



MASTER EN AUTOMOCIÓN

ESCUELA DE INGENIERÍAS INDUSTRIALES

TRABAJO FIN DE MÁSTER

Diseño de un sensor knock

Konck sensor desing

Autor: D. Rafael Fernández Frutos

Tutor: D. José María Pastor Barajas

Valladolid, julio de 2015

Escuela Ingenierías Industriales

Depto. Ing^a Energética y Fluidomecánica
Paseo del Cauce s/n
47011 Valladolid
(España)



ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES

Fundación Cidaut

Parque Tecnológico de Boecillo, 209
47151 Boecillo (Valladolid)
España

Fundación
cidaut
Investigación y Desarrollo en Transporte y Energía

Resumen

Convencionalmente, los vehículos siempre han contado con sistemas mecánicos para el desarrollo de su funcionamiento, a excepción de ciertos sistemas eléctricos para dar información o confort al ocupante. Hoy, la irrupción de la electrónica en el automóvil es un hecho innegable, dado que estos sistemas electrónicos están sustituyendo a los sistemas mecánicos con el objetivo de garantizar una mayor precisión de operación y un menor peso en el vehículo.

Para el buen funcionamiento de estos dispositivos electrónicos es necesario que el dispositivo tenga que estar tomando muestras de la magnitud real que se quiere controlar en un tiempo programado entre muestra y muestra y compararla con un registro ideal al que se quiere llegar para tener un comportamiento normal. Si no coincide el sistema actuaría para aproximarse lo más posible a ese valor registrado en la memoria del sistema electrónico.

La toma de medida de estas magnitudes se realiza mediante sensores. En este proyecto se va a abordar el diseño de un sensor que mide la vibración del motor, y si esta es anormal, actuaría en los tiempos de detonación del combustible para ajustar el ciclo con objetivo de conseguir el mayor rendimiento posible y dañar lo menos posible el motor.

Abstract

Conventionally, vehicles have always had mechanical systems for the development of its operation, except for certain electric systems to provide information to the occupant or occupant comfort. Today, the advent of electronics in the car is an undeniable fact, since these electronic systems are replacing the mechanical systems in order to ensure greater accuracy and lower operating weight of the vehicle.

In order to ensure a good functionality of these electronic devices is necessary that the device has to be sampling the real magnitude that we want to control by a scheduled time between two samples and compare it with an ideal entry you want to get for normal behavior. If it does not, the system act to approximate as close as possible to that recorded figure in the memory of the electronic device.

Taking measuring these quantities it is performed by sensors. This project will focus the design of a sensor that measures the vibration of the engine, and if this is abnormal, it would act at the time of detonation of the fuel to adjust cycle and get the best possible performance and least possible damage of the engine.

Índice

Bloque I: Ingeniería de motores

1. Introducción. [7]

- 1.1. Aspectos energéticos y medioambientales de los sistemas de propulsión de vehículos [7]
 - 1.1.1. Consumo y emisiones de CO₂ de los vehículos convencionales [8]
- 1.2. Conclusiones [12]

2. Combustión en MEP [14]

- 2.1. Introducción [14]
- 2.2. Desarrollo de la presión y factores que afectan a la combustión [15]
 - 2.2.1. Instante de encendido [16]
 - 2.2.2. Régimen de giro [17]
 - 2.2.3. Grado de carga [18]
 - 2.2.4. Dosado [18]
- 2.3. Combustión anormal [19]
 - 2.3.1. Combustión con autoinflamación [19]

3. Combustibles [21]

- 3.1. Introducción [21]
- 3.2. Propiedades químicas de los combustibles [22]
 - 3.2.1. Densidad [22]
 - 3.2.2. Viscosidad [23]
 - 3.2.3. Inflamabilidad [23]
 - 3.2.4. Volatilidad y entalpía de vaporación [24]
 - 3.2.5. Propiedades del flujo en frío [25]

4. Conclusiones [27]

- 4.1. Parámetros de operación [27]
- 4.2. Parámetros de diseño [28]

Bloque II: Cálculo de características del sensor

5. Desarrollo del sensor [29]

- 5.1. Introducción [29]
- 5.2. Definición de características funcionales [31]
- 5.3. Elección de la cerámica piezoeléctrica [32]
 - 5.3.1. Relaciones piezoeléctricas [33]
 - 5.3.2. Subíndices [35]

-
- 5.3.3. Modos de vibración [36]
 - 5.4. Cálculos [38]
 - 5.4.1. Cerámica piezoeléctrica [38]
 - 5.4.2. Masa sísmica [40]
 - 5.4.3. Tensión de salida y sensibilidad [40]

Bloque II: Cálculo de características del sensor

6. Diseño CAD en SolidWorks [42]

- 6.1. Crear un nuevo documento de pieza [42]
 - 6.1.1. Abrir un croquis [42]
 - 6.1.2. Croquizar un rectángulo [43]
 - 6.1.3. Agregar cotas [43]
 - 6.1.4. Extruir la operación base [44]
 - 6.1.5. Redondear esquinas de la pieza [46]
 - 6.1.6. Extruir operación corte [47]

7. Conclusiones [49]

8. Bibliografía [50]

1. Planteamiento global del proyecto

El objetivo global del proyecto es el diseño de un sensor de detonación o knock. Un sensor de detonación o knock es un sensor que se instala en los motores de encendido provocado, gasolina, cuyo objetivo es la detección de la autoinflamación del combustible y permite un control activo del avance del encendido, es decir, gestiona los tiempos en los que el sistema de ignición actúa. Esto supone una mejora en las prestaciones del motor, pues es posible ajustar el avance del encendido hasta el límite que supone la aparición de la detonación.

Para el control del encendido se emplea en general un control de bucle abierto que, en base a las condiciones de la mezcla, grado de carga, régimen de giro y temperatura de operación, entre otras variables, aplica un determinado valor de avance en el tiempo de encendido. El control de éste parámetro en bucle cerrado fuerza a la implementación de una medida determinada como puede ser la instalación de un captador de presión en la cámara. Los motores actuales no utilizan un captador de estas características, por lo que no es posible efectuar un control completo en bucle cerrado. La TPU se encarga de sincronizar el momento de encendido o de inyección con el cigüeñal para producir el inicio de la combustión en el momento adecuado del ciclo termodinámico.

Actualmente, se ha extendido el uso del sensor de detonación en motores de encendido provocado (MEP), que registra las aceleraciones del bloque y proporciona información sobre el proceso de combustión. En estos motores es posible realizar una corrección sobre el valor obtenido por el controlador en bucle abierto, de forma que el encendido se adelanta hasta que se alcanza un cierto valor de vibración (o se retrasa para evitar un nivel de detonación excesivo). Esto permite adaptar el encendido a las características de octanaje del combustible y optimizar el avance absorbiendo la dispersión de fabricación de motores, pudiendo así mejorarse el consumo del motor, entre otras características.

1.1. Planteamiento específico del proyecto

El proyecto se va a centrar en el diseño de la parte sensora y se va a dividir en tres bloques. En el primer bloque se pretende abordar el estudio de la ingeniería del entorno del motor, en la que influye el sensor de detonación.

El segundo bloque se va a enfocar en el estudio de la ingeniería de materiales necesaria para conformar el producto y se calcularán las características del sensor. Una vez hecho el estudio de materiales se van a escoger los materiales existentes en el mercado que mejor se adapten al producto.

En el tercer bloque se va a abordar el diseño del sensor en el software Solid Works.

El proyecto en el que se va a trabajar trata de profundizar en las tecnologías de vanguardia de la electrónica de automoción. El uso de sensores es primordial para conocer los estados que quieren controlarse y el dominar su funcionamiento y aplicaciones resulta un objetivo sumamente interesante.

1.2. Objetivos del proyecto

Diseño del sensor de knock o detonación:

- Bloque 1: Estudio de la ingeniería que engloba el producto
- Bloque 2: Estudio de la ingeniería de materiales
- Bloque 3: Diseño en CAD

BLOQUE I: Ingeniería de motores

1. Introducción

1.1. Aspectos energéticos y medioambientales de los sistemas de propulsión de vehículos

La energía necesaria para poner en funcionamiento la mayoría de los vehículos es proporcionada mediante un proceso de combustión.

El combustible se introduce en la cámara de combustión del motor (cilindro). Según el tipo de combustible, y en función del combustible, según el diseño del motor, la mezcla con aire se produce en la misma cámara o se mezcla anteriormente. La mezcla produce una explosión química durante el proceso de combustión. En el caso de que la combustión sea completa se producen CO_2 , Nitrógeno y agua en estado gaseoso. En el caso de una combustión incompleta se producen CO , HC , NO_x y emisión de partículas (hollín) entre otros muchos productos. Se citan el CO , HC , NO_x y hollín especialmente porque son los principales gases que están regulados como emisiones contaminantes. En la Figura 1.1 se puede observar la transformación química del combustible en gases tras la combustión.

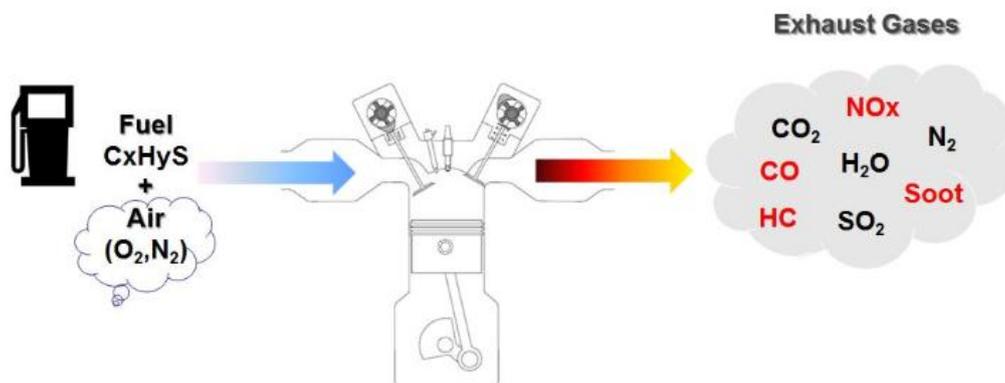


Figura 1.1: Gases emitidos tras un proceso de combustión.

Generalmente una combustión es incompleta por dos razones principales:

- Porque el combustible y el aire no están mezclados en proporciones correctas.
- Porque la temperatura no es lo suficientemente elevada para que se produzca la reacción.

1.1.1. Consumo y emisiones de CO₂ de los vehículos convencionales.

El CO₂ a pesar de ser un gas de efecto invernadero no está regulado como contaminante. Existen medidas para reducirlo pero se trata de manera distinta a las demás emisiones contaminantes. Las emisiones de CO₂ no son tan simples de controlar debido a que está presente en la atmósfera de forma natural y juega un rol muy importante en la vida de muchas especies.

Algunos gobiernos están forzando a los fabricantes de vehículos a producir vehículos con un consumo menor de cara a reducir las emisiones de CO₂. Mediante el Protocolo de Kyoto, los países industrializados de todo el mundo firmaron un tratado que establecen obligaciones vinculantes de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero.

En la Figura 1.2 se muestra cómo ha decrecido la tendencia de las emisiones de CO₂ para todos los coches nuevos vendidos en estos últimos años.

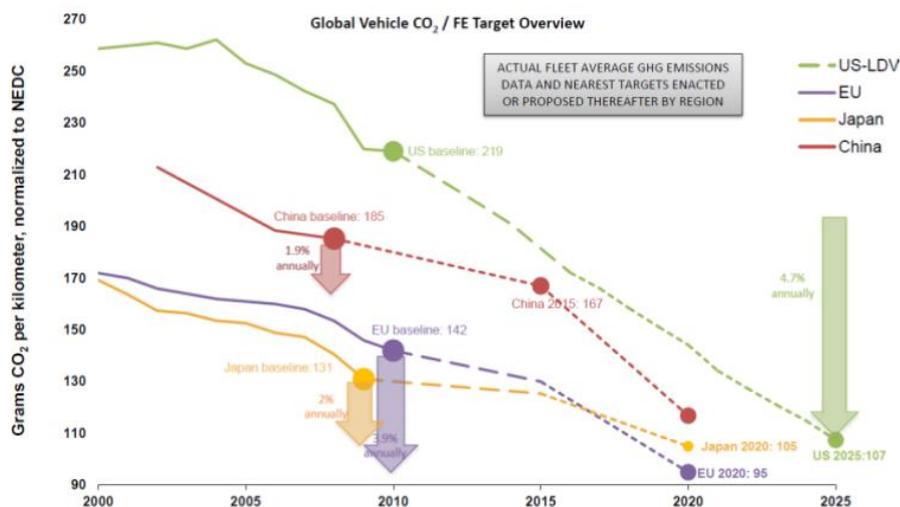


Figura 1.2: Decremento de emisiones de CO₂ en los últimos años y objetivo de emisiones en los próximos.

En los últimos años ha existido una 'dieselización' del parque de turismos en España, debido a la mejora de prestaciones de estos motores, junto con el menor consumo de combustible de estos motores frente a los de gasolina, aspecto cada vez más importante para el comprador.

Para ambos tipos de motores, las normas anticontaminación y las exigencias de disminución de emisiones contaminantes ha hecho que cada vez se diseñen motores más eficaces y con mayor número de dispositivos anticontaminación.

Hay que tener en cuenta que la emisión de CO₂ por kilómetro recorrido por el vehículo depende del consumo de éste (l/100km) y de las propiedades físicas del combustible (a través de la densidad) y de la composición del combustible (relación hidrógeno-carbono básicamente).

A su vez, la energía desarrollada para el movimiento de vehículo se emplea (o se gasta)

en vencer diversas resistencias y conseguir distintos efectos:

- **Rodadura.** Esta resistencia depende del peso del vehículo, de la velocidad y del estado de neumáticos y calzada.
- **Aerodinámica.** Esta resistencia depende de la sección frontal del vehículo y de su coeficiente aerodinámico, y de la velocidad.
- **Subir pendientes.** En este caso, se trata de un efecto útil, que depende del peso del vehículo, de la velocidad y de la propia pendiente de ascenso.
- **Acelerar el vehículo.** Nuevamente es un efecto útil que también depende del peso, de la velocidad y de la aceleración que se quiere obtener.
- **Funcionamiento al ralentí.** A las resistencias y efectos anteriores, hay que añadir también la situación de funcionamiento al ralentí, en la que el vehículo tiene el motor en marcha, pero no se mueve, con lo que el rendimiento aportado es nulo.

Como se ve, la emisión de CO₂ de un vehículo depende del tipo de combustible y del consumo de éste. El consumo está relacionado con la cantidad de energía necesaria para mover el vehículo, venciendo las pérdidas aerodinámicas, de fricción y de rodadura, y otros accionamientos mecánicos o eléctricos del vehículo, además de las que se producen en el seno del motor, para realizar la transformación de la energía del combustible en energía térmica primero y energía mecánica después.

Como consecuencia para reducir el consumo del vehículo y por ello las emisiones de CO₂ y de otros contaminantes, es preciso actuar de varias formas:

- **Reduciendo la cantidad de energía demandada por el vehículo.** Esto supone vehículos más pequeños, con menor peso, con menores pérdidas aerodinámicas (menor sección frontal y/o mejor coeficiente aerodinámico), y menor resistencia a la rodadura (dependiente del conjunto rueda-pavimento). Adicionalmente, los modos de conducción no agresivos, con aceleraciones y frenados suaves reducen la demanda de energía.

La relación entre los valores medios de las emisiones de CO₂ y el peso de los vehículos es bastante clara, ya que el peso afecta a la inercia del vehículo, a la fricción y a la resistencia a la rodadura, y además el peso es un estimador del tamaño del vehículo, por lo que indirectamente recoge también el efecto de la aerodinámica, como se aprecia en la Figura 1.3.

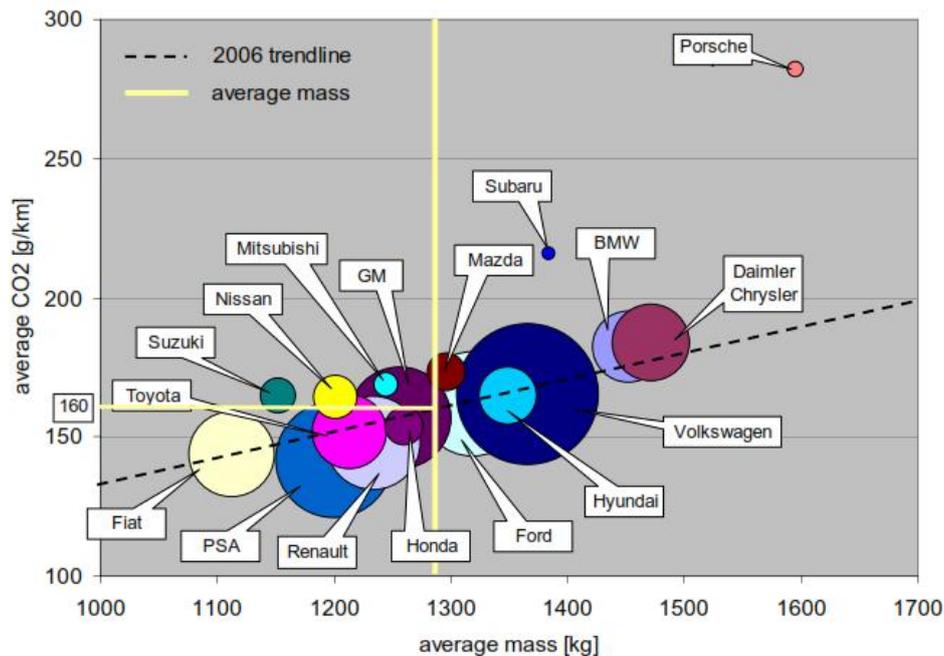


Figura 1.3: Relación entre emisiones medidas de CO₂ y el peso de los vehículos vendidos en Europa

- **Reduciendo las pérdidas internas del motor.** Estas pérdidas son de varios tipos: de origen termodinámico (no es posible transformar íntegramente la energía térmica en energía mecánica, por lo que aparece energía en los gases de escape), de tipo térmico (el motor como máquina debe ser refrigerado, y esta energía térmica aparece en el sistema de refrigeración), y de tipo mecánico (fricción en las piezas del motor y accionamiento de sus elementos auxiliares). Frecuentemente las pérdidas termodinámicas y térmicas se engloban en un único concepto. Este aspecto de la reducción de las pérdidas del motor, o su inverso, el aumento del rendimiento del mismo, se ha venido produciendo de forma continuada en las últimas décadas, tanto en los motores diesel como gasolina, por lo que las posibilidades de mejora marginales son pequeñas, siendo necesario explorar otros conceptos de combustión.
- **Pérdidas del sistema de transmisión.** Éstas son de tipo mecánico (fricción entre elementos). Los sistemas automáticos de transmisión suelen incorporar sistemas hidráulicos y conllevan mayores pérdidas de energía.

- **Energía necesaria para accionar otros sistemas del vehículo.** Finalmente hay que incluir otros sistemas del vehículo, bien inherentes a la función de conducción (iluminación por ejemplo) o bien relacionados con el confort (aire acondicionado, accionamientos eléctricos de elevalunas, puertas, asientos), todos los cuales penalizan el consumo del vehículo y por lo tanto las emisiones. Estas penalizaciones pueden no venir reflejadas en su totalidad en la homologación del vehículo, pero desde luego sí afectan al uso habitual del mismo.

Todo lo anterior configura el destino final de la energía del combustible e indica las oportunidades que hay para reducir o en su caso recuperar la energía perdida.

En la tabla 1.1 se puede apreciar el destino de la energía del combustible en recorridos urbanos e interurbanos.

Tipo de recorrido		Urbano	Interurbano
Contenido energético del combustible		100%	100%
Pérdidas sistema motopropulsor			
	Termodinámicas	60	60
	Mecánicas (motor)	12	3
	Transmisión	4	5
Total		76%	68%
Otros sistemas			
	Auxiliares	2	1
	Accesorios	1	1
	Aire acondicionado	10	10
Total		13%	12%
Energía usada para el movimiento del vehículo (terreno llano)			
	Aerodinámica	2	11
	Rodadura	4	7
	Aceleración/frenado	5	2
Total		11%	20%

Tabla 1.1: Desglose de la energía contenida en el combustible para un vehículo europeo convencional de tamaño medio con motor de combustión interna de gasolina.

Los resultados mostrados en la tabla 1.1 se refieren a marcha por terreno llano por la gran variabilidad que supondría contemplar condiciones con pendientes de ascenso o de descenso. Puede observarse la diferencia entre las utilidades en condiciones urbanas (velocidades más bajas, con frecuentes paradas y arranques) y en condiciones interurbanas (velocidades mantenidas y más altas). Además, destaca la importancia de las pérdidas del sistema motor-transmisión en el total de utilización de la energía del combustible. Igualmente destaca la relativa importancia del sistema de aire acondicionado y del resto de sistemas auxiliares, que además tiene una tendencia creciente.

Cada una de las resistencias y efectos anteriores afecta de forma distinta al consumo de combustible y a las emisiones contaminantes, dependiendo en cada caso de efectos distintos:

-
- **Sistema de propulsión.** El motor y el tipo de combustible determinan el rendimiento del motor, el cual depende fuertemente de las condiciones operativas (temperatura, aceleración, reglajes) y de su correcta adaptación al vehículo (buscando que el motor trabaje la mayor parte del tiempo en las zonas más favorables de mayor rendimiento y menores emisiones contaminantes). Aquí aparece una oportunidad con la utilización de motores eléctricos en los vehículos, ya que estos transforman de manera más eficiente en energía mecánica la energía eléctrica de la batería o de una pila de combustible.
 - **Sistema de transmisión.** Los efectos más importantes son la fricción del sistema y también su influencia sobre la adaptación entre el motor y las condiciones operativas del vehículo (velocidad, aceleración, ascenso de pendientes).
 - **Ciclos de conducción.** La marcha del vehículo a velocidad constante y moderada, con poca carga, y con el motor a su régimen de temperatura es la de menor consumo. Habitualmente los recorridos contienen además situaciones como marcha con motor en frío, aceleraciones, ascenso de pendientes, etc. que incrementan el consumo. Los ciclos de conducción (ejemplo: New European Driving Cycle) tratan de reproducir las condiciones de funcionamiento típicas de referencia.
 - **Diseño del vehículo.** Aquí interviene fundamentalmente el peso total del vehículo, la sección aerodinámica y el coeficiente aerodinámico, también la resistencia de rodadura (neumáticos y estado de la calzada).
 - **Modos de conducción.** Los consumos de combustible y en mayor medida las emisiones contaminantes dependen fuertemente de los modos y condiciones de conducción.

1.2. Conclusiones

Además de actuar sobre las situaciones que conducen a menores consumos de combustible, las vías de actuación para reducir las emisiones contaminantes distintas del CO₂ son:

- Eliminar del combustible los precursores de dichas emisiones, por ejemplo reducir o eliminar el azufre.

-
- Evitar la formación de los compuestos contaminantes en el interior del motor. Esto es relevante para CO, NO_x, HC, partículas (hollín).
 - Favorecer la transformación en el sistema de escape de dichos compuestos en otros menos contaminantes mediante la utilización de catalizadores de oxidación (CO, HC) o de reducción (NO_x) o combinados.
 - Impedir la emisión de los mismos mediante filtrado (partículas).

Mientras tanto, como ha podido observarse, se estudia la capacidad de reducir los niveles de emisión de CO₂ al mínimo, ya que el eliminarlos es una tarea muy complicada. Ni siquiera con los motores de cero emisiones conseguimos anular la emisión de dióxido de carbono pues en toda transformación de energía existe una emisión de CO₂.

La optimización del consumo mediante el sensor de detonación en motores de gasolina, impacta directamente sobre la optimización de las emisiones, dado que al optimizar el ciclo de ignición del combustible, la combustión dentro de la cámara tenderá a ser completa y así la emisión de gases contaminantes será menor.

2. Combustión en MEP

2.1. Introducción

En un motor de encendido provocado (MEP) operando en condiciones normales, como su nombre indica, el proceso de combustión se inicia por un agente externo, habitualmente una chispa procedente de una bujía. Este hecho impone un requisito claro al combustible a usar en este tipo de motores, y es su resistencia a la autoinflamación, para que no ocurra en el encendido espontáneo de la mezcla durante el desarrollo de la combustión. En condiciones normales, entonces, el proceso de combustión se inicia tras provocar una chispa eléctricamente en el volumen de mezcla ubicado en la zona exterior del plasma generado por la chispa.

En una primera fase de combustión, frontera de ese volumen se va propagando, inicialmente poco a poco, hacia el resto de la mezcla sin quemar que lo envuelve. Transcurrido un tiempo determinado, el tamaño de la región quemada empieza a ser ya importante, y el efecto de la combustión empieza a percibirse en la presión que registra el interior de la cámara de combustión.

A partir de ese momento se inicia una segunda fase de combustión, ya mucho más rápida debido al efecto combinado de mayor superficie del frente de llama, mayores temperaturas en la mezcla sin quemar e incremento de la velocidad de combustión, por lo que la presión crece de manera muy sensible. Durante esta segunda fase se quema la mayor parte de la mezcla. Esta fase finaliza cuando el frente de llama se acerca a las paredes de la cámara de combustión, ralentizándose propagación.

A partir de este momento se inicia la tercera y última fase del proceso de combustión, que se desarrolla hasta que termina por completo dicho proceso.

En la Figura 2.1 se puede observar gráficamente la evolución del proceso de combustión dividido en tres fases a medida que cambia el ángulo del cigüeñal, como se ha explicado anteriormente.

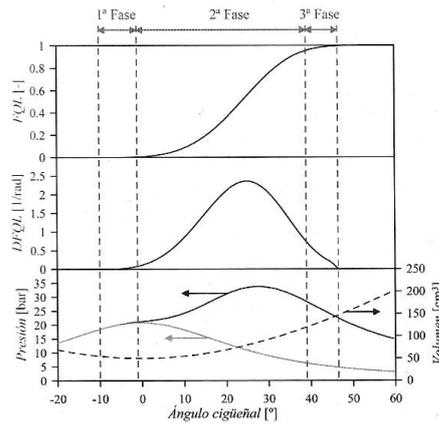


Figura 2.1: Definición y ubicaciones de las tres fases de la combustión en un MEP

2.2. Desarrollo de la presión y factores que afectan a la combustión.

La velocidad de combustión desempeña un papel importante en cómo evoluciona la presión en el interior del cilindro con el ángulo del cigüeñal durante el proceso de combustión. Además, esta evolución está íntimamente ligada al rendimiento del motor, con lo que se trata de un aspecto importante a analizar.

En la Figura 2.1 se habían definido las tres fases de la combustión normal en los MEP. La primera fase transcurre entre el salto de chispa, en el que se inicia la combustión, y el punto en el que la curva de presión del cilindro empieza a separarse de la evolución que tendría de no existir la combustión. Durante esta fase el tamaño del frente de llama es muy pequeño, con lo que éste es de características más bien laminares. Considerando que durante esta fase el frente ha de recorrer una distancia L_1 y que su velocidad de propagación es U_{cl} , el ángulo que dura esta fase es:

$$\alpha_{C1} = \omega \frac{L_1}{u_{CL}} = 2\pi L_1 \frac{n}{u_{CL}}$$

Donde ω es la velocidad angular. Se observa que éste ángulo será variable en función del régimen de giro. Como orden de magnitud, no obstante, habitualmente este ángulo constituye en torno al 10% del ángulo total de combustión.

En la segunda fase de la combustión el tamaño del frente ya es mayor, y adquiere un carácter turbulento. Esta fase tiene lugar en el punto en el que la curva de presión se separa de la curva de presión sin combustión hasta que el frente de llama llega a las proximidades de las paredes de la cámara de combustión, momento en el cual pasa nuevamente a tener un carácter laminar. Si se considera que durante esta fase tiene que recorrer una distancia L_2 y que la velocidad de propagación es ahora U_{ct} , el ángulo que dura esta fase es:

$$\alpha_{C2} = 2\pi L_2 \frac{n}{u_{CT}}$$

Dado que ahora la velocidad del frente es turbulenta y, por tanto, tal y como se ha visto, crece con el régimen de giro, el ángulo de duración de esta fase de combustión no tiene porqué aumentar con el régimen de giro, tal y como ocurría en la fase anterior. De manera general, como orden de magnitud, a_{c2} suele representar el 85% de a_c .

Por último, la tercera fase de la combustión se desarrolla entre el final de la segunda fase y el final de la combustión. Tiene carácter laminar por el hecho de que el frente se encuentra en las proximidades de las paredes, donde las velocidades de la mezcla son mucho menores que lejos de éstas. Esta última fase es breve, representando a_{c3} en torno al 5% de a_c .

Los parámetros que ejercen influencia sobre el proceso de combustión se pueden clasificar en:

- **Factores de diseño**, como es la geometría de la cámara de combustión, la ubicación y el número de bujías, etc.
- **Factores de operación**, como es el régimen de giro, el grado de carga, las condiciones ambientales, etc.

2.2.1. Instante de encendido

La variación del instante de encendido modifica la cantidad de mezcla que se quema antes y después del PMS (punto más alto al que llega el pistón dentro del cilindro), y por tanto ejerce una influencia notable en el trabajo desarrollado por el ciclo. En la Figura 2.2 se muestran cómo varían la pme y la presión máxima en un MEP, operando a 2000 rpm y grado de admisión de 0,5, al variar el instante de encendido. En la figura se ha marcado en sombreado una región que no es accesible en la práctica, debido a la aparición de combustión con autoinflamación. Esta anomalía es normalmente conocida como fenómeno knock debido al ruido característico que lleva asociado. Conviene resaltar que el límite de esta región depende fundamentalmente de las condiciones de operación.

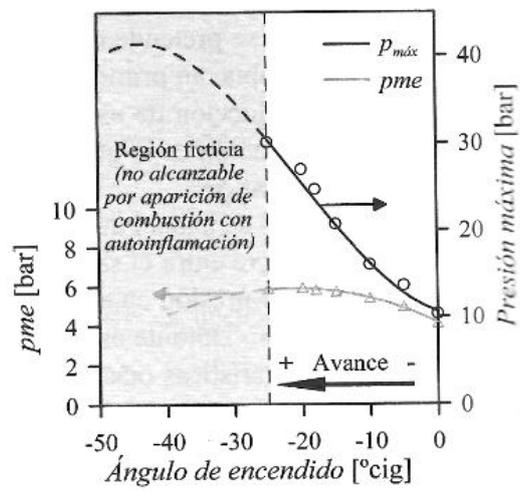


Figura 2.2: Evolución de la presión máxima y la pme en función del avance de encendido a régimen y grado de admisión constantes.

La evolución de la presión máxima se puede explicar cómo sigue. Al ir avanzando el encendido ocurren dos fenómenos como consecuencia: por un lado crece la cantidad de masa quemada antes del PMS, con lo que la temperatura y presión máximas en la cámara tienden a crecer; por otro lado, también crece la cantidad de calor transferido a las paredes antes del PMS, lo que produce el efecto contrario. La combinación de ambos efectos es la que explica por qué se incrementa la presión máxima a medida que aumenta el avance de encendido hasta que supera un cierto límite, a partir del cual ésta empieza a decrecer.

En lo que a evolución del pme se refiere, se observa que al ir avanzando el encendido se llega a un valor máximo y, pasado un determinado avance, ésta empieza a decrecer. Cuando el avance es pequeño, la presión en el interior del cilindro sube demasiado tarde, de manera que no se obtiene el máximo provecho de la combustión. Cuando el avance es excesivo, sin embargo, la presión en el cilindro se eleva demasiado pronto dificultando incluso la subida del pistón al final de la fase de compresión. Entre ambas situaciones extremas, ninguna de ellas conveniente, existe una situación óptima en la que se maximiza el aprovechamiento de la combustión. En estas condiciones se dice que la combustión está centrada y el avance es óptimo.

Lamentablemente, no siempre es posible utilizar una combustión centrada en la que el pme esté optimizado. En efecto, a medida que se incrementa el avance de encendido con la intención de llegar a esa situación óptima, tanto la presión como la temperatura máxima en el interior de la cámara de combustión crecen, incrementándose así el riesgo de aparición de la combustión con autoinflamación. El interés por evitar esta anomalía en el proceso de combustión obliga, en ocasiones, a operar con combustiones no suficientemente centradas, y por tanto no completamente

optimizadas. Algunos sistemas de encendido electrónico que equipan los MEP incluyen un sensor de autoencendido, o sensor knock, para evitar la aparición de este fenómeno indeseable y, a su vez, para ser capaces de acercárselo más posible al avance óptimo en todas las condiciones de operación.

2.2.2. Régimen de giro

Al incrementar el régimen de giro manteniendo constantes el resto de parámetros operativos, α_{c1} (el ángulo correspondiente a la primera fase de combustión) aumenta, ya que U_{cl} permanece prácticamente constante y la ligera disminución de L_1 no llega a compensar el aumento de n . Como consecuencia, α_c aumenta, y es preciso incrementar el avance de encendido para mantener nuevamente centrada la combustión. Al incrementar más el régimen de giro, se da un progresivo incremento de la turbulencia inducida por el régimen, lo cual puede hacer aumentar la fracción de ángulo de la combustión que ocurre en condiciones turbulentas a expensas de la que tiene lugar en condiciones laminares. Esto lleva a que el incremento de avance de encendido sea innecesario a partir de un cierto régimen de giro.

2.2.3. Grado de carga

Al disminuir la carga en un MEP se incrementa la proporción de gases residuales en el cilindro, tal y como se muestra esquemáticamente en la Figura 2.3. En efecto, al bajar la carga se reduce la presión en el colector de admisión, y es necesario despresurizar los gases residuales que han quedado en el interior del cilindro al final del proceso de escape para que pueda entrar la mezcla fresca. La porción de carrera de admisión en la que realmente se está efectuando se reduce, aumentando así la proporción de gases residuales en la cámara de combustión una vez finalizado el proceso de admisión. El mayor contenido de interés en la mezcla produce una reducción de la velocidad de propagación del frente, haciéndose necesario un incremento del avance de encendido para centrar nuevamente la combustión. Esta variación de avance se lleva a cabo con un dispositivo de avance neumático en los sistemas de encendido tradicionales, sustituyéndose por el control electrónico en los sistemas actuales.

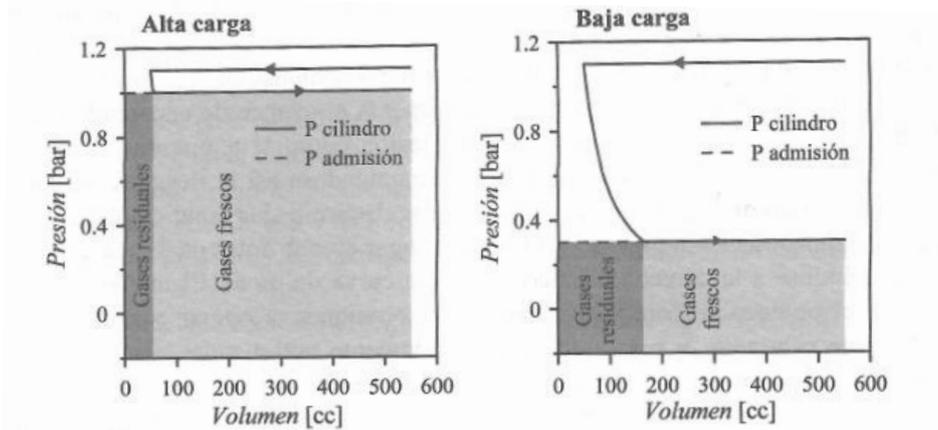


Figura 2.3: Esquema simplificado para explicar el efecto de la carga del motor en la cantidad existentes de gases residuales.

2.2.4. Dosado

En la Figura 2.4 se muestra la variación del ángulo de combustión cuando tiene lugar un cambio en el dosado. En ella se puede observar que para las mezclas ricas, dentro de los márgenes usuales de variación del dosado en los MEP, la variación del ángulo de combustión no es muy grande, teniendo un valor ligeramente mínimo en mezclas ligeramente ricas, en las cuales las temperaturas de combustión son las más altas. Fuera del rango del dosado indicado, el ángulo de combustión sí que aumenta de manera muy significativa.

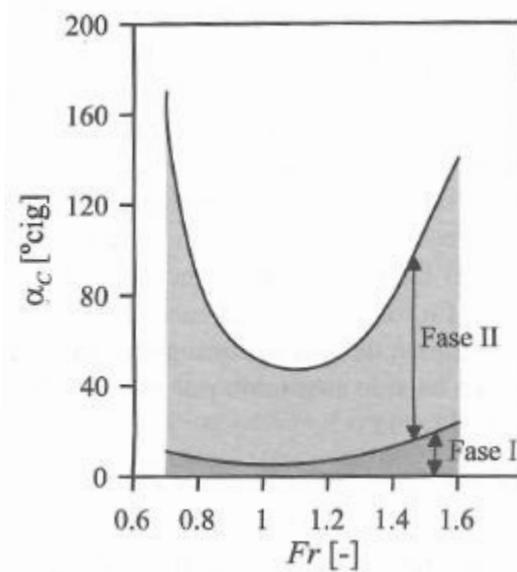


Figura 2.4: Variación del ángulo de combustión en un MEP al variar el dosado de la mezcla.

2.3. Combustión anormal.

2.3.1. Combustión con autoinflamación

La combustión con autoinflamación tiene lugar cuando parte de la mezcla sin quemar se autoinflama. Habitualmente, esto ocurre en la fracción final de la mezcla, a la que el frente de llama tarda más en llegar.

El autoencendido de la parte final de la mezcla en un MEP tiene las siguientes consecuencias:

- Provoca un incremento de la temperatura y la presión en la región que autoenciende, lo que llega a crear una onda de presión que se propaga violentamente a lo largo de la cámara de combustión.
- Una de las consecuencias que produce esta onda de presión es la generación de un ruido muy característico (que es lo que se conoce como picado de biela o knock en la terminología anglosajona). Es un ruido que recuerda al motor diesel, en el que también tiene lugar una autoinflamación, pero en este caso controlada. Este ruido, que va de la mano de un gradiente de presiones elevado, castiga mecánicamente al motor. En la Figura 2.5, a la derecha, se representa una señal de presión en el cilindro en la que se da el fenómeno del autoencendido, observándose una oscilación importante en la presión que será tanto más intensa cuanto mayor sea la cantidad de mezcla que ha sufrido el autoencendido.

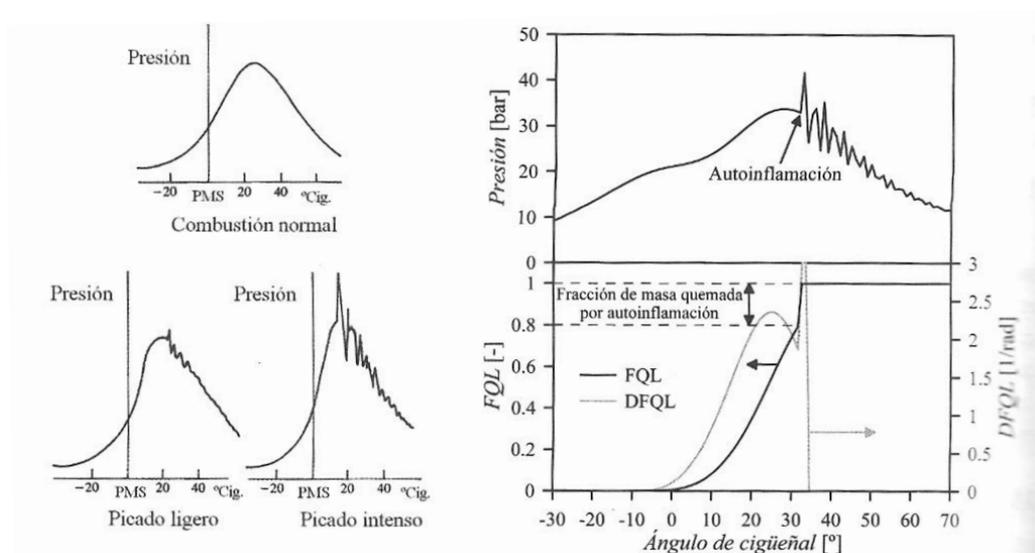


Figura 2.5: Evolución de la curva de presión al aparecer el knock.

- La otra consecuencia de la onda de presión es que rompe la capa límite térmica que existe en las vecindades de las paredes de la cámara de combustión. La capa límite térmica es, en el fondo, una vía de protección de las superficies, puesto que hace que la temperatura del gas del interior de la cámara de combustión y la de las paredes, sean diferentes, evitando así la fusión del material que compone la pared. Si esa capa térmica límite se rompe, la alta

temperatura del gas llega a la superficie de la pared, causando una fusión del material.

3. Combustible.

3.1. Introducción

En función del país y su regulación, los combustibles se someten a diversas especificaciones. Esto significa que los combustibles deben ser capaces de cumplir con las restricciones en términos de propiedades y forma de actuar.

Primero, las especificaciones garantizan un mínimo de calidad del combustible frente al usuario y permiten la armonización de las propiedades de los combustibles en un territorio.

En la Figura 3.1 se puede ver las especificaciones de las regiones coloreadas y su nomenclatura.

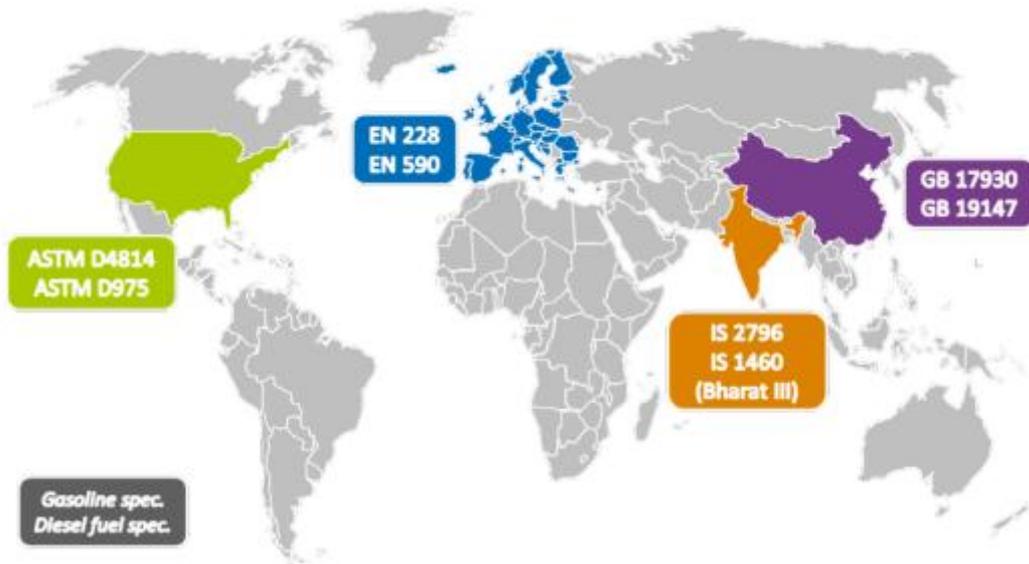


Figura 3.1: Distintas normativas en diversos territorios del globo terráqueo.

Las especificaciones de combustible ayudan al control de la polución. Optimizando las propiedades de los combustibles es posible reducir las emisiones contaminantes.

La meta de la normativa de combustible es asegurar su calidad en toda su cadena de uso, desde su producción, hasta su emisión tras la combustión del vehículo. La siguiente figura muestra las principales etapas que sigue el combustible en su cadena de uso.

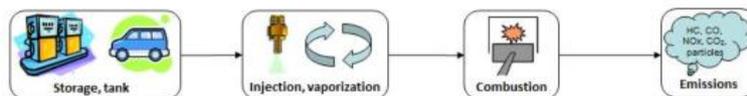


Figura 3.2: Principales etapas de uso del combustible.

Los combustibles utilizados tradicionalmente por los motores alternativos son líquidos y proceden del petróleo. La gasolina y el gasoil constituyen los principales productos de las refinerías. Su facilidad para el almacenamiento en condiciones ambientales y su gran densidad energética aportan al motor una gran autonomía y a su sistema de alimentación una relativa sencillez. Estas ventajas, junto con otras específicas de cada tipo de motor, hacen que estos combustibles sean ventajosos para un consumo en motores de combustión interna alternativos en general, a pesar de su pésimo rendimiento aportado.

3.2. Propiedades físico químicas de los combustibles

3.2.1. Densidad

La densidad (ρ) es la masa por unidad de volumen del fluido. Incluso si el combustible es líquido, su densidad depende ligeramente de la presión y en mayor medida de la temperatura.

La mencionada dependencia, y las habituales dispersiones de densidad de los combustibles líquidos suministrados por distintas compañías, justifican utilizar sistemas gravimétricos en vez de volumétricos cuando pretende medirse con precisión el consumo de combustible de una máquina térmica.

Por otra parte, los sistemas de inyección de combustible en los motores son volumétricos. La inyección tiene lugar a cierta presión, y a temperaturas mayores que la atmosférica como consecuencia del calentamiento provocado por la compresión o por la proximidad con las zonas calientes del motor. Todo ello obliga a considerar las variaciones de densidad del combustible en el diseño del sistema de inyección, y aún así, las dispersiones de densidad de los combustibles repercuten negativamente en el rendimiento y en las emisiones generales.

Para medir la densidad se emplean boyas calibradas, que se sumergen dentro del líquido, de manera que la lectura de la densidad se obtiene en el nivel de flotación de la boya (método del hidrómetro). La normativa europea permite la medición de la densidad tanto por el método del hidrómetro (EN-3675) como por el método del tubo oscilante (EN-12158), en cualquier caso a 15°C y 1 atm.

En la Figura 3.3 se muestra la normativa Europea, EN228 para gasolina, en la que se puede observar que la gasolina tiene un rango de densidad de 720-775 Kg/m³. Así en Europa se asegura una calidad mínima para el rendimiento del motor y la conservación del medio ambiente.



Examples in Europe:

- EN228 for gasoline: 720 - 775 kg/m³
- EN590 for Diesel fuel: 820 - 845 kg/m³

Figura 3.3: Especificaciones de densidad de la gasolina y el gasoil en Europa.

3.2.2. Viscosidad

Aunque no tanto como en el caso de un lubricante, la viscosidad cinemática de un combustible líquido es un parámetro importante pues su valor debe ser suficientemente bajo como para poder circular por los circuitos de alimentación sin excesivas pérdida de carga.

Para medir la viscosidad cinemática de un combustible o de un lubricante se emplean viscosímetros, consistentes en tubos capilares a través de los cuales fluye un volumen calibrado bajo una columna de líquido reproducible, en un tiempo determinado, que es proporcional a la viscosidad, siendo la constante de proporcionalidad la de calibración del viscosímetro. La norma europea que establece el método de medida es

la EN-3104, y requiere que el proceso tenga lugar a una temperatura controlada de 40°C, dada la influencia de esta variable sobre la viscosidad.

3.2.3. Inflamabilidad

Existen una serie de características que describen el comportamiento de un combustible frente a la combustión o durante ésta. Pueden destacarse las siguientes:

- **Límites de inflamabilidad:** Existen dos para cada combustible, el superior y el inferior, si bien son dependientes de la presión y de la temperatura. Una llama puede propagarse siempre y cuando su relación de mezcla combustible-aire esté comprendida dentro del límite superior e inferior de la inflamabilidad. Fuera de los límites se acaba extinguiendo.
- **Temperatura de inflamabilidad:** (Flash point): Es la mínima temperatura a la que existe peligro de inflamación de un combustible ante la proximidad de un agente exterior, a presión ambiental. Es importante por razones de seguridad ante el transporte y almacenamiento de combustibles.
- **Temperatura de autoinflamación:** Es la mínima temperatura a la que un combustible se autoinflama al estar en contacto con el aire. Depende de la presión y de la relación de mezcla, por lo que no es una característica físico-química del combustible.
- **Número de octano (ON):** Es la resistencia a la autoinflamación de un combustible. Tiene interés en los motores de encendido provocado, en los que se desarrolla un frente de llama que avanza barriendo la mezcla de reactivos presente en la cámara. La autoinflamación de ésta en las zonas aún no alcanzadas por el frente de llama provoca aumentos bruscos de presión muy perjudiciales para el motor. Cuanto mayor es el número de octano menor es la tendencia a que esto ocurra. Su valor numérico indica la concentración de isoctano en n-heptano (combustibles de referencia a los que se asignan valores 100 y 0 respectivamente) que en las mismas condiciones produciría al quemarse la misma intensidad de picado. Dado que hay combustible con resistencia al autoencendido aún mayor que la del isoctano, se asigna también el número de octano 120 a una mezcla de isoctano con 0.264 ml/l de tetraetilo de plomo, con el fin de extender hasta ese extremo la escala de medición. El método de medida consiste en aumentar la relación de compresión de un motor monocilíndrico estándar hasta que registra una intensidad de picado estándar (50 unidades en la escala knockmeter), y encontrar la composición de la mezcla que provocó dicha intensidad a la misma relación de compresión. Existen dos métodos para su determinación experimental, Research y Motor que establecen sendos números de octano, el RON (el más comúnmente utilizado) y el MON. El método Research (definido en la norma europea EN-5164) establece la resistencia a la autoinflamación de un combustible en

condiciones poco severas, mientras que el método Motor (norma EN-5163) lo establece en condiciones más severas. Esta severidad es simulada en el método Motor por medio del precalentamiento de la mezcla, el mayor régimen de giro (900 rpm frente a las 600 rpm del método Research) y el incremento del avance al encendido a medida que aumenta la relación de compresión (frente al avance fijo del 13° del cigüeñal en el método Research). Como consecuencia, el MON suele ser inferior al RON hasta en 10 unidades, denominándose esta diferencia sensibilidad.

3.2.4. Volatilidad y entalpía de vaporización

La volatilidad de un combustible es la tendencia de un combustible líquido a evaporarse en determinadas condiciones. Un combustible es más volátil cuanto menor es su temperatura de ebullición. La mayoría de los combustibles, dado su carácter multicomponente, no tiene punto de ebullición fijo.

La volatilidad de un combustible se determina por la curva de destilación obtenida con las normas EN-3405 o ASTM D86, a presión atmosférica, si bien en el caso de los combustibles de baja volatilidad presenta muchas ventajas realizar el ensayo a presión reducida, y posteriormente transformar las temperaturas medidas a sus equivalentes atmosféricas, siguiendo en este caso la norma ASTM D1160. La curva de destilación indica el porcentaje en volumen de combustible vaporizado en función de la temperatura. A la fracción sin destilar que queda en el matraz se le denomina residuo.

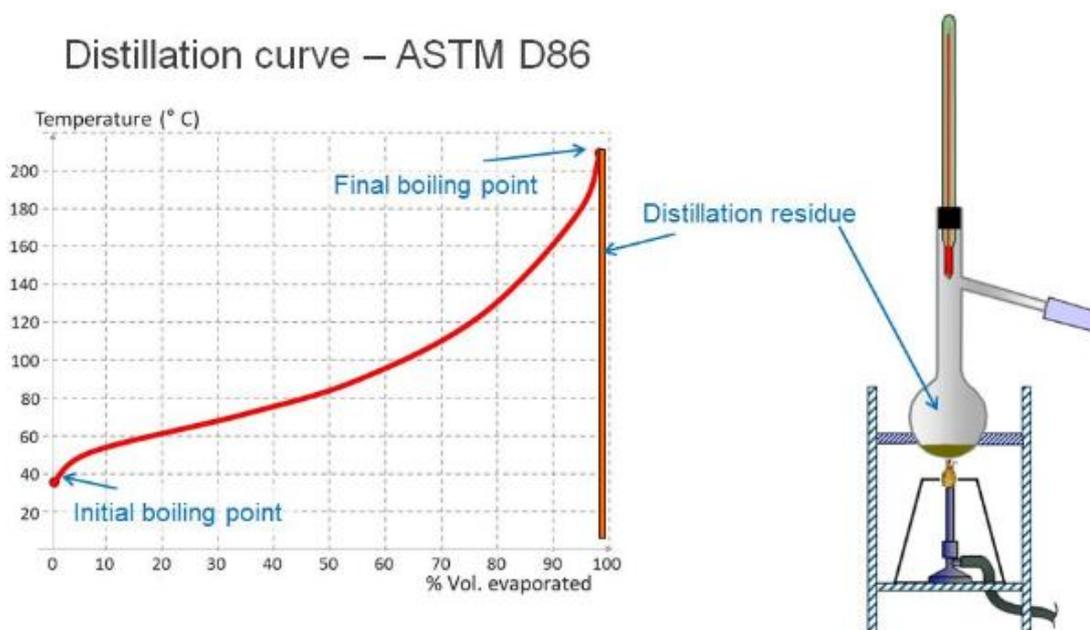


Figura 3.4: Curva de destilación según norma ASMT D86.

Otra magnitud relacionada con la volatilidad de un combustible es la presión de vapor, que a una temperatura dada (38°C), es la presión a la que se establece el equilibrio líquido/vapor. Un líquido es más volátil cuanto mayor es su presión de vapor.

También es importante conocer cuál es la entalpía de vaporización, es decir, la energía absorbida del ambiente cuando el combustible se evapora, ya que ello puede producir enfriamiento en los sistemas de alimentación e incluso durante la combustión, favoreciendo el apagado de la llama, dificultando el arranque en frío o influyendo sobre la contaminación de contaminantes. Las entalpías de vaporización de los hidrocarburos, como las de cualquier líquido, disminuyen al aproximarse a su temperatura crítica, y además son tanto mayores cuanto más alta es dicha temperatura. Dado que al aumentar su peso molecular los combustibles son menos volátiles, las temperaturas de cambio de fases se aproximan al punto crítico, lo que conduce a que cuanto menos volátil es un combustible menor es su entalpía de vaporización. Por eso las gasolinas tienen mayor entalpía de vaporización que los gasóleos.

3.2.5. Propiedades de flujo en frío

Las propiedades de flujo en frío de un combustible están relacionadas con la tendencia del mismo a formar cristales. Estos cristales aumentan de tamaño a medida que disminuye la temperatura, ya que aumenta la temperatura entre los compuestos céreos formando entre sí aglomerados, los cuales pueden dificultar el paso del combustible a través de los sistemas de alimentación e inyección del motor. Las cuatro propiedades de flujo en frío son el punto de niebla (PN), el punto de vertido (PV), el punto de obstrucción de los filtros (POFF) y la filtrabilidad:

- **PN:** temperatura a la que empieza la formación de los primeros cristales o ceras cuando se somete a enfriamiento normalizado al combustible según el método estandarizado ASTM D-2500. Estos cristales o ceras pueden pasar a través de las bombas y filtros del motor. Por ello, el PN como límite de operación es excesivamente restrictivo.
- **PV:** temperatura a la que todo combustible adquiere un estado gelatinoso cuando se somete a enfriamiento según la norma ASTM D-97. El PV siempre es menor que el PN. En este punto el combustible no puede ser bombeado e incluso, a temperaturas mayores que el PV, obstruye totalmente los filtros del motor. Esta temperatura como límite de operatividad es poco restrictiva.
- **POFF:** temperatura a la que se obstruyen los filtros a causa de la aglomeración de cristales formados en el combustible ensayado. Esta temperatura se mide en un ensayo normalizado EN-116, ASTM D-6371 o IP-309.
- **Filtrabilidad:** expresa igualmente la tendencia a la obstrucción de los filtros, pero controlando la caída de presión y caudal a través de éste, y sin llegar a la

obstrucción, en un banco de filtrabilidad, más próximo a la disposición del filtro en un motor. El método se define en las normas ASTM D-2068 y IP-387.

La composición y estructura molecular del combustible tienen gran influencia sobre las propiedades de flujo en frío. Los parámetros que más afectan son la longitud de cadena, el grado de saturación y la ramificación de la molécula.

4. Conclusiones

Tras haber dado un repaso al entorno a la ingeniería del motor y de los combustibles, enfocando la revisión a motores de gasolina (encendido provocado) y a la gasolina como combustible, se va a discutir sobre los principales factores de diseño y operación que afectan a la aparición o no de la combustión por autoinflamación.

4.1. Parámetros de operación

- **Grado de carga.** Cuanto mayor es el grado de carga, mayor es la pureza de la mezcla y mayor es la temperatura en la cámara. Ambas cosas llevan a un incremento en el riesgo de aparición de la combustión por autoinflamación.
- **Régimen de giro.** A medida que aumenta el régimen de giro la temperatura de la mezcla se incrementa (por existir menos tiempo a que tengan lugar las

pérdidas de calor), reduciéndose ligeramente el tiempo para el autoencendido. Del mismo modo, el tiempo de combustión se reduce fuertemente, en mayor medida que el tiempo de autoinflamación. Consecuentemente al aumentar el régimen de giro disminuye el riesgo de autoencendido.

- **Dosado.** Cuando el dosado es estequiométrico es cuando el riesgo de autoencendido es mayor. De hecho, una de las estrategias más comunes para reducir el riesgo de autoencendido en motores fuertemente cargados es enriquecer la mezcla.
- **EGR.** La adición de gases quemados a la mezcla es una manera de reducir el riesgo de aparición de la combustión con autoinflamación. Actualmente son pocos los fabricantes que, en motores de gran cilindrada, prefieren usar esta estrategia, y no la del enriquecimiento de la mezcla, pues de esta manera se obtiene, como beneficio adicional, una reducción significativa del consumo del motor.
- **Avance del encendido.** Al incrementar el avance, tanto la presión como la temperatura máximas crecen, incrementándose entonces el riesgo del autoencendido.
- **Temperatura del refrigerante.** A mayor temperatura, mayor riesgo de autoencendido.
- **Condiciones ambientales.** Una mayor presión y temperatura ambiente, así como una disminución de la humedad conducen a incrementar el riesgo de autoencendido.

4.2. Parámetros de diseño.

- **Relación de compresión.** Aumentar la relación de compresión lleva a aumentar la presión y la temperatura máximas, y por tanto aumenta el riesgo de que pueda producirse autoencendido.
- **Recorrido del frente de llama.** Todas las acciones que reducen la distancia a recorrer por la llama reducen, a su vez, el riesgo de autoencendido. Se hace notar que en los motores de gran tamaño el riesgo de autoencendido es muy alto por una doble razón: por incrementar la distancia que recorre la llama, y por la reducción del porcentaje de pérdidas de calor.
- **Turbulencia.** El incremento de la turbulencia en el interior de la cámara de combustión, conduce a una disminución del tiempo de combustión y, por tanto, reduce el riesgo de autoencendido.
- **Pérdidas de calor.** Todo aquello que favorece a la evacuación de calor en la cámara de combustión reduce el riesgo de autoencendido.

Finalmente debe resaltarse la resistencia a la autoinflamación del combustible (cuantificada por el número de octano, ON) es también un parámetro que juega un papel importante en la aparición o no de esta anomalía de la combustión que se está analizado.

Un mayor octanaje en la gasolina implica una reducción del riesgo de autoinflamación. Es importante resaltar que en los transitorios de aceleración donde el mojado de pared es muy significativo y lleva a que, inicialmente, entre únicamente la fracción más volátil del combustible en el interior del cilindro, el riesgo de autoencendido es más elevado a causa del más bajo número de octano de esa fracción más volátil.

BLOQUE II: Cálculo de características del sensor

5. Desarrollo del sensor.

5.1. Introducción

El sensor knock, o detonación, es un sensor que genera una tensión cuando le es aplicado un esfuerzo a lo largo de su superficie, debido al efecto piezoeléctrico. La tensión generada es proporcional a la aceleración.

El principio de funcionamiento de un acelerómetro se basa en la ley de Hooke y la segunda ley de Newton. La aceleración genera una fuerza sobre una masa,

denominada masa sísmica, que al desplazarse deforma un muelle con la condición de que:

$$F_a = ma$$

$$F_a - b\dot{x} - Kx = m\ddot{x}$$

Con lo cual, se llega a que:

$$ma = m\ddot{x} + b\dot{x} + Kx$$

Siendo **a** la aceleración.

Para poder calcular los parámetros deseados, se calcula la función de transferencia del sistema:

$$H(s) = \frac{y(s)}{a(s)} = \frac{m}{ms^2 + bs + k}$$

En este proyecto interesa estudiar un comportamiento cuasi-elástico en el que $s=0$.

En la Figura 5.1 se puede observar gráficamente el sistema sobre el que se basa el sensor de detonación, y sobre el que hemos calculado la función de transferencia.

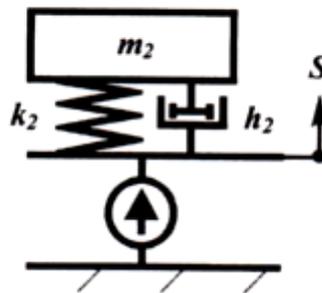


Figura 5.1: Circuito dinámico simplificado del sensor de detonación: m_2 es la masa sísmica, k_2 es el factor de elasticidad de la piezo cerámica, h_2 es el amortiguador que simula la fricción interna del piezoelemento.

De esta forma una aceleración **a** ocasionará que la masa se desplace, o viceversa. Si se observa un desplazamiento **x** suponemos que la masa está bajo la acción de una aceleración:

$$a = \frac{kx}{m}$$

Cuando la masa sísmica se desplaza por efecto de la aceleración, ejerce una fuerza sobre la cerámica piezoeléctrica y en su interior se produce una redistribución de las cargas generándose una diferencia de carga neta entre sus caras que es proporcional a la aceleración.

En la Figura 5.2 se representa en la gráfica a) la aceleración respecto al tiempo en condiciones normales. Cuando aparece el fenómeno knock, una intensa onda de choque se propaga en la mezcla aire-combustible, a una velocidad comprendida en un rango de 1-3 Km/s, con una presión entre los 3-6 MPa y temperaturas de 2200°C. La duración de la vibración en el cuerpo del motor es estimada en un rango de 2-20ms, dependiendo de la intensidad de la detonación. Se puede observar su efecto en la gráfica b) en la cual sucede el fenómeno knock entre los 5 y los 10 ms .

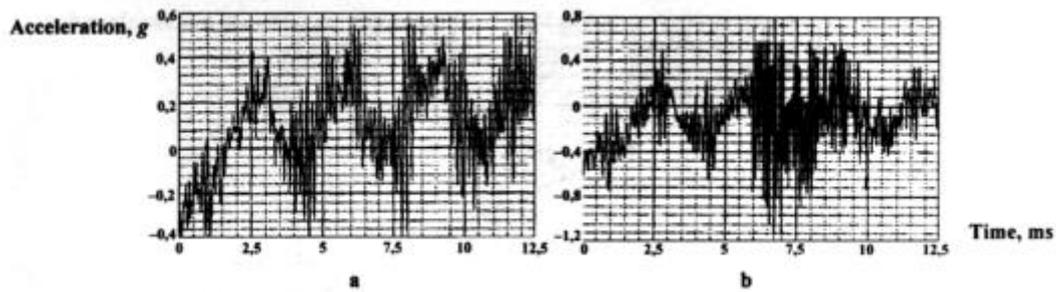


Figura 5.2: Aceleración típica del cuerpo de un motor: a) en condiciones estándar, b) en condiciones de autodetonación.

En este bloque se aborda la elección de los materiales requeridos para la elaboración del sensor, como se puede ver en la Figura 5.3, que constará de:

- Una cerámica piezoeléctrica
- Una masa sísmica
- Una arandela de fijación
- Una tuerca
- Una base metálica
- Encapsulado o housing.

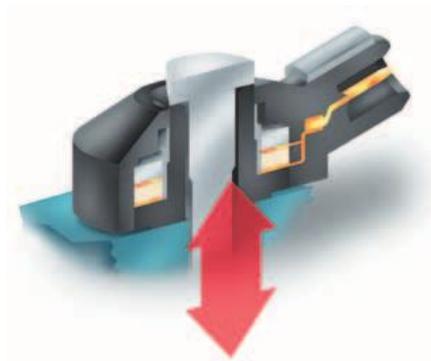


Figura 5.3: Montaje interno del sensor knock.

5.2. Definición de características funcionales.

Existen tres grandes grupos en los que se pueden clasificar los sensores de detonación:

- **Acelerómetros:** son sensores de ancho de banda que operan en un rango de frecuencia de 4-10KHz, formado en un parte plana de la característica amplitud-frecuencia por debajo de la frecuencia natural.
- **Sensores resonantes:** sensores con un ancho de banda estrecho (~100Hz), cuya frecuencia natural está sintonizada con la frecuencia del picado de biela del motor.
- **Sensores semiresonantes:** sensores con un amplio ancho de banda (mayor de 1KHz), cuyas frecuencias naturales difieren de la frecuencia del picado de biela medido por un valor determinado y cuya característica de frecuencia podría ser sintetizada por dos o más intersecciones de modos oscilantes.

El sensor que se desarrolla en el proyecto es un acelerómetro. Cada tipo de motor debería ir asociado a un diseño de acelerómetro. Por lo tanto, para abordar el diseño han de establecerse unas condiciones de operación y unas características funcionales, y para hacer los cálculos, hay que ponerse en el peor de los casos. En la tabla 5.1 se definen las características más críticas que deben de tener los acelerómetros para tener un buen funcionamiento.

	Valor Típico	Valor Máximo
Coefficiente de transformación de aceleración en tensión (mV/g)	28±8mV/g	100 mV/g
Rango de frecuencia de operación (KHz)	6-8	5-10
Irregularidad de la característica amplitud frecuencia (dB)	±1	
Frecuencia de resonancia principal (KHz)	20	25-40
Rango de operación de aceleración vibracional (g)	0.1-10	
Resistencia al impacto (g)	>1000	
Rango de operación de temperatura (°C)	-40-125	-60-150
Humedad relativa	>98% a 40°C	
Rango de presión ambiental (Hg)	400-800	
Capacidad eléctrica (nF)	0.6-10	
Resistencia eléctrica del aislamiento entre la cápsula y los terminales en condiciones ambientales normales (MΩ)	20	

Tabla 5.1: Características funcionales de los sensores de detonación de ancho de banda.

5.3. Elección de la cerámica piezoeléctrica.

Para ayudar a entender el efecto piezoeléctrico debemos considerar primero la microestructura del material. Desde el punto de vista eléctrico la cerámica piezoeléctrica puede considerarse que contiene dipolos elementales, representados en la Figura 5.4 esquemáticamente, consistentes en una carga positiva y una negativa a una cierta distancia.

Antes del proceso de fabricación los dipolos no muestran preferencia por alguna dirección en particular, de modo que en el material cerámico están orientados al azar, véase Figura 5.4.a. Cuando se aplica un esfuerzo la suma de los desplazamientos de carga es cero tal que bajo estas condiciones el material no exhibirá un efecto piezoeléctrico.

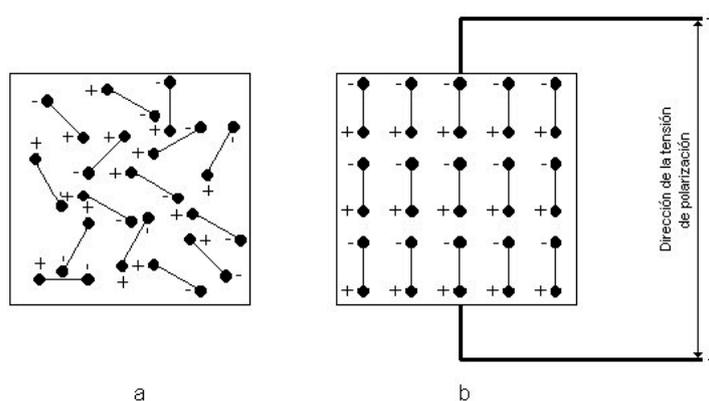


Figura 5.4: Dipolos en cerámicas piezoeléctricas (a) antes y (b) después de la polarización

Para obtener actividad piezoeléctrica los dipolos deben primero ser orientados, lo que se hace exponiendo al material cerámico a un fuerte campo eléctrico externo a alta temperatura, no más allá de la llamada temperatura Curié (recordemos que la temperatura Curié es aquella en que la permeabilidad relativa de los materiales ferromagnéticos cae al valor 1). A esta temperatura los dipolos naturales desaparecen y son creados nuevamente en forma espontánea cuando disminuye la temperatura. Bajo estas condiciones polares los dipolos toman una dirección correspondiente a la dirección del campo de polarización, como puede verse en la Figura 5.4.b, con el resultado que el cuerpo de la cerámica muestra una elongación en la misma dirección (en realidad los dipolos nunca se orientan como idealmente sugiere la figura 5.4.b; la estructura cerámica admite solo ciertas rotaciones a los dipolos).

Después de remover el campo de polarización y enfriar el material los dipolos no pueden volver fácilmente a su posición original y lo que se obtiene es llamado polarización remanente del material cerámico. El cuerpo cerámico se ha convertido, en forma permanente, en piezoeléctrico y puede convertir energía mecánica en eléctrica y viceversa. Por eso es indispensable hacer a estos materiales un tratamiento de polarización, y usualmente la operación final se lleva a cabo conectando los electrodos al material cerámico a una fuente de tensión continua.

Para poder hacer una elección buena de la cerámica piezoeléctrica, lo primero es saber interpretar sus características, y como hacer uso de ellas. En función de la dirección en la que se aplique la fuerza al elemento piezo-cerámico, sus dipolos tomarán una dirección u otra, por lo tanto es imprescindible conocer el modo de vibración.

5.3.1. Relaciones piezoeléctricas

La condición eléctrica de un medio no sujeto a esfuerzo bajo la influencia de un campo eléctrico queda definida por 2 cantidades: la intensidad de campo \mathbf{E} y la densidad de flujo electro estático \mathbf{D} que están relacionadas según:

$$\mathbf{D} = \boldsymbol{\varepsilon} - \mathbf{E}$$

donde $\boldsymbol{\varepsilon}$ es la permeabilidad del medio.

La condición elástica del mismo medio bajo intensidad de campo cero está definida por 2 cantidades mecánicas: la tensión aplicada \mathbf{T} y la deformación relativa \mathbf{S} que están relacionadas por:

$$\mathbf{S} = \mathbf{s} - \mathbf{T}$$

donde \mathbf{s} depende de la elasticidad del medio.

La piezoelectricidad involucra la interacción entre el comportamiento eléctrico y elástico de un medio y es así definido por las relaciones lineales entre las dos variables eléctricas y las dos elásticas:

$$\begin{cases} \mathbf{S} = \mathbf{s}^E \mathbf{T} + \mathbf{d} \mathbf{E} \\ \mathbf{D} = \mathbf{d} \mathbf{T} + \boldsymbol{\varepsilon}^T \mathbf{E} \end{cases} \quad (\text{A})$$

La elección de las variables independientes (una elástica \mathbf{T} y otra eléctrica \mathbf{E}) es arbitraria. Otro par de ecuaciones piezoeléctricas distintas corresponderá a una elección diferente de variables independientes. El siguiente par de relaciones provee otra combinación útil:

$$\begin{cases} \mathbf{E} = -\mathbf{g} \mathbf{T} + \frac{\mathbf{P}}{\boldsymbol{\varepsilon}^T} \\ \mathbf{S} = \mathbf{s}^D \mathbf{T} + \mathbf{g} \mathbf{D} \end{cases} \quad (\text{B})$$

Las constantes \mathbf{s}^D , \mathbf{s}^E , $\boldsymbol{\varepsilon}^T$, \mathbf{d} y \mathbf{g} utilizadas en estas fórmulas necesitarán una explicación ulterior. Los súper índices en los símbolos muestran la cantidad que se mantiene constante en condiciones límite. Por ejemplo: si cortocircuitando los electrodos el campo eléctrico a través del cuerpo piezoeléctrico se mantiene constante se utiliza el súper índice \mathbf{E} . Manteniendo los electrodos en circuito abierto la densidad de flujo electro estático se mantiene constante, se usa el súper índice \mathbf{D} .

Luego s^D y s^E son los módulos de elasticidad (relación deformación relativa – tensión) para una densidad de carga eléctrica constante y un campo eléctrico constante respectivamente, y ϵ^T es la constante dieléctrica (relación desplazamiento campo) con una fuerza constante.

Surge de las ecuaciones (A) y (B) que hay dos formas de definir las constantes piezoeléctricas d y g . Así d puede ser definido como el cociente entre S y E o D y T ; igualmente g puede ser definido de otros dos cocientes.

Constante	Definición
d	$\frac{\text{Desplazamiento Dieléctrico } \boxtimes \text{ Desarrollado } \left(\frac{C}{N}\right)}{\text{Esfuerzo } \boxtimes \text{ Mecánico } \boxtimes \text{ Aplicado}}$
	$\frac{\text{Tensión Desarrollada } \left(\frac{m}{V}\right)}{\text{Campo aplicado}}$
g	$\frac{\text{Campo Desarrollado } \left(\frac{Vm}{N}\right)}{\text{Esfuerzo Mecánico Aplicado}}$
	$\frac{\text{Tensión desarrollada } \left(\frac{m^2}{C}\right)}{\text{Desplazamiento Dieléctrico Aplicado}}$

Tabla 5.2: Definición de constantes d y g .

Tomando la relación entre los productos cruzados de los coeficientes de las ecuaciones (A) y (B) se obtiene:

$$K^2 = \frac{d^2}{s^E \epsilon^T}$$

y

$$\frac{g^2 \epsilon^T}{s^D} = \frac{K^2}{(1 - K^2)}$$

Se ha introducido la constante K , coeficiente de acoplamiento electromecánico, que puede ser considerada simplemente como una cantidad numérica conveniente. Sin embargo, tiene un significado físico básico. A frecuencias muy por debajo de la frecuencia de resonancia mecánica fundamental, K^2 puede expresarse como:

$$K^2 = \frac{\text{Energía } E_k \text{ convertida}}{\text{Energía } E_k \text{ de entrada}}$$

donde la energía E_k es la energía potencial de desplazamientos atómicos retenida por el cristal luego de haber sido sometido a la irradiación del campo eléctrico.

Esta fórmula es válida para las conversiones de energía electro – mecánica y mecano – eléctrica, pero no necesariamente representa el rendimiento total (relación entre la

potencia útil convertida y la potencia de entrada), el cual será mucho menor que K^2 a bajas frecuencias.

5.3.2. Subíndices

En los materiales piezoeléctricos polarizados las constantes dependen de la dirección del campo eléctrico, densidad de flujo, tensión y deformación relativa. Por ello se agrega a los símbolos subíndices que indican dirección.

Para los materiales cerámicos piezoeléctricos la dirección de polarización positiva se toma usualmente como la del eje **Z** de un sistema ortogonal **XYZ** como el de la Figura 5.5. Dado que estos materiales tienen simetría polar, los sentidos de **X** e **Y** elegidos en un elemento tienen importancia, y planos paralelos al eje **Z** son planos de reflexión.

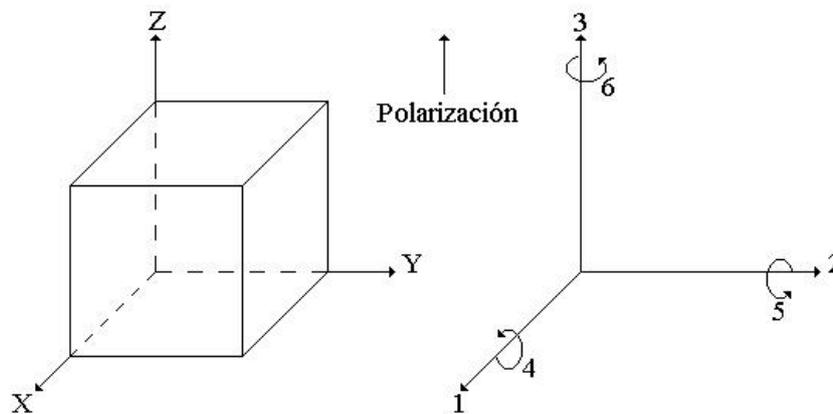


Figura 5.5: Notación axial

Si las direcciones **X**, **Y**, **Z** se representan como **1**, **2** y **3** respectivamente y los giros o torsiones sobre estos ejes como **4**, **5** y **6** respectivamente como se observa en la Figura 5.5, los distintos parámetros pueden ser escritos con subíndices referentes a ellos.

- **Constante dieléctrica (ϵ):** El primer subíndice corresponde a la dirección del desplazamiento eléctrico, el segundo indica la dirección del campo eléctrico.
- **Constante elástica (**s**):** El primer subíndice da la dirección de la deformación relativa y el segundo la dirección de la tensión.
- **Constantes piezoeléctricas (**d**, **g**, **k**):** El primer subíndice se refiere a la dirección del campo eléctrico y el segundo a la dirección de la deformación
- **Constante de frecuencia (**N**):** La constante de frecuencia depende de la frecuencia de resonancia mecánica y de las dimensiones que gobiernan esa frecuencia. El subíndice se refiere a la dirección de la vibración resonante.

5.3.3. Modos de vibración

Si una tensión alterna de una frecuencia variable se aplica a una cerámica piezoeléctrica de una geometría o forma específica, puede observarse que existe una frecuencia determinada en la cual se produce una vibración muy fuerte. Esta frecuencia se denomina frecuencia de resonancia y depende de la forma y del modo de vibración, de la orientación de la polarización y de la dirección del campo eléctrico. Como se muestra en la Tabla 5.3 cada uno de los modos de vibración tienen una única frecuencia de resonancia y unas únicas características piezoeléctricas.

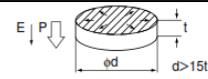
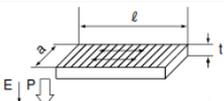
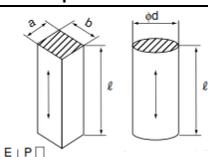
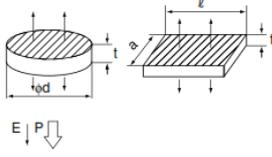
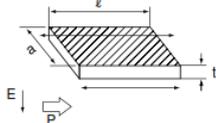
Modo de vibración	Forma/Modo de vibración	Frecuencia de resonancia	Símbolo de la constante del material					
			k	d	g	Y^E	ϵ^T	N
Modo radial	 <p>La polarización está orientada a lo largo del espesor de la cerámica</p>	$\frac{N}{p}$	K_p	d_{31}	g_{31}	Y_{11}^E	ϵ_{33}^T	N_p
Modo longitud	 <p>Placa cuadrada y fina, con la dirección de la polarización ortogonal al eje de polarización y con un solo punto de resonancia</p>	$\frac{N_{31}}{l}$	K_{31}	d_{31}	g_{31}	Y_{11}^E	ϵ_{33}^T	N_{31}
Modo longitudinal	 <p>Columnas cuadradas y cilíndricas. La vibración se orienta a lo largo de la dirección de polarización. Solo un punto único de resonancia.</p>	$\frac{N_{33}}{l}$	K_{33}	d_{33}	g_{33}	Y_{33}^E	ϵ_{33}^T	N_{33}
Modo espesor	 <p>Placas rectangulares y forma de disco las cuales son finas en comparación con sus áreas.</p>	$\frac{N_t}{t}$	K_t	d_{33}	g_{33}	Y_{33}^E	ϵ_{33}^T	N_t
Modo forma	 <p>Placas rectangulares o discos, con el campo eléctrico ortogonal a la dirección de polarización.</p>	$\frac{N_{15}}{t}$	K_{15}	D_{15}	G_{15}	Y_{44}^E	ϵ_{11}^T	N_{15}

Tabla 5.3: Relación entre el modo de vibración y sus constantes características.

Una vez analizados los modos de vibración existentes, el siguiente paso es elegir la forma de la cerámica piezoeléctrica.

En la siguiente tabla se muestran las formas típicas que puede adoptar una cerámica piezoeléctrica y su relación con el modo de vibración ideal para hacer el sensado de la muestra.

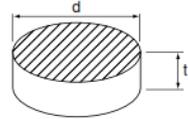
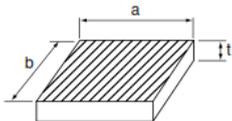
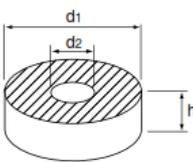
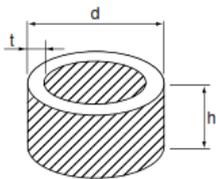
Forma	Estructura	Modo de vibración
Disco		Radial Espesor
Placa rectangular		Espesor Longitud
Anillo		Espesor
Cilindro hueco		Espesor

Tabla 5.4: Relación entre el modo de vibración y la dimensión de la cerámica piezoeléctrica.

Por lo tanto, se escoge una cerámica piezoeléctrica de forma anular que tiene asociado el modo de vibración espesor. Para definir los parámetros del sensor, se debe tener en cuenta las características de la cerámica piezoeléctrica.

Atendiendo a las características anteriormente citadas y comparando muestras de Murata, CeramTec y Morgan se elige el producto de CeramTec, la cerámica PZT Sonox P502, con un dimensionado de 22mm de diámetro exterior, 14.35mm de diámetro interior y 3mm de espesor.

Los materiales cerámicos basados en titanato circonato de plomo, PZT, se utilizan como elementos piezoeléctricos en una amplia variedad de aplicaciones. En el rango de composición de la frontera morfotrópica de fases estos materiales presentan los coeficientes piezoeléctricos más elevados (1,2). El aumento de las propiedades

piezoeléctricas en las proximidades de la frontera morfotrópica de fases se debe a un aumento en la facilidad de reorientación de los dominios durante la polarización causado por la proximidad de las estructuras ferroeléctricas tetragonal y romboédrica, ya que es mayor el número de direcciones disponibles para la polarización, y por un máximo en la complianza mecánica.

5.4. Cálculos

5.4.1. Cerámica piezoeléctrica

La documentación técnica de la cerámica piezoeléctrica PZT SONOX P502, define los siguientes parámetros que son necesarios para hacer los cálculos de las características del sensor y orientativos para saber cómo va a comportarse el sensor y en qué condiciones.

Constante de carga piezoeléctrica: $d_{33} = 440 \cdot 10^{-12} \text{ C/N}$

Cumplimiento elástico: $s_{33}^E = 18.5 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{N}$

Acoplamiento electromecánico: $K_t = 0.48$

Temperatura de Curie: $T_c = 335^\circ\text{C}$

Permitividad dieléctrica relativa: $\epsilon_r = \frac{\epsilon_{33}^T}{\epsilon_0} = 1850$

Factor de disipación dieléctrica: $\tan \delta = 12.5 \cdot 10^{-3}$

Constante de frecuencia: $N_t = 2030 \text{ KHz} \cdot \text{mm}$

Factor de calidad mecánica: $Q_m = 80$

Constante de tensión: $g_{33} = 26.9 \cdot 10^{-3}$

Capacitancia C: capacitancia de un transductor piezoeléctrico, medida muy por debajo del mínimo de su frecuencia de resonancia (normalmente 1KHz).

Usando la permitividad dieléctrica relativa, este dato puede ser computado desde la documentación técnica para una geometría definida del componente y material mediante la siguiente fórmula:

$$C = \epsilon_r^T \epsilon_0 (A/d)$$

donde **A** es el área del electrodo y **d** es la distancia entre electrodos.

Una buena aproximación de la capacidad de un cuerpo piezocerámico puede ser calculada mediante la siguiente ecuación simplificada:

$$C = \frac{\epsilon_r d^2}{t 144} (pF)$$

Donde **t** es el espesor y **d** es el diámetro en mm

Utilizando la expresión citada anteriormente obtenemos que la capacidad es de C=1.712, 96pF.

La capacidad es creada al metalizar las dos caras de la cerámica. Así, en una cara creamos un polo positivo, en la otra uno negativo y la capacidad será en gran proporción dependiente del espesor de la cerámica piezoeléctrica, que es la distancia **d**.

Densidad: $\rho = 7.74 \cdot 10^3 \text{ Kg/m}^3$

Se calcula el volumen de la pieza. Para ello primero se calcula el área y se multiplica por el espesor. El volumen toma un valor de $V=6.55 \cdot 10^{-7} \text{ m}^3$.

Dado que la densidad se define como el cociente entre la masa de un cuerpo y su volumen, se calcula la masa de la cerámica mediante estos dos datos, resultando una masa de $m=5.06\text{g}$ teóricos.

Deformación: La deformación que sufre el material cuando un esfuerzo es aplicado.

Dado que el desplazamiento cuasi-elástico viene dado por la ley de Hooke:

$$y = \frac{F}{K}$$

y que la fuerza **F** es igual a la masa **m** por la aceleración **a** que se desea medir (2ª ley de Newton), se puede deducir que la proporcionalidad entre el desplazamiento y la aceleración es:

$$y = \frac{a}{\omega_0^2}$$

donde ω_0^2 (rad/s) es la frecuencia de resonancia no amortiguada del sistema.

Se deduce de esta relación que si se diseña un acelerómetro capaz de responder rápidamente a variaciones de aceleración (ω_0 grande), entonces la amplitud de la señal de salida **x** es pequeña, y viceversa.

El desplazamiento a una aceleración de 10g y con una frecuencia de resonancia de $f_n=676.67 \text{ KHz}$ resulta de $y=3.4\mu\text{m}$.

5.4.2. Masa sísmica

La masa sísmica es un anillo metálico que se desplaza por efecto de la aceleración, y se encarga de transmitir al elemento sensor los esfuerzos transmitidos por la aceleración.

Se elige usar un anillo metálico de acero F-125, que es un acero al cromo molibdeno, similar al 34CRMO4 (1.7220) con un contenido mayor en carbono que le permite alcanzar resistencias de 80/120 kg/mm² manteniendo una buena tenacidad en piezas de secciones pequeñas.

Para calcular la tensión de salida del acelerómetro primero se debe calcular el dimensionado de la masa sísmica para conocer su masa teórica.

La masa se va a calcular para unas dimensiones de diámetro similares a las de la cerámica piezoeléctrica, eligiendo un espesor de 2mm.

Sabiendo que la densidad media del acero es de $\rho=7850 \text{ Kg/m}^3$, resulta una masa de $m=3.42\text{gr}$.

5.4.3. Tensión de salida y sensibilidad

El siguiente sistema ilustrado en la Figura 5.6 define la tensión de salida del sensor:

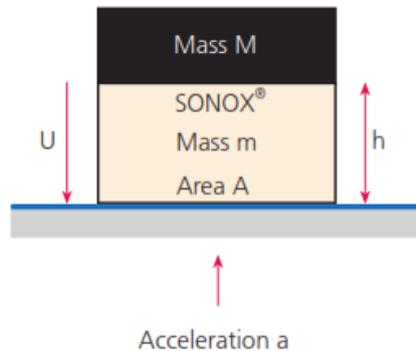


Figura 5.6: Cuerpo del acelerómetro

En la estructura de la Figura 5.7 se puede observar el material SONOX P502 de CeramTec, el cual cuenta con un masa **m** y un área **A**. El parámetro **h** corresponde al espesor del material cerámico y **U** es la tensión de salida que aporta el sistema.

Se puede observar que encima de la cerámica se posa la masa sísmica con una masa **M**. El cálculo de tensión se realiza para un contacto teórico entre la masa sísmica y la cerámica piezoeléctrica. En el diseño real entre los dos hay una capa de plata o plata-platino depositada encima de la cerámica y una capa de pasta dieléctrica que haga de aislante entre las dos.

$$U = \frac{d_{33}}{C} \left(M + \frac{m}{2} \right) a$$

La tensión que emite la cerámica depende de la capacidad entre las placas metálicas, que corresponde con las deposiciones de pasta metálica en las caras de la cerámica, de la constante de carga, y de las masas de la cerámica y de la masa sísmica. Realizando el cálculo resulta una tensión de $U=151.01\text{mV}$

También se puede definir la sensibilidad de tensión, S_v , como el voltaje por unidad de aceleración:

$$S_v = \frac{d_{33}}{C} \left(M + \frac{m}{2} \right) (\text{mV/g})$$

La sensibilidad final resulta 1.53 mV/g .

BLOQUE III: Diseño CAD

6. Diseño CAD en SolidWorks

6.1. Crear un nuevo documento de pieza

Hacer clic en Nuevo  en la barra de herramientas Estándar.

Aparece el cuadro de diálogo Nuevo documento de SolidWorks. Seleccionar el icono Pieza como se muestra en la Figura 6.1.

Hacer clic en Aceptar.

Aparece una nueva ventana de documento de pieza.

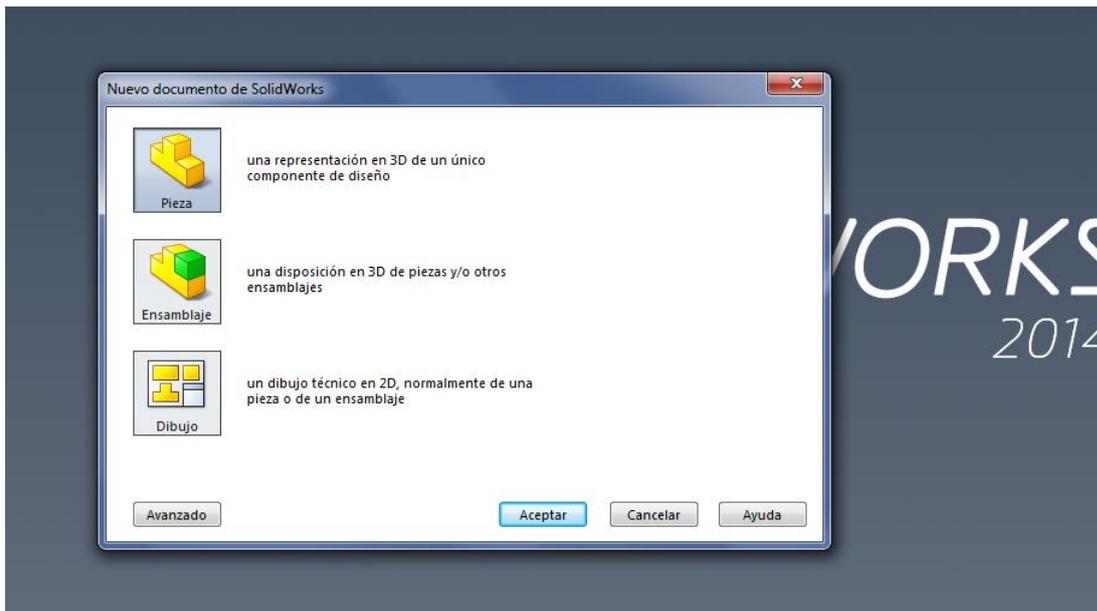


Figura 6.1: Diálogo de nuevo documento.

La operación Base requiere:

- Plano de croquis – Front (Alzado) (plano predeterminado)
- Perfil de croquis – Rectángulo 2D
- Tipo de operación – Operación Extruir saliente

6.1.1. Abrir un croquis:

- Hacer clic para seleccionar el plano 'Alzado' en el gestor de diseño del FeatureManager.
- Abrir un croquis 2D. Hacer clic en Croquis  en la barra de herramientas Croquis.

6.1.2. Croquizar un rectángulo

- Hacer clic en Rectángulo  en la barra de herramientas Croquis.
- Hacer clic en el origen de croquis para iniciar el rectángulo como se ve en la Figura 6.2.
- Mover el cursor hacia arriba y hacia la derecha para crear un rectángulo.
- Volver a hacer clic en el botón del ratón para completar el rectángulo.

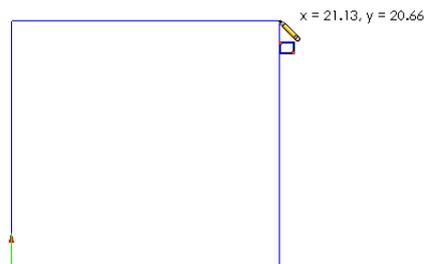


Figura 6.2: Rectángulo croquizado.

6.1.3. Agregar cotas

- Hacer clic en Cota inteligente  en la barra de herramientas Cotas/Relaciones.
- La forma del cursor pasa a ser .
- Hacer clic en la línea superior del rectángulo.
- Hacer clic en la ubicación del texto de cota arriba de la línea superior. Aparece el cuadro de diálogo Modificar, representado en la Figura 6.3.
- Escribir 22. Haga clic en  o pulse Enter.
- Hacer clic en la esquina derecha del rectángulo.
- Hacer clic en la ubicación del texto de cota. Escribir 3. Haga clic en .
- El segmento superior y el resto de los vértices aparecen en color negro. La barra de estado de la esquina inferior derecha de la ventana indica que el croquis está completamente definido.
- Las cotas se introducen en milímetros.

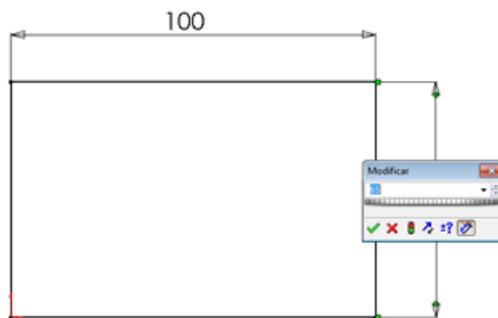


Figura 6.3: Rectángulo acotado.

6.1.4. Extruir la operación Base.

La primera operación de cualquier pieza se denomina operación Base. En este diseño, la operación Base se crea extruyendo el rectángulo croquizado.

- Hacer clic en Extruir saliente/base  en la barra de herramientas Operaciones.

Si se realiza una vista preliminar de la Figura 6.4 se puede observar en ellos:

- una vista preliminar de la operación en la profundidad predeterminada.
- asas  que pueden utilizarse para arrastrar la vista preliminar a la profundidad deseada. Las asas aparecen en magenta para la dirección activa y en gris para la dirección inactiva. Una anotación en forma de regla muestra el valor de la profundidad actual.

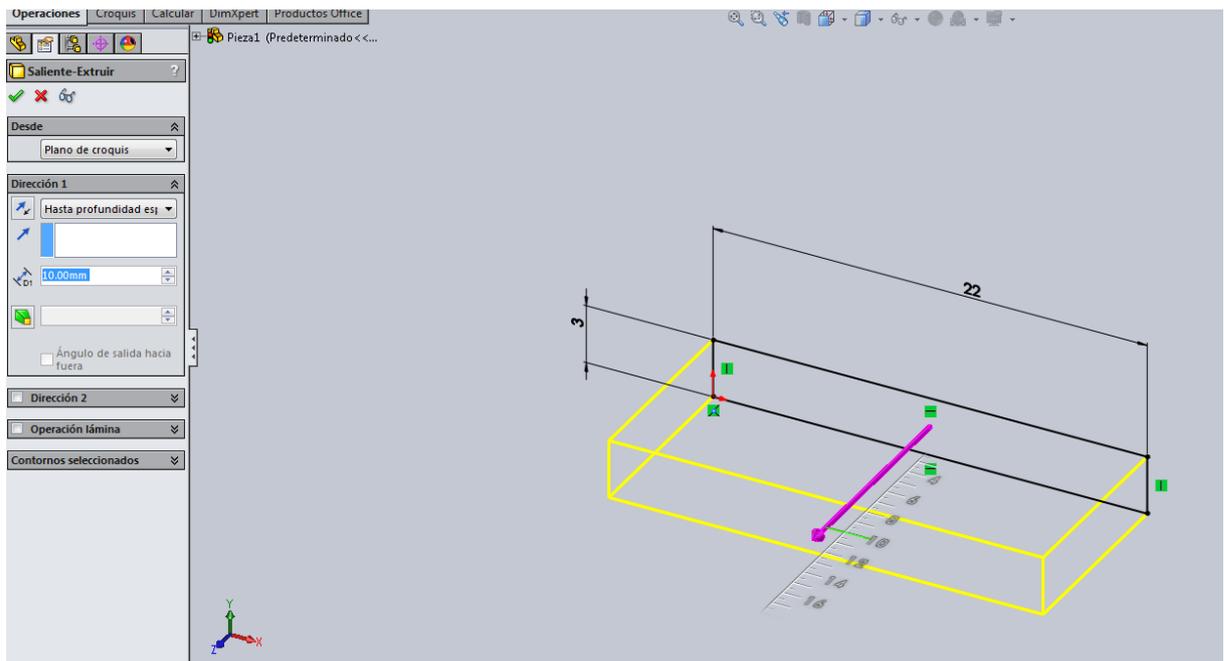


Figura 6.4: Extrusado del rectángulo.

Se modifican los parámetros tal como se indica a continuación en el box que representa la Figura 6.5.

- Condición final = Hasta profundidad especificada
- (Profundidad) = 22

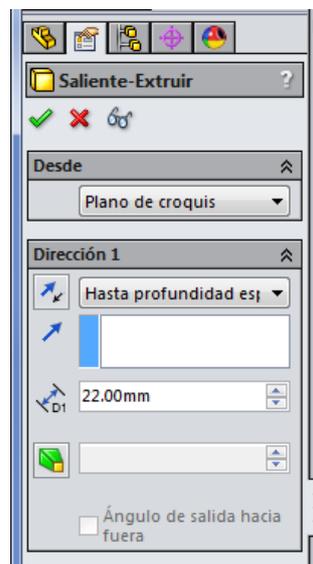


Figura 6.5: Confirmación de profundidad.

Haciendo clic en aceptar quedaría el diseño de la siguiente manera, representado en la Figura 6.6:

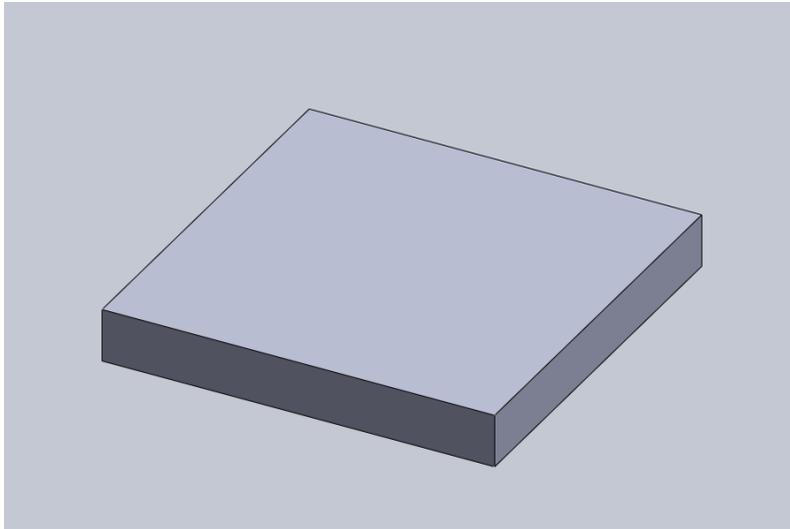


Figura 6.6: Rectángulo de 22mm*22mm*3mm.

Se cambia el modo de visualización haciendo clic en Líneas ocultas visibles  en la barra de herramientas Ver, como se puede observar en la Figura 6.7.

El comando Líneas ocultas visibles le permite seleccionar las aristas posteriores ocultas de la caja.

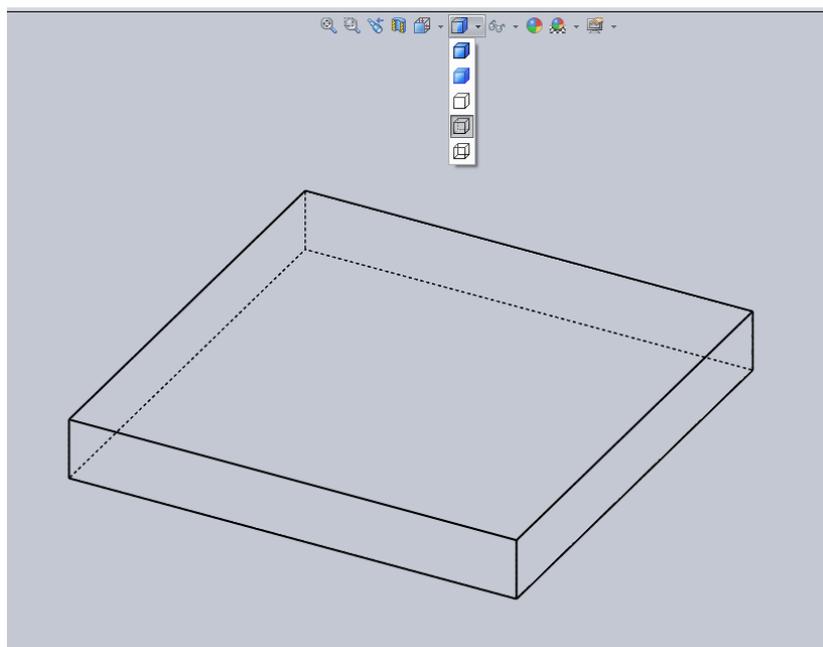


Figura 6.7: Visualización en modo líneas ocultas visibles.

6.1.5. Redondear las esquinas de la pieza

Se van a redondear las aristas de las cuatro esquinas de la pieza. Todos los redondeos tienen el mismo radio (11 mm). Para ello:

- Hacer clic en Redondeo  en la barra de herramientas Operaciones. Aparece el PropertyManager Redondeo.
- Escriba 11 en Radio.
- Seleccionar Vista preliminar completa resultado el modelo de la Figura 6.8.
- Mantener los demás parámetros con sus valores predeterminados

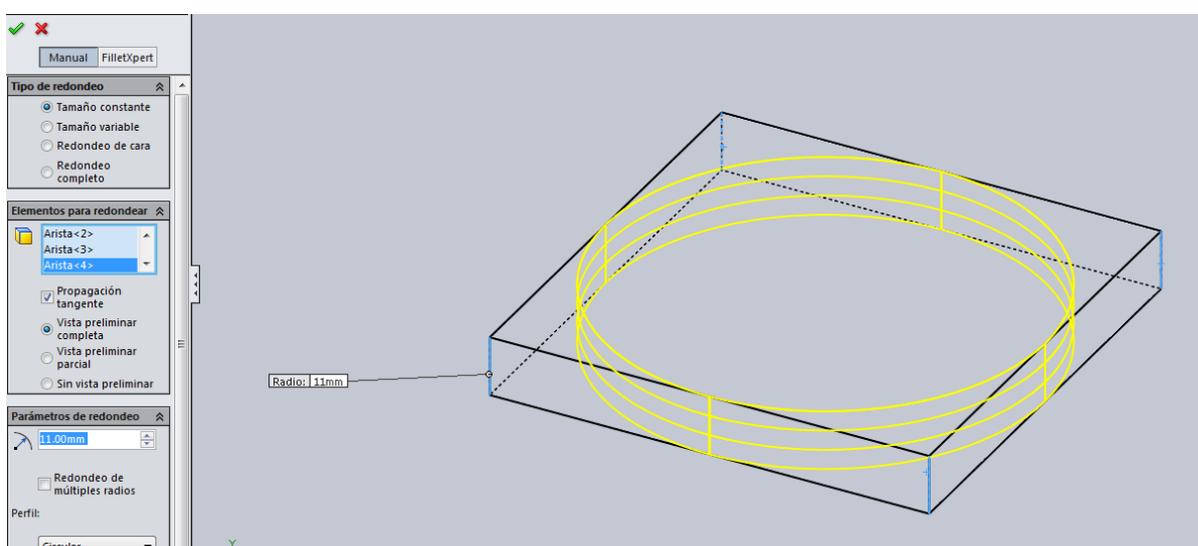


Figura 6.8: Vista preliminar de el redondeo de aristas.

6.1.6. Operación Extruir corte

La operación Extruir corte elimina material. Para extruir un corte:

- Seleccionar el plano de croquis haciendo clic en la cara superior de la pieza box (caja).
- Hacer clic en Derecha  en la barra de herramientas Vistas estándar.

Se activa la vista de la pieza box. La cara del modelo seleccionado se encuentra de frente.

- Abrir un croquis 2D. Haga clic en Croquis  en la barra de herramientas Croquis
- Hacer clic en Círculo  en la barra Herramientas de croquizar.

- Colocar el cursor donde desea que se ubique el centro del círculo. Hacer clic con el botón izquierdo del ratón.
- Arrastrar el cursor para croquizar un círculo.
- Volver a hacer clic con el botón izquierdo del ratón para completar el círculo.
- Acote el círculo para determinar su tamaño y ubicación.
- Hacer clic en Cota inteligente  en la barra de herramientas Cotas/Relaciones.
- Acotar el diámetro. Hacer clic en la circunferencia del círculo. Hacer clic en una ubicación para el texto de cota en la esquina superior derecha. Escribir 14.35 y el resultado es el mostrado en la Figura 6.9.

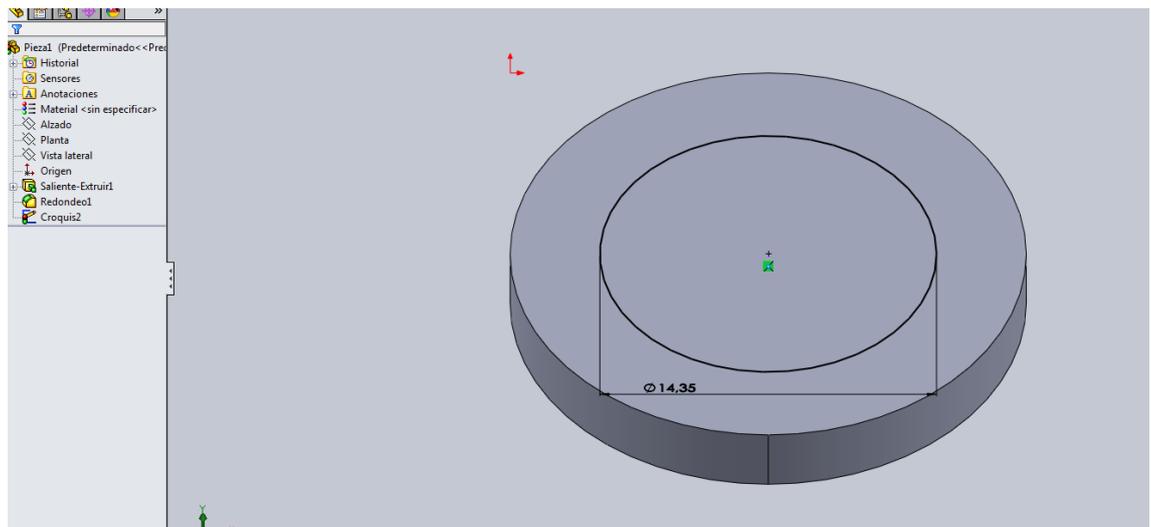


Figura 6.9: Acotación del círculo central.

- Hacer clic en Extruir corte  en la barra de herramientas Operaciones. Aparece el PropertyManager Extruir.
- Seleccionar 'Por todo' para obtener la condición final.
- Haga clic en  y el material que rodea el círculo será eliminado como se muestra en la Figura 6.10.

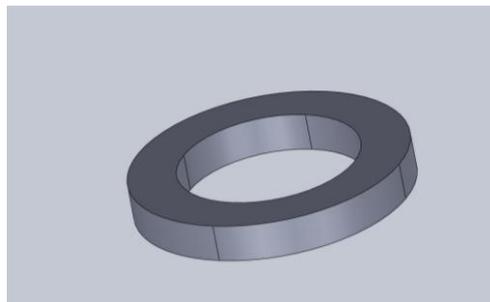


Figura 6.10: Piezocerámica.

Siguiendo esta pauta de diseño se crean las principales piezas que conforman el sensor, ilustradas en la Figura 6.11.

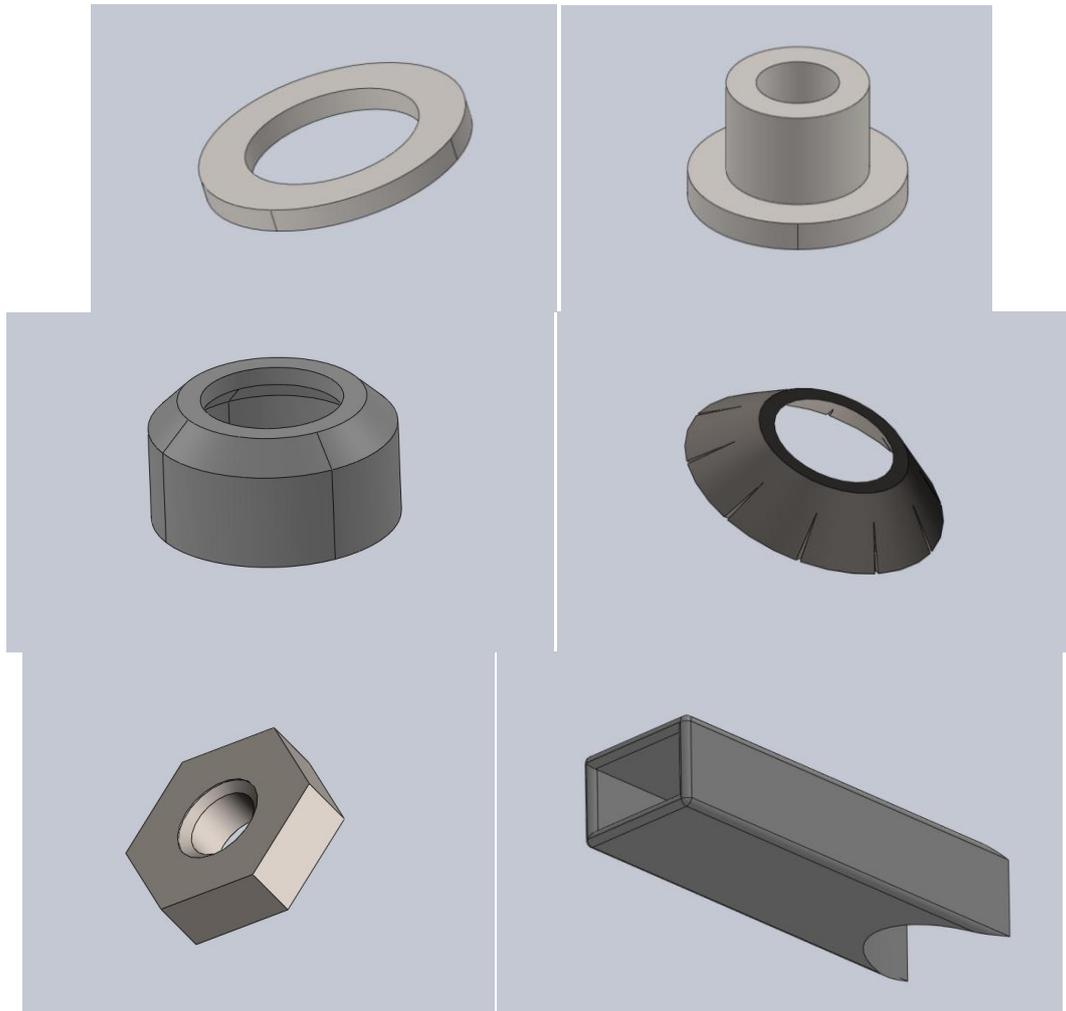


Figura 6.11: Diferentes piezas diseñadas.

7. Conclusiones y consideraciones finales

Tras el cálculo y estudio del sensor y su entorno se extraen las siguientes conclusiones:

- El sensor, con las dimensiones de la masa sísmica con las que se han realizado los cálculos tiene una sensibilidad muy baja, con lo cual se da como no apto de cara a una validación de producto. Se ha de trabajar en el dimensionado de la masa sísmica, puesto que aumentando su volumen, se aumenta su masa, que es un dato clave en la sensibilidad del sensor, con el objetivo de llegar a una sensibilidad media competente en el mercado (22mV/g). La masa sísmica no deberá de ser mayor de 50*50mm.
- Cuanto mayor sea la frecuencia de resonancia, la respuesta del sistema será más rápida.

-
- Los valores obtenidos mediante cálculo están dentro de la media de los dispositivos del mercado, con lo cual se puede establecer como base para poder desarrollar un producto eficiente y competente en el futuro.
 - Para que la cerámica sea polarizada se ha de depositar en cada una de sus caras una capa de pasta metálica que tiene un espesor de 10 micras aproximadamente. Se propone depositar una plata-platino, en concreto la 1076SD de Heraeus, debido a que tiene una mayor compatibilidad con la deposición de estaño que la plata normal.
 - La cerámica no puede estar en contacto con la masa sísmica ni con la base. Se propone depositar una pasta dieléctrica que cubra completamente la pasta metálica para aislarla en cada una de sus caras, concretamente la pasta IP9229 de Heraeus.
 - El conector se ha de diseñar según especificaciones de cliente (cable ó conector macho).
 - Los terminales han de ir soldados a la capa de plata mediante estaño. En ocasiones, se deposita algún epoxy dopado con plata, no obstante, la resina tiende a amortiguar los movimientos, por lo tanto se escoge el estaño para tratar de evitar estos efectos.
 - Se escoge un polipropileno copolímero para conformar la cápsula debido a sus propiedades de resistencia mecánica.
 - En futuros desarrollos se va a tratar de hacer un estudio de frecuencia, para completar una gráfica sensibilidad-frecuencia.

8. Bibliografía

[1] Piezo composites metal-cerámica como elementos activos en acelerómetros. P. Ochoa, M.Villegas

[2] Piezo electric ceramic sensor. Murata

[3] Materiales piezoeléctricos y efecto piezoeléctrico. Adolfo F. Gonzalez, Ricardo M. Cesari

[4] PI piezoelectric ceramics products. PI

[5] Guía del estudiante para el aprendizaje del software SolidWorks. SolidWorks corporation

[6] knock sensors. FAE

[7] Advanced ceramics in piezo applications. CeramTec

[8] Motores de combustion interna alternatives

[9] Electroceramics - Materials, Properties, Applications, Second Edition - A.J.Moulson, J.M.Herbert

[10] Designs of knock sensor and piezoaccelerometers

[11] Signals conditioning for piezoelectric sensors