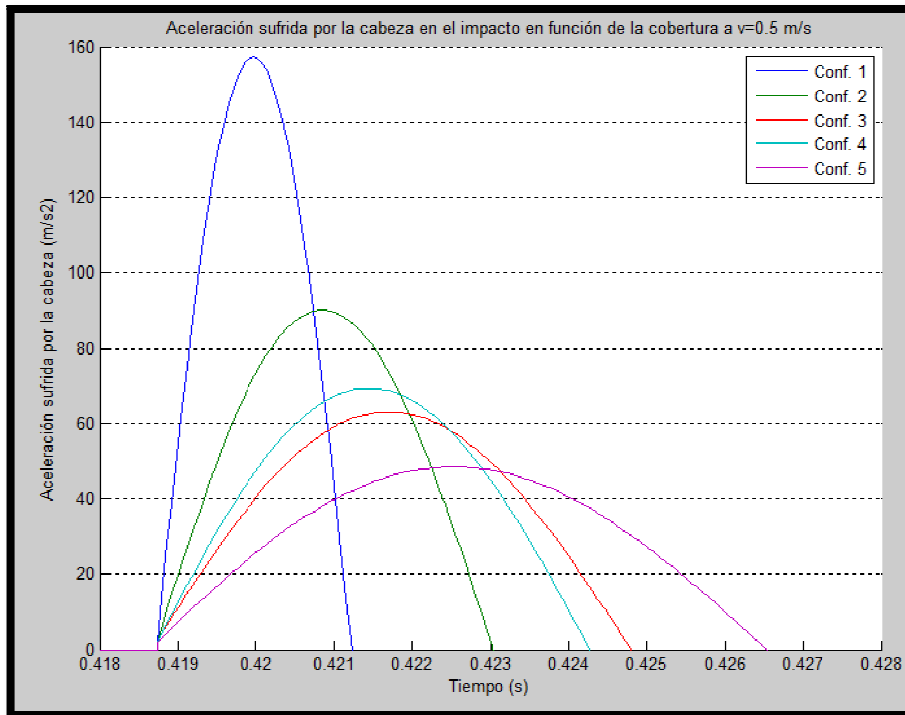


Figura 88. Aceleración sufrida por la cabeza en función de la cobertura.

Mostradas las gráficas con los resultados obtenidos, pasamos a detallar en la siguiente tabla los valores máximos alcanzados en cada una de ellas para cada tipo de cobertura simulada, calculando además el porcentaje de reducción de ambos parámetros medidos.

Tabla 20. Detalle de valores máximos alcanzados e influencia del factor a estudio.

Configuración de la cobertura	Pico de Fuerza (N)	% disminución	Pico de aceleración (m/s ²)	% disminución
Tipo 1	440,82	—	157,37	—
Tipo 2	252,85	43%	90,06	43%
Tipo 3	177,62	60%	63,14	60%
Tipo 4	194,94	56%	69,33	56%
Tipo 5	136,72	69%	48,48	69%

Ante estos datos más concretos, vemos que la reducción de ambos parámetros es más que significativa, alcanzando niveles en los porcentajes de reducción de casi el 70% por parte de la cobertura número 5 simulada.

Recordando los niveles de influencia de las coberturas en los ensayos experimentales llevados a cabo, para la misma velocidad en el impacto, en todas ellas teníamos una influencia de entorno a un 80% de reducción de los

valores de fuerza y aceleración registrados, con respecto al primer tipo de cobertura utilizada, es decir, ningún tipo de cobertura empleada influía más o menos que la otra, algo que en este caso de coberturas ideales si ocurre. Comentaremos esta situación en el apartado de observaciones de esta exposición de datos virtuales.

➤ 20° (velocidad del brazo en el impacto de 1 m/s)

En las dos gráficas siguientes, figuras 89 y 90, podemos apreciar que al aumentar la velocidad en el punto de impacto la influencia que tienen los diversos tipos de coberturas simulados sigue por el mismo camino, aumentando, como consecuencia de elevar la velocidad en el impacto, los valores obtenidos de la primera configuración simulada especialmente.

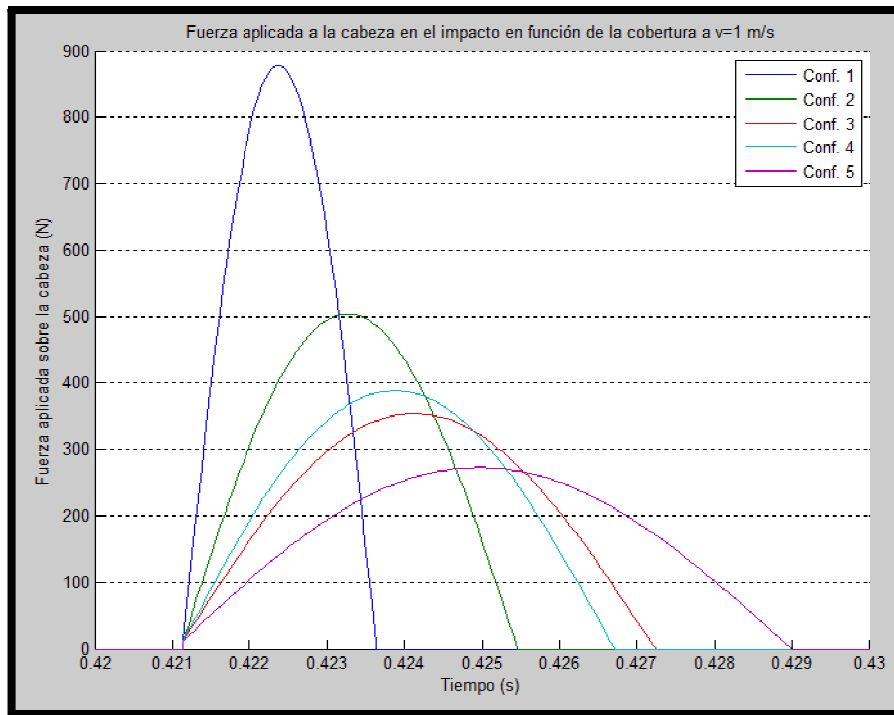


Figura 89. Fuerza aplicada a la cabeza en función de la cobertura.

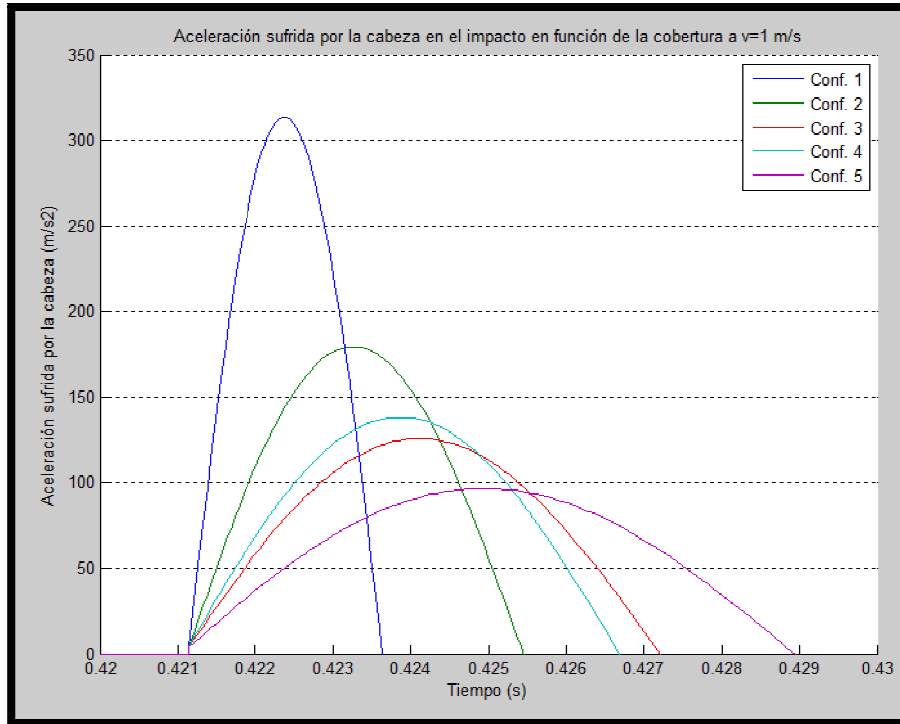


Figura 90. Aceleración sufrida por la cabeza en función de la cobertura.

Pasamos a mostrar en la tabla 21 los valores pico alcanzados, tanto de velocidad como de aceleración, incluyendo los porcentajes en los que disminuyen los valores, obtenidos con las simulaciones, de los tipos de coberturas 2, 3, 4 y 5, con respecto a la primera, la más desfavorable.

Tabla 21. Detalle de valores máximos alcanzados e influencia del factor a estudio.

Configuración de la cobertura	Pico de Fuerza (N)	% disminución	Pico de aceleración (m/s ²)	% disminución
Tipo 1	878,25	—	313,55	—
Tipo 2	503,76	43%	179,46	43%
Tipo 3	353,91	60%	125,8	60%
Tipo 4	388,39	56%	138,15	56%
Tipo 5	272,39	69%	96,61	69%

La influencia en este caso se mantiene en los mismos números que para la velocidad anterior simulada, por lo que sigue siendo muy elevada sobre todo en el último caso de cobertura, aunque ya con el segundo tipo de cobertura simulada se reducen enormemente los valores, tanto de fuerza como de velocidad. Si recordamos de nuevo los valores de los porcentajes de influencia de cada una de las coberturas empleadas en los ensayos experimentales para esta velocidad del brazo en el impacto, el segundo tipo

llegaba a reducir en un 80% los valores de fuerza, y en un 70% los de aceleración, con respecto al primero. Las otras tres se encontraban en unos niveles de un 90% aproximadamente tanto para fuerza como para aceleración, por lo que la influencia de las tres últimas configuraciones en los datos recogidos aún no era distinta para esta segunda velocidad.

A la vista de los resultados mostrados hasta ahora, para este caso en el que mostramos los resultados obtenidos en las simulaciones realizadas enfocadas a estudiar la influencia de las coberturas, nos vamos a ahorrar exponer las gráficas con los datos de aceleración y de fuerza para las velocidades de impacto de 1.5 y 2 m/s, saltándonos el esquema inicial planteado, ya que estamos viendo que los porcentajes en que se ven reducidos los mismos con respecto al primer tipo de cobertura utilizado son idénticos, ya que en las simulaciones no afecta ningún factor externo y la constantes de rigidez introducida representa una cobertura ideal, algo que nos da una exactitud posible sólo en la teoría. Pasamos directamente a la simulación realizada para una velocidad de la barra en el punto de impacto de 2.5 m/s, donde vemos los valores más altos alcanzados tanto de velocidad como de fuerza.

➤ 50° (velocidad del brazo en el impacto de 2.5 m/s)

Para la velocidad de simulación de 2.5 m/s, vemos en las figuras 91 y 92 cómo la influencia de las coberturas en los datos expuestos sigue siendo la misma, algo que comprobaremos con más detalle viendo los valores exactos alcanzados en la tabla que mostramos a continuación. Si bien podemos destacar en este punto que la fuerza aplicada a la cabeza, figura 91, cuando tenemos colocada en el punto de impacto una cobertura del tipo primero, alcanza y supera el nivel de los 2000 N. En cuanto a la aceleración que sufre la cabeza, vemos que su valor no es muy elevado para este mismo caso, en comparación con los datos obtenidos experimentalmente, en donde la configuración de cobertura con la que se llegaba a alcanzar el nivel de los 2000 N de fuerza superaba con creces esta marca de unos 750 m/s².

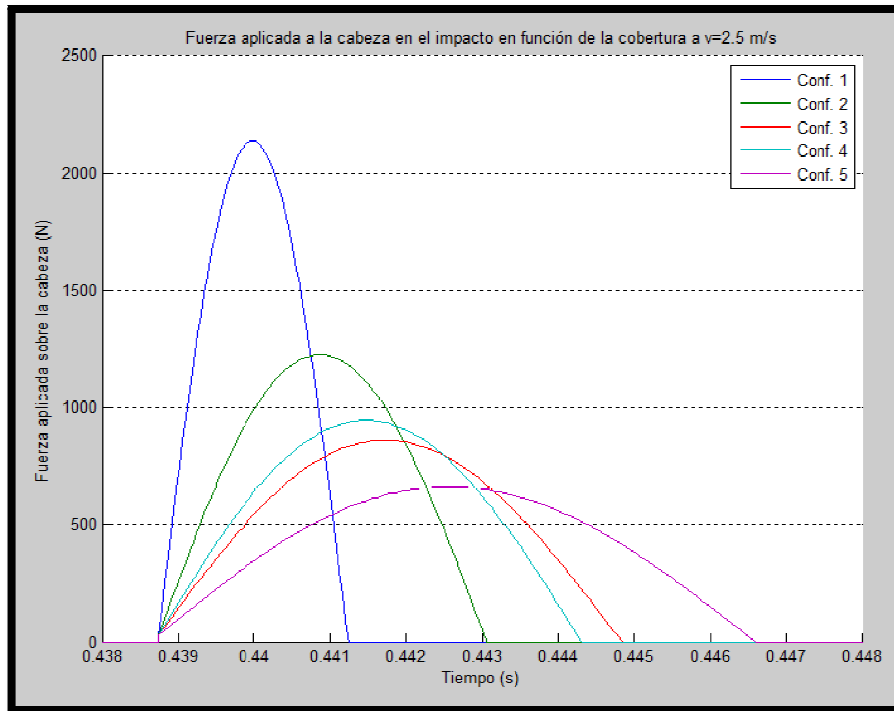


Figura 91. Fuerza aplicada a la cabeza en función de la cobertura.

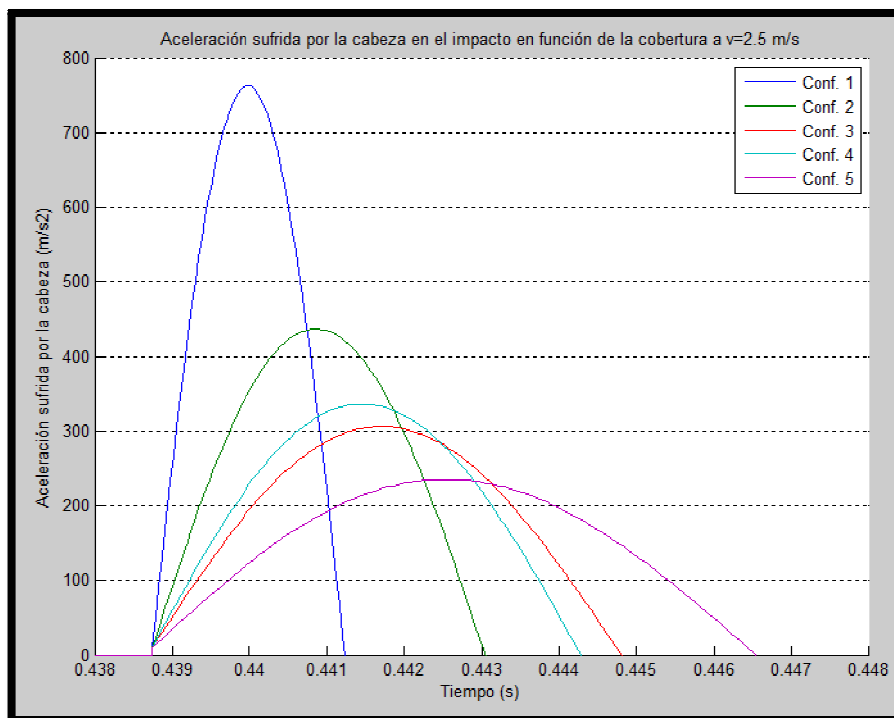


Figura 92. Aceleración sufrida por la cabeza en función de la cobertura.

Además de los detalles que venimos mostrando habitualmente en las tablas, en esta, tabla 22, mostramos los valores calculados de HIC alcanzados debido a la aceleración sufrida por la cabeza más alta obtenida en esta

parte, así como la indicación pertinente a si el valor más alto de fuerza obtenida supera el valor de referencia establecido.

Tabla 22. Detalle de valores máximos alcanzados, influencia del factor e índices.

Configuración de la cobertura	Pico de fuerza (N)	% disminución	Rotura craneal	Pico de aceleración (m/s ²)	% disminución	HIC
Tipo 1	2137,56	—	No	763,14	—	55,5
Tipo 2	1226	43%	No	436,74	43%	23,8
Tipo 3	861,36	60%	No	306,16	60%	13,83
Tipo 4	945,37	56%	No	336,26	56%	15,97
Tipo 5	662,94	69%	No	235,12	69%	9,22

Manteniendo el mismo tono, las coberturas número 3, 4 y 5, aportan una gran ventaja para que los daños que sufra la cabeza ante un posible impacto queden minimizados de forma considerable, aunque el segundo tipo de cobertura simulado también aporta una buena reducción de ambos valores, fuerza y aceleración. Comparándolos con los porcentajes que obteníamos en las experimentaciones, la forma en que influyen cada una de las coberturas tampoco se asemeja en este caso, ya que en estos ensayos, con el tipo 2 de configuración, la reducción disminuía bastante, bajando los niveles de porcentaje de reducción hasta un 20% aproximadamente. Las coberturas 3 y 4 se mantenían en torno al 70% de reducción de los valores, y el quinto tipo se disparaba, llegando a alcanzar unos niveles de reducción de más del 90%. De esta manera comprobamos una vez más la variación que posee en la realidad una cobertura cuando se aplica más o menos fuerza sobre ella.

En cuanto a los índices indicativos de un posible daño cerebral se refiere, decir que ningún valor de fuerza ni de aceleración alcanza el nivel suficiente de magnitud como para llegar a provocar algún daño severo en una cabeza humana. Si los referimos con los obtenidos en las experimentaciones, los valores máximos alcanzados de fuerza en estas rondaban la misma magnitud, en el caso más desfavorable, que en las simulaciones, por lo que tampoco provocaría una fractura craneal. En el caso del índice referido a la aceleración sufrida por la cabeza, HIC, es incluso algo mayor en las simulaciones realizadas, debido a que el tiempo de exposición de la cabeza a esa aceleración es mayor, algo que hace aumentar dicho valor si recordamos lo explicado en el capítulo de revisión bibliográfica, pero que en ambos casos no llega a ser nada elevado como para que la cabeza sufra algún daño por culpa de esta aceleración.

Límites de velocidad en el impacto

La segunda parte de esta exposición, siguiendo con el esquema inicial planteado, corresponde a mostrar los resultados obtenidos en las simulaciones enfocadas a determinar la velocidad máxima a la que podríamos golpear un cráneo antes de su fractura, para el caso más desfavorable de cobertura utilizada, en este caso el primer tipo.

Aprovechando las simulaciones efectuadas, hemos obtenido también los valores de aceleración sufrida por la cabeza en el impacto para comprobar si el índice HIC alcanza los niveles que tenemos de referencia a los cuales dicha aceleración provocaría daños en la cabeza, en los cuales los niveles de fuerza alcanzados producirían una rotura craneal, también según la referencia a la que nos acogemos en este caso.

Por lo tanto, exponemos en la figura 93 los valores obtenidos de fuerza aplicada sobre la cabeza en el impacto durante las simulaciones a distintas velocidades, comenzando por la siguiente velocidad a la que hemos llegado a simular la situación de impacto en el anterior caso, siguiendo la progresión de apertura angular de la barra, 10° , y terminando por la primera velocidad a la cual llegamos al valor de 4000 N, valor referencia de rotura craneal tomado. Seguidamente, en la figura 94, se muestra la aceleración sufrida por la cabeza en el impacto para las mismas velocidades simuladas.

En esta ocasión los valores que mostramos de velocidad se corresponden exactamente con los adquiridos por esta barra, número 4 de sección cuadrada, para los distintos ángulos de apertura, sin simplificaciones ni aproximaciones.

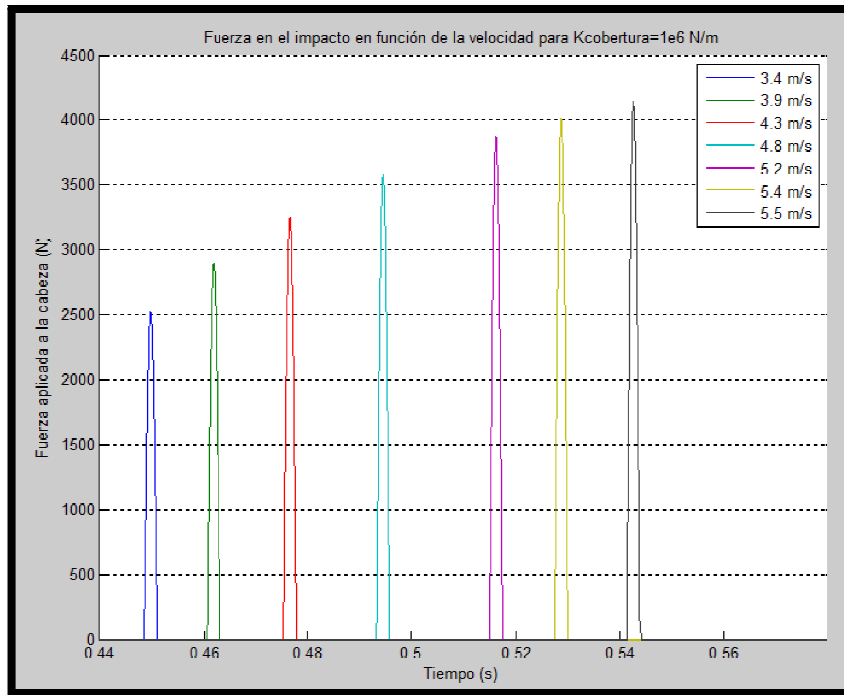


Figura 93. Fuerza aplicada a la cabeza en función de la velocidad.

A simple vista, podemos apreciar en la figura 93 que la velocidad máxima a la que un choque produce una rotura está en torno a los 5.4 m/s, ya que en la última velocidad simulada vemos que llega a superarse ese valor referencia, incluso en la penúltima velocidad simulada ya se rozan esos 4000 N.

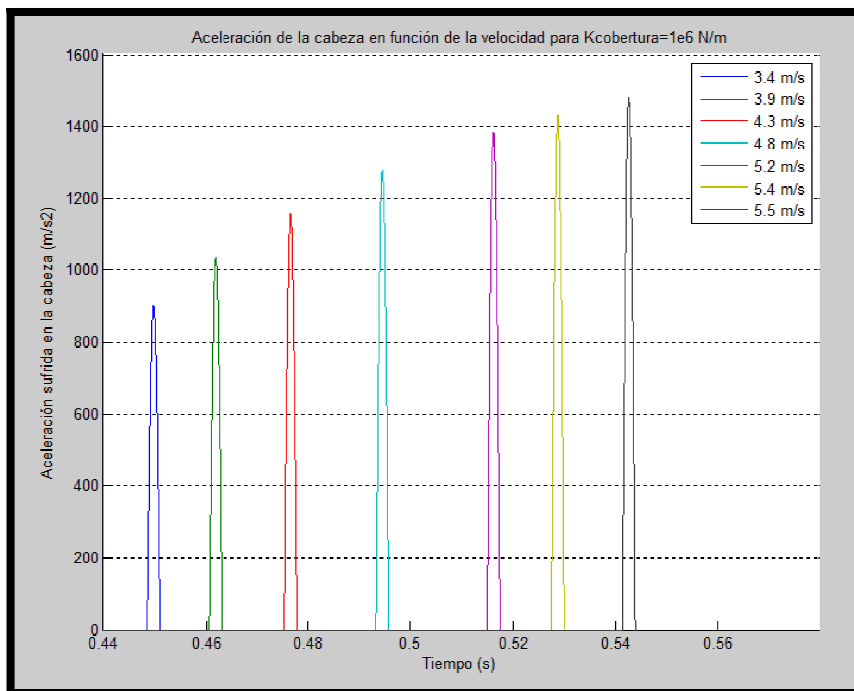


Figura 94. Aceleración sufrida por la cabeza en función de la velocidad.

Destacamos, en la gráfica que nos muestra los datos de aceleración, figura 94, el valor de esta que se alcanza para una velocidad en el impacto de 5.5 m/s, llegando casi a los 1500 m/s².

Detallamos todos los valores máximos alcanzados en ambas gráficas en la tabla 23, y, como hemos dicho, indicamos si la fuerza alcanzada rompería o no un cráneo humano. También mostramos el valor calculado de HIC para las aceleraciones recogidas.

Tabla 23. Detalle de valores máximos alcanzados e índices, para cada velocidad.

Velocidad de la barra en el impacto	Pico de fuerza (N)	Rotura craneal	Pico de aceleración (m/s ²)	HIC
3.4 (m/s)	2529,2	No	902,9	84,46
3.9 (m/s)	2901,2	No	1035,8	119,06
4.3 (m/s)	3251,4	No	1160,8	158,28
4.8 (m/s)	3576,7	No	1276,8	201,05
5.2 (m/s)	3875	No	1383,3	245,41
5.4 (m/s)	4012,7	Si	1432,6	268,04
5.5 (m/s)	4143,1	Si	1479	290,42

Aunque las simulaciones las estamos efectuando con un modelo en que simulamos una barra totalmente rígida, si en la realidad nos encontrásemos con una brazo robot cuya rigidez es bastante elevada y llegara a impactarnos a una velocidad superior de 5.4 m/s, sin que hubiese ningún tipo de recubrimiento intermedio, ni en la cabeza ni en el brazo, esto nos llegaría a provocar una fractura craneal debido a la fuerza aplicada en el impacto. Aunque si miramos el valor de HIC y nos olvidamos del valor de fuerza alcanzado, la probabilidad de provocarnos estos impactos algún daño severo, como consecuencia de la aceleración sufrida por la cabeza en el choque, es bastante bajo, según las gráficas mostradas en el apartado de revisión bibliográfica.

IV.3.2.-Influencia de la inercia en el impacto

Entramos en la segunda parte de las simulaciones, las enfocadas a estudiar la influencia de la inercia que poseen las barras en los datos obtenidos de aceleración sufrida por la cabeza como consecuencia del impacto y de la fuerza que se aplica a la misma en el choque.

Al igual que hemos hecho para los ensayos experimentales, pero con la diferencia de que en este caso, la simulación, la rigidez de la barra no podemos adaptarla a la realidad, utilizamos tres tipos de barras para realizar el estudio, con los diferentes valores de inercia correspondientes cada una. Los niveles en los que influye la inercia deberían de corresponderse, ya que en ambos casos la rigidez de las barras no varía para las distintas configuraciones estudiadas. Como los valores de inercia que poseen las barras que simulamos son los mismos que los que tenían las barras con las que hemos hecho las experimentaciones, barra número 2 de sección cuadrada a la que multiplicamos por 2.5 y por 4 su inercia respecto al eje de giro, a la hora de introducir estos valores tenemos que hacerles una pequeña adaptación. Esto se debe a que en el software utilizado, SimMechanics, los valores de inercia a introducir están referidos al centro de gravedad del cuerpo. Aplicando la ecuación de Steiner, resolvemos fácilmente los dos segundos casos de configuraciones de barras empleadas. Finalmente los valores a introducir en el software son, para la primera configuración de $I_{B1}=0.080123 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$, $I_{B2}=0.373282 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ para la segunda, y $I_{B3}=0.665944 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ para la tercera.

Introduciendo estos parámetros en las variables que se encargan de definir la inercia de la barra y ejecutando el programa, obtenemos los siguientes resultados, que comenzaremos por la primera velocidad simulada, 0.5 m/s.

➤ 10° (velocidad del brazo en el impacto de 0.5 m/s)

Para esta primera velocidad simulada mostramos, como viene siendo habitual, los valores, obtenidos del software, de fuerza aplicada a la cabeza, figura 95, parte superior, y aceleración consecuente que esta sufre, figura 96, parte inferior. Como la constante de rigidez en el impacto utilizada para este estudio es bastante elevada, la que tenemos de referencia que posee una estructura craneal, los valores de esta primera simulación ya son elevados en los tres casos. Podemos observar fácilmente cómo influye la inercia nada más que echando un primer vistazo en las dos gráficas, de forma que la barra simulada con menor inercia produce unos valores, de ambos parámetros, menores que en las otras dos simulaciones.

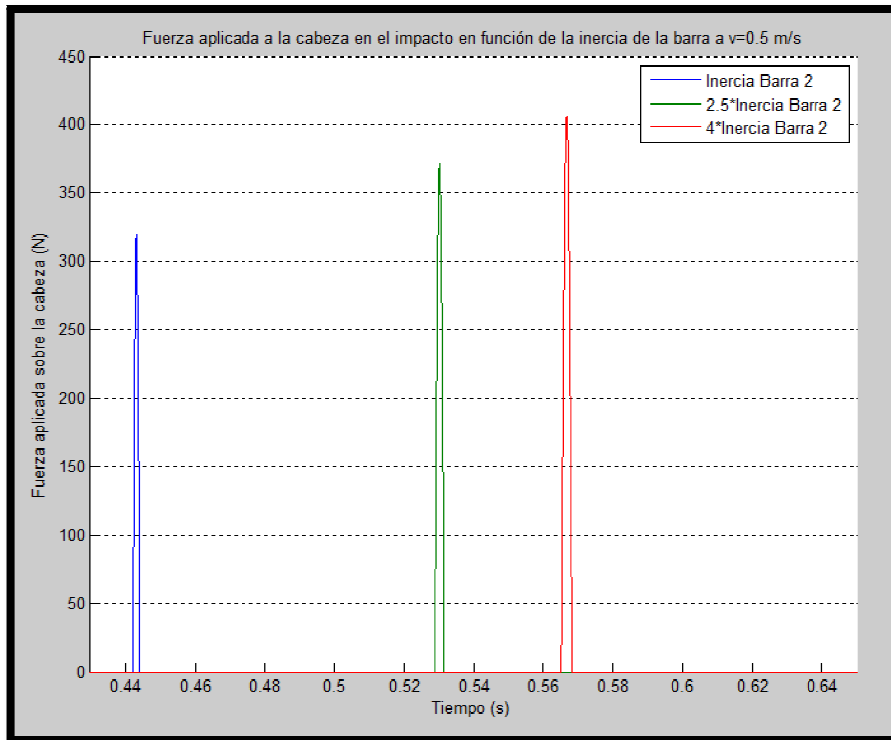


Figura 95. Fuerza aplicada a la cabeza en función de la inercia.

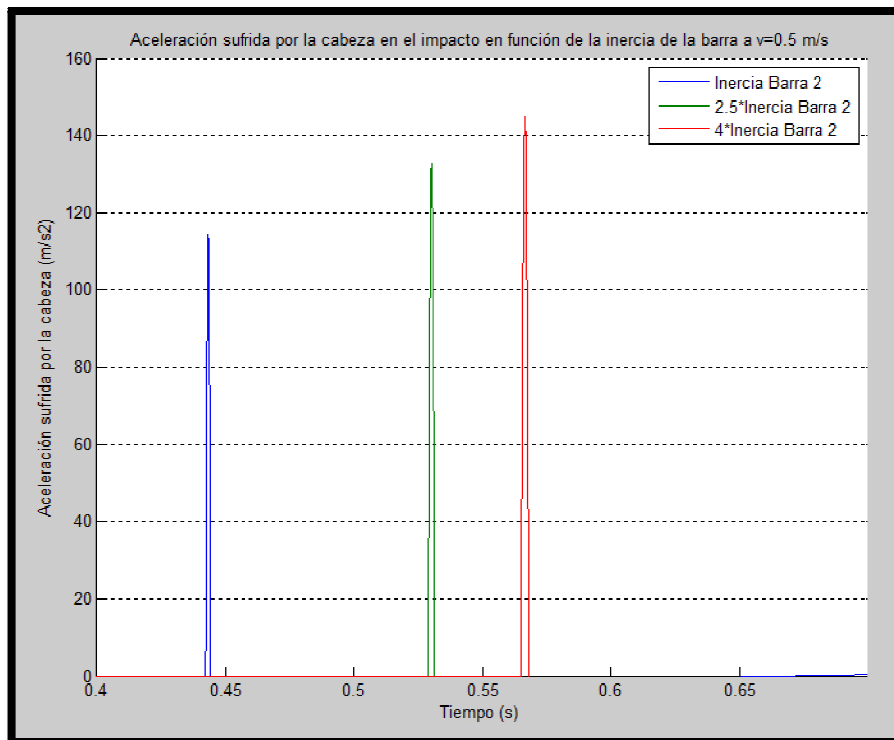


Figura 96. Aceleración sufrida por la cabeza en función de la inercia.

A continuación detallamos en la tabla 24 los valores máximos que se han alcanzado en esta primera simulación de fuerza y aceleración, y el porcentaje en que aumentan dichos valores de los tipos 2 y 3 de

configuraciones con respecto a la primera barra simulada, la que menos inercia posee.

Tabla 24. Detalle de valores máximos alcanzados e influencia del factor a estudio.

Configuración de la barra	Pico de Fuerza (N)	% aumento	Pico de aceleración (m/s ²)	% aumento
Tipo 1 (Inercia Barra 2 s.c.)	319,55	—	114,16	—
Tipo 2 (2,5*Inercia Barra 2 s.c.)	371,64	16%	132,66	16%
Tipo 3 (4*Inercia Barra 2 s.c.)	405,98	27%	144,84	27%

Con los valores detallados en la tabla 24, observamos que al aumentar la inercia de las barras se aumentan los valores de fuerza y aceleración, algo que cabía esperar, aunque este aumento no es demasiado considerable. Si comparamos estos valores con los obtenidos en la experimentación, vemos que existe una gran diferencia, tanto en las fuerzas pico registradas para cada barra, como para las aceleraciones máximas obtenidas. Además, los porcentajes de aumento son enormemente superiores en la parte experimental, alcanzando niveles de en torno al 250% para el segundo tipo de barra empleado con respecto al primera, y de más del 500% para el tercer tipo de barra. Trataremos de explicar este asunto en el apartado de observaciones de esta exposición de resultados teóricos.

➤ 20° (velocidad del brazo en el impacto de 1 m/s)

Pasando a la segunda velocidad simulada, mirando las gráficas, figuras 97 y 98, podemos observar como la tendencia se mantiene, de igual manera que en los impactos simulados a 0.5 m/s, únicamente aumentan las magnitudes de los valores registrados. Destacamos que a esta segunda velocidad, una velocidad en el impacto baja, la fuerza que se llega a alcanzar, para una barra con la inercia del tipo 3, supera el valor de los 800 N.

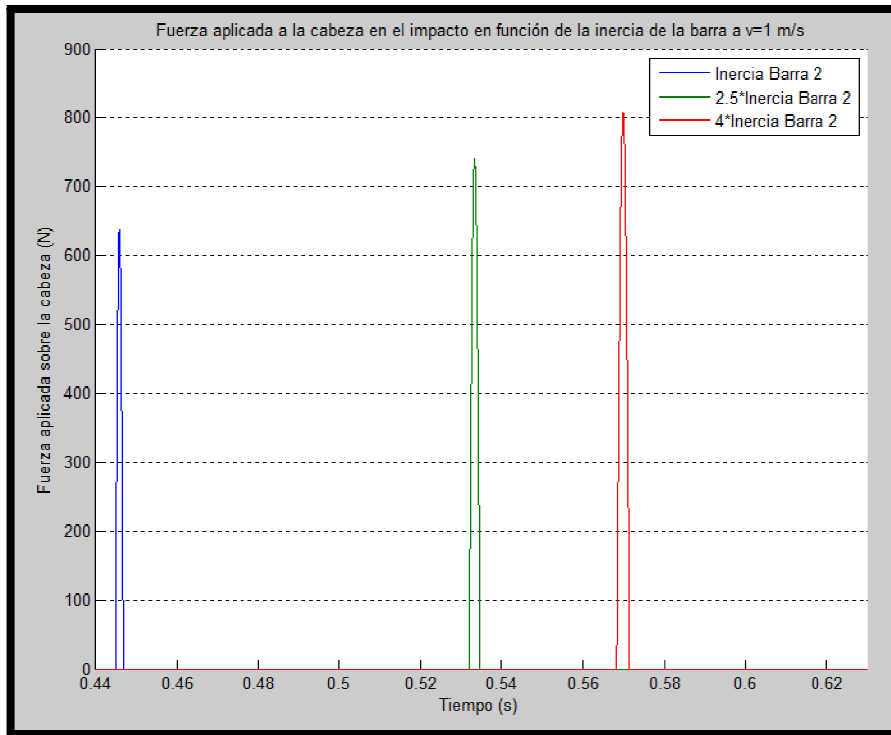


Figura 97. Fuerza aplicada a la cabeza en función de la inercia.

En la tabla que mostraremos tras estas dos figuras veremos si los porcentajes de aumento de los valores se mantienen con los calculados en la simulación anterior, de modo que si es así, volveremos a hacer lo mismo que en el apartado anterior, ahorrarnos la exposición de resultados para las velocidades de simulación de 1.5 m/s y de 2 m/s, ya que al producirse estas simulaciones en un entorno ideal, no habrá cambios de ningún tipo, únicamente un aumento de los valores que obtengamos del software, tanto para aceleración sufrida por la cabeza como para la fuerza aplicada sobre la misma.

El que sí mostremos los resultados obtenidos en la simulación realizada a la velocidad de 2.5 m/s se debe a las mismas razones que expusimos en el anterior apartado.

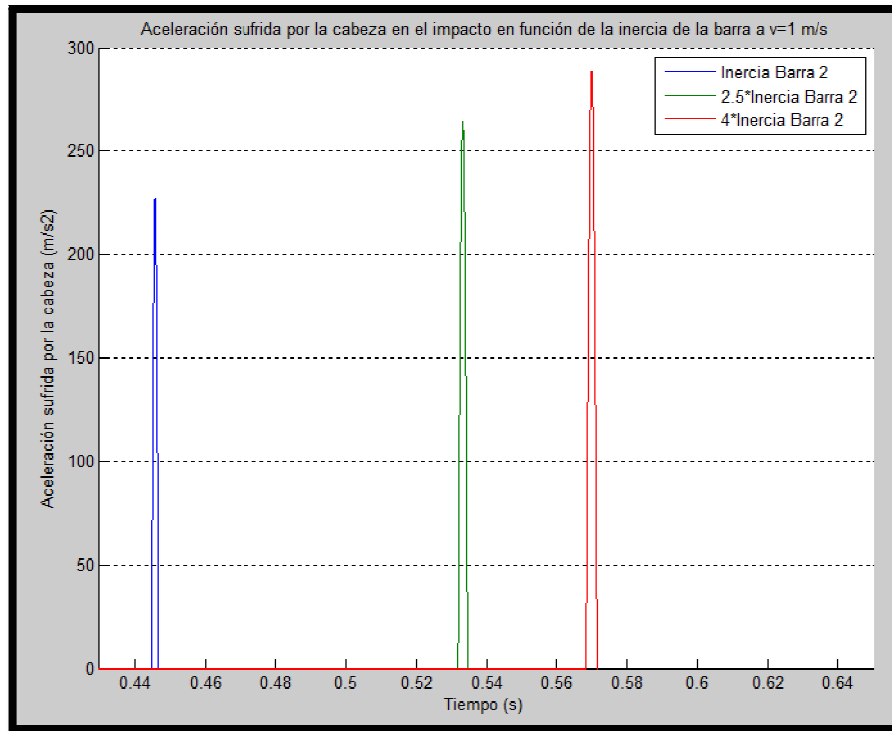


Figura 98. Aceleración sufrida por la cabeza en función de la inercia.

Exponemos los valores más altos alcanzados y los porcentajes de aumento calculados para los tipos 2 y 3 de barras respecto al primer tipo.

Tabla 25. Detalle de valores máximos alcanzados e influencia del factor a estudio.

Configuración de la barra	Pico de Fuerza (N)	% aumento	Pico de aceleración (m/s ²)	% aumento
Tipo 1 (Inercia Barra 2 s.c.)	636,68	—	227,45	—
Tipo 2 (2,5*Inercia Barra 2 s.c.)	740,71	16%	264,38	16%
Tipo 3 (4*Inercia Barra 2 s.c.)	808,77	27%	288,51	27%

Efectivamente, vemos que los porcentajes de aumento de los valores se mantienen, por lo que pasamos, tras comparar este ensayo con su homólogo experimental, a los resultados obtenidos a la velocidad de 2.5 m/s.

Recordando los porcentajes en que aumentaban los parámetros de fuerza y aceleración para esta velocidad, estos variaban dependiendo de si nos referimos a los valores de aceleración o de fuerza. Para el segundo tipo de barra, estos rondaban el valor del 150% aproximadamente, y para el tercero en torno al 300% para la reducción de fuerza respecto a la barra uno, y en torno al 200% para la disminución de aceleración. De esta forma vemos como se mantiene una gran distancia, aunque esta se haya visto reducida,

entre los porcentajes de disminución de los datos experimentales y los virtuales. En cuanto a la magnitud de los valores máximos alcanzados, para esta velocidad se invierte la situación, de forma que ahora los picos máximos alcanzados en los ensayos experimentales superan a los de las simulaciones. Como hemos dicho, comentaremos esto en el apartado de observaciones, pero podemos recordar que la inestabilidad de la cobertura utilizada era bastante significativa.

➤ 50° (velocidad del brazo en el impacto de 2.5 m/s)

Para esta última velocidad simulada con las configuraciones de las barras descritas, podemos ver que el valor de fuerza, figura 99, para el tipo de barra más desfavorable, el tipo 3, alcanza casi, en su valor máximo, el nivel de los 2000 N. Esto entra en contraste de nuevo con los ensayos experimentales, en los cuales la tercera configuración de barra utilizada ya superaba este valor para una velocidad de 1.5 m/s.

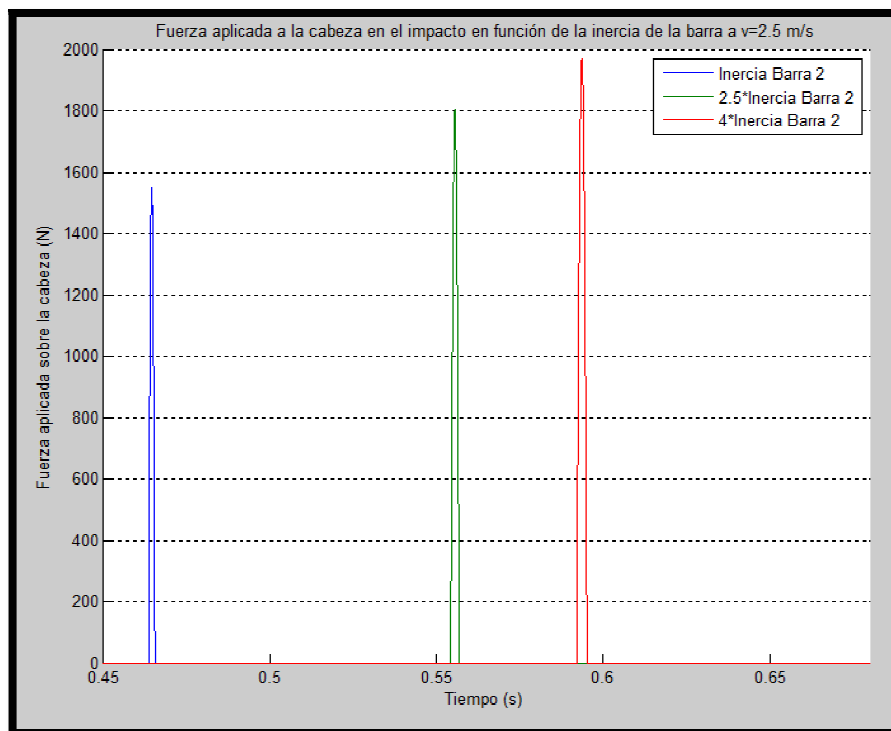


Figura 99. Fuerza aplicada a la cabeza en función de la inercia.

En cuanto al valor de aceleración obtenido, figura 100, vemos que de la primera configuración utilizada a la tercera apenas si hay unos 150 m/s² de diferencia. Algo que nos hace ver que la influencia que tiene la inercia de las barras en los impactos no es muy considerable para las aceleraciones que sufre la cabeza.

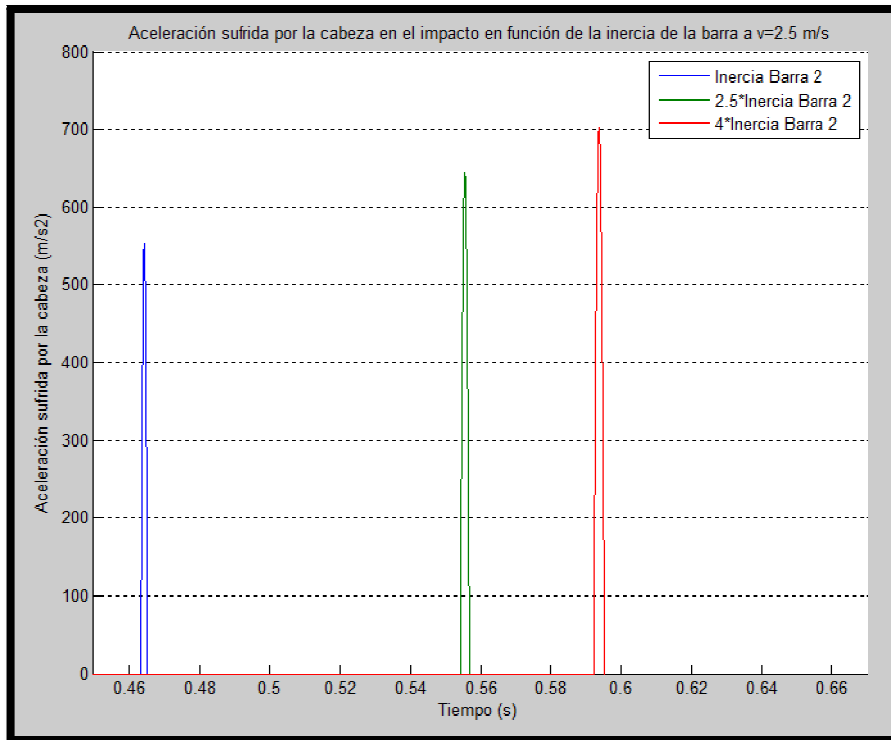


Figura 100. Aceleración sufrida por la cabeza en función de la inercia.

En la siguiente tabla, además de exponer los datos que vienen siendo habituales, mostramos el índice calculado de HIC y hacemos referencia a si se produciría una rotura craneal con los valores máximos de fuerza aplicada sobre la cabeza, algo que también venimos realizando para la última velocidad simulada en este punto.

Tabla 26. Detalle de valores máximos alcanzados, influencia del factor e índices.

Configuración de la barra	Pico de fuerza (N)	% aumento	Rotura craneal	Pico de aceleración (m/s ²)	% aumento	HIC
Tipo 1	1549,4	—	—	553,49	—	19,17
Tipo 2	1802,62	16%	No	643,38	16%	38,57
Tipo 3	1969,04	27%	No	702,4	27%	55,97

Como era de esperar, para los datos obtenidos en las simulaciones, los porcentajes de aumento se mantienen también para esta última velocidad simulada. Comparándolos con los porcentajes de la experimentación, ahora sólo la barra dos utilizada con respecto a la uno, vemos que estos siguen siendo distantes, aunque se hayan visto reducidos en gran medida.

En cuanto a los índices representativos de daño cerebral, decir que ni los valores de fuerza aplicada sobre superan el límite, ni la aceleración que

sufre la cabeza es tan grande como para provocar algún tipo de daño, al igual que ocurría en los ensayos reales, de los que obteníamos unos valores de HIC muy parecidos en las barras uno y dos.

Límites de velocidad en el impacto

Y los últimos resultados que vamos a exponer en este capítulo, pertenecen al estudio de las velocidades máximas admisibles para que se produzca una rotura craneal como consecuencia de la fuerza aplicada a la cabeza en el impacto, si utilizamos una barra con estas características, en este caso la que nos estaba proporcionando los datos más desfavorables, la barra tipo 3. Paralelamente, obtenemos también los valores de aceleración sufrida por la cabeza durante estos choques para comprobar si un impacto que produciría una rotura craneal como consecuencia de la fuerza aplicada, nos provocaría un daño severo en la cabeza a consecuencia de la aceleración sufrida en el mismo.

En la figura 101 revelamos los datos fuerza aplicada sobre la cabeza, obtenidos en las simulaciones para cada una de las velocidades que indicamos. Y en la figura 102 hacemos lo propio con los resultados de aceleración.

Podemos comprobar a simple vista que el límite de velocidad del brazo en el impacto es de 4.2 m/s, ya que se alcanza el límite de los 4000 N. Para este valor de velocidad, las aceleraciones que sufre la cabeza superan el valor de los 1400 m/s², magnitud que veremos si provocaría o no un daño cerebral.

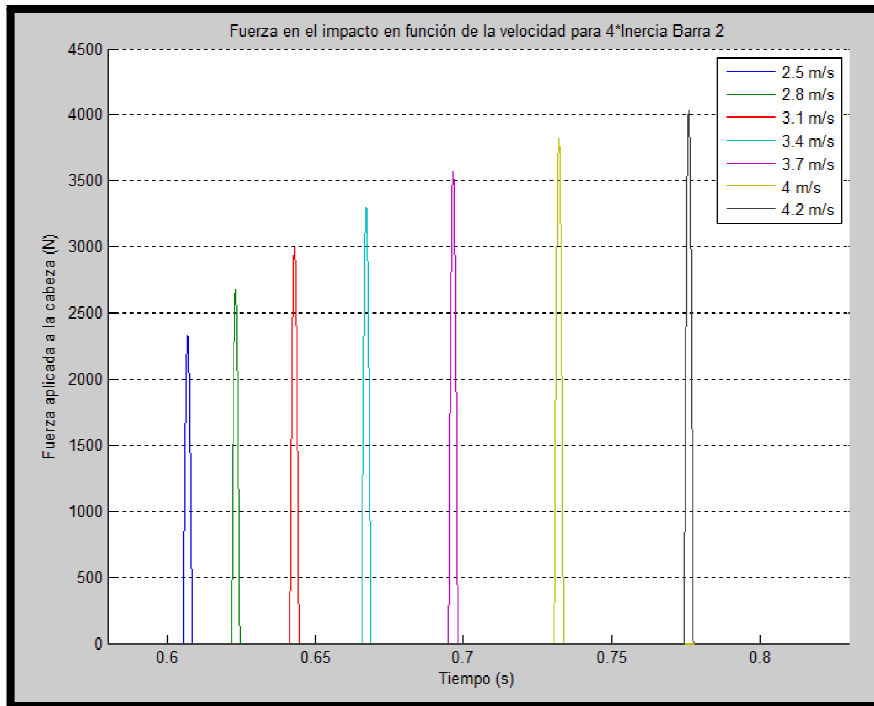


Figura 101. Fuerza aplicada a la cabeza en función de la velocidad.

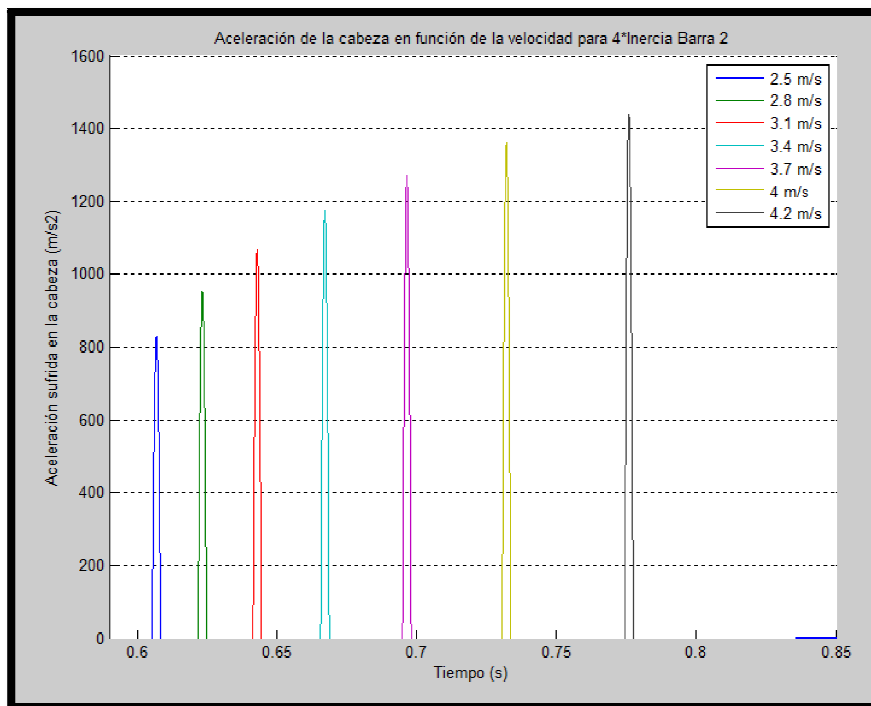


Figura 102. Aceleración sufrida por la cabeza en función de la velocidad.

En la siguiente tabla mostramos los valores máximos alcanzados para cada velocidad, de fuerza y de aceleración, y detallamos si los niveles alcanzados de estos parámetros medidos superan los límites que producirían un daño cerebral.

Tabla 27. Detalle de valores máximos alcanzados e índices, para cada velocidad.

Velocidad de la barra en el impacto	Pico de fuerza (N)	Rotura craneal	Pico de aceleración (m/s ²)	HIC
2.5 (m/s)	2329,74	No	831,11	85,16
2.8 (m/s)	2672,32	No	953,37	120,1
3.1 (m/s)	2994,46	No	1068,32	159,47
3.4 (m/s)	3294,54	No	1175,34	202,64
3.7 (m/s)	3568,64	No	1273,16	247,34
4 (m/s)	3816,42	No	1361,39	292,77
4.2 (m/s)	4035,23	Si	1439,53	336,05

La barra simulada en este caso, con la velocidad de 4.2 m/s en el impacto ya se produciría una rotura craneal, mientras que para el valor del índice HIC no alcanza ni la mitad de lo que indicaría un daño cerebral grave por culpa de la aceleración sufrida por la cabeza.

IV.3.3.Observaciones

Concluimos la exposición de resultados obtenidos durante las simulaciones con el apartado donde vamos a tratar de explicar algunos detalles que no concuerdan con lo esperado.

Nos referimos al primer factor objeto de estudio en estas simulaciones, las coberturas, para detallar la causa que entendemos es la responsable de que haya esa gran diferencia, en función de la velocidad, entre los valores que recogemos de forma experimental y los que obtenemos de las simulaciones, y en los porcentajes en que se ven reducidos los mismos en función del tipo de cobertura estudiado.

Estas discrepancias varían en función de la velocidad del impacto, esto se debe a la inestabilidad de la cobertura colocada en el punto de impacto en las experimentaciones. Como la rigidez de las coberturas simuladas en el software siempre va a tener el mismo valor, la influencia de cada una de ellas siempre va a ser la misma, pero para el caso real, esto no es así, sino que el valor de la rigidez de cada una de las coberturas va a variar en función de la fuerza aplicada, la cual aumenta en función de la velocidad del brazo en el impacto.

V. Conclusiones

V.1.-Conclusiones y futuros proyectos

Ensayos experimentales

- Comenzando con los ensayos enfocados a estudiar la influencia de las coberturas, podemos afirmar que este factor es determinante a la hora de reducir los valores de fuerza aplicada a la cabeza en un impacto, y aceleración de la misma. Todos los datos registrados cuando hemos introducido una cobertura en el punto del impacto, exceptuando la del primer tipo que imitaba la rigidez de la piel humana, han sido muy favorables, en cuanto a la disminución de estos parámetros se refiere. Dependiendo de la velocidad a la que el brazo robot trabaje, la influencia de las coberturas varía. Si la velocidad de los movimientos del brazo robot no es muy elevada (entre 0.5 y 1 m/s), colocando cualquier tipo de cobertura estudiada en los ensayos, las magnitudes de los parámetros de aceleración de la cabeza y fuerza aplicada sobre ella se verán reducidos enormemente (en torno al 80%), minimizando cualquier tipo de riesgo o daño que pueda sufrir la cabeza. Si la velocidad de trabajo de las partes móviles de un robot asistencial o de servicio es más elevada, entonces será más conveniente introducir una cobertura del quinto tipo utilizado en nuestros ensayos, ya que esta es la que más reduce, en proporciones muy elevadas ($\approx 90\%$), los parámetros registrados.
- Respecto a la influencia de la inercia, la reducción de la misma nos provoca unos daños menores en la cabeza, ya que los valores medidos disminuyen. En este caso el aumento tanto de la fuerza como de la aceleración, con respecto a la primera barra utilizada, ha sido más significativo a baja velocidad (0.5 m/s). Entonces, a la hora de diseñar un robot que opere en entornos compartidos con personas, hay que tener en cuenta la velocidad de trabajo de los brazos móviles. Si la velocidad es reducida, los brazos que posea este deben de tener la mínima inercia posible. Para velocidades mayores, a menor inercia del brazo menores fuerzas aplicaremos a la cabeza en un posible impacto, y menores aceleraciones consecuentes sufrirá la misma, pero no influirá de la misma manera.

Simulaciones

- Los resultados obtenidos en las simulaciones enfocadas a analizar la influencia de las coberturas nos han permitido ver la diferencia de un

sistema ideal con lo que tenemos realmente. Las coberturas usadas en este caso seguían una tendencia constante, ya que la constante de rigidez de cada una de ellas también era constante. Para todas las velocidades, los porcentajes en que se veían reducidos los parámetros de fuerza y aceleración eran los mismos. La reducción conseguida con la cobertura menos rígida ha sido la más elevada, con respecto a la primera de ellas. Según los resultados teóricos, independientemente de la velocidad a la que se produzcan los impactos, la mejor cobertura a utilizar en un brazo robot es la del tipo quinto, si queremos reducir considerablemente las fuerzas y aceleraciones que sufre la cabeza, ya que es la que tiene una menor rigidez. Le sigue la cobertura tipo 3 en segundo lugar, con una rigidez mayor que la quinta, y la tipo 4 en tercero, con mayor rigidez que la tercera.

- Los niveles de influencia de la inercia de cada una de las barras también se mantenían cuando hemos aumentado la velocidad de los impactos, ya que la rigidez en estos también era la misma, lineal. Aquí tampoco hemos podido apreciar una igualdad en los porcentajes de aumento de los valores con los calculados de los resultados experimentales, aunque la inercia de cada una de las barras simuladas era la misma que las reales.

Índices de daño

Hemos visto a lo largo de toda la exposición de datos que los valores indicativos de un daño cerebral a causa de la aceleración sufrida por la cabeza, índice HIC, eran muy reducidos para prácticamente todos los niveles que alcanzaban los datos de aceleración obtenidos, tanto en las experimentaciones como en las simulaciones. En cambio, la magnitud de los datos de fuerza alcanzados en los impactos, también para ambas situaciones, real y simulada, eran en los casos más desfavorables bastante elevadas, llegando a superar la mitad del límite establecido, a partir del cual se produciría una rotura craneal. De hecho, en las simulaciones realizadas para determinar las velocidades más altas, hasta las que podemos llegar para que la fuerza aplicada sobre la cabeza en un impacto no llegue a producir rotura, los valores de HIC que calculábamos, cuando la velocidad producía fractura craneal, no llegaban a la mitad del valor de referencia, 1000, con el cual se produciría un daño severo. Por lo que concluimos que el criterio de rotura craneal tomado como referencia es mucho más restrictivo que el criterio de lesión encefálica, HIC (Head Injury Criterion).

Futuros proyectos

Se podría volver a analizar los mismos factores estudiados en este trabajo pero sin las restricciones que nos hemos encontrado nosotros, concretamente el no poder utilizar barras adecuadas, teniendo que adaptar las disponibles a las necesitadas. También podríamos mejorar el estudio conociendo los valores exactos de rigidez y amortiguación de cada una de las coberturas utilizadas, de forma que el modelo simulado fuese más preciso.

Algunas propuestas de futuros proyectos a realizar son:

1. Estudiar los factores de inercia y cobertura utilizando en este caso un brazo mecanizado impulsado mediante un motor que controle tanto posición como velocidad y aceleración.
2. Analizar la influencia de la rigidez del brazo en los impactos, utilizando para ello barras de distintos tipos de materiales (acero, aluminio, nylon, PVC, etc.), o del mismo material.
3. Crear una mesa de ensayos en la que el sistema mecánico que representa la cabeza y el cuello sea reemplazado por otro sistema que represente más fielmente el comportamiento de una cabeza humana, por ejemplo utilizando un dummy.

VI. Bibliografía

VI.1-.Libros

- [1] Advani S, Ommaya A, Yang W: *Head injury mechanisms, in Human Body Dynamics*, Ed. Ghista, Oxford Univ. Press, 1982.
- [2] Antoni Manuel Lázaro, Joaquín del Río Fernández: *LabVIEW 7.1. Programación gráfica para el control de instrumentación*. Paraninfo, 2006.
- [3] K.-U. Schmitt et al.: *Trauma Biomechanics*, Springer 3rd ed, 2010.
- [4] Pérez, M et al.: *Instrumentación electrónica*. Thomson, 2004.
- [5] Ronald W. Larsen: *LabVIEW for Engineers*. Source, 2011
- [6] William F. Riley, Leroy D. Sturges: *Ingeniería Mecánica. Estática*. Reverté, 1995.
- [7] William F. Riley, Leroy D. Sturges: *Ingeniería Mecánica. Dinámica*. Reverté, 1995.

VI.2-.Proyectos fin de carrera

- [8] Arévalo J.J. *Montaje y programación bajo MATLAB de una mesa de ensayos de vibraciones*. Ingeniería Técnica Industrial esp. Mecánica, Universidad de Almería, 2011.
- [9] Jiménez E. *Análisis dinámico del robot CaPaMan y programación como seguidor solar*. Ingeniería Técnica Industrial esp. Mecánica, Universidad de Almería, 2011.
- [10] Lozano F.J. *Modelado y simulación de actuadores de rigidez variable en situaciones de impacto hombre-robot*. Ingeniería Técnica Industrial esp. Mecánica, Universidad de Almería, 2012.
- [11] Medina J. *Control de manipuladores con rigidez articular variable atendiendo a criterios de seguridad*. Ingeniería de sistemas y automatización, Universidad Carlos III de Madrid, 2011.

VI.3- Artículos científicos

[12] Advani S, Powell W, Huston J, Ojala S (1975): *Human head impact response experimental data and analytical simulations*, Proc. Intern. Conf. on Biomechanics of Serious Trauma, pp. 153-162.

[13] Allsop D, Perl T, Warner C (1991): *Force/deflection and fracture characteristics of the temporoparietal region of the human head*, Proc. 35th Stapp Car Crash Conf., SAE 912907, pp. 139-155.

[14] Allsop D, Warner C, Wille M, Schneider D, Nahum A (1988): *Facial impact response — a comparison of the Hybrid III dummy and human cadaver*, Proc. 32nd Stapp Car Crash Conf., SAE 881719.

[15] Anderson, G.B.J., Winters, J.M. (1990): *Role of muscle in postural tasks: spinal loading and postural stability*. In, Winters, J.M., Woo, S.L.-Y. (Eds.), *Multiple Muscles Systems: Biomechanics and Movement Organization*. Springer, New York.

[16] C.W. Gadd, “*Use of weighted impulse criterion for estimating injury hazard*”, in Proc. 10th Stapp Car Crash Conf., New York, 1966, pp. 164-174.

[17] Gina E. Bertocci, PhD; Mary Clyde Pierce, MD; Ernest Deemer, MS; Fernando Aguel, BS; Janine E. Janosky, PhD; Ev Vogeley, MD, JD. (2003): *Using test dummy experiments to investigate pediatric injury risk in simulated short-distance falls*.

[18] Hertz (1993): *A note on the head injury criterion (HIC) as a predictor of the risk of skull fracture*, 37th Annual Proceedings of the AAAM.

[19] Hodgson V, Thomas L (1971): *Breaking strength of the human skull vs. impact surface curvature*, Wayne State University School of Medicine, Dept. of Neurosurgery, Report.

[20] Martin Simoneau, Marc Denninger, Timothy C. Hain (2008): *Role of loading on head stability and effective neck stiffness and viscosity*. Journal of Biomechanics Volume 41, Issue 10.

[21] Nahum A, Gatts J, Gadd C, Danforth J (1968): *Impact tolerance of the skull and face*, Proc. 2nd Stapp Car Crash Conf., SAE 680785.

[22] P. Prasad P., H. M. (1985). *American the position of the united states delegation to the iso working group on the use of hic in the automotive environment, society of automotive engineers technical*.

[23] Sami Haddadin, Alin Albu-Schäffer, and Gerd Hirzinger (2008): *The role of the robot mass and velocity in physical human-robot interaction, Part I: Non-constrained blunt impacts*, Robotics and Automation, 2008. ICRA 2008. IEEE International Conference.

[24] Schneider D, Nahum A (1972): *Impact studies of facial bones and skull*, Proc. 16th Stapp Car Crash Conf., SAE 720965, pp. 186-203.

VI.4-.Normas

[25] EN ISO 10218-1:2008 *Robots para entornos industriales. Requisitos de seguridad*.

VI.5-.Páginas web

[26] <http://www.mathworks.es/>

[27] <http://www.ni.com/labview/>

[28] <http://www.sc.ehu.es/sbweb/fisica/default.htm>

[29] <http://www.pcb.com/>

VI.6-.Manuales

[30] Ignacio M., Pedro L. S. *Introducción a la instrumentación virtual. Programación en LabVIEW 5.5*.

[31] National Instrument: *DAQ M Series User Manual*. 2004.

[32] Mathworks: *SimMechanics 3, User's Guide*. 2001.

[33] PCB Piezotronics: *Model 200B03, ICP Dynamic Force Sensor, Installation and Operating manual*.

[34] PCB Piezotronics: *Model 352C03, ICP Accelerometer, Installation and Operating Manual*.

[35] PCB Piezotronics: *Model 482C05, Manual 482C05 Series, Installation and Operating Manual.*