

Universidad de Almería
Escuela Superior de Ingeniería
Ingeniería Técnica Industrial, especialidad en Mecánica

Proyecto fin de carrera

Modelado y simulación de
actuadores de rigidez
variable en situaciones de
impacto hombre-robot

Autor

Francisco Javier Lozano Ferre

Directores

Javier López Martínez

Antonio Giménez Fernández

Marzo 2012

Índice

1.	Interés y objetivos	4
2.	Criterios de daño	6
2.1	Criterio de daño en la cabeza (Head Injury Criterion, HIC)	6
3.	Actuadores de rigidez variable.....	8
3.1.	Clasificación de los ARV	8
4.	Modelado del brazo robot	19
4.1.	Introducción a Matlab y Simulink.....	19
4.2.	Modelado del AwAS.....	21
4.3.	Modelo simplificado de un ARV	29
4.4.	Modelado del eslabón flexible	32
4.4.1.	Otros modelos de eslabón flexible	33
5.	Modelado para la simulación del sistema cuello-cabeza y del impacto	37
5.1.	Representación del cuello y la cabeza.....	37
5.2.	Modelado de la fuerza de impacto.....	38
6.	Simulación del impacto cabeza-robot	42
7.	Validación del modelado del AwAS	44
8.	Simulación y análisis del eslabón flexible.....	47
8.1.	Selección del modelo de eslabón flexible.....	54
9.	Simulación y análisis del impacto hombre-robot.....	57
9.1.	Contribución de los ARV en la dinámica del impacto	59
9.2.	Contribución de la cobertura en la dinámica del impacto.....	61
9.3.	Contribución del material del eslabón de salida en la dinámica del impacto.....	64
10.	Conclusiones	67
	Bibliografía	69
	Anexo	71

Capítulo 1.

Interés y objetivos

Es bien sabido por todos la importancia que ha tenido la aplicación de los robots en la industria desde su invención. Su uso está ampliamente extendido gracias a que son capaces de realizar tareas de forma más rápida, más precisa y a un menor coste que las personas, además de otros trabajos que serían peligrosos o imposibles de realizar. La gran eficiencia de los robots crea el interés de llevar su aplicación a otros ámbitos y entornos en los que la interacción con las personas sea más directa, como en la asistencia a discapacitados o a personas mayores, tareas domésticas y, en general, a todo tipo de tareas serviciales.

Tradicionalmente, los robots han trabajado en espacios delimitados debido a la peligrosidad de sus movimientos, controlados por un software. El uso de sensores y la programación adecuada al entorno permite solventar en la actualidad este problema, pero a la vez se crea la dependencia al correcto funcionamiento de ese software. En caso del fallo de éste, cualquier persona se expone al mismo peligro con que contábamos, ya que la alta precisión que se busca en el trabajo de los robots requiere una gran rigidez de sus articulaciones. Puesto que la seguridad de las personas es lo primero que se debe garantizar, se hace imperativo que ello se refleje ya desde el diseño mecánico. Es por eso que en la actualidad se están desarrollando actuadores para las articulaciones cuya rigidez sea modificable.

Estos actuadores de rigidez variable (ARV, o en inglés, *variable stiffness actuator*, VSA) permiten introducir una flexibilidad articular con el objetivo de absorber parte de la fuerza de impacto. Ello se consigue gracias a un cierto grado de desacople entre el eslabón y el rotor del motor, mitigando la transmisión de la inercia de este último. Es lógico pensar que ello pueda implicar una reducción de la eficiencia ya que la flexibilidad se puede traducir en oscilaciones del efector final. El diseño mecánico y de control de los ARV permite modificar la rigidez, consiguiendo que en movimientos a bajas velocidades ésta sea mayor para alcanzar una gran precisión, y a altas velocidades sea menor, logrando así reducir el riesgo de causar daños graves.

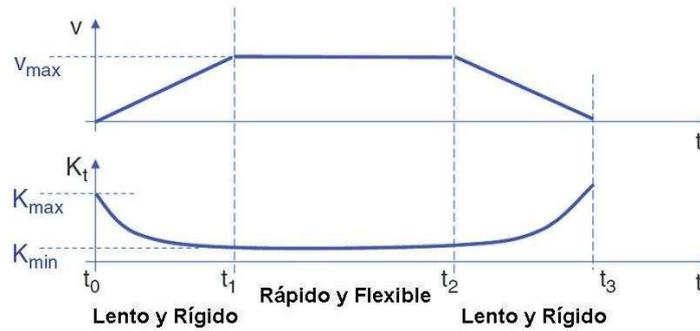


Figura 1. Comportamiento intuitivo de un actuador de rigidez variable.

Todas las ventajas expuestas de este tipo de actuadores conforman la motivación para realizar este estudio, centrado en la simulación de estos sistemas, cuyos resultados nos servirán para atisbar la efectividad de los ARV.

Esto será posible gracias al software de cálculo y programación MatLab, el cual nos permitirá, mediante su herramienta Simulink, crear un modelo virtual del brazo robótico. Se modelará un escenario de impacto en el que se hará colisionar el brazo robot sobre la cabeza de una persona, simulando la dinámica del sistema y obteniendo los valores de aceleración de la cabeza, prediciendo así sus consecuencias en lo relativo al daño causado. Obtendremos resultados para una diversidad de casos determinados por la variación de parámetros y, mediante el criterio de daño encefálico (*Head Injury Criterion*, HIC) podremos estimar el nivel de daño que el impacto podría provocar.

Capítulo 2.

Criterios de daño

Para poder realizar diseños adecuados a la seguridad de las personas, es importante saber detectar y cuantificar el daño que se puede producir en un impacto. Ya que la investigación sobre este tema está aún en progreso, diversos estudios han intentado adaptar criterios de daño desarrollados para el mundo del automóvil, donde estos criterios han sido extensamente ensayados y han conseguido aceptación.

El impacto, al ser un suceso fortuito, puede suceder en cualquier fase del trabajo, y puede verse afectada cualquier parte del robot así como cualquier parte del cuerpo. Al ser tan variadas las posibilidades, muchos criterios han sido propuestos, como por ejemplo el *Thoracic Trauma Index* (TTI), el *Viscous Injury Response* (VC) el *Gadd Severity Index* (GSI) o el *Head Injury Criterion* (HIC); aunque en la mayor parte de los casos, los estudios se han centrado en el estudio del daño provocado en la cabeza, ya que es la parte del cuerpo más sensible. Estos criterios mayormente están basados en la llamada curva de tolerancia límite de la Wayne State University (Wayne State University tolerance limit, WSUTL), la cual relaciona la aceleración de la cabeza con el tiempo de duración de esa aceleración. Con esta curva, basada en datos experimentales, se establece que son soportables altas aceleraciones mientras la duración de éstas sean pequeñas (por debajo de los 10 milisegundos).

De entre todos los criterios existentes, el más aceptado y utilizado es el *Head Injury Criterion* (HIC), por lo cual será el que se utilice en este estudio.

2.1 Criterio de daño en la cabeza (*Head Injury Criterion, HIC*)

Para el desarrollo del HIC, Versace [1] se basó en el *Gadd Severity Index* (GSI), propuesto por Gadd [2], definido como

$$GSI = \int_0^t a^{2.5} d\tau,$$

donde a es la aceleración de la cabeza en G (aceleración de la gravedad, $1 G \approx 9.81 \text{ m/s}^2$). Un valor de GSI superior a 1000 indica una alta probabilidad de daño grave. Posteriores

trabajos lo refinaron para una mejor adaptación al mundo de la robótica, como es el caso de [3], que lo establece como

$$\text{HIC}(\Delta t_{\max}) = \max_{t_1, t_2} \left[\left(\frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} \hat{a} dt \right)^{2.5} (t_2 - t_1) \right], \text{ siendo } t_2 - t_1 \leq \Delta t_{\max},$$

donde \hat{a} es la aceleración de la cabeza medida en G y t es el tiempo medido en segundos. Los casos más significativos son en los que $\Delta t_{\max} = 15 \text{ ms}$ y $\Delta t_{\max} = 36 \text{ ms}$, llamados respectivamente HIC_{15} y HIC_{36} .

El hecho de que el HIC establezca valores de daños severos para altas velocidades (debido a su origen en la industria automovilística) provoca que no sea posible concluir si un impacto de un robot a bajas velocidades es peligroso, sobre todo en los casos en que existe penetración. Los resultados experimentales obtenidos por Haddadin [4] en impactos entre un robot y diferentes partes del cuerpo concluyen que el índice HIC no es un criterio válido para medir el grado de riesgo. Es por eso que actualmente se sigue investigando sobre nuevos criterios que evalúen de manera más verídica el riesgo en situaciones de interacción física hombre-robot.

Cabe destacar la reciente publicación por parte de la *International Organization for Standardization* (ISO) de un nuevo estándar en lo concerniente a este tema, recogido en la norma ISO 10218, titulada *Robots and robotic devices – Safety requirements for industrial robots*, compuesto de dos partes: ISO 10218-1:2011, *Robots*, e ISO 10218-2:2001, *Robot systems and integration*. Las anteriores versiones de esta norma solo contenían el caso de espacios limitados para robots como método de seguridad, y no detallaban el caso de la interacción directa. Debido a la importancia de esta organización, la publicación de estas modificaciones se consideran un avance hacia una norma a nivel internacional que establezca un patrón adecuado que homogeneice el uso de criterios y motive a las empresas y a los investigadores a seguir un camino común en todo el mundo en cuanto a seguridad. Sin embargo, estudios llevados a cabo por diversos centros de investigación han demostrado que esta norma es demasiado restrictiva, motivo por el cual no se aplicará en este trabajo.

Capítulo 3.

Actuadores de rigidez variable

La investigación sobre los ARV no se impulsó hasta mediados de los 90, cuando G. A. Pratt y M. M. Williamson propusieron el *Series Elastic Actuator*, SEA [6], el cual no es más que un actuador rígido con un resorte en serie. La rigidez del actuador estaba predefinida por la constante de rigidez del muelle, por lo que ésta no puede modificarse durante el funcionamiento. Para que esto sea posible, es necesario el uso de dos motores para poder controlar la posición y la rigidez, lo cual es un inconveniente al aumentar el tamaño y el peso del mecanismo. Existen actuadores basados en la forma de actuar de los músculos [7], llamados agonistas/antagonistas, ya que incorporan dos motores que trabajan simultáneamente para determinar la posición y la rigidez, lo cual puede conllevar el incremento excesivo de sus dimensiones. Otra forma de afrontar este problema es dedicando un motor a la posición (tal como los actuadores rígidos) e instalar otro para el control de la rigidez, el cual suele ser de menores dimensiones, consiguiendo así reducir el tamaño del actuador, además de ser más eficiente energéticamente.

A parte de las ya mencionadas, se han desarrollado diversas formas de aproximarse a este tema en los últimos años, los cuales Van Ham [8] clasifica en cuatro ideas principales, las cuales usaremos para exponer los diferentes modelos de ARV: *equilibrium-controlled stiffness*, *antagonistic-controlled stiffness*, *structure-controlled stiffness* y *mechanically controlled stiffness*.

3.1. Clasificación de los ARV

Estos actuadores usan un resorte con rigidez constante con un método tradicional de actuación, ya sea mediante un motor eléctrico o un sistema hidráulico.

Equilibrium-controlled stiffness

Series Elastic Actuator, SEA

El SEA [6] es básicamente un resorte en serie con un actuador rígido. La rigidez está determinada por la constante del resorte y por tanto no se puede modificar durante la operación.

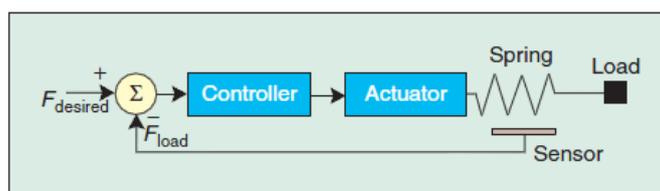


Figura 2. Esquema de control de un SEA.

La figura muestra la estructura básica de un SEA para el control de la fuerza. Un sensor en el resorte registra su elongación, que devuelve como señal de entrada y sirve como dato de control para establecer el par a ejercer por el motor. La desventaja de no poder variar la rigidez del resorte se compensa con la ventaja de solo necesitar un motor.

Antagonistic-controlled stiffness

Estos actuadores se basan en el funcionamiento del bíceps y del tríceps del brazo de humano. Cuando el bíceps se contrae y el tríceps se relaja, el brazo se flexiona, mientras que cuando ocurre al contrario (el tríceps se contrae y el bíceps se relaja), el brazo se extiende. La razón de que existan dos músculos para realizar ambos movimientos es el hecho de que éstos solo pueden tirar y no empujar. La rigidez del brazo se logra cuando tanto el bíceps como el tríceps se contraen, mientras que si ambos están relajados, la articulación pasa a ser flexible y el brazo puede moverse libremente. Entre esos dos estados existe un amplio rango de rigidez que permite al brazo trabajar con una gran variedad de comportamientos.

Biologically Inspired Joint Stiffness Control

Diseñado por Migliore et al. [7], este actuador controla la rigidez mediante dos resortes no lineales instalados antagonísticamente, al igual que el bíceps y el tríceps humano. Este diseño es, básicamente, una articulación actuada por dos SEAs.

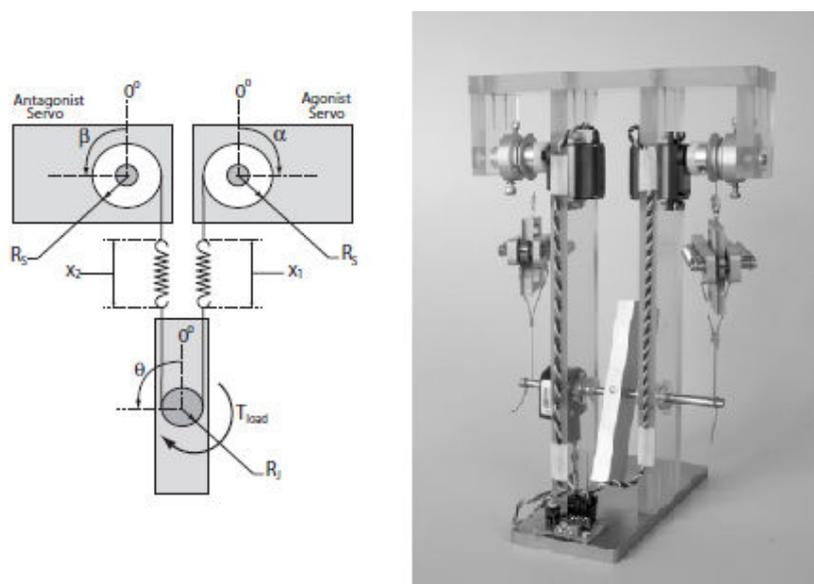


Figura 3. Diseño conceptual (izquierda) y fotografía del prototipo (derecha).

Los resortes no lineales se han conseguido a partir de una pieza con una determinada forma sobre la que dos ruedas se desplazan, las cuales están conectadas entre sí por un muelle lineal. Cuando ambas piezas base se mueven en direcciones opuestas, las ruedas se alejan una de otra estirando el muelle.

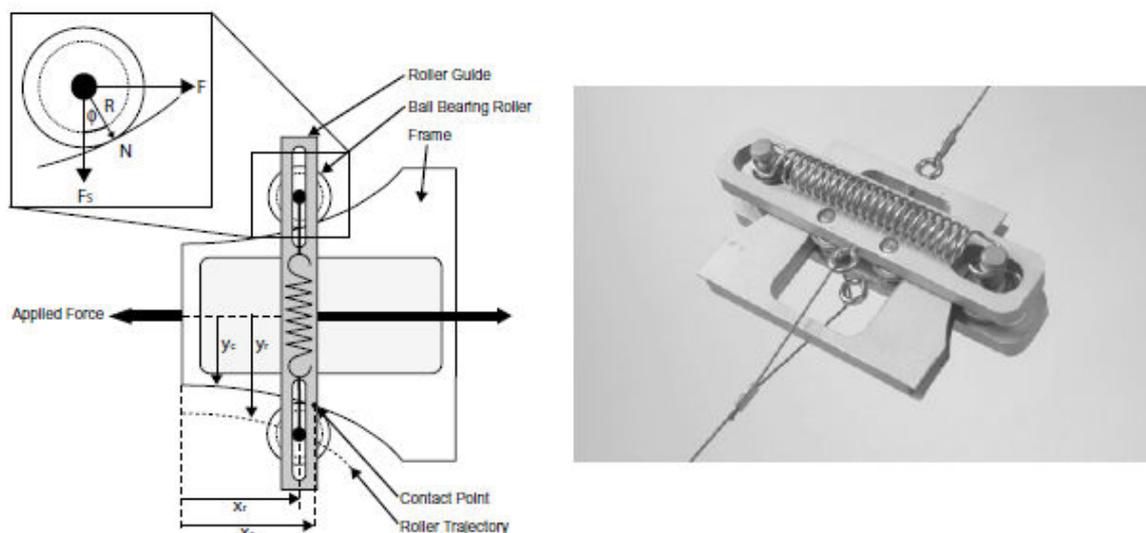


Figura 4. Diseño conceptual del resorte no lineal (izquierda) y prototipo (derecha).

Cada SEA está controlado por un servomotor. Cuando ambos giran en el mismo sentido, se consigue el desplazamiento y cuando giran en sentido opuesto, se modifica la rigidez (mayor o menor dependiendo del sentido de giro). Cabe destacar como inconveniente de este modelo el tamaño y la complejidad añadida del resorte no lineal.

Variable Stiffness Actuator, VSA

Ideado por Tonietti et al. [Tonietti2005], es otra configuración antagonista, pero menos intuitiva.

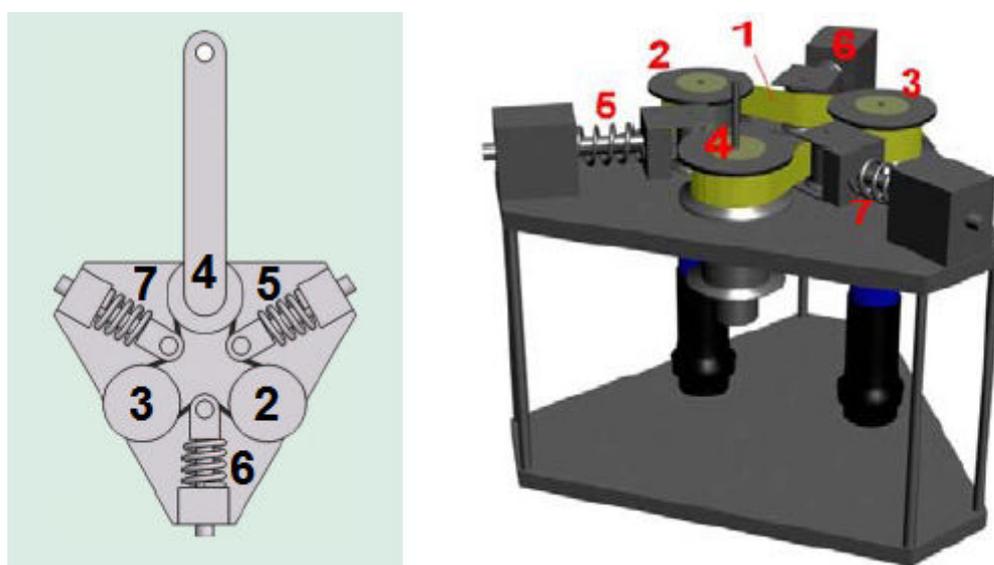


Figura 5. Dibujos CAD del VSA desde dos perspectivas

El VSA consiste en tres poleas (2, 3 y 4) conectadas por una correa dentada (1). Las poleas 2 y 3 están controladas por un servomotor cada una. A la polea número 4 va unido el brazo. Entre las poleas se sitúan tres muelles que tensan la correa (5, 6 y 7), de los cuales el 5 y el 7 además forman cada uno un resorte no lineal, obteniendo en realidad dos SEAs.

Cuando las dos poleas controladas por los servomotores giran en el mismo sentido, los resortes no se ven afectados y la rigidez de la articulación no cambia, pero la polea número 4 girará y, por tanto, el brazo se desplazará. Para conseguir un aumento de la rigidez, la polea 2 ha de girar en sentido horario y la polea 3 en sentido antihorario. Esto provoca que los resortes 5 y 7 se compriman y el 6 se alargue para mantener la correa tensa. Si el caso es justo el contrario (polea 2 gira en sentido antihorario y polea 3 gira en sentido horario), los resortes 5 y 7 se alargarán mientras que el 6 se comprimirá, y la articulación será más flexible.

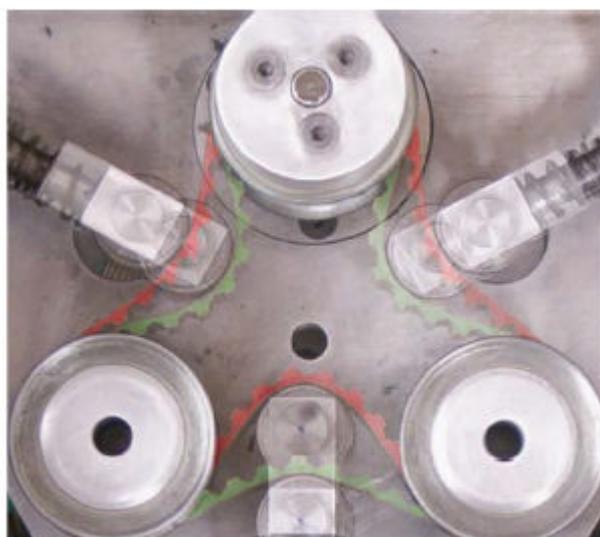


Figura 6. VSA en estado de rigidez (rojo) y en estado de flexibilidad (verde)

Será necesario un control más elaborado para este actuador que para los anteriores debido a la complejidad de su diseño. Este modelo es el primero desarrollado por los investigadores de la Universidad de Pisa, los cuales trabajan en una nueva versión, el VSA-II [9].

Pneumatic Artificial muscles

Estos músculos, cuando se aumenta su presión, se contraen axialmente y se expanden radialmente. La compresibilidad del aire los hace inherentemente flexibles, funcionando como un muelle. El diseño más famoso es el McKibben, por Chou et al. [10], el cual presenta unas desventajas en la existencia de histéresis introducida por la fricción, lo cual complica su control, y el alto umbral de presión que debe alcanzarse para poder generar fuerza. Verrelst et al. [11], desde a Universidad de Bruselas, desarrollaron una

mejora del McKibben para su robot bípedo Lucy que reducía en gran medida la histéresis y superaba el umbral de presión.

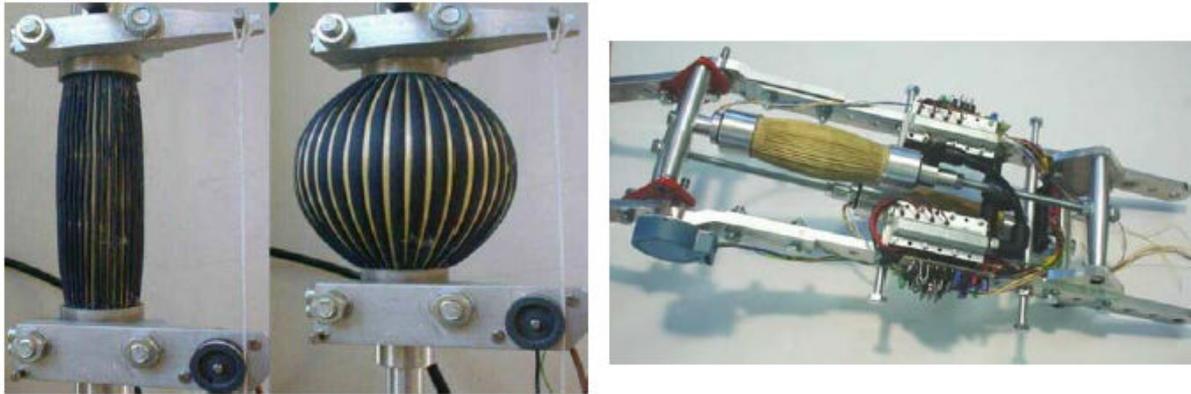


Figura 7. Fotografías de los músculos artificiales utilizados por Verrelst et al. En las situaciones de desinflado e inflado respectivamente (izquierda) y montado antagónicamente

Estos músculos neumáticos poseen una alta relación potencia-peso y puede ser instalado sin necesidad de complejos mecanismos. Sin embargo, las desventajas más notables de este tipo de actuación es la lentitud de acción (la despresurización es especialmente lenta), la presencia de histéresis y la necesidad del aporte de aire a presión.

Structure-Controlled Stiffness

Además de los anteriores medios de controlar la rigidez, esto se puede conseguir mediante la modificación de la estructura del resorte. Esto se explica gracias a la ecuación de la deflexión de una viga

$$M = \left(\frac{EI}{L}\right) \times \theta$$

donde M es el momento, E el módulo elástico del material, I es el momento de inercia, L es la longitud de la viga y θ es el ángulo de flexión. El término EI/L representa la rigidez a la flexión, lo cual quiere decir que ésta variará con la modificación de cualquiera de esos tres parámetros.

El parámetro E es una propiedad del material, por lo que no se puede controlar mediante cambios estructurales. Algunos materiales cambian su módulo elástico con el cambio de temperatura, pero, en la mayoría de los casos, ésta no puede cambiar lo suficientemente rápido para ser útil en estas aplicaciones. Por tanto, los actuadores que ocupan este apartado se centran en la variación del momento de inercia I y de la longitud del elemento elástico L para lograr el control de la rigidez.

Un ejemplo es el mecanismo ideado por Hollander et al. [12] para prótesis. Como se muestra en la imagen, se trata de un muelle con una placa alargada en su interior, la cual, girada 90º, impedirá el movimiento a la articulación.

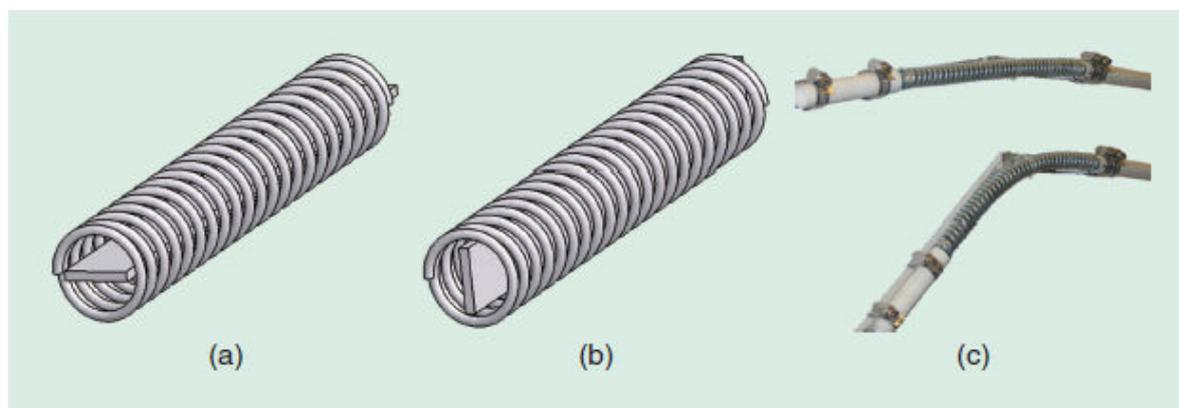


Figura 8. Variación del momento de inercia girando la placa

Esto es así debido a que el momento de inercia de la placa varía dependiendo de su anchura y de su espesor según las ecuaciones

$$I_{\text{rigido}} = \frac{\text{espesor} \times \text{ancho}^3}{12}$$

$$I_{\text{flexible}} = \frac{\text{ancho} \times \text{espesor}^3}{12}$$

Se trata de un mecanismo sencillo, pero con el inconveniente de poseer solo dos posiciones posibles.

Otro medio de controlar la rigidez es variar la longitud activa del elemento flexible. En la Figura 9 se muestra un mecanismo [13] consistente en un resorte de hoja conectado a una polea mediante un cable. La longitud activa del resorte se puede variar mediante un eslabón que se desplaza gracias a un motor.

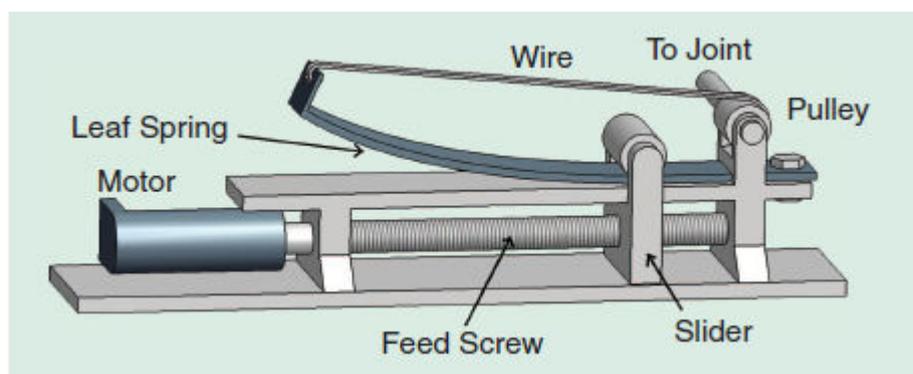


Figura 9. Diseño conceptual del mecanismo propuesto por Morita et al. [13].

El mismo principio de funcionamiento fue aplicado en otro actuador [14], mostrado en la Figura 10, diseñado para articulaciones rotatorias. El resorte de hoja se sitúa vertical en el centro, sobre el cual se desplaza un eslabón mediante unas ruedas que lo aprisionan. Gracias a un motor, el eslabón puede moverse arriba o abajo, acortando o aumentando respectivamente la longitud activa del resorte.

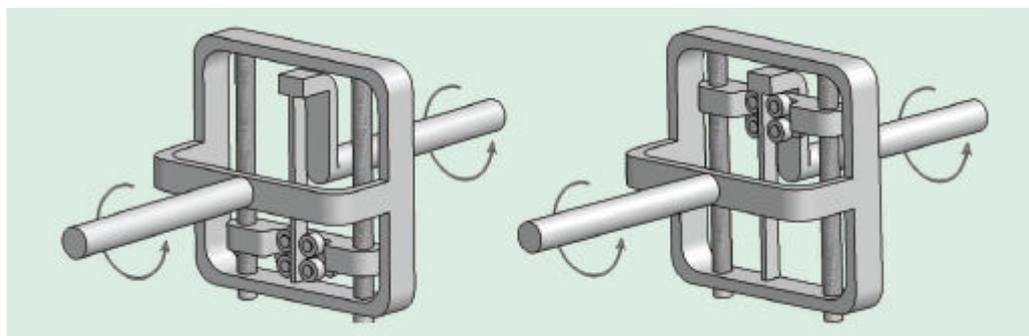


Figura 10. Diseño conceptual del mecanismo de control de rigidez rotacional.

Tanto de este modelo como del anterior se pueden valorar positivamente la baja complejidad y la facilidad de control debido a que el movimiento de la articulación y del actuador se manejan independientes el uno del otro. A parte, el rango de rigidez que se puede conseguir es amplio debido a todas las posibles posiciones intermedias que el actuador permite.

Mechanically Controlled Stiffness

Este tipo de control modifica la rigidez del actuador cambiando la pretensión del elemento flexible al desplazarlo.

MACCEPA

El *Mechanically Adjustable Compliance and Controllable Equilibrium Position Actuator*, o MACCEPA, fue presentado por Van Ham et al. [15] en la revista *International Applied Mechanics*.

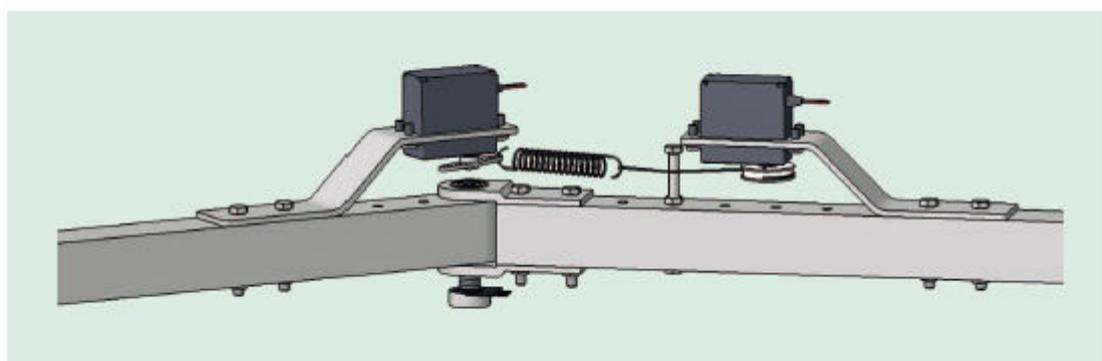


Figura 11. Dibujo CAD del MACCEPA.

Tomando como base la Figura 12, un diseño conceptual del funcionamiento del actuador, tenemos tres eslabones unidos por una misma articulación, siendo fijo el eslabón de la izquierda. Existen dos servomotores: uno controla la posición del eslabón más corto (esto es, el ángulo φ), y el otro, situado en el punto c , controla la pretensión del muelle situado entre b y c mediante un cable unido a éste. Cuando α es igual a cero, el mecanismo se encuentra en equilibrio, pero cuando difiere de cero, el muelle ejerce una fuerza que tiende a alinear ambos eslabones. Esta fuerza depende de la pretensión del resorte, la cual está controlada por el servomotor situado en c y que varía la longitud del cable unido al muelle. Una ventaja a destacar es que puede ser construido con componentes ya existentes.

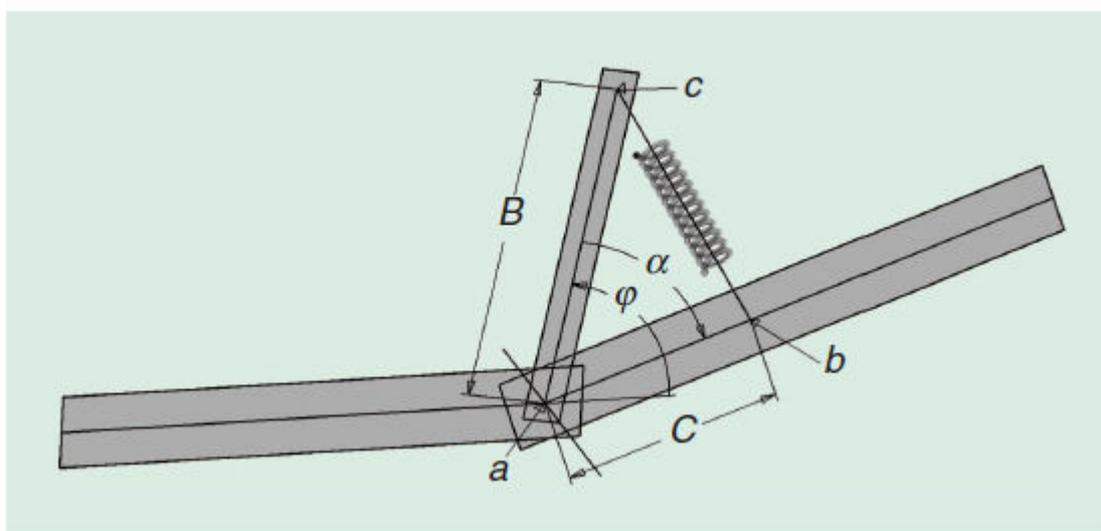


Figura 12. Principio de funcionamiento del MACCEPA.

VS Joint

Desarrollado en el Centro Aeroespacial Alemán (el DLR) por Wolf et al. [16], el VS-Joint se muestra en la Figura 13.

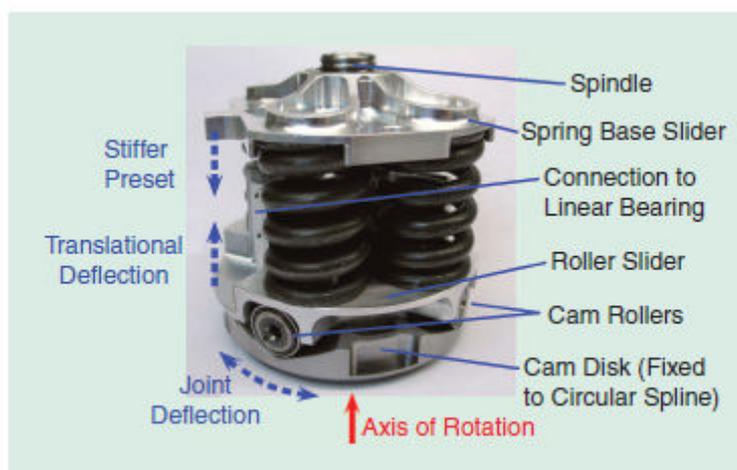


Figura 13. Prototipo del VS-Joint.

El disco superior varía su posición vertical gracias al eje central que está actuado por un pequeño motor, ajustando así la precarga de los muelles, mientras que otro motor se ocupa de desplazamiento angular. Cuando existe ese desplazamiento angular, en el actuador sucede lo representado en la Figura 14.

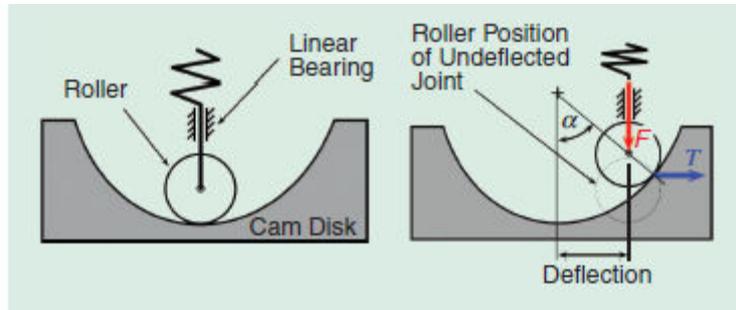


Figura 14. Esquema del principio de funcionamiento del VS-Joint.

La primera figura muestra la posición de equilibrio. Cuando se le aplica un par al actuador, la rueda se desplazará y, debido a la curvatura de la superficie, ésta subirá comprimiendo al muelle (representado en la segunda figura), el cual intentará recuperar la posición de equilibrio debido a la energía que acumula. Aumentando la precarga de los resortes, el desplazamiento de las ruedas será menor y el actuador será más rígido, mientras que si se reduce la precarga, los resortes permitirán mayor movimiento a las ruedas y, por tanto, más libertad de movimiento al eslabón de salida. El prototipo es un actuador fácil de integrar en un brazo robótico, con solo dos motores, uno de mayor y otro de menor tamaño.

VSM

En 2010, Hyun et al. [17] proponen el VSM, *Variable Stiffness Mechanism*, el cual recuerda al ya comentado VS-Joint. El mecanismo se compone de tres partes básicas: superior interna, inferior interna y externa, estando unidas estas dos últimas. La parte inferior interna dispone de unos cilindros que ruedan sobre la parte externa, diseñada con una forma específica para estos cilindros.

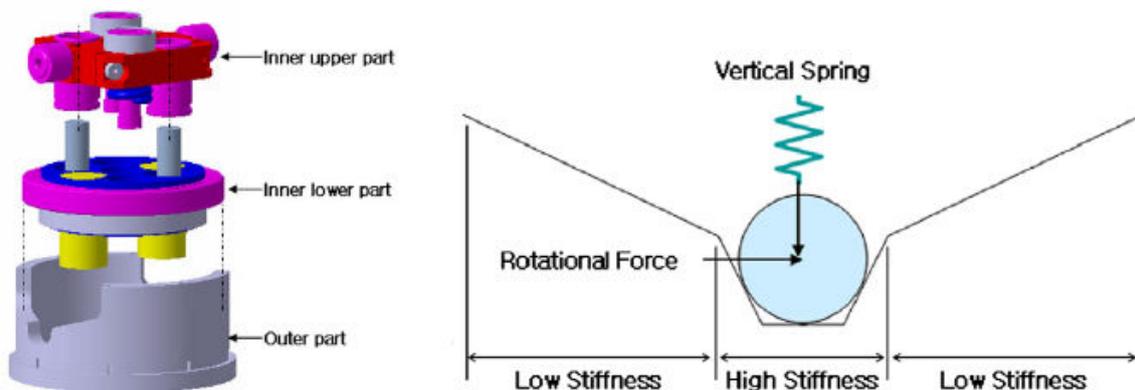


Figura 15. Dibujo CAD del VSM dividido en sus principales partes (izquierda) y principio de funcionamiento (derecha).

A diferencia del VS-Joint, la posición de equilibrio es la de mayor rigidez, la cual se establece gracias a la forma de la superficie, a los muelles que dispone y a unos electroimanes, que mantienen unidas las partes interiores. Cuando existe un impacto que supera la precarga de los muelles y de los electroimanes, la parte superior consigue separarse de la inferior, escapando del efecto de los electroimanes para rodar por la fracción de la pieza diseñada para baja rigidez, donde disfruta de mayor libertad de movimiento. El control de los electroimanes permite variar la precarga y así establecer a voluntad el límite en el cual el actuador trabaja a baja rigidez.

AwAS

El AwAS, *Actuator with Adjustable Stiffness*, desarrollado por Jafari et al. [18], presenta un mecanismo en el que dos muelles, actuados por un servomotor, se desplazan para modificar la rigidez el actuador.

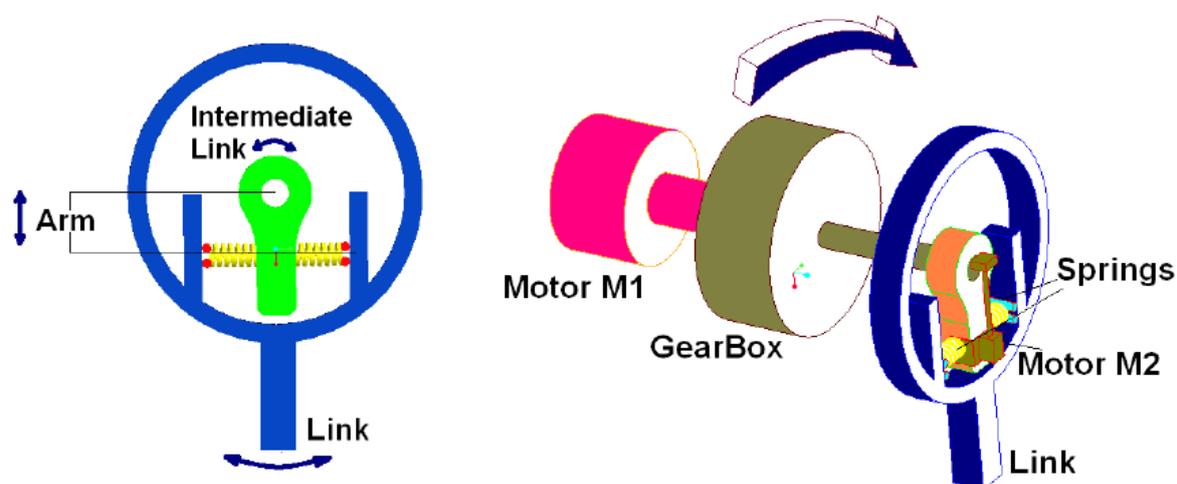


Figura 16. Principio de funcionamiento (izquierda) y diseño conceptual del AwAS (derecha).

El eslabón intermedio recibe la actuación del motor y, mediante los resortes, transmite el movimiento al eslabón de salida. Estos resortes se desplazan sobre el eslabón intermedio gracias a otro motor de menor tamaño. El objetivo es, mediante control numérico, hacer que los muelles se dispongan de manera adecuada en el caso de que el eslabón de salida se desplace con mayor o menor rapidez. Cuanto más cerca se sitúan del eje de rotación la rigidez es mayor, y menor cuanto más lejos del eje. El desplazamiento gradual de los muelles permite obtener un gran rango en la rigidez (o flexibilidad) alcanzable.

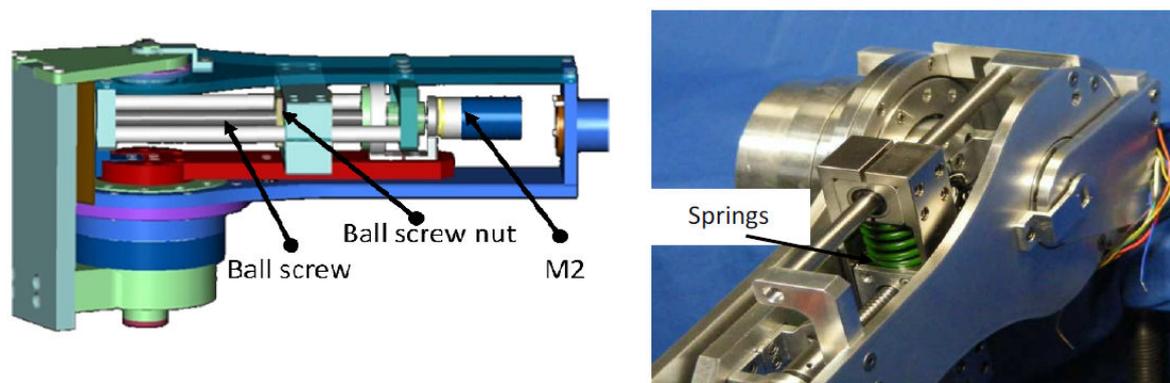


Figura 17. Modelo CAD (izquierda) y prototipo del AwAS (derecha).

Su sencillez y su reducido tamaño son dos de las grandes ventajas de este diseño. Los investigadores siguen trabajando en este actuador, proponiendo una nueva versión en 2011, el AwAS-II [19].

Capítulo 4.

Modelado del brazo robot

Para realizar el estudio propuesto, se han realizado dos modelos virtuales del sistema compuesto por un motor, un reductor, un ARV y un eslabón (cabe destacar la simplificación realizada del brazo robot, el cual se ha representado con un solo grado de libertad, esto es, un actuador y un eslabón). Uno de esos modelos será una implementación del AwAS, actuador mencionado en el capítulo anterior, procurando recrearlo de la manera más fiel posible, con el objetivo de servir de comprobación de la veracidad de las simulaciones realizadas por el software, comparándolo con los resultados de sus desarrolladores en [18]. El otro modelo será una simplificación del sistema, en el que se obviarán partes cuya influencia es despreciable, componiéndose únicamente de aquellas necesarias para la simulación del impacto y la obtención de resultados.

4.1. Introducción a Matlab y Simulink

Tal como se describe en la página web oficial de la empresa MathWorks [<http://www.mathworks.es/>], MATLAB (acrónimo de MATrix LABoratory) es un lenguaje de programación de alto nivel con un entorno interactivo para el desarrollo de algoritmos, visualización de datos, análisis de datos y cálculo numérico. Este software permite la gestión del código en forma de funciones y archivos que estructuran y agilizan la tarea de programación. Entre otras funcionalidades, MATLAB posee herramientas interactivas para exploración, diseño y resolución de problemas iterativos, además de funciones matemáticas para álgebra lineal, estadística, análisis de Fourier, filtraje, optimización e integración numérica, funciones gráficas bidimensionales y tridimensionales para visualización de datos, y un largo etcétera.

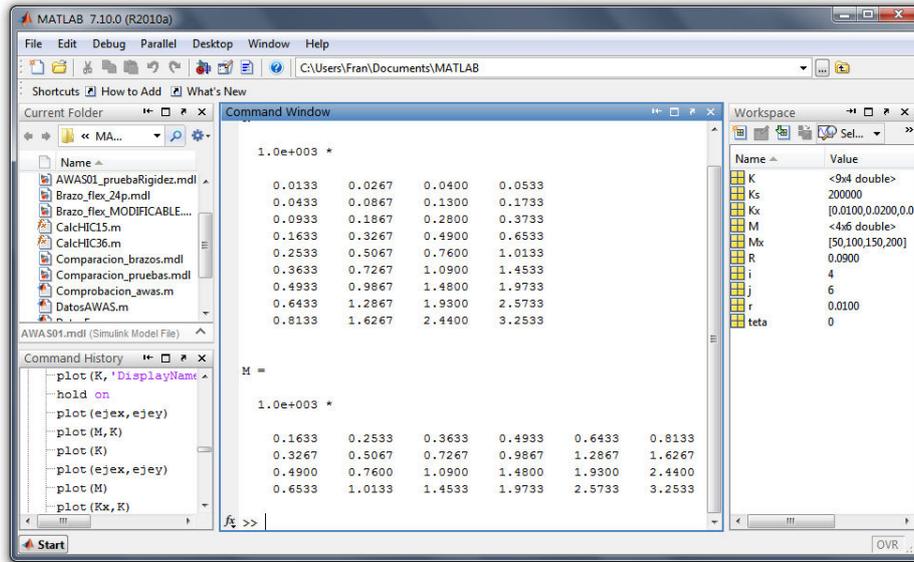


Figura 18. Ventana principal de MATLAB

Todas estas funciones permiten realizar cálculos y representaciones gráficas necesarias realizadas en capítulos posteriores. Sin embargo, nos centraremos en una de sus herramientas incluidas, llamada Simulink. Se trata de un entorno de programación de mayor nivel de abstracción, basado en un editor gráfico en el cual se crean los modelos mediante diagramas de bloques. Estos bloques son solo una representación gráfica del cálculo matemático que en realidad el software ejecuta, cálculos que describen el comportamiento físico de lo representado.

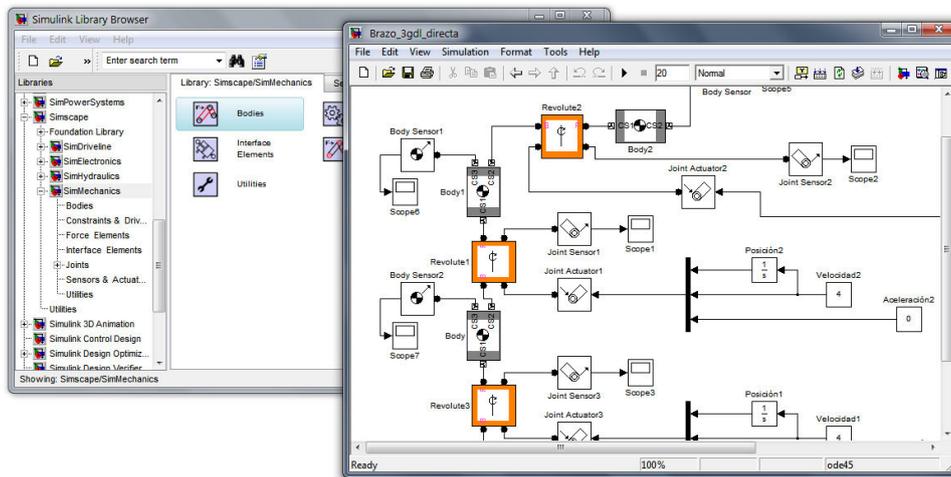


Figura 19. Simulink: librería de bloques (detrás) y espacio de creación de modelos (delante).

Simulink ofrece una extensa librería de bloques que representan gran diversidad de funciones, con la posibilidad de personalizarlos o crear nuevos bloques. El apartado Simmechanics de Simulink posee las herramientas y los bloques enfocados al modelado de sistemas mecánicos necesarios para el trabajo que nos ocupa.

El modelo se compone de las partes mencionadas con anterioridad: motor, reductor, ARV y brazo. La Figura 21 muestra la disposición de las partes de las que se compone.

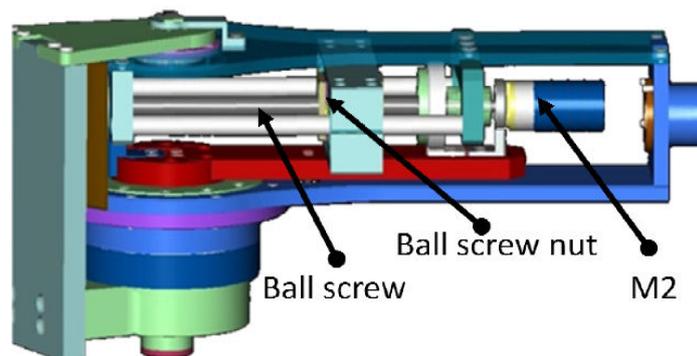


Figura 21. Vista lateral del sistema, donde se aprecian las partes básicas que se simularán.

Subsistema motor más reductor

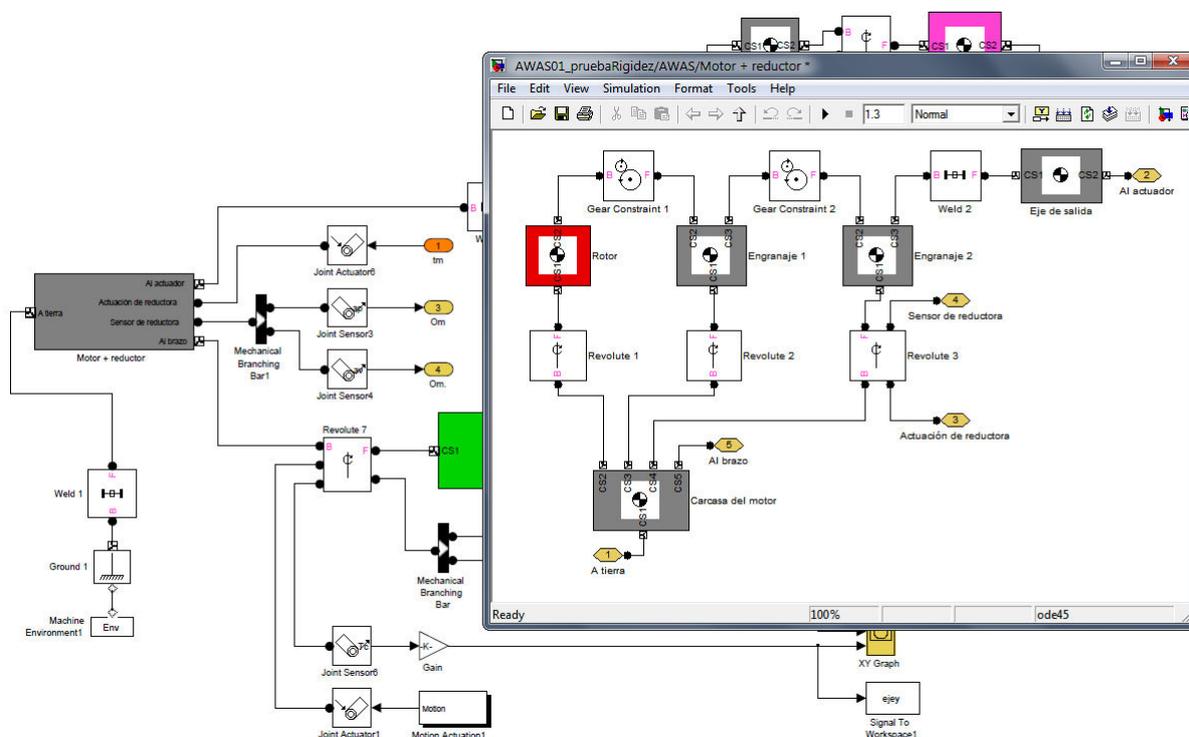


Figura 22. Detalle del subsistema motor más reductor.

Para comenzar, necesitamos establecer la situación en el espacio. Esto se hace mediante un bloque *ground* (*Ground 1*), el cual recrea una unión fija con respecto a un punto del espacio, al cual se le une el bloque *Machine Environment*, que define el vector de gravedad (a parte de otros factores que no son de relevancia en nuestro caso). A él se le une el subsistema *motor + reductor* mediante un bloque *weld* (*Weld 1*), que representa una unión soldada.

Un subsistema en Simulink es una agrupación de un conjunto de bloques en uno solo para simplificar su representación, pudiendo acceder a su contenido en cualquier momento para modificarlo. En el subsistema tenemos la *Carcasa del motor*, constituida por un bloque *body*. Un bloque *body* representa un cuerpo cualquiera, definiendo su situación en el espacio a través de puntos cartesianos. Representar la carcasa es necesario, ya que solo a otro cuerpo pueden ir conectados varios bloques de revolución. A ella van unidos el rotor (*Rotor*) y los engranajes del reductor (*Engranaje 1* y *Engranaje 2*). La unión se realiza mediante bloques *revolute* (*Revolute 1*, *Revolute 2* y *Revolute 3* respectivamente). Estos bloques definen una relación de rotación entre los puntos de los cuerpos unidos a ellos con respecto a un eje (en este caso, Z).

Para la transmisión entre el rotor y la reductora, lo deseable es realizarla en el mismo eje, pero Simulink no lo permite. La manera de solventarlo es incluyendo un engranaje adicional separado de los principales que sirva de intermediario, consiguiendo así la transmisión requerida, en este caso de 35:5. Los bloques que establecen la relación de transmisión son *Gear Constraint 1* y *Gear Constraint 2*, cuya situación es entre dos cuerpos cualesquiera (en este caso entre *Rotor* y *Engranaje 1*, y entre *Engranaje 1* y *Engranaje 2*). Este engranaje, mediante el *Eje de salida*, transmite el movimiento gracias a la soldadura *Weld 2*.

Queda por destacar la función de los puertos de conexión, o *Connection Port*, destacados en color ocre en la Figura 22. Permiten la conexión de bloques del subsistema a otros del sistema superior.

- Puerto 1, A tierra: la carcasa va conectada al suelo (Ground 1) gracias a la una soldadura, *Weld 1*.
- Puerto 2, Al brazo: conecta al eje de salida con la primera parte del AwAS, el cuerpo Eslabón intermedio, mediante una soldadura, *Weld 3*.
- Puerto 3, Actuación de reductora: este bloque une a la reductora con el bloque *Joint Actuator1*, el cual crea el movimiento del cuerpo al que se conecta.
- Puerto 4, Sensor de reductora: conecta a dos sensores (bloques *Joint Sensor1* y *Joint Sensor2*) que miden la posición y la velocidad angular (rad y rad/s respectivamente) a la reductora. *Mechanical Branching Bar1* permite la conexión de dos sensores a un mismo puerto.
- Puerto 5, Al brazo: es la conexión de la carcasa con el brazo mediante una junta de rotación en el eje Z (*Revolute 5*).

Los valores requeridos e introducidos en cada bloque se muestran en la tabla 1.

Tabla 1. Parámetros de cada bloque del subsistema motor más reductor.

Bodies			
	<i>Situación [x,y,z]</i>		
<i>Ground</i>	[0 0 0]		
	<i>Vector de gravedad (m/s²)</i>		
<i>Machine Environment</i>	[0 0 -9,81]		
	<i>Masa (kg)</i>	<i>Inercia (kg·m²)</i>	<i>Puntos que lo definen</i>
<i>Carcasa del motor</i>	masacero	inerciadero	CG [0 0 0] (m) respecto a CS1 CS1 [0 0 0] (m) respecto a unión CS2 [0 0 0] (m) respecto a CS1 CS3 [Distejes 0 0] (mm) respecto a CS1 CS4 [0 0 0] (m) respecto a CS1 CS5 [0 0 0] (m) respecto a CS1
<i>Rotor</i>	MasaRotor1	InerciaRotor1	CG [0 0 0] (m) respecto a CS1 CS1 [0 0 0] (m) respecto a unión CS2 [0 0 0] (m) respecto a CS1
<i>Engranaje 1</i>	masacero	Inerciadero	CG [0 0 0] (m) respecto a CS1 CS1 [0 0 0] (m) respecto a unión CS2 [0 0 0] (m) respecto a CS1 CS3 [0 0 0] (m) respecto a CS1
<i>Engranaje 2</i>	masacero	inerciadero	CG [0 0 0] (m) respecto a CS1 CS1 [0 0 0] (m) respecto a unión CS2 [0 0 0] (m) respecto a CS1 CS3 [0 0 0] (m) respecto a CS1
<i>Eje de salida</i>	masacero	inerciadero	CG [0 0 0] (m) respecto a CS1 CS1 [0 0 0] (m) respecto a unión CS2 [0 0 0] (m) respecto a CS1
Constraint & Drivers			
	<i>Radio circunferencia primitiva (mm)</i>	<i>de la base</i>	<i>del seguidor</i>
<i>Gear Constraint 1</i>		RadioPinon1	RadioRueda1
<i>Gear Constraint 2</i>		RadioPinon2	RadioRueda2
Joints			
	<i>Ejes de acción</i>		
<i>Revolute 1</i>	[0 0 1]		
<i>Revolute 2</i>	[0 0 1]		
<i>Revolute 3</i>	[0 0 1]		
<i>Weld 1</i>	—		
<i>Weld 2</i>	—		

Solo los parámetros destacables en cuanto a su influencia en la simulación han sido detallados en estas tablas. Las variables se definen mediante archivos .m, detallados en el anexo, página 69.

Tabla 2. Parámetros de cada bloque del mecanismo de control de la rigidez.

Bodies				
	<i>Masa (kg)</i>	<i>Inercia (kg·m²)</i>	<i>Puntos que lo definen</i>	
<i>Eslabón intermedio</i>	MasaLinkInt	InerciaLinkInt	CG [0.05 0 0] (m) respecto a CS1 CS1 [0 0 0] (m) respecto a unión CS2 [LongLinkInt 0 0] (m) respecto a CS1 CS3 [LongLinkInt 0 0] (mm) respecto a CS1 CS4 [LongLinkInt 0 0] (m) respecto a CS1 CS5 [LongLinkInt LongResorte 0] (m) respecto a CS1	
<i>Motor ARV</i>	masacero	inerciadero	CG [0 0 0] (m) respecto a CS1 CS1 [0 0 0] (m) respecto a unión CS2 [0 LongResorte 0] (m) respecto a CS1	
<i>Husillo de bolas</i>	MasaTotal	InerciaTotal	CG [0 0 0] (m) respecto a CS1 CS1 [0 0 0] (m) respecto a unión CS2 [0 0 0] (m) respecto a CS1 CS3 [-LongLinkInt 0 0] (m) respecto a CS1	
<i>Tuerca del husillo de bolas</i>	MasaNut	inerciadero	CG [0 0 0] (m) respecto a CS1 CS1 [0 0 0] (m) respecto a unión CS2 [0 0 0] (m) respecto a CS1 CS3 [0 0 0] (m) respecto a CS1 CS4 [0 0 0] (m) respecto a CS1	
<i>Cojinete</i>	masacero	inerciadero	CG [0 0 0] (m) respecto a CS1 CS1 [0 0 0] (m) respecto a unión CS2 [0 0 0] (m) respecto a CS1 CS3 [LongLinkInt 0 0] (m) respecto a CS1	
Force Elements				
		<i>Constante de resorte</i>	<i>Constante de amortiguación</i>	
<i>Joint Spring & Damper1</i>		<i>k</i>	<i>b</i>	
Joints				
		<i>Ejes de acción</i>		
<i>Weld 4</i>		—		
<i>Revolute 4</i>		[1 0 0]		
<i>Screw1</i>		[1 0 0]		
<i>Custom Joint1</i>		[0 0 1] (revolute), [0 1 0] (prismatic)		
<i>Prismatic1</i>		[1 0 0]		
<i>Prismatic2</i>		[1 0 0]		
Sensors & Actuators				
	<i>Unidades:</i>	<i>Posición</i>	<i>Velocidad</i>	<i>Aceleración</i>
<i>Joint Actuator2</i>		rad	rad/s	rad/s ²
	<i>Parámetros medidos</i>			
<i>Joint Sensor3</i>	posición (m)			

Solo los parámetros destacables en cuanto a su influencia en la simulación han sido detallados en esta tabla.

Las variables se definen mediante archivos .m, detallados en el anexo, página 69.

Brazo y otros bloques

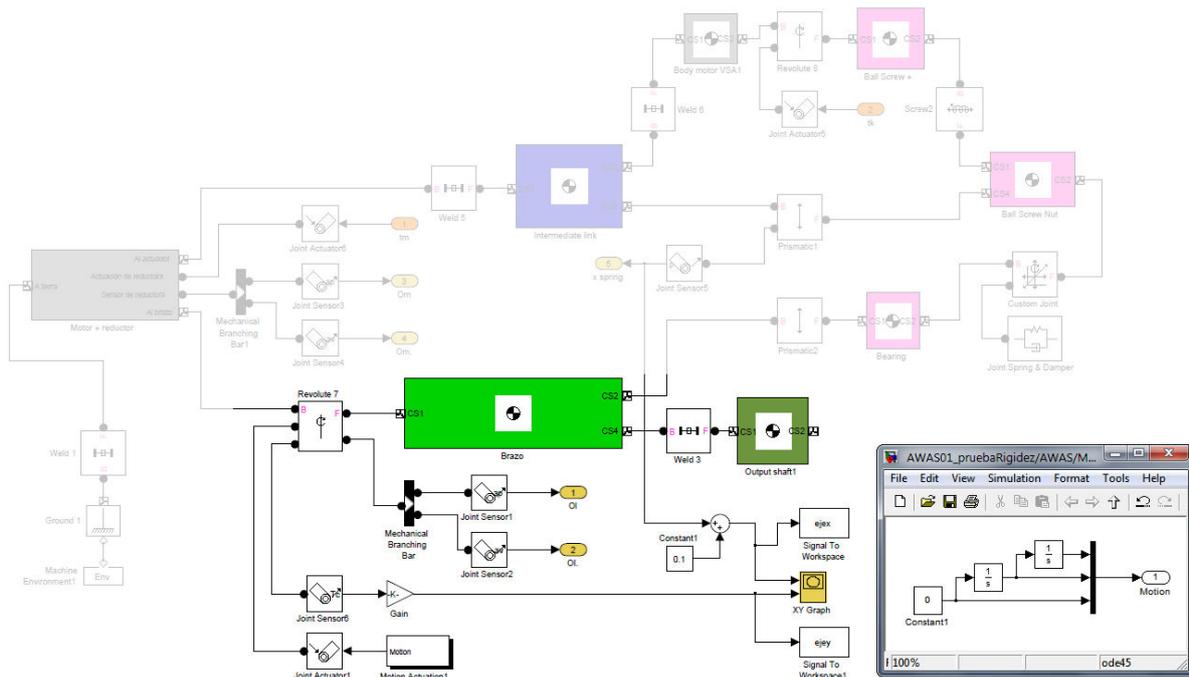


Figura 24. Conjunto de bloques del modelo donde se incluye el brazo y otros bloques de utilidad.

Para describir completamente el modelo, quedan varios bloques con diversas funciones. En primer lugar, tenemos el *Brazo*, conectado tanto a la carcasa del motor principal como al mecanismo de control de rigidez por los bloques *Revolute 5* y *Prismatic 2*, ya comentado anteriormente. El primero de ellos está sensorizado por los bloques *Joint Sensor4*, *Joint Sensor5* y *Joint Sensor6*, y actuado por *Joint Actuator3*, conectado a su vez con el bloque *Motion Actuation3*, el cual se ocupa de definir matemáticamente el movimiento. *Constant2* es una constante que corresponde a la posición, a continuación se sitúa un bloque integrador que calcula la velocidad a partir de la posición, y a su vez otro integrador, que calcula la aceleración a partir de la velocidad. Con esos tres datos, el bloque actuador crea el movimiento del brazo.

La función del último conjunto de bloques es obtener una gráfica del par conseguido en el brazo con respecto a la posición de los resortes. *Joint Sensor6* mide el par en la articulación del brazo (*Revolute 5*), y *Joint Sensor3* mide la posición de los resortes. Esos datos se conectan al bloque *XY Graph*, el cual crea la gráfica. A la señal del par se le une el bloque *Gain1* que multiplica la señal entrante por una constante a definir, y a la señal de la posición de los muelles se le suma una constante, *Constant1*, mediante el bloque *Sum*. Esto último es necesario para la correcta representación gráfica de las señales. A ambas señales se les conecta un bloque *Signal to Workspace*, cuya función es guardar la señal entrante en una variable en el workspace de Matlab, donde se puede manipular para realizar otro tipo de cálculos. La tabla 3 expone los datos introducidos en cada bloque.

Tabla 3. Parámetros del brazo y de los bloques restantes.

Bodies				
	<i>Masa (kg)</i>	<i>Inercia (kg·m²)</i>	<i>Puntos que lo definen</i>	
<i>Brazo</i>	MasaLink	InerciaLink	CG [LongLink/2 0 0] (m) respecto a CS1 CS1 [0 0 0] (m) respecto a unión CS2 [LongLinkInt 0 0] (m) respecto a CS1 CS3 [0 0 0] (m) respecto a CS1 CS4 [LongLink 0 0] (m) respecto a CS1	
Joints				
<i>Ejes de acción</i>				
<i>Revolute 5</i>	[0 0 1]			
Sensors & Actuators				
	<i>Unidades:</i>	<i>Posición</i>	<i>Velocidad</i>	<i>Aceleración</i>
<i>Joint Actuator3</i>		rad	rad/s	rad/s ²
<i>Parámetros medidos</i>				
<i>Joint Sensor4</i>	posición (rad)			
<i>Joint Sensor5</i>	velocidad (rad/s)			
<i>Joint Sensor6</i>	par (N·m)			
Otros bloques				
<i>Valor</i>				
<i>Gain1</i>	1/0,1			
<i>Constant1</i>	0,1			
<i>Constant2</i>	0			
<i>Nombre de la variable</i>				
<i>Signal to Workspace1</i>	ejex			
<i>Signal to Workspace2</i>	ejey			

Solo los parámetros destacables en cuanto a su influencia en la simulación han sido detallados en esta tabla.

Las variables se definen mediante archivos .m, detallados en el anexo, página 69.

El modelo presentado, a su vez, se ha reunido en un subsistema para simplificar su uso.

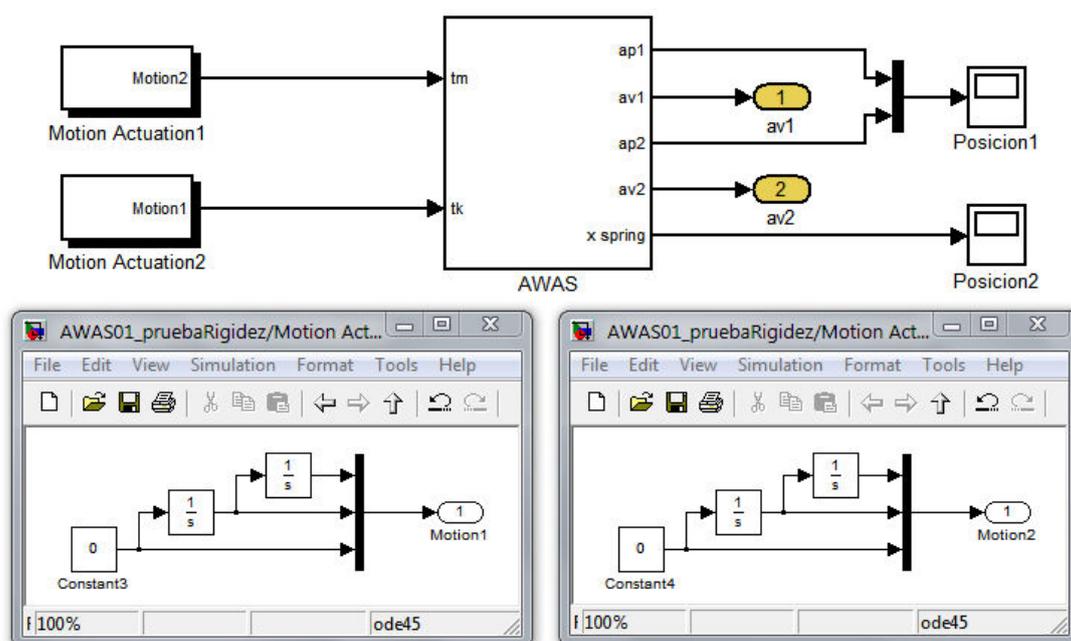


Figura 25. Representación final del AwAS como un subsistema, donde se le conectan los dos subsistemas que crean el movimiento, Motion Actuation1 (abajo izquierda) y Motion Actuation2 (abajo derecha).

El subsistema AWAS contiene todo el sistema ya representado. Posee dos entradas, tm y tk, correspondientes a la actuación del motor principal y del motor secundario, respectivamente, siendo *Motion Actuation1* y *Motion Actuation2* dos subsistemas que definen el movimiento (mostrados en la figura [---], dispuestos en la parte inferior), diseñados de la misma manera que el *Motion Actuation3* expuesto con anterioridad.

También posee cinco puertos de salida. Cuatro de ellos corresponden a la salida de diferentes sensores: ap1 (*Joint Sensor4*, posición angular del brazo, puerto de salida 1), av1 (*Joint Sensor5*, velocidad angular del brazo, puerto de salida 2), ap2 (*Joint Sensor1*, posición angular de la reductora, puerto de salida 3) y av2 (*Joint Sensor2*, velocidad angular de la reductora, puerto de salida 4). El último puerto (x spring) corresponde al sensor *Joint Sensor3* (puerto de salida 5), que nos da la posición de los resortes. ap1 y ap2 se unen a un bloque *Scope (Posicion1)*, que representa los datos recibidos en gráficas, al igual que la salida x spring (*Posicion2*). av1 y av2 se han dejado libres, de manera que en cualquier momento podamos acceder a los datos que aportan usando los bloques pertinentes.

4.3. Modelo simplificado de un ARV

Hay muchos modelos de ARV, tal como se a expuesto con anterioridad, pero la idea básica de todos ellos es la misma: incluir una flexibilidad entre la inercia del rotor y la inercia del brazo.

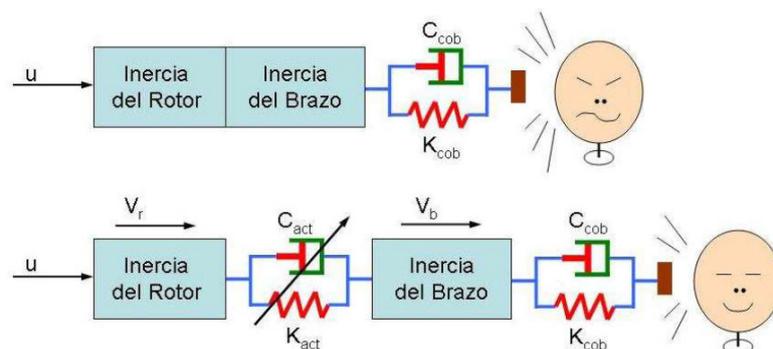


Figura 26. Modelo simplificado del impacto entre el brazo de un robot de 1 g.d.l. y el usuario, en los casos de actuador rígido (Arriba) y actuador flexible (abajo).

El reto es conseguir un sistema mecánico con el que se tenga control sobre esa rigidez, o constante del resorte. Ya que el sistema se puede resumir en la influencia de la constante, la simplificación consistirá en la inclusión de esa constante, dejando a un lado todo el mecanismo y dando como resultado un modelo que se podría aplicar a cualquier actuador.

Partiendo del esquema de la Figura 26, se ha realizado el modelo en Simulink de un ARV simplificado, siendo éste el que se muestra en la siguiente imagen.

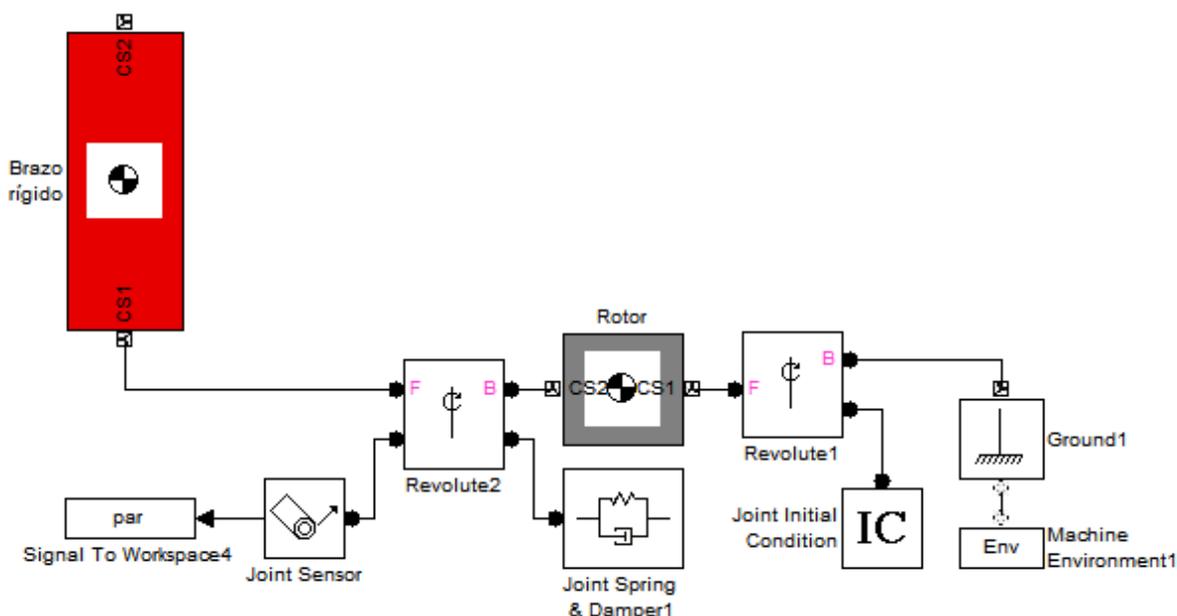


Figura 27. Modelo simplificado de un ARV en Simulink.

Flexibilidad articular

La articulación del brazo del robot se realiza con dos bloques *body* conectados mediante el bloque *Revolute2*. A éste se le une el bloque *Joint Spring & Damper1*, el cual otorga la propiedad elástica a la unión, estableciendo las constantes de rigidez y de amortiguación. Los bloques *body* unidos en este caso son el *Rotor* y el eslabón de salida, o *Brazo*. De la totalidad del motor, sólo se ha representado el rotor, ya que es la única

parte cuya inercia influye en el movimiento del sistema. El rotor debe ir conectado a otro bloque de rotación (*Revolute1*) y éste a su vez a un bloque *ground* (*Ground1*). Otros bloques, *Joint Initial Condition1* y *Joint Sensor1*, se incorporan a este bloque *Revolute1* para darle unas condiciones iniciales de posición y velocidad, y sensorizar su comportamiento, respectivamente. En la tabla 4 se presentan los datos introducidos en cada uno de los bloques mencionados.

Tabla 4. Parámetros de cada bloque del modelo simplificado del ARV.

Bodies			
	<i>Masa (kg)</i>	<i>Inercia (kg·m²)</i>	<i>Puntos que lo definen</i>
<i>Brazo rígido</i>	<i>m</i>	<i>Izcdg*eye(3)</i>	CG [0 -L/2 0] (m) respecto a CS1 CS1 [0 0 0] (m) respecto a unión CS2 [0 -L 0] (m) respecto a CS1
<i>Rotor</i>	<i>MasaRotor1</i>	<i>Irotor*eye(3)</i>	CG [0 0 0] (m) respecto a CS1 CS1 [0 0 0] (m) respecto a unión CS2 [0 0 0] (m) respecto a CS1
	<i>Situación [x,y,z]</i>		
<i>Ground1</i>	[0 0 0]		
	<i>Vector de gravedad (m/s²)</i>		
<i>Machine Environment1</i>	[0 0 -9,81]		
Force Elements			
	<i>Constante de resorte</i>		<i>Constante de amortiguación</i>
<i>Joint Spring & Damper1</i>	Karv		Darv
Joints			
	<i>Ejes de acción</i>		
<i>Revolute1</i>	[0 0 1]		
<i>Revolute2</i>	[0 0 1]		
Sensors & Actuators			
	<i>Parámetros medidos</i>		
<i>Joint Sensor</i>	par (N·m)		
	<i>Posición</i>		<i>Velocidad</i>
<i>Joint Initial Condition</i>	0 (deg)		vinicial (rad/s)

Solo los parámetros destacables en cuanto a su influencia en la simulación han sido detallados en esta tabla.

Las variables se definen mediante archivos .m, detallados en el anexo, página 69.

Brazo

En lo que respecta al diseño del brazo, podría ser trivial con una simple representación mediante un bloque *body* (como se muestra en la Figura 27 con el bloque *Brazo*), pero este tipo de bloques representan un cuerpo con máxima rigidez. Debe tenerse en cuenta que realmente un cuerpo no es completamente rígido y, debido a que Simulink no dispone de un bloque que lo represente, debe recrearse de la forma más veraz posible un eslabón con una determinada flexibilidad. Esto nos lleva al siguiente apartado.

4.4. Modelado del eslabón flexible

Partiremos del hecho de que un eslabón flexible se puede dividir en infinitos eslabones rígidos unidos entre sí mediante uniones flexibles. Tomando como base esta afirmación, podemos crear un eslabón flexible en Simulink con tantos eslabones rígidos como sean necesarios para que la simulación se ajuste a la teoría.

Para que esto sea posible, necesitamos conocer el comportamiento de un eslabón flexible, el cual está definido por la teoría de vigas de Euler-Bernoulli, que define la ecuación diferencial de la curva elástica para una barra delgada de material elástico lineal bajo la hipótesis de pequeños desplazamientos como

$$\frac{d^2y}{dx^2} = \frac{M}{EI}$$

y, para el caso de una viga empotrada en voladizo, siendo la semejanza al caso que nos ocupa, la ecuación queda definida como

$$y_{max} = \frac{PL^3}{3EI},$$

donde P es la carga aplicada en el extremo de la viga, L es la longitud de la viga, E es el módulo elástico o módulo de Young e I es el momento de inercia de área de la viga. Conociendo estos datos, la ecuación nos da el resultado teórico de la deformación de un eslabón flexible, por lo que la deformación del modelo a crear en Simulink debe aproximarse a este resultado al ser simulado en las mismas condiciones para considerarlo válido.

Tal como se ha descrito con anterioridad, se ha representado el eslabón flexible en la Figura 28.

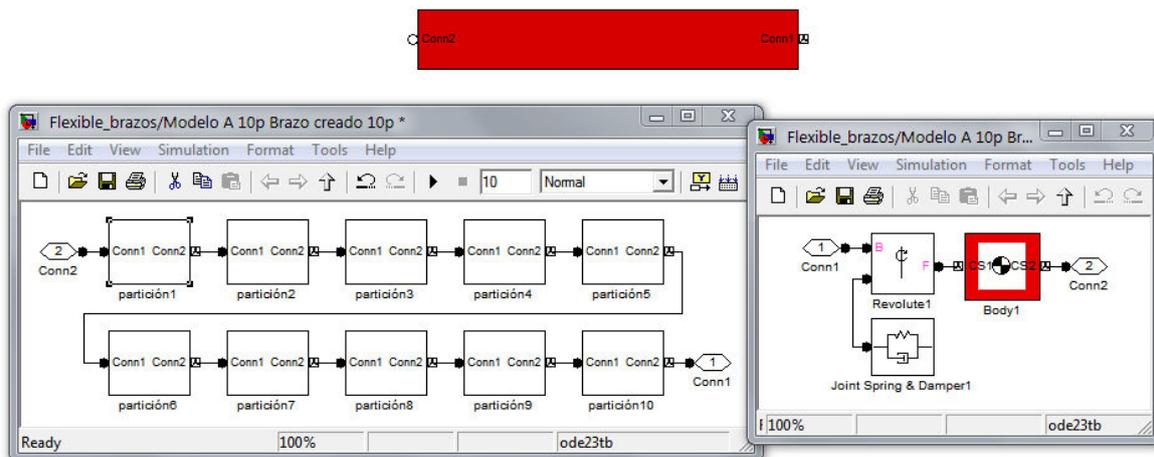


Figura 28. Diseño del eslabón flexible en Simulink.

Se trata de un eslabón dividido en n particiones de longitud L/n , siendo cada una de ellas el subsistema que puede verse a la derecha en la imagen. El hecho de contenerlo en subsistemas facilita su manipulación a la hora de añadir o quitar particiones.

Este subsistema se compone de una unión de revolución (*Revolute*), con una elasticidad definida por el bloque *Joint Spring & Damper*, y un bloque *body* (*partición del brazo*). De esta manera, cada partición del brazo conectada a continuación quedará unida por una unión de revolución con una determinada flexibilidad definida por la constante de rigidez. Es por eso que conocer dicha constante se torna imprescindible.

En [21], podemos encontrar cómo desarrolladores de The MathWorks, empresa creadora de Matlab y Simulink, se aproximan a este problema y aportan una solución a la definición de la constante de rigidez de un eslabón flexible, siendo ésta

$$k = \frac{EI_{zz}}{l}$$

donde E el módulo elástico, I_{zz} el momento de inercia de area en Z, y l la longitud del eslabón. Sabiendo esto y que la constante de amortiguación es un dato que se puede escoger a voluntad, tenemos los parámetros necesarios para el modelo en Simulink, representados en la siguiente tabla.

Tabla 5. Parámetros de cada bloque del eslabón flexible diseñado.

<i>Bodies</i>			
	<i>Masa (kg)</i>	<i>Inercia (kg·m²)</i>	<i>Puntos que lo definen</i>
<i>Body1</i>	m_{part}	$[I_{xp} \ 0 \ 0; \ 0 \ I_{yp} \ 0; \ 0 \ 0 \ I_{zp}]$	CG $[0 \ 0 \ L_{part}/2]$ (m) respecto a CS1 CS1 $[0 \ 0 \ 0]$ (m) respecto a unión CS2 $[0 \ 0 \ L_{part}]$ (m) respecto a CS1
<i>Force Elements</i>			
		<i>Constante de resorte</i>	<i>Constante de amortiguación</i>
<i>Joint Spring & Damper</i>		K_{part}	B_{part}
<i>Joints</i>			
	<i>Ejes de acción</i>		
<i>Revolute1</i>	$[1 \ 0 \ 0]$ (respecto a la base)		

Solo los parámetros destacables en cuanto a su influencia en la simulación han sido detallados en esta tabla. Las variables se definen mediante archivos .m, detallados en el anexo, página 69.

4.4.1. Otros modelos de eslabón flexible

Debido a la ausencia en Matlab de un bloque que represente este tipo de eslabón, en las demos incluidas en Simulink los desarrolladores han incluido un diseño de eslabón flexible, el cual se muestra en la Figura 29.

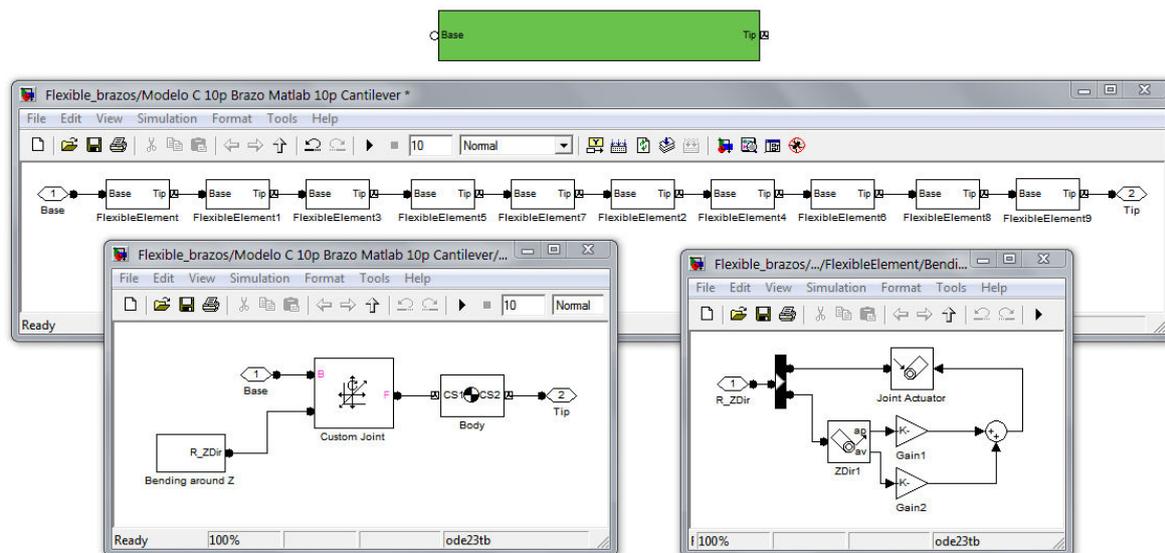


Figura 29. Modelo de eslabón flexible perteneciente a las demos de Simulink.

Este modelo está compuesto de un conjunto de subsistemas, al igual que el modelo ya propuesto, todos equivalentes, formados por la porción de brazo (*Body*), la unión articulada (*Custom Joint*) y la flexibilidad de esa unión (subsistema *Bending around Z*). La diferencia reside en que, en lugar de usar un bloque *Joint Spring & Damper*, se ha modelado el comportamiento directamente con bloques de Simulink.

El funcionamiento del subsistema *Bending around Z* es el siguiente: al bloque *joint* va conectado un bloque *Mechanical Branching Bar*, cuya función es permitir la conexión de varios sensores y/o actuadores a un mismo puerto, en este caso, un actuador (*Joint Actuator*) y un sensor (*ZDir1*). El sensor detecta la variación de la posición angular y de la aceleración angular, las cuales multiplica por la constante de rigidez k y la constante de amortiguación b respectivamente, y se suman mediante el bloque *Sum*, tal como establece la ley de la elasticidad de Hooke:

$$F = (x - x_c)k + (\dot{x} - \dot{x}_c)b$$

El resultado de la suma es la fuerza que ejerce el resorte, cuya señal es recibida por un bloque de actuación que crea esa fuerza en la articulación.

Los valores introducidos en los bloques son los presentados en la tabla 6 (las variables y valores numéricos han sido modificados del modelo original para realizar las simulaciones).

Tabla 6. Parámetros de cada bloque del modelo de brazo flexible perteneciente a las demos de Simulink

<i>Bodies</i>			
	<i>Masa (kg)</i>	<i>Inercia (kg·m²)</i>	<i>Puntos que lo definen</i>
<i>Body</i>	m _{part}	[I _{xp} 0 0; 0 I _{yp} 0; 0 0 I _{zp}]	CG [0 0 L _{part} /2] (m) respecto a CS1 CS1 [0 0 0] (m) respecto a unión

CS2 [0 0 Lpart] (m) respecto a CS1		
Joints		
	<i>Ejes de acción</i>	
<i>Custom Joint</i>	[1 0 0] (revolución)	
Sensors & Actuators		
	<i>Unidades:</i>	<i>Par</i>
<i>Joint Actuator</i>		N·m
	<i>Parámetros medidos</i>	
<i>ZDir1</i>	posición (rad)	velocidad (rad/s)
Otros bloques		
	<i>Valor</i>	
<i>Gain1</i>	-Kpart	
<i>Gain2</i>	-Bpart	

Solo los parámetros destacables en cuanto a su influencia en la simulación han sido detallados en esta tabla. Las variables se definen mediante archivos .m, detallados en el anexo, página 69.

Junto al artículo [21], descargando desde su dirección web en TheMathworks, también puede encontrarse un modelo de brazo flexible, el cual se puede observar en la Figura 30.

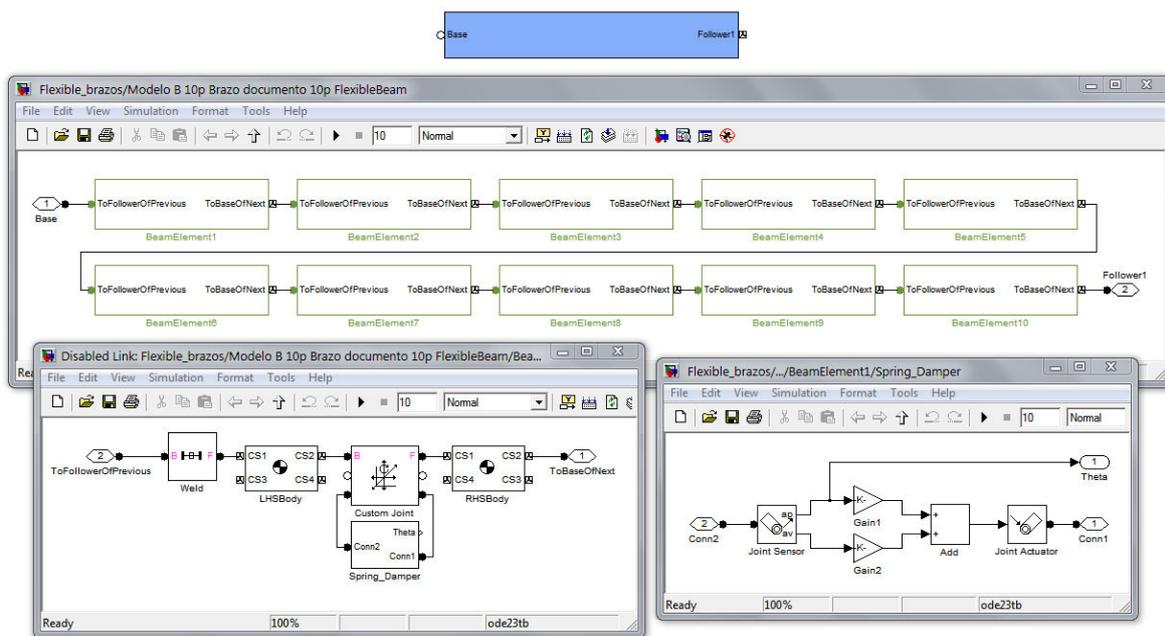


Figura 30. Modelo de eslabón flexible perteneciente a [21], extraído de la web <http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/11027.9>

En este caso, los subsistemas que representan una sección de la barra están hechas con dos particiones unidas por la junta de revolución flexible, esto es, dos bloques *body* (*LHSBody* y *RHSBody*) conectados por un bloque *Custom Joint* (de mismo nombre) que permite rotación en el eje X, con una flexibilidad definida por el bloque *Spring_Damper*. El principio que usa este bloque subsistema (representado a la derecha en la Figura 30) es el mismo que el utilizado en el modelo anterior, basado en la ley de la elasticidad

de Hooke (solo destacar el uso del bloque *Add*, el cual realiza la misma función que el lboque *Sum* ya visto). El primero de los bloques *body* lleva conectado un bloque *Weld* (de mismo nombre) para poder conectar en serie cualquier número de particiones. Es evidente que, al componerse de dos cuerpos y no solo de uno como en los casos anteriores, tanto la longitud como la masa de ellos será la misma que si se tratase de un solo cuerpo, pero divididas entre dos. Esto, y otros datos importantes quedan reflejados en la tabla 7.

Tabla 7. Parámetros de los bloques del modelo de eslabón flexible perteneciente a [21].

<i>Bodies</i>			
	<i>Masa (kg)</i>	<i>Inercia (kg·m²)</i>	<i>Puntos que lo definen</i>
<i>LHSBody</i>	$m_{part}/2$	$[I_{xp2} \ 0 \ 0; \ 0 \ I_{yp2} \ 0; \ 0 \ 0 \ I_{zp2}]$	CG $[0 \ 0 \ L_{part}/4]$ (m) respecto a CS1 CS1 $[0 \ 0 \ 0]$ (m) respecto a unión CS2 $[0 \ 0 \ L_{part}/2]$ (m) respecto a CS1
<i>RHSBody</i>	$m_{part}/2$	$[I_{xp2} \ 0 \ 0; \ 0 \ I_{yp2} \ 0; \ 0 \ 0 \ I_{zp2}]$	CG $[0 \ 0 \ L_{part}/4]$ (m) respecto a CS1 CS1 $[0 \ 0 \ 0]$ (m) respecto a unión CS2 $[0 \ 0 \ L_{part}/2]$ (m) respecto a CS1
<i>Joints</i>			
	<i>Ejes de acción</i>		
<i>Custom Joint</i>	$[1 \ 0 \ 0]$ (revolución)		
<i>Sensors & Actuators</i>			
	<i>Unidades:</i>	<i>Par</i>	
<i>Joint Actuator</i>		N·m	
	<i>Parámetros medidos</i>		
<i>Joint Sensor</i>	posición (rad)	velocidad (rad/s)	
<i>Otros bloques</i>			
	<i>Valor</i>		
<i>Gain1</i>	-Kpart		
<i>Gain2</i>	-Bpart		
<i>Add</i>	—		

Solo los parámetros destacables en cuanto a su influencia en la simulación han sido detallados en esta tabla. Las variables se definen mediante archivos .m, detallados en el anexo, página 69.

Cada uno de estos tres diseños propuestos de un eslabón flexible tiene sus características propias, por lo que posteriormente será necesario comparar las simulaciones de cada uno de ellos y determinar cual se ajusta más a nuestras necesidades.

Capítulo 5.

Modelado para la simulación del sistema cuello-cabeza y del impacto

Teniendo ya una representación de la parte que simula al brazo robot, para realizar la simulación del impacto queda por describir mediante Simulink el receptor del impacto, en este caso la cabeza de una persona, y el subsistema que reproduce el efecto de un choque entre ambos cuerpos.

5.1. Representación del cuello y la cabeza

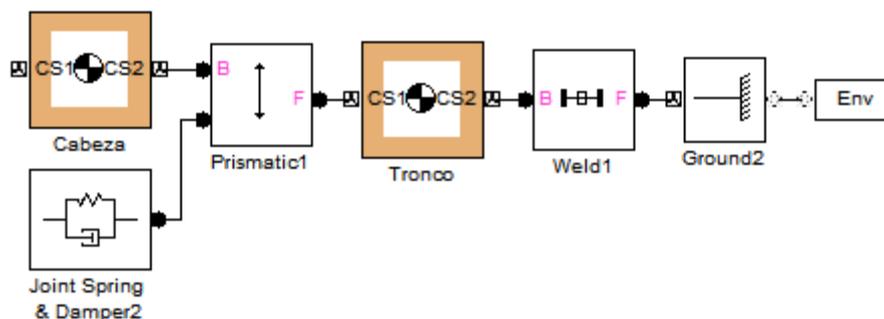


Figura 31. Conjunto de bloques del modelo que representan a la persona.

En cuanto a la simulación, la cabeza no es más que un cuerpo con una determinada masa, por lo que un bloque *Body* es adecuado para representarla. Mediante una unión prismática (*Prismatic1*), la cual representa el cuello, se une la cabeza con el tronco, otro bloque *body*, cuya masa es irrelevante ya que no tiene efectos en el impacto. El bloque de unión entre los dos cuerpos tiene conectado el resorte, *Joint Spring & Damper2*, el cual aporta la constante de rigidez del cuello. Por último, el tronco debe ir unido a un bloque *Ground* para que éste se considere fijo en el espacio, lo cual se realiza mediante una unión soldada, *Weld1*.

Los datos de masa de la cabeza o rigidez del cuello no son datos triviales, sino que existen estudios enfocados a determinar una medida representativa de éstos. De los artículos de McElhaney y Anderson podemos extraer los valores que son necesarios incluir en el modelo:

$$m_{\text{cabeza}} = 5,09 \text{ kg}$$

$$L_{\text{cuello}} = 0,3 \text{ m}$$

$$K_{\text{cuello}} = 3300 \text{ N/m}$$

$$D_{\text{cuello}} = 12 \text{ Ns/m}$$

Los parámetros importantes para la definición de los bloques son los mostrados en la tabla 8.

Tabla 8. Parámetros de los bloques que componen el modelo de la persona.

Bodies			
	<i>Masa (kg)</i>	<i>Inercia (kg·m²)</i>	<i>Puntos que lo definen</i>
<i>Cabeza</i>	mcabeza	eye(3)	CG [0 0 0] (m) respecto a CS1 CS1 [0 0 0] (m) respecto a CS2 CS2 [-0,3 0 0] (m) respecto a unión
<i>Tronco</i>	1	eye(3)	CG [0 0 0] (m) respecto a CS1 CS1 [0 0 0] (m) respecto a CS2 CS2 [0 0 0] (m) respecto a unión
	<i>Situación [x,y,z]</i>		
<i>Ground1</i>	[0 0 0]		
	<i>Vector de gravedad (m/s²)</i>		
<i>Machine Environment2</i>	[0 0 -9,81]		
Force elements			
	<i>Constante de resorte</i>	<i>Constante de amortiguación</i>	
<i>Joint Spring & Damper2</i>	Kneck	Dneck	
Joints			
	<i>Ejes de acción</i>		
<i>Prismatic1</i>	[1 0 0]		
<i>Weld1</i>	—		

Solo los parámetros destacables en cuanto a su influencia en la simulación han sido detallados en esta tabla.

Las variables se definen mediante archivos .m, detallados en el anexo, página 69.

5.2. Modelado de la fuerza de impacto

Tal como sucede con el movimiento del brazo, es necesario diseñar mediante bloques el comportamiento de los cuerpos para una situación de impacto. Para ello, debemos tener claro qué sucede en dicha situación.

El brazo comienza su movimiento a una velocidad constante y, eventualmente, se encuentra con la cabeza de la persona. En ese instante en que entran en contacto, la velocidad de ambos es cero, la cabeza recibe una determinada fuerza debido al choque y el brazo recibe esa misma fuerza en sentido opuesto debido al principio de acción-reacción (tercera ley de Newton). El brazo pasará a moverse en sentido contrario, con

una velocidad y aceleración a determinar debido a la influencia de la inercia del rotor, y la cabeza obtiene un movimiento en sentido opuesto al brazo, restringido por el cuello. De todo ello, será necesario modelar un subsistema que recree la situación, esto es, el momento de contacto y las fuerzas aplicadas. El software se ocupará de simular el movimiento que ambos cuerpos adquieren una vez existan esas fuerzas, el cual es uno de los objetivos que se persiguen.

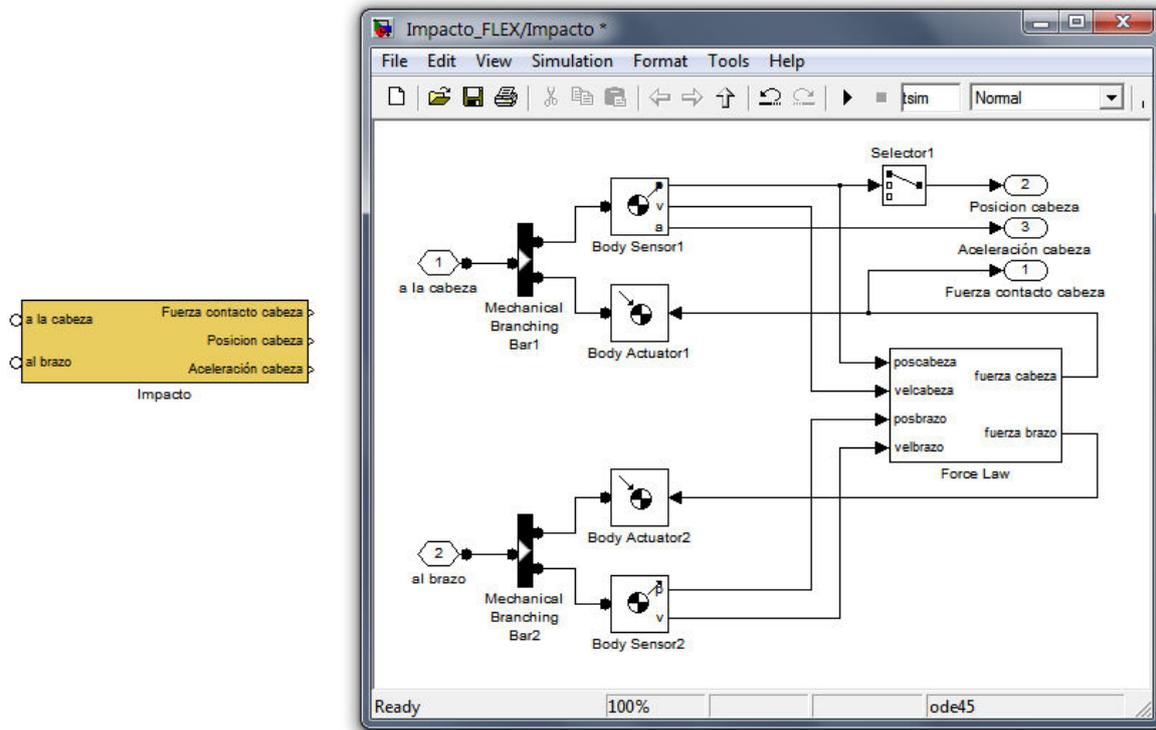


Figura 32. Bloque impacto.

La estructura y funcionamiento del bloque impacto está basado en la demo contenida en Simulink titulada *Bouncing Ball* (mech_bouncing_ball.mdl), la cual se trata de la simulación de una pelota en caída libre rebotando contra el suelo. Ya que la colisión entre la pelota y el suelo se basa en los mismos principios que nuestro caso, nos es posible utilizar el bloque que recrea ese efecto (con sus debidas modificaciones para adaptarlo al caso presente).

Por un lado, se sensoriza la *Cabeza* y por el otro el *Brazo* mediante los bloques *Body Sensor1* y *Body Sensor2* respectivamente, referentes a los parámetros de posición, velocidad y aceleración. Esta información es utilizada por el subsistema *Force Law* que se ocupa de determinar la fuerza y su aplicación.

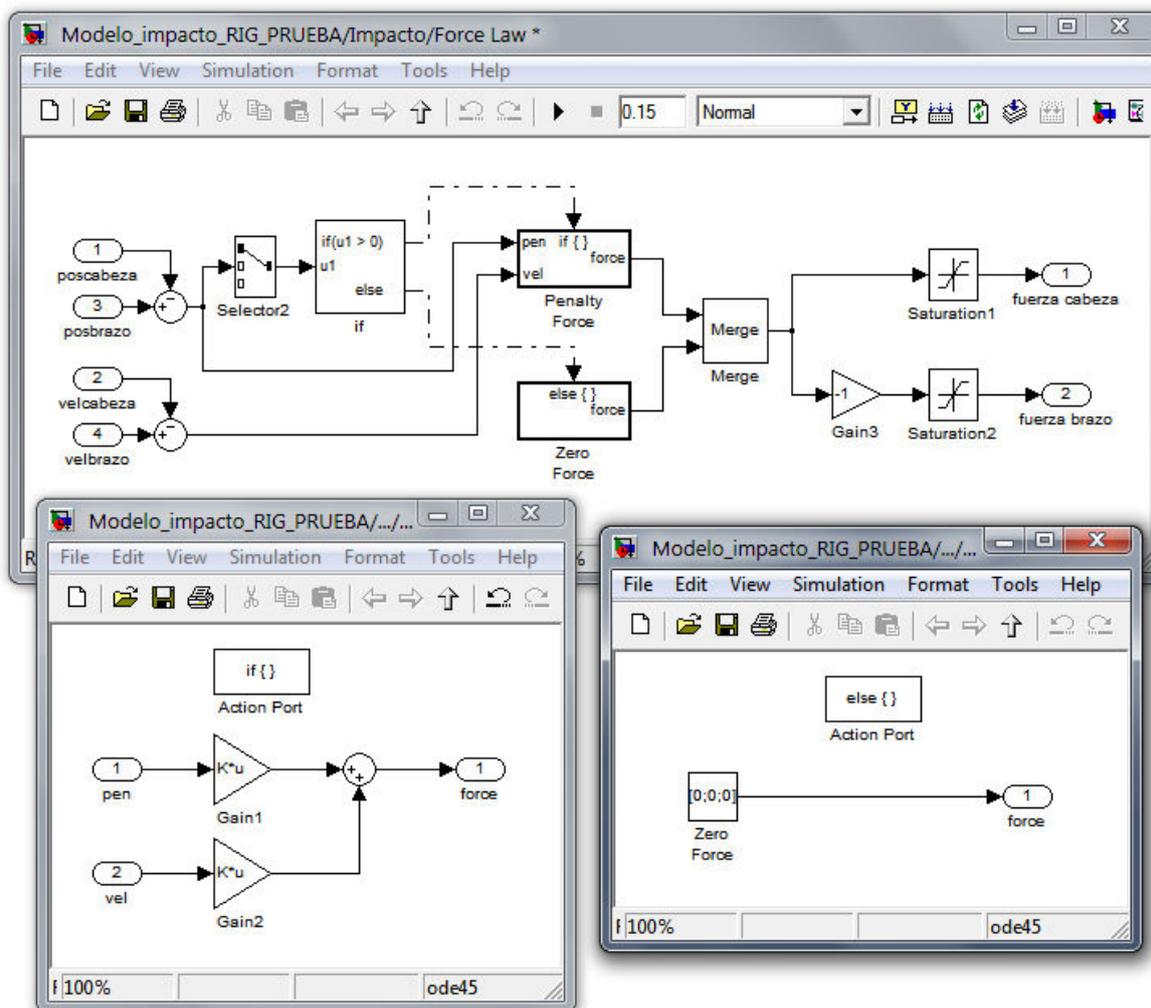


Figura 33. Subsistema Force Law (Arriba), con los dos subsistemas que a su vez contiene: Penalty Force (inferior izquierda) y Zero Force (inferior derecha).

El bloque *Force Law* compara las posiciones y velocidades de ambos cuerpos, restando los parámetros (bloque *Sum*). Con el bloque *Selector3* (permite seleccionar o reordenar los elementos de una señal multidimensional) retenemos solamente la posición en el eje X. Esta señal es recibida por el bloque *if* (ejecuta una acción si se cumple una determinada condición, si no, ejecuta otra acción diferente), el cual comprueba si esa señal (es decir, la diferencia de posiciones entre brazo y cabeza) es mayor que cero (debido a la disposición en el espacio del modelo, la cabeza está en el origen de coordenadas de X y el brazo se sitúa en el sentido negativo de éste). Si no es mayor que cero, o si es igual a cero, el contacto entre los cuerpos aun no se ha producido y la fuerza aplicada a ellos es cero (subsistema *Zero Force*). Pero en el caso de que sea mayor que cero, existe contacto y se aplica la fuerza (subsistema *Penalty Force*). Esta fuerza la describe la ley de la elasticidad de Hooke ya mencionada anteriormente, usando para ello los parámetros que aportan los sensores (diferencias de posición y velocidad entre cabeza y brazo), e introduciendo unas constantes de rigidez y amortiguación, referidas a la cobertura que el brazo posee (el primero de estos parámetros es objetivo de variación en las simulaciones que se realizan más adelante, para determinar su influencia en el

impacto). Ambas situaciones posibles (existencia y no existencia de fuerza) confluyen en el bloque *Merge*, cuya función es recibir varias señales y transmitir únicamente la última recibida. De esta manera, a la salida del sistema, tendremos la señal adecuada para la situación que sucede en cada momento.

La señal es la fuerza aplicada en ambos cuerpos, puesto que, cuantitativamente, es la misma, pero como sus sentidos son opuestos, a continuación se divide la señal en dos ramas, la primera sin modificar para aplicarla a la cabeza, y la segunda con el bloque *Gain3* para convertirla en negativa. Los bloques *saturation* se sitúan para limitar la señal a unos determinados valores (en este caso, limitan las señales para impedir una aplicación negativa de la fuerza en la cabeza, y positiva en el brazo, ya que no existe ningún agente en el sistema que cree ese tipo de fuerzas).

Obtenidas ya las fuerzas, del subsistema *Force Law* salen las señales para conectarlas cada una a un bloque de actuación (*Body Actuator1* y *Body Actuator2*). Los sensores y actuadores correspondientes a cada cuerpo afectado se unen con un bloque *mechanical branching bar* para converger los puertos de conexión en uno solo y simplificar la representación. Por tanto, del bloque *Impacto* salen ambas conexiones, una para el brazo, y otra para la cabeza. La tabla 9 expone los parámetros importantes introducidos en cada bloque que los requiere.

Tabla 9. Parámetros que definen a los bloques del subsistema impacto.

<i>Sensors & Actuators</i>			
	<i>Unidades:</i>	<i>Fuerza</i>	
<i>Body Actuator1</i>		N	
<i>Body Actuator2</i>		N	
<i>Parámetros medidos</i>			
<i>Body Sensor1</i>	posición (rad)	velocidad (rad/s)	aceleración (rad/s ²)
<i>Body Sensor2</i>	posición (rad)	velocidad (rad/s)	
<i>Otros bloques</i>			
	<i>Valor</i>		
<i>Gain1</i>	[Kcov 0 0; 0 0 0; 0 0 0]		
<i>Gain2</i>	[Dcov 0 0; 0 0 0; 0 0 0]		
<i>Gain3</i>	-1		
	<i>Condición</i>		
<i>if</i>	u1>0		
	<i>Límite superior</i>	<i>Límite inferior</i>	
<i>Saturation1</i>	inf	0	
<i>Saturation2</i>	0	-inf	
	<i>Elemento seleccionado del vector entrada</i>		
<i>Selector1</i>	[1]		
<i>Selector2</i>	[1]		

Solo los parámetros destacables en cuanto a su influencia en la simulación han sido detallados en esta tabla. Las variables se definen mediante archivos .m, detallados en el anexo, página 69.

Capítulo 6.

Simulación del impacto cabeza-robot

Se han definido mediante bloques las cuatro partes esenciales que componen el modelo: el rotor más ARV, el brazo flexible, la persona objetivo del impacto y el bloque que simula las fuerzas del impacto. Uniendo todo ello convenientemente, el modelo completo es el siguiente:

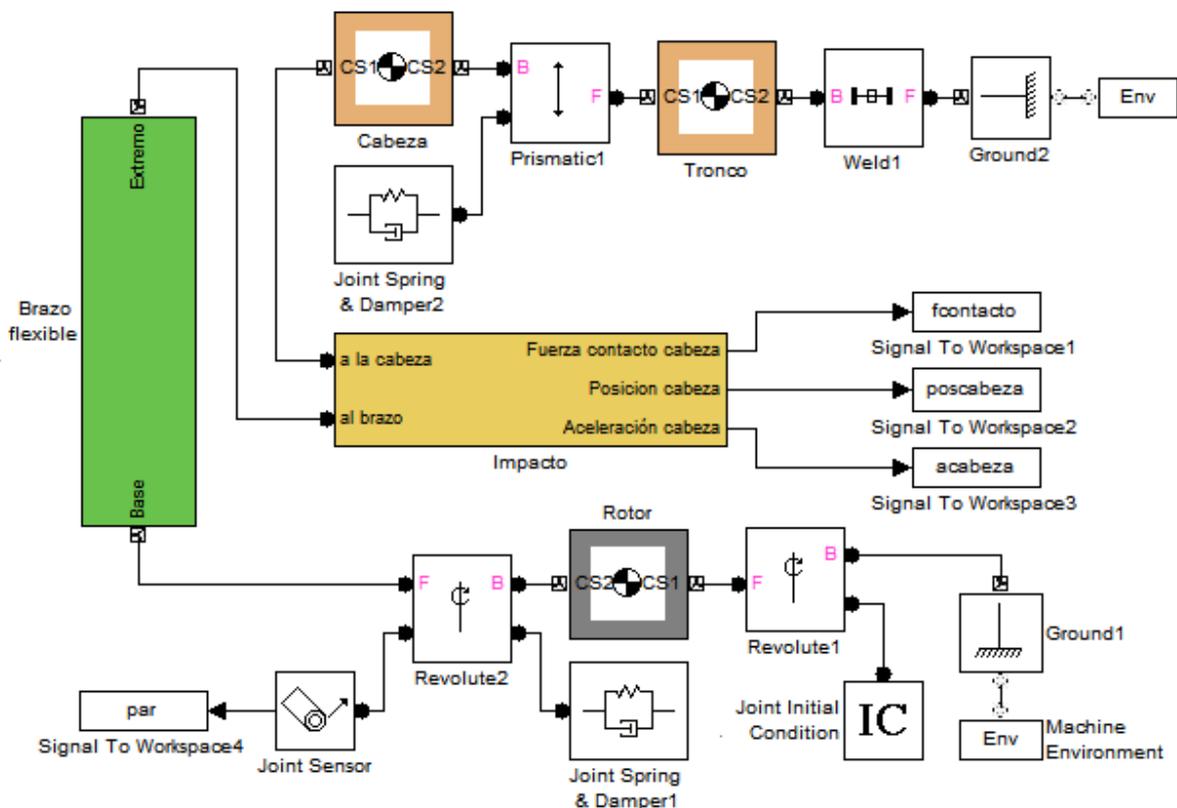


Figura 34. Modelo completo para la simulación del impacto

La conexión entre el ARV y el brazo se realiza uniendo el brazo al bloque *Revolute2*. El subsistema *Impacto* se ocupa de unir el brazo y la cabeza, relacionándolos así según las fuerzas que el subsistema simula.

Del subsistema *Impacto* tenemos tres salidas, cada una correspondiente a uno de los parámetros que queremos controlar: la posición de la cabeza, la aceleración de la cabeza, y la fuerza de contacto en la cabeza, todas ellas conectadas a bloques *Signal to Workspace* para ser almacenadas en variables que nos permitan manejarlas

posteriormente en Matlab (las variables son, *poscabeza*, *acabeza* y *fcontacto*, respectivamente).

De este modo, el modelo final para la simulación del impacto se diseñado. Con esto, el siguiente paso ya consiste en realizar las simulaciones pertinentes para determinar los efectos de la fuerza del impacto.

Capítulo 7.

Validación del modelado del AwAS

En la página 21, se expuso el modelo en Simulink del actuador AwAS, comentando y definiendo su estructura, funcionamiento y sus variables. En este apartado daremos valores a esas variables y realizaremos las simulaciones oportunas para comprobar que los resultados se ajustan a las pruebas experimentales de Jafari et al. en el artículo donde es presentado [18].

Recordemos que el AwAS basaba su funcionamiento en la variación de la rigidez mediante un resorte móvil que transmite el movimiento entre un eslabón intermedio unido al actuador y el eslabón de salida o brazo. Es por tanto necesario comprobar que la rigidez del sistema varía con respecto de la posición de los resortes.

En el artículo se define mediante ecuaciones esta relación, siendo

$$K = 2K_s \left(r^2 + \frac{d_s^2}{12} \right) (2\cos^2 \delta\theta - 1)$$

donde K es la rigidez del sistema, K_s es la rigidez de cada muelle, r es la posición de los muelles sobre el eslabón intermedio, d_s es el diámetro externo de los muelles y $\delta\theta$ es el ángulo entre el eslabón intermedio y el eslabón de salida.

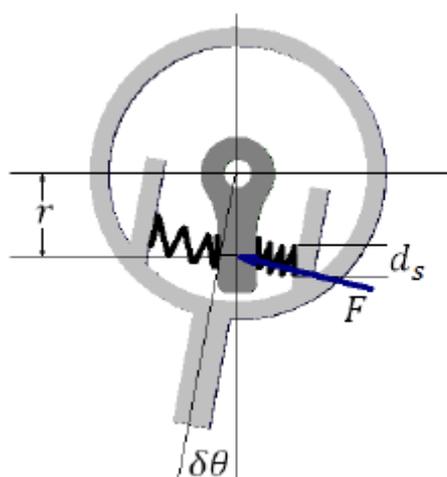


Figura 35. Dibujo esquemático del AwAS y los parámetros que influyen.

Tomando como valores para esas variables los siguientes números:

- $d_s = 0,01$
- $\delta\theta = 0$
- $r = \text{entre } 0.01 \text{ y } 0.09, \text{ en pasos de } 0,01$
- $K_s = \text{entre } 50 \text{ y } 200, \text{ en pasos de } 50$

los resultados, expresados gráficamente, son los siguientes;

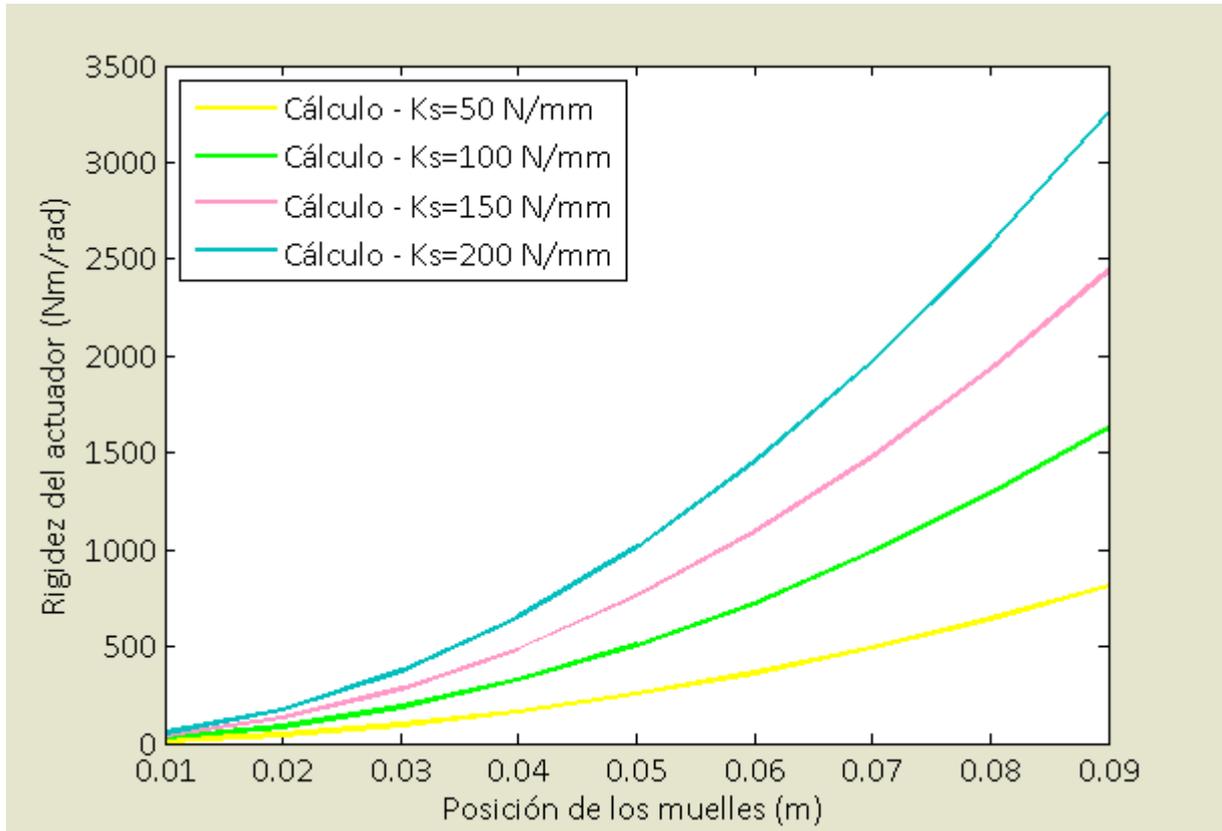


Figura 36. Rigidez del AwAS para distintas posiciones de los muelles, con cuatro valores distintos de la rigidez de cada muelle.

Si realizásemos estas pruebas mediante simulaciones del modelo en Simulink con los mismos datos, deberían obtenerse aproximadamente los mismos resultados.

El archivo mfile utilizado para la obtención de las gráficas se titula *AWAS_comprobacion*, el cual puede consultarse en el anexo, página 69. Las gráficas, superpuestas con las obtenidas teóricamente, quedan así:

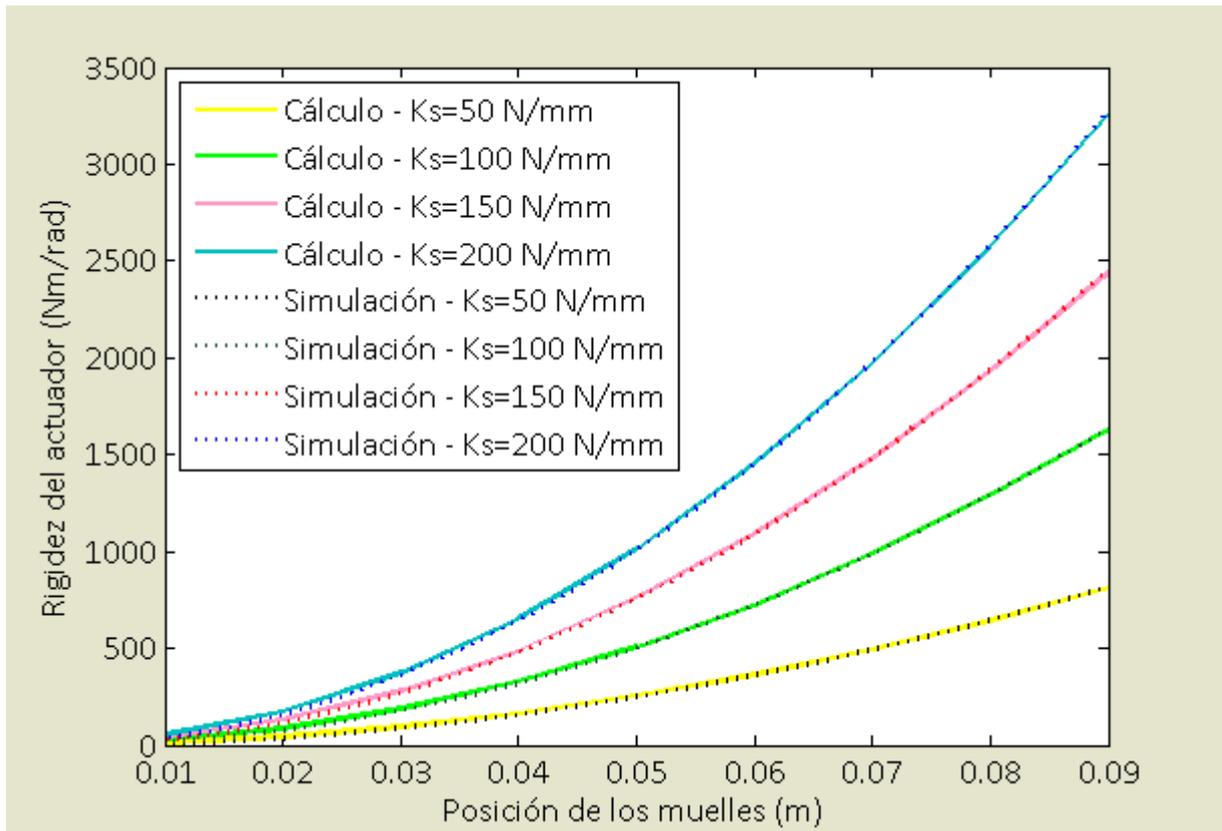


Figura 37. Rigidez del AwAS para distintas posiciones de los muelles, con ocho valores distintos de rigidez de cada muelle: cuatro correspondientes a los resultados teóricos calculados (líneas continuas) y cuatro correspondientes a los resultados de las simulaciones (líneas discontinuas).

Se ve con claridad cómo los resultados experimentales son prácticamente iguales a los teóricos, quedando superpuestos en la gráfica. Por lo cual podemos decir que el modelo creado en Simulink es acertado.

Capítulo 8.

Simulación y análisis del eslabón flexible

Tomando como base el modelo de brazo diseñado, expuesto en el capítulo 4 (página 32), se realizarán diversas simulaciones variando el número de eslabones en que puede dividirse, y los resultados se compararán a los cálculos teóricos para determinar si el diseño de brazo flexible en Simulink es válido.

Los parámetros que se tendrán en cuenta serán la flecha en el extremo del brazo (despreciando su peso propio), los ciclos de vibración del brazo y el tiempo real de simulación.

La flecha queda definida por la deformación de una viga empotrada en voladizo:

$$y_{max} = \frac{Pl^3}{3EI}$$

siendo I el momento de inercia de área de la viga, que para la geometría cilíndrica hueca que posee se calcula como:

$$I_{area} = \frac{\pi}{4}(r_{ext}^4 - r_{int}^4)$$

P es la carga aplicada en el extremo de la viga, l es la longitud de la viga, E es el módulo elástico o módulo de Young y r_{ext} y r_{int} son, respectivamente, el radio externo y el radio interno de la sección.

Para el cálculo de los ciclos de vibración para el caso brazo -viga empotrada en un extremo y libre en otro, sometida a flexión- se considera el caso de vibraciones libres sin amortiguamiento [22], del cual se extrae:

$$N_1 = \frac{1}{T}$$

donde

$$T = \frac{2\pi}{\omega_1}$$

siendo T el periodo y ω_1 la frecuencia natural del primer modo de vibración, que se expresa como

$$\omega_1 = \beta_1^2 \sqrt{\frac{EI}{\mu}}$$

siendo

$$\beta_1^2 = \frac{(\beta l)_1}{l}$$

$(\beta l)_1$ es la raíz primera de la ecuación característica de vibración del sistema, l la longitud de la viga, μ es la masa por unidad de longitud, E es el módulo de Young e I es el momento de inercia de área. Conociendo estos parámetros, podemos obtener teóricamente los ciclos de vibración para compararlos con los ciclos que se obtienen de la simulación.

En cuanto al tiempo real de simulación, el software no posee una manera de medirlo, por lo que se usará un cronómetro.

Los valores utilizados se presentan en las tablas 10 y 11.

Tabla 10. Parámetros para el cálculo de la flecha y de los ciclos.

<i>Diámetro externo de la sección</i>	$D_{\text{ext}}=$	0.150	m
<i>Diámetro interno de la sección</i>	$D_{\text{int}}=$	0.146	m
<i>Longitud del brazo</i>	$l=$	1	m
<i>Densidad del aluminio</i>	$d=$	2711.519	kg/m ³
<i>Módulo de Young (para el aluminio)</i>	$E=$	72·10 ⁶	N/m ²
<i>Fuerza del impacto</i>	$P=$	10 N	N
<i>Raíz primera de la ecuación característica</i>	$(\beta l)_1=$	1.875	

Tabla 11. Parámetros calculados a partir de los presentes en la tabla 10.

<i>Masa del brazo</i>	$m=$	2.522	kg
<i>Área de la sección</i>	$A=$	1.256·10 ⁻⁵	m ²
<i>Volumen del brazo</i>	$v=$	9.299·10 ⁻⁴	m ³
<i>Radio externo de la sección</i>	$R_{\text{ext}}=$	0.075	m
<i>Radio interno de la sección</i>	$R_{\text{int}}=$	0.073	m
<i>Momento de inercia de área</i>	$I_{\text{area}}=$	2.546·10 ⁻⁶	m ⁴
<i>Momento de inercia másico en X</i>	$I_x=$	0.209	kg·m ²
<i>Momento de inercia másico en Y</i>	$I_y=$	0.217	kg·m ²
<i>Momento de inercia másico en Z</i>	$I_z=$	0.014	kg·m ²
<i>Momento de inercia másico en X desde el extremo</i>	$I_{xx}=$	0.847	kg·m ²
<i>Flecha en el extremo despreciando el peso propio</i>	$f=$	0.018	m
<i>Flecha en el extremo debida al peso propio</i>	$f_{pp}=$	0.017	m

<i>Flecha total</i>	$f_T =$ 0.035	m
<i>Raíz primera de la ecuación característica</i>	$\beta_1 =$ 1.875	
<i>Frecuencia natural</i>	$\omega_1 =$ 29.982	Hz
<i>Periodo</i>	$T =$ 0.209	s
<i>Ciclos por segundo</i>	$N =$ 4.772	ciclos/s
<i>Ciclos cada 5 segundos</i>	$N_5 =$ 23.859	ciclos/s

Una vez conocidos los resultados teóricos, definimos las variables introducidas en cada bloque del modelo, que el software calculará dependiendo del número de particiones que introduzcamos en cada simulación. Estas variables se muestran en la tabla 12.

Tabla 12. Definición de las variables introducidas en los bloques para las pruebas del eslabón flexible.

<i>Número de particiones</i>	$N_{part} =$ —
<i>Longitud de cada partición</i>	$L_{part} =$ L/N_{part}
<i>Masa de cada partición</i>	$m_{part} =$ m/N_{part}
<i>Momentos de inercia máxicos de cada partición:</i>	
<i>en X</i>	$I_{xp} = (m_{part}/4) * ((R_{ext}^2 + R_{int}^2) + ((L_{part}^2)/3))$
<i>en Y</i>	$I_{yp} = (m_{part}/4) * ((R_{ext}^2 + R_{int}^2) + ((L_{part}^2)/3))$
<i>en Z</i>	$I_{zp} = (m_{part} * (R_{ext}^2 + R_{int}^2)) / 2$
<i>Constante de resorte de cada partición</i>	$K_{part} = (E * I_{area}) / L_{part}$
<i>Constante de amortiguación de cada partición</i>	$B_{part} = 0$

Estos cálculos, junto con los demás datos definidos se describen en el archivo *Flexible_Datos.m*, el cual puede consultarse en el anexo, página 69.

El modelo para la simulación será el siguiente:

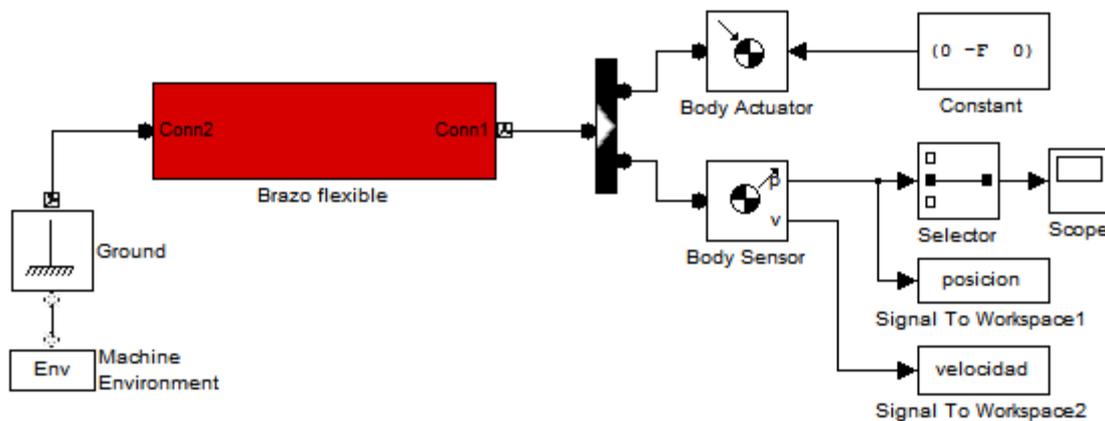


Figura 38. Modelo en Simulink del sistema para las pruebas de los eslabones flexibles.

El bloque *5 particiones* es un subsistema que engloba 5 particiones del brazo flexible diseñado, para que en cada prueba podamos duplicarlo y el número de eslabones en cada simulación se incremente en cinco. Ello se une a uno de sus extremos a un punto fijo (*Ground*) mediante una unión de revolución (incluida dentro de las particiones de las

particiones), con una fuerza aplicada en el otro extremo, siendo esto posible gracias a un bloque actuador (*Body Actuator*) que recibe como señal una constante (*Constant*). Además, se incluye un sensor (*Body Sensor*) que obtiene la posición y la velocidad en el extremo del brazo y las almacena en variables mediante los bloques *Signal to Workspace1* y *Signal to Workspace2*. El bloque *Scope* representa la posición en una gráfica con respecto al tiempo de simulación. La tabla 13 indica los valores introducidos (excluyendo las particiones, ya descritas en la página 32).

Tabla 13. Parámetros de cada bloque del modelo para las pruebas del eslabón flexible

<i>Bodies</i>	
	<i>Situación [x,y,z]</i>
<i>Ground</i>	[0 0 0]
	<i>Vector de gravedad (m/s²)</i>
<i>Machine Environment</i>	[0 0 0]
<i>Sensors & Actuators</i>	
	<i>Unidades:</i> <i>Fuerza</i>
<i>Body Actuator</i>	N
	<i>Parámetros medidos</i>
<i>Body Sensor</i>	posición (m) velocidad (m/s)
<i>Otros bloques</i>	
	<i>Valor</i>
<i>Constant</i>	[0 -F 0]
	<i>Nombre de la variable</i>
<i>Signal to Workspace1</i>	posicion
<i>Signal to Workspace2</i>	velocidad

Solo los parámetros destacables en cuanto a su influencia en la simulación han sido detallados en esta tabla. Las variables se definen mediante archivos .m, detallados en el anexo, página 69.

Con todo esto, se han realizado simulaciones modificando el número de eslabones entre 5 y 70, variando cada caso en 5 eslabones. Para cada caso, dos simulaciones son necesarias: una para obtener el número de ciclos a los 5 segundos, y otra para obtener la flecha. Esto es así debido a que, con $B_{part}=0$, el sistema no llega a estabilizarse en 5 segundos y la flecha no llega a ser observable. La siguiente imagen muestra un ejemplo de ello.

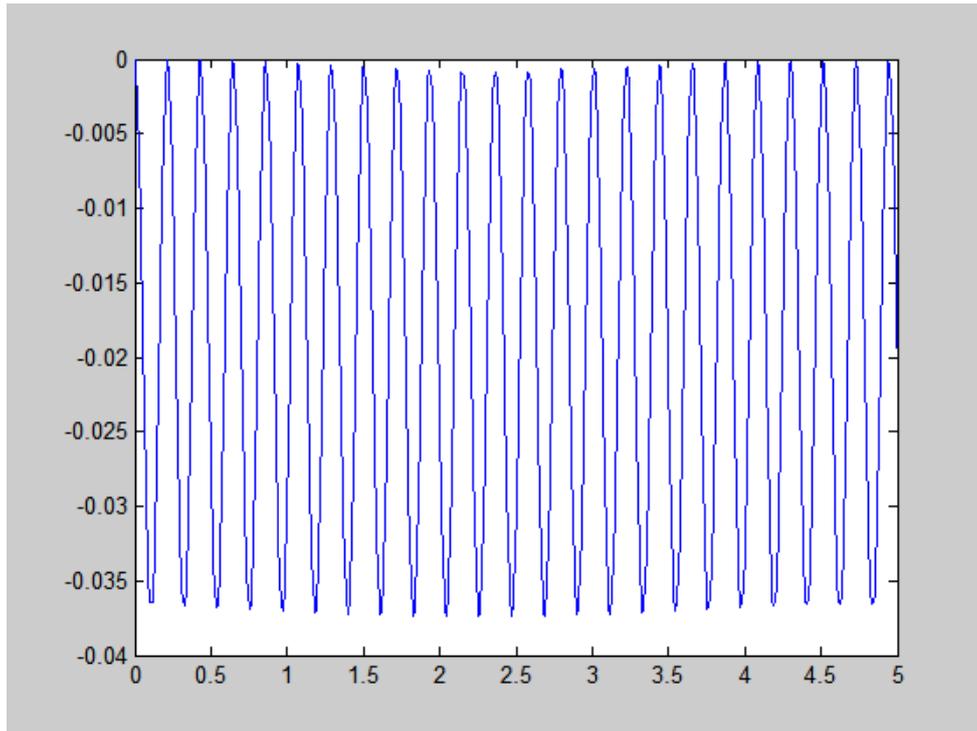


Figura 39. Posición del extremo del brazo durante los primeros 5 segundos, con $B_{part}=0$ y $N_{part}=50$.

Tras varias pruebas con diferentes valores de B_{part} (entre 0 y 60), $B_{part}=40$ es el valor que permite obtener la flecha con cuatro decimales extendiendo lo mínimo posible el tiempo real de simulación, para el número de pruebas previsto. Con $B_{part}=40$, el sistema consigue llegar al equilibrio y podemos observar la flecha, resultando la gráfica como en la siguiente imagen.

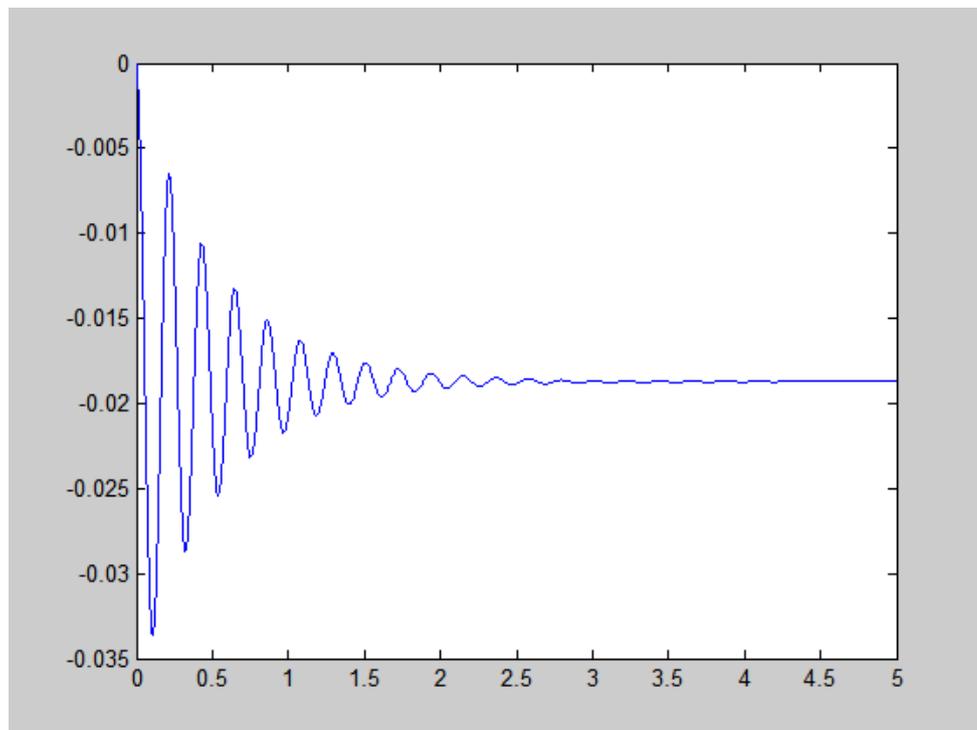


Figura 40. Posición del extremo libre del rbazo durante los primeros 5 segundos, con $B_{part}=40$ y $N_{part}=50$.

Por tanto, para la obtención de los ciclos en cada caso, se ha establecido $B_{part}=0$, y para la obtención de la flecha se ha establecido $B_{part}=40$. En lo que respecta al tiempo de simulación, se ha medido con un cronómetro el de aquellas simulaciones con $B_{part}=40$, ya que cuanto más alto es este número, más tiempo se requiere para realizar una simulación (mientras que el tiempo requerido con $B_{part}=0$ es trivial comparado con éste). Teniendo en cuenta que el resultado teórico para la flecha es de $0,0182 \cdot 10^{-3}$ m y para los ciclos es de 23,86, los resultados son los mostrados en la tabla 14.

Tabla 14. Contribución del número de particiones de un eslabón flexible

Número de eslabones	flecha ($\times 10^{-3}$) (m)	ciclos (en 5 segundos)	tiempo real de simulación	
			formato horario	segundos
5	0,0240	19,75	0:00:19	19
10	0,0210	21,50	0:02:09	129
15	0,0200	22,25	0:05:49	349
20	0,0196	22,55	0:10:47	647
25	0,0193	22,85	0:16:13	973
30	0,0191	22,99	0:21:41	1301
35	0,0190	23,03	0:27:03	1623
40	0,0189	23,10	0:35:23	2123
45	0,0188	23,20	0:46:14	2774
50	0,0187	23,25	0:55:54	3354
55	0,0187	23,35	1:09:29	4169
60	0,0186	23,40	1:32:10	5530
65	0,0186	23,45	1:48:56	6536
70	0,0186	23,47	1:50:05	6605
75	—	23,48	—	—
80	—	23,49	—	—
85	—	23,50	—	—
90	—	23,50	—	—
95	—	23,50	—	—
100	—	23,50	—	—

Para obtener un resultado más fiable de los ciclos, ya que el tiempo de simulación lo permite (a diferencia de las pruebas para la flecha), se han realizado pruebas hasta los 100 eslabones.

Las representaciones gráficas de los resultados son las mostradas por las figuras 41, 42 y 43.

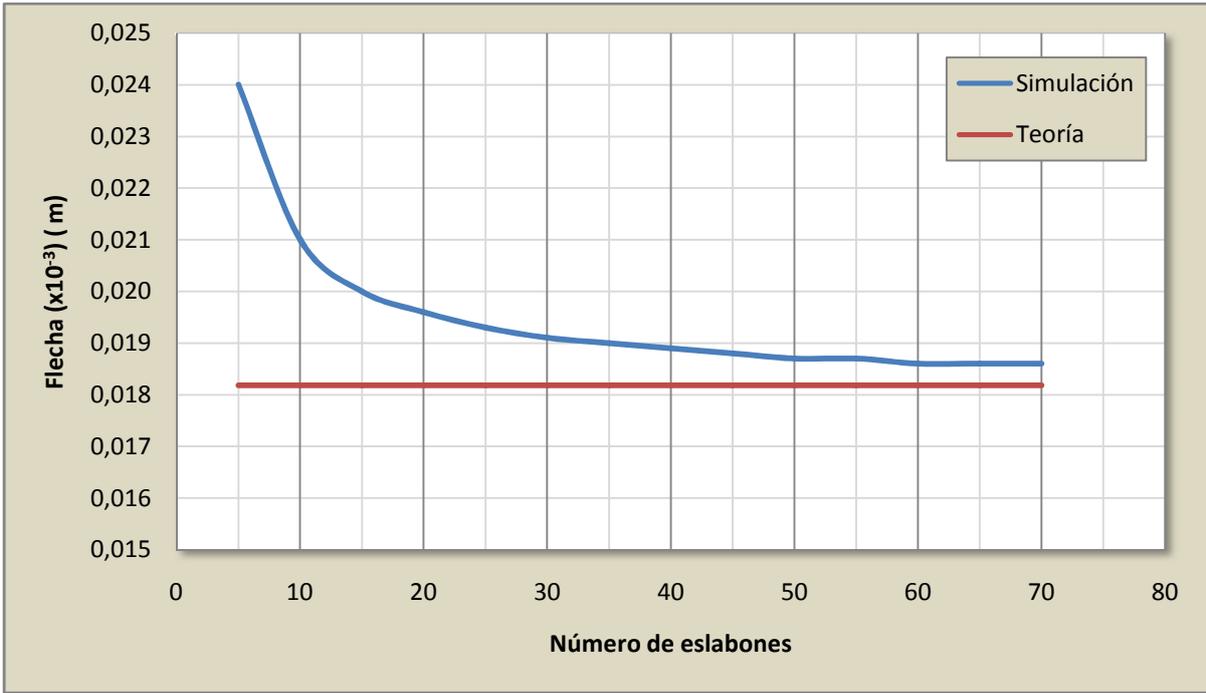


Figura 41. Flecha del brazo para diferentes números de eslabones, para el caso práctico y teórico.



Figura 42. Número de ciclos a los 5 segundos para diferentes números de eslabones, para el caso práctico y teórico.

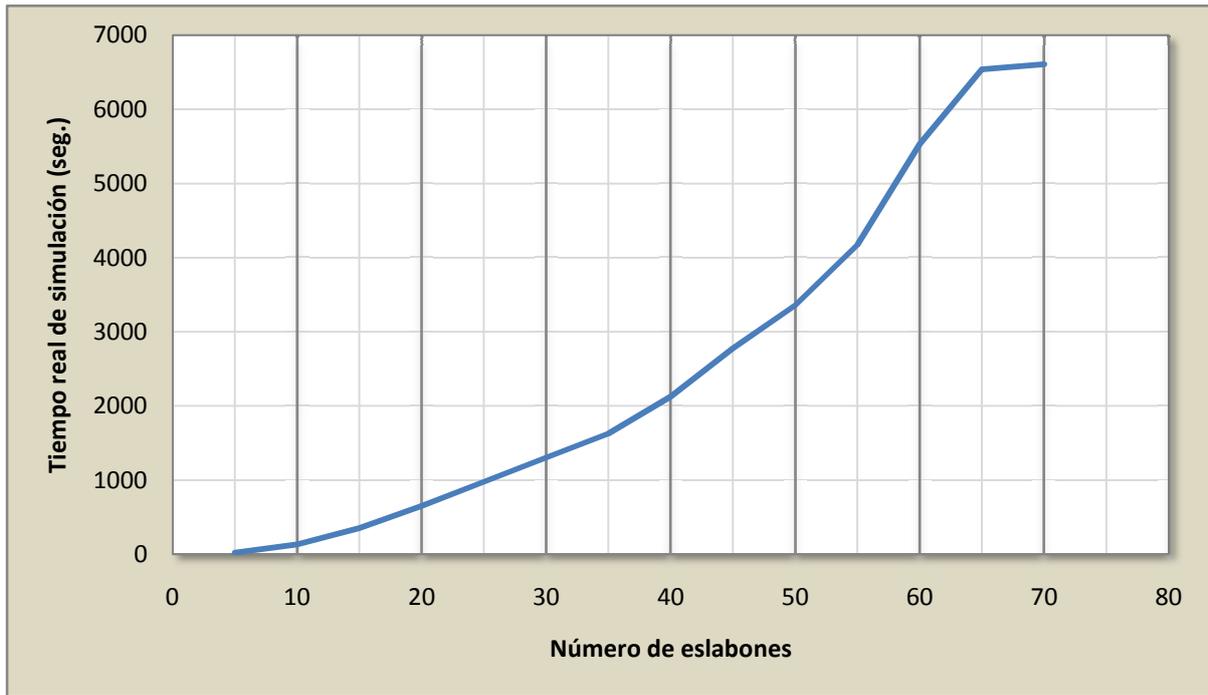


Figura 43. Tiempo real de simulación (con $B_{part}=40$) para diferente números de eslabones.

En la figura 41 vemos como el resultado de las simulaciones se aproxima al resultado teórico conforme se aumenta el número de eslabones, lo cual era el comportamiento previsto. El error entre el valor teórico y el valor más cercano obtenido a éste (con 70 eslabones) es del 2,3%, suficientemente pequeño como para aceptar que el modelo es válido. Lo mismo sucede con los ciclos de vibración (figura 42), cuyo error es solo del 1,51%. Con respecto al tiempo real de simulación (figura 43), queda patente que los casos con mayor número de eslabones consumen mucho tiempo como para realizar múltiples pruebas con el modelo, por lo que, para realizar simulaciones en apartados posteriores, se deberá establecer un número de eslabones menor para el cual el tiempo requerido sea asumible.

8.1. Selección del modelo de eslabón flexible

Después de la comprobación de los resultados del modelo creado de eslabón flexible, queda estimar cuál de los modelos expuesto en el capítulo 4 es el más apto para el estudio.

El modelo a elegir debe ser el que obtenga los resultados más precisos con un tiempo de cálculo asumible. Es por eso que para la elección se tendrá en cuenta tanto la flecha como el tiempo real de simulación de cada uno. Para simplificar la notación, los modelos se nombrarán del siguiente modo:

- El brazo creado para el estudio será el modelo A (rojo), descrito en la página 32.
- El brazo incluido en Simmechanics será el modelo B (azul), descrito en la página 34.

- El brazo obtenido del estudio de Chudnovsky [21] será el modelo C (verde), descrito en la página 35.

Las pruebas se realizan con el mismo modelo para el ensayo anterior, sustituyendo en cada caso el brazo.

Para realizar las pruebas, se ha variado el número de eslabones entre 10 y 50, con variaciones de 10 eslabones cada vez, la fuerza aplicada en el extremo libre es de 10 N y Bpart, será 40.

Los resultados pueden consultarse en la tabla 15.

Tabla 15. Contribución del número de eslabones en cada modelo

	Eslabones	Modelo A	Modelo B	Modelo C			
Flecha ($\times 10^{-3}$) (m)	10	0,0210	0,0181	0,0210			
	20	0,0196	0,0182	0,0196			
	30	0,0191	0,0182	0,0191			
	40	0,0189	0,0182	0,0189			
	50	0,0187	0,0183	0,0187			
Tiempo real de simulación (formato horario y en segundos)	10	0:02:09	129	0:02:28	148	0:01:43	103
	20	0:10:47	647	0:11:12	672	0:07:28	448
	30	0:21:41	1301	0:25:03	1503	0:18:42	1122
	40	0:35:23	2123	0:43:30	2610	0:29:38	1778
	50	0:55:54	3354	1:22:51	4971	0:44:27	2667

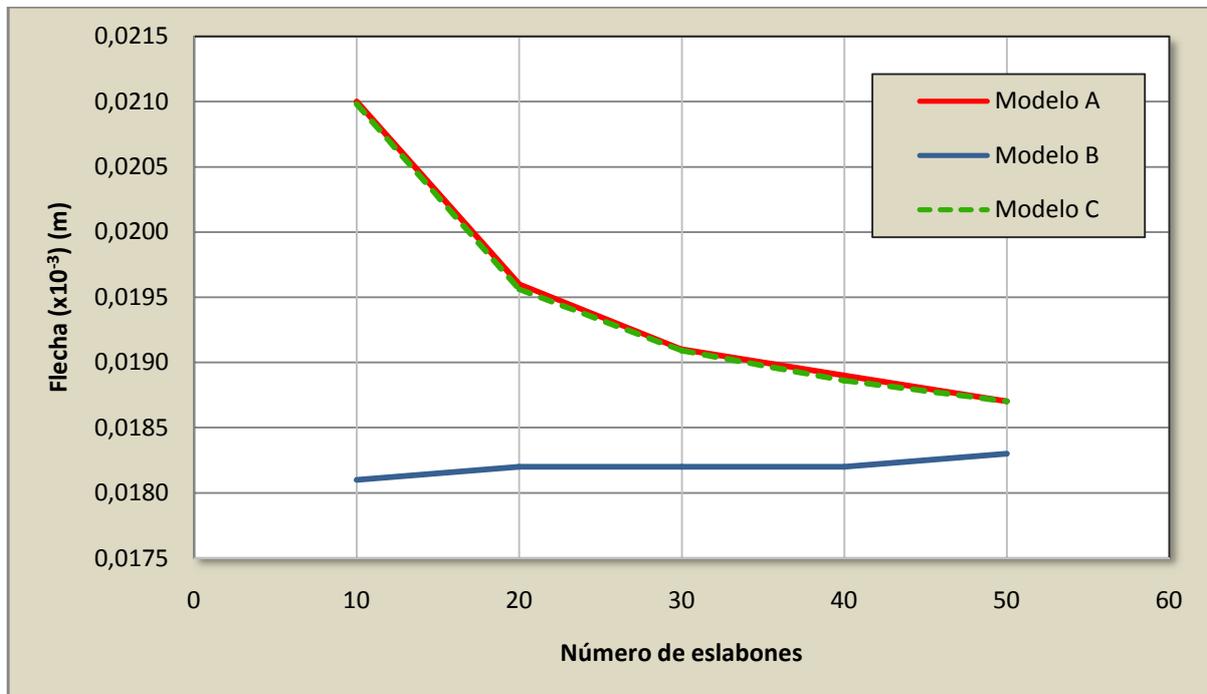


Figura 44. Flecha de los tres modelos para diferente número de eslabones.

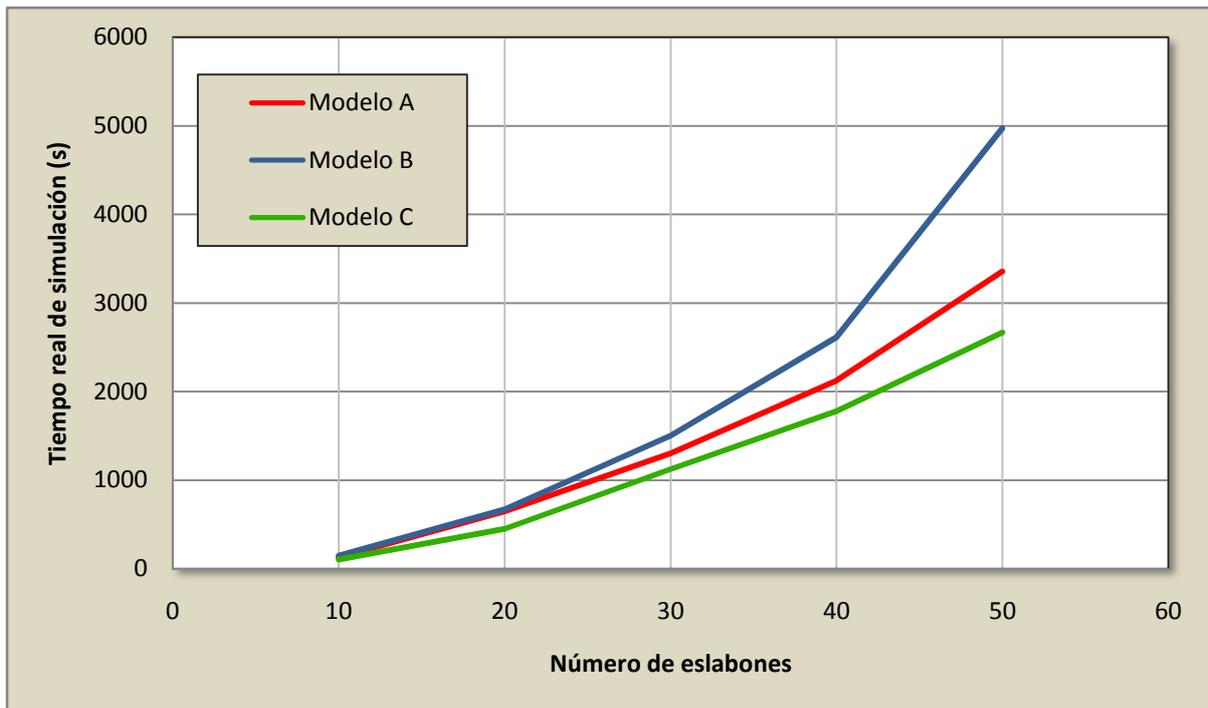


Figura 45. Tiempo real de simulación de los tres modelos para diferente número de eslabones.

Observando la flecha de los modelos, vemos como la del modelo B, pese a ser el que más se acerca al resultado teórico ya desde la primera prueba, con 10 eslabones, su comportamiento difiere con lo que podría ser un comportamiento previsible. Es de esperar que, cuanto mayor sea el número de eslabones, el resultado se acerque cada vez más a la teoría, pero observamos que con 50 eslabones el valor experimental supera al teórico, teniendo como cómputo global una tendencia creciente la cual no indica que aumentando el número de eslabones por encima de 50 el resultado sea el adecuado. Sin embargo, el comportamiento previsible de un eslabón flexible podemos observarlo tanto en el modelo A como en el B, cuyos resultados son los mismos. Por lo tanto, si tomamos en cuenta el tiempo de simulación de ambos eslabones, podemos ver como el modelo C requiere menos tiempo para realizar las pruebas, por lo que es este eslabón el más adecuado para realizar las simulaciones de impacto.

Capítulo 9.

Simulación y análisis del impacto hombre-robot

Una vez completado el modelo en Simulink, podemos realizar diversas simulaciones y obtener resultados de la influencia de diferentes parámetros en las consecuencias de la colisión entre el brazo robot y la persona.

Los parámetros que serán objeto de análisis en las diversas pruebas que se realizarán serán la rigidez del ARV (K_{arv}) y la rigidez de la cobertura (K_{cov}), para los cuales se utilizará un eslabón rígido (un bloque *Body*); y el material del cual esté constituido el brazo, representado por el módulo elástico (E), para el cual se utilizará el modelo de eslabón flexible seleccionado con anterioridad, ya que la diferencia entre un material y otro es la flexibilidad que confiere al eslabón. Se observarán los resultados de fuerza de contacto, aceleración de la cabeza y par a la salida de la reductora con cada variación de los parámetros descritos, de manera que podamos determinar los efectos del impacto.

El modelo usado para esta tarea es el descrito en el capítulo 6 y que se vuelve a mostrar en la Figura 46.

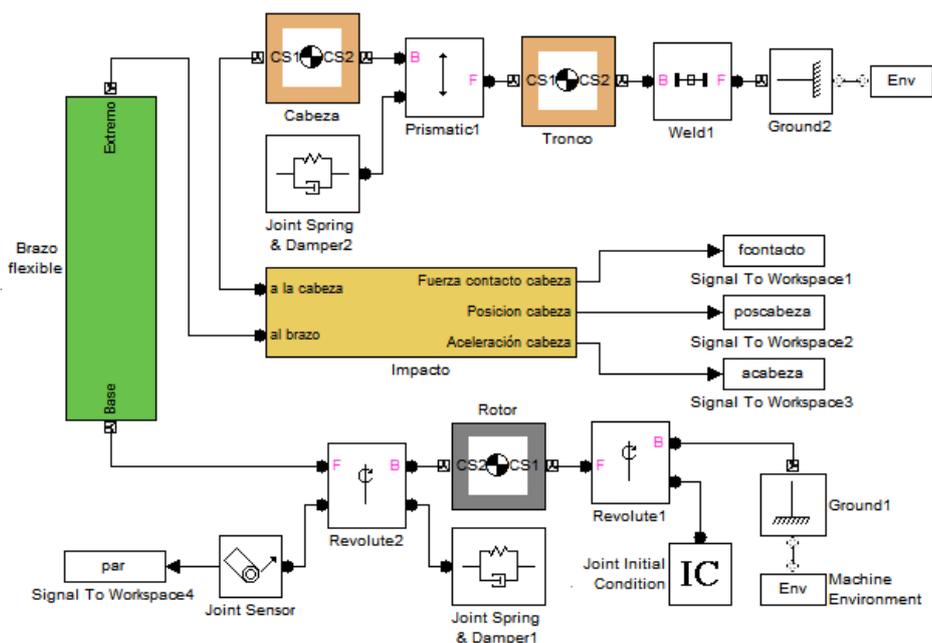


Figura 46. Modelo en Simulink para la simulación del impacto.

Los valores de los distintos parámetros del modelo se recogen en la tabla 16.

Tabla 16. Parámetros del modelo para la simulación del impacto.

Longitud del brazo	L=	0,6	m
Diámetro externo de la sección	D _{ext} =	0,150	m
Diámetro interno de la sección	D _{int} =	0,147	m
Densidad del aluminio	d=	2710	kg/m ³
Módulo de Young para el aluminio	E=	72·10 ⁹	N/m ²
Masa del brazo	m _{brazo} =	1,138	kg
Volumen del brazo	V=	4,199·10 ⁻⁴	m ³
Área de la sección	A=	6,998·10 ⁻⁴	m ²
Momento de inercia de área	I _{area} =	1,929·10 ⁻⁶	m ⁴
Momento de inercia másico en Z	I _Z =	0,037	kg·m ²
Momento de inercia másico en Z desde el extremo	I _{zz} =	3,478·10 ⁻⁴	kg·m ²
Momento de inercia a la salida de la reductora	I _{rotor} =	0,175	kg·m ²
Constante de rigidez de la reductora	K _{red} =	10 ⁶	N·m/rad
Constante de amortiguación de la reductora	D _{red} =	0	
Constante de rigidez del actuador	K _{arv} =	10 ⁶	N·m/rad
Constante de amortiguación del actuador	D _{arv} =	0	
Masa de la cabeza	m _{cabeza} =	5,09	kg
Constante de rigidez del cuello	K _{cuello} =	3300	N/m
Constante de rigidez de la cobertura	K _{cov} =	10 ⁶	N/m
Constante de amortiguación del cuello	D _{cuello} =	12	Ns/m
Constante de amortiguación de la cobertura	D _{cov} =	15	Ns/m
Velocidad angular inicial del rotor	V _{inicial} =	2	rad/s
<i>Para el brazo flexible:</i>			
Número de particiones	N _{part} =	30	
Longitud de cada partición	L _{part} =	0,02	m
Masa de cada partición	m _{part} =	0,038	kg
Momento de inercia másico en Z para cada partición	I _{Zcdg} =	1,058·10 ⁻⁴	kg·m ²
Constante de rigidez para cada partición	K _{part} =	6,945·10 ⁶	N·m/rad
Constante de amortiguación para cada partición	B _{part} =	0	

Algunos de estos valores son establecidos como constantes y otros se calculan a partir de esas constantes a través del mfile *Impatco_Datos*, el cual se puede consultar en el anexo, página 69.

El valor de la inercia a la salida de la reductora (0,175 kg·m²) es un valor estimado para este tipo de tarea, el cual se puede conseguir con el uso de un motor DC Maxon RE 40 (I=138 gcm²) y una reductora planetaria Maxon GP 52 C (I=9,3 gcm², reducción de 113:1), de manera que el par intermitente máximo a la salida de la reductora sería, según el catálogo de la reductora, de 45 Nm, del cual se puede estimar un par máximo puntual de 100 Nm. Esto es importante tenerlo en cuenta para saber qué par de los obtenidos en las siguientes simulaciones se consideraría admisible.

9.1. Contribución de los ARV en la dinámica del impacto

Para comprobar la contribución de los ARV en la dinámica del impacto, se variará su rigidez (K_{arv}) entre 10^2 y 10^6 , aumentando el exponente en una unidad en cada prueba. La evolución en el tiempo de la fuerza de contacto, aceleración de la cabeza y par a la salida de la reductora se muestran en las figuras 47, 48 y 49 respectivamente. Los máximos valores numéricos extraídos, junto con el cálculo del HIC, se recogen en la tabla 17.

Tabla 17. Contribución de la rigidez del actuador, K_{arv} .

K_{arv} (Nm/rad)	F (N)		Aceleración (m/s^2)		Par (N·m)	HIC
	pico 1	pico 2	pico 1	pico 2		
10^2	706,88	840,03	138,66	161,36	10,16	0,8518
10^3	706,99	760,74	138,68	146,40	32,14	0,6707
10^4	708,12	728,71	138,91	141,65	101,70	0,6298
10^5	720,05	582,89	141,24	113,48	320,89	0,7053
10^6	936,93	—	183,54	—	446,63	1,9243

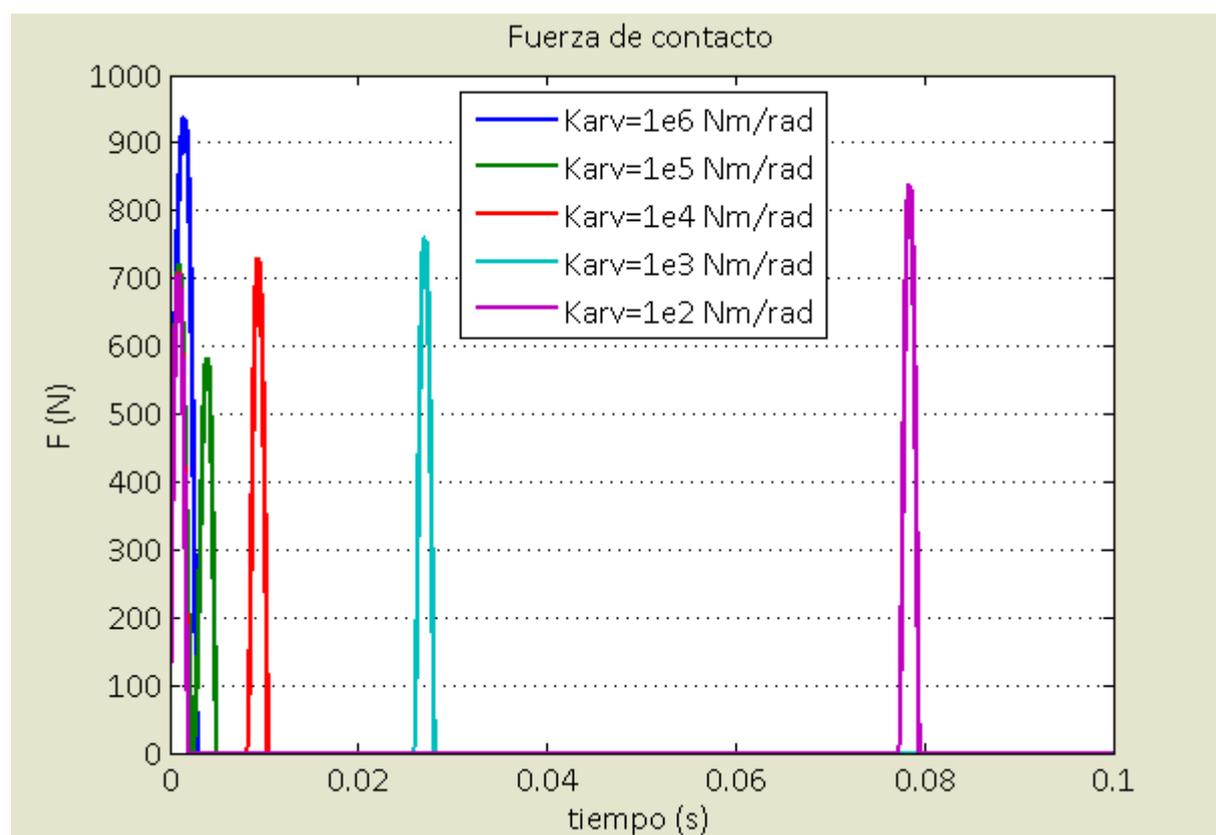


Figura 47. Fuerza de contacto para diferentes valores de la rigidez del ARV

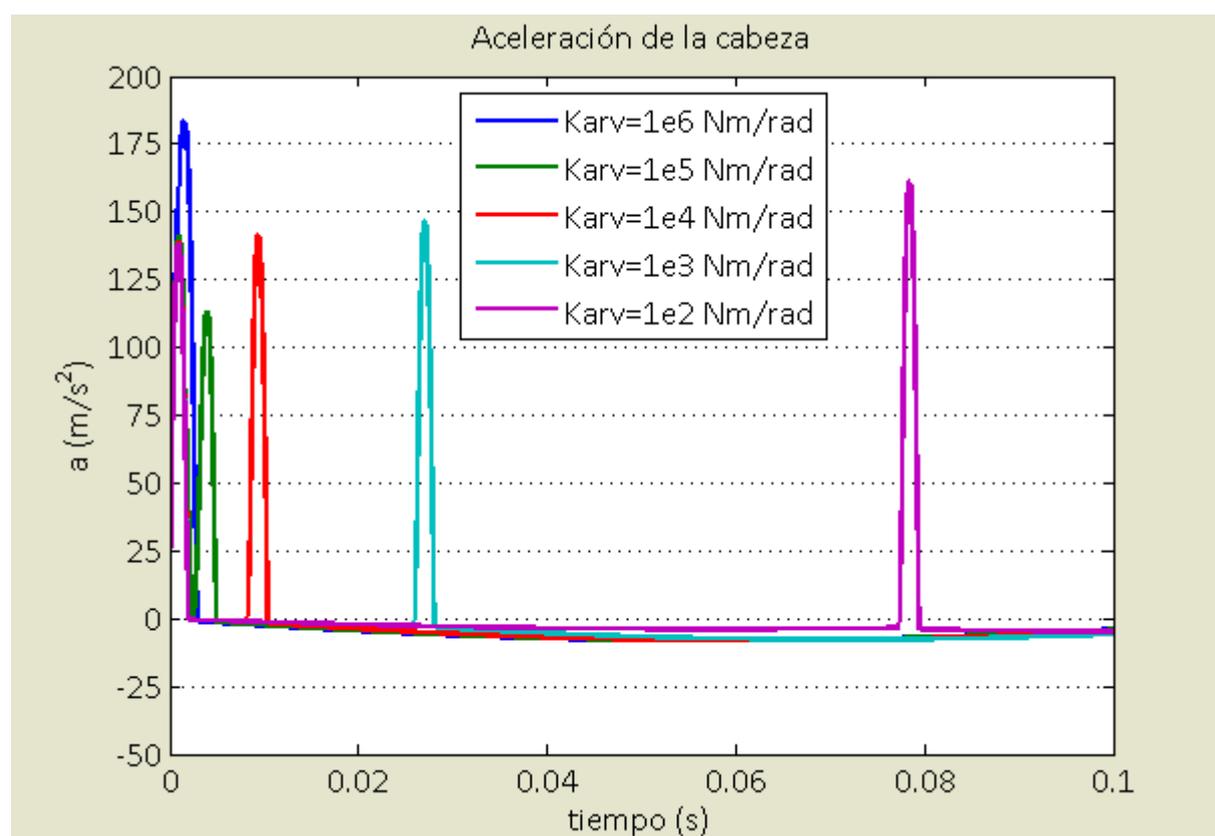


Figura 48. Aceleración adquirida por la cabeza tras el impacto para diferentes valores de la rigidez del ARV

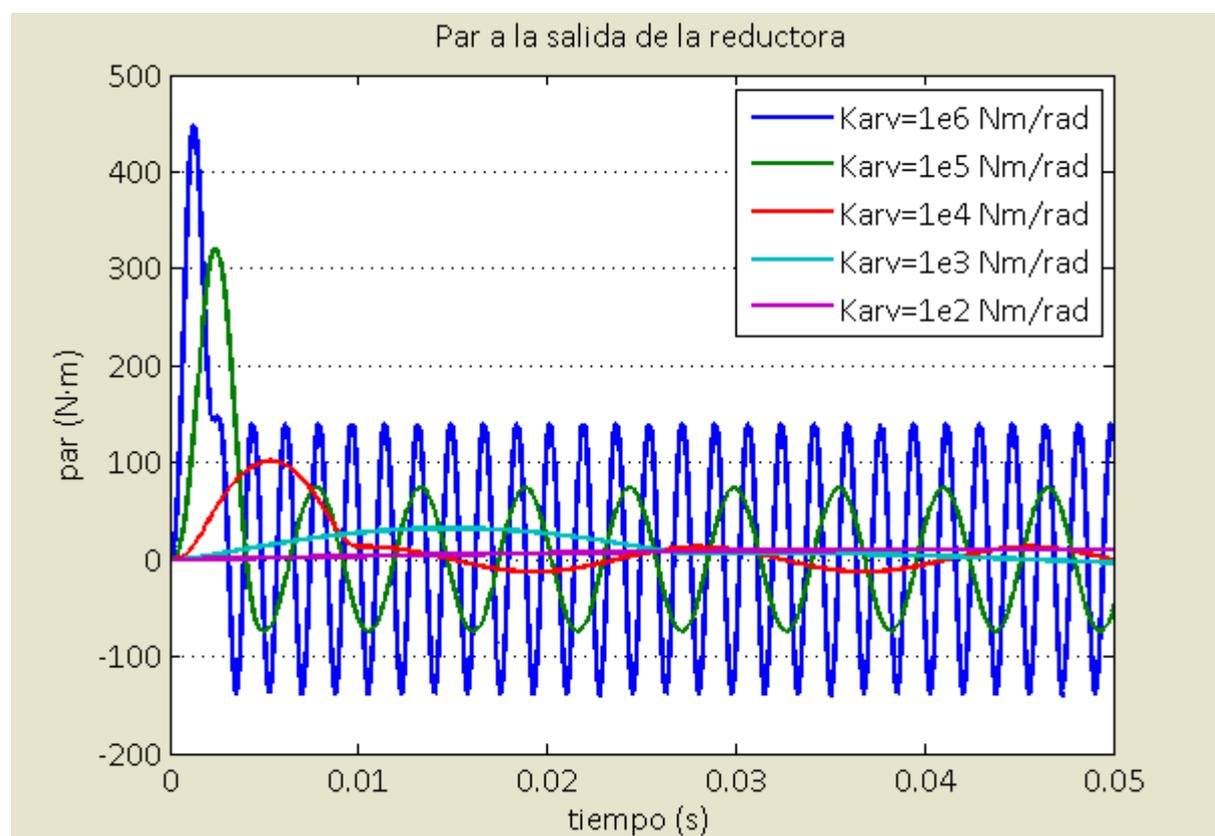


Figura 49. Par a la salida de la reductora para diferentes valores de la rigidez del ARV

Gracias a la representación gráfica de los resultados de la fuerza del impacto (figura 47), vemos cómo el comportamiento, que podíamos esperar de un único impacto, difiere de lo previsto. La inclusión de la flexibilidad aportada por el ARV (por debajo de $K_{arv}=10^6$, lo cual puede considerarse como rígido) hace que, tras el primer choque previsto, un segundo choque se produzca. Esto es debido al desacople parcial de la reductora, lo cual significa que cuando el brazo se detiene al encontrarse con un obstáculo, la inercia del rotor sigue transmitiéndose por un breve espacio de tiempo, lo suficiente como para que el brazo, tras impactar y ser repelido, adquiera de nuevo un movimiento que le hace impactar de nuevo.

Tal como se podía intuir, la fuerza se reduce cuanto menor es K_{arv} , lo cual se hace patente entre valores de K_{arv} de 10^6 y 10^5 (una reducción del 23%), pero no resulta significativo en el resto de valores (una reducción del 1,8% entre los casos en que $K_{arv}=10^5$ y $K_{arv}=10^2$). Pero si analizamos el segundo impacto, el efecto es el opuesto: al reducir la rigidez, la fuerza de este impacto aumenta en cada caso, llegando a ser mayor que el primero en la mayoría de ellos (en valores de $K_{arv}=10^4$ e inferior). El mismo patrón se reproduce con la aceleración (figura 48), y prácticamente igual con el HIC, el cual se reduce considerablemente entre los dos primeros casos (un 63,35%).

En cambio, en lo referente al par máximo (figura 49), éste se reduce conforme se reduce la rigidez. Del valor de $K_{arv}=10^6$ a $K_{arv}=10^5$ existe una disminución del 28,2%, mientras que entre los otros casos la disminución es prácticamente igual, de un 68,4% aproximadamente entre uno y su siguiente, por lo que el efecto del ARV si es notable para este parámetro.

De esto se puede extraer que la disminución de la rigidez de la articulación mediante un ARV no influye de manera destacable en la fuerza del impacto, pero sí en el par que se produce a la salida de la reductora, lo cual resulta beneficioso para la máquina.

9.2. Contribución de la cobertura en la dinámica del impacto

Para este caso, se ha variado la rigidez de la cobertura del eslabón, K_{cov} , entre 10^2 y 10^6 , donde $K_{cov}=10^6$ se considera sin cobertura, ya que este valor es la rigidez equivalente aproximada del cráneo de una persona. Los resultados se muestran en la tabla 18:

Tabla 18. Contribución de la rigidez de la cobertura, K_{cov} .

K_{cov} (Nm/rad)	F (N)	Aceleración (m/s ²)	Par (N·m)	HIC
10^2	18,00	3,54	11,89	0,00099
10^3	26,75	4,67	13,79	0,0076
10^4	92,57	17,42	36,31	0,0197
10^5	313,14	60,98	115,56	0,3422
10^6	936,93	183,54	446,63	1,9244

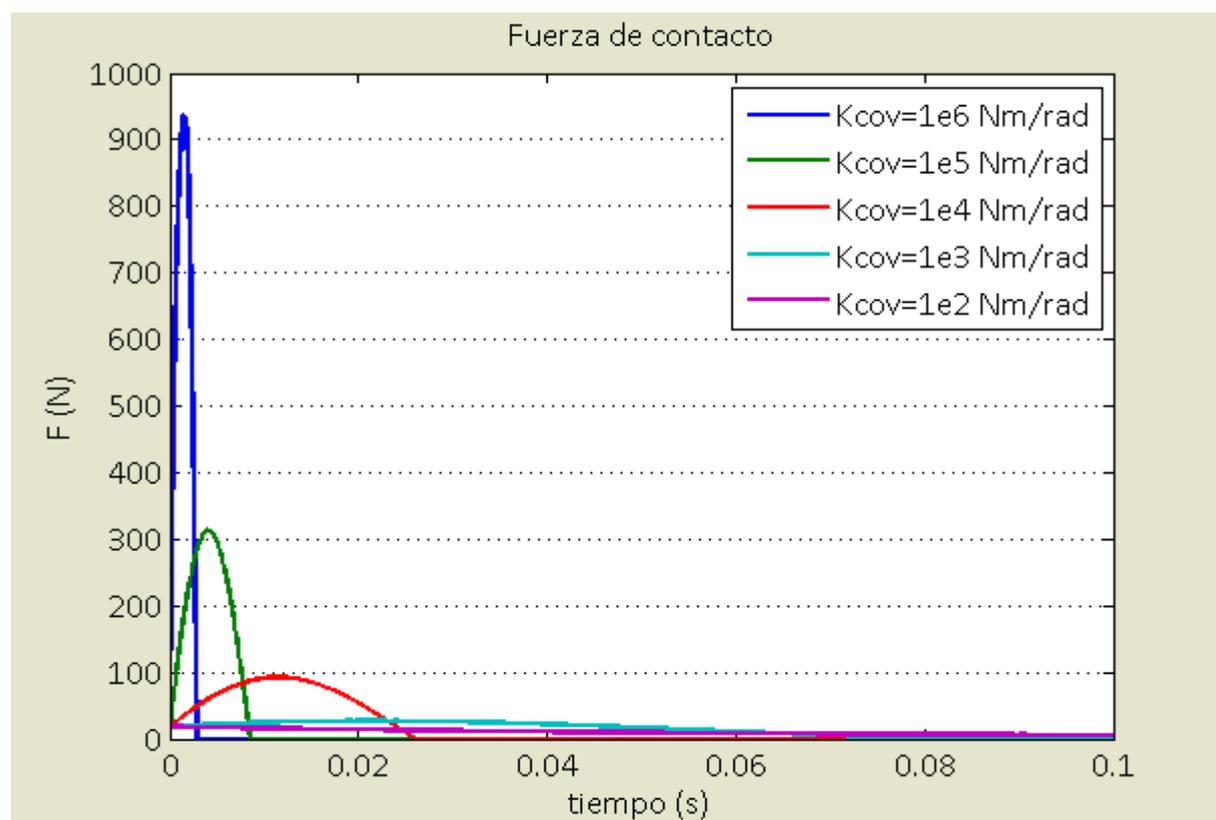


Figura 50. Fuerza de contacto para diferentes valores de la rigidez de la cobertura

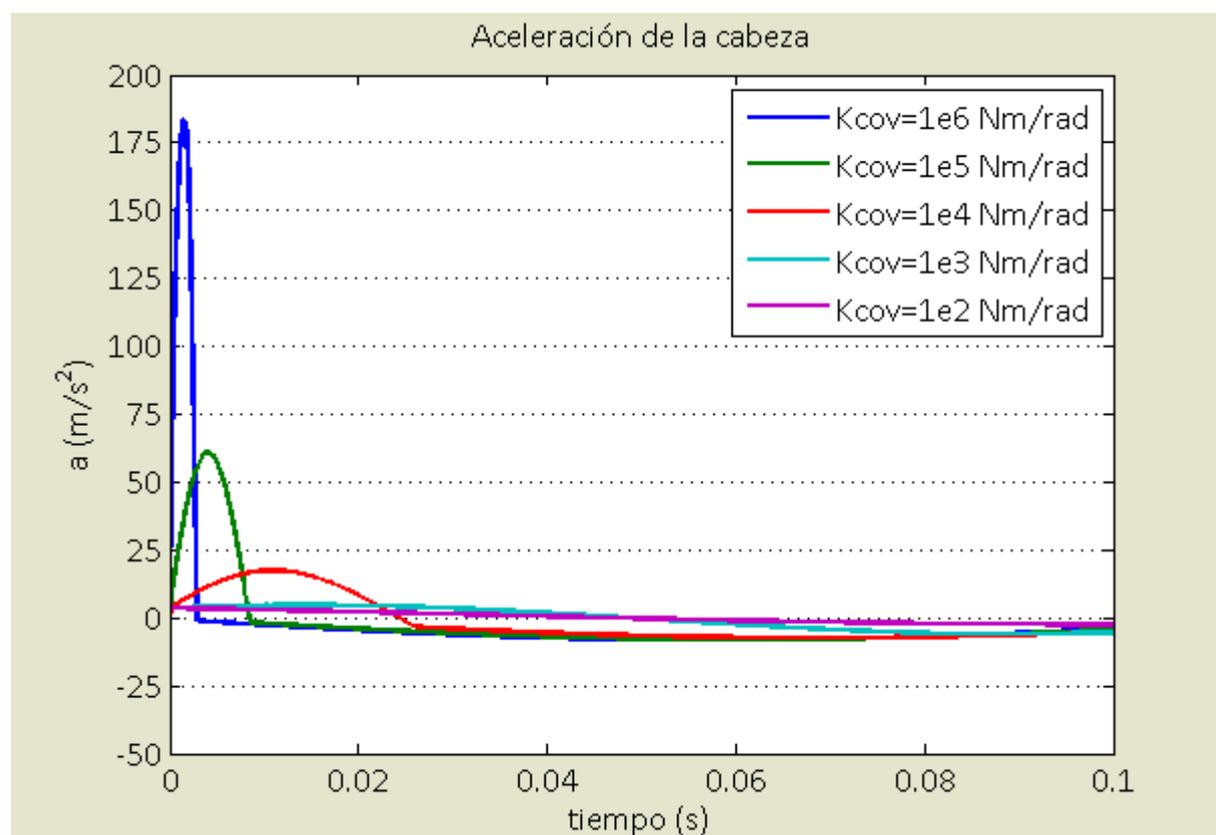


Figura 51. Aceleración adquirida por la cabeza tras el impacto para diferentes valores de la rigidez de la cobertura

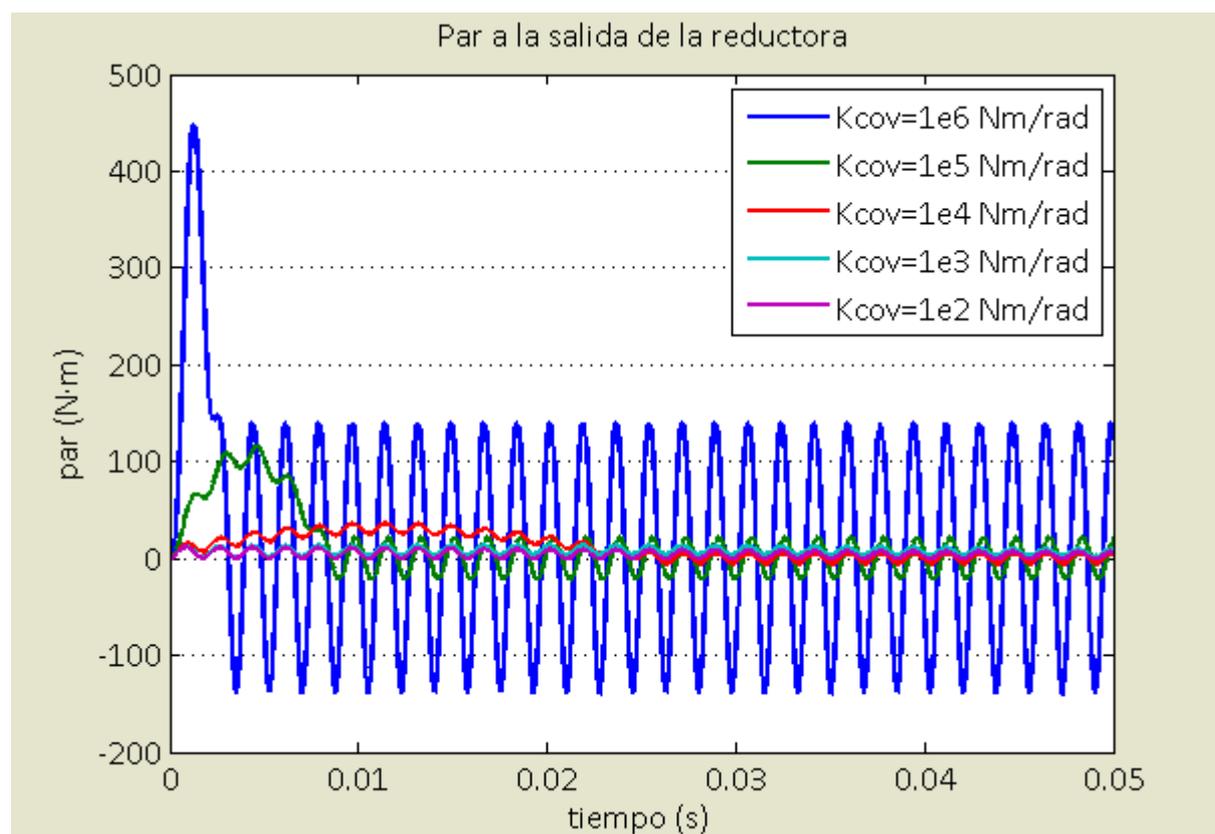


Figura 52. Par a la salida de la reductora para diferentes valores de la rigidez de la cobertura

Gracias a las gráficas se ve cómo, a diferencia del caso anterior en el que se varió la rigidez del ARV, variar la rigidez de la cobertura no produce la aparición de un segundo impacto. Además, en este caso, la fuerza del impacto disminuye conforme se reduce la rigidez. La disminución entre el caso más rígido y el siguiente es de un 66,58%, siendo para las disminuciones de rigidez sucesivas de un 70,44%, 71,1% y 32,71%. El caso de la aceleración es análogo al de la fuerza, así como lo es para el HIC, aunque con porcentajes de variación diferentes, incluso mayores.

El par máximo se ve afectado por la disminución de la rigidez de la cobertura de manera similar a como lo afectaba la rigidez del actuador. Entre el caso más rígido y su siguiente, la disminución es de un 74,13%, mientras que para los intervalos consecutivos las variaciones son del 68,58%, 62,02% y 13,78%. Aquí el menor cambio se produce para los valores más bajos de K_{cov} , mientras que los otros casos experimentan grandes variaciones, con valores similares.

Se aprecia con facilidad, gracias a estas simulaciones, que la cobertura de la que sea provisto el brazo robot es un factor que ayuda a reducir de manera importante la fuerza de un posible impacto, y por tanto ayudaría a reducir el posible daño causado por éste.

9.3. Contribución del material del eslabón de salida en la dinámica del impacto

Ya que el material del eslabón determina su flexibilidad, también se han realizado pruebas variando el módulo E, característico de cada material. Los valores escogidos son: 200 GPa (acero al carbono), 72 GPa (aluminio), 20 GPa (GFRP), 2,7 GPa (nylon) y 1,1 GPa (ABS). Los resultados aparecen en la tabla 19.

Tabla 19. Contribución del módulo de elasticidad, E.

E (GPa)	F (N)				Aceleración (m/s ²)				Par (N·m)
	pico 1	pico 2	pico 3	pico 4	pico 1	pico 2	pico 3	pico 4	
1,1	388,25	273,00	331,59	515,75	76,20	53,29	64,35	100,06	137,18
2,7	451,60	405,60	575,25	—	88,62	78,97	111,92	—	185,59
20	635,04	601,80	—	—	124,57	117,30	—	—	405,82
72	726,47	730,44	—	—	142,43	142,83	—	—	471,31
200	860,10	—	—	—	168,42	—	—	—	465,83

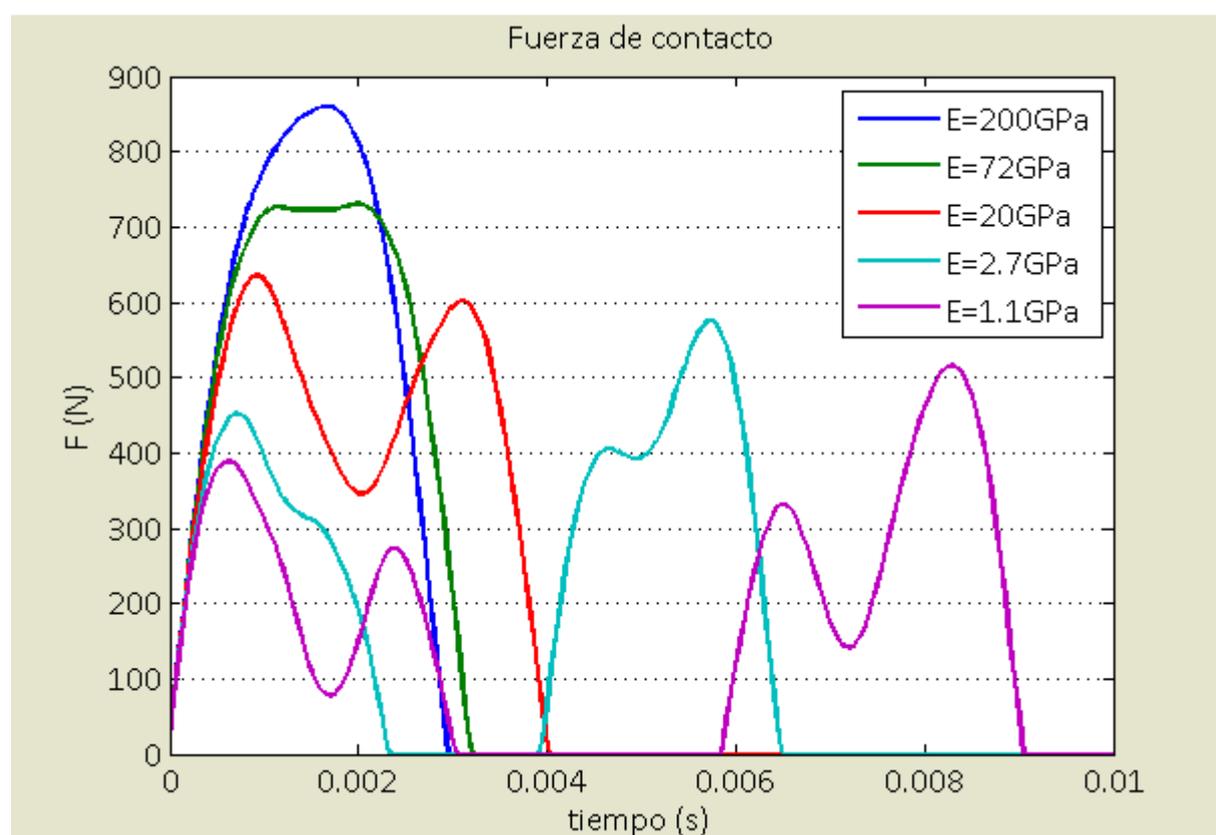


Figura 53. Fuerza de contacto para diferentes valores del módulo de elasticidad

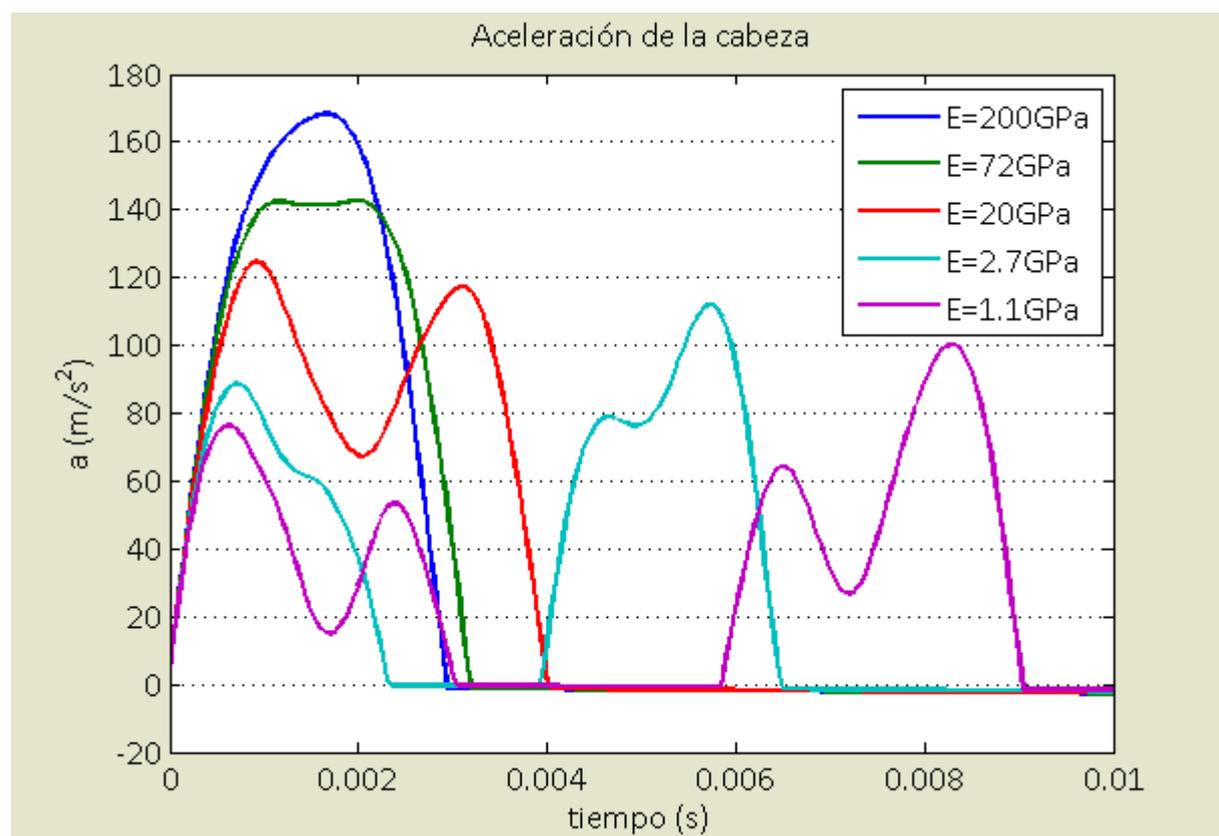


Figura 54. Aceleración adquirida por la cabeza tras el impacto para diferentes valores de módulo de elasticidad

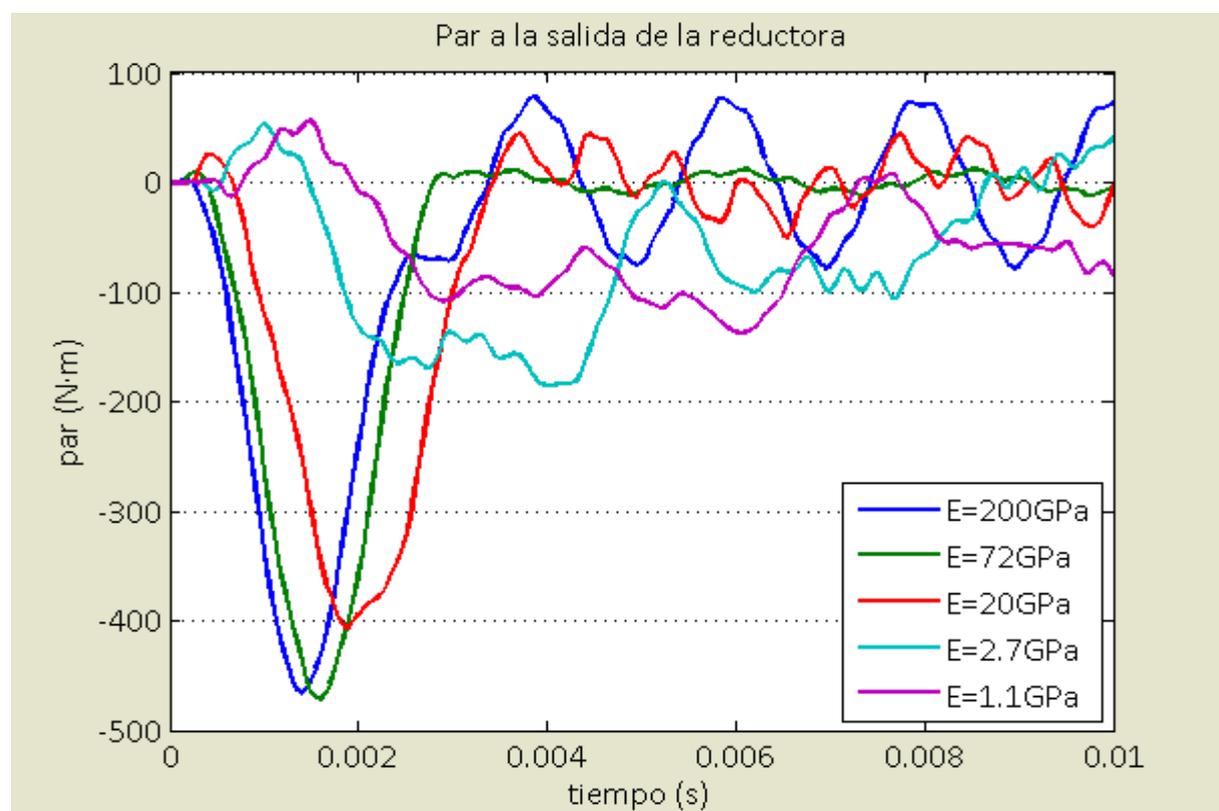


Figura 55. Par a la salida de la reductora para diferentes valores del módulo de elasticidad

Los resultados indican un comportamiento parecido al observado al variar K_{arv} , en cuanto a que se produce un segundo impacto mayor que el primero conforme se reduce la rigidez. La diferencia existe en que no solo hay un segundo impacto, si no que en los casos con menor rigidez existen más impactos. Aunque estos impactos posteriores sean mayores que el primero de ellos, el cambio de material a otro más flexible consigue reducir la fuerza del impacto (una media de un 12% entre cada caso consecutivo). El caso de la aceleración es análogo a éste.

El par máximo también se ve afectado por el cambio de material del eslabón. Al reducir la rigidez cambiando de un acero al aluminio, el efecto es el opuesto y el par aumenta, aunque de una manera bastante leve. A partir de aquí, el reducir el módulo E el par disminuye, de una manera notable sobre todo entre los valores de $E=20$ GPa y $E=2,7$ GPa.

Se puede concluir que la reducción de la rigidez del material que constituye el eslabón reduce la fuerza del impacto por encima de lo que puede reducirlo el actuador de rigidez variable, pero no tan efectiva como el uso de una cobertura óptima.

Capítulo 10.

Conclusiones

El objetivo de este estudio se estableció en la comprobación del efecto de los actuadores de rigidez variable en la fuerza de impacto de un choque entre el brazo robot y una persona. Para ello se propuso el uso del software Matlab y, más concretamente, su herramienta Simulink. Con este software se hizo posible modelar el sistema que compone el brazo robot: motor, reductora, ARV y eslabón de salida. Se analizó el uso de un eslabón flexible, el cual se modeló en su totalidad, y se comparó con otros modelos de eslabón flexible, entre los cuales se escogió el más óptimo.

A parte, se modeló en detalle uno de los actuadores prototipo existente, el AwAS, con el cual se comprobó el adecuado funcionamiento de Simulink y su similitud con los resultados experimentales del actuador.

Se pasó a crear un modelo para la cabeza de la persona y el bloque dedicado a la representación del impacto. Con ello y el modelo de brazo robot, el modelo para la simulación del impacto estaba completo y con él se realizaron diferentes pruebas con las que determinar la influencia de diferentes parámetros en las consecuencias del impacto (rigidez del ARV, de la cobertura y del material del eslabón de salida).

A partir de los resultados de las pruebas realizadas, se puede concluir que el actuador de rigidez variable no consigue disminuir en la cantidad deseada la fuerza del impacto, debido principalmente a la aparición de un segundo impacto que supera en valor al primero. Pese a esto, el par a la salida de la reductora si consigue reducirse, lo cual significa mayor seguridad para la máquina. Por otro lado, el material del que se componga el eslabón de salida presenta mayor influencia en la fuerza del impacto, reduciéndola en mayor medida que el ARV, aunque, en lo que concierne a la reducción par, el ARV es más efectivo.

Las simulaciones en las que la rigidez de la cobertura es el objeto de análisis demuestran que es este parámetro el que mayor influencia tiene en la reducción tanto de la fuerza de impacto como en el par en la reductora, revelando que este elemento es muy importante para garantizar la seguridad de aquellos que trabajen cerca de un brazo robot.

Con este documento se ha pretendido examinar la influencia de los actuadores de rigidez variable que actualmente están en desarrollo. Debido a la naturaleza experimental que aún mantienen estos mecanismo, es de esperar mayores avances en este campo aplicado a la robótica gracias a los diversos organismos que lo investigan, en los que se puede incluir la propia Universidad de Almería. Es por ello que este campo

sigue en pleno desarrollo y en un futuro cercano podremos ver nuevos modelos de actuadores que consigan aumentar la flexibilidad de las articulaciones de los brazos robot y con ello crear mayor seguridad en los entornos en los que robots y personas trabajen conjuntamente.

Bibliografía

- [1] J. Versace, "A review of the severity index," in *Proc. 15th Stapp Car Crash Conf.*, 1971, New York, pp. 771–796.]
- [2] 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.
- [3] D. Gao and C. W. Wampler, "Head injury criterion," *IEEE Robotics and Automation Magazine*, vol. 16, pp. 71-74, 2009
- [4] S. Haddadin, A. Albu-Schaffer, G. Hirzinger, "Safety evaluation of physical human-robot interaction via crash-testing," *Proc. Robotics: Science and System (RSS)*, pp. 217-224, 2007.
- [5] http://www.robotics.org/content-detail.cfm/Industrial-Robotics-Feature-Article/New-ISO-Robot-Safety-Standards-Published!/content_id/2945
- [6] A. Pratt, M.M. Williamson, "Series elastic actuators", *IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 1, pp. 399-406. 1995
- [7] S. A. Migliore, E. A. Brown and S.P. DeWeerth, "Biologically inspired joint stiffness control," *Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation (ICRA'05)*, pp. 4519-4524, 2005
- [8] V. R. Ham, T. G. Sugar, B. Vanderborght, K. W. Hollander and D. Lefeber, "Compliant actuator designs: Review of actuators with passive adjustable compliance/controllable stiffness for robotic applications," *IEEE Robotics and Automation Magazine*, vol. 16, pp. 81-94, 2009
- [9] Schiavi, R.; Grioli, G.; Sen, S.; Bicchi, A.; , "VSA-II: a novel prototype of variable stiffness actuator for safe and performing robots interacting with humans," *Robotics and Automation*, 2008. *ICRA 2008. IEEE International Conference on* , vol., no., pp.2171-2176, 19-23 May 2008
- [10] C.-P. Chou and B. Hannaford, "Measurement and modeling of mckibben pneumatic artificial muscles," *IEEE Trans. Robotics and Automation*, vol. 12, no. 1, pp. 90–102, 1996
- [11] B. Verrelst, R. Van Ham, B. Vanderborght, F. Daerden, and D. Lefeber, "The pneumatic biped LUCY actuated with pleated pneumatic artificial muscles," *Autonom. Robots*, vol. 18, no. 13, pp. 201–213, 2005

- [12] K. Hollander and T. Sugar, "Concepts for compliant actuation in wearable robotic systems," in *Proc. US-Korea Conf. Science, Technology and Entrepreneurship (UKC'04)*, 2004, vol. 128, pp. 644–650
- [13] T. Morita and S. Sugano, "Development of a new robot joint using a mechanical impedance adjuster," in *Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation (ICRA'95)*, May 1995, vol. 3, pp. 2469–2475
- [14] T. Morita and S. Sugano, "Development of an anthropomorphic force-controlled manipulator wam-10," in *Proc. 8th Int. Conf. Advanced Robotics (ICAR'97)*, 1997, pp. 701–706
- [15] R. Van Ham, M. Van Damme, B. Verrelst, B. Vanderborght, and D. Lefeber, "MACCEPA, the mechanically adjustable compliance and controllable equilibrium position actuator: A 3DOF joint with 2 independent compliances," *Int. Appl. Mech.*, vol. 4, pp. 130–142, Apr. 2007
- [16] S. Wolf and G. Hirzinger, "A new variable stiffness design: Matching requirements of the next robot generation," in *accepted at ICRA 2008: IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA2008)*, 2008
- [17] D. Hyun, H. S. Yang, J. Park, Y. Shim, "Variable stiffness mechanism for human-friendly robots", *Mechanism and Machine Theory* 45, 880-897 (2010)
- [18] Jafari, A.; Tsagarakis, N.G.; Vanderborght, B.; Caldwell, D.G.; , "A novel actuator with adjustable stiffness (AwAS)," *Intelligent Robots and Systems (IROS), 2010 IEEE/RSJ International Conference on* , vol., no., pp.4201-4206, 18-22 Oct. 2010
- [19] Jafari, A.; Tsagarakis, N.G.; Caldwell, D.G.; , "AwAS-II: A new Actuator with Adjustable Stiffness based on the novel principle of adaptable pivot point and variable lever ratio," *Robotics and Automation (ICRA), 2011 IEEE International Conference on* , vol., no., pp.4638-4643, 9-13 May 2011
- [20] <http://www.mathworks.es/>
- [21] V. Chudnovsky, A. Mukherjee, J. Wendlandt, D. Kennedy, "Modeling Flexible Bodies in SimMechanics", <http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/11027>, 2006
- [22] Thorby, Douglas, "Dynamics and vibration in practice: An Engineering handbook", Butterworth-Heinemann, 2008

Anexo

Archivos .m utilizados

Awaw_comprobación.m

```
clear all
clc

%Datos:
r=0.01;      %Radio externo del muelle (m) (aproximación)
teta=0;     %Ángulo entre el eslabón intermedio y el de salida (rad)

%Cálculos:
Kx=[0.01:0.01:0.09];
for i=1:9
    for j=1:4
        Ks=50000*j;
        R=0.01*i;
        K(i,j)=2*Ks*((R^2)+(r^2)/3)*(2*(cos(teta)^2)-1);
    end
end
K

Mx=[50:50:200];
for i=1:4
    for j=1:6
        Ks=50000*i;
        R=0.03+(0.01*j);
        M(i,j)=2*Ks*((R^2)+(r^2)/3)*(2*(cos(teta)^2)-1);
    end
end
M

subplot(2,1,1)
plot(Kx,K)
subplot(2,1,2)
plot(Mx,M)
```

Awaw_datos.m

```
% VALORES APROXIMADOS DEL ACTUADOR AWAS
clear all
clc
%Datos a introducir

%para cuerpos cuya masa no se desprecia
masacero=0.01;      % kg
desp=1e-10;
ineriacero=desp*eye(3); % kg*m2

%Motor principal
MasaRotor1=0.3;      % kg
InerciaRotor1=2e-5; % kg*m2 (Inercia antes de la reductora)
```

```
InerciaRotor1=[desp 0 0; 0 desp 0; 0 0 InerciaRotor1];
i1=7; % relación de transmisión
RadioPinon1=5; % mm
RadioRueda1=RadioPinon1*i1; % mm
i2=7; % relación de transmisión
RadioPinon2=5; % mm
RadioRueda2=RadioPinon2*i2; % mm
Disteje1=RadioPinon1+RadioRueda1; % mm
Disteje2=RadioPinon2+RadioRueda2; % mm
if Disteje1~=Disteje2
    disp('ERROR. debe cumplirse que Disteje1=Disteje2')
    pause
else
    Distejes=Disteje1;
end

%Eslabón intermedio
MasaLinkInt=0.08; %kg
InerciaLinkInt=[4.24e-6 0 0; 0 7.28e-5 0; 0 0 7.28e-5]; % kg.m2
LongLinkInt=0.1; % m

%Motor control rigidez
MasaMotor2=0.03; % kg
InerciaRotor2=1.75e-4; % kg*m2 (Inercia a la salida de la reductora)
InerciaRotor2=[InerciaRotor2 0 0; 0 desp 0; 0 0 desp]; % kg*m2
MasaBallscrew=0.06; % kg
InerciaBallscrew=[8e-7 0 0; 0 5e-5 0; 0 0 5e-5]; % kg*m2
MasaTotal=MasaMotor2+MasaBallscrew;
InerciaTotal=InerciaRotor2+InerciaBallscrew;
MasaNut=0.15; % kg masa ball screw nut

%Resorte
LongResorte=0.035; % m
k=300000; % Nm (rigidez de ambos resortes sumados)
b=2.5; % Ns/m

%Eslabón principal
MasaLink=0.4; % kg
InerciaLink=[3e-5 0 0; 0 3e-3 0; 0 0 3e-3]; % kg*m2
LongLink=0.3; % m

%masa EE
MasaExt=0; %kg
InerciaExt=inerciacerro;

% CABEZA + CUELLO + cobertura
global mcabeza Kneck Dneck Kcov Dcov

mcabeza=5.09; % kg
Kneck=3300; % N/m
Kcov=1500; % N/m
Bneck=12; % Ns/m
Bcov=15; % Ns/m
Rcabeza=0.125; % m

CalcHIC36ok.m

aceleraciones=acabeza(:,1);
```

```

t=tout;
g_aceleraciones=aceleraciones/9.81;

a=g_aceleraciones;

v = cumtrapz(t,abs(a));

n = length(a);
HIC36 = -inf;
for it = 1:2:n-1
    for jt = it+1:2:n
        if (t(jt)-t(it))<0.036
            h = (t(jt)-t(it))*((v(jt)-v(it))/(t(jt)-t(it)))^2.5;
            if h > HIC36
                HIC36 = h;
                t1=t(it);
                t2=t(jt);
            end
        else
            break
        end
    end
end
end

t1
t2
HIC36

```

Flexible_Datos.m

```

%DATOS DEL ESLABÓN RÍGIDO
clear all
clc
%Datos a introducir
Dext=0.15;
Dint=0.146;
Rext=Dext/2;           %Radio externo (m)
Rint=Dint/2;          %Radio interno (m)
L=1;                  %Longitud (m)
dens=26600/9.81;      %Densidad del aluminio (kg/m3)
E=72e6;               %72e9 Módulo de Young para el aluminio (N/m2)
F=10;                 %Fuerza aplicada en el extremo (N)

%Datos calculados
Area=pi*((Rext-Rint)^2);           %Área de la sección (m2)
Iarea=(pi*(Rext^4-Rint^4))/4;      %Momento de inercia de área (m4)
vol=(pi*(Rext^2-Rint^2))*L;        %Volumen (m3)
m=vol*dens;                        %Masa (kg)
Ix=(m/4)*((Rext^2+Rint^2)+(L^2)/3); %Momento de inercia másico en X
(kg*m2)
%Ix=(m/48)*(3*(Dext^2+Dint^2)+4*L^2)
Ixsteiner=Ix+m*(L/2)^2;
Iy=Ix;                             %Momento de inercia másico en Y
(kg*m2)
Iz=(m*(Rext^2+Rint^2))/2;          %Momento de inercia másico en Z
(kg*m2)
deforml=(F*(L^3))/(3*E*Iarea)      %Flecha en el extremo (m)
despreciando el peso propio

```

```

Wpp=m*9.81/L; %Carga/unidad de longitud (peso propio)
deform2pp=Wpp*L^4/(8*E*Iarea) %Flecha en el extremo (m) debida al peso propio (p993 Shigley)
deform=deform1+deform2pp

%DATOS DE LAS PARTICIONES DEL ESLABÓN RÍGIDO
%Datos a introducir
Npart=10 %Número de particiones
Lpart=L/Npart; %Longitud de cada partición (m)

%Datos calculados
mpart=m/Npart; %Masa de cada partición (kg)
Ixp=(mpart/4)*((Rext^2+Rint^2)+((Lpart^2)/3)); %Momento de inercia másico en X de cada partición (kg*m2)
Iyp=Ixp; %Momento de inercia másico en Y de cada partición (kg*m2)
Izp=(mpart*(Rext^2+Rint^2))/2; %Momento de inercia másico en Z de cada partición (kg*m2)

Kpart=(E*Iarea)/Lpart; %Constante de resorte equivalente de cada partición (N/m)
Bpart=30; %Constante de amortiguación de cada partición

%CÁLCULO DE CICLOS
BL1=1.87510; %raiz primera de la ecuación característica de vibración de una viga empotrada
beta=BL1/L;
frecuenciaNat=beta^2*sqrt(E*Iarea/(m/L)) %Frecuencia natural de una viga empotrada (Hz)
Herz=2*pi/frecuenciaNat; %Periodo (s)
ciclos1segundos=1/Herz %Ciclos de vibración por segundo (rad/s)
ciclos5segundos=5/Herz %Ciclos de vibración cada 5 segundos

%DATOS EXTRA PARA COMPARAR LOS 3 MODELOS DE BRAZO FLEXIBLE
Ixp2=((mpart/2)/4)*((Rext^2+Rint^2)+((Lpart^2/2))/3); %Momento de inercia másico en X de cada partición (kg*m2)
Iyp2=Ixp2; %Momento de inercia másico en Y de cada partición (kg*m2)
Izp2=((mpart/2)*(Rext^2+Rint^2))/2; %Momento de inercia másico en Z de cada partición (kg*m2)

grafSimm_FLEX_E.m

%GRÁFICAS DE FUERZA, ACELERACIÓN Y PAR CON ESLABÓN FLEXIBLE
%VARIANDO MÓDULO E
clc
clear all

Impacto_DatosHyun %llama al fichero de datos
tsim=0.1;
Karv=1e6;
Kcov=1e6;

E=200e9;
sim Impacto_unico_final_FLEX
F1=fcontacto;

```

```
A1=acabeza;
P1=par;
T1=tout;
CalcHIC36ok

E=72e9;
sim Impacto_unico_final_FLEX
F2=fcontacto;
A2=acabeza;
P2=par;
T2=tout;
CalcHIC36ok

E=20e9;
sim Impacto_unico_final_FLEX
F3=fcontacto;
A3=acabeza;
P3=par;
T3=tout;
CalcHIC36ok

E=2.7e9;
sim Impacto_unico_final_FLEX
F4=fcontacto;
A4=acabeza;
P4=par;
T4=tout;
CalcHIC36ok

E=1.1e9;
sim Impacto_unico_final_FLEX
F5=fcontacto;
A5=acabeza;
P5=par;
T5=tout;
CalcHIC36ok

figure
hold all
title 'Fuerza de contacto'
xlabel 'tiempo (s)'
ylabel 'F (N)'
plot(T1,F1(:,1))
plot(T2,F2(:,1))
plot(T3,F3(:,1))
plot(T4,F4(:,1))
plot(T5,F5(:,1))
legend('E=200 Gpa (Acero al carbono)', 'E=72 Gpa (Aluminio)', 'E=20 Gpa (GFRP)', 'E=2,7 GPa (Nylon)', 'E=1,1 Gpa (ABS)')
```

grafSimm_FLEX_Karv.m

```
%GRÁFICAS DE FUERZA, ACELERACIÓN Y PAR CON ESLABÓN FLEXIBLE
%VARIANDO Karv
clc
clear all

Impacto_DatosHyun
```

```
tsim=0.1;
Kcov=1e6;

Karv=1e6
sim Impacto_unico_final_FLEX
F1=fcontacto;
A1=acabeza;
P1=par;
T1=tout;
CalcHIC36ok

Karv=1e5
sim Impacto_unico_final_FLEX
F2=fcontacto;
A2=acabeza;
P2=par;
T2=tout;
CalcHIC36ok

Karv=1e4
sim Impacto_unico_final_FLEX
F3=fcontacto;
A3=acabeza;
P3=par;
T3=tout;
CalcHIC36ok

Karv=1e3
sim Impacto_unico_final_FLEX
F4=fcontacto;
A4=acabeza;
P4=par;
T4=tout;
CalcHIC36ok

Karv=1e2
sim Impacto_unico_final_FLEX
F5=fcontacto;
A5=acabeza;
P5=par;
T5=tout;
CalcHIC36ok

figure
hold all
title 'Fuerza de contacto'
xlabel 'tiempo (s)'
ylabel 'F (N)'
plot(T1,F1(:,1))
plot(T2,F2(:,1))
plot(T3,F3(:,1))
plot(T4,F4(:,1))
plot(T5,F5(:,1))
legend('Karv=1e6 Nm/rad','Karv=1e5 Nm/rad','Karv=1e4 Nm/rad','Karv=1e3 Nm/rad','Karv=1e2 Nm/rad')

figure
hold all
title 'Aceleración de la cabeza'
xlabel 'tiempo (s)'
```

```
ylabel 'a (N)'  
plot(T1,A1(:,1))  
plot(T2,A2(:,1))  
plot(T3,A3(:,1))  
plot(T4,A4(:,1))  
plot(T5,A5(:,1))  
legend('Karv=1e6 Nm/rad','Karv=1e5 Nm/rad','Karv=1e4 Nm/rad','Karv=1e3  
Nm/rad','Karv=1e2 Nm/rad')
```

```
figure  
hold all  
title 'Par a la salida del rotor'  
xlabel 'tiempo (s)'  
ylabel 'par (N)'  
plot(T1,P1(:,1))  
plot(T2,P2(:,1))  
plot(T3,P3(:,1))  
plot(T4,P4(:,1))  
plot(T5,P5(:,1))  
legend('Karv=1e6 Nm/rad','Karv=1e5 Nm/rad','Karv=1e4 Nm/rad','Karv=1e3  
Nm/rad','Karv=1e2 Nm/rad')
```

grafSimm_FLEX_Kcov.m

```
%GRÁFICAS DE FUERZA, ACELERACIÓN Y PAR CON ESLABÓN FLEXIBLE
```

```
%VARIANDO Kcov
```

```
clc  
clear all
```

```
Impacto_DatosHyun  
tsim=0.01;  
Karv=1e6;  
E=72e9;
```

```
Kcov=1e6  
sim Impacto_unico_final_FLEX  
F1=fcontacto;  
A1=acabeza;  
P1=par;  
T1=tout;  
CalcHIC36ok
```

```
Kcov=1e5  
sim Impacto_unico_final_FLEX  
F2=fcontacto;  
A2=acabeza;  
P2=par;  
T2=tout;  
CalcHIC36ok
```

```
Kcov=1e4  
sim Impacto_unico_final_FLEX  
F3=fcontacto;  
A3=acabeza;  
P3=par;  
T3=tout;  
CalcHIC36ok
```

```
Kcov=1e3
```

```
sim Impacto_unico_final_FLEX
F4=fcontacto;
A4=acabeza;
P4=par;
T4=tout;
CalcHIC36ok

Kcov=1e2
sim Impacto_unico_final_FLEX
F5=fcontacto;
A5=acabeza;
P5=par;
T5=tout;
CalcHIC36ok

figure
hold all
title 'Fuerza de contacto'
xlabel 'tiempo (s)'
ylabel 'F (N)'
plot(T1,F1(:,1))
plot(T2,F2(:,1))
plot(T3,F3(:,1))
plot(T4,F4(:,1))
plot(T5,F5(:,1))
legend('Kcov=1e6 Nm/rad','Kcov=1e5 Nm/rad','Kcov=1e4 Nm/rad','Kcov=1e3
Nm/rad','Kcov=1e2 Nm/rad')

figure
hold all
title 'Aceleración de la cabeza'
xlabel 'tiempo (s)'
ylabel 'a (N)'
plot(T1,A1(:,1))
plot(T2,A2(:,1))
plot(T3,A3(:,1))
plot(T4,A4(:,1))
plot(T5,A5(:,1))
legend('Kcov=1e6 Nm/rad','Kcov=1e5 Nm/rad','Kcov=1e4 Nm/rad','Kcov=1e3
Nm/rad','Kcov=1e2 Nm/rad')

figure
hold all
title 'Par a la salida del rotor'
xlabel 'tiempo (s)'
ylabel 'par (N)'
plot(T1,P1(:,1))
plot(T2,P2(:,1))
plot(T3,P3(:,1))
plot(T4,P4(:,1))
plot(T5,P5(:,1))
legend('Kcov=1e6 Nm/rad','Kcov=1e5 Nm/rad','Kcov=1e4 Nm/rad','Kcov=1e3
Nm/rad','Kcov=1e2 Nm/rad')
```

Impacto_Datos.m

```
%DATOS BARRA
global E Iz Iseccion L m F1 F2 xp g Dff
```

```
%-----  
%INTRO DATOS TUBO HUECO  
L=0.6; % longitud m  
Dext=0.150; % m  
Dint=0.147; % m  
densidad=2710; % kg/m^3  
%-----  
Area=3.1416*(Dext^2-Dint^2)/4;  
Iseccion=3.1416*(Dext^4-Dint^4)/64; % m^4  
Volumen= Area*L; % m^3  
m=densidad*Volumen; % kg  
Izcdg=(m/48)*(3*(Dext^2+Dint^2)+4*L^2); % inercia respecto al c.d.g. (tubo  
hueco)  
Iz=Izcdg+m*(L/2)^2; % inercia respecto del extremo (kg*m2)  
%-----  
E=72e9; % aluminio 72e9  
Dff=0; % amortiguamiento de la barra  
  
% ACTUADOR + ARV  
global Irotor Kred Dred Karv Darv MasaRotor1  
  
Irotor= 0.175; % kg*m2  
Kred= 1000000; % Nm/rad  
Dred= 0;  
Karv= 1000000; % Nm/rad (de 100 a 100000)  
Darv= 0;  
  
% CABEZA + CUELLO + cobertura  
global mcabeza Kneck Dneck Kcov Dcov  
  
mcabeza=5.09; % kg  
Kneck=3300; % N/m  
Kcov=1000000; % N/m  
Dneck=12; % Ns/m  
Dcov=15; % Ns/m  
  
vinicial=2; % rad/s  
tsim=1; % s  
  
% ESLABÓN FLEXIBLE  
Npart=30;  
Lpart=L/Npart;  
mpart=m/Npart;  
Izcdgpart=(mpart/48)*(3*(Dext^2+Dint^2)+4*Lpart^2);  
Kpart=(E*Iseccion)/Lpart;  
Bpart=0;
```

