



UNIVERSIDAD PONTIFICIA COMILLAS

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA (ICAI)

INGENIERÍA EN AUTOMÁTICA Y ELECTRÓNICA INDUSTRIAL

**PROYECTO FIN DE CARRERA**

DISEÑO Y DESARROLLO DEL

PROTOTIPO DE UN SENSOR

BASADO EN MATERIALES

PIEZOELÉCTRICOS

DAVID COSÍN ANDRADAS

MADRID, junio de 2006

Autorizada la entrega del proyecto al alumno:

David Cosín Andradas

EL DIRECTOR DEL PROYECTO

Oscar López García

Fdo:

Fecha: 20 - 06 - 06

Alberto Carnicero López

Fdo:

Fecha: 20 - 06 - 06

Vº Bº del Coordinador de Proyectos

Álvaro Sánchez Miralles

Fdo:

Fecha: 20 - 06 - 06

## Resumen

### DISEÑO Y DESARROLLO DEL PROTOTIPO DE UN SENSOR BASADO EN MATERIALES PIEZOELÉCTRICOS.

**Autor: Cosín Andradas, David**

Directores: López García, Oscar y Carnicero López, Alberto

Entidad Colaboradora: ICAI – Universidad Pontificia Comillas.

En 1880 Jacques y Pierre Curie descubrieron que cuando se someten ciertos minerales cristalinos a fuerzas mecánicas, se observa como se polarizan eléctricamente. La tensión y compresión del material piezoeléctrico genera tensiones de polaridad opuesta. La tensión es proporcional a la fuerza aplicada. Cuando se exponen estos cristales a un campo eléctrico surgen tensiones elásticas en el material, alargándose o encogiéndose según la polaridad del campo eléctrico. Estos comportamientos se llaman *efecto piezoeléctrico* y *efecto piezoeléctrico inverso*. Un material piezoeléctrico tiene perfectamente definida la relación entre el comportamiento eléctrico y el comportamiento mecánico. Este es el principio en que se basara el funcionamiento del sensor.

Las cerámicas piezoeléctricas pueden ser cientos de veces más sensibles a entradas eléctricas o mecánicas, que los materiales naturales, y se les puede dar la forma deseada para un propósito concreto. Las cerámicas piezoeléctricas son muy fuertes, químicamente inertes e inmunes a la humedad y otras influencias atmosféricas.

Gracias las propiedades de estos materiales se lleva tiempo estudiando su posible uso en nuevas aplicaciones. En este proyecto se estudiara su uso como sensor en transformador de voltaje, intentando obtener con precisión una tensión proporcional y menor a la que se desea medir en una línea de alta tensión.

Las ventajas que introducen los transformadores piezoeléctricos es que son menos pesados, no emiten ruido electromagnético. Tampoco poseen anillos por lo que tampoco existe la posibilidad de cortocircuito entre los anillos , y que son muy

eficientes si se trabaja a la frecuencia de resonancia. Otra ventaja es que no hay peligro de incendio.

Los objetivos de este proyecto se pueden resumir en el estudio del comportamiento de los materiales piezoeléctricos, y una vez estudiado el comportamiento, se realizara un modelo numérico para obtener una estimación de la medida y poder tomar decisiones sobre su diseño. A continuación se construirá un prototipo del sensor.

El sensor consistirá en una estructura cilíndrica en cuyos extremos se situaran los materiales piezoeléctricos. Se excitara el emisor con la tensión periódica que se desea medir, la cual provocara vibraciones mecánicas en el material. Estas vibraciones se transmitirán a través de la estructura y del fluido hasta llegar al receptor. Estas vibraciones serán transformadas en una señal eléctrica proporcional a la tensión de excitación .

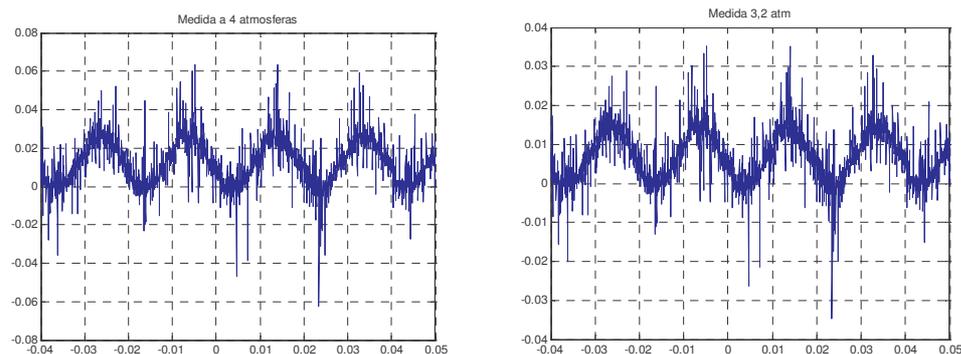
Como fase previa para la realización del prototipo se ha realizado un modelo numérico sencillo, el cual recoge la dinámica de los materiales piezoeléctricos, transmisión de ondas a través de un fluido y la transmisión de ondas a través de la estructura. Este modelo numérico nos ayudara a fijar los parámetros necesarios para la realización del sensor.

A continuación se diseño el prototipo para obtener una señal lo suficientemente grande como para ser medida y discriminar el ruido. Una vez pensada cual podría ser la estructura mas sencilla para la construcción del sensor (cilindro, 2 anillos de sujeción y 2 discos metálicos), hubo que pensar en soluciones para poder sacar los cables del emisor y del receptor sin que se perdiese presión interior. Otra parte importante del diseño fue como resolver el problema de aislamiento eléctrico del sensor, ya que este sensor trabaja con tensiones elevadas. El problema de presurización se resolvió sacando los cables entre dos juntas de goma, las cuales están comprimidas por un anillo de sujeción y un disco metálico para garantizar la presión estable dentro del cilindro. El aislamiento eléctrico se realizo mediante discos de goma de diferentes diámetros de tal forma que ningún componente eléctrico estuviese en contacto con el cilindro metálico. Esta solución también permite centrar los discos piezoeléctricos del sensor en la estructura cilíndrica evitando la perdida señal.

A continuación se realizaron los planos del prototipo del sensor con la herramienta Solid Edge V17, necesarios para el posterior mecanizado de las piezas y para su construcción indicando la manera en que tenían que ir ensambladas.

También se tuvo que elegir entre los diferentes materiales piezoeléctricos existentes en el mercado para estudiar cuales eran los que mas adecuados para el sensor. La elección del material piezoeléctrico también se baso en el modelo numérico, ya que este indicaba que el material piezoeléctrico adecuado debía tener una constante de carga piezoeléctrica en el receptor lo mayor posible, y que la salida era inversamente proporcional al espesor del emisor.

Una vez construido el sensor se realizaron las pruebas del mismo, conectándolo a una tensión alterna de 220 V de amplitud y a una frecuencia de 50 Hz. Las medidas se realizaron con el osciloscopio Tektronics A1000 obteniendo los siguientes resultados:



Han sido cumplidos gran parte de los objetivos propuestos en el proyecto, ya que se ha realizado y programado un modelo numérico en matlab. Gracias a este modelo se han podido tomar todas las decisiones necesarias para realización del sensor. Este proyecto puede ser continuado y mejorado en años sucesivos ya que es un campo interesante y novedoso el que ofrecen los materiales piezoeléctricos.



## Summary

### DISEÑO Y DESARROLLO DEL PROTOTIPO DE UN SENSOR BASADO EN MATERIALES PIEZOELÉCTRICOS.

In 1880 Jacques and Pierre Curie discovered that when they subject certain crystalline minerals to a mechanical force, the crystals became electrically polarised. Tension and compression generated voltages of opposite polarity, and the voltage was proportional to the force applied. When such crystals are exposed to an electric field they experience an elastic strain, and lengthened or shortened according to the polarity of the field. These behaviours are labelled the *piezoelectric effect* and the *inverse piezoelectric effect*. A piezoelectric ceramic has perfectly defined the relationship between the electric behaviour and the mechanical behaviour. This is the principle in which the sensor is based.

Piezoelectric ceramics could be hundreds of times more sensitive to electrical or mechanical inputs, than natural materials, and the composition, shape, and dimensions of a ceramic can be tailored to meet the requirements of a specific purpose. Piezoelectric ceramics are physically strong, chemically inert, and immune to humidity or other atmospheric influences.

Thanks to the properties of these materials, many times is being used to study its possible uses in new applications. In this project we will study its possible use in voltage measuring, obtaining with precision a lower proportional voltage than the voltage that we want to measure.

Piezoelectric transformers offer certain advantages. They are generally lighter and there is no fire hazard, and they do not emit electromagnetic noise. They do not have the possibility of short-circuit in their rings. They are very efficient if they work at the resonant frequency.

The aims of this project can be summed up in the study of the piezoelectric behaviour, after that we realise a numeric model to obtain a measure estimation. Then we will fix all the parameters of the design and we will realise the sensor.

Then we have realised the better design to obtain a good measure without noise. The simplest structure consists of one cylinder, two rings and two metallic disks, we have

to think in the solution to take out the wires of the emitter and the receptor, and the solution to support the inside pressure. Another problem is the electrical isolator. To maintain the inside pressure we have used two rubbers. We have take out the wire between the two rubbers, then they are compressed with the ring and the metallic disk. The electrical isolator have been managed with rubber disks of different diameters. This solution permit us to centre the piezoelectric disk in the structure.

Then we have realised the mechanical and installation drawing with the program Solid Edge V17.

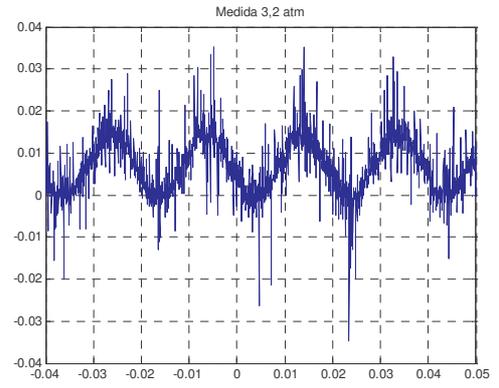
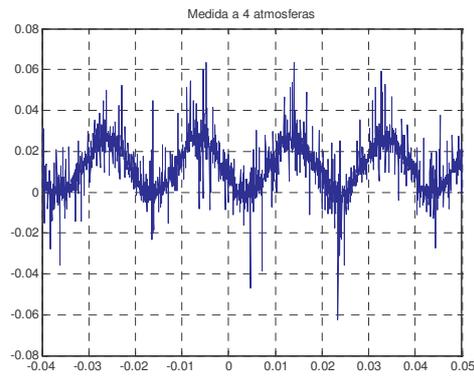
Also we have to choose between the different piezoelectric materials which are available. This selection is based in the numeric model. This model shows that we need a piezoelectric material with a high piezoelectric charge for the receptor. And that the output is inversely proportional to the emitter thickens.

The test has been realised with voltages near 220 V at 50 Hz. This will affect to our measure because the vibrations will be lower.

The aims of the project have been realised because we have realised a numeric model and we have programmed this model with matlab. Thanks to this model I have fix all the parameters of the design.

This project can be continued and improved next year because it is based in a new and interesting materials.

The results of the project are:



## Índice

<b>1</b>	<b>INTRODUCCION.....</b>	<b>2</b>
1.1	Motivación del proyecto.....	2
1.2	Objetivos del proyecto.....	2
<b>2</b>	<b>INTRODUCCIÓN A LOS MATERIALES PIEZOELÉCTRICOS.....</b>	<b>4</b>
2.1	Introducción.....	4
2.1.1	<i>Constantes piezoeléctricas</i> .....	5
2.1.1.1	Constante de carga piezoeléctrica.....	6
2.1.1.2	Permitividad.....	6
2.1.1.3	Constante de voltaje Piezoeléctrico.....	6
2.1.1.4	Flexibilidad elástica.....	6
2.1.1.5	Modulo de Young.....	7
2.1.1.6	Factor de enganche electromecánico.....	7
2.1.1.7	Factor de disipación dieléctrica.....	7
2.1.1.8	Constante Frecuencia.....	8
2.1.1.9	Dependencia térmica de las constantes piezoeléctricas.....	8
2.1.2	<i>Comportamiento de un elemento cerámico piezoeléctrico</i> .....	8
2.1.2.1	Entrada de baja frecuencia.....	8
2.1.2.2	Comportamiento dinámico (Entrada de alta frecuencia).....	9
2.1.3	<i>Estabilidad</i> .....	11
2.1.3.1	Depolarización eléctrica.....	11
2.1.3.2	Depolarización mecánica.....	11
2.1.3.3	Depolarización térmica y los efectos piroeléctricos.....	12
2.1.4	<i>Cerámicas blandas contra cerámicas duras</i> .....	12
2.1.5	<i>Nuevos materiales.</i> .....	13
2.1.5.1	Materiales con difusión. Transición de fase (Relaxors).....	13
2.1.5.2	Elementos piezoeléctricos monocristalinos.....	13
2.1.5.3	PVDF.....	13
2.1.5.4	Laminas delgadas.....	14
2.1.5.5	Fotostricción.....	14
<b>2.2</b>	<b>GENERADORES.....</b>	<b>14</b>
2.2.1	<i>Entrada estática</i> .....	14
2.2.1.1	Sistema en circuito abierto.....	14
2.2.1.2	Sistema en cortocircuito.....	15
2.2.1.3	Generar energía eléctrica sin depolarizar el generador.....	16
2.2.1.4	Aplicaciones de un solo uso: Depolarizar el generador.....	16
2.2.2	<i>Entrada dinámica</i> .....	16

2.2.3	<i>Baterías en estado sólido</i>	16
2.3	<b>SENSORES</b>	17
2.3.1	<i>Sensores Axiales</i>	17
2.3.2	<i>Sensores flexibles</i>	20
2.3.2.1	Constantes de tiempo	21
2.3.3	<i>Efectos de la temperatura</i>	21
2.3.3.1	Dependencia térmica de las constantes piezoeléctricas	21
2.3.3.2	Efecto piroeléctrico	22
2.3.4	<i>Diseños para un propósito especial</i>	22
2.3.4.1	Compuestos	22
2.3.4.2	Cables sensores	22
2.3.4.3	Sensores táctiles	22
2.3.4.4	Sensor Breeze	23
2.3.4.5	Sensores Surface Acoustic Waves	23
2.4	<b>ACTUADORES</b>	24
2.4.1	<i>Actuadores axiales y transversales</i>	24
2.4.1.1	Actuadores axiales y transversales simples	24
2.4.1.2	Actuadores axiales compuestos	25
2.4.1.3	Actuadores multilámina	26
2.4.1.4	Actuadores multilámina Pseudohear	26
2.4.1.5	Actuador apilado	27
2.4.2	<i>Actuadores Flexibles</i>	28
2.4.2.1	Actuadores Stripe	28
2.4.2.2	Actuador Widthwise Bending	28
2.4.2.3	Actuador flexible multilámina	29
2.4.3	<i>Aplicaciones para los actuadores piezoeléctricos</i>	29
2.4.3.1	Motores piezoeléctricos	29
2.4.3.2	Bombas piezoeléctricas	30
2.4.3.3	Aplicaciones para actuadores flexibles	30
2.5	<b>TRANSDUCTORES</b>	31
2.5.1	<i>Transductor de sonido audible</i>	31
2.5.1.1	Helmholtz Resonators	33
2.5.1.2	Presión sonora	34
2.5.1.3	Conexiones eléctricas	34
2.5.2	<i>Generar vibraciones ultrasónicas en líquidos o sólidos</i>	36
2.5.2.1	Limpieza ultrasónica: discos transductores	36
2.5.2.2	Limpieza ultrasónica: transductores compuestos	36
2.5.2.3	Material compuesto con esfuerzos iniciales: transductores ultrasónicos	37
2.5.2.4	Cavitación	37
2.5.2.5	Aplicaciones adicionales para las vibraciones ultrasónicas	37
2.5.3	<i>Transmisión de señales ultrasónicas</i>	37

2.5.3.1	Direccionalidad .....	38
2.5.3.2	Medida de distancias en el aire .....	38
2.5.3.3	Transmisión de señales ultrasónicas en agua.....	39
2.5.3.4	Transductores de baja frecuencia.....	39
2.5.3.5	Transductores de alta frecuencia: Tonpilz Transducer .....	40
2.5.3.6	Transductores ultrasónicos para diagnósticos médicos.....	40
2.5.3.7	Medidores de Flujo .....	40
2.5.3.8	Transformadores .....	41
<b>3</b>	<b>TRANSFORMADORES DE MEDIDA CONVENCIONALES.....</b>	<b>43</b>
3.1	Relación de voltaje a través de un transformador .....	44
3.2	La corriente de magnetización en un transformador real. ....	45
3.3	Determinación de los valores de los parámetros en el modelo de transformador.....	46
3.4	Ccaracterísticas particulares de los transformadores de corriente .....	48
3.5	Características particulares de los transformadores de tensión.....	50
3.6	Pérdidas en un transformador.....	51
<b>4</b>	<b>TRANSFORMADORES DE MEDIDA INTELIGENTES .....</b>	<b>53</b>
4.1	Modelo de un transformador piezoeléctrico.....	54
4.2	Perdidas en un transformador piezoeléctrico .....	57
<b>5</b>	<b>MODELO NUMÉRICO.....</b>	<b>60</b>
5.1	Introducción al problema .....	60
5.2	Solución del problema .....	62
5.2.1	<i>Guía cilíndrica de ondas con paredes rígidas</i> .....	62
5.2.2	<i>Guía de ondas fluido-estructura acoplado</i> .....	67
5.2.2.1	Ecuaciones emisor .....	67
5.2.2.2	Ecuaciones fluido .....	68
5.2.2.3	Ecuaciones del receptor.....	69
5.2.2.4	Ecuaciones de la estructura.....	71
5.2.2.5	Resolución del problema.....	71
5.3	Resultados obtenidos .....	73
<b>6</b>	<b>DISEÑO DEL PROTOTIPO.....</b>	<b>87</b>
<b>7</b>	<b>PRUEBAS.....</b>	<b>89</b>
<b>8</b>	<b>CONCLUSIONES Y FUTURAS VIAS PARA UN MEJOR DESARROLLO DEL MODELO NUMÉRICO.....</b>	<b>90</b>
<b>9</b>	<b>PLIEGO DE CONDICIONES GENERALES Y ECONÓMICAS .....</b>	<b>91</b>

---

9.1	Objetivo del pliego .....	91
9.2	Condiciones generales. ....	91
9.2.1	<i>Comienzo de los trabajos:</i>	93
9.2.2	<i>Programa de trabajo</i>	93
9.2.3	<i>Desarrollo de los trabajos</i>	93
9.2.4	<i>Omisiones, contradicciones o errores</i>	94
9.2.5	<i>Contradicciones entre el proyecto y la legislación administrativa general</i>	95
9.2.6	<i>Contradicciones entre el proyecto y la norma técnica</i>	95
9.2.7	<i>Cambios en el proyecto, o en los trabajos</i>	95
9.2.8	<i>Instalación incompleta</i>	96
9.2.9	<i>Instalaciones defectuosas</i>	96
9.2.10	<i>Plazo de garantía</i>	97
9.2.11	<i>Liquidación de la instalación</i>	97
9.2.12	<i>Condiciones económicas</i>	98
9.3	Pliego de condiciones técnicas y particulares .....	98
9.3.1	<i>Normas de calidad</i>	98
9.3.2	<i>Normas de seguridad e higiene</i>	99
9.3.3	<i>Vida útil del producto</i>	99
9.4	Alcance del suministro .....	99
9.4.1	<i>Pruebas en fábrica</i>	99
9.4.2	<i>Puesta en marcha</i>	99
<b>10</b>	<b>ESTUDIO ECONOMICO .....</b>	<b>100</b>
10.1	Honorarios .....	100
10.2	Gastos directos.....	100
10.3	Gastos indirectos .....	101

## Índice de Figuras

Figura 2.1: Dirección de fuerzas que afectan a un elemento piezoeléctrico	5
Figura 2.2: Circuito eléctrico equivalente	9
Figura 2.3: Impedancia como función de la frecuencia	9
Figura 2.4: Circuito equivalente de un transductor	10
Figura 2.5: Circuito eléctrico equivalente de un acelerómetro axial	19
Figura 2.6 : Sensibilidad de un acelerómetro como función de la frecuencia	19
Figura 2.7: Acelerómetro Center-mounted	20
Figura 2.8: Acelerómetros Shear – based	20
Figura 2.9: Sensor flexible	21
Figura 2.10: Actuador multilámina	27
Figura 2.11: Circuito eléctrico equivalente	32
Figura 2.12: Transductor de sonido	32
Figura 2.13: Resonador Helmholtz incorporado en un transductor de sonido	33
Figura 2.14: Ancho de banda	33
Figura 2.15: Amplification type Drive Circuit	34
Figura 2.16: Two step amplification in load resistance drive circuit	34
Figura 2.17: Amplification-type drive circuit:load inductance	35
Figura 2.18: Amplification-type drive circuit: complementary	35
Figura 2.19: Oscillation-type: integrated circuits	35
Figura 2.20: Oscillation-type: RC	35
Figura 2.21: Oscillation-type: multivibrador	35
Figura 2.22: Oscillation-type: blocking	35
Figura 2.23: Drive circuit with booster coil	36
Figura 2.24: Dirección de un transductor ultrasónico	39
Figura 2.25: Transformador piezoeléctrico tipo Rosen	41
Figura 2.26: Circuito eléctrico equivalente de un transformador tipo Rosen	42
Figura 2.27: Modificaciones para mejorar la fuerza mecánica	42
Figura 3.1: Modelo de un transformador ideal	43
Figura 3.2: Modelo de un transformador real	46
Figura 4.1: Modelo de un transformador piezoeléctrico	54
Figura 4.2: Modelo avanzado de un transformador piezoeléctrico	55
Figura 4.3: Circuito equivalente con los terminales de salida cortocircuitados	56
Figura 5.1: Esquema de la guía cilíndrica	62
Figura 5.2: Guía de onda fluido-estructura	67

1

MEMORIA

---

## 1 INTRODUCCION

Este proyecto se basa en un proyecto anterior muy parecido, IELAS. El proyecto IELAS consistía en un sensor de tensión como el que se desarrolla en nuestro proyecto con la diferencia de que el emisor estaba constituido por un material magnetostrictivo y el receptor estaba formado por un material piezoeléctrico. En este proyecto se usaran materiales piezoeléctricos tanto en el emisor como en el receptor.

Como primera parte para la realización de este proyecto se hizo un estudio previo sobre los materiales piezoeléctricos. Para la realización de este estudio previo se uso el libro "Piezoelectric ceramics: principles and applications" de la editorial APC.

Para la elaboración de un modelo numerico que tuviera en cuenta las vibraciones en estructuras se uso el libro "Dynamics of Structures" de RayW. Clough y Joseph Penzien y el libro " "

### 1.1 Motivación del proyecto

La motivación principal por la que he escogido este proyecto es, porque me parecía interesante realizar un proyecto que utilice materiales novedosos, como los materiales piezoeléctricos, que se están empezando a utilizar en muchas aplicaciones. Otra razón para haber escogido este proyecto es que no solo se reduce ha hacer un modelo numérico, sino que se intentara realizar un prototipo del sensor.

Este sensor tiene una serie de ventajas como que es menos pesado, no emiten ruido electromagnético. Tampoco poseen anillos por lo que tampoco existe la posibilidad de cortocircuito entre los anillos , y son muy eficientes si se trabaja a la frecuencia de resonancia. Otra ventaja es que no hay peligro de incendio.

### 1.2 Objetivos del proyecto

El objetivo principal del proyecto es realizar un modelo numérico para evaluar la posible salida del sensor si se varían todos los parámetros. Es decir como varia la señal de salida que proporciona el sensor, si variamos el fluido dieléctrico, su presión, la longitud o el diámetro del sensor. Esta parte del proyecto es muy importante para

---

realizar el prototipo. Si se consigue este objetivo, se fijaran todos los parámetros de diseño del sensor y se intentara realizar un prototipo del sensor.

## 2 INTRODUCCIÓN A LOS MATERIALES PIEZOELÉCTRICOS

### 2.1 Introducción

En 1880 Jacques y Pierre Curie descubrieron que cuando se someten ciertos minerales cristalinos a fuerzas mecánicas, se observa como se polarizan eléctricamente. La tensión y compresión del material piezoeléctrico genera tensiones de polaridad opuesta. La tensión es proporcional a la fuerza aplicada. Cuando se exponen estos cristales a un campo eléctrico surgen tensiones elásticas en el material, alargándose o encogiéndose según la polaridad del campo eléctrico. Estos comportamientos se llaman *efecto piezoeléctrico* y *efecto piezoeléctrico inverso*.

Con el paso de los años el hombre ha conseguido crear materiales piezoeléctricos con mayor sensibilidad y mayor temperatura de funcionamiento a partir de óxidos metálicos, lo que ha permitido utilizar el efecto piezoeléctrico en muchas nuevas aplicaciones. Un material cerámico tradicional tiene una estructura perovskite, la cual consta de un ion metálico tetravalente, normalmente titanio o zirconio, en una reja de iones metálicos divalentes, normalmente bario y  $O_2$ .

Las cerámicas piezoeléctricas pueden ser cientos de veces más sensibles a entradas eléctricas o mecánicas, que los materiales naturales, y se les puede dar la forma deseada para un propósito concreto. Las cerámicas piezoeléctricas son muy fuertes, químicamente inertes e inmunes a la humedad y otras influencias atmosféricas. Para la fabricación de una cerámica piezoeléctrica solo se tienen que echar las proporciones justas de cada material, se calienta para lograr una mezcla uniforme. A continuación es prensada y modelada formando elementos estructurales. Se enfrían, se terminan de pulir y de dar forma, y por último, se les colocan los electrodos en las superficies deseadas.

Estas cerámicas a temperaturas por debajo del punto de Curie tienen un momento dipolar, mientras que a temperaturas por encima del punto de Curie, no existe momento dipolar.

Inicialmente los momentos dipolares de cada material cerámico están orientados aleatoriamente, por lo que el material no está polarizado. Si exponemos el material a un campo eléctrico fuerte los momentos dipolares se alinean en la dirección del campo.

Cuando desaparece el campo los momentos se quedan alineados en esta configuración de forma permanente. Análogamente a los materiales ferromagnéticos, estos materiales también tienen ciclo de histéresis, las constantes dieléctricas son altas y son dependientes de la temperatura.

La compresión del elemento a lo largo de la dirección de polarización o la tensión perpendicular a la dirección de polarización generan voltajes de la misma polaridad. Si la tensión es aplicada a lo largo de la dirección de polarización, o el elemento es comprimido perpendicular a la dirección de polarización, el voltaje generado es inverso al anterior. De forma análoga si aplicamos a un material un voltaje en la dirección de polarización se observa como el material cerámico se alarga estrechándose en el centro.

Se dice que los materiales piezoeléctricos se comportan como generadores cuando transforman la energía mecánica en energía eléctrica. Y se comportan como motores cuando transforman energía eléctrica en energía mecánica.

### 2.1.1 Constantes piezoeléctricas

Como la cerámica piezoeléctrica es un material anisotrópico, las constantes físicas están relacionadas con las direcciones del campo eléctrico y de la fuerza mecánica aplicada. La dirección de polarización positiva se hace coincidir con el eje Z. Las direcciones X, Y, Z coinciden con los subíndices 1, 2, 3 respectivamente.

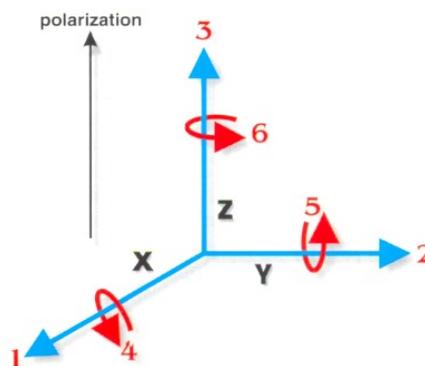


Figura 1.1 Dirección de fuerzas que afectan a un elemento piezoeléctrico

### 2.1.1.1 Constante de carga piezoeléctrica

La carga piezoeléctrica,  $d$ , es la polarización generada por unidad de presión mecánica aplicada al material. De igual manera podemos decir que es el esfuerzo mecánico que experimenta un piezoeléctrico por unidad de campo eléctrico aplicado. El primer subíndice de  $d$ , indica la dirección de polarización generada en el material cuando el campo eléctrico es cero. El segundo subíndice indica la dirección de la presión aplicada o el esfuerzo inducido.

### 2.1.1.2 Permitividad

La permitividad,  $\epsilon$ , es el desplazamiento dieléctrico por unidad de campo eléctrico.  $\epsilon^T$  es la permitividad para una presión constante y  $\epsilon^S$  es la permitividad para un esfuerzo constante. El primer subíndice indica la dirección de desplazamiento dieléctrico y el segundo indica la dirección del campo eléctrico.

### 2.1.1.3 Constante de voltaje Piezoeléctrico

La constante de voltaje piezoeléctrico,  $g$ , es el campo eléctrico generado por un material piezoeléctrico por unidad de presión mecánica o la deformación mecánica experimentada por un material piezoeléctrico por unidad de desplazamiento eléctrico. El primer subíndice indica la dirección del campo eléctrico generado en el material o la dirección del desplazamiento eléctrico aplicado. El segundo subíndice indica la dirección de la presión aplicada o la deformación inducida.

$$E = -(gT) + \frac{D}{\epsilon^T}$$

### 2.1.1.4 Flexibilidad elástica

La flexibilidad elástica es la deformación producida en un material piezoeléctrico por unidad de presión aplicada. El primer subíndice indica la dirección de la tensión, y el segundo es la dirección de la presión.  $S^D$  es la flexibilidad que se produce bajo un desplazamiento dieléctrico constante.  $S^E$  es la flexibilidad bajo un campo eléctrico constante.

### 2.1.1.5 Modulo de Young

El módulo de Young,  $Y$ , es un indicador de la rigidez del material cerámico.  $Y$ , se calcula dividiendo el valor de presión aplicado, entre la resultante de la deformación aplicada en esa dirección.

### 2.1.1.6 Factor de enganche electromecánico.

El factor de enganche electromecánico,  $k$ , es un indicador de la efectividad con la que un material piezoeléctrico convierte energía eléctrica en energía mecánica o viceversa. El primer subíndice indica la dirección en la que son aplicados los electrodos. El segundo subíndice indica la dirección en la que energía mecánica es aplicada. Para condiciones estáticas:

$$k^2 = \frac{\text{energía\_convertida}}{\text{entrada\_de\_energía}}$$

Para frecuencias por debajo de la frecuencia de resonancia:

$$k_{31}^2 = \frac{d_{31}^2}{s_{11}^E \cdot \epsilon_{33}^T} \Rightarrow \text{Plato}$$

$$k_p^2 = \frac{2 \cdot d_{31}^2}{(s_{11}^E + s_{12}^E) \cdot \epsilon_{33}^T} \Rightarrow \text{Disco}$$

$$k_{33}^2 = \frac{d_{33}^2}{s_{33}^E \cdot \epsilon_{33}^T} \Rightarrow \text{Varilla}$$

Una  $k$  alta significa una conversión de energía eficiente, porque no acumula pérdidas dieléctricas ni mecánicas.

### 2.1.1.7 Factor de disipación dieléctrica

Indica las pérdidas dieléctricas,  $\tan \delta$ , para un material cerámico es la tangente del ángulo de las pérdidas dieléctricas.  $\tan \delta$ , viene determinada por el radio de conducción efectiva y la susceptancia efectiva en un circuito en paralelo medida mediante un puente de impedancias.

### 2.1.1.8 Constante Frecuencia

Cuando un elemento cerámico es expuesto a un campo eléctrico variable, comienza a vibrar en modo radial o modo planar. La frecuencia de resonancia en modo radial, viene determinada por la relación entre la constante  $N_p$  y el diámetro del elemento cerámico. Si la vibración es en modo planar la frecuencia de resonancia viene determinada por la relación entre la constante  $N_T$  y la altura del disco cerámico.

$$N_p = f_s \cdot D_0 \qquad N_T = f_s \cdot h$$

### 2.1.1.9 Dependencia térmica de las constantes piezoeléctricas

Todas las constantes piezoeléctricas,  $g$ ,  $d$  y  $\epsilon$  dependen de la temperatura. Trabajar fuera de los rangos de temperatura puede causar cambios en la orientación de los dominios, desplazamientos de la carga y campos eléctricos que pueden impedir realizar la medida con precisión. Un cambio fuerte y rápido en la temperatura puede generar voltajes altos, lo que puede depolarizar el material o dañar algún elemento del sistema. Este problema se soluciona conectando un condensador en paralelo al elemento cerámico. El incremento en la capacidad total del sistema viene acompañado por una reducción equivalente en el coeficiente de temperatura.

## 2.1.2 Comportamiento de un elemento cerámico piezoeléctrico

### 2.1.2.1 Entrada de baja frecuencia

Para una entrada de este tipo la relación entre la fuerza aplicada y el campo eléctrico viene dada por:

$$E = -(g_{33}T) \qquad Q = -(d_{33}F)$$

Las relaciones entre el voltaje aplicado y los incrementos o decrementos en el grosor, longitud y anchura son:

$$\Delta h = d_{33}V \qquad S = d_{33}E \qquad \frac{\Delta l}{l} = d_{31}E \qquad \frac{\Delta w}{w} = d_{31}E$$

### 2.1.2.2 Comportamiento dinámico (Entrada de alta frecuencia)

Un elemento cerámico piezoeléctrico expuesto a un campo eléctrico alterno, cambiara sus dimensiones cíclicamente, según la frecuencia del campo. Cada elemento tiene una frecuencia de resonancia, en la cual vibra mas fácilmente como respuesta a una entrada y convierte de forma más eficiente la energía. Esta frecuencia viene determinada por la composición, la forma y el volumen del material.

La impedancia del elemento cerámico es una función de la frecuencia. Según aumenta la frecuencia, primero se encuentra la frecuencia de resonancia serie ( $f_s \cong f_m$ ), para la cual la impedancia es mínima. En esta frecuencia la impedancia en un circuito eléctrico es cero cuando la resistencia causada por las perdidas mecánicas es ignorada. El circuito equivalente es:

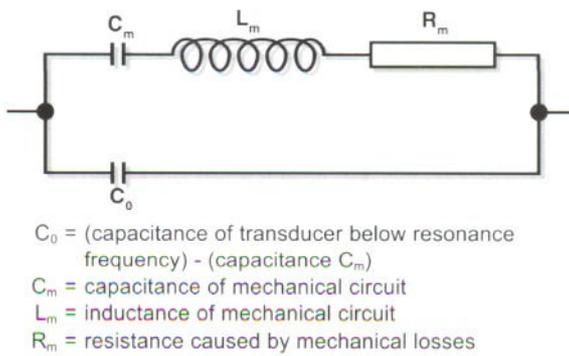


Figura 1.2 Circuito eléctrico equivalente

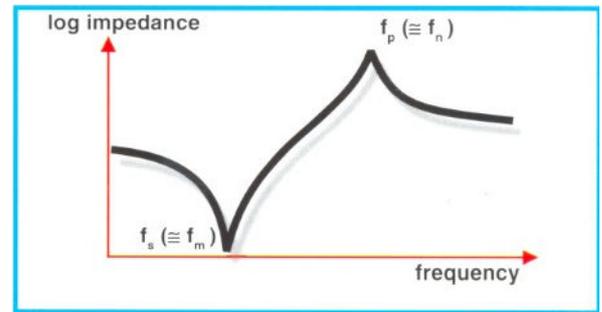


Figura 1.3 Impedancia como función de la frecuencia

Si sigue aumentando la frecuencia la impedancia sigue aumentando hasta su valor máximo, para la frecuencia de resonancia paralelo ( $f_p \cong f_n$ ). En esta frecuencia la resistencia paralelo en el circuito equivalente es infinito cuando la resistencia causada por las perdidas mecánicas es ignorada.

$$f_p = \frac{\sqrt{\frac{C_o + C_m}{L_m C_o C_m}}}{2\pi}$$

$C_o$ : Capacidad del elemento cerámico por debajo de la frecuencia de resonancia

$C_m$ : Capacidad mecánica del circuito

$L_m$ : Inductancia mecánica del circuito

Por debajo de  $f_m$ , y por encima de  $f_n$  el elemento se comporta capacitivamente, mientras que entre  $f_m$  y  $f_n$  se comporta inductivamente.

Se puede calcular  $k$ , a partir de  $f_m$  y  $f_n$  :

$$k_{31} = \frac{(\pi/2)(f_n / f_m) \tan[(\pi/2)((f_n - f_m) / f_m)]}{1 + (\pi/2)(f_n / f_m) \tan[(\pi/2)((f_n - f_m) / f_m)]} \quad \text{Plato cerámico}$$

$$k_p = \sqrt{[2.51(f_n - f_m) / f_n] - ((f_n - f_m) / f_n)^2} \quad \text{Disco cerámico}$$

$$k_{33}^2 = (\pi/2)(f_n / f_m) \tan[(\pi/2)((f_n - f_m) / f_n)] \quad \text{Barra cerámica}$$

El factor de calidad eléctrico es:

$$Q_c = \frac{1}{\tan \delta}$$

El factor de calidad mecánico es:

$$Q_m = f_n^2 / ((2\pi f_m C_0 Z_m)(f_n^2 - f_m^2))$$

Un  $Q_m$  bajo indica que el material es un buen oscilador armónico. Materiales con un  $Q_m$  alto son utilizados para desplazamientos máximos y para generación mínima de calor.

Existen dos circuitos para representar las cerámicas piezoeléctricas:

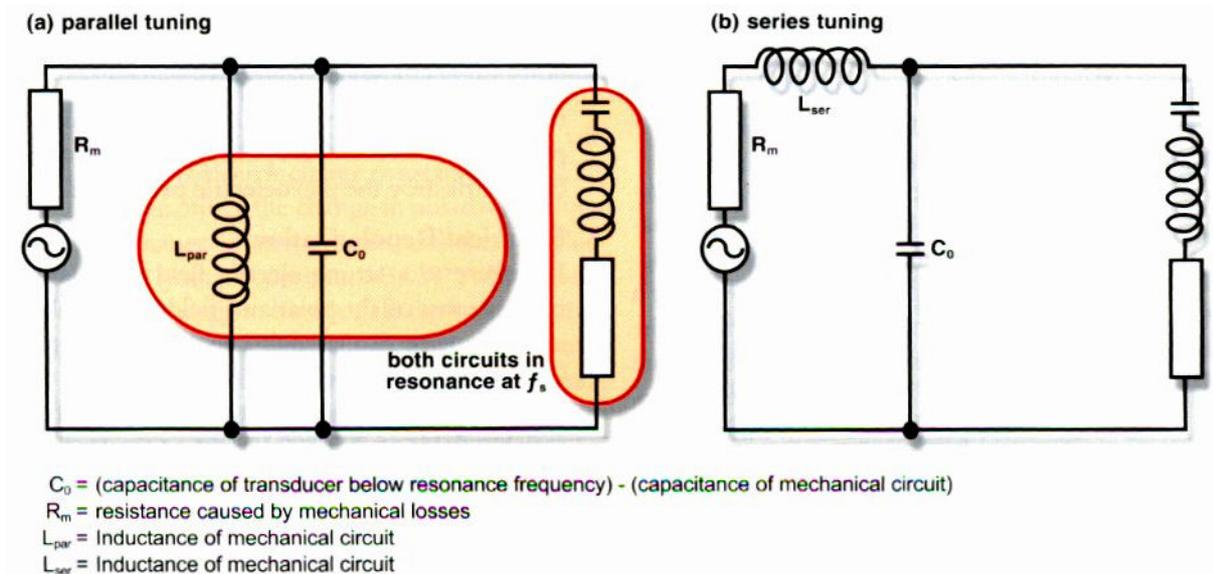


Figura 1.4 Circuito equivalente de un transductor

$$L_p = 1/((2\Pi f_p)^2 C_0)$$

$$L_s = 1/((2\Pi f_s)^2 C_0)$$

### 2.1.3 Estabilidad

Los elementos cerámicos se deterioran gradualmente. Su duración es:

$$duracion = \frac{Par_2 - Par_1}{Par_1(\log(t_2) - \log(t_1))}$$

t<sub>1</sub>: tiempo 1 después de la polarización (días)

t<sub>2</sub>: tiempo 2 después de la polarización (días)

Par<sub>1</sub>: Valor del parámetro Par en t<sub>1</sub>

Par<sub>2</sub>: Valor del parámetro Par en t<sub>2</sub>

En las primeras 24-50 horas después de la polarización, las pérdidas en las propiedades piezoeléctricas son importantes. Después de este periodo las pérdidas son menores. Las pérdidas iniciales son atribuidas a que algunos dominios quieren volver a su posición inicial. El resto de las pérdidas son debidas a defectos químicos en el proceso de fabricación. Una cerámica piezoeléctrica se depolariza rápidamente si se exceden sus limitaciones eléctricas, mecánicas o térmicas.

#### 2.1.3.1 Depolarización eléctrica

Un material cerámico se depolariza si lo exponemos a un campo eléctrico de polaridad opuesta. El grado de depolarización depende de la clase del material, el tiempo de exposición, la temperatura y otros factores. Una corriente alterna produce una depolarización durante la primera mitad de cada ciclo, en la cual la polaridad es opuesta al campo de polarización.

#### 2.1.3.2 Depolarización mecánica

La suficiente presión mecánica para perturbar la orientación de los dominios, puede destruir el alineamiento de los dipolos.

### 2.1.3.3 Depolarización térmica y los efectos piroeléctricos

Si un piezoeléctrico es calentado hasta superar el punto de Curie, los dominios se desordenan y el material se depolarizará. Los cambios en la orientación de los dominios asociados a la temperatura son reversibles, pero estos cambios pueden dar lugar a desplazamientos de la carga y campos eléctricos. Cambios bruscos en la temperatura pueden dar lugar a voltajes altos, lo que puede producir la depolarización del material, una mala medida o puede llegar a dañar un componente electrónico.

La constante de carga piroeléctrica ( $\frac{\Delta P_{pir}}{\Delta T^0}$ ) cuantifica el cambio en la polarización para un cambio dado de temperatura. La constante de la fuerza del campo piroeléctrico ( $\frac{\Delta E}{\Delta T^0}$ ) cuantifica el cambio en el campo eléctrico para un cambio dado de temperatura. El cambio de carga pirogénica viene dado por:

$$Q_p = 1/2((\Delta P_{yr} / \Delta T^{\circ}_1 + \Delta P_{yr} / \Delta T^{\circ}_2)(T^{\circ}_2 - T^{\circ}_1)A)$$

El voltaje generado por el elemento cerámico viene dado por:

$$V_p = (\Delta E / \Delta T^{\circ})(\Delta T^{\circ})(h)$$

### 2.1.4 Cerámicas blandas contra cerámicas duras

Las cerámicas blandas consisten en añadir dopantes donadores al zirconato de titanio para crear cationes en la estructura cristalina. Tienen alto factor de enganche electromecánico, alta permitividad, altas pérdidas dieléctricas, bajo factor de calidad mecánica y poca linealidad. Tienen mayor ciclo de histéresis y son más susceptibles de depolarizarse o deteriorarse. Las cerámicas blandas suelen usarse como sensores.

Las cerámicas duras se crean añadiendo dopantes aceptores para crear aniones en la estructura de cristal. Son más difíciles de polarizar o depolarizar, son más estables aunque producen desplazamientos menores. Las cerámicas duras tienen puntos de Curie por encima de los 300 °C. Tienen valores de constantes más pequeños que las blandas, y factor de calidad mecánica alto. Estas cerámicas son buenas para cargas mecánicas o voltajes altos.

### 2.1.5 Nuevos materiales.

Cada vez se utilizan los piezoeléctricos para un mayor número de aplicaciones, lo que provoca que se investiguen nuevos usos para emplear el efecto piezoeléctrico.

#### 2.1.5.1 Materiales con difusión. Transición de fase (Relaxors)

En los materiales relaxor la transición entre capacidad para el comportamiento piezoeléctrico y la pérdida de las propiedades piezoeléctricas, no se produce a una temperatura determinada. Cerca del punto de Curie los materiales tienen permitividad máxima. La permitividad también depende de la frecuencia, un aumento en la frecuencia hace que la permitividad se desplace a valores de temperatura mayores. Son materiales muy atractivos para aplicaciones como actuadores o transductores.

#### 2.1.5.2 Elementos piezoeléctricos monocristalinos

Los elementos piezoeléctricos tendrían mejores propiedades si todos los dominios del elemento están perfectamente alineados. Con cerámicas monocristalinas podemos llegar a conseguir este comportamiento. Estos materiales se usan para aplicaciones acústicas, ópticas, comunicaciones inalámbricas, ondas acústicas de superficie, para temperaturas bajas o medida de temperatura en las habitaciones. Estos materiales pueden soportar deformaciones 10 veces superiores. Hay materiales como el Germanato de Bismuth que son transparentes, insoluble en el agua y cuando los exponemos a radiación, emite una luz verde de longitud de onda de 480nm. Algunos materiales opto-acústicos son usados como modulador A-D y como filtros.

#### 2.1.5.3 PVDF

No todos los materiales piezoeléctricos son cristales o cerámicas. Hay materiales naturales como la madera, el colágeno, los huesos, que muestran un débil comportamiento piezoeléctrico. Láminas finas de PVDF pueden estirarse en una dirección o dos. Estos materiales tienen constantes de carga piezoeléctricas bajas, lo que les hace útiles para actuadores. Tienen altas constantes de voltaje, lo que los hace útiles para sensores. Un bajo factor de carga mecánica permite un amplio ancho de banda. La combinación de la naturaleza piezoeléctrica, la flexibilidad y la durabilidad mecánica,

hace que estos materiales sean útiles para altavoces, micrófonos direccionales e hidrófonos ultrasónicos.

#### **2.1.5.4 Laminas delgadas**

Laminas delgadas de material piezoeléctrico (óxido de zinc), depositadas en varios sustratos, están siendo estudiadas para crear componentes más pequeños. Estos materiales ofrecen mejores coeficientes piezoeléctricos.

#### **2.1.5.5 Fotostricción**

Es un fenómeno en el cual la tensión es inducida en el elemento piezoeléctrico mediante la iluminación material. Esto es una consecuencia del efecto fotovoltaico junto con las propiedades piezoeléctricas. Iluminando el material podemos conseguir voltajes suficientes para inducir el efecto piezoeléctrico inverso.

## **2.2 GENERADORES**

Son aquellas cerámicas piezoeléctricas capaces de generar energía eléctrica a partir de una entrada mecánica. En un diseño generador el voltaje se incrementa casi linealmente, según aumenta la presión ejercida. Pueden ser utilizados como encendido para motores, o mediante un condensador podemos almacenar energía y puede ser usada sin provocar interferencias electromagnéticas. La configuración del elemento y la manera de ser construido son elementos importantes en el diseño del generador. Un cilindro largo y delgado se deforma más que un cilindro bajo del mismo volumen, para la misma presión.

### **2.2.1 Entrada estática**

#### **2.2.1.1 Sistema en circuito abierto**

Una entrada estática puede depolarizar el sistema más rápidamente que una entrada dinámica de la misma magnitud. La presión aplicada en el elemento cerámico paralela a la dirección de polarización deformará el elemento perpendicularmente a la dirección de polarización, y provocará un campo eléctrico de la misma polaridad que el campo utilizado para polarizar el elemento.

$$V = -(g_{13}hT)$$

Parte de la energía mecánica se emplea para deformar el elemento. El resto de la energía se transforma en energía eléctrica.

$$W_t = W_d + W_e$$

$W_t$ :energía mecánica total

$W_d$ : Energía mecánica empleada en deformar el elemento

$W_e$ :Energía eléctrica

$$W_t = [(vol)(s^D_{33}T^2)]/2$$

$$W_d = [(vol)(1 - k_{33}^2)(s^D_{33}T^2)]/2$$

$$W_e = [(vol)(k_{33}^2)(s^D_{33}T^2)]/2$$

$$W_e = [(1 - k_{33}^2)(C_0V^2)]/2$$

Existen dos métodos para minimizar las pérdidas eléctricas: ajustar la capacidad construyendo el generador mediante laminas delgadas de material cerámico o ajustando la impedancia incorporando un transformador al sistema. Cuanto mayor sea  $C_0$  menor será  $V$ .

$$V = h/[(n)(g_{33}T)]$$

### 2.2.1.2 Sistema en cortocircuito

Si un sistema cortocircuitado es sometido a una presión, la carga eléctrica se generara por dos procesos, uno lineal (deformación de los dominios) y por otro proceso no lineal (desplazamientos de las paredes de los dominios reversibles o irreversibles). Los desplazamientos lineales son:

$$\frac{Q}{A} = D = d_{33}T$$

Los efectos de la no linealidad son más pequeños para frecuencias de entrada bajas.

### 2.2.1.3 Generar energía eléctrica sin depolarizar el generador

Para aplicaciones sucesivas como un encendedor, el material no se puede depolarizar por el campo que crea el material. En estas situaciones el elemento cerámico debe actuar como un sistema abierto hasta el encendido, pero en ese tiempo la resistencia de conducción pone el sistema bajo carga.

$$W_{ee} = [(\epsilon^{T}_{33})(A/h)(V^2)]/2$$

$$W_{ee} = (C_0V^2)/2$$

$$W_{ee} = (\epsilon^{T}_{33}g_{33}^2T^2)/2$$

$W_{ee}$  :energía eléctrica disponible

### 2.2.1.4 Aplicaciones de un solo uso: Depolarizar el generador

Son aplicaciones en las cuales se depolariza el generador intencionadamente para conseguir la mayor cantidad de energía posible, como en bombillas o en detonadores de explosivos. Esta energía esta disponible durante muy poco tiempo. El alto voltaje puede ser reducido mediante la colocación de un condensador en paralelo.

### 2.2.2 Entrada dinámica

Un golpe con un martillo a un elemento cerámico genera una presión que es reflejada en el elemento cerámico y en el martillo. El comportamiento de la onda depende de la elasticidad del martillo y de las propiedades acústicas del elemento cerámico. Hasta el chispazo de encendido el sistema es un circuito abierto. Existe un valor critico de  $V$ , que puede ser calculado mediante  $V = -(g_{13}hT)$  para encendedores sencillos. Sino se puede aproximar su valor pico mediante  $W_{ee} = (C_0V^2)/2$

### 2.2.3 Baterías en estado sólido

Estas baterías no crean interferencias electromagnéticas, son generadores piezoeléctricos multilamina. Son laminas muy finas intercaladas con electrodos. Al ser multilamina exhibe una mayor capacidad, por lo que la capacidad necesaria para reducir el voltaje será menor.

## 2.3 SENSORES

Los sensores son intermediarios entre el mundo físico y los sistemas electrónicos que procesan y almacenan información. Los sensores convierten una entrada física, química o biológica en una señal eléctrica. Existen dos tipos de sensores: sensores axiales y sensores flexibles. En un sensor axial la fuerza ejercida es paralela a la dirección de polarización y genera energía eléctrica en la misma dirección. Un sensor flexible también mide la presión ejercida en la dirección de polarización, pero la fuerza que causa la deformación del elemento es aplicada perpendicularmente a la dirección de polarización. Los sensores solo generaran una señal cuando experimentan un cambio en la fuerza aplicada.

Bajo una entrada estática, las cargas libres se dirigen hacia los dipolos, neutralizando la carga de los dipolos, lo que provoca la descarga del material. Una presión sobre el material vuelve a restaurar la carga eléctrica.

En la practica, los sistemas para medir señales de baja frecuencia vienen descritos por la constante de tiempo. La constante de tiempo es la capacidad del elemento cerámico  $C_0$ , por la resistencia de entrada del circuito. La constante de tiempo debe ser 10 veces mayor que el periodo de la señal. Hay tres alternativas para mantener la resistencia de entrada baja: construyendo un sensor multil minas conectadas, incorporando un amplificador al sistema o incorporando un condensador al sistema.

Para aplicaciones de monitorización los sensores monocristalinos son mejores, ya que sus propiedades piezoeléctricas son más estables. Por otra parte los sensores policristalinos son mecánicamente más fuertes y ofrecen una mayor resistencia a las condiciones ambientales.

### 2.3.1 Sensores Axiales

La carga  $Q$ , desarrollada por una fuerza en el sensor es:

$$Q = C_0V \quad \text{ó} \quad Q = -(d_{33}F) \text{ para sensores axiales}$$

Si hay múltiples sensores apilados y conectados, la carga  $Q$  es:

$$Q = -(d_{33}F)n$$

La tensión generada por el sensor es:

$$V = -(g_{33}hT)$$

Si el sensor es construido a partir de un elemento cerámico o de múltiples elementos cerámicos, no importa, con ambos obtenemos la misma tensión que incrementara casi linealmente con la presión.

Las aplicaciones básicas para un sensor axial son: monitorizar la aceleración, o el bloqueo de un motor. El sensor de aceleración más sencillo consiste en colocar una masa sísmica por encima y por debajo del elemento cerámico. De esta forma cuando se acelera en la dirección de polarización, la masa sísmica ejerce una fuerza sobre el elemento cerámico y genera una señal eléctrica.

El circuito equivalente de un sensor axial es:

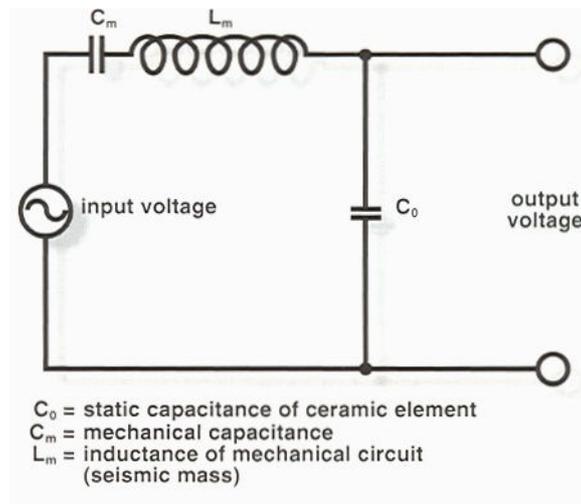


Figure 1.5 Circuito eléctrico equivalente de un acelerómetro axial

Para entradas estáticas, la inductancia equivalente de la masa sísmica es despreciada. Lo que hace que la capacidad del sensor  $C_s$ , la suma de la capacidad estática del elemento cerámico  $C_0$  y la capacidad mecánica  $C_m$ . La carga en el sensor es la impedancia de entrada del amplificador,  $Z_e$ . Para mantener el circuito abierto la capacidad del sensor debe ser igual o superior a la capacidad del amplificador.

$$Z_e \cdot C_e \geq \frac{1}{w(C_s + C_e)} \cong \frac{1}{C_s w}$$

La sensibilidad del sensor es función de la energía eléctrica generada.

$$S_v = V/a \quad S_Q = Q/a$$

También depende de la frecuencia. Como podemos observar en la figura siguiente, hay una parte donde la sensibilidad es lineal.

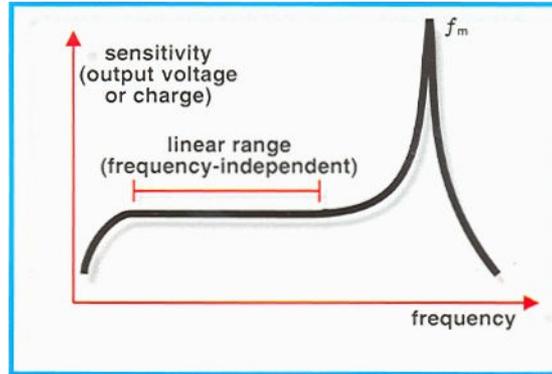


Figure 1.6 Sensibilidad de un acelerómetro como función de la frecuencia

$$f_m = (1/2\pi)(\sqrt{[K/(M + m/3)]})$$

K: rigidez del elemento cerámico

M: masa sísmica

M: masa del elemento cerámico

La frecuencia inferior de la zona lineal se puede obtener de la siguiente manera:

$$f_1 = 1/[(2\pi Z_e)(C_S + C_E)]$$

$$V = g_{33}h(aM/A) \quad a : \text{aceleración}$$

$$S_v = g_{33}(h/A)M$$

Si  $M = 0$  se puede expresar la ecuación anterior como:

$$S_v = g_{33}(h^2)\rho/2 \quad \rho : \text{densidad del material cerámico}$$

En la práctica una capacidad externa reduce la sensibilidad a un valor inferior al teórico.

$$S_p = (S_v)(1/(1 + (C_E/C_S)))$$

Los diseños de acelerómetros simples muestran defectos en la estabilidad y la selección de la dirección. Hay diferentes diseños de acelerómetros como el Center-mounted compression accelerometer, útil para medidas de alta precisión. Un defecto

de este diseño es que el incremento de temperatura conlleva un incremento de la carga piroeléctrica. El incremento de temperatura también provoca variaciones en las constantes piezoeléctricas y en la permitividad.

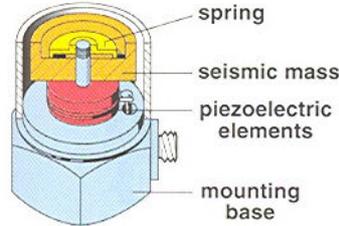


Figure 1.7 Acelerómetro Center-mounted

Otro diseño es el Anular shear, que es una solución a los problemas de los acelerómetros de modo 33. Este diseño elimina las cargas piroeléctricas, un elemento piezoeléctrico cortante con los electrodos en dirección 1, solo produce una respuesta a una presión en dirección 5. También reduce los defectos provocados por la inclinación de la base. A partir de este diseño se han desarrollado otros muchos como:

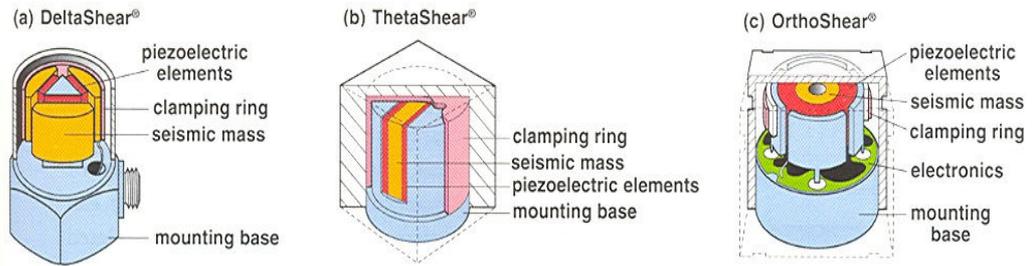


Figure 1.8 Acelerómetros Shear – based

### 2.3.2 Sensores flexibles

Están constituidos por dos laminas de material cerámico polarizados en dirección 3, unidas para conseguir un elemento bilaminar. Este elemento está sujeto por un voladizo en su extremo. La fuerza física que tiene que ser medida actúa en el otro extremo del elemento. Si las dos laminas tienen direcciones de polarización opuestas y los electrodos están situados en la cara exterior, se dice que es un elemento serie. Si las dos laminas tienen la misma dirección de polarización, se dice que es un elemento

paralelo. Ambos elementos tienen un voltaje opuesto que depolariza el elemento. Si se aplica el voltaje a ambas laminas en la dirección de polarización eliminara la posibilidad de depolarización.

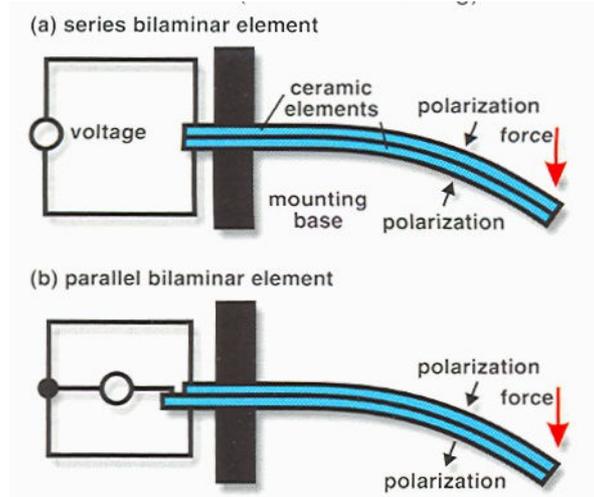


Figure 1.9 Sensor flexible

En un elemento serie los campos eléctricos y los voltajes producidos por la fuerza tienen la misma dirección, por lo que se suman. En un elemento paralelo los campos eléctricos y los voltajes tienen sentidos opuestos. La polarización opuesta de los elementos serie los hace más resistentes a los cambios de temperatura.

El voltaje generado por el sensor flexible es:

$$V = 50(l_f^3 / l_t) a$$

Los sensores flexibles tienen menor rigidez, menor impedancia mecánica y menor impedancia eléctrica.

### 2.3.2.1 Constantes de tiempo

La capacidad de un elemento sensible es alta, por lo que su constante de tiempo es alta. Conectando un condensador en paralelo podemos subir la constante de tiempo y hacer la salida independiente de la temperatura.

### 2.3.3 Efectos de la temperatura

#### 2.3.3.1 Dependencia térmica de las constantes piezoeléctricas

Las constantes piezoeléctricas como  $d$ ,  $g$ ,  $\epsilon$  son dependientes de la temperatura. Esto se puede eliminar conectando un condensador en paralelo, ya que el incremento en la capacidad total del sistema conlleva una reducción en el coeficiente térmico.

### **2.3.3.2 Efecto piroeléctrico**

Variaciones en la temperatura pueden provocar altos voltajes, lo que a su vez provoca la depolarización del material. Esto también se soluciona con la colocación de un condensador en paralelo.

### **2.3.4 Diseños para un propósito especial**

#### **2.3.4.1 Compuestos**

Para fabricar sensores la sensibilidad del material cerámico tiene que ser máxima, y esto se da cuando la constante de voltaje piezoeléctrico es máxima. Los sensores deben estar contruidos para compensar el efecto de la presión hidrostática. Esto se ha solucionado encapsulando el sensor o rodeando el elemento cerámico por un polímero absorbente que reduce la presión hidrostática. El uso de polímeros también es útil para aplicaciones bajo el agua. La fabricación de un material no piezoeléctrico flexible, lo hace adecuado para su uso en hidrófonos.

Los materiales con partículas cerámicas en contacto en una sola dirección, se llaman materiales 1-3. Las características sensoriales de los materiales 0-3 y 1-3 son casi iguales. Los materiales 1-3 tienen mayor carga piezoeléctrica, por lo que son mejores para aplicaciones acústicas. Los productos con formas complicadas y mucha superficie son contruidos con materiales 1-3. Los materiales 0-3 tienen alta sensibilidad, alta tolerancia a la presión, una buena impedancia acústica y alto ancho de banda.

#### **2.3.4.2 Cables sensores**

Consiste en un hilo de cobre cubierto por material piezoeléctrico sin polarizar. Todo esto va encapsulado por un aislante. Si se somete el cable a un alto voltaje y a temperaturas cercanas al punto de Curie, el material piezoeléctrico confiere al cable propiedades piezoeléctricas.

#### **2.3.4.3 Sensores táctiles**

Son contruidos por laminas finas de material piezoeléctrico. Se usan cuando la fuerza se puede transmitir entre dos superficies próximas (pantalla táctil).

---

#### 2.3.4.4 Sensor Breeze

Un sensor Breeze mide la velocidad del aire o de otro gas. El sensor esta compuesto de dos elementos serie con polaridad opuesta. Un elemento esta expuesto al gas y el otro es aislado. Cuando la velocidad del gas es constante, las cargas en las superficies del elemento son iguales, y ambos elementos generan la misma carga eléctrica. Cuando la velocidad del gas cambia las cargas se mueven y aparecen variaciones en los voltajes.

#### 2.3.4.5 Sensores Surface Acoustic Waves

Son sensores gravimétricos que detectan sustancias químicas en un gas. Un oscilador eléctrico provoca ondas mecánicas en el sólido. Las ondas pasan a un receptor piezoeléctrico que las convierte en señal eléctrica. La capa opuesta de la línea de transmisión es rodeada con una lamina de un material químico específico. La interacción entre la línea de transmisión y la lamina química frena y acelera la velocidad de las ondas mecánicas. Por lo tanto podemos medir la concentración de gas a partir de la variación en la señal.

## 2.4 ACTUADORES

Cuando estimulamos un actuador con una señal eléctrica, el actuador responde con un deslizamiento mecánico. La magnitud de este desplazamiento viene determinada por la rigidez del diseño. Existen actuadores simples y actuadores compuestos de varias laminas. Los actuadores son muy usados para controles de posición precisos ya que con una pequeña variación en el voltaje, produce un pequeño cambio en la posición. Debido a sus tiempos de reacción y a sus aceleraciones se usan en equipos para la inyección de combustible y en el control de válvulas.

Los actuadores se pueden clasificar según el desplazamiento que producen en actuadores axiales, transversales o flexibles. Un actuador axial recibe una señal paralela a la dirección de polarización, y ejerce una respuesta en esa dirección. Un actuador transversal recibe una entrada paralela a la dirección de polarización y ejerce una respuesta perpendicular a la dirección de polarización. Un actuador flexible es un elemento bilaminar que funciona como el actuador transversal. Los actuadores axiales o los actuadores transversales son más rígidos y provocan desplazamientos menores que los actuadores flexibles.

### 2.4.1 Actuadores axiales y transversales

#### 2.4.1.1 Actuadores axiales y transversales simples

Para un actuador axial simple se puede determinar:

$$\Delta h = d_{33}V$$

$$F_b = (d_{33}\Pi r^2 V)/(s^E_{33}h)$$

$$K_E = \Delta F / \Delta h$$

$$K_E = (\Pi r^2)/(s^E_{33}h)$$

$$f_m = N_L / h$$

$$f_m = N_L / 2h \quad \text{elemento fijo a la base}$$

Para un actuador transversal simple se puede determinar:

$$\Delta l = (d_{31})(1/h)(V)$$

$$F_b = (d_{31} / s^E_{11})(w)(V)$$

$$K_E = \Delta f / \Delta l$$

$$K_E = (hw)/(s^E_{11}l)$$

$$f_m = N_p / l \quad \text{elemento libre}$$

$$f_m = N_p / 2l \quad \text{elemento fijo a la base}$$

La carga piezoeléctrica aumenta según la fuerza del campo eléctrico, y depende de la temperatura. Estas características varían según el material usado en la construcción el actuador.

Se puede calcular la deformación del actuador a partir de:

$$\Delta h_L = \Delta h / (1 + (K_L / K_E))$$

$$\Delta F_L = \Delta F_c / (1 + (K_L / K_E))$$

#### 2.4.1.2 Actuadores axiales compuestos

Están compuestos por múltiples elementos cerámicos apilados, con la misma dirección de polarización, y esta dirección coincide con la dirección de la fuerza desarrollada. Los elementos están conectados en paralelo.

Los actuadores pueden ser construidos de dos formas: cada elemento es construido y disparado individualmente, y cada elemento tiene su electrodo. Esta forma de construirlos ofrece una mayor flexibilidad en el diseño de la forma del elemento cerámico. Necesitan un voltaje relativamente alto para funcionar, no llega a los kV. La otra forma de construir un actuador que necesite menos voltaje debe ser construido con laminas muy finas, menores de 1 mm, y haciendo que todos los elementos actúen como uno solo.

El voltaje necesario para un actuador apilado es proporcional a la altura. Mientras que la fuerza desarrollada por este actuador, es proporcional al área de la pila. Hay otra relación entre la presión y la energía consumida. Cuanto mayor es la presión, mayor es el consumo de energía. Esto se reduce en un 50%, si disminuye el tamaño del actuador a la mitad y se aplica la máxima tensión.

Las características de un actuador apilado dependen mucho del material cerámico elegido, la forma en que ha sido construido, la altura y el área. Estos actuadores se pueden proteger del daño mecánico o de la humedad, utilizando un material aislante.

La rigidez del sistema se puede reducir incorporando una presión inicial.

#### **2.4.1.3 Actuadores multilámina**

Un actuador axial o transversal puede ser construido a partir de muchas láminas muy finas. Esta configuración no añade ventajas en desplazamientos pero si en los voltajes necesarios ya que con una entrada de 50V se puede conseguir un campo de 1kV/mm.

#### **2.4.1.4 Actuadores multilámina Pseudohear**

Son laminas rectangulares apiladas y polarizadas. Cada lamina esta separada por otra lamina de plástico donde se colocan de forma alterna los electrodos. Las laminas están conectadas en paralelo.

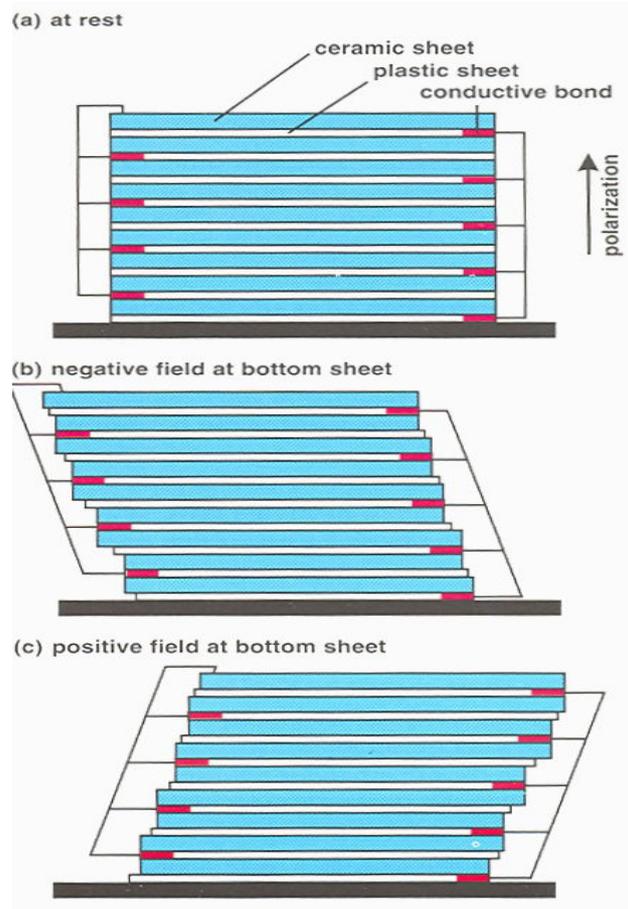


Figure 1.10 Actuador multilamina

Todas las laminas se mueven en la misma dirección bajo la acción de un campo eléctrico. Bajo el efecto de una corriente alterna el actuador comienza a vibrar. Los desplazamientos conseguidos se pueden aumentar a la vez que se pueden reducir los voltajes, disminuyendo el espesor de las laminas e incrementando el numero de laminas.

#### 2.4.1.5 Actuador apilado

Un actuador apilado solo transfiere la fuerza en la dirección de los ejes, y hay que evitar que las fuerzas provoquen la inclinación o el daño del actuador. Hay que procurar situar una interface en el material cerámico para que no sea el material cerámico el que reciba directamente la fuerza. También hay que procurar que la fuerza se ejerza igual por toda la superficie del elemento cerámico. Además hay que protegerlo del daño mecánico y de los efectos ambientales.

Si con un actuador solo no es suficiente, podemos conectar actuadores en serie. Una ventaja puede ser el uso de un actuador de alto voltaje en combinación con una fuente de alimentación menor. Esta configuración reduce el consumo de energía asociada a la fuente de alimentación de alto voltaje para conducir al actuador a deformación máxima. Esta configuración también minimiza el autocalentamiento del actuador.

Cuando el actuador es usado en aplicaciones de alta precisión, el actuador debe contar con un sensor en lazo cerrado para ver la posición absoluta del actuador y ajustar el voltaje.

La señal que se obtiene de un generador de señal no sirve como entrada para el actuador. Hay que situar un amplificador entre el generador y el actuador. El circuito que diseñemos tiene que ser capaz de manejar corrientes muy altas durante pequeños periodos de tiempo. Hay dos alternativas: Voltage Drive y Charge Drive Circuitry. Voltage Drive es más simple, pero se necesita un sistema controlado para compensar la histéresis. Charge Drive proporciona una relación casi lineal entre el voltaje y el desplazamiento.

#### **2.4.2 Actuadores Flexibles**

Son cerámicas piezoeléctricas bilaminares conectadas en paralelo. La deformación es mayor mientras que las fuerzas de bloqueo son menores. La frecuencia de resonancia se aumenta haciendo el material más delgado.

##### **2.4.2.1 Actuadores Stripe**

Es un actuador flexible que consigue mayores deformaciones que los actuadores flexibles normales. Las dos laminas están polarizadas en la misma dirección (paralela al elemento bilaminar). El electrodo está soldado entre las dos laminas. Las superficies están cubiertas con un barniz que aísla la superficie y lo protege de la humedad, el polvo...

##### **2.4.2.2 Actuador Widthwise Bending**

Es un actuador bilaminar convencional pero con deformación en la dirección de su espesor. Este tipo de actuador tiene una frecuencia de resonancia mayor, produce desplazamientos el doble de grandes y fuerzas de bloqueo 27 veces mayores. Este

actuador es muy adecuado para el uso en el control de servos para la búsqueda de información en los discos duros.

### 2.4.2.3 Actuador flexible multilamina

Son construidos combinando electrodos y laminas de material polarizado, de manera que permite a las laminas deformarse como un solo elemento. Tiene voltajes menores, son más rápidos y su vida útil es mayor.

## 2.4.3 Aplicaciones para los actuadores piezoeléctricos

### 2.4.3.1 Motores piezoeléctricos

Los motores piezoeléctricos ultrasónicos tienen un gran rendimiento. Convierten los pequeños desplazamientos en movimientos rotacionales o lineales. Son mas caros que los motores eléctricos, pero ofrecen una serie de ventajas como una respuesta rápida, alta energía, alto rendimiento y no genera campos electromagnéticos.

Los desplazamientos son creados por alternar una deformación inducida por un campo eléctrico a la frecuencia de resonancia mecánica. Un motor tiene que estar construido de un material piezoeléctrico muy resistente con alto factor de calidad mecánico, para minimizar la generación de calor y maximizar el desplazamiento.

Hay tres tipos de motores: lineales, axiales, traveling wave. Los motores lineales consisten en 3 actuadores, dos actúan como frenos y el otro genera el movimiento. La velocidad del movimiento se regula por la amplitud del escalón y por la frecuencia. Un motor axial esta construido por discos cerámicos y cilindros metálicos en resonancia mecánica. El movimiento axial se transforma en movimiento elíptico en el rotor. En un traveling wave un anillo de cerámica polarizada esta unida a un anillo metálico, el estator. Un voltaje alterno es ajustado para producir resonancia y generar una onda. Esta onda provoca que el estator se mueva elípticamente.

Hay que proteger los motores del calentamiento para que no se depolarice el material. El elemento cerámico tiene que tener un alto punto de Curie.

#### 2.4.3.2 Bombas piezoeléctricas

Alternando estiramientos y contracciones de un actuador piezoeléctrico, este puede actuar como una bomba de entrada-salida. Un disco cerámico puede mover un pequeño volumen a alta presión (0.001 – 0.01 mm<sup>3</sup>). Un tubo polarizado puede actuar como una bomba ya que el volumen aumenta y disminuye según el voltaje aplicado. Para prevenir la depolarización del material el campo eléctrico aplicado, es en la dirección de polarización. Los cambios en el espesor y volumen vienen dados por:

$$\Delta h = d_{33}V \quad \Delta h = d_{33}hE \quad \Delta h = s_{33}hT \quad \Delta vol = d_{33}VA$$

La presión necesaria para el desplazamiento es:

$$p_B = (d_{33}V)/(s_{33}h)$$

El desplazamiento del fluido se determina a partir de:

$$d_d = 10^{-10} (D_0^2 / h^2) V \quad \Delta vol = (0.5)(\Pi D_0^2 / 4)(d_d)$$

#### 2.4.3.3 Aplicaciones para actuadores flexibles

Son aptos para aplicaciones que necesitan alta sensibilidad y una respuesta duradera. Se usan para el control de movimientos, como interruptores y en bombas de pequeño volumen.

## 2.5 TRANSDUCTORES

Convierte un voltaje eléctrico en vibración mecánica, que se usa para limpieza ultrasónica, medida de distancias, etc... Constan de un emisor y un receptor que transforma una señal audible en una señal eléctrica. Las categorías principales son:

- Transductores que producen una señal audible (micrófono del teléfono).
- Transductores que producen vibraciones ultrasónicas, que son transferidas a un liquido o a un sólido.
- Transductores que producen señales ultrasónicas (emisor) que son recibidas por otro transductor (receptor).

### 2.5.1 Transductor de sonido audible

Pueden generar una señal audible alta a partir de una entrada de miliwatios. Constan de un disco de cerámica piezoeléctrica unido a un disco metálico, llamado diafragma. Bajo una entrada el disco cerámico comienza a vibrar, obteniendo un sonido audible. A la frecuencia de resonancia, la amplitud de las vibraciones será mayor y la salida será máxima. Se puede determinar esta frecuencia a partir de la ecuación:

$$f_r = (0.412h / r_{disk}^2) \sqrt{(Y / \rho[1 - \sigma^{E2}])}$$

Si se considera el disco cerámico y el disco de metal como un solo elemento la frecuencia de resonancia es:

$$f_r = \alpha h / r_{disk}^2$$

A continuación se muestra el circuito eléctrico equivalente de un transductor y su frecuencia de resonancia:

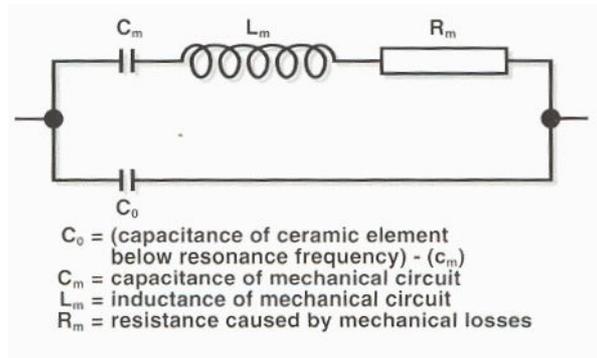


Figure 1.11 Circuito eléctrico equivalente

$$f_r = 1/(2\Pi)\sqrt{L_m C_m}$$

A continuación se muestran los diferentes diseños de un vibrador.

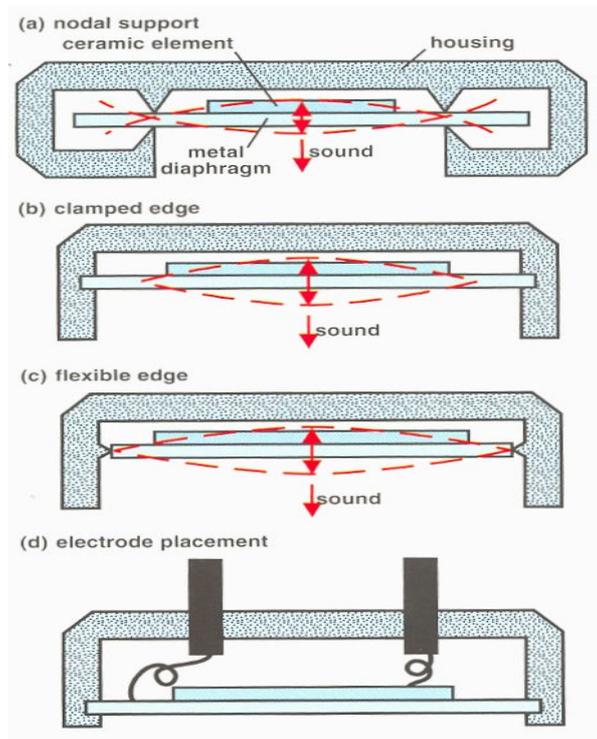


Figure 1.12 Transductor de sonido

En el Nodal support mounting se minimiza la restricción mecánica en el movimiento del mecanismo que produce el sonido. Para prevenir las interferencias la salida debida a la parte exterior debe ser eliminada.

La configuración en el clamped edge permite que toda la superficie vibre en fase. Este diseño disminuye el factor de calidad mecánica.

El flexible edge es similar al clamped edge pero el elemento flexible no está unido rígidamente, lo que permite movimientos angulares en la periferia del elemento flexible. Su frecuencia de resonancia es la mitad que en los otros dos diseños.

La cuarta alternativa es fijar el disco en el centro. Este diseño es de difícil ejecución y las presiones serán menores.

### 2.5.1.1 Helmholtz Resonators

Para asegurar una salida excelente, las dimensiones del encapsulado deben de ser diseñadas para ajustar la impedancia acústica a la impedancia del elemento flexible. La frecuencia de resonancia se puede determinar a partir de la siguiente ecuación:

$$f_r = (v_{air} / 2\Pi) \sqrt{[(4r_{hole}^2) / (D_0^2 h_{cavity})(h_{hole} + 1.3r_{hole})]}$$

El elemento flexible en un vibrador piezoeléctrico puede ser excitado por ondas cuadradas, pulsos o senoidales. Con ondas cuadradas y pulsos se asegura una salida acústica alta, pero los armónicos también serán mayores. Para reducir los armónicos se coloca un condensador en paralelo. Si se usan ondas senoidales el elemento operará a frecuencias menores que la frecuencia de resonancia.

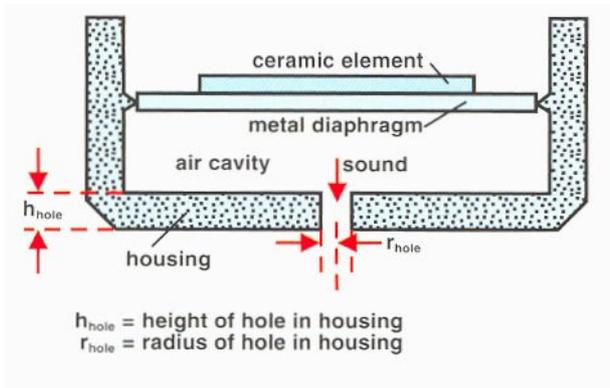


Figure 1.13 Resonador Helmholtz incorporado en un transductor de sonido

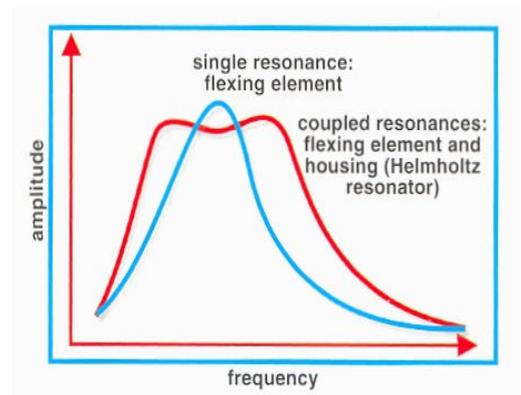


Figura 1.14 Ancho de banda

### 2.5.1.2 Presión sonora

La presión sonora generada por un sonido audible es función del volumen y la frecuencia del sonido. Esta magnitud se determina a partir de:

$$dB = 20 \log(\text{presión medida} / 20 \mu Pa)$$

### 2.5.1.3 Conexiones eléctricas

Se pueden encontrar vibradores piezoeléctricos con dos o tres electrodos. En los de dos electrodos, son el diafragma metálico y elemento cerámico los que hacen de electrodos. Este tipo de conexión tiene impedancia capacitiva. En los de tres electrodos es el tercer electrodo es el encargado de formar un lazo de realimentación mediante un circuito. Este circuito operará automáticamente a la frecuencia de resonancia. Un alto factor de calidad mecánica asegura un bajo consumo de energía. También se puede conseguir que un circuito vibre a la frecuencia de resonancia, colocándole una bobina en paralelo al elemento cerámico. Apagando y encendiendo la corriente que circula por la bobina, se inducen voltajes muy altos que provocaran que el elemento vibre a la frecuencia de resonancia.

Los circuitos se pueden clasificar en: circuitos amplificadores o circuitos osciladores. Los circuitos amplificadores son circuitos estables que amplifican una entrada y la transmiten al transductor. En un circuito oscilador la señal eléctrica varía, es un circuito inestable. El transductor es una parte integral del circuito de oscilación junto con otros elementos. A continuación se muestran los diferentes circuitos de amplificación y de oscilación:

Figura 1.15 Amplification type Drive Circuit

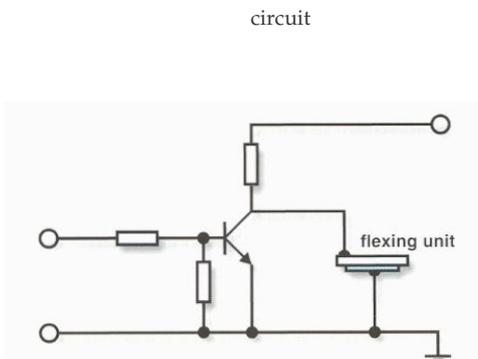


Figura 1.16 Two step amplification in load resistance drive

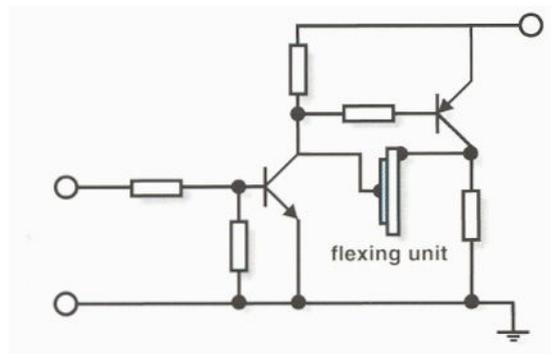


Figura 1.17 Amplification-type drive circuit:  
 complementary

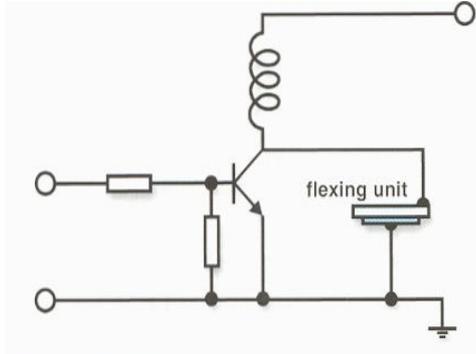


Figura 1.18 Amplification-type drive circuit:  
 load inductance

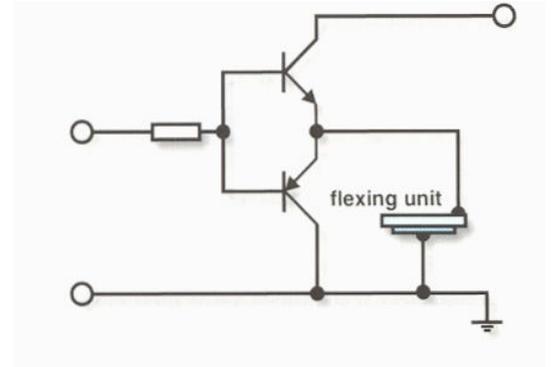


Figure 1.19 Oscillation-type: integrated circuits

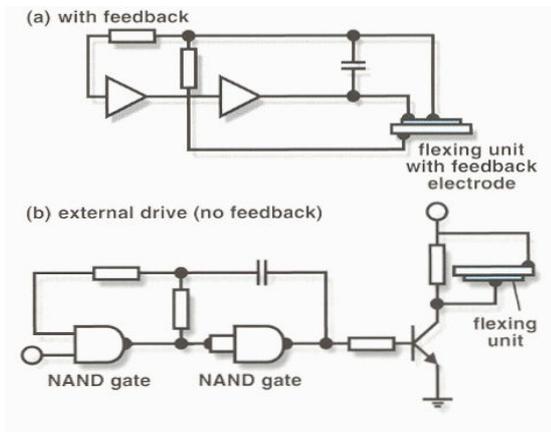


Figure 1.20 Oscillation-type: RC

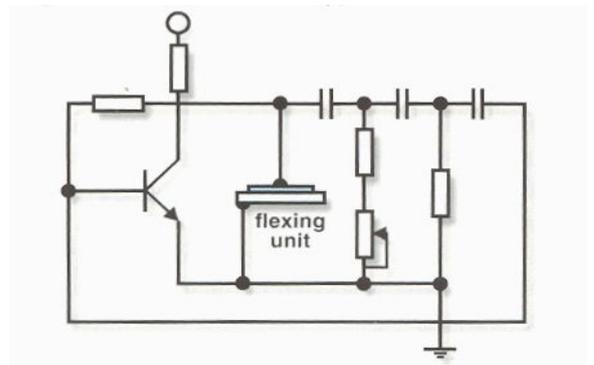


Figure 1.21 Oscillation-type: multivibrador

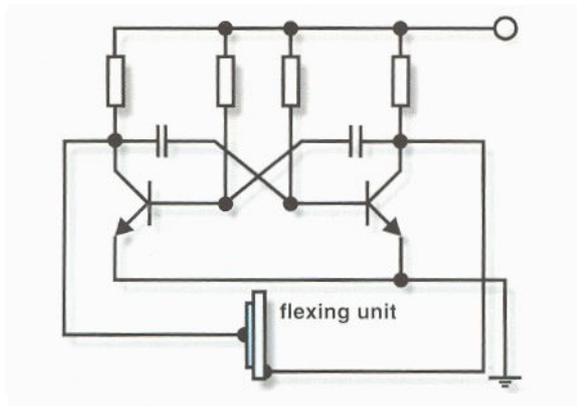


Figure 1.22 Oscillation-type: blocking

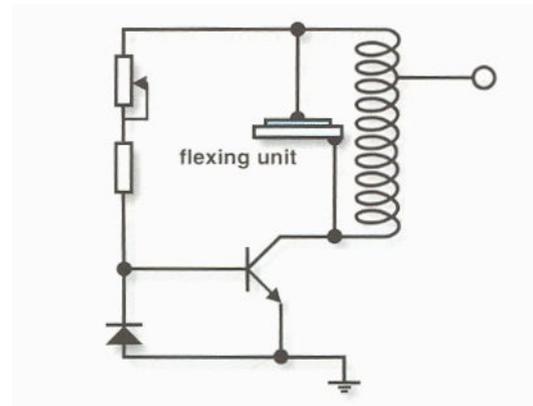
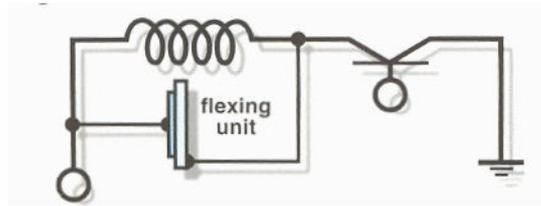


Figure 1.23 Drive circuit with booster coil



## 2.5.2 Generar vibraciones ultrasónicas en líquidos o sólidos

### 2.5.2.1 Limpieza ultrasónica: discos transductores

Se puede limpiar un tanque de agua mediante un disco cerámico unido a la base del tanque. El disco vibra en modo radial y tiene una impedancia de varios cientos de ohmios. Si se sitúa un disco metálico entre el tanque y el disco cerámico las vibraciones se transmiten a las paredes del tanque, transfiriendo la energía al líquido. Esta construcción tiene una impedancia de varios miles de ohmios.

El espesor del tanque dicta el espesor del disco cerámico (1mm de acero = 3mm de disco cerámico). El material cerámico debe de tener un alto punto de Curie para prevenir la depolarización térmica.

### 2.5.2.2 Limpieza ultrasónica: transductores compuestos

Es la unión de múltiples elementos cerámicos que ofrecen ventajas en el diseño y en la producción en aplicaciones de limpieza ultrasónica. Esta formado por dos discos cerámicos encapsulados por dos discos metálicos. Sin presencia de un líquido muestran mayor factor de calidad mecánica que los limpiadores con un disco cerámico. Los elementos metálicos deben tener las mismas propiedades acústicas y el mismo área que los discos cerámicos.

La eficiencia electroacústica se puede calcular a partir de la ecuación:

$$\eta = 1 - [(1/(1 + k^2 Q_e Q_l)) - (1/(1 + Q_m / Q_l))]$$

$$Q_l = (1/k) \sqrt{Q_m / Q_e}$$

$$\eta = 1 - (2/k \sqrt{Q_e Q_m})$$

### 2.5.2.3 Material compuesto con esfuerzos iniciales: transductores ultrasónicos

La fuerza de los elementos cerámicos se suplen mecánicamente por un esfuerzo inicial en la dirección de polarización. Existen dos tipos de diseño: en el *single central bolt* esta presión se introduce incorporando un tornillo central, fijo periféricamente al diseño del transductor. Otro tipo de diseño es el *múltiple peripheral bolt*, igual que el otro modelo pero que consta de dos tornillos a los lados

### 2.5.2.4 Cavitación

La cavitación ocurre cuando la vibración de la superficie del transductor interfiere con el líquido, lo cual es suficiente para superar la presión de vapor del líquido. Este efecto es deseable en limpieza ultrasónica o en aplicaciones de vaporización.

A presión atmosférica, la presión de vaporización es (solo para agua y para frecuencias de varios kilohercios):

$$p_{co} = (0.00025f)^2 + (0.045f - 1)$$

Si el transductor esta sumergido:

$$p_{ch} = p_{co} + 0.1h$$

La intensidad acústica de la superficie vibratoria es:

$$J = 0.15(p_{co} + 0.1h)^2$$

### 2.5.2.5 Aplicaciones adicionales para las vibraciones ultrasónicas

También pueden ser usados para soldar plásticos, las vibraciones se transmite por el termoplástico quedando unido. Otro uso es para atomizar líquidos o para perforar cerámicas o metales.

### 2.5.3 Transmisión de señales ultrasónicas

Como un transductor es capaz de transformar energía eléctrica en mecánica o viceversa, un transductor ultrasónico es capaz de transmitir y recibir una señal. Este principio ha sido adaptado para medir distancias en aire, agua u otro material, determina los ratios de flujo.

### 2.5.3.1 Direccionalidad

Es uno de los parámetros más importantes, es el nivel de respuesta del transductor como una función del ángulo con que incide el sonido. La direccionalidad es función de la apertura del transductor y de la frecuencia de la señal. Una alta directividad indica que la energía de transmisión acústica se concentra en una pequeña región.

El índice de directividad se calcula a partir de:

$$DI = 10 \log(4\pi)(area / \lambda^2)$$

$$DI = 10 \log(2l / \lambda)$$

$$BW = 60\lambda / d$$

$$BW = 50\lambda / l$$

l: longitud de un cilindro delgado o de un lado en una superficie

### 2.5.3.2 Medida de distancias en el aire

El rango de medida depende de dos factores: de la frecuencia de operación y de la energía que genera. La energía depende de las características mecánicas y térmicas del material. La reflexión y la absorción de señales ultrasónicas dependen de la frecuencia de operación. El ancho de banda se estrecha lo cual es bueno porque la energía que requiere la entrada es menor. Los cambios en la humedad y la temperatura también afectan.

También se pueden usar transductores flexibles para la medida de distancias en el aire. Si ajustamos la tensión aplicada a la frecuencia de resonancia mecánica se maximizara la deflexión del elemento flexible y se maximizara la señal ultrasónica. Un rayo estrecho minimiza las perdidas, las interferencias y las reflexiones de objeto no deseados. La directividad de un transductor flexible es:

$$\sin \alpha / 2 = \lambda / D \quad \sin \alpha / 2 = v_{air} / D_0 f$$

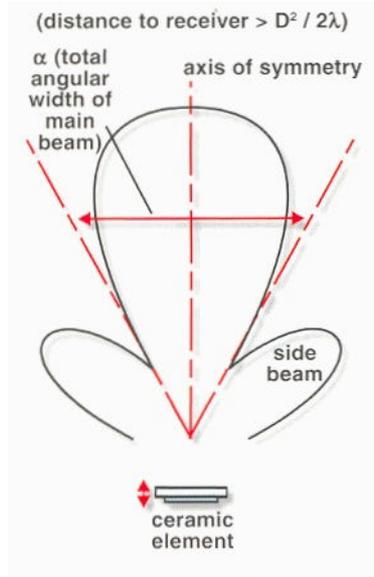


Figure 1.24 Dirección de un transductor ultrasónico

### 2.5.3.3 Transmisión de señales ultrasónicas en agua

Son diseñados y construidos de manera y con materiales diferentes. Esto depende de la frecuencia de la señal. Frecuencias comprendidas entre 1kHz y 100kHz son usadas en los sonar y en aplicaciones armamentísticas submarinas. Frecuencias comprendidas entre 50kHz y 1 MHz son usadas para la localización de pescados y minas. Cuando el transductor está en modo de transmisión, un voltaje flexiona el elemento piezoeléctrico y provoca vibraciones ultrasónicas. Cuando el transductor está en modo receptor, la señal ultrasónica hace que el material piezoeléctrico vibre provocando una salida en tensión. La distancia al objeto se determina a partir de la ecuación:

$$L = ((v)(t)(\cos \beta)) / 2$$

### 2.5.3.4 Transductores de baja frecuencia

Su característica principal es que producen largos desplazamientos. La cantidad de sonido generada es pequeña porque las dimensiones de estos transductores son pequeñas. La energía requerida también es pequeña. Los transductores flexibles pueden ser diseñados para transmitir señales submarinas tan bien como por aire.

Un transductor flexensional convierte pequeños desplazamientos en desplazamientos mayores por el metal cóncavo. Producen una señal omnidireccional

en el plano perpendicular a los ejes del elemento cerámico. Ofrecen una mayor salida de tensión que los flexibles.

### 2.5.3.5 Transductores de alta frecuencia: Tonpiliz Transducer

Este tipo de transductores vibran longitudinalmente y generan señales entre 3 kHz y 100 kHz. Se puede ajustar el ángulo para localizar objetos. Un transductor bien diseñado tienen una eficiencia del 80-90%. Funcionan cerca de la frecuencia de resonancia. La superficie de la cabeza es mayor que la superficie del elemento cerámico por que los incrementos en la señal de salida para un voltaje dado en el elemento cerámico asegura una impedancia mejor

Aunque las vibraciones longitudinales de un transductor tonpiliz, pueden generar señales de 100 kHz, las dimensiones son muy pequeñas para estas frecuencias. Es más económico construir un transductor de un solo elemento cerámico, con la polarización y el campo eléctrico en la dirección del espesor.

### 2.5.3.6 Transductores ultrasónicos para diagnósticos médicos

Un obstáculo en el desarrollo de este tipo de transductores es la gran impedancia acústica que existe entre la cerámica piezoeléctrica y el cuerpo humano. Una solución a este problema es aplicar un apoyo mínimo al elemento cerámico e incorporar una lamina en la cara frontal del elemento.

También se pueden usar materiales Relaxor para diagnósticos médicos. Se requiere una alta permitividad, alta sensibilidad, alto factor electromecánico y un alto punto de Curie. Estos materiales son difíciles de producir, caros, además son susceptibles a la corrosión en los entornos médicos.

### 2.5.3.7 Medidores de Flujo

Dos transductores piezoeléctricos son capaces de medir la velocidad de un gas o de un liquido. Los dos transductores emiten pulsos pequeños, si los tiempos de retraso son iguales es que el gas esta quieto. Si el gas esta en movimiento los tiempos de retraso serán proporcionales a la velocidad.

$$t_1 = L/(v + w) \quad t_2 = L/(v - w) \quad w = (L/2)(1/t_1 - 1/t_2)$$

### 2.5.3.8 Transformadores

Los transformadores piezoeléctricos ofrecen una serie de ventajas como su menor tamaño, no generan ruido electromagnético (ideal para uso en ordenadores) y tienen una salida más estable para una entrada que varia. Están compuestos de dos componentes cerámicos, un componente de entrada y otro componente de salida, combinados en un solo elemento. El componente de entrada transforma la entrada eléctrica en energía mecánica. El componente de salida transforma la energía mecánica en energía eléctrica. Normalmente operan a la frecuencia de resonancia.

El valor de  $(V_o/V_{in})$  lo podemos determinar a partir de la ecuación:

$$r = (4/\Pi^2)(k_{31}k_{33}Q_m)(l_2/h)[2\sqrt{(s_{33}^E/s_{11}^E)} / (1 + \sqrt{s_{33}^D/s_{11}^E})]$$

$$r = k_1k_2Q_m$$

En la figura siguiente se muestra el circuito eléctrico equivalente para un transformador tipo Rosen:

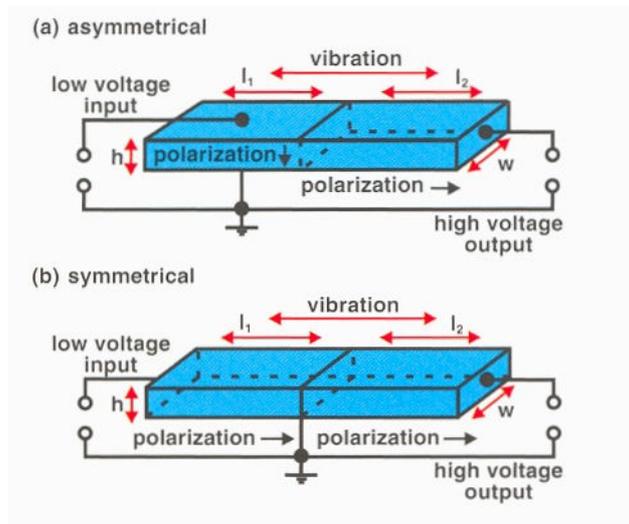


Figure 1.25 Transformador piezoeléctrico tipo Rosen

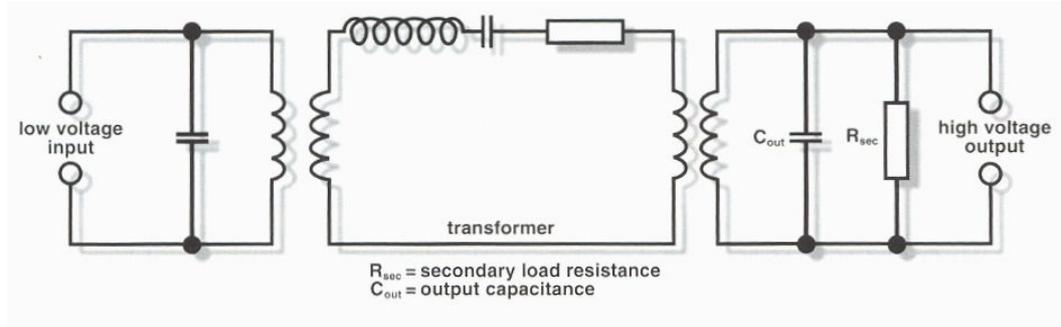


Figure 1.26 Circuito eléctrico equivalente de un transformador tipo Rosen

Su eficiencia es máxima cuando  $R_{sec} = 1/(w \cdot C_{out})$

Existen modificaciones para mejorar la fuerza mecánica de un transformador piezoeléctrico.

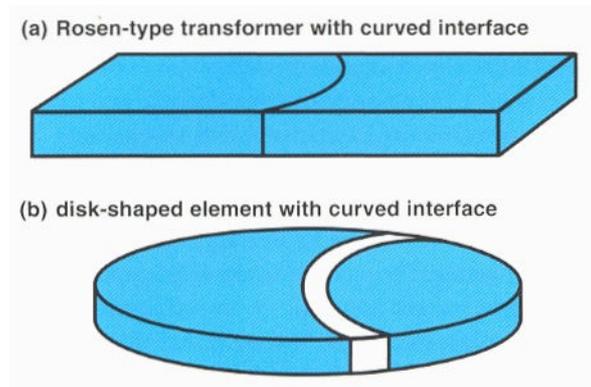


Figure 1.27 Modificaciones para mejorar la fuerza mecánica

### 3 TRANSFORMADORES DE MEDIDA CONVENCIONALES

Los transformadores de medición para alta tensión han sido utilizados desde sus inicios en las redes de transmisión y distribución eléctricas de energía.

La importancia de estos equipos es fundamental pues constituyen los sensores de los sistemas de control, protecciones, medición y monitoreo de las redes eléctricas.

El desarrollo en su diseño ha ido obedeciendo a exigencias cada vez mas estrictas de precisión, e influenciado también por la aplicación de la electrónica a los equipos de medición y de protecciones, así como a la ciencia de los materiales aplicada en su diseño.

La confiabilidad de estos equipos se ha convertido en un factor muy importante en el diseño de estos equipos, ya que debe garantizarse su funcionamiento tanto en condiciones normales, como bajo situaciones de presencia de fallos en la red.

Los transformadores ideales, nunca se podrán construir en realidad. Lo que puede construirse son transformadores reales; dos o más bobinas de alambre, físicamente envueltas alrededor de un núcleo ferromagnético. Las características de un transformadores real se aproximan mucho a las de un transformadores ideal, pero sólo hasta cierto grado.

Un transformador consiste en dos bobinas de alambre enrolladas alrededor de un núcleo ferromagnético. La bobina primaria del transformador está conectada a una fuente de fuerza de *ca* y la bobina secundaria está en circuito abierto.

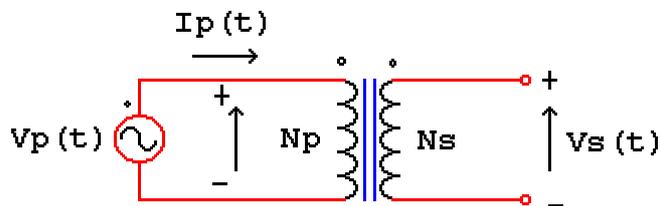


Figure 2.1 Modelo de un transformador ideal

La base del funcionamiento del transformador se puede derivar de la ley de Faraday

$$e_{\text{ent}} = dl / dt$$

En donde  $l$  es el flujo magnético ligado de la bobina, a través de la cual el voltaje se induce. El flujo ligado total  $l$  es la suma de los flujos que pasan por cada vuelta de la bobina, sumando tantas veces como vueltas tenga dicha bobina. El flujo magnético total que pasa por la bobina depende de la posición de cada una de las espiras de las bobinas.

### 3.1 Relación de voltaje a través de un transformador

Esta ecuación significa que la relación entre el voltaje primario, causado por el flujo mutuo, y el voltaje secundario, causado también por el flujo mutuo, es igual a la relación de espiras del transformador. Puesto que en un transformador bien diseñado  $f_M \gg f_{LP}$  y  $f_M \gg f_{LS}$ , la relación del voltaje total en el primario y el voltaje total en el secundario es aproximadamente

$$\frac{V_p}{V_s} = \frac{N_p}{N_s}$$

Cuanto más pequeños son los flujos dispersos del transformador, tanto más se aproxima la relación de su voltaje total al transformador ideal.

$F_P$  = flujo medio total del primario.

$F_M$  = componente del flujo de enlace entre las bobinas primaria y secundaria.

$F_{LP}$  = flujo de dispersión del primario.

$F_S$  = flujo medio total del secundario.

$F_{LS}$  = flujo de dispersión del secundario.

### 3.2 La corriente de magnetización en un transformador real.

Cuando una fuente de tensión de *ca* se conecta a un transformador, fluye una corriente por el circuito primario, aun cuando su circuito secundario esté en circuito abierto. Esta corriente es la corriente necesaria para producir un flujo en el núcleo ferromagnético real. Consta de dos componentes: la corriente de magnetización  $i_m$ , que es la corriente necesaria para producir el flujo en el núcleo del transformador, y la corriente de pérdidas en el núcleo  $i_{h+e}$ , que es la corriente necesaria para compensar las pérdidas por histéresis y corrientes parásitas.

La corriente de magnetización en el transformador no es sinusoidal. Los componentes de más alta frecuencia en la corriente de magnetización se deben a la saturación magnética en el núcleo del transformador.

Los componentes de más alta frecuencia en la corriente de magnetización pueden ser más bien grandes, comparados con la componente fundamental. En general, cuanto más se impulse un núcleo de transformador hacia la saturación, tanto más grandes se volverán los componentes armónicos.

La otra componente de la corriente en vacío del transformador es la corriente necesaria para producir la potencia que compense las pérdidas por histéresis y corrientes parásitas en el núcleo. Esta es la corriente de pérdidas en el núcleo. Supongamos que el flujo en el núcleo es sinusoidal. Puesto que las corrientes parásitas en el núcleo son proporcionales a  $df/dt$ , las corrientes parásitas son las más grandes cuando el flujo en el núcleo está pasando a través de 0 Wb. La pérdida por histéresis es no lineal, pero también es la más grande mientras que el flujo en el núcleo pasa por 0.

La corriente total del núcleo en vacío, se llama la corriente de excitación del transformador. Es, simplemente, la suma de la corriente de magnetización y la corriente por pérdidas en el núcleo:

$$i_{ex} = i_m + i_{h+e}$$

### 3.3 Determinación de los valores de los parámetros en el modelo de transformador.

Es posible determinar experimentalmente los valores de las inductancias y resistencias en el modelo de un transformador. Una aproximación adecuada de estos valores se puede obtener con dos ensayos: ensayo de circuito abierto y ensayo de corto circuito.

En el ensayo de circuito abierto, la bobina secundaria del transformador está en circuito abierto y su bobina primaria está conectada a una línea con tensión nominal. Bajo las condiciones descritas, toda la corriente de alimentación debe estar fluyendo a través de la rama de excitación del transformador. Los elementos en serie  $R_P$  y  $X_P$  son demasiado pequeños en comparación con  $R_C$  y  $X_M$  para causar una caída significativa de voltaje, así que esencialmente todo el voltaje de alimentación se aplica a través de la rama de excitación.

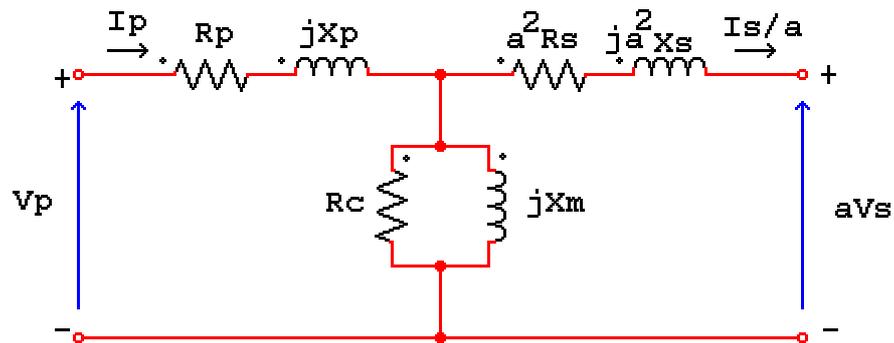


Figure 2.2 Modelo de un transformador real

La manera más fácil de calcular los valores de  $R_C$  y  $X_M$  es observar primero la admitancia de la rama de excitación. La conductancia de la resistencia que modela las pérdidas del núcleo se expresa por:

$$G_C = 1 / R_C$$

Y la susceptancia del inductor magnetomotriz viene dada por:

$$B_M = 1 / X_M$$

Puesto que estos dos elementos son paralelos, sus admitancias se suman y la admitancia total de excitación es:

$$Y_E = G_C - jB_M = 1 / R_C - j1 / X_C$$

La magnitud de la admitancia de excitación (referida al circuito primario) se puede encontrar por medio del ensayo del circuito abierto de voltaje y corriente:

$$|Y_E| = I_{OC} / V_{OC}$$

El ángulo de la admitancia puede encontrarse conociendo el factor de potencia del circuito. El factor de potencia en circuito abierto (FP) se da por:

$$FP = \cos(q) = P_{OC} / V_{OC} I_{OC}$$

El *Ensayo de cortocircuito* se realiza poniendo el transformador en cortocircuito por uno de los dos arrollamientos. Después aplicamos al otro lado una tensión reducida hasta que pase por este lado del transformador la corriente nominal, pueden hallarse fácilmente las constantes más importantes de los devanados, como son sus tensiones, resistencias, reactancias de dispersión, la reactancia de cortocircuito y las pérdidas en las bobinas incluidas las adicionales por efecto superficial. Así pues tomamos nuevamente el circuito equivalente del transformador y se considerara el caso de que la resistencia y la reactancia de carga sean nulas, es decir, que los bornes del secundario estén en cortocircuito, en este caso se cumple:

$$U_s \frac{N_p}{N_s} = 0$$

La tensión primaria de cortocircuito  $U_{cc}$  se consume íntegramente en la impedancia, que por esta razón también se ha denominado impedancia de cortocircuito. El ensayo se efectuará aplicando baja tensión al primario, con el fin de que por él circule justamente la corriente de plena carga. Las resistencias comprenden el aumento debido al flujo de dispersión producido por la corriente a plena carga, a la vez que por ser muy reducido el flujo que se precisa para inducir en los devanados de la escasa f.e.m. que debe desarrollarse, la corriente de excitación es prácticamente despreciable. Así en el ensayo con una corriente de cortocircuito igual a la nominal en plena carga, surgen

inmediatamente las pérdidas en los bobinados  $p_{cc}$  incluidas las adicionales, por hallarse presente todo el flujo de dispersión, en tanto por uno:

$$p_{cc} = \frac{P_{cc}}{S}$$

Donde S es la potencia aparente del transformador. De la misma forma, si  $U_{cc}$  es la tensión nominal del devanado que actúa ahora como primario con el voltaje  $u_{cc}$ , en valor relativo:

$$u_{cc} = \frac{U_{cc}}{U_N}$$

La magnitud de la impedancia de cortocircuito es :

$$Z_{cc} = R_{cc} + jX_{cc}$$

$$R_{cc} = \frac{P_{cc}}{i_{cc}^2} \quad X_{cc} = \frac{u_{cc} \operatorname{sen}(\varphi_{cc})}{i_{cc}}$$

Siendo  $\varphi_{cc}$  el ángulo de desfase entre la intensidad y la tensión de cortocircuito:

$$\varphi_{cc} = \arccos\left(\frac{P_{cc}}{u_{cc} i_{cc}}\right)$$

### 3.4 Características particulares de los transformadores de corriente

Estos se conectan en serie en el circuito, y deben ser capaces de soportar las sobrecorrientes que se presentan en la red, y que dependen del diseño de la instalación eléctrica. Sobrecorrientes térmicas permanentes (del 20%), las cuales no deben superar ciertos límites de sobretemperatura, y deben respetar condiciones de precisión.

Los valores de 20%, 80 y 200 veces se han normalizado y son los valores que se presentan en instalaciones proyectadas con criterios normalizados, y a su vez son valores que es conveniente que sirvan de límites cuando se proyectan instalaciones.

La carga o prestación del transformador de corriente es la potencia que el transformador debe tener en su circuito secundario, manteniendo su clase de precisión (error de relación y error de ángulo).

La prestación debe ser adecuada a la carga que el transformador alimenta, en la carga se deben incluir los instrumentos, y los cables de conexión desde los transformadores a los instrumentos.

Es importante responder a la pregunta de cual es la función del transformador, si este alimenta dispositivos de medición, son muy importantes sus características en régimen permanente. Si en cambio el transformador alimenta dispositivos de protección es importante su comportamiento en régimen transitorio. La normativa ha fijado el valor de sobrecorriente representativa de estas situaciones en 20 veces la corriente nominal.

Cuando se presentan estas sobrecorrientes el transformador debe actuar de forma distinta según cual sea su función, puede ser interesante que el transformador se sature bajo efectos de sobrecorriente, para proteger los instrumentos que se encuentran alimentados por el, en este caso se falsea la medición, lógicamente esta característica es indeseada si se alimentan protecciones. Aunque con el instrumental de medición moderno, el cual tiene una gran capacidad de sobrecarga, ha perdido importancia.

Surge entonces el concepto de que un transformador de medición debe saturar cuando se presentan sobrecorrientes, mientras que uno de protección, en cambio debe reflejar correctamente la corriente, no saturarse con valores de varias veces la corriente nominal.

La mayoría de los transformadores son con núcleo magnético, y tienen características ligadas esencialmente a las características del hierro. El circuito equivalente del transformador de corriente es en esencia el mismo que se estudia para el transformador de potencia, pero debe notarse que el transformador de corriente trabaja con inducción variable, en otras palabras, la tensión entre bornes es variable.

La precisión del transformador esta ligada a la menor corriente derivada por el brazo de excitación. Cuando por el aumento de corriente se supera el codo de saturación la precisión cae.

Si se varia la carga aumentándola, se alcanzara la tensión de saturación con menor corriente, y viceversa.

Surgen entonces algunos conceptos muy importantes en la aplicación de los transformadores de corriente. Si estos están destinados a la medición deben estar cargados lo justo, si están menos cargados que su prestación, no saturaran de la forma esperada. Si están mas cargados perderán precisión. Para un núcleo de protección, si se carga menos se extenderá su campo de acción en el que la saturación no se nota.

El factor de seguridad para los transformadores de medida es la relación entre la corriente nominal de seguridad y la corriente nominal primaria.

Cuando se desean hacer mediciones de corrientes transitorias será importante que el error en el rango de corrientes elevadas no sea grande, entonces no es correcto conectarse a un transformador de medida que se satura, y falsea la medida.

El factor limite de precisión es el valor mas elevado de la corriente primaria para la cual el transformador debe satisfacer las prescripciones correspondientes al error compuesto.

### **3.5 Características particulares de los transformadores de tensión**

Estos se conectan en derivación, entre fases (en tensiones bajas y medias) o entre fase y neutro cualquiera que sea la tensión.

La conexión fase-neutro es muy útil, ya que entrega tensiones que permiten reconstruir tanto las tensiones simples como las compuestas, mientras que las tensiones obtenidas de las conexiones fase-fase no permiten reconstruir las tensiones fase-neutro, y bajo circunstancias especiales (por ejemplo cuando se desea conocer el contenido armónico) es importante poder conocer las tensiones simples.

Los transformadores de tensión funcionan prácticamente a tensión constante, a inducción constante, y no presentan efectos de saturación tan notables como los transformadores de corriente.

La tensión nominal primaria coincide con la tensión nominal del sistema , o si están conectados fase-neutro, será la tensión nominal del sistema sobre raíz de 3.

La prestación del transformador no esta condicionada a la carga que este alimenta. Debe observarse que la precisión de la medida puede ser afectada por los cables de conexión (sección y longitud) y la corriente que circula por ellos.

Entonces es conveniente separar los circuitos por sus funciones en un lugar próximo al núcleo. El transformador debe soportar situaciones de sobretension en la red.

Factor de tensión es el valor mas elevado de tensión con el cual se pretende que el transformador satisfaga prescripciones de calentamiento.

### 3.6 Pérdidas en un transformador

Las pérdidas de un transformador incluyen las pérdidas en vacío (pérdidas en el núcleo y pérdidas por corriente de excitación) y las pérdidas en carga (pérdidas por resistencia, pérdidas por corrientes parásitas en los devanados y pérdidas adicionales).

Las pérdidas en vacío constan de pérdidas por histéresis y por corrientes parásitas de Foucault en el núcleo. Además, existen unas pequeñas pérdidas por resistencia en el devanado de excitación debido a la corriente de excitación, pero éstas son despreciables. Para las ondas de tensión reales que sólo contienen armónicos impares, el valor máximo del flujo se determina mediante el valor medio de la tensión. Por lo tanto, las pérdidas por histéresis dependen no del valor eficaz de la tensión, sino de su valor medio. Las pérdidas por corrientes parásitas, por otra parte, dependen del valor eficaz de la tensión. Las pérdidas en carga son: las pérdidas por resistencia y las pérdidas por corrientes parásitas, en los devanados y conexiones, son debidas a las corrientes de carga; las pérdidas adicionales en los devanados, las abrazaderas del núcleo, la cuba, etc., son causadas por flujos dispersos; y las pérdidas debidas a las corrientes circulatorias, si las hay, en los devanados en paralelo.

Las perdidas que ocurren en los transformadores reales tienen que explicarse en cualquier modelo confiable del comportamiento del transformador. Los detalles principales que deben tenerse en cuenta para la construcción de un modelo son:

*Pérdidas (FR) en el cobre.* Pérdidas en el cobre son pérdidas por resistencias en las bobinas primaria y secundaria del transformador. Ellas son proporcionales al cuadrado de la corriente de dichas bobinas.

*Pérdidas por corrientes parásitas.* Las pérdidas por corrientes parásitas son pérdidas por resistencia en el núcleo del transformador. Ellas son proporcionales al cuadrado del voltaje aplicado al transformador.

*Pérdidas por histéresis.* Las pérdidas por histéresis están asociadas con los reacomodamientos de los dominios magnéticos en el núcleo durante cada medio ciclo.

*Flujo de dispersión.* Los flujos  $f_{LP}$  y  $f_{LS}$  que salen del núcleo y pasan solamente a través de una de las bobinas de transformador son flujos de dispersión. Estos flujos escapados producen una autoinductancia en las bobinas primaria y secundaria, y los efectos de esta inductancia deben tenerse en cuenta.

## 4 TRANSFORMADORES DE MEDIDA INTELIGENTES

La electrónica demanda que los sistemas cada vez sean mas pequeños. Para medir tensiones o corrientes altas es necesario el uso de un transformador para poder medir. Una alternativa es el uso de transformadores piezoeléctricos.

Un transformador piezoeléctrico es básicamente un resonador. Los transformadores piezoeléctricos se pueden clasificar según su modo de vibración como los resonadores. El modo que mayor posibilidades nos ofrece es el modo longitudinal. Cuando la frecuencia de vibración es un numero entero de medias longitudes de onda es igual a la longitud de la barilla, la barilla estará en resonancia mecánica.

Además de las presiones mecánicas esta el campo eléctrico generado debido al efecto piezoeléctrico. La dirección del campo eléctrico será la misma que la dirección de polarización de la cerámica.

Un transformador piezoeléctrico esta formado por dos terminales. El primer terminal es conectado a la entrada y el segundo terminal es conectado a la salida. Estos transformadores funcionan mejor a la frecuencia de resonancia, ya que producen vibraciones de mayor amplitud. Por este motivo un transformador piezoeléctrico puede ser usado como un filtro.

El principio de operación de un transformador piezoeléctrico consiste en que puede transformar energía eléctrica en energía eléctrica (de otro nivel) a través de vibraciones mecánicas. En otras palabras, un transformador piezoeléctrico es capaz de convertir una tensión de un nivel en otra tensión de otro nivel a través de vibraciones a lo largo de una estructura. La tensión que se desea medir produce una vibración en el emisor. Esta vibración se transmite a través de la estructura y es recibida por el receptor. El receptor es el encargado de transformar estas vibraciones en una tensión proporcional a la que se desea medir.

Los transformadores piezoeléctricos pueden clasificarse según su modo de vibración o según sus frecuencias de operación. Normalmente se clasifican en tres grupos: los de alto voltaje (Rosen-type), los de bajo voltaje o los de modo longitudinal y los de modo radial.

En los transformadores Rosen-type se combina el modo transversal para el actuador y el modo longitudinal para el transductor . Las vibraciones son en modo longitudinal y la frecuencia de resonancia es menor.

Los transformadores con vibraciones en la dirección del espesor combinan modo longitudinal en el actuador y modo longitudinal en el transductor. Su frecuencia de resonancia es mayor.

Los transformadores de modo radial están formados por un actuador y un transductor que operan en modo transversal.

Las ventajas que introducen los transformadores piezoeléctricos es que son menos pesados, no emiten ruido electromagnético. Tampoco poseen anillos por lo que tampoco existe la posibilidad de cortocircuito entre los anillos , y que son muy eficientes si se trabaja a la frecuencia de resonancia. Otra ventaja es que no hay peligro de incendio.

#### 4.1 Modelo de un transformador piezoeléctrico

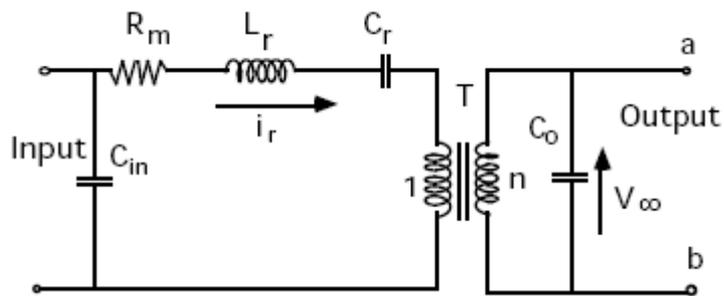


Figure 3.1 Modelo de un transformador piezoeléctrico

La figura anterior muestra un modelo de transformador bastante aceptado. Esta basado en las resonancias mecánicas de la estructura. El circuito equivalente de un transformador piezoeléctrico consta de un transformador, un condensador de entrada, un condensador de salida. Además consta de una bobina, un condensador y una resistencia en serie que representan la resonancia mecánica para la frecuencia

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_r C_r}}$$

$R_m$  en realidad representa las pérdidas mecánicas. Este circuito es erróneo porque permite pasar DC al secundario para imitar la ganancia mecánica. Este efecto no existe en los transformadores piezoeléctricos. Si se quisiera simular este esquema en Pspice existiría el problema de que el transformador no es ideal. Este efecto se consigue imitar mediante el uso de dos fuentes de corrientes dependientes, una fuente de tensión en el primario y una fuente de corriente en el secundario.

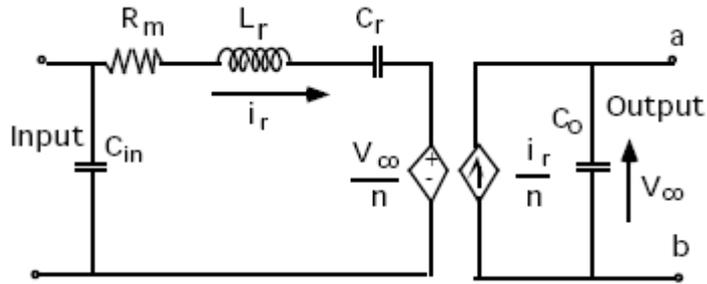


Figure 3.2 Modelo avanzado de un transformador piezoeléctrico

Una ventaja de este modelo es que no introduce componentes inductivos. La segunda ventaja es que permite componentes DC, como en los transformadores piezoeléctricos.

Los componentes de DC son bloqueados por  $C_r$ , mientras que no provoca efecto sobre las señales AC, que son las que nos interesan. Este modelo es más correcto desde el punto de vista teórico. Considerando el alto Q, y que se trabajara cerca de la frecuencia de resonancia, solo los primeros armónicos de la tensión de entrada afectaran a la corriente de resonancia. La tensión AC de salida podrá ser rectificadora por un rectificador.

Las dimensiones mecánicas y el valor de las constantes del material determinan los parámetros del material. Estos parámetros tienen que ser obtenidos experimentalmente. Hay que tener en cuenta que es un elemento no lineal, por lo tanto solo se puede describir este comportamiento para un pequeño rango de frecuencias. Los procedimientos de medida deben ser realizados entorno a su frecuencia de operación y a los niveles de corriente nominales.

Cuando los terminales de entrada o de salida son cortocircuitados, el circuito equivalente es:

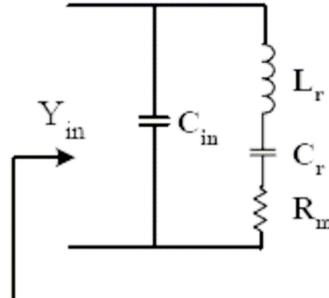


Figure 3.3 Circuito equivalente con los terminales de salida cortocircuitados

El procedimiento de medida se tiene que llevar a cabo desde los terminales de entrada y salida del piezoeléctrico, mientras que los terminales complementarios están cortocircuitados.

La capacitancia total de entrada y de salida son medidas a bajas frecuencias. También están incluidas las capacidades parásitas.

Para determinar la admitancia de entrada, la tensión de entrada debe ser elegida para mantener la corriente de entrada en el rango de operación.

$$Y_{in} = \frac{\frac{50 + R_i}{(50 + R_{ref})R_i} \frac{V_A}{V_R}}{1 - \frac{50}{50 + R_{ref}} \frac{V_A}{V_R}}$$

Las capacidades son estimadas a partir de los siguientes valores de  $C_t$ , la frecuencia de resonancia y la frecuencia de antiresonancia:

$$C_{(in/o)} = \left( \frac{f_{r(in/o)}}{f_{a(in/o)}} \right)^2 C_{T(in/o)}$$

Esta ecuación solo es valida cuando el factor de calidad es lo suficientemente alto. Los parámetros del circuito  $R_m$ - $C_r$ - $L_r$  son calculados a partir de la admitancia calculada anteriormente:

$$R_{eq_i} = \frac{1}{\text{Re}\{Y_{in}(f_i)\}}; \quad C_{eq_i} = \frac{\text{Im}\{Y_{in}(f_i)\}}{\omega_i}$$

$$C_{p_i} = C_{eq_i} - C_T; \quad C_{s_i} = \frac{[1 + (\omega_i C_{p_i} R_{eq_i})^2]}{(\omega_i C_{p_i} R_{eq_i})^2} C_{p_i}$$

Si particularizamos para  $f_1$  y  $f_2$ , los parámetros obtenidos son:

$$L_r = \frac{C_{s_1} - C_{s_2}}{C_{s_1} C_{s_2} (\omega_1^2 - \omega_2^2)}; \quad C_r = \frac{C_{s_1}}{1 + \omega_1^2 C_{s_1} L_r}; \quad R_m = \frac{R_{eq_i}}{1 + (\omega_i C_{p_i} R_{eq_i})}$$

$$\eta = \sqrt{\frac{L_{r(out)}}{L_{r(in)}}}$$

#### 4.2 Pérdidas en un transformador piezoeléctrico

Los mecanismos de pérdidas para el caso de transformadores piezoeléctricos pueden ser de dos tipos: pérdidas mecánicas, pérdidas dieléctricas, que son introducidas considerando los parámetros correspondientes (coeficientes elásticos, dieléctricos) como magnitudes complejas que en general dependen de la frecuencia.

En todos los casos las mismas pueden expresarse a través de tangentes de pérdidas que están asociadas a la existencia de la parte imaginaria de las magnitudes que describen este fenómeno y que hasta el momento se habían considerados reales e independientes de la frecuencia. Dicha tangente define un ángulo, cuyo significado físico corresponde a un desfase adicional que se le agrega a la relación causa-efecto que existe en cada caso considerando movimiento sinusoidal. Las pérdidas dieléctricas

representan el fenómeno de disipación dieléctrica así como las pérdidas mecánicas señalan los efectos de disipación mecánica.

*Perdidas dieléctricas:* Las pérdidas dieléctricas solo son significantes para condiciones normales de carga. Es necesario calcular la tensión de salida. Se cambiarán las unidades de esta tensión a unidades de campo eléctrico. Las pérdidas dieléctricas vienen dadas por:

$$P_{DE} = \omega V_L$$

Otro método para calcular las pérdidas es a través de la capacidad  $C_0$ , que pasará a ser una magnitud compleja,

$$C_0 = \epsilon^s A / l$$

$C_0$  es la propiedad capacitiva del material piezoeléctrico,  $\epsilon^s$  es la constante dieléctrica,  $A$  es el área,  $l$  longitud.

En realidad la constante que tiene en cuenta las pérdidas es la constante dieléctrica que en el caso de un material sin pérdidas será real

$$\epsilon^s \rightarrow \text{real.}$$

Y si el material tiene pérdidas, estas serán tenidas en cuenta en la tangente de pérdida eléctrica de la forma siguiente:

$$\epsilon^s \rightarrow \epsilon^s(1 - i \tan(\delta_E)),$$

*Perdidas mecánicas:* Se pueden considerar las pérdidas mecánicas a través de magnitudes elásticas en forma de números complejos, es más conveniente considerar este mecanismo a través del vector de onda  $k$ , mediante una parte imaginaria. Esto se puede hacer, ya que el mismo está relacionado con las magnitudes elásticas a través de la velocidad de fase y la frecuencia. Por tanto podemos considerar:

$$k \text{ (vector de onda, elástico)} \rightarrow k - i \alpha \text{ (caso de pérdidas mecánicas)}$$

aquí  $\alpha$  es el coeficiente de atenuación, que está relacionado con el factor de calidad mecánico  $Q$  de la siguiente forma:

$$Q = k/2\alpha$$

y con la tangente de pérdida mecánica de la forma:

$$Q^{-1} = \tan(\delta_{mec})$$

En las ecuaciones el parámetro que se valora es el coeficiente de atenuación, en cambio en las tablas lo que aparece es la tangente de pérdidas mecánicas, por eso se hace la conversión, que finalmente queda:

$$\alpha = \tan(\delta_{mec})k/2$$

## 5 Modelo numérico

### 5.1 Introducción al problema

Se ha intentado realizar un modelo numérico para preevaluar el diseño del sensor. Este sensor recibe una señal eléctrica periódica. Esta señal se transforma en energía mecánica por el material piezoeléctrico situado en el emisor. Estas vibraciones se transmiten por la estructura rellena con un fluido dieléctrico. Estas vibraciones son recibidas por el receptor. Este receptor está formado por material piezoeléctrico, el cual se encarga de transformar energía mecánica en energía eléctrica. Esta señal será procesada y se obtendrá la medida deseada.

En el análisis de una estructura lineal es conveniente distinguir entre entrada dinámica y entrada estática. Se estudia cada efecto por separado y luego se superponen para observar el efecto total. Una carga dinámica es aquella que varía su magnitud y dirección con el tiempo. Como consecuencia las presiones resultantes también varían con el tiempo. La respuesta a una carga dinámica se expresa en términos de desplazamientos de la estructura.

Estas cargas pueden ser periódicas o no periódicas. Una carga periódica exhibe la misma variación temporal ciclo tras ciclo. El análisis de una carga periódica se puede representar como la suma de componentes armónicos simples.

El sensor consta de cuatro bloques, emisor (E), estructura (S), fluido (F), receptor (R). El emisor y el receptor están formados por materiales piezoeléctricos. El emisor produce ondas longitudinales que se transmiten por el fluido y la estructura. El receptor como se ha dicho anteriormente transforma energía mecánica en energía eléctrica. Esta señal tendrá que ser filtrada y amplificada para obtener una medida correcta.

El modelo numérico se formulara en términos de ecuaciones diferenciales. Se asumirá que los modos longitudinales son los únicos responsables de la transmisión de las ondas a través de la estructura. Los modos transversales no se tienen en cuenta porque se considerara que el grosor del cilindro será lo suficientemente grande como para que no existan vibraciones transversales. Esto significa que la dinámica del problema estudiara solo este grado de libertad. Se considerara un problema

axil simétrico y con dependencia respecto al tiempo de tipo armónica. Al desprestigiar las vibraciones radiales, significa que no existe velocidad radial.

En la dinámica del fluido se considerará que el desplazamiento que se induce en el emisor es el mismo que induce en el fluido. Otra consideración deberá ser la igualdad de presiones del fluido con los esfuerzos normales en el emisor y receptor.

Cuando la tensión que se desea medir se induce en el emisor se observa que las deformaciones del emisor, del fluido y de la estructura varían con el tiempo. En el emisor habrá que tener en cuenta las ecuaciones lineales del comportamiento piezoeléctrico. También se considerará el equilibrio de la cantidad de movimiento en la dirección axial. Si añadimos las condiciones de contorno que representan la igualdad de desplazamientos entre la base del emisor y la parte superior de la estructura, y la igualdad de esfuerzos entre el fluido y el emisor se obtendrá el modelo matemático que relacionan el emisor, la estructura y el fluido.

Una vez que los desplazamientos longitudinales llegan al receptor, estas presiones generan la señal eléctrica que se desea medir. Esta variación también depende del tiempo de forma armónica. Las ecuaciones que rigen el comportamiento del receptor serán las mismas que para el emisor, las ecuaciones lineales que rigen el comportamiento piezoeléctrico y el equilibrio de la cantidad de movimiento.

Si lo que interesa es tener como salida una tensión se puede utilizar la configuración de circuito abierto. En esta configuración se impone que no se induce carga eléctrica, es decir  $D = 0$ .

Si lo que nos interesa es tener como salida una intensidad habrá que utilizar la configuración de cortocircuito. En esta configuración la tensión es cero, lo que implica que  $E = 0$ .

## 5.2 Solución del problema

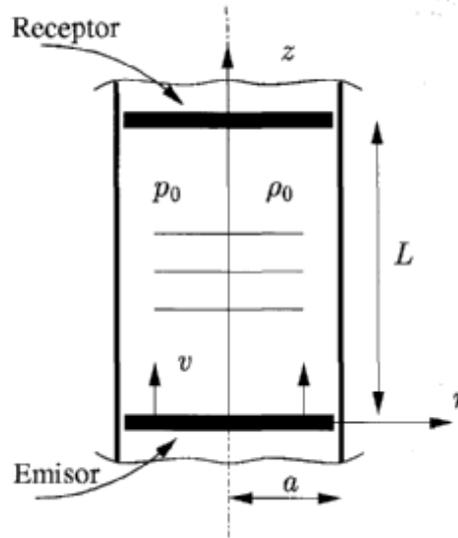


Figure 4.1 Esquema de la guía cilíndrica

### 5.2.1 Guía cilíndrica de ondas con paredes rígidas

Inicialmente para la resolución del problema hay que estudiar dos variantes. La primera consiste en el estudio de la propagación en un cilindro con presión cero en su guía de onda límite. La segunda variante del problema consiste en el estudio de la propagación en un cilindro que carece de vibraciones lo que implica que su velocidad radial ( $r = a$ ) en el límite es cero.

Teniendo en cuenta las consideraciones anteriores se obtiene la ecuación de ondas en un cilindro con un piezoeléctrico, en el cual se induce una velocidad en la parte inferior se puede escribir como:

$$\nabla^2 \varphi = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \varphi}{\partial t^2} \quad 0 < r < a \quad z \geq 0 \quad (1)$$

$$\left. \frac{\partial^2 \varphi}{\partial t \partial r} \right|_{r=a} = \dot{u}_{r=a} = 0 \quad (2)$$

$$\left. \frac{\partial^2 \varphi}{\partial t \partial z} \right|_{z=a} = \dot{u}_{z=a} = v_n \exp(j\omega t) \quad (3)$$

La relación que existe entre la función potencial,  $\phi$ , el campo de presiones,  $p$ , y velocidades ( $\dot{u}_r, 0, \dot{u}_z$ ) es:

$$p(r, z, t) = -\rho \frac{\partial^2 \phi}{\partial t^2}$$

$$\dot{u}_r(r, z, t) = \frac{\partial^2 \phi}{\partial r \partial t}$$

$$\dot{u}_z(r, z, t) = \frac{\partial^2 \phi}{\partial z \partial t}$$

La solución al problema será de la forma  $\phi = \hat{\phi}(r, z, t)$  donde se ha aplicado la condición de problema axilsimetrico,  $\frac{\partial}{\partial \theta} \equiv 0$ . Se supone además que la dependencia temporal de la solución es armónica, es decir. Aplicando esta transformación, el problema de transmisión de ondas en el cilindro se puede escribir como:

$$\nabla^2 \phi = -\left(\frac{w}{c}\right)^2 \phi \quad 0 < r < a \quad z \geq 0 \quad (4)$$

$$\left. \frac{\partial \phi}{\partial r} \right|_{r=a} = 0 \quad (5)$$

$$-jw \left. \frac{\partial \phi}{\partial z} \right|_{z=0} = v_n \quad (6)$$

Aplicando separación de variables, es decir, buscamos soluciones al problema (4) de la forma  $\phi(r, z) = R(r).Z(z)$  se obtendrá:

$$\frac{1}{R} \frac{d^2 R}{dr^2} + \frac{1}{rR} \frac{dR}{dr} = -\frac{1}{Z} \frac{d^2 Z}{dz^2} - \left(\frac{w}{c}\right)^2 = -k^2$$

El problema en la coordenada radial corresponde al siguiente problema de Sturm-Liouville:

$$\frac{d^2 R}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dR}{dr} + k^2 R = 0 \quad (7)$$

$$\left. \frac{dR}{dr} \right|_{r=a} = 0 \quad (8)$$

Y que corresponde con la función de Bessel de orden  $\nu = 0$ . La solución se puede escribir como:

$$R_m(r) = \frac{\sqrt{2} J_0(k_m r)}{a J_0(k_m a)} \quad m \geq 0$$

Donde se ha empleado el factor de normalización  $\rho = \frac{a J_0(k_m a)}{\sqrt{2}}$  definido en la ecuación (10) del apéndice A, y  $h = 0, l = 1$ .

Los autovalores del problema,  $\lambda_m$ , se calculan aplicando la condición de contorno (8). Por tanto:

$$\left. \frac{dR}{dr} \right|_{r=a} = A \left. \frac{d}{dr} (J_0(kr)) \right|_{r=a} = -A k J_1(ka) = 0$$

Para que la solución sea distinta de la trivial,  $A \neq 0$ , por tanto,  $J_1(ka) = 0$ . Si se definen los valores  $j_{1m}$  como los ceros de la función de Bessel de primer orden,  $J_1(j_{1m}) = 0$ , es decir,  $j_{1m} = \{0, 3.8317, 7.0156, \dots\}$  entonces los autovalores serán  $k_m = j_{1m} / a$ . El problema correspondiente a la coordenada axial es:

$$\frac{d^2 Z}{dz^2} + k_z^2 Z = 0 \quad (9)$$

donde,  $k_z^2 = \left(\frac{w}{c}\right)^2 - k^2$  Teniendo en cuenta que  $k_m = j_{1m} / a$  entonces

$k_{zm}^2 = \left(\frac{w}{c}\right)^2 - k_m^2$ . La solución a este problema es:

$$Z_m(z) = B \exp(-jk_{zm}z)$$

Por tanto la solución general al problema (4) es:

$$\phi(r, z) = \sum_{m=0}^{\infty} A_m \frac{\sqrt{2}J_0(k_m r)}{aJ_0(k_m a)} \exp(-jk_{zm} z)$$

Para obtener los valores de los coeficientes de la serie,  $A_m$ , se debe aplicar la condición de contorno (6). Para ello primero se expresa la velocidad en  $z = 0$

$$v = -j\omega \frac{\partial \phi}{\partial z} \Big|_{z=0} = \omega \sum_{m=0}^{\infty} A_m k_{zm} \frac{\sqrt{2}J_0(k_m r)}{aJ_0(k_m a)} = \omega \left( A_0 k_{z0} \frac{\sqrt{2}}{a} + \sum_{m=1}^{\infty} A_m k_{zm} \frac{\sqrt{2}J_0(k_m r)}{aJ_0(k_m a)} \right)$$

donde se ha considerado que  $J_0(0) = 1$ . Esta forma es más conveniente para los siguientes desarrollos porque se debe tener en cuenta que  $j_{1,0} = 0$ . Para obtener los valores de los coeficientes  $A_0$  y  $A_m$  es necesario expresar la velocidad  $v$  y conocida como una serie de funciones de Bessel. Es decir:

$$v = V_0 \frac{\sqrt{2}}{a} + \sum_{m=1}^{\infty} V_m \frac{\sqrt{2}J_0(k_m r)}{aJ_0(k_m a)}$$

La definición de los coeficientes de la serie de Bessel es:

$$V_m = \int_0^a vr \frac{\sqrt{2}J_0(k_m r)}{aJ_0(k_m a)} dr$$

, realizando el cambio de variable  $u = k_m r$  se tiene que

$$\begin{aligned} V_m &= \frac{\sqrt{2}v}{aJ_0(k_m a)k_m^2} \int_0^{k_m a} uJ_0(u) du \\ &= \frac{\sqrt{2}v}{aJ_0(k_m a)k_m^2} \int_0^{k_m a} \frac{d}{du} (uJ_1(u)) du = \frac{\sqrt{2}v}{aJ_0(k_m a)k_m^2} uJ_1(u) \Big|_0^{k_m a} = 0 \end{aligned}$$

ya que  $J_1(k_m a) = 0$ . El único término de la serie no nulo es el que corresponde a  $m = 0$ . Así pues

$$V_m = \int_0^a v r \frac{\sqrt{2} J_0(0)}{a J_0(0)} dr = \frac{\sqrt{2} v a}{2}$$

Por tanto, identificando términos de la siguiente igualdad

$$\begin{aligned} v &= V_0 \frac{\sqrt{2}}{a} + \sum_{m=1}^{\infty} V_m \frac{\sqrt{2} J_0(k_m r)}{a J_0(k_m a)} \\ &= w \left( A_0 k_{z0} \frac{\sqrt{2}}{a} + \sum_{m=01}^{\infty} A_m k_{zm} \frac{\sqrt{2} J_0(k_m r)}{a J_0(k_m a)} \right) \end{aligned}$$

obtenemos  $A_m = 0 \quad \forall m > 0$ , y  $A_0 = va / (\sqrt{2} k_{z0} w)$ . Finalmente, la solución al problema:

$$\phi(r, z) = \frac{v}{w k_{z0}} \exp(-j k_{z0} z)$$

La distribución de presiones y velocidades y que corresponde a la ecuación de Bessel de orden  $\nu = 0$

$$p(r, z, t) = \frac{\rho w v}{k_{z0}} \exp(-j k_{z0} z) \exp(j \omega t)$$

$$u_r = 0$$

$$\dot{u}_z = v \exp(-j k_{z0} z) \exp(j \omega t)$$

donde  $k_{z0} = \omega/c$ .

El resultado obtenido indica claramente que si no se introduce una dependencia explícita con el radio a través de las condiciones de contorno, la solución radial implica la existencia de un frente de onda plano.

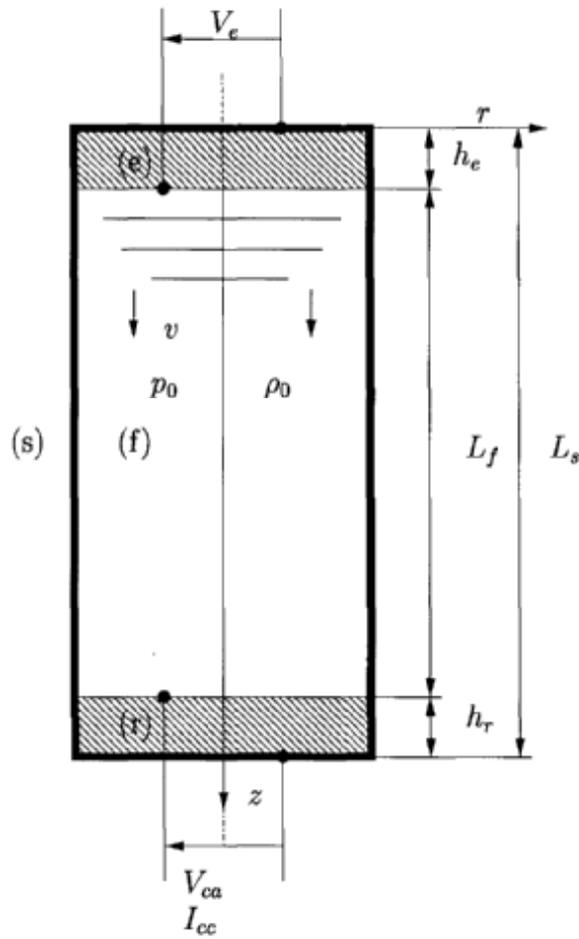


Figure 4.2 Guía de onda fluido-estructura

### 5.2.2 Guía de ondas fluido-estructura acoplado

En la Figura se muestra un esquema de la guía de ondas formada por un fluido (f) y una estructura cilíndrica (s) donde existe un emisor piezoeléctrico (e) y un receptor, también piezoeléctrico (r).

#### 5.2.2.1 Ecuaciones emisor

Se considera un elemento emisor piezoeléctrico con las siguientes ecuaciones de comportamiento

$$S_e = s_e T_e + d_e E_e$$

$$D_e = d_e T_e + \epsilon_e E_e$$

Siendo  $S_e$  la deformación desarrollada,  $s_e$  es la flexibilidad elástica,  $d_e$  es la constante de carga piezoeléctrica,  $\varepsilon_e$  es la permitividad para presión constante,  $E_e$  es el campo eléctrico y  $D_e$  es el desplazamiento eléctrico.

Si se considera el equilibrio de la cantidad de movimiento en la dirección axial se tiene la siguiente ecuación diferencia ordinaria

$$\begin{aligned} \frac{d^2 w_e}{dz^2} + k_e^2 w_e &= 0 \\ w_e(0) &= w_s(0) \\ \frac{1}{s_e} \frac{dw_e}{dz} \Big|_{z=h_e} - \frac{d_e V_e}{s_e h_e} &= p_f(0) \end{aligned}$$

donde se ha supuesto que el campo eléctrico en el emisor pueda considerarse uniforme no solo radialmente sino también axialmente. El número de ondas del emisor es  $k_e = \omega/c_e$ . Además la velocidad de propagación de ondas longitudinales del disco piezoeléctrico se define como  $c_e = \sqrt{1/(s_e \rho_e)}$ . La primera condición de contorno representa la igualdad de desplazamientos de la base del emisor y de la parte superior de la estructura. La segunda condición de contorno es la igualdad de esfuerzos entre el fluido y el emisor.

### 5.2.2.2 Ecuaciones fluido

Se considera que no existe variación ni circunferencial, axilsimétrica, ni variación radial por que se ha visto anteriormente que la única forma de que aparezcan ondas en la dirección radial es introduciendo una dependencia radial de las condiciones de contorno, y como inicialmente no se va a considerar la elasticidad radial del cilindro, se sabe que la única onda que se va a propagar es la plana, sin dependencia del radio. La ecuación de ondas del fluido se escribe como

$$\begin{aligned} \frac{d^2 \phi}{dz^2} + k_f^2 \phi &= 0 \\ \frac{d\phi}{dz} \Big|_{z=0} &= w_e(h_e) \Rightarrow p_f(0) = \rho_f \omega^2 \phi(0) = T_e(h_e) \\ \frac{d\phi}{dz} \Big|_{z=L_f} &= w_r(0) \Rightarrow p_f(L_f) = \rho_f \omega^2 \phi(L) = T_r(0) \end{aligned}$$

donde se considera que el desplazamiento del fluido,  $d\phi/dz$  es igual en las superficies de contacto entre el fluido, el emisor y el receptor, respectivamente. Igualmente, debe existir igualdad de presiones del fluido,  $p_f = \rho_f w^2 Z$  con los esfuerzos normales en el emisor y receptor.

### 5.2.2.3 Ecuaciones del receptor

Se considera un elemento receptor piezoeléctrico con las mismas ecuaciones de comportamiento que el emisor. Si se considera el equilibrio de la cantidad de movimiento en la dirección axial se tiene la siguiente ecuación diferencial ordinaria

$$\frac{d^2 w_r}{dz^2} + k_r^2 w_r + \frac{d_r}{Y_r} \frac{dE_r}{dz} = 0$$

$$\frac{1}{s_r} \frac{dw_r}{dz} \Big|_{z=0} - \frac{d_r}{s_r} E_r \Big|_{z=0} = p_f(L_f)$$

$$w_r(h_r) = 0$$

Dependiendo de la configuración del elemento receptor podemos tener dos configuraciones, cortocircuito y circuito abierto.

#### 5.2.2.3.1 Configuración de cortocircuito

La condición a imponer es que  $V_r = 0 \rightarrow E_r = 0$  y por tanto las ecuaciones de comportamiento del piezoeléctrico serán:

$$T_r = \frac{1}{s_r} S_r$$

$$D_r = d_r S_r$$

por lo que la ecuación del problema a resolver se puede escribir como

$$\frac{d^2 w_r}{dz^2} + k_r^2 w_r = 0$$

$$\frac{1}{s_r} \frac{dw_r}{dz} \Big|_{z=0} = p_f(0)$$

$$w_r(h_r) = 0$$

La magnitud que interesa obtener en este caso es la intensidad de cortocircuito,  $I_{cc}$ , que se puede escribir como

$$I_{cc} = \dot{D}_r A_r = j\omega d_r \frac{dw_r}{dz} \Big|_{z=h_r} A_r$$

### 5.2.2.3.2 Configuración de circuito abierto

Ahora, la condición a imponer es que  $I_r = 0 \rightarrow D_r = 0$  y por tanto las ecuaciones de comportamiento del piezoeléctrico serán

$$T_r = \left(1 + \frac{d_r^2}{\epsilon_r}\right) \frac{S_r}{s_r}$$

$$E_r = -\frac{d_r}{\epsilon_r} S_r$$

por lo que la ecuación del problema a resolver se puede escribir de la misma forma que el caso de cortocircuito, es decir

$$\frac{d^2 w_r}{dz^2} + k_r^2 w_r = 0$$

$$\frac{1}{s_r} \left(1 + \frac{d_r^2}{\epsilon_r}\right) \frac{dw_r}{dz} \Big|_{z=0} = p_f(L_f)$$

$$w_r(h_r) = 0$$

donde la velocidad de propagación de ondas longitudinal  $c_r = \sqrt{1/(s_r \rho_r)}$  y la flexibilidad del piezoeléctrico se define dependiendo del tipo de configuración

$$s_r = \begin{cases} s_r & \text{Cortocircuito} \\ \frac{s_r}{1 + \frac{d_r^2}{\epsilon_r}} & \text{Circuito abierto} \end{cases}$$

La magnitud que interesa obtener en este caso es la intensidad de cortocircuito,  $V$  que se puede escribir como

$$V_{ca} = -\frac{d_r}{\epsilon_r} \frac{dw_r}{dz} \Big|_{z=h_r}$$

#### 5.2.2.4 Ecuaciones de la estructura

La ecuación de ondas en la dirección axial de la estructura es:

$$\begin{aligned} \frac{d^2 w_s}{dz^2} + k_s^2 w_s &= 0 \\ \frac{1}{s_s} \frac{dw_s}{dz} \Big|_{z=0} &= T_e(0) \frac{A_e}{A_s} \\ w_s(L_s) &= 0 \end{aligned}$$

#### 5.2.2.5 Resolución del problema

Resolviendo el sistema de ecuaciones:

$$\begin{aligned} w_e(z) &= \frac{\delta}{k_e} [\gamma_1 \sin(k_e z) + \gamma_2 \cos(k_e z)] \\ \phi_f(z) &= \frac{\delta}{k_f^2} [\gamma_3 \sin(k_f z) + \gamma_4 \cos(k_f z)] \\ w_r(z) &= \frac{\delta}{k_e} [\gamma_5 \sin(k_r z) + \gamma_6 \cos(k_r z)] \\ w_s(z) &= \frac{\delta}{k_s} [\gamma_7 \sin(k_s z) + \gamma_8 \cos(k_s z)] \end{aligned}$$

donde  $\delta = d_e V_e/h_e$  es el termino adimensional correspondiente a la excitación en voltaje del emisor. Las constantes de integración se expresan en función de los parámetros geométricos, y propiedades de la estructura, fluido, emisor y receptor según:

$$\gamma_1 = \frac{g_{1,1} + g_{1,2}g_{1,3}}{g_{1,4} + g_{1,2}g_{1,5} - g_{1,6}}$$

$$g_{1,1} = \frac{k_e}{k_s} \tan(k_s L_s)$$

$$g_{1,2} = \frac{k_f k_e \tan(k_f L_f) - \frac{\rho_f w^2 s_r}{k_f k_r} \tan(k_r L_r)}{\rho_f w^2 s_e \left( 1 + \frac{\rho_f w^2 s_r}{k_f k_r} \tan(k_r L_r) \tan(k_f L_f) \right)}$$

$$g_{1,3} = \frac{1}{\cos(k_e h_e)} + \tan(k_s L_s) \tan(k_e L_e) \frac{k_e}{k_s}$$

$$g_{1,4} = \tan(k_s L_s) \frac{A_e s_s k_e}{A_s s_e k_s}$$

$$g_{1,5} = 1 + \tan(k_s L_s) \tan(k_e L_e) \frac{A_e s_s k_e}{A_s s_e k_s}$$

$$g_{1,6} = \tan(k_e L_e)$$

$$\gamma_2 = \frac{k_e}{k_s} \tan(k_s L_s) \left( 1 - \frac{A_e s_s}{A_s s_e} \gamma_1 \right)$$

$$\gamma_3 = \gamma_1 g_{3,1} + g_{3,2}$$

$$g_{3,1} = \frac{k_f}{k_e} \cos(k_e h_e) \left( \tan(k_e h_e) - \tan(k_s L_s) \frac{A_e s_s k_e}{A_s s_e k_s} \right)$$

$$g_{3,2} = \tan(k_s L_s) \cos(k_e h_e) \frac{k}{k_s}$$

$$\gamma_4 = \gamma_1 g_{4,1} + g_{4,2}$$

$$g_{4,1} = \frac{k_f^2}{\rho_f w^2 s_e} \cos(k_e h_e) \left( 1 + \tan(k_s L_s) \tan(k_e L_e) \frac{A_e s_s k_e}{A_s s_e k_s} \right)$$

$$g_{4,2} = \frac{k_f^2}{\rho_f w^2 s_e} \cos(k_e h_e) \left( 1 + \tan(k_s L_s) \sin(k_e h_e) \frac{k_e}{k_s} \right)$$

$$\gamma_5 = \frac{\rho_f w^2 s_r}{k_f^2} (\gamma_3 \sin(k_f L_f) + \gamma_4 \cos(k_f L_f))$$

$$\gamma_6 = -\gamma_5 \tan(k_r h_r)$$

$$\gamma_7 = \frac{A_e s_s}{A_s s_e} \gamma_1 - 1$$

$$\gamma_8 = -\gamma_7 \tan(k_s L_s)$$

### 5.3 Resultados obtenidos

Mediante el programa realizado en matlab (anexo A), se obtienen la corriente de cortocircuito y la tensión de circuito abierto para diferentes variaciones de los parámetros.

Los parámetros introducidos son:

#### **Parámetros del emisor y del receptor:**

$\rho$ : densidad = 7750 kg/m<sup>3</sup>

$s_{33}$ : flexibilidad elástica = 17.2e-12 m<sup>2</sup>/N

$d_{33}$ : carga piezoeléctrica = 409e-12 m/V

$\epsilon_3$ : permitividad relativa = 1700\* $\epsilon_0$

$\gamma_s$ : amortiguamiento de la flexibilidad según Giorgitou 2000 = 5/100

$\gamma_e$ : amortiguamiento de la permitividad según Giorgitou 2000 = 5/100

#### **Parámetros del fluido:**

$T_0$ : temperatura del fluido, ambiente = 20+273 K

$p_0$ : presión del fluido = 1e5 N/ m<sup>2</sup>

$cp/cv$ : relación entre calores específicos = 1.4

$R_g$ : constante de gas = 287 m<sup>2</sup>.K/s<sup>2</sup>

#### **Parámetros de la estructura:**

$\rho$ : densidad = 7800 kg/m<sup>3</sup>

$s$ : flexibilidad = 1/200e9 m<sup>2</sup>/N

$D_{ext}$ : diámetro exterior = 50 mm

$D_{int}$ : diámetro interior = 30 mm

$h_e$ : espesor del emisor = 4 mm

$h_r$ : espesor del receptor = 4 mm

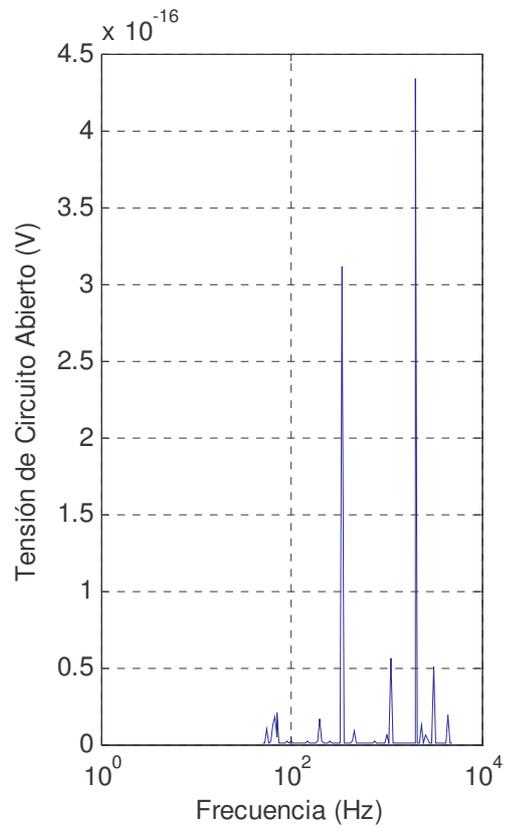
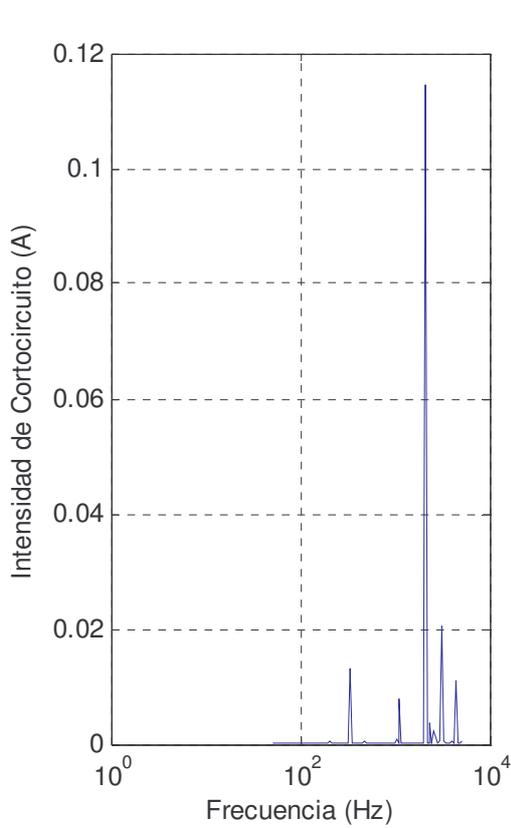
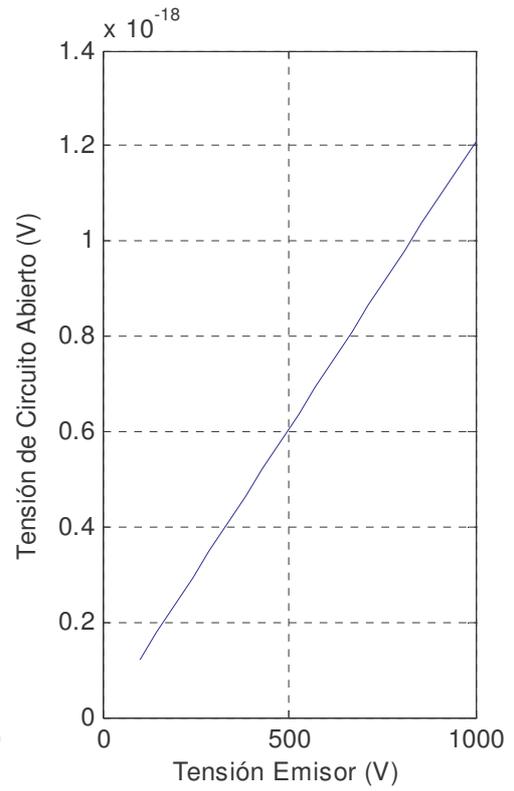
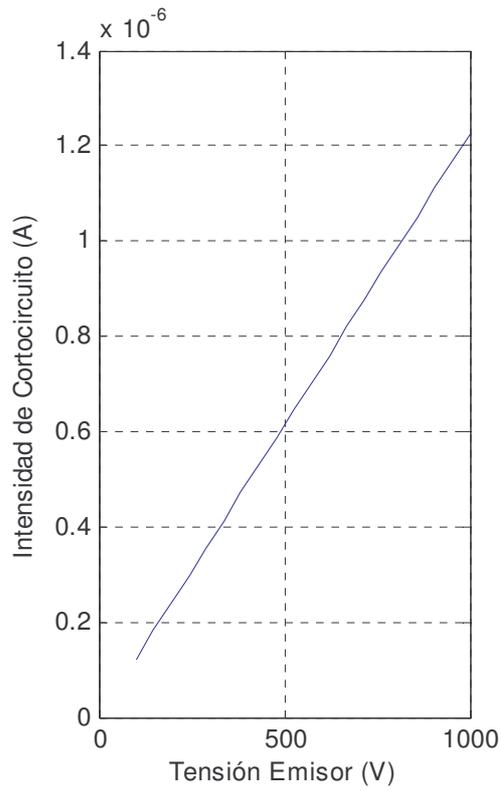
$L$ : longitud = 50 cm

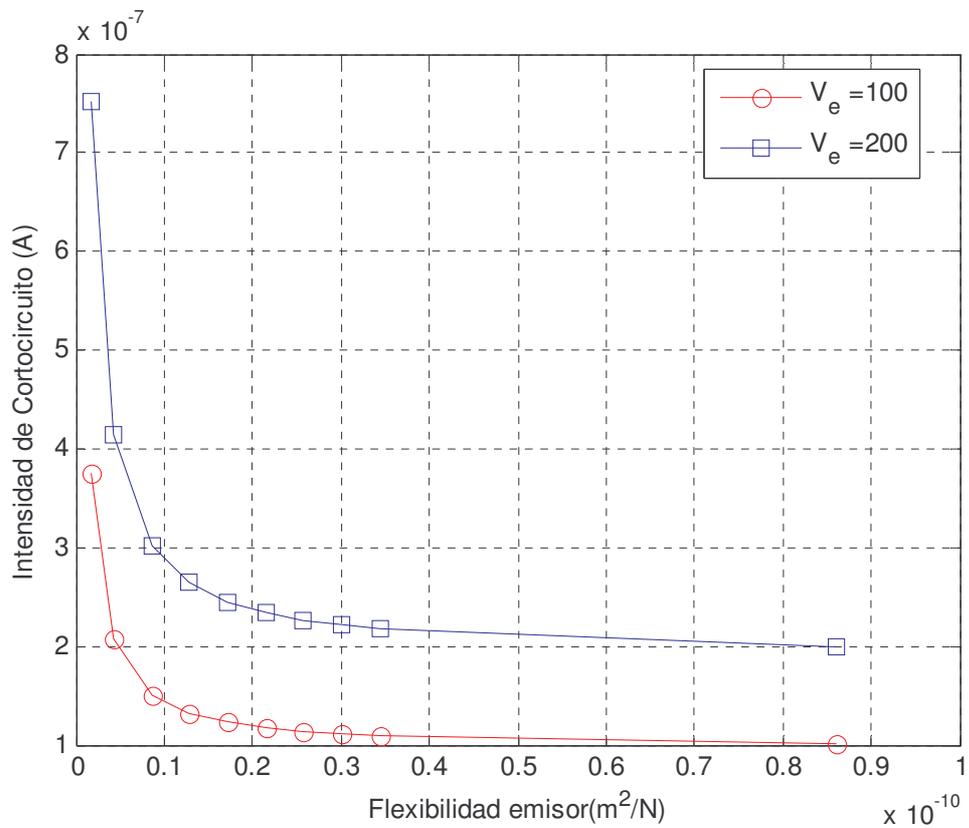
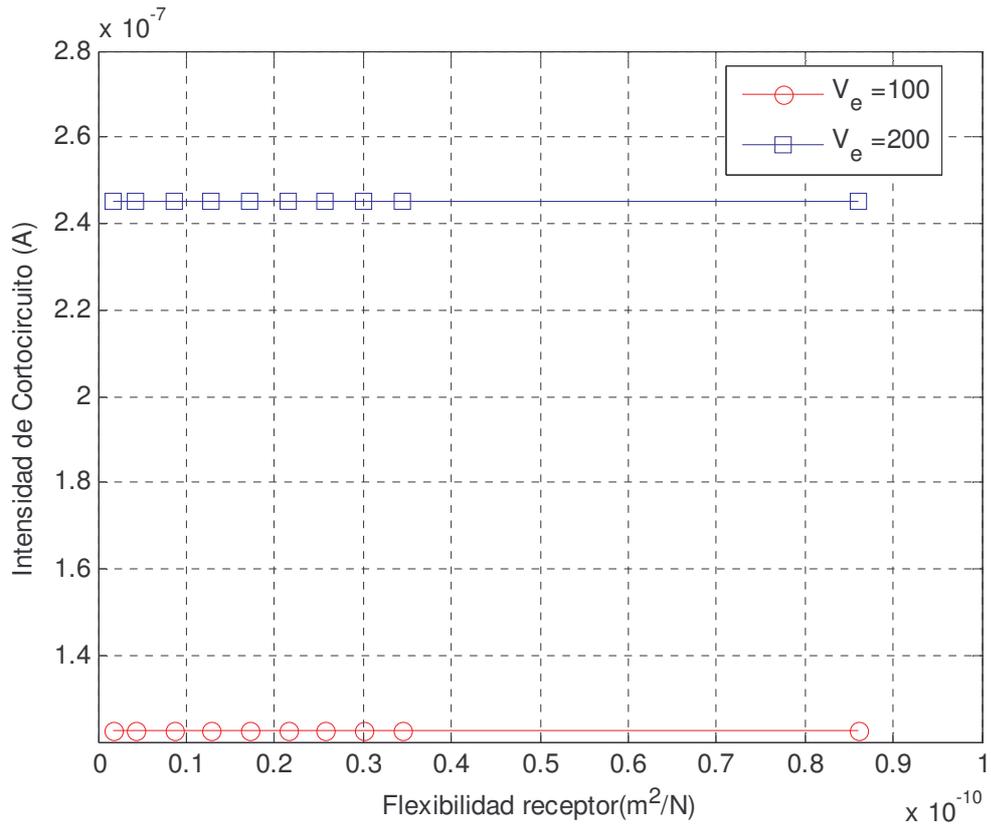
Las variaciones introducidas en los parámetros son las siguientes:

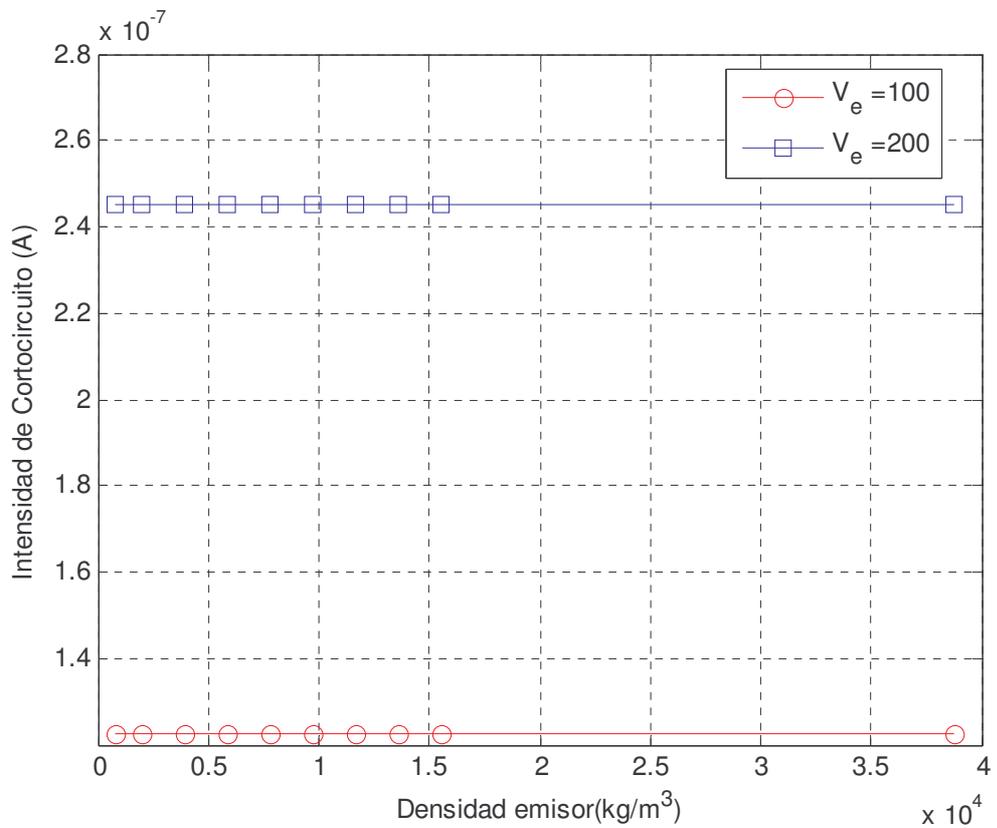
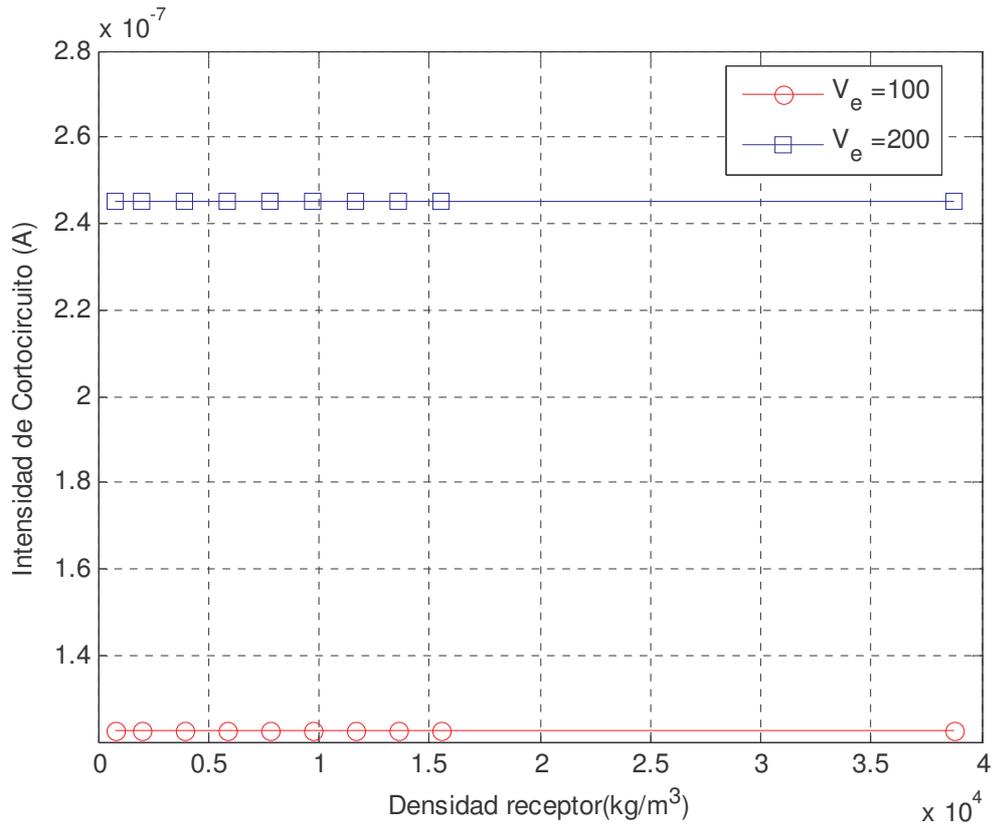
Los parámetros como  $\rho$ ,  $s_{33}$ ,  $d_{33}$  (tanto para el emisor como para el receptor) se han sometido a las siguientes variaciones [0.01 0.05 0.1 0.5 1 5 10 50 100].

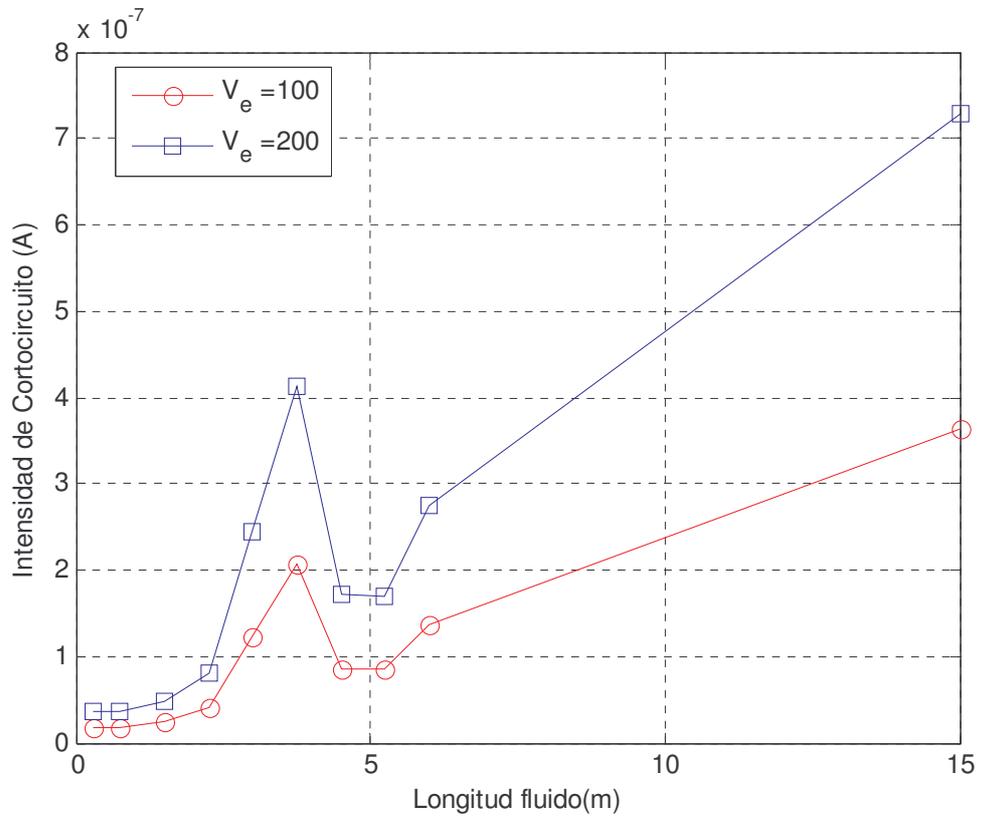
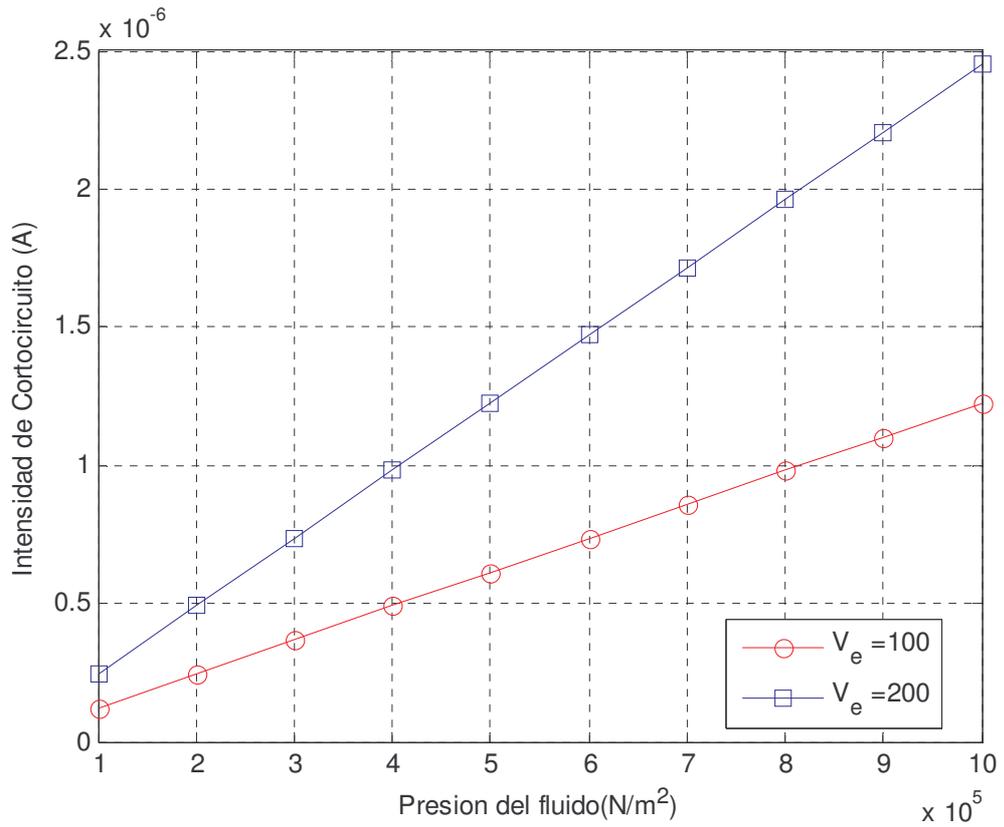
Los parámetros relacionados con la estructura y su geometría ( $D_{ext}$ ,  $D_{int}$ ,  $h_e$ ,  $h_r$ ,  $L$ ) se han sometido a las siguientes variaciones [0.5 0.60 0.75 0.90 1.0 1.10 1.15 1.25 1.5].

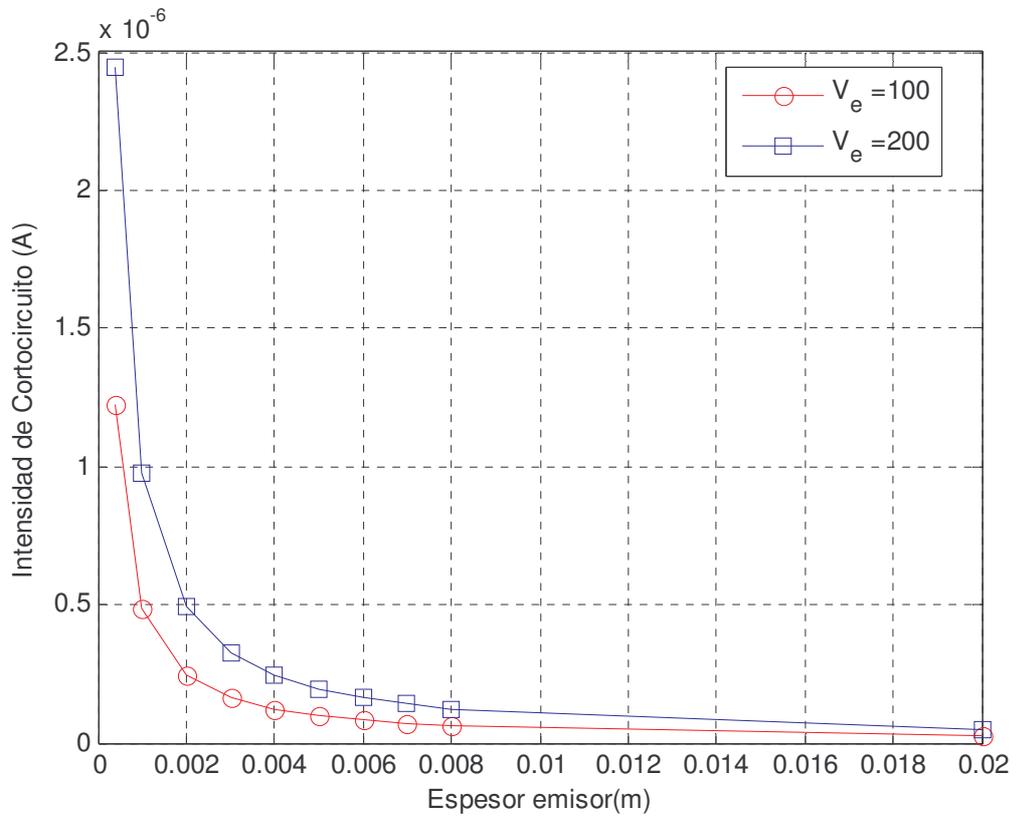
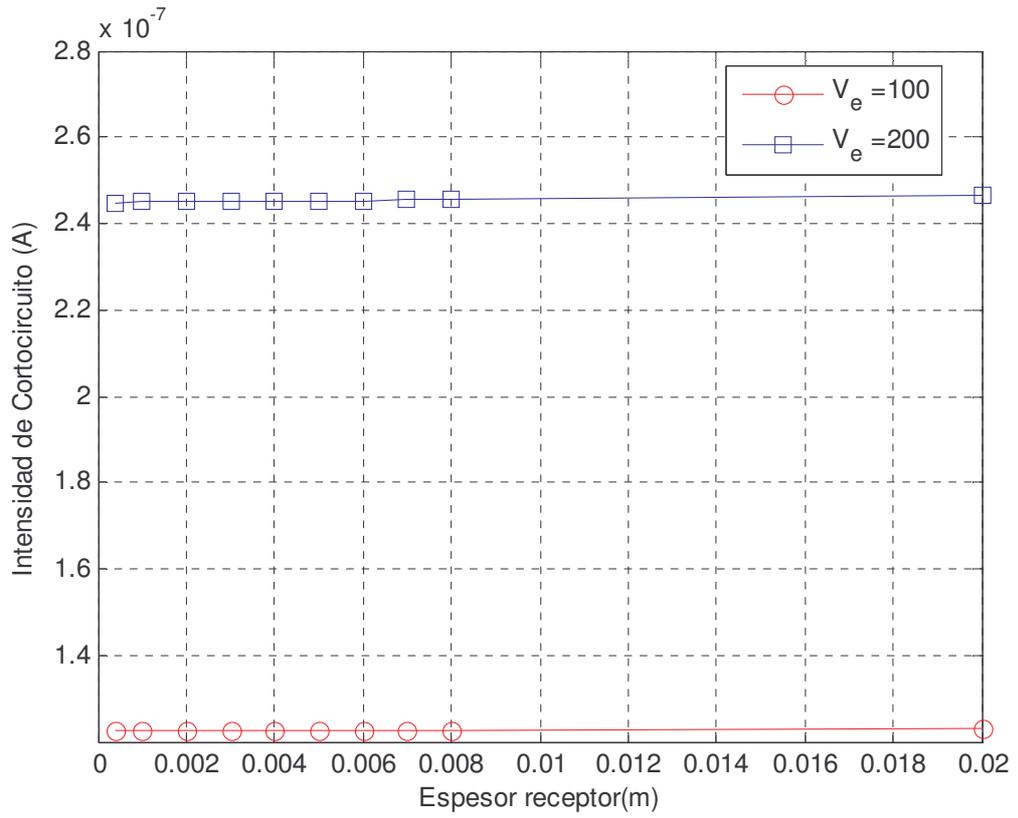
Los resultados obtenidos mediante el modelo numérico son los siguientes:

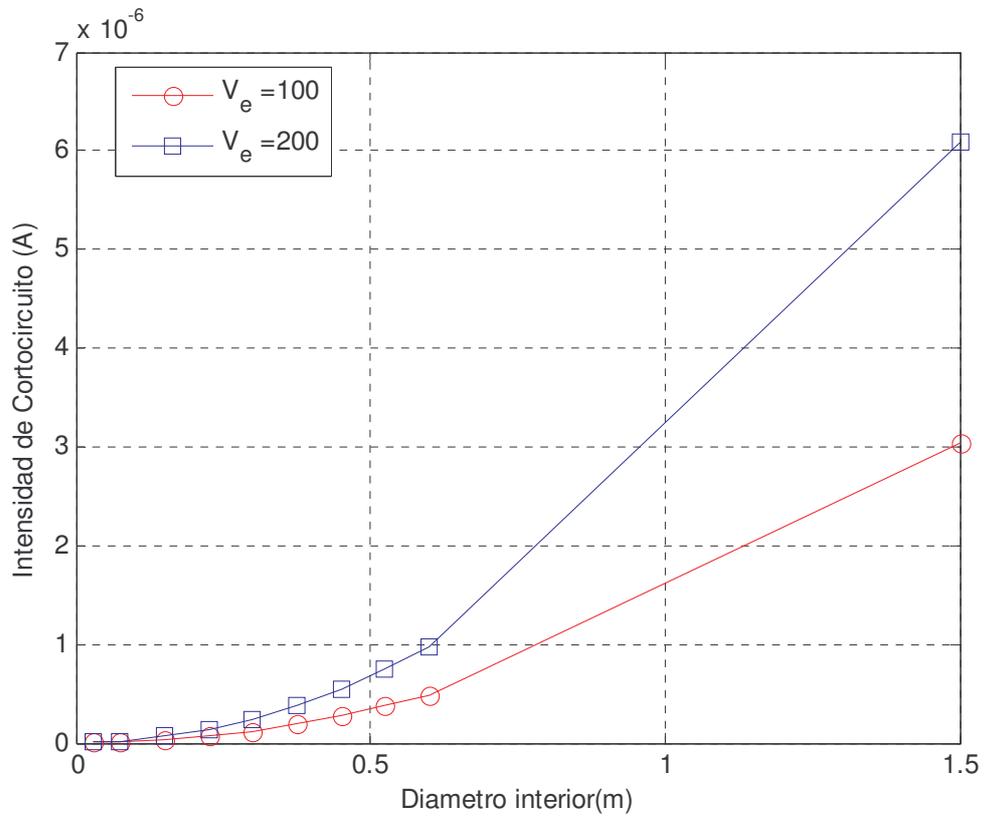
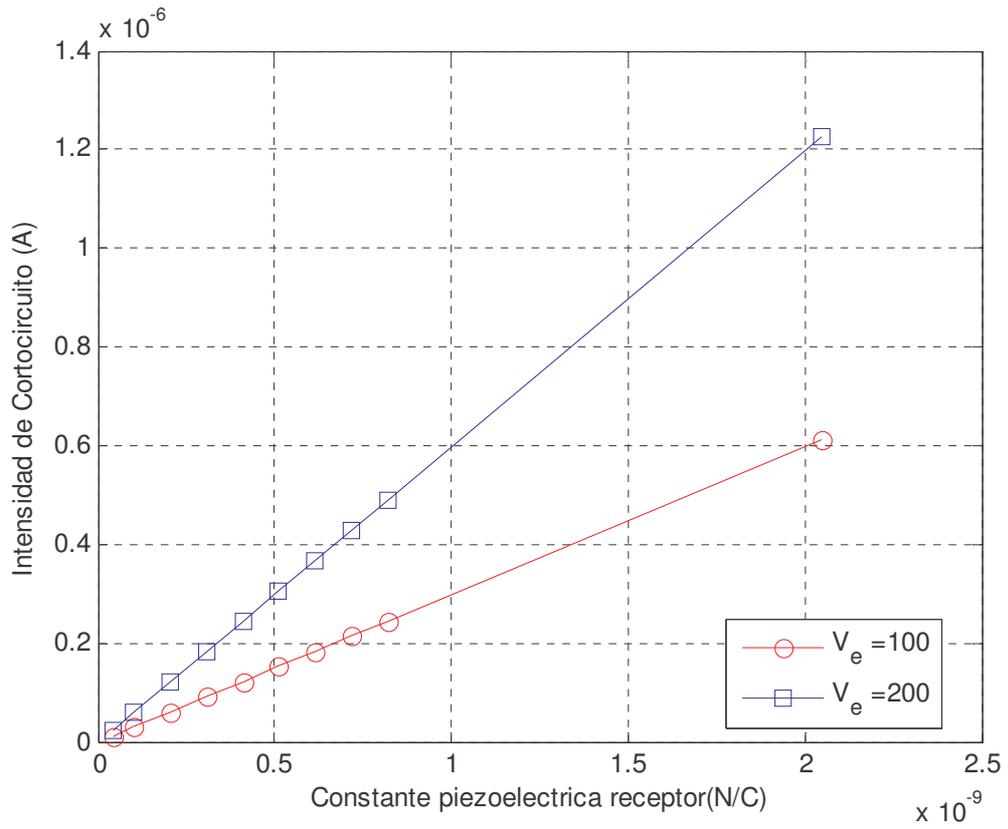


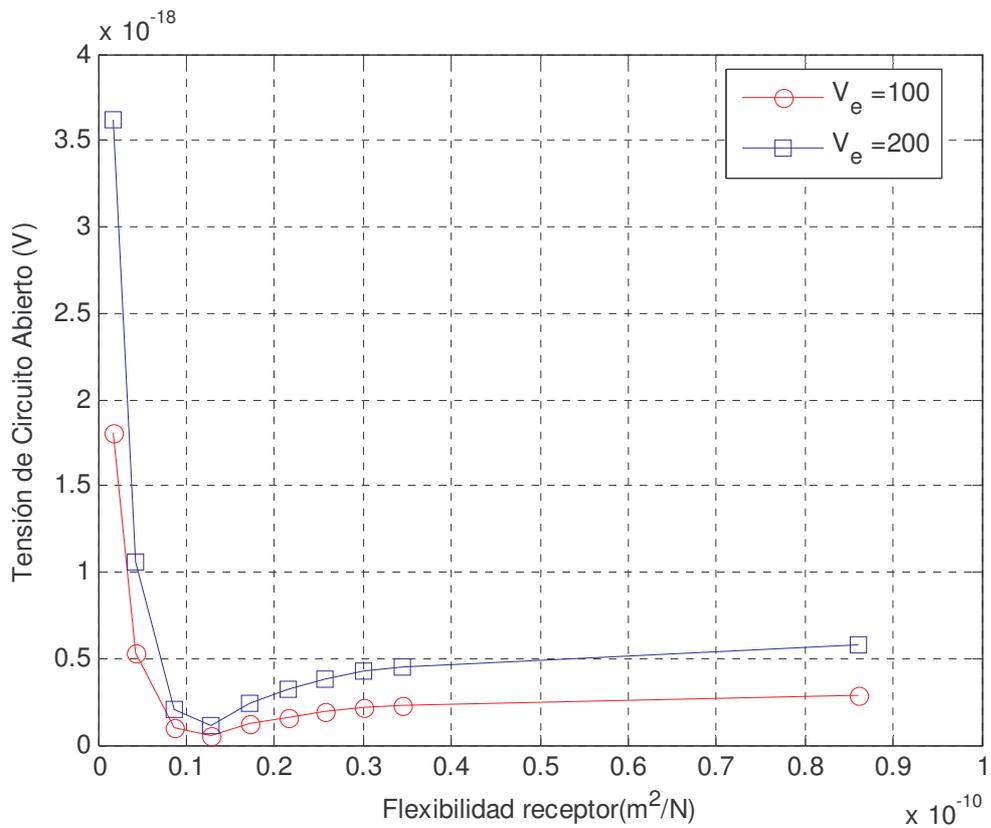
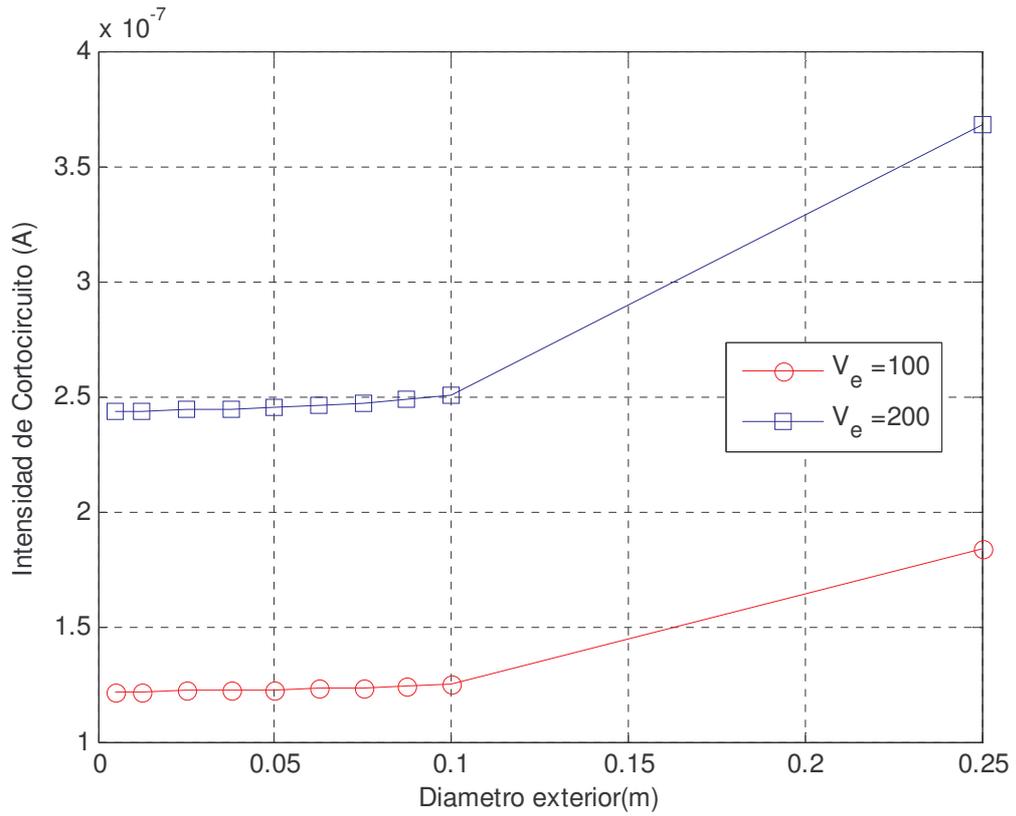


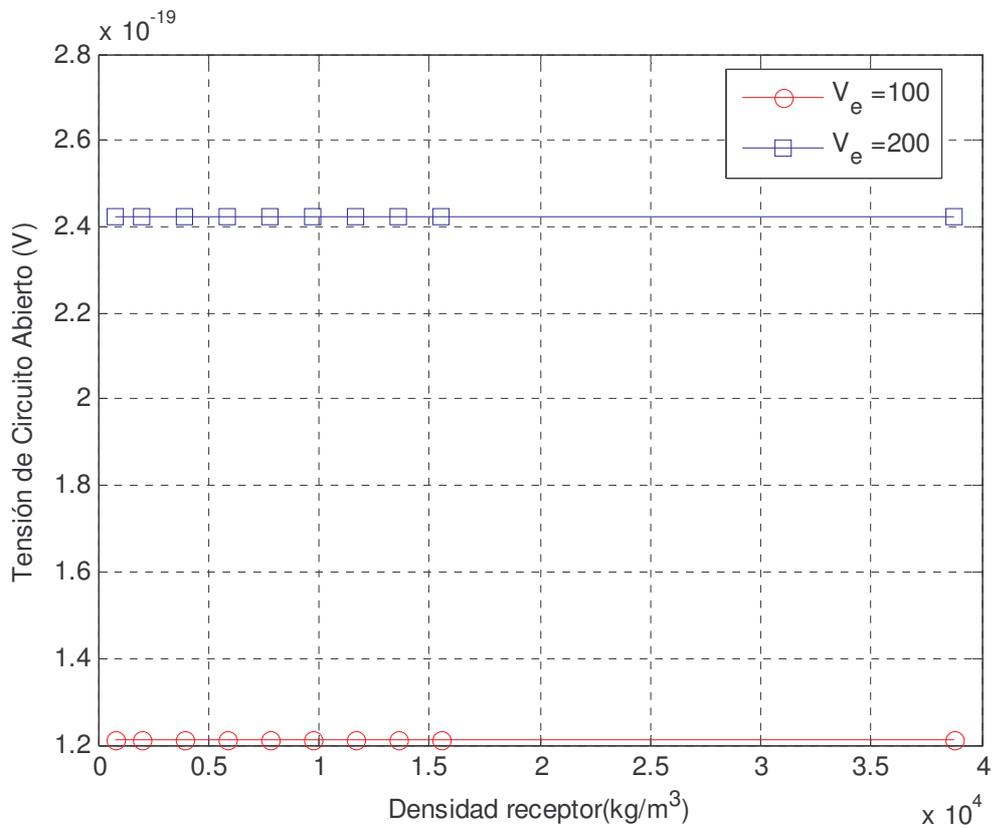
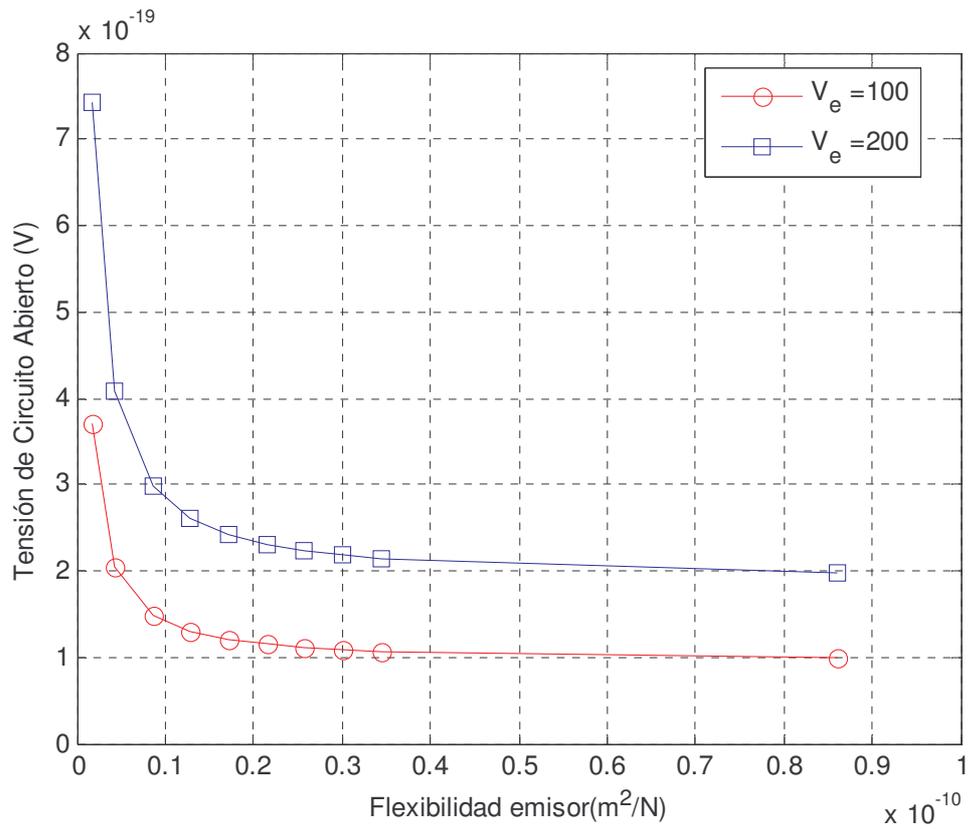


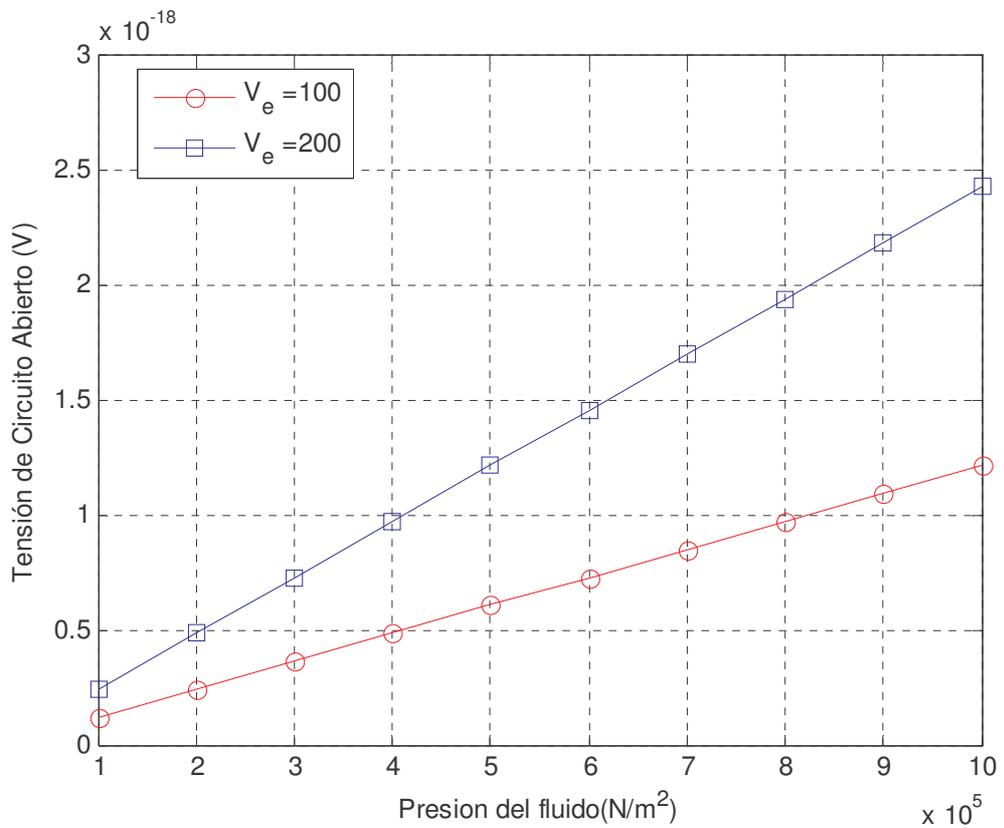
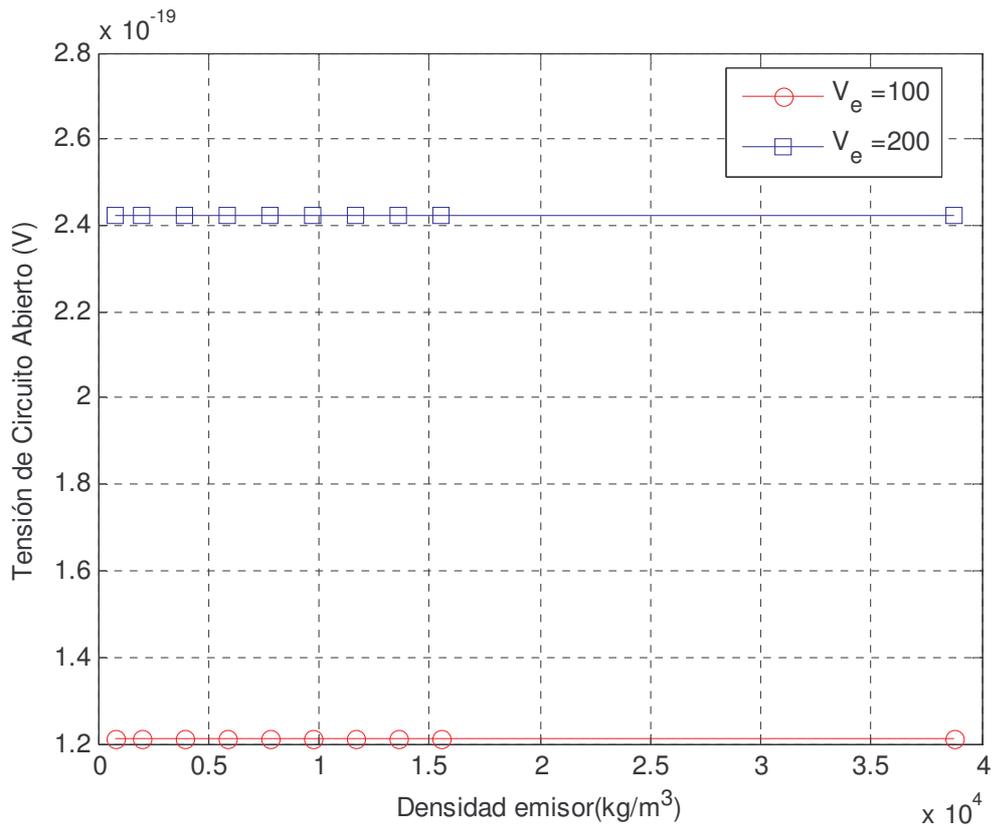


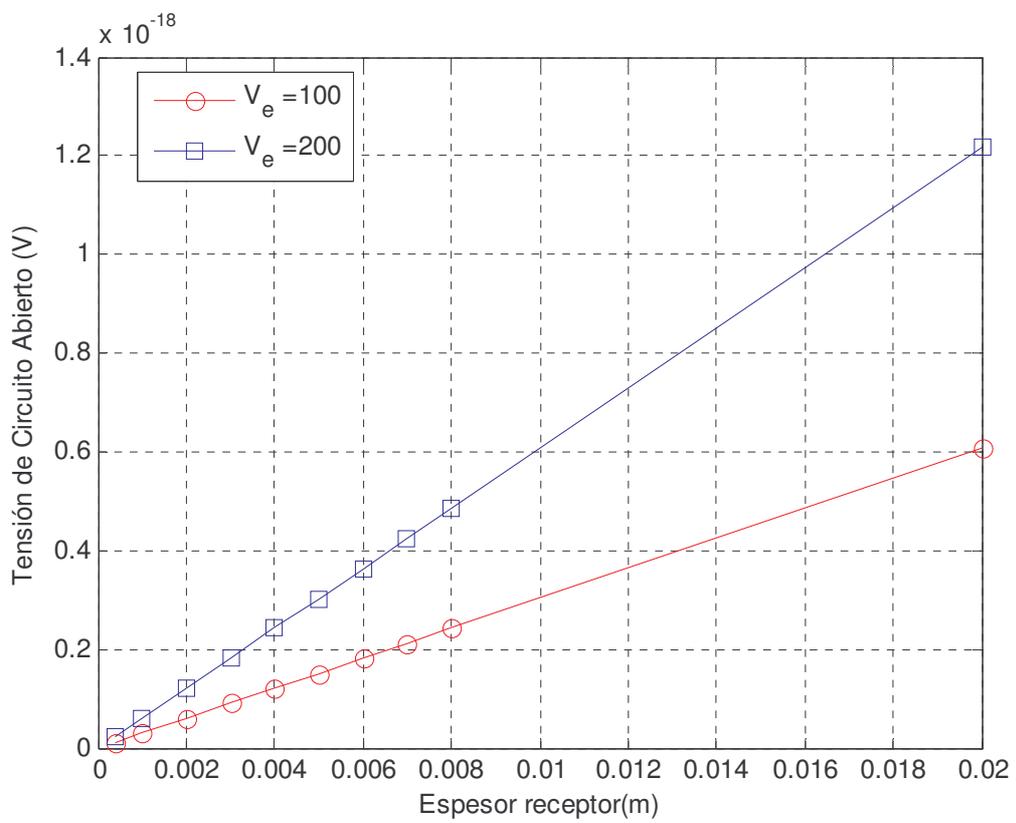
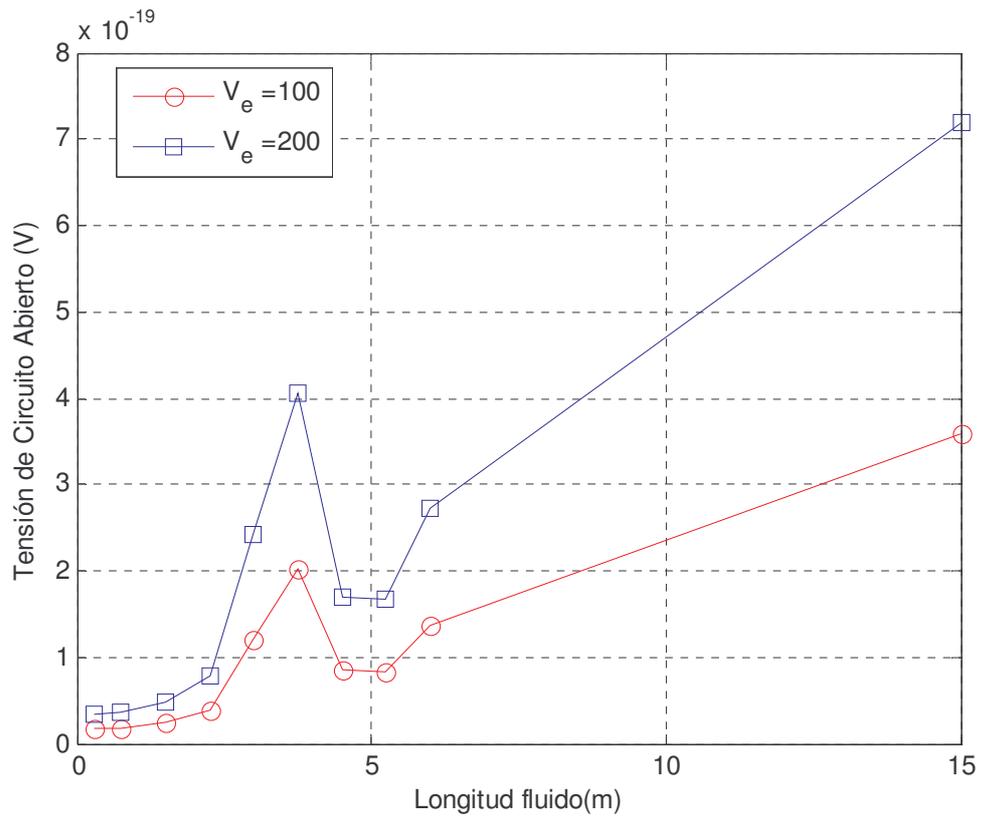


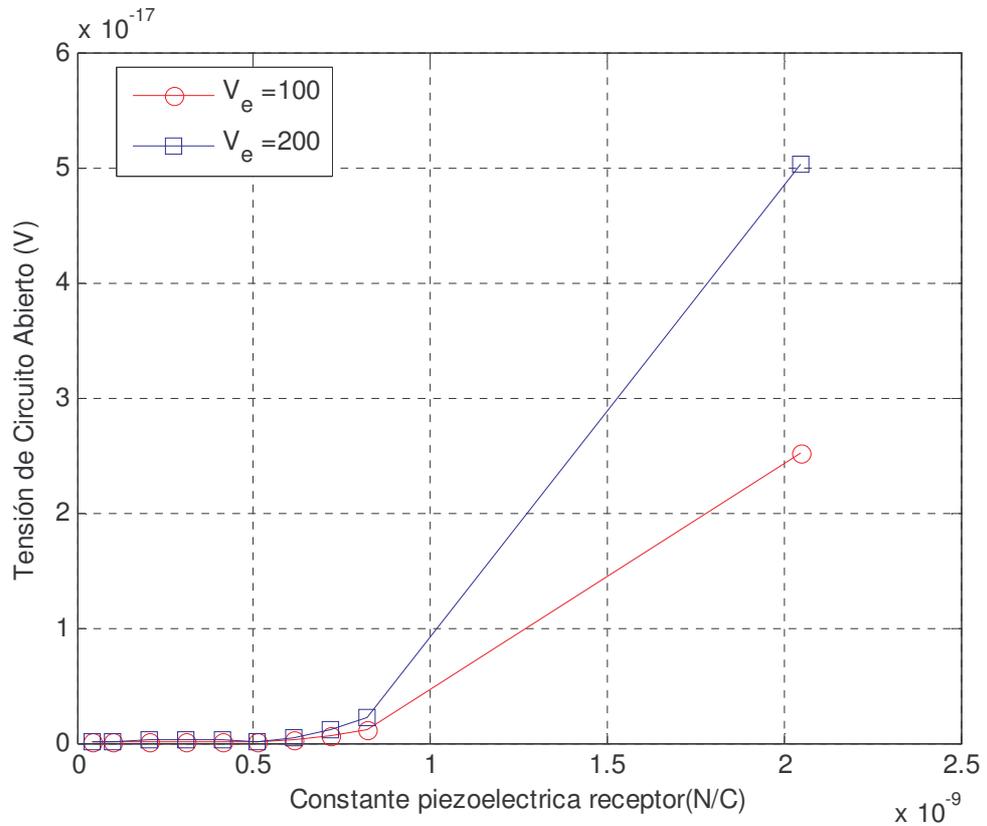
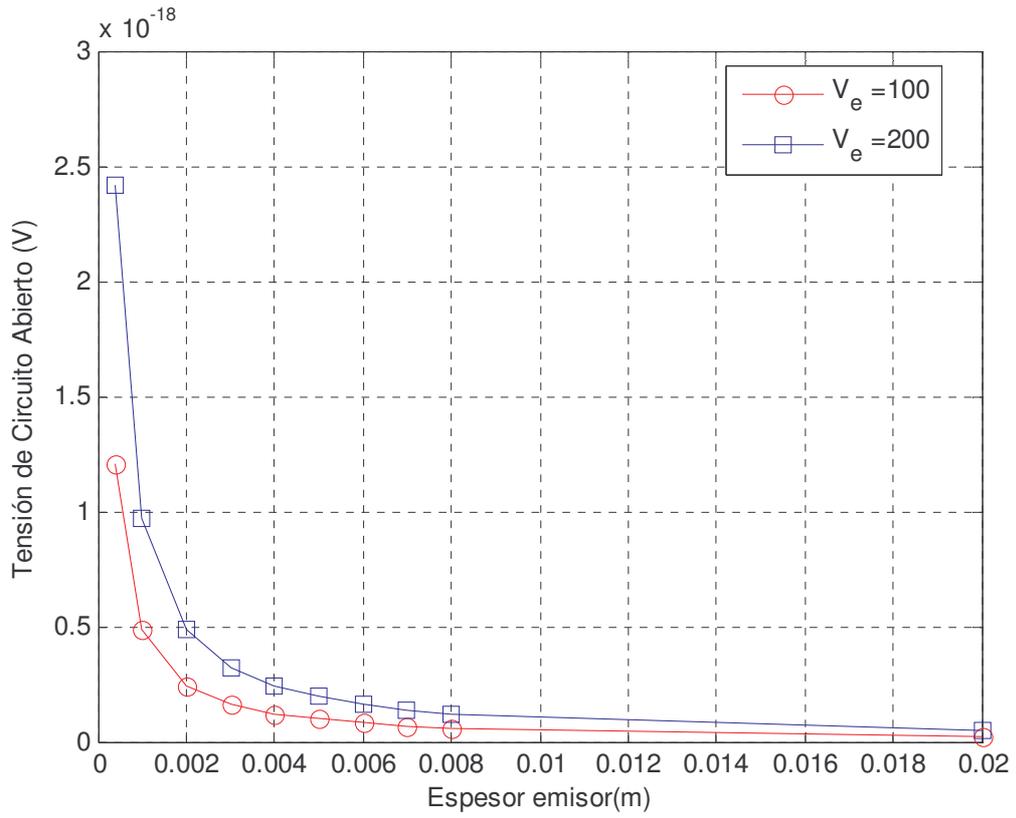


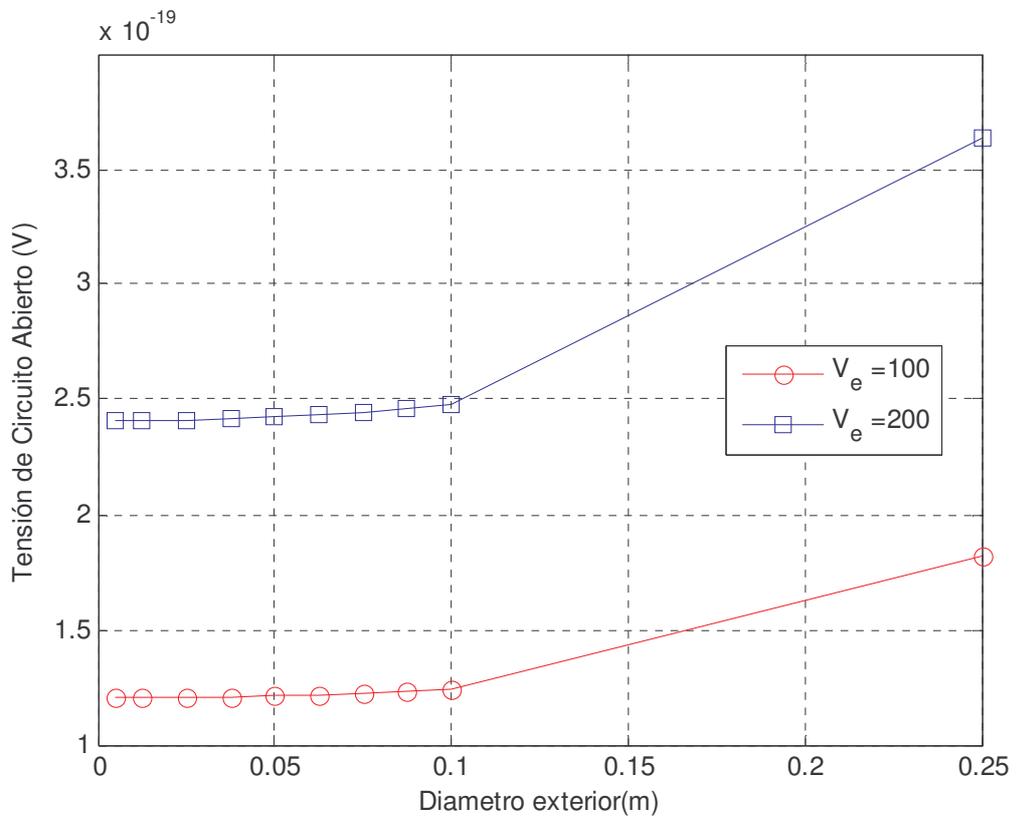
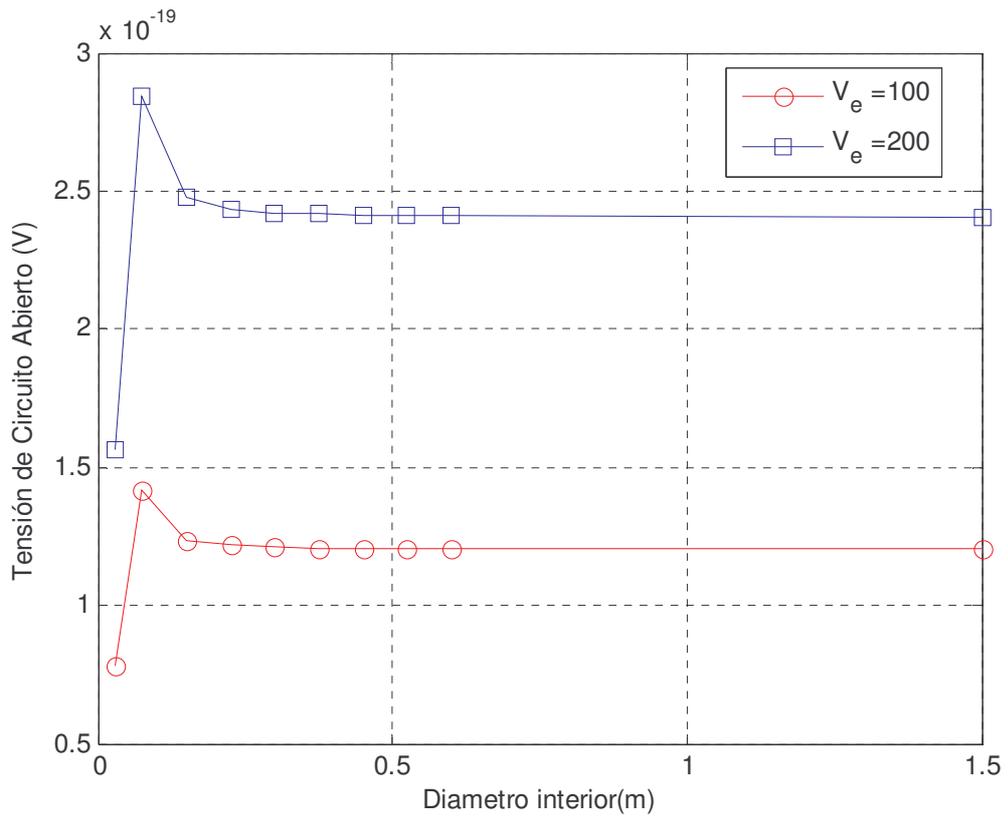












## 6 Diseño del prototipo

Las decisiones en cuanto al diseño se han tomado en base a los resultados obtenidos en el modelo numérico.

El sensor consta de un cilindro metálico de acero, lo suficientemente grueso como para evitar que se transmitan los modos transversales. Este cilindro está roscado a dos anillos de sujeción, cada uno en un extremo. Dentro de estos anillos se situarán los discos piezoeléctricos. Los anillos están tapados por dos discos de acero, los cuales sirven para conseguir presurizar todo el sensor mediante el uso de unas membranas. Estas membranas son dos discos de goma entre los cuales se sacarán los cables de los electrodos.

La longitud del cilindro es de 101 mm y tiene un diámetro interior de 26 mm y un diámetro exterior de 33 mm. El material elegido para todas las piezas del sensor es acero, el cual resiste presiones altas. En el cilindro se situará una toma de aire y un barómetro.

Los materiales piezoeléctricos son de diferentes tipos y grosores. Se ha decidido colocar más de un disco piezoeléctrico tanto en el emisor como en el receptor, para obtener una señal  $N$  veces mayor, siendo  $N$  el número de discos. Los discos tienen grosores que van desde 0.5 mm hasta 2 mm. El tipo de materiales elegidos son PZ26, PZ27. Las características que determina el fabricante para este tipo de materiales piezoeléctricos se incluyen en el anexo B.

En conjunto el sensor consta de los siguientes materiales:

Dos anillos de acero

Cilindro de acero

Dos tapas

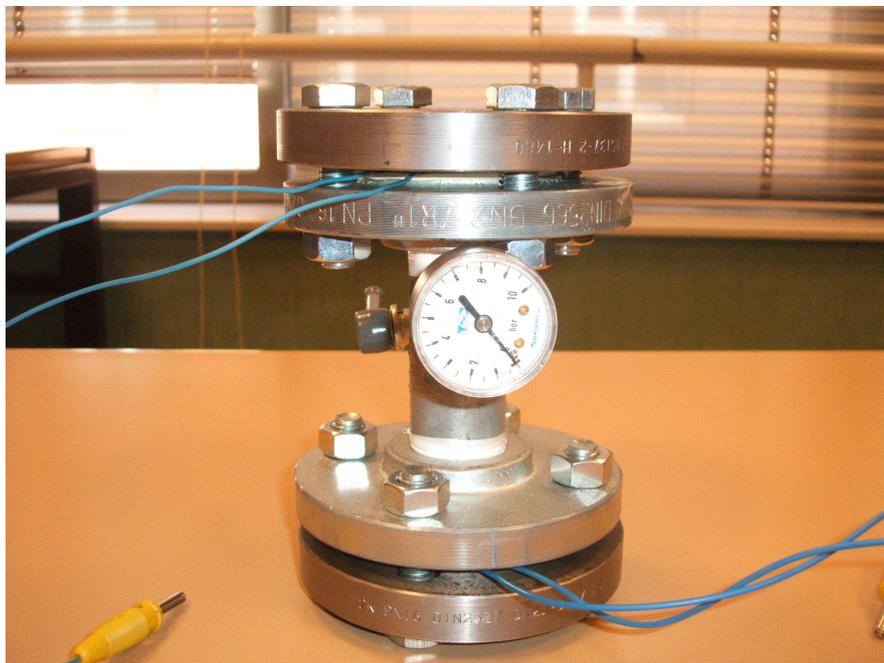
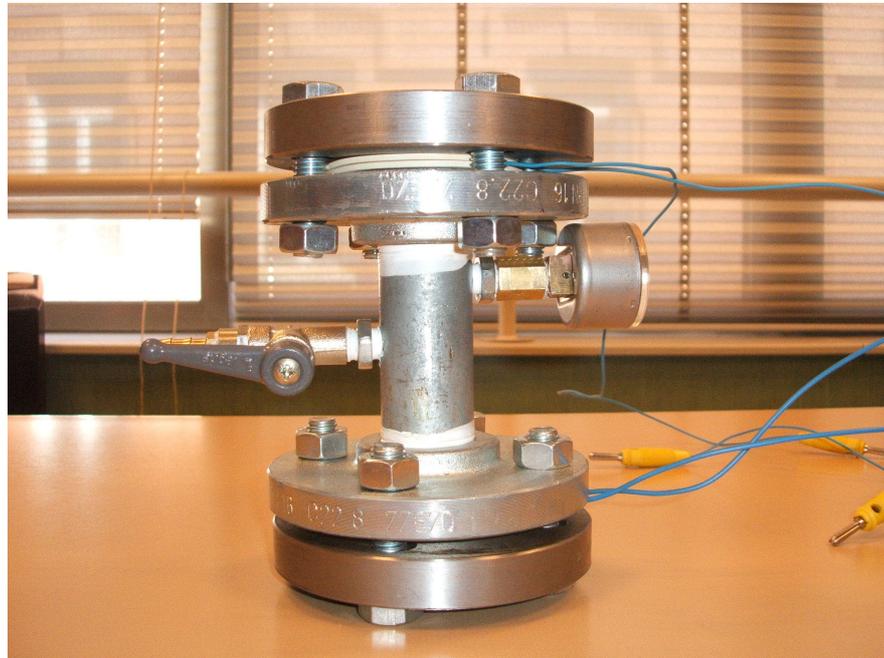
4 discos de goma

11 discos cerámicos: 4 discos PZ26 y 7 discos PZ27

8 tornillos hexagonales de acero

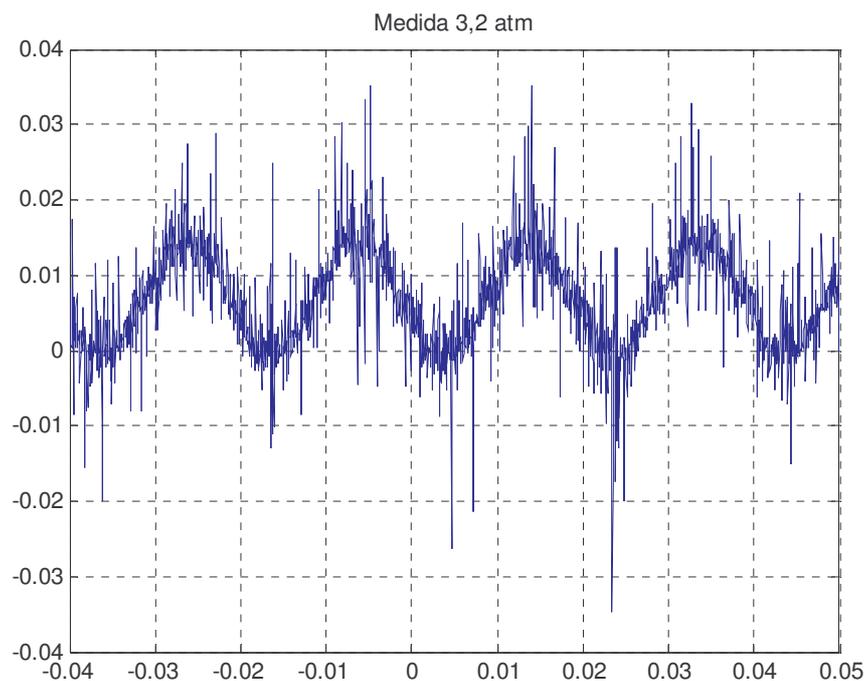
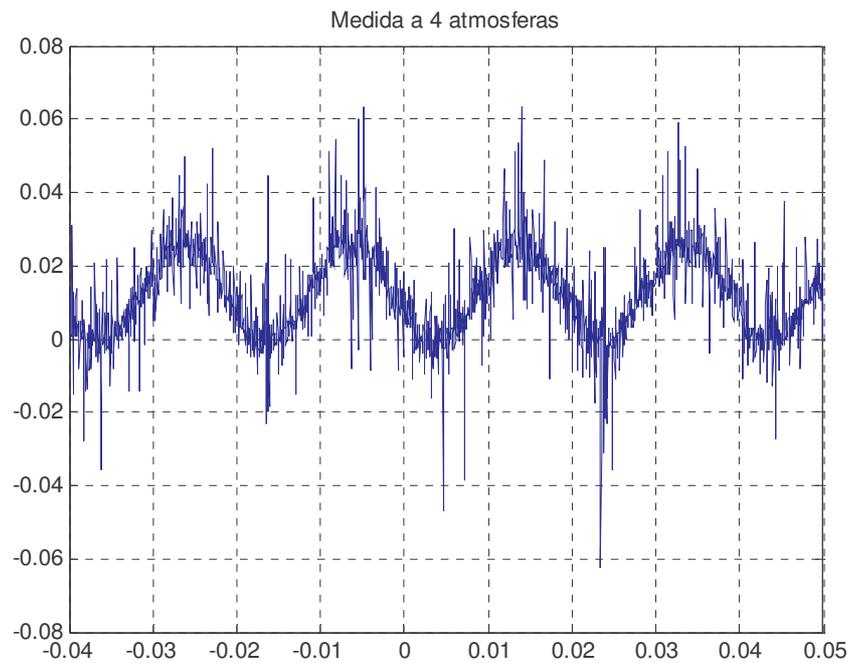
Los planos del sensor se han realizado con la herramienta Solid Edge V17 y están incluidos en el anexo C.

La implementación física del sensor es:



## 7 Pruebas

Las pruebas del sensor se realizaron conectando lo a 220 V y con una frecuencia de 50 Hz. Esta tensión se obtuvo de la red eléctrica. Se realizaron medidas a presiones de 4 y 3.2 atmosferas. Los resultados obtenidos son:



---

## 8 CONCLUSIONES Y FUTURAS VIAS PARA UN MEJOR DESARROLLO DEL MODELO NUMÉRICO

Como se puede observar los resultados obtenidos no concuerdan con los obtenidos en el modelo numérico. Las señales obtenidas tienen una amplitud de 30 mV en el mejor de los casos, mientras que los resultados del modelo numérico predecían una salida del orden de  $10^{-19}$  Voltios. Es lógico que la salida real sea mayor que la esperada porque el diseño se realizó variando todos los parámetros para obtener la mayor salida posible. El emisor y el receptor están formados por varios discos piezoeléctricos, se introdujo aire a la máxima presión posible, el material piezoeléctrico tenía la mayor constante de carga piezoeléctrica posible y los discos del emisor son del menor espesor posible. Todo esto nos ha ayudado a obtener la mayor salida posible, pero en ningún caso hubiera subido tanto su nivel.

Se realizó un modelo numérico sencillo para poder tomar decisiones sobre el diseño como las comentadas anteriormente. Este modelo numérico se podría mejorar incluyendo el efecto de los modos transversales o con una mejor caracterización de la impedancia del transformador piezoeléctrico. Habría que estudiar mejor el efecto que tienen sobre la salida las vibraciones de la estructura ya que estas pueden afectar más de lo que refleja el modelo numérico.

## 9 PLIEGO DE CONDICIONES GENERALES y ECONÓMICAS

### 9.1 Objetivo del pliego

El presente Pliego tiene por objeto establecer la normativa que se aplicará al desarrollo del sensor y al propio tiempo, regular las relaciones entre la Administración y el Contratista adjudicatario durante el plazo de ejecución de los trabajos, hasta la extinción del Contrato con la liquidación y recepción definitiva de las obras mencionadas.

Las prescripciones que contiene este Pliego se aplicarán a los materiales que, definitiva, o provisionalmente, hayan de incorporarse a las obras, a la forma de ejecutar las unidades de obra y a la manera de medir las unidades ejecutadas. Igualmente, define la normativa a aplicar en el desarrollo de los trabajos, y la forma en que estos han de ser facturados y abonados.

### 9.2 Condiciones generales.

Las condiciones y cláusulas que se establecen en este documento son de obligado cumplimiento por las partes contratantes.

I - Tanto el administrador como el cliente se comprometen desde la fecha de la firma del contrato a llevar a cabo lo que se estipule.

II - Ante cualquier reclamación o discrepancia en lo concerniente al cumplimiento de lo pactado por cualquiera de las partes, una vez agotada toda vía de entendimiento, se tramitará el asunto por la vía de lo legal. El dictamen o sentencia que se dicte será de obligado cumplimiento para las dos partes.

III - Al firmarse el contrato, el suministrador se compromete a facilitar toda la información necesaria para la instalación y buen funcionamiento del sistema, siempre que sea requerido para ello.

IV - Asimismo, el cliente entregará al suministrador todas las características distintivas del equipo comprado y aquellas otras que considere oportunas para el necesario conocimiento de la misma a efectos del diseño del presente equipo.

V - El plazo de entrega será de tres meses, a partir de la fecha de la firma del contrato, pudiendo ampliarse en un mes. Cualquier modificación de los plazos deberá contar con el acuerdo de las dos partes.

VI - En caso de retrasos imputables al suministrador, se considerará una indemnización del 1 % del valor estipulado por semana de retraso.

VII - Existirá un plazo de garantía de un año a partir de la entrega del sistema. Dicha garantía quedará sin efecto si se demostrase que el sistema ha estado sometido a manipulación o uso indebido.

VIII - Cumplido dicho plazo de garantía, el suministrador queda obligado a la reparación del sistema durante un plazo de cinco años, fuera del cual quedará a su propio criterio atender la petición del cliente.

IX - En ningún momento tendrá el suministrador obligación alguna frente a desperfectos o averías por uso indebido por personas no autorizadas por el suministrador.

X - Será de cumplimiento obligatorio toda la legislación vigente sobre contratos del Estado y, en particular, la que, sin carácter limitativo se menciona seguidamente:

- L.C.A.P. Ley de Contratos de las Administraciones Públicas de 18 de Mayo de 1995.
- R.G.C. Reglamento General de Contratación del Estado de 25 de Noviembre de 1975 y modificaciones posteriores.
- P.C.A. Pliego de Cláusulas Administrativas Generales para la Contratación de Obras del Estado de 31 de Diciembre de 1970.
- S.S. T. Real Decreto sobre estudios de Seguridad y salud en el Trabajo de 24 de Octubre de 1997.

### 9.2.1 Comienzo de los trabajos:

Si, por causa del contratista, los trabajos no tuvieran comienzo en su fecha, se le requerirá por escrito fijándole un nuevo plazo. Si tampoco cumpliera este, la Administración podrá dar por rescindido el Contrato.

### 9.2.2 Programa de trabajo

El Contratista está obligado a presentar un programa de trabajo, a la aprobación del Director, en el plazo de 15 días a partir del momento de la firma del Contrato.

El programa de trabajo señalará los períodos de terminación y los costes mensuales de realización de las diferentes partidas de la instalación, haciéndolo compatibles con el Programa y Plazos parciales establecidos en el Proyecto objeto del Concurso, el tipo, clase y cantidad de maquinaria que ha de utilizar en cada momento, la organización y personal adscritos a los mismos y los medios auxiliares e instalaciones a emplear.

La duración de los trabajos y su coste mensual deberá representarse en un diagrama de barras, realizando un diagrama PERT a partir de él, cuando así lo estime necesario la Administración.

La no presentación de este programa, sin que exista causa que la justifique, llevará como sanción al Contratista, una multa de 90 euros por día de retraso, aparte de no cursar ninguna certificación hasta su presentación. Transcurridos más de 30 días sin que haya sido presentado, la Administración está facultada para rescindir el Contrato.

### 9.2.3 Desarrollo de los trabajos

Los trabajos se desarrollarán con sujeción a las cláusulas estipuladas en el Contrato, al Proyecto que sirva de base al mismo y a las órdenes que diera el Director en su interpretación, que serán de obligado cumplimiento para el Contratista.

La Administración suministrará todos los planos, documentos y órdenes necesarios para las instalaciones. A ellos deberá ceñirse el Contratista estrictamente.

La ejecución del contrato se considera a riesgo y ventura del Contratista y éste no tendrá derecho a indemnizaciones por pérdidas averías o perjuicios, sino los ocasionados por causa de fuerza mayor.

Para los efectos de este Pliego se considerarán como tales las que siguen:

- Incendios causados por la electricidad atmosférica.
- Daños causados por terremotos o maremotos.
- Los destrozos causados violentamente a mano armada en tiempo de guerra, sediciones populares o robos tumultuosos.
- Inundaciones catastróficas, producidas como consecuencia de desbordamiento de ríos o arroyos.
- Cualquier otro de efecto análogo a los anteriores, previo acuerdo del Consejo de Ministros.
- Los conflictos laborales del personal a las órdenes del Contratista afectos a la obra y que provoquen su paralización.

La paralización total de los trabajos o la suspensión definitiva de los mismos, solamente podrá verificarse por motivo grave, a propuesta del Director y mediante acuerdo del organismo competente de la Administración.

El Contratista es responsable de las faltas que puedan advertirse en las instalaciones hasta que tenga lugar la recepción definitiva de las mismas.

Los precios se consideran inalterables salvo caso de disposiciones oficiales en contrario. El Contratista no podrá reclamar aumento de los precios fijados en el cuadro de contrata bajo ningún pretexto de error u omisión.

#### **9.2.4 Omisiones, contradicciones o errores**

Cualquier omisión en alguno de los documentos del Proyecto, o del Contrato consignada en otros, deberá considerarse como inexistente.

En las contradicciones entre los planos, la Memoria y el Pliego de Condiciones, prevalecerá lo reflejado en este, realizando todo lo que en él se indique, siempre que quede bien definida la unidad de obra a juicio del Director de la misma.

### **9.2.5 Contradicciones entre el proyecto y la legislación administrativa general**

En este tipo de contradicciones prevalecerá la Legislación vigente (Leyes, Reglamentos y Reales Decretos).

### **9.2.6 Contradicciones entre el proyecto y la normativa técnica**

Como criterio general, prevalecerá lo establecido en el Proyecto salvo que en este Pliego se haga remisión expresa a la aplicación preferente de un Artículo determinado de una norma concreta, en cuyo caso prevalecerá lo establecido en dicho Artículo.

### **9.2.7 Cambios en el proyecto, o en los trabajos**

La Administración está facultada, antes de empezar los trabajos o durante su realización para realizar parte de las que comprenda la contrata, bien sea por sí, o por administración, introducir modificaciones o supresiones en el proyecto con la consiguiente modificación del presupuesto y cambiar unas fabricas o materiales por otros siempre que éstas sean de las comprendidas en el Contrato. Dichas disposiciones serán obligatorias para el Contratista, sin que tenga derecho a indemnización alguna siempre que no se introduzcan variaciones en más o en menos, superiores a un veinte por ciento del presupuesto; en este caso podrá rescindir el contrato con devolución de la fianza. Por su parte, la Administración puede exigirle realice la obra contratada.

La Administración está facultada para cambiar el porcentaje de cualquier unidad de presupuesto pudiendo, incluso, suprimirla totalmente o incluir la realización de aquella que, aún no estando valorada, figure en el cuadro de precios sin más restricciones que las señaladas en el apartado anterior.

Si la Administración juzgase conveniente suspender total o parcialmente, los trabajos contratados para llevar a cabo las modificaciones a que se refieren los apartados anteriores se lo comunicará por escrito al Contratista, procediendo a la medición de la instalación afectada por la suspensión y extendiendo el acta correspondiente.

Si, como consecuencia de estas modificaciones, fuera necesario emplear materiales o realizar instalaciones nuevas, la Administración valorará su importe a los precios asignados a otros materiales o realizar instalaciones nuevas, la Administración valorará

su importe a los precios asignados a otros materiales semejantes, si los hubiera, y cuando no sea así se fijarán entre el Director y el Contratista, sometidos a la aprobación de la Superioridad.

Caso de no existir acuerdo, el Contratista quedará relevado de realizar la instalación de que se trate.

El Director podrá admitir y dictar la correspondiente orden de modificación de instalación cuando no se altere fundamentalmente su naturaleza, el coste a abonar por la Administración, ni el plazo de ejecución de la misma.

El Contratista podrá proponer por escrito a la Dirección, la sustitución de unidades de obra por otras que reúnan condiciones más adecuadas, el empleo de material de mejor calidad, o, en general, cualquier otra mejora que juzgue beneficiosa.

El Director admitirá estas mejoras si las estimase convenientes, autorizándolas por escrito, sin que el Contratista tenga derecho a indemnización ni sobreprecio alguno salvo en caso de modificación del proyecto aprobada por la Administración.

#### **9.2.8 Instalación incompleta**

La Administración determinará el valor que debe abonarse al Contratista por la instalación incompleta que haya efectuado, teniendo en cuenta las multas que haya originado el retraso de la terminación para su uso.

#### **9.2.9 Instalaciones defectuosas**

La Administración ordenará el desmantelamiento de las partes defectuosas de las instalaciones, antes de la recepción provisional, o definitiva de la misma, siendo los gastos de desmantelamiento por cuenta del Contratista y sin que la dilatación de tiempo que pueda haber por esta decisión sea repercutible en el plazo de terminación de los trabajos.

El Contratista no podrá oponer reclamación alguna contra esta decisión.

Cuando la Dirección estime que las unidades de instalación defectuosa, son sin embargo, admisibles podrá aceptarlas determinando, entonces, el precio a que debe ser abonadas, siempre inferior al de adjudicación. El Contratista no puede efectuar reclamación alguna contra esta decisión, salvo en el caso en que prefiera desinstalar y reconstruir dichas unidades por su cuenta y con arreglo a las condiciones de contrato.

#### **9.2.10 Plazo de garantía**

Efectuada la recepción de los trabajos comenzará a contar un plazo de garantía cuya duración no será inferior a un año salvo casos especiales recogidos en el Contrato.

#### **9.2.11 Liquidación de la instalación**

El Director, o la persona que señale la Administración, redactará la liquidación definitiva de la instalación dentro de un plazo de tres meses a partir del momento en que haya sido firmada el acta de recepción.

El Contratista puede formular los reparos que estime oportuno a esta liquidación, haciéndolo, a través del Director, en el plazo de diez días.

Una vez efectuada la liquidación de los trabajos se procederá a regularizar la cuenta de saldos con el Contratista. Si de esta operación resultase un saldo a su favor se le formalizará una situación definitiva por el importe del mismo.

A continuación se procederá a la devolución de la fianza, o a lo que reste de ella por deducciones habidas durante las obras, o por cualquier otro cargo que resultara a favor de la Administración durante la liquidación.

La fianza no podrá ser devuelta nunca en forma parcial aún cuando se hayan efectuado recepciones parciales de los trabajos.

### 9.2.12 Condiciones económicas

I - Los precios indicados en este proyecto son firmes y sin revisión por ningún concepto, siempre y cuando se acepten dentro del periodo de validez del presupuesto que se fija hasta Diciembre de 2006.

II - El pago se realizará como sigue:

- 75% a la firma del contrato.
- 25% en el momento de entrega.

III - La forma de pago será al contado mediante cheque nominativo o mediante transferencia bancaria. En ningún caso se aceptarán letras de cambio.

IV - El suministrador se hará cargo de los gastos de embalaje y del transporte, dentro de la ciudad donde se encuentre la instalación. En caso de ser necesario transporte interurbano, el gasto correrá por cuenta del cliente. En todo caso, el responsable de los posibles desperfectos ocasionados por el transporte será el suministrador.

V - Durante el plazo de garantía, la totalidad de los gastos originados por las reparaciones correrán por cuenta del suministrador.

VI - Fuera de dicho plazo y durante los siguientes cinco años, los costes serán fijados mediante acuerdo por ambas partes. Pasados 5 años, éstos los fijará exclusivamente el suministrador.

## 9.3 Pliego de condiciones técnicas y particulares

### 9.3.1 Normas de calidad

Los sistemas se diseñarán de forma que cumplan las normas UNE, CEI y EN aplicables a este tipo de productos, así como las normas ETSI (European Telecommunications Standards Institute) para sistemas de radiofrecuencia.

### **9.3.2 Normas de seguridad e higiene**

El proyecto cumplirá con la Ley 31/95 de Prevención de Riesgos Laborales.

### **9.3.3 Vida útil del producto**

Los sistemas se diseñarán para una vida útil no inferior a 10 años en funcionamiento continuo.

## **9.4 Alcance del suministro**

### **9.4.1 Pruebas en fábrica**

Se realizarán con presencia de personal, del suministrador y de La Empresa de Ingeniería, siendo responsabilidad del Suministrador la elaboración del correspondiente protocolo de pruebas, que deberá ser aprobado por La Empresa de Ingeniería con anterioridad a la ejecución de dichas pruebas.

### **9.4.2 Puesta en marcha**

El Suministrador desplazará el personal técnico necesario para la realización de la puesta en marcha de los equipos en la instalación definitiva.

Asimismo, elaborará el correspondiente Protocolo de Pruebas que incluirá relación de equipos de simulación y medida a emplear. El documento anterior deberá ser aprobado por La Empresa de Ingeniería antes del comienzo de las pruebas.

En cualquier caso el Suministrador será el responsable del correcto funcionamiento de la totalidad de los componentes del Sistema de Supervisión y Control que se instala.

## 10 ESTUDIO ECONOMICO

A continuación se describe el análisis económico aproximado del desarrollo del proyecto “*Diseño y desarrollo del prototipo de un sensor basado en materiales piezoeléctricos*”. Los costes del proyecto se subdividen en tres categorías:

### 10.1 Honorarios

Este apartado contempla los honorarios percibidos en calidad de Ingeniero Superior por el estudio previo, desarrollo del modelo numérico, su programación y su implementación. Se contabilizan días laborables y tiempo extra, valorando la hora dedicada a 25€. A continuación se describe el numero de horas utilizadas:

2 semanas de documentación previa.  $40 \text{ horas} / \text{semana} \times 2 = 80 \text{ horas}$

3 meses laborables para el desarrollo.  $40 \text{ horas} / \text{semana} \times 4 \text{ semanas} \times 3 \text{ meses} = 480 \text{ horas}$

40 horas extra laborables de supervisión, pruebas adicionales y chequeo.

Esto hace un total de 600 horas para el completo desarrollo del sistema y su coste asciende a :

$600 \text{ horas} \times 25\text{€}/\text{hora} = 15000 \text{ €}$  por coste en mano de obra y desarrollo.

### 10.2 Gastos directos

En gastos directos se incluyen el gasto en materiales de montaje:

Cilindro: 7 €

Anillo de sujeción:  $2 \times 10 = 20 \text{ €}$

Tapa:  $2 \times 9 = 18 \text{ €}$

Juntas:  $4 \times 0.5 = 2 \text{ €}$

Disco piezoeléctrico:  $8.1 \times 11 = 90 \text{ €}$

Tornillo hexagonal de acero:  $8 \times 4 = 3 \text{ €}$

Mecanizado de las piezas: **100 €**

Total de gastos directos: **240 €**

### 10.3 Gastos indirectos

Gastos indirectos contempla aquellos gastos que son debidos de forma implícita al desarrollo del proyecto. A continuación se detallan los gastos indirectos:

#### Gastos por desplazamiento

Gasolina Euro súper sin plomo 95 octanos: **25€** en dos desplazamientos por adquisición de material.

#### Gastos de servicios generales

Luz y equipos: **30€**

Total de gastos indirectos: **55€**

Coste total del proyecto

El coste total asciende a:

Gastos indirectos + Gastos directos + Honorarios =  $55\text{€} + 240 \text{ €} + 15000\text{€} = 15295 \text{ €}$

Con el correspondiente incremento del 16% de IVA, queda:

**Coste proyecto final =  $15295 \text{ €} + 2447,2 \text{ €} = 17742.2\text{€}$**

# Anexos

A

Programa

---

```

function sensibilidadParametros(name)

%   SENSIBILIDADPARAMETROS(FILE) genera las graficas correspondientes
%   al analisis de la sensibilidad dinamica de la interaccion fluido
%   estructura del transformador FPZT. La variable FILE es un char
que
%   define un fichero matlab que debe definir dos estructuras de
datos,
%   es decir:
%   >> [P,O] = file;
%
%   produce la estructura de parametros, P, y la de opciones, O.
%
%   Estructura de parametros puede incluir la siguiente lista de
parametros
%
%   voltage: [vector de voltages del emisor]
%   rho_e: [vector de densidades del emisor]
%   s_e: [vector de flexibilidades del emisor]
%   d_e: [vector de constantes piezoelectricas del emisor]
%   rho_r: [vector de densidades del receptor]
%   s_r: [vector de flexibilidades del receptor]
%   d_r: [vector de constantes piezoelectricas del receptor]
%   D_e: [vector de diametros exteriores del cilindro]
%   D_i: [vector de diametros interiores del cilindro]
%   h_e: [vector de espesores del emisor]
%   L_f: [vector de longitudes del fluido]
%   h_r: [vector de espesores del receptor]
%
%   Estructura de opciones deben incluirse los siguientes campos
%   fpzt: nombreFPZT fichero que define la estructura del fpzt
%   frecuencia: f valor de la frecuencia del voltage de excitacion

% Carga el archivo de parametros de ensayo.
[par,opt]=feval(name);

% Obtiene el nombre de los campos de parametros
key=fieldnames(par);

for b=2:length(key)
    % Valor del campo de la estructura de parametros.
    val=getfield(par,char(key(b)));
    if isempty(val)==0
        % Inicializacion de la matriz de datos
        data=zeros(length(val),length(par.voltage));
        for j=1:length(val)
            fpzt = modificarFPZT(char(key(b)),val(j),opt.fpzt);
            y     = calculaFPZT(fpzt,par.voltage,opt.frecuencia);

            icc(j,:)=y(1,:);
            vca(j,:)=y(2,:);
        end
        parametros = getfield(par,char(key(b)));
    end
end
end

```

```

function fpzt = mod01()
%
%
%   Genera una estructura con el valor de todos los parámetros del
%   modelo relacionados con el emisor, el receptor, estructura y el
%   fluido.
%
%
%   La estructura de parametros puede incluir la siguiente lista de
%   parametros
%
%
% Notacion para definir un prototipo de FPZT
% (e) emisor
% (f) fluido
% (r) receptor
% (s) estructura
%
% Variables:
% rho      densidad kg/m3
% s        flexibilidad (m2/N)
% d        coeficiente de carga (N/C)
% eps      Permitividad relativa
% gamma_s  amortiguamiento de la flexibilidad segun Giorgitou 2000
% gamma_e  amortiguamiento de la permitividad segun Giorgitou 2000
% T0       temperatura del fluido, ambiente (K)
% p0       presion del fluido (N/m2)
% cp/cv    relacion calores especificos (-)
% Rg       constante del gas (m^2/s^2/K )
% D_exterior  diametro exterior (m)
% D_interior  diametro interior (m)
% h_e      espesor del pzt emisor (m)
% longitud  Longitud axial del fluido (m)
% h_r      espesor del pzt receptor (m)
%
% fpzt = struct(...
%   'e', [rho, s_33, d_33, eps_33, gamma_s, gamma_eps], ...
%   'f', [T0, p0, cp/cv, Rg], ...
%   'r', [rho, s_33, d_33, eps_33, gamma_s, gamma_eps], ...
%   's', [rho, s], ...
%   'geometria', [D_exterior, D_interior, h_e, longitud, h_r]);
%
% [7650, 15.7e-12, 230e-12, 1035*epsilon0, 5/100, 5/100]PC8
% [7750, 17.2e-12, 409e-12, 1700*epsilon0, 5/100, 5/100]PC5
% [7700, 13.9e-12, 153e-12, 425*epsilon0, 5/100, 5/100]PZT7A
% [7600, 13.9e-12, 225e-12, 1200*epsilon0, 5/100, 5/100]PZT7D
% [50e-3, 30e-3, 4e-3, 100e-2, 4e-3]
% [80e-3, 55e-3, 2e-3, 150e-2, 6e-3]
%
epsilon0 = 8.854e-12;
fpzt = struct(...
    'e', [7750, 17.2e-12, 409e-12, 1700*epsilon0, 5/100, 5/100], ...
    'f', [20+273, 1e5, 1.4, 287], ...
    'r', [7750, 17.2e-12, 409e-12, 1700*epsilon0, 5/100, 5/100], ...
    's', [7800, 1/200e9], ...
    'geometria', [50e-3, 30e-2, 4e-3, 300e-2, 4e-3]);

```

```

function varargout = calculaCampo(z,cte)

%   CALCULACAMPO(Vector,Vector): calcula el valor del campo eléctrico
%   generado a partir del valor de la variable z particularizada para
la %   distancia que se desea y el valor de unas constantes

%   k: numero de ondas
%   delta: excitación en función de la tensión de excitación
%   A,B: constantes intermedias para la resolución del problema

k       = cte(1);
delta   = cte(2);
A       = cte(3);
B       = cte(4);

w       = zeros(size(x));
dw      = zeros(size(x));

for a=1:length(z)
    w(a) = delta/k*(A*sin(k*z(a)) + B*cos(k*z(a)));
    dw(a) = delta*(A*cos(k*z(a)) - B*sin(k*z(a)));
end

if nargout == 1
    varargin{1} = w;
elseif nargout == 2
    varargin{1} = w;
    varargin{1} = dw;
end

```

```

function constante = calculaConstante(fpzt,voltage,modo)

%     CALCULACONSTANTE(Est,Vector,Char): calcula el valor de las
%     constantes necesarias para la resolucion del problema. Algunas
%     de estas constantes dependen de si estamos en configuración de
%     cortocircuito o circuito abierto.
%
%     fpzt: es la estructura donde estan todos los parámetros del
%     modelo
%     voltage: es un vector con el valor de las tensiones de
%     excitación
%     modo: es una cadena donde se indica en que configuración se esta
%     trabajando

V_e      = voltage(1);
omega    = voltage(2);

rho_e    = fpzt.e(1);
T_0      = fpzt.f(1);
rho_r    = fpzt.r(1);
rho_s    = fpzt.s(1);

s_e      = fpzt.e(2)*(1-i*fpzt.e(5));
p_0      = fpzt.f(2);

if strcmp(modo,'cortoCircuito')
    s_r    = fpzt.r(2)*(1-i*fpzt.r(5));
elseif strcmp(modo,'circuitoAbierto')
    s_r    = fpzt.r(2)*(1-i*fpzt.r(5))-fpzt.r(3)^2/(fpzt.r(4)*(1-
    i*fpzt.r(6)));
else
    error('Modo incorrecto')
end

s_s      = fpzt.s(2);

d_e      = fpzt.e(3);
gamma    = fpzt.f(3);
d_r      = fpzt.r(3);

R_g      = fpzt.f(4);
rho_f    = p_0/R_g/T_0;

diametro_ext = fpzt.geometria(1);
diametro_int = fpzt.geometria(2);
h_e      = fpzt.geometria(3);
L_f      = fpzt.geometria(4);
h_r      = fpzt.geometria(5);

area_e   = pi/4*diametro_int^2;
area_s   = pi/4*(diametro_ext^2-diametro_int^2);

L_s      = h_e + L_f + h_r;
alpha    = area_e/area_s;

```

```

k_e = omega*sqrt(s_e*rho_e);
k_f = omega/sqrt(gamma*p_0/rho_f);
k_r = omega*sqrt(s_r*rho_r);
k_s = omega*sqrt(s_s*rho_s);

delta = d_e*V_e/h_e;

g1 = k_e/k_s*tan(k_s*L_s);
g2 = k_f*k_e/(rho_f*omega^2*s_e)*...
    (tan(k_f*L_f)-rho_f*omega^2*s_r/(k_f*k_r)*tan(k_r*h_r))/...
    (1+rho_f*omega^2*s_r/(k_f*k_r)*tan(k_r*h_r)*tan(k_f*L_f));
g3 = 1/cos(k_e*h_e)+tan(k_s*L_s)*tan(k_e*h_e)*k_e/k_s;
g4 = tan(k_s*L_s)*alpha*s_s/s_e*k_e/k_s;
g5 = 1+tan(k_s*L_s)*tan(k_e*h_e)*alpha*s_s/s_e*k_e/k_s;
g6 = tan(k_e*h_e);

gamma1 = (g1 + g2*g3)/(g4 + g2*g5 - g6);
gamma2 = k_e/k_s*tan(k_s*L_s*(1-alpha*s_s/s_e*gamma1));

gamma3 = gamma1*k_f/k_e*cos(k_e*h_e)*...
    (tan(k_e*h_e)-tan(k_s*L_s)*alpha*s_s/s_e*k_e/k_s) + ...
    tan(k_s*L_s)*cos(k_e*h_e)*k_f/k_s;
gamma4 = k_f^2/(rho_f*omega^2*s_e)*(gamma1*cos(k_e*h_e)*...
    (1+tan(k_s*L_s)*tan(k_e*h_e)*alpha*s_s/s_e*k_e/k_s) - ...
    (1+tan(k_s*L_s)*sin(k_e*h_e)*k_e/k_s));

gamma5 = rho_f*omega^2*s_r/(k_f^2)*...
    (gamma3*sin(k_f*L_f) + gamma4*cos(k_f*L_f));
gamma6 = -gamma5*tan(k_r*h_r);

gamma7 = alpha*s_s/s_e*gamma1-1;
gamma8 = -gamma7*tan(k_s*L_s);

constante = [gamma1, gamma2, gamma3, gamma4, ...
    gamma5, gamma6, gamma7, gamma8];

```

```

function y = calculaFPZT(fpzt,voltage,frequency)

%     CALCULAFPZT(Est,Vector,Num): Guardamos el valor de las
%     constantes generadas en la función CALCULACONSTANTE y el valor
%     de la salida en ambos modos y para los diferentes valores de
%     tensión de excitación.
%
%     fpzt: es la estructura donde estan todos los parámetros del
%     modelo
%     voltaje: es un vector con el valor de las tensiones de
%     excitación
%     frecuencia: es un vector con el valor de las frecuencias de la
%     señal de excitación

y = zeros(2,length(voltage));
if ischar(fpzt)
    fpzt=feval(fpzt);
end

omega = 2*pi*frequency;

modo = {'cortoCircuito','circuitoAbierto'};

for j=1:length(modo)
    for i=1:length(voltage)
        gamma = calculaConstante(fpzt,[voltage(i),omega],modo{j});
        y(j,i) = calculaSalida(fpzt.r,fpzt.geometria,fpzt.e,...
            [voltage(i),omega],gamma(5:6),modo{j});
    end
end
end

```

```

function y = calculaFPZTfrecuencia(fpzt,voltage,frequency)

%     CALCULAFPZTFRECUENCIA(Est,Vector,Vector): Guardamos el valor de
%     las constantes generadas en la función CALCULACONSTANTE y guarda
%     el valor de la salida para ambas configuraciones y para
%     diferentes frecuencias en la señal de excitación.
%
%     fpzt: es la estructura donde estan todos los parámetros del
%     modelo
%     voltaje: es un vector con el valor de las tensiones de
%     excitación
%     frecuencia: es un vector con el valor de las frecuencias de la
%     señal de excitación

y = zeros(2,length(voltage));
if ischar(fpzt)
    fpzt=feval(fpzt);
end

modo = {'cortoCircuito','circuitoAbierto'};

for j=1:length(modo)
    for i=1:length(frequency)
        omega = 2*pi*frequency(i);
        gamma = calculaConstante(fpzt,[voltage,omega],modo{j});
        y(j,i) = calculaSalida(fpzt.r,fpzt.geometria,fpzt.e,...
            [voltage,omega],gamma(5:6),modo{j});
    end
end
end

```

```

function fpzt = modificarFPZT(propiedad,valor,fpzt)

% MODIFICAFPZT(Char,Num,Est):Guarda el valor de la variable que
% viene indicada en la cadena en su correspondiente elemento de la
% estructura.
%
% propiedad: es una cadena donde está guardado el nombre del
% parámetro donde se quiere guardar el valor
% valor: es el valor numerico de la propiedad
% fpzt: es la estructura donde estan todos los parámetros del
% modelo

if ischar(fpzt)
    fpzt=feval(fpzt);
end

% Emisor

switch propiedad

    case 'rho_e'
        fpzt.e(1) = valor;
    case 's_e'
        fpzt.e(2) = valor;
    case 'd_e'
        fpzt.e(3) = valor;
    case 'p_0'
        fpzt.f(2) = valor;
    case 'rho_r'
        fpzt.r(1) = valor;
    case 's_r'
        fpzt.r(2) = valor;
    case 'd_r'
        fpzt.r(3) = valor;
    case 'D_e'
        fpzt.geometria(1) = valor;
    case 'D_i'
        fpzt.geometria(2) = valor;
    case 'h_e'
        fpzt.geometria(3) = valor;
    case 'L_f'
        fpzt.geometria(4) = valor;
    case 'h_r'
        fpzt.geometria(5) = valor;
    otherwise
        error('Opcion no contemplada')

end

```

```

function [parametros,opciones] = parametros01()

%     PARAMETROS01: Guarda el valor de las variables de la estructura
%     y genera variaciones en el valor de esa variable para poder
%     pintar las curvas de tendencia según la variación de los
%     parámetros.

fpzt = 'mod01';

if ischar(fpzt)
    fpzt=feval(fpzt);
end

% Obtiene nominales
rho_e0 = fpzt.e(1);
s_e0   = fpzt.e(2);
d_e0   = fpzt.e(3);
eps_e0 = fpzt.e(4);

rho_r0 = fpzt.r(1);
s_r0   = fpzt.r(2);
d_r0   = fpzt.r(3);
eps_r0 = fpzt.r(4);

D_e     = fpzt.geometria(1);
D_i     = fpzt.geometria(2);
h_e     = fpzt.geometria(3);
L_f     = fpzt.geometria(4);
h_r     = fpzt.geometria(5);

parametros = struct('voltage', linspace(100,1000,20),...
                    'rho_e',rho_e0*[0.01 0.05 0.1 0.5 1 5 10 50
100],...
                    's_e',s_e0*[0.01 0.05 0.1 0.5 1 5 10 50 100],...
                    'd_e',d_e0*[0.01 0.05 0.1 0.5 1 5 10 50 100],...
                    'rho_r',rho_e0*[0.01 0.05 0.1 0.5 1 5 10 50
100],...
                    's_r',s_r0*[0.01 0.05 0.1 0.5 1 5 10 50 100],...
                    'd_r',d_r0*[0.01 0.05 0.1 0.5 1 5 10 50 100],...
                    'D_e',D_e*[0.5 0.60 0.75 0.90 1.0 1.10 1.15 1.25
1.5],...
                    'D_i',D_i*[0.5 0.60 0.75 0.90 1.0 1.10 1.15 1.25
1.5],...
                    'h_e',h_e*[0.5 0.60 0.75 0.90 1.0 1.10 1.15 1.25
1.5],...
                    'L_f',L_f*[0.5 0.60 0.75 0.90 1.0 1.10 1.15 1.25
1.5],...
                    'h_r',h_r*[0.5 0.60 0.75 0.90 1.0 1.10 1.15 1.25
1.5]...
                    );

opciones = struct(...
            'fpzt','mod01',...
            'fmt','fig',...
            'frecuencia',50 ...
            );

```

```

function procesaParametroFPZT(parametro,labParametro,voltage,icc,vca)

% PROCESAPARAMETROSFPZT(Vector,Char,Vector,Vector,Vector): Genera
% el titulo de los ejes x e y para cada una de las graficas y
% genera todas las graficas.
%
% Parámetro: es un vector con el valor de todos los parámetros.
% Labparametro: es una cadena con la etiqueta de cada parámetro
% Voltaje: es un vector con el valor de las tensiones de
% excitación
% Icc, vca: Son dos vectores con el valor de la salida para ambas
% configuraciones

MARK      = {'r-o','b-s','g-d','k-^','m-x', ...
             'r-p','b-*','g-+','k-<','m-h', ...
             'r->','b-.','g-v'};

%LABS     = {'Voltage [km/h]', ...1
%           'Fuerza media [N]', ...2
%           'Desv. tipica [N]', ...3
%           'Max. estadistico [N]', ...4
%           'Min. estadistico [N]', ...5
%           'Max. real [N]', ...6
%           'Min. real [N]', ...7
%           'Desplazamiento poste 1 [mm]',...8
%           'Desplazamiento poste 2 [mm]',...9
%           'Desplazamiento poste 3 [mm]'...10
%           };

FILE      = {'icc_','vca_' ...
             };

g        = '';
xp       = ' ';

switch labParametro
case 'rho_e'
    unit = '(kg/m^3)';
    label = strcat('Densidad emisor',xp,unit);
case 's_e'
    unit = '(m^2/N)';
    label = strcat('Flexibilidad emisor',xp,unit);
case 'd_e'
    unit = '(N/C)';
    label = strcat('Constante piezoelectrica emisor',xp,unit);
case 'p_0'
    unit = '(N/m^2)';
    label = strcat('Presion del fluido',xp,unit);
case 'rho_r'
    unit = '(kg/m^3)';
    label = strcat('Densidad receptor',xp,unit);
case 's_r'
    unit = '(m^2/N)';
    label = strcat('Flexibilidad receptor',xp,unit);
case 'd_r'

```

```

        unit = '(N/C)';

label = strcat('Constante piezoelectrica receptor',xp,unit);
case 'D_e'
    unit = '(m)';
    label = strcat('Diametro exterior',xp,unit);
case 'D_i'
    unit = '(m)';
    label = strcat('Diametro interior',xp,unit);
case 'h_e'
    unit = '(m)';
    label = strcat('Espesor emisor',xp,unit);
case 'L_f'
    unit = '(m)';
    label = strcat('Longitud fluido',xp,unit);
case 'h_r'
    unit = '(m)';
    label = strcat('Espesor receptor',xp,unit);
otherwise
    error('Opcion no contemplada')
end

if length(voltage) >= length(parametro)
    xl = 'Tensión Emisor (V)';
    % Crea legendas
    for p=1:length(parametro)
        g=[g, {[strcat(labParametro, ' = ', num2str(parametro(p)))}]];
    end

    figure(1)
        for p=1:length(parametro)
            plot(voltage,abs(icc(p,:)),MARK{p}); hold on
        end
        grid on; xlabel(xl);
        ylabel('Intensidad de Cortocircuito (A)');
        legend(g,0);
        saveas(gcf,strcat(FILE{1},'_Ve_',labParametro),'epsc');
        saveas(gcf,strcat(FILE{1},'_Ve_',labParametro),'fig');
    close(1)

    figure(2)
        for p=1:length(parametro)
            plot(voltage,abs(vca(p,:)),MARK{p}); hold on
        end
        grid on; xlabel('Tensión Emisor (V)');
        ylabel('Tensión de Circuito Abierto (V)');
        legend(g,0);
        saveas(gcf,strcat(FILE{2},'_Ve_',labParametro),'epsc');
        saveas(gcf,strcat(FILE{2},'_Ve_',labParametro),'fig');
    close(2)

else
    xl = label;
    % Crea legendas
    for p=1:length(voltage)

```

```

    g=[g, {[strcat('V_e = ', num2str(voltage(p)))]}];
end

figure(1)
    for p=1:length(voltage)
        plot(parametro, abs(icc(:,p)), MARK{p}); hold on
    end
    grid on; xlabel(x1);
    ylabel('Intensidad de Cortocircuito (A)');
    legend(g, 0);
    saveas(gcf, strcat(FILE{1}, labParametro, '_Ve'), 'epsc');
    saveas(gcf, strcat(FILE{1}, labParametro, '_Ve'), 'fig');
close(1)

figure(2)
    for p=1:length(voltage)
        plot(parametro, abs(vca(:,p)), MARK{p}); hold on
    end
    grid on; xlabel(x1);
    ylabel('Tensión de Circuito Abierto (V)');
    legend(g, 0);
    saveas(gcf, strcat(FILE{2}, labParametro, '_Ve'), 'epsc');
    saveas(gcf, strcat(FILE{2}, labParametro, '_Ve'), 'fig');
close(2)

end

```

Con el fichero "pztEquations" se consigue cambiar del formato *esfuerzo - carga* al formato *presión - carga*.

```
syms s11 s12 s13 s33 s44 s_E real
syms d31 d33 d15 d real
syms e1 e3 epsilon_T real

syms c_E e epsilon_S real

s_e = [s11,s12,s13,0,0,0;...
       s12,s11,s13,0,0,0;...
       s13,s13,s33,0,0,0;...
       0,0,0,s44,0,0;...
       0,0,0,0,s44,0;...
       0,0,0,0,0,2*(s11-s12)];

d = [0,0,0,0,d15,0;...
     0,0,0,d15,0,0;...
     d31,d31,d33,0,0,0];
epsilon_T = [e1,0,0;...
            0,e1,0;...
            0,0,e3];

% Change from strain-charge format to stress-charge format
c_e = inv(s_e)
e = d*inv(s_e)
epsilon_S = epsilon_T-d*inv(s_e)*d'
```

El fichero “runner” genera las graficas de la tensión de circuito abierto en función de la frecuencia y de la tensión de excitación. También genera estas mismas graficas pero para la configuración de cortocircuito.

```
clear all
close all

np      = 20;
voltage = linspace(100,1000,np);
frecuencia = 50;

y = calculaFPZT('mod01',voltage,frecuencia);

figure(1)
subplot(1,2,1)
plot(voltage,abs(y(1,:))); hold on
grid on; xlabel('Tensión Emisor (V)'); ylabel('Intensidad de
Cortocircuito (A)')

subplot(1,2,2)
plot(voltage,abs(y(2,:))); hold on
grid on; xlabel('Tensión Emisor (V)'); ylabel('Tensión de Circuito
Abierto (V)')

% Analisis en frecuencias
np      = 100;
Voltage = 100;
Frecuencia = 5*logspace(1,3,np);
Omega      = 2*pi*Frecuencia;
x = calculaFPZTfrecuencia('mod01',Voltage,Omega);

figure(2)
subplot(1,2,1)
semilogx(Frecuencia,abs(x(1,:))); hold on
grid on; xlabel('Frecuencia (Hz)'); ylabel('Intensidad de
Cortocircuito (A)')

subplot(1,2,2)
semilogx(Frecuencia,abs(x(2,:))); hold on
grid on; xlabel('Frecuencia (Hz)'); ylabel('Tensión de Circuito
Abierto (V)')
```

B

Materiales

---

---



---

## Ferroperm Piezoelectric Materials

---

### Material Data For Standard Test Specimens

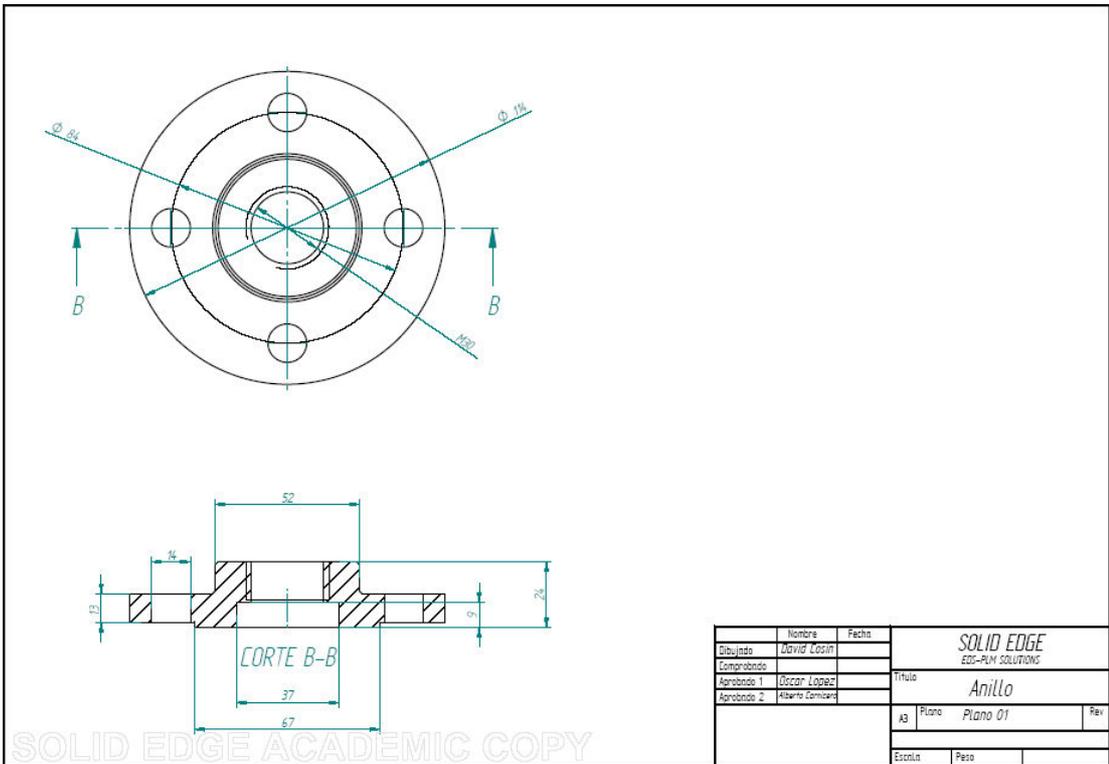
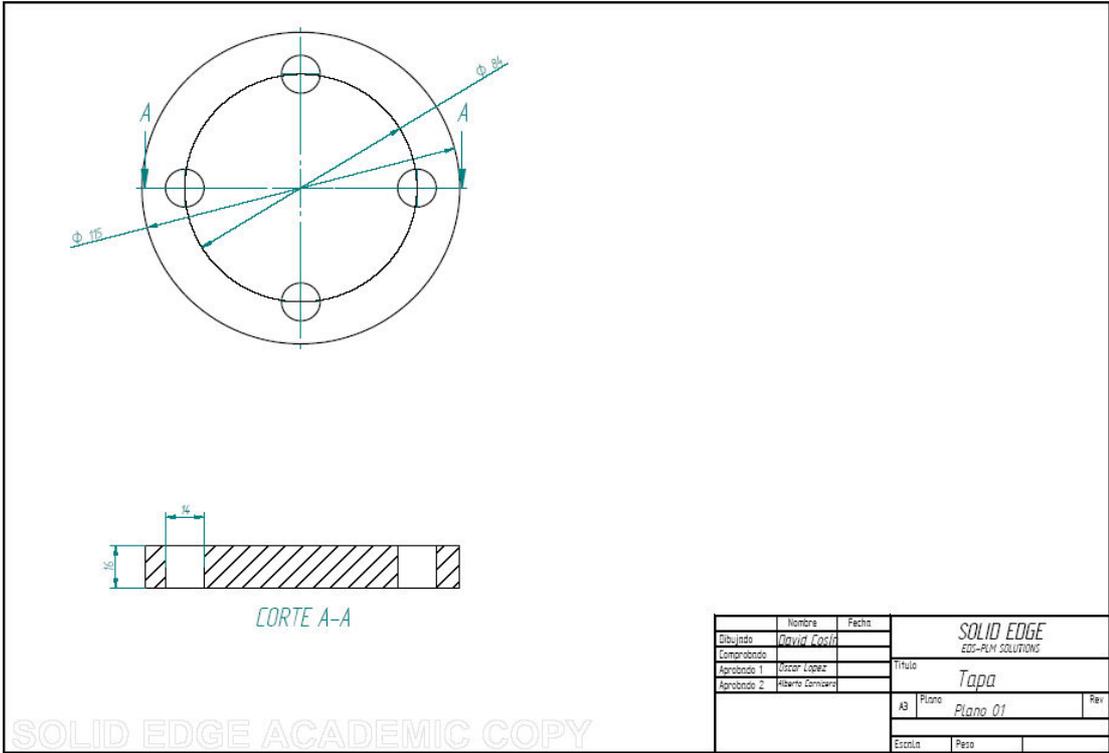
Data are measured at 25°C and 24 hours after poling.

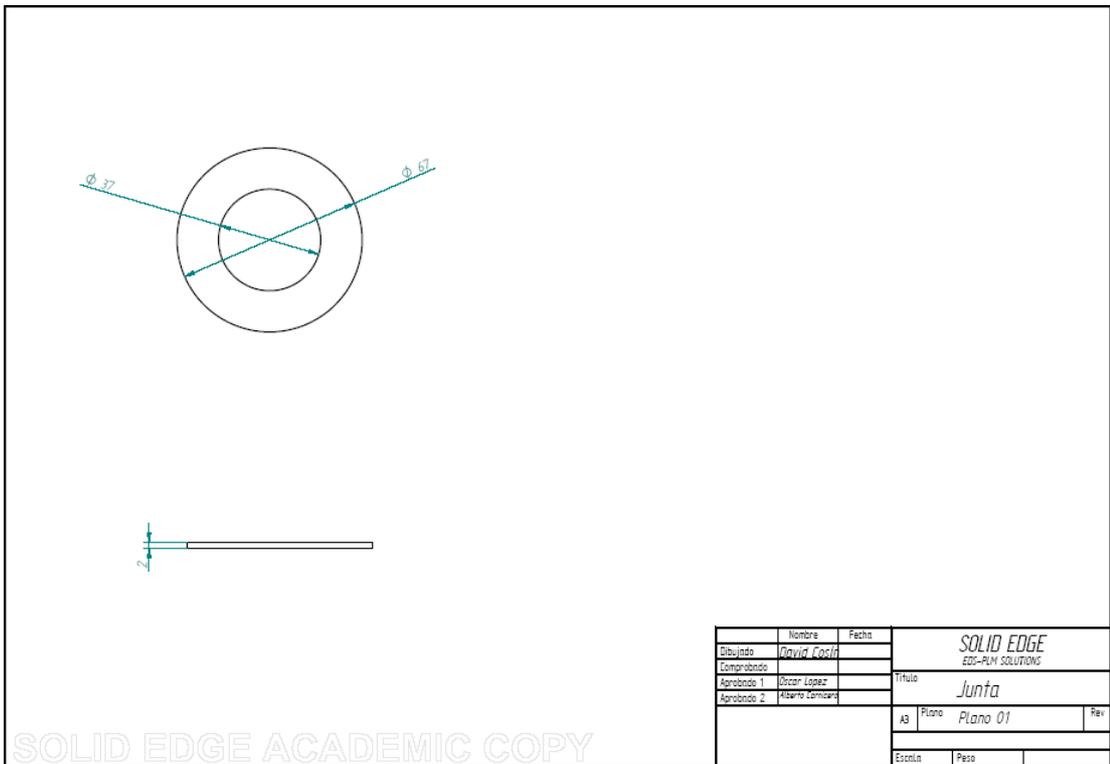
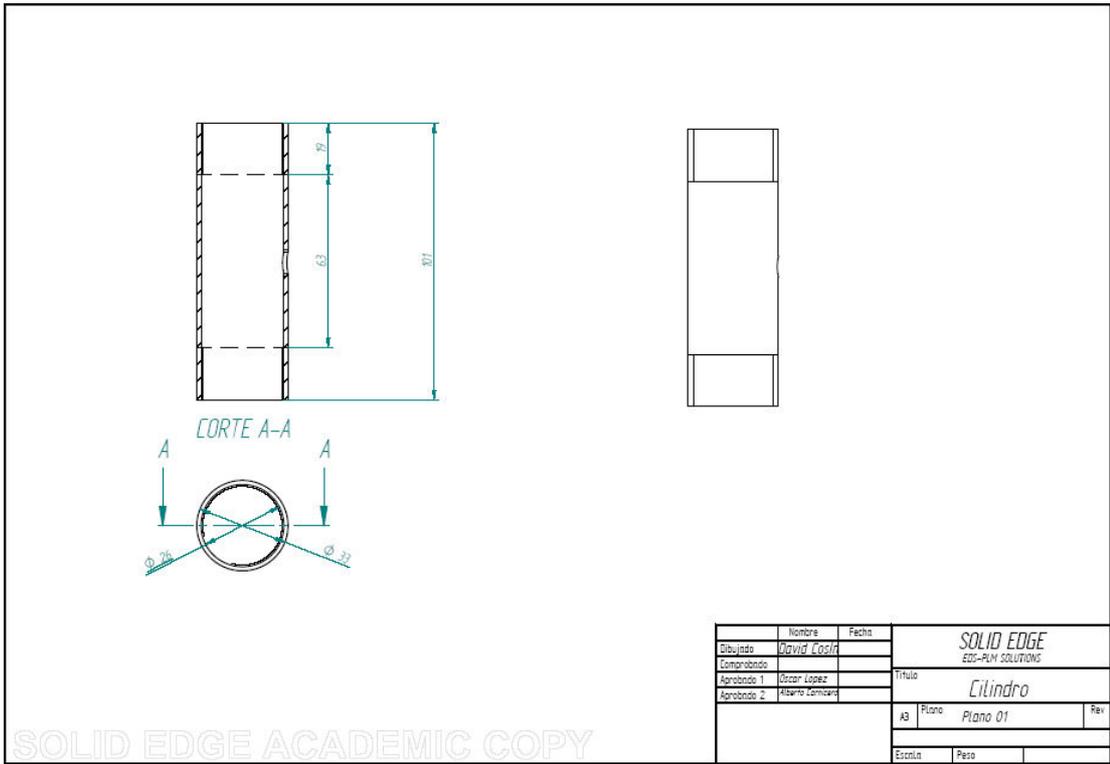
	Symbol	Dimension	Pz21	Pz23	Pz24	Pz26	Pz27	
<b>Electrical Properties</b>								
Relative dielectric const. at 1 kHz	$K_{33}^T$	1	3800	1500	400	1300	1800	
Diel. dissipation factor at 1 kHz	$\tan \delta$	$10^{-3}$	18	13	2	3	17	
Curie temperature	$T_c >$	°C	205	350	330	330	350	
Recommended working range	$<$	°C	130	250	230	230	250	
<b>Electromechanical Properties</b>								
Coupling factors								
	$k_p$	1	0.60	0.52	0.50	0.57	0.59	
	$k_t$	1	0.47	0.45	0.52	0.47	0.47	
	$k_{31}$	1	0.33	0.29	0.29	0.33	0.33	
	$k_{33}$	1	0.70	0.65	0.67	0.68	0.70	
Piezoelectric charge coefficients								
	$-d_{31}$	$10^{-12}$ C/N	250	130	55	130	170	
	$d_{33}$	$10^{-12}$ C/N	600	330	190	330	425	
	$d_{15}$	$10^{-12}$ C/N	650	335	150	400	500	
Piezoelectric voltage coefficients								
	$-g_{31}$	$10^{-3}$ Vm/N	7	10	16	11	11	
	$g_{33}$	$10^{-3}$ Vm/N	18	25	54	28	27	
Frequency constants								
	$N_p$	Hz·m	2030	2160	2400	2230	2010	
	$N_t$	Hz·m	1970	2030	2100	2040	1950	
	$N_{31}$	Hz·m	1375	1480	1670	1500	1400	
	$N_{33}$	Hz·m	1325	1600	1600	1800	1500	
<b>Mechanical Properties</b>								
Density	$\rho$	$10^3$ kg/m <sup>3</sup>	7.80	7.70	7.70	7.70	7.70	
Elastic compliances								
	$s_{11}^E$	$10^{-11}$ m <sup>2</sup> /N	18	15	10	13	17	
	$s_{33}^E$	$10^{-11}$ m <sup>2</sup> /N	18	19	23	20	23	
	$s_{11}^D$	$10^{-11}$ m <sup>2</sup> /N	16	14	10	12	15	
	$s_{33}^D$	$10^{-11}$ m <sup>2</sup> /N	9	11	13	11	12	
Poisson's ratio	$\sigma^E$	1	0.40	0.39	0.29	0.33	0.39	
Mechanical quality factor	$Q_m$	1	65	100	>1000	>1000	80	
<b>Standard tolerances:</b>			Electrical Properties					± 10 %
			Electromechanical Properties					± 5 %
			Mechanical Properties					± 2.5 % (Except for $\sigma^E$ and $Q_m$ )

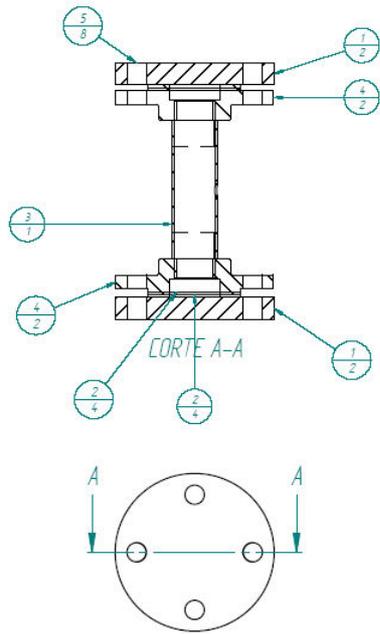
C

Planos

---







Numero de elemento	Titulo	Material	Cantidad
1	Tapa	Acero inoxidable	2
2	Anillo sujeción	Acero inoxidable	2
3	Cilindro	Acero inoxidable	1
4	Junta	Goma	4
5	Terminillo hexagonal 306	Acero inoxidable	8

Nombre		Fecha	
Dibujado	David Cosin		
Comprobado			
Aprobado 1	Oscar Lopez	Titulo	
Aprobado 2	Alvaro Hernandez	SENSOR	
		kg	Peso
		Plano 01	
		Escala	Rev

SOLID EDGE ACADEMIC COPY