

# 1. INTRODUCCIÓN

## 1.1 Motivación

Aparecen muchos artículos en la literatura sobre la optimización de suspensiones pasivas, semi-activas y activas para proporcionar una mejora en la calidad del traqueteo y de la adherencia. Este interés en suspensiones mejoradas y optimizadas ha ido creciendo no solo en la comunidad académica sino que también entre los fabricantes de vehículos.

Últimamente los sistemas de suspensión hidroneumática se utilizan más a menudo debido a las ventajas que ofrecen frente a otros sistemas convencionales:

- Las suspensiones hidroneumáticas permiten tener carreras mayores de la suspensión.
- Un cilindro de suspensión hidroneumática puede integrar en el mismo elemento el mecanismo amortiguador y el resorte correspondiente a un sistema de suspensión. Normalmente cargados con nitrógeno, permiten mantener la elongación de reposo ante posibles cambios de la carga estática si se le incorpora un dispositivo regulador de presión.
- La rigidez dinámica no es constante, varía con la carrera.

Precisamente la profundización en el estudio de estas ventajas son las que han conducido a la elaboración de esta Tesis Doctoral, donde se pretende estudiar la suspensión neumática y su fenomenología únicamente, sin tener en cuenta el elemento amortiguador que complementa la suspensión de un vehículo.

Es de especial interés el estudio del comportamiento asimétrico de la suspensión neumática en la compresión y en la expansión. En la carrera de compresión, cuando el vehículo encuentra un bache, a parte de la suspensión y del amortiguador, el peso del vehículo actúa como en una suspensión convencional. Pero en la carrera de expansión donde el peso no es una fuerza de oposición al movimiento vertical del vehículo, aparecerá una fuerza de oposición ante este movimiento, a parte del efecto del amortiguador, que provocará un comportamiento que no será simétrico al de compresión, el cuál es causado por el muelle neumático. Este hecho le distingue de un muelle convencional que tiene un comportamiento simétrico en la compresión y la expansión.

Es el hecho de poder controlar esta característica del muelle neumático, conocida como constante elástica del muelle o su inversa la rigidez, lo que ha sugerido la necesidad de este trabajo.

## 1.2 Estado del arte

La literatura sobre suspensiones para vehículos es realmente muy extensa, especialmente en lo que respecta al control activo de la suspensión. Distintos modelos han sido propuestos en los artículos, revistas y libros del sector que actualmente pueden encontrarse sobre dicha temática. En esta línea, destaca sobre los demás el grupo de investigación “Transportation Research Group” de la University of Cambridge encabezado por el Dr. D. Cebon.

El hecho de limitar el estudio a las suspensiones hidroneumáticas, reduce considerablemente la cantidad de información existente. No obstante, los trabajos existentes no son pocos, destacando la aportación de los doctores Belforte, Sorli y Quaglia del Politecnico di Torino.

La idea de poder inferir sobre la constante de rigidez, conlleva que el abanico de información queda prácticamente reducido a unos pocos estudios sobre el tema.

A continuación se muestra un esquema (Fig. 1) donde se clasifican las diferentes aportaciones sobre el estudio de la rigidez en suspensiones neumáticas:

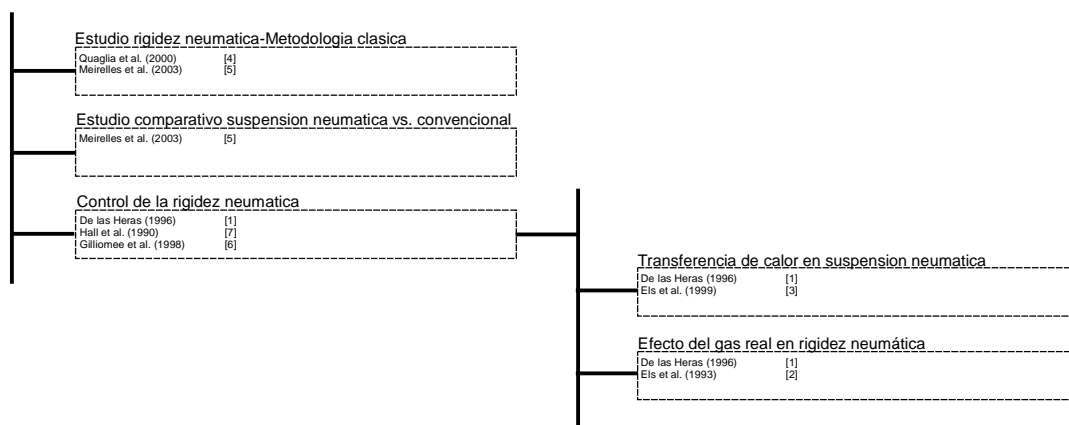


Fig. 1: Esquema del estado del arte rigidez neumática

El antecedente por excelencia de este trabajo es sin ningún tipo de duda el trabajo llevado a cabo por De las Heras [1] que fue realizado en el mismo laboratorio donde se desarrollará esta Tesis Doctoral.

De las Heras [1] en su trabajo desarrolla los principios básicos que rigen y definen el comportamiento dinámico de un cilindro de suspensión hidroneumática. Describe el comportamiento elástico de la suspensión mediante el uso de un índice politrópico instantáneo. El hecho más destacable de su trabajo es el método con el que modifica la rigidez dinámica de la suspensión en tiempo real, consistente en la construcción de una doble cámara neumática con una tobera de conductancia variable que hace de separación entre ambas cámaras. Este método también se estudiará en esta Tesis Doctoral.

Otro antecedente importante a destacar en este apartado, son los estudios de Els y Grobelaar sobre la dependencia del tiempo y la temperatura de las suspensiones hidroneumáticas de cámara simple [2] y los efectos de la transferencia de calor sobre dicha suspensión [3]. En ambos artículos cabe destacar el rechazo a la metodología clásica, la cual describe la fuerza del muelle mediante procesos politrópicos y la aproximación de gas ideal, debido a que no tiene en cuenta la transferencia de calor entre el gas y su entorno y a que es incorrecto considerar el gas como ideal a las altas presiones de trabajo de la suspensión. El modelo se sustenta en la resolución de la ecuación de la energía utilizando la ecuación de Benedict-Webb-Rubin para gas real, y así determinar la constante del muelle. Cabe señalar también el método semi-empírico de transferencia de calor utilizado, el cuál también se va a estudiar en este trabajo.

Valorar también el trabajo de Quaglia y Sorli [4] donde se presenta una extensa investigación experimental sobre suspensiones de aire caracterizando un muelle neumático instalado entre el eje y la carrocería. Aunque se trate de un sistema diferente al que se estudia en esta Tesis Doctoral, es interesante ver como se utiliza la metodología clásica para aportar un buen entendimiento de cómo los parámetros de diseño y geometría de la suspensión hidroneumática afectan al funcionamiento estático y dinámico de ésta.

Así mismo es interesante citar el estudio realizado por Meirelles y Baldi [5] donde se desarrolla un modelo matemático que describe el comportamiento de la rigidez del muelle hidroneumático así como una metodología para definir los parámetros de la suspensión. A través de un modelo numérico de  $\frac{1}{4}$  de vehículo realiza una comparación del comportamiento dinámico de su modelo utilizando muelles convencionales y neumáticos.

Para terminar, destacar dos artículos donde se complementa la suspensión hidroneumática con mecanismos de control para optimizar su funcionamiento. En primer lugar, Giliomee y Els [6] proporcionan a la suspensión un amortiguador de dos estados para mejorar el confort y la maniobrabilidad; Y en segundo lugar y último Hall y Tang [7] quienes completan la suspensión con un mecanismo auto-nivelante el cuál optimiza el funcionamiento de la suspensión frente a las variaciones de carga.

En este apartado, se ha hecho imprescindible incluir el estado del arte sobre el flujo compresible a través de orificios, en concreto en lo que hace referencia a gases reales. Por consiguiente y en lo que al tema se refiere, se adjunta el siguiente esquema (Fig. 2) a modo de resumen de los autores y sus respectivas obras más relevantes:



**Fig. 2:** Esquema del estado del arte sobre el estudio del coeficiente de descarga para flujo no ideal

### 1.3 Objetivos

Anteriormente se ha enunciado el control de la rigidez de una suspensión neumática como el principal aliciente para llevar a cabo un trabajo como este. Sin embargo para llevar a cabo tal tarea es necesario establecer una serie de objetivos o hitos por alcanzar de manera secuencial o paralela.

Estos objetivos se detallan a continuación:

- En primer lugar, se considera un requisito imprescindible la definición y comprensión de la característica o constante de rigidez de una suspensión neumática. De esta manera, podrán abordarse otras temáticas para su posterior regulación en función de los agentes externos que puedan perturbarle.
- Es imprescindible el estudio del fluido de trabajo y su fenomenología. Es igualmente importante la interacción de éste con su entorno, es decir, conocer como le afecta lo que le rodea y viceversa. En otras palabras, es necesario detallar con la máxima precisión posible lo que sucede en el interior de una suspensión neumática.
- Finalmente, se explicará la solución propuesta para el control de la rigidez neumática y los pasos a seguir para llevarla a término.

### 1.4 Metodología

Entre otras cuestiones de interés en el campo de la I+D aplicada a las suspensiones para vehículos, en el presente trabajo de investigación se ha escogido la estrategia del análisis paramétrico aplicado a un modelo que simula el proceso de compresión-expansión de la suspensión. Para ello ha sido necesario elaborar un modelo del tipo predictivo y uno del tipo de diagnosis que por un lado contemplen el máximo número de variables y parámetros que sean susceptibles de influir en cada uno de los aspectos señalados y por otro que se sustenten en el mínimo número de coeficientes o correlaciones empíricas.

Los límites del sistema analizado deben escogerse de manera que incluyan en su interior aquellos componentes necesarios para generar los modos de comportamiento que interesan. El carácter multidisciplinario del tema hace que en la modelización de una suspensión hidroneumática, existan interrelaciones entre las distintas disciplinas de la

- termodinámica,
- mecánica de fluidos y
- transferencia de calor y de masa.

Es por ello que en la construcción de modelos en donde existen numerosos procesos constitutivos, debe extremarse el cuidado en la selección de aquellos procesos que desempeñen papeles principales en el proceso global. En este sentido, cabe señalar que al modelizar el proceso de compresión-expansión, éste no puede ser resuelto satisfactoriamente si no se conecta con un modelo de transferencia de calor y uno que contemple la fluidodinámica del gas contenido.

En este orden de ideas, las variables y parámetros que influyen en cada uno de los aspectos a analizar, los proporciona el análisis fenomenológico del proceso, sustentado en unas bases fundamentales del proceso de compresión-expansión del gas. Por otra parte, con el fin de tener el suficiente poder de resolución, se procurará dentro de las capacidades de cálculo y de los datos disponibles, operar con las hipótesis menos restrictivas posibles, haciendo uso de los planteamientos más rigurosos.

El modelo a desarrollar pretende ser una herramienta que permita predecir la evolución de la rigidez neumática de la suspensión en función de la carrera del cilindro y de las características constructivas y operativas de la suspensión y del fluido operante. Evaluando las bandas de fluctuación de las diferentes variables que caracterizan la operación de la suspensión, la modificación del valor de referencia de cada una de ellas, manteniendo invariantes las demás no dependientes, permite analizar su influencia en el ciclo indicado, simular las variaciones ciclo a ciclo causadas por dicho estado inicial de carga y detectar bajo que situaciones se hacen intolerables.

El estudio de la actuación de una suspensión hidroneumática puede ser llevado a cabo por diferentes procedimientos. Básicamente, son tres los métodos que se pueden emplear en la resolución de un problema de este tipo:

- Experimental.
- Teórico.
- Numérico: Modelos matemáticos.

Cada uno de estos métodos presenta ventajas e inconvenientes sobre los restantes, los cuales se pasan a describir brevemente a continuación:

El método experimental ofrece la posibilidad de obtener soluciones más realistas del problema que las alcanzadas mediante cualquier otro método, ahora bien en contrapartida los costes instrumentales y de operación son cada día más elevados, presentan las dificultades inherentes a toda medición y requieren el uso de equipos generalmente específicos para cada tipo de problema.

Por otro lado, el método teórico, hace uso de hipótesis muy simplificadoras con el fin de hacer más manejable el tratamiento analítico del problema, por lo que es bastante útil en las fases correspondientes al diseño preliminar en las que interesa la obtención de

una respuesta razonablemente aproximada con un mínimo de tiempo de cálculo. Dado su carácter eminentemente cualitativo, proporciona únicamente tendencias. El inconveniente que presenta es que queda restringido a la resolución de fenómenos y geometrías sencillas.

Por último, el método numérico, flexibiliza el método teórico, haciendo menos restrictivas las hipótesis empleadas, permitiendo la resolución de problemas no lineales y de fenómenos y geometrías complicadas. Las ecuaciones ordinarias o en derivadas parciales son resueltas mediante ordenador, discretizando las derivadas en diferencias finitas, las cuales pueden ser integradas con un número suficiente de pasos para proporcionar una solución próxima a la real. Una característica de este método es la información que suministra sobre la evolución temporal de la respuesta, además de proporcionar unos resultados exentos de las limitaciones impuestas por la experimentación. Las desventajas típicas de estos métodos son los costes de cálculo, el establecimiento de las condiciones de contorno y los errores de truncación con los que viene afectada la solución.

En un sentido amplio, un modelo es una representación formal de un sistema, puede definirse como la relación o relaciones funcionales entre varias magnitudes involucradas en un proceso físico, las cuales pueden ser expresadas tanto en forma algebraica, como en forma diferencial o integral, no siendo necesario el disponer de una solución analítica.

El objetivo inmediato de un modelo, es la representación esquemática de la historia y de la evolución temporal de un sistema y el fin último es la síntesis del sistema modelizado. Entre dichos extremos, se sitúan un abanico de posibilidades intermedias tales como las que permiten predecir el estado del sistema ante diferentes hipótesis y parámetros y que representan un auxilio en la minimización de los esfuerzos requeridos en la realización de un diseño de un modelo físico.

Los diferentes modelos del proceso de expansión-compresión de una suspensión, pueden ser en principio agrupados en dos grandes áreas: Modelos de ayuda a la comprensión y modelos de aplicación para el diseño. No obstante, difícilmente puede hacerse una división con las fronteras claramente delineadas de los diversos grupos de modelos, ya que es prácticamente inevitable que haya solapamiento entre éstos o que incluso puedan ser utilizados, con ligeras modificaciones, para diferentes fines y aplicaciones.

Entre los modelos de ayuda a la comprensión encontrados en la bibliografía cabe diferenciar entre tres familias, en función de su propósito: los de análisis y diagnosis, los de predicción y los de síntesis.

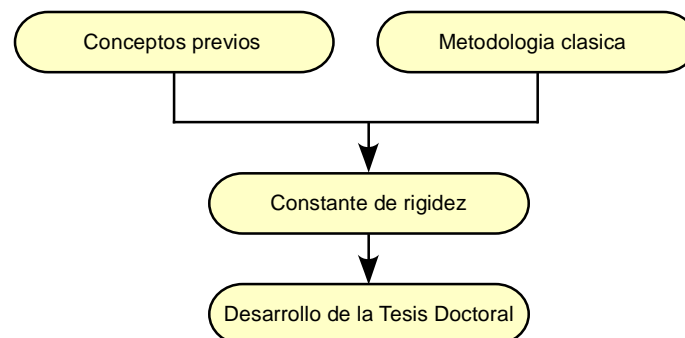
Diagnosis: Son aquellos que su principal propósito es la interpretación de la información obtenida a partir de medidas experimentales y de unas hipótesis relativas a los fenómenos que tienen lugar. Este tipo de modelo se usa frecuentemente para:

- Convertir la información experimental en una forma más manejable.
- Calcular o en su caso estimar magnitudes difíciles de medir.
- Evaluar los efectos de las variaciones ciclo a ciclo.

Predicción: Dichos modelos operan a la inversa de los de diagnosis, siendo muy útiles para la selección de experimentos y de análisis paramétricos en los que los parámetros son difíciles de variar o experimentos costosos de realizar. Un ejemplo representativo lo constituye el estudio de los efectos de la geometría de la suspensión.

Síntesis: Los modelos denominados bajo dicho nombre son una extensión de los modelos predictivos pero que abordan el problema directo. Bajo este concepto se entienden los modelos que serían capaces de proporcionar el diseño de una suspensión para que ésta cumpliera con unas especificaciones dadas, como por ejemplo el traqueteo.

Recordando los objetivos planteados en el apartado anterior, la elaboración de esta Tesis Doctoral debería seguir un planteamiento como el que se ha esquematizado en el diagrama de bloques de la siguiente figura (Fig. 3):



**Fig. 3:** Esquema de la metodología utilizada

Una vez definida la constante de rigidez de una suspensión neumática con la ayuda de la metodología clásica y de una serie de definiciones que se introducirán posteriormente, se estará en disposición de estudiar el fluido de trabajo y de desarrollar un modelo capaz de describir el comportamiento de la suspensión objeto de estudio. A continuación se muestra un esquema de los pasos a seguir para alcanzar dichos objetivos:



