



# **INSTITUTO TECNOLÓGICO DE TUXTLA GUTIÉRREZ**

## **INGENIERÍA MECÁNICA**

**Proyecto de residencia:**

**Sistema recolector de energía cinética de autotransportes  
mediante el uso de un mecanismo de elementos piezoeléctricos.**

**Presenta:**

**TRUJILLO TORRES SERGIO IVAN**

**Asesor:**

**DR. ROBERTO CARLOS GARCÍA GÓMEZ**

**Revisores:**

**M.C. IGNACIO ARRIJOA CÁRDENAS**

**ING. JOSÉ MANUEL RASGADO BEZARES**

**TUXTLA GUTIÉRREZ, CHIAPAS; 13 DE DICIEMBRE DE 2013**

<b>ÍNDICE</b>	<b>PAG.</b>
1.- Introducción .....	4
2.- Planteamiento del problema .....	5
2.1.- Justificación .....	6
2.2.- Objetivo .....	7
2.3.- Objetivos específicos .....	7
2.4.- Caracterización del área de trabajo .....	8
2.4.1.- Antecedentes históricos .....	8
2.4.2.- Misión y visión .....	8
3.- Estudio del campo del arte .....	10
3.1.- Cosechamiento en un humano .....	10
3.2.- Piso generador de energía .....	11
3.3.- Energía Eléctrica Producida por Dispositivos Piezoeléctricos .....	12
4.- Propuesta a desarrollar .....	13
5.- Fundamento teórico .....	14
5.1.- Conceptos de diseño .....	14
5.1.1.- Proceso del diseño .....	15
5.1.2.- Factores del diseño .....	17
5.2.- Piezoelectricidad .....	18
5.2.1.- Efectos piezoeléctricos en materiales cerámicos .....	19
5.2.2.- Ecuaciones de piezoelectricidad .....	22
5.3.- Remaches .....	24
5.3.1.- Esfuerzos y resistencia en uniones remachadas .....	25
5.4.- Resortes .....	27
5.4.1.- Efecto de la curvatura .....	29

5.4.2.- Deflexión .....	29
5.4.3.- Carga por fatiga de resortes helicoidales en compresión .....	30
5.4.4.- Materiales para resortes .....	31
6.- Memoria de cálculo .....	33
6.1.- Bosquejo del mecanismo .....	34
6.2.- Cálculos .....	36
6.2.1.- Cálculos de voltaje teórico producido .....	36
6.2.2.- Cálculos de uniones remachadas .....	41
6.2.3.- Cálculos de resortes .....	43
6.3.- Dimensiones y modelado .....	54
7.- Análisis de resultados .....	60
7.1 Alcances .....	60
7.2.- Limitaciones .....	60
7.3.- Propuestas .....	61
8.- Conclusión .....	62
9.- Fuentes de información .....	63
10.- Anexos .....	64

A 3D CAD model of a kinetic energy harvester. It features a spherical mass on top of a vertical shaft, which is supported by a central column and two side springs. The entire assembly is mounted on a circular base plate. The text is overlaid in the center of the image.

SISTEMA RECOLECTOR DE  
ENERGÍA CINÉTICA DE  
AUTOTRANSPORTES  
MEDIANTE EL USO DE UN  
MECANISMO DE ELEMENTOS  
PIEZOELÉCTRICOS

## 1.- INTRODUCCIÓN.

La humanidad desde sus principios ha buscado como sacar provecho de la naturaleza para resolver los problemas en los que se enfrenta, y más hablando de cómo obtener energía de ella, por ejemplo la energía eólica es una de las más antiguas junto con la energía térmica, esta ha sido utilizada para mover grandes barcos impulsados por velas o echar a andar molinos de vientos, en el caso de la energía térmica ha sido de gran utilidad por que ha cubierto necesidades de abrigo, alimentación, iluminación y fabricación de herramientas; actualmente estos dos tipos de energía junto con la energía hidráulica se utilizan para generar energía eléctrica.

Desde que el hombre descubrió como obtener la energía eléctrica ha investigado diferentes formas de producirla, ya que actualmente nos encontramos en una era de grandes avances tecnológicos y científicos esta energía es de suma importancia para el funcionamiento de muchos de los aparatos que utilizamos habitualmente.

La manera de producir esta energía de manera ecológica ha ido progresando con los años pero desgraciadamente aun dependemos demasiado de los combustibles fósiles para obtenerla y eso ha ocasionado la contaminación del planeta, aunque en los últimos años se han venido haciendo investigaciones y desarrollando tecnologías no contaminantes para la producción de energía eléctrica, como ejemplos tenemos la utilización de la fuerza del viento( eólica), del calor del sol(solar), el movimiento del agua(hidráulica) y la de vibraciones(movimiento).

“En 1881 Pierre y Jacques Curie descubrieron al estudiar el cuarzo que si se sometía a cierta compresión estos producían chispas”<sup>1</sup>, después mediante la investigación determinaron que existen algunos cristales que tienen la capacidad de generar energía a partir de ser sometidos a tensiones mecánica, este fenómeno es llamado piezoelectricidad. La piezoelectricidad se genera cuando determinados cristales se encuentran bajo cargas de tensión o compresión, entonces los cristales sufren un cambio en su estructura creando una polarización en su masa, ocasionando una diferencia de potencial y respectivas cargas eléctricas en la superficie del cristal. Con esto se puede generar energía eléctrica de manera ecológica y rentable, se puede implementar en lugares de gran tránsito de personas como centro comerciales o discotecas, también en calles muy transitadas por autotransportes, solo utilizando la presión ejercida por la masa de cada elemento situado sobre los sensores piezoeléctricos.

---

<sup>1</sup> Martín Puppo, Martín Vázquez. *Ensayo sobre Sensores Piezoeléctricos*. Universidad de la República, Facultad de Ingeniería, 2012, p. 1. <sup>[1]</sup>

## 2.- PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.

Actualmente estamos en una era en que la energía eléctrica es parte fundamental de nuestra vida diaria, se han desarrollado varias tecnologías para la obtención de la electricidad, por ese motivo para establecer el planteamiento del problema surgen las siguientes interrogantes, la primera de ellas es ¿Cuál es la situación actual de la problemática? Las últimas décadas se ha venido popularizando la utilización de pilas o de batería como un medio de almacenamiento, pero una vez que termina su tiempo de vida nos deshacemos de ellas. Las pequeñas pilas y baterías usadas en relojes, cámaras fotográficas, controles remotos, radiograbadoras, teléfonos celulares y juguetes, tienen gran efecto contaminante, si se arrojan al ambiente.

Las consecuencias son importantes, por eso ¿Qué impacto ha tenido dicho problema? Actualmente no se conoce ningún estudio que evalúe el impacto al ambiente ocasionado por la utilización y manejo inadecuado de pilas y baterías en México; se sabe que varios componentes usados en su fabricación son tóxicos y por tanto la contaminación ambiental y los riesgos de afectar la salud y los ecosistemas dependen de la forma, lugar y volumen en que se ha dispuesto o tratado este tipo de residuos.

¿Qué relevancia ha tenido? Así como las pilas y baterías contaminan también existen otros medios de obtención de energía eléctrica que dañan el medio ambiente las denominadas energías no limpias, estos procesos de producción llevan en gran medida efectos dañinos a la naturaleza como por ejemplo la energía térmica que utiliza carbón y derivados del petróleo que lanzan grandes cantidades de vapores tóxicos al aire, también la energía nuclear que durante el proceso se contaminan grandes cantidades de agua y al final estos desechos son arrojados al medio ambiente.

¿Qué se pretende realizar para contrarrestar la problemática? Con este proyecto se pretende desarrollar una manera alternativa de obtener energía eléctrica pero de una manera limpia, que no se desechen contaminantes a la naturaleza, solo se utilizara la energía que llevan los automóviles cuando están en movimiento para que por medio de uno sensores se almacene la energía obtenida en una batería. Existen muchos lugares estratégicos donde se puede llevar a cabo la realización del presente proyecto, podemos mencionar lugares muy concurridos como por ejemplo los grandes estacionamientos de las plazas comerciales, ahí encontramos un gran flujo vehicular por lo que es un buen punto estratégico; también podrían ser las calles de la ciudad que por lo general están muy transitadas por vehículos ofreciendo así otro punto estratégico para seleccionar el área donde se instalara el proyecto.

## 2.1.- JUSTIFICACIÓN.

Se tomó la decisión de elegir este tema porque nos percatamos que actualmente es una idea poco desarrollada a nivel nacional, es algo innovador, en otros países como Japón esta tecnología ya ha sido implementada y ha tenido buena aceptación por parte de la comunidad, a continuación se exponen dos áreas donde impacta el proyecto.

### Impacto ambiental

La elaboración de mecanismo a base de elementos piezoeléctricos para generar energía eléctrica ofrece una alternativa que es limpia y amigable con el medio ambiente, ya que este no contaminaría, sería una energía limpia; otra ventaja sería que no puede ser agotada.

Actualmente dependemos en gran medida de los combustibles fósiles para producir energía eléctrica, esto trae como consecuencia la contaminación de nuestro planeta, la problemática está precisamente en utilizar energías no limpias; podríamos mencionar la energía nuclear, que produce desechos altamente tóxicos y si hay algún accidente en la planta contamina a gran escala, también está la energía termoeléctrica, la cual como decíamos es generada a base de combustibles como el petróleo o el gas natural.

### Impacto tecnológico

Con este proyecto el alcance de los beneficiados es muy amplio ya que puede ser implementado desde un pequeño pasillo hasta grandes calles muy transitadas, la persona o empresa que inviertan en un proyecto como este se beneficiaría en gran medida, como por ejemplo la principal estación de metro en Tokio que instaló estos dispositivos y ya generan su propia energía.

Este proyecto ayudaría a resolver o en tal caso disminuir la contaminación que sufre este planeta, es cierto que esto no será de la noche a la mañana pero esto implica que debemos tomar la iniciativa para dar ese cambio; con este proyecto de residencia trataría justamente de eso, de como alumno tomar la iniciativa con este proyecto utilizando energías limpias.

La innovación es algo muy importante, ya que nos permite sugerir ideas, recomendaciones o hipótesis en proyectos pasados, este proyecto sugiere una manera de implementar reductores de velocidad, o comúnmente llamados “topes”, con una doble finalidad; la de disminuir la velocidad de los autotransportes y la otra sería obtener energía eléctrica para su posterior utilización.

## **2.2.- OBJETIVO.**

Con este proyecto de residencia se tiene como objetivo realizar un diseño de un mecanismo que permita la recolección de energía cinética de autotransportes por medio de elementos piezoeléctricos, se utilizara el programa solidworks para el modelado de las piezas en base a los cálculos.

## **2.3.- OBJETIVOS ESPECÍFICOS.**

- Reconocimiento y recopilación de la información del área de trabajo.
- Verificación de diseños previos dentro del país así como la viabilidad de proyectos similares internacionales.
- Organización de la información obtenida.
- Análisis de las cargas a las que estará sometido el mecanismo bajo la presencia de un autotransporte.
- Cálculos de los voltajes producidos por los elementos piezoeléctricos.
- Realizar cálculos para dimensionar el sistema (diseño).
- Diseño de un sistema con resorte para el amortiguamiento del paso del vehículo.
- Modelado de los elementos que integran el mecanismo.



## **2.4- CARACTERIZACIÓN DEL AREA DE TRABAJO.**

### **2.4.1.- Antecedentes históricos.**

En la década de los 70's, se incorpora el estado de Chiapas al movimiento educativo nacional extensión educativa, por intervención del Gobierno del Estado de Chiapas ante la federación.

Esta gestión dio origen a la creación del Instituto Tecnológico Regional de Tuxtla Gutiérrez (ITRTG) hoy Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez (ITTG).

El día 23 de agosto de 1971 el Gobernador del Estado, Dr. Manuel Velasco Suárez, colocó la primera piedra de lo que muy pronto sería el Centro Educativo de nivel medio superior más importante de la entidad.

El día 22 de octubre de 1972, con una infraestructura de 2 edificios con 8 aulas, 2 laboratorios y un edificio para talleres abre sus puertas el Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez con las carreras de Técnico en Máquinas de Combustión Interna, Electricidad, Laboratorista Químico y Máquinas y Herramientas.

### **2.4.2.- Misión y visión.**

El Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez a 40 años de su fundación, comprometido con brindar servicios de Educación Superior Tecnológica de calidad para la comunidad en el Estado de Chiapas busca transformar y fortalecer el desarrollo integral de sus estudiantes con base en los principios de justicia social, equidad y transparencia.

El Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez tiene un compromiso social con la comunidad. Los logros de la Institución son producto del aprovechamiento de la capacidad instalada en aulas, talleres, laboratorios, centro de información y de cómputo, pero sobre todo de las capacidades del personal que atiende y hace posible la realización de los servicios institucionales.

Valores

- El ser humano
- El espíritu de servicio
- El liderazgo
- El trabajo en equipo
- La calidad
- El alto desempeño
- El respeto al medio ambiente

## Misión

“Formar de manera integral profesionistas de excelencia en el campo de la ciencia y la tecnología con actitud emprendedora, respeto al medio ambiente y apego a los valores éticos.”<sup>2</sup>

## Visión

“Ser una institución de excelencia en la educación superior tecnológica del sureste, comprometida con el desarrollo socioeconómico sustentable de la región”<sup>3</sup>.



<sup>2</sup> [www.ittuxtlagutierrez.edu.mx/](http://www.ittuxtlagutierrez.edu.mx/)

<sup>3</sup> [www.ittuxtlagutierrez.edu.mx/](http://www.ittuxtlagutierrez.edu.mx/)

### 3.- ESTUDIO DEL CAMPO DEL ARTE.

Los siguientes breves tratados se ejemplifican algunos proyectos similares donde se emplean elementos piezoeléctricos con la finalidad de generar electricidad, con esto podemos percatarnos de los alcances y las limitaciones que tienen los proyectos.

#### 3.1.- Cosechamiento en un humano. [2]

Producir energía en un paso, al momento que la persona camine por medio de láminas de metal unidas a un piezoeléctrico PVDF semiflexible bajo el talón.

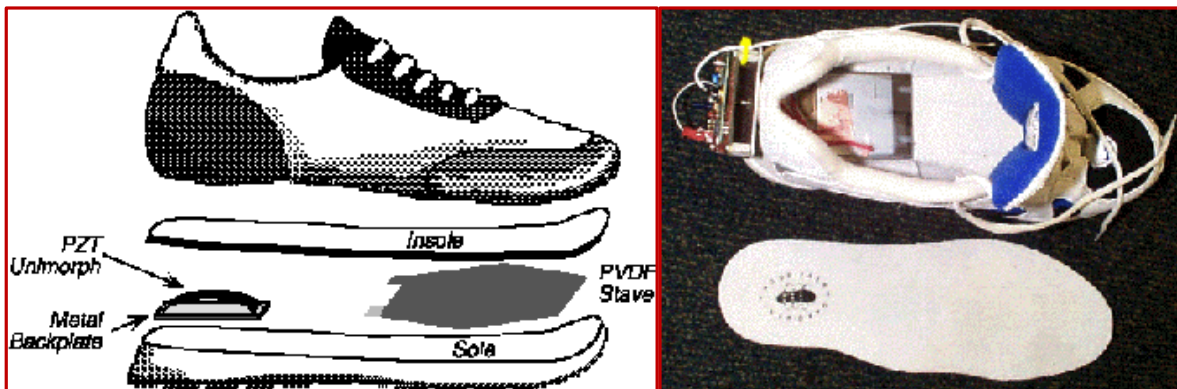


Ilustración 1: Implante de elementos piezoeléctricos en suelas de zapatos para recoger la energía al caminar.

En el movimiento del talón de una persona que camina, con un peso promedio de 68Kg, se puede producir una potencia de 67 watts.

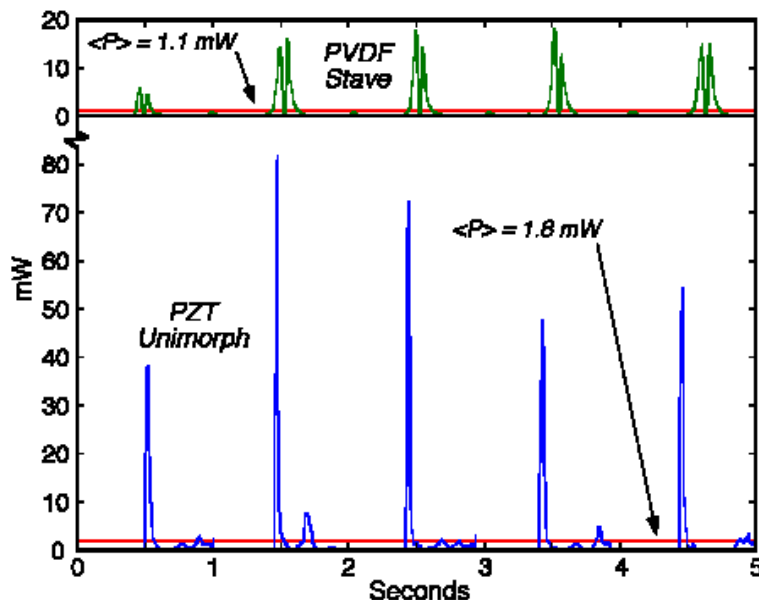


Ilustración 2: Genera picos de 20-80 mW de potencia (1-2 mW promedio) durante la caminata.

### 3.2.- Piso generador de energía. [3]

Cuando el metro de Tokio decidió invertir en fuentes de energía alternativa, sólo tenía que mirar a sus usuarios para determinar la fuente perfecta de energía. Recientemente, la compañía decidió actualizar su estación de Tokio con una nueva planta generadora de energía piezoeléctrica revolucionario. El sistema recogerá la energía cinética la que generara energía eléctrica para una multitud de puertas de entrada y sistemas de visualización.



Ilustración 3: Experimento de demostración en la estación de Tokio.

La East Japan Railway Company ha instalado un pavimento piezoeléctrico para generación de energía eléctrica en el paso de torniquetes y puertas de entrada al metro. La superficie total utilizada en el sistema abarca aproximadamente 25 metros cuadrados y se estima una generación de energía de alrededor de 1400 kW por día.

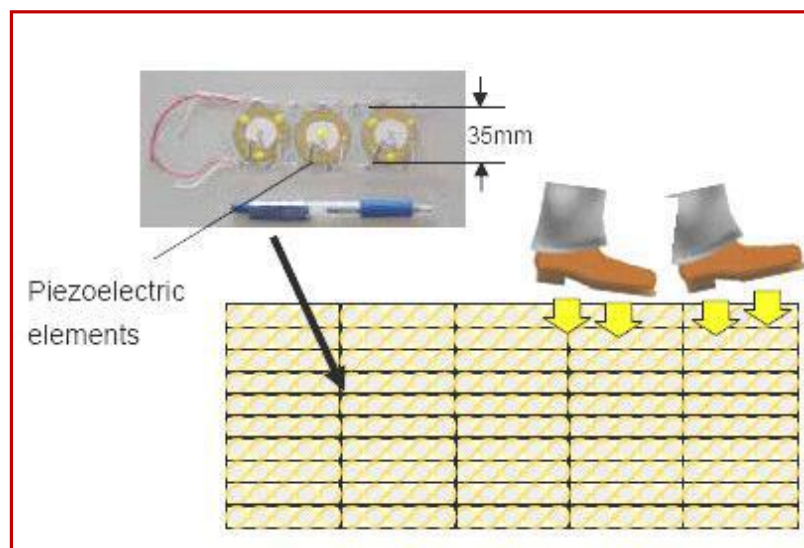


Ilustración 4: Mecanismo de la planta de generación de energía.

### 3.3.- Energía Eléctrica Producida por Dispositivos Piezoeléctricos. [4]

El proyecto fue hecho por alumnos de la Universidad Autónoma de Ciudad Juárez, motivados por que en la actualidad se están desarrollando cada vez más en el mundo dispositivos de datos inalámbricos, pequeños, de bajo consumo de potencia y de bajo coste, así como también el desecho de las batería comunes contaminantes.



Ilustración 5: Baterías contaminantes.

El objetivo del proyecto fue el de la implementación de un circuito de acondicionamiento de señal para cosechadores de energía basados en generadores piezoeléctricos.

Objetivos particulares:

- Estudio y caracterización de generadores piezoeléctricos.
- Diseño e implementación del circuito acondicionador para los generadores.

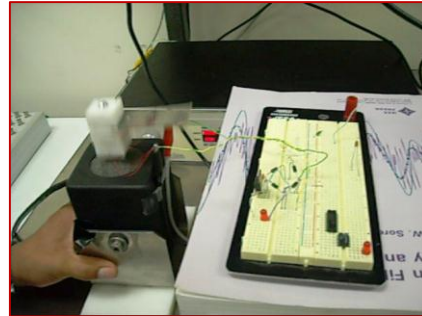


Ilustración 6: Encendido de (izquierda) MP3 y (derecha) LED.

Con este proyecto se logró:

- El encendido de un diodo emisor de luz (LED).
- Carga de un Supercapacitor en 10 min.
- Cargar una batería de 1/3 de AAA: Individual con 1.42V en 15 min., En serie con 2.12 V en 15 min., En paralelo 1.37V en 15 min.
- Encendido de un mp3 con 1.9V.



#### **4.- PROPUESTA A DESARROLLAR.**

Actualmente la humanidad utiliza los combustibles fósiles para la obtención de la energía eléctrica, y aunque en menor medida también se utilizan las energías renovables, por lo que la contaminación es evidente en estos días.

Aunque la tecnología ha ido avanzando a grandes pasos en cuanto a alternativas de generación de energía eléctrica, todavía queda mucho por indagar e investigar en estos temas. La intención de este proyecto de residencia es la de diseñar un mecanismo que funcione a base de resortes y que con la ayuda de los elementos piezoeléctricos se puede generar cierta cantidad de energía eléctrica.

El funcionamiento dependerá de los autotransportes, ya que es como será accionado el mecanismo, es decir, que gracias a la energía cinética que llevan todos los cuerpos en movimiento, que en este caso son los autotransportes, se podrá transformar dicha energía en la que necesitamos.

La propuesta es que dicho sistema recolector este sobre la pista asfáltica, dando la apariencia topes, y en el interior se encontrara el mecanismo y las conexiones de los elementos piezoeléctricos. Se realizaran los cálculos necesarios para determinar las dimensiones del sistema y la selección de los materiales.

Con la ayuda del software SolidWorks se realizara el modelado de las piezas que constituirán el mecanismo, ya que nos permitirá tener una vista previa del sistema en su totalidad.

Gracias el efecto de la piezoelectricidad, que se explicara más adelante, podemos llevar a cabo la generación de cierto voltaje, que dependerá del peso del vehículo y la frecuencia con que estos pases sobre el sistema. Por lo que sería conveniente el prototipo sea instalado en zonas de tránsito vehicular, en el caso de que este sea ensamblado.

## 5.- FUNDAMENTO TEÓRICO.

### 5.1.- Conceptos de diseño. <sup>[5]</sup>

El diseño está ligado a la concepción, construcción o implementación de objetos, sistemas o dispositivos que no existen aún, o que existiendo requieren modificaciones para cumplir con nuevos requerimientos. Implica la toma de decisiones frente a la incertidumbre causada por la falta de información o antecedentes.

Existen un sin número de definiciones de lo que es el diseño, sin embargo mencionaremos solamente algunas que consideramos importantes y que fueron dadas por diferentes autores. Podemos decir entonces que:

a).- El diseño es una actividad creativa que supone la consecución de algo nuevo y útil, sin existencia previa. (**Reswick**, 1965).

b).- El diseño es la solución óptima de un conjunto de verdaderas necesidades en un conjunto particular de circunstancias. (**Matchett**, 1968).

c).- El diseño consiste en simular lo que queremos construir (o hacer), antes de construirlo (o hacerlo), tantas veces como sea necesario para confiar en el resultado final. (**Booker**, 1964).

d).- El diseño técnico es la utilización de principios científicos, información técnica e imaginación en la definición de una estructura mecánica, máquina o sistema que realice funciones específicas con el máximo de economía y eficiencia. (**Fielden**, 1963).

Tomando como apoyo las definiciones anteriores podemos establecer el siguiente concepto:

El “**diseño mecánico**” es el proceso lógico que ordena y planea la actividad creativa que, utilizando principios científicos, información técnica e imaginación, define estructuras mecánicas, máquinas o sistemas para realizar funciones específicas con el máximo de economía y eficiencia.

#### **Filosofía del diseño**

El diseño es una disciplina común a muchos casos. En todos participa con características similares, cuya enumeración facilita su definición.

El diseño es acción, actividad, romper el equilibrio, ya que sin esto no se iniciaría el proceso de diseño.

### 5.1.1.- Proceso del diseño.

Las fases del diseño se refieren a las etapas que hay que tomar en cuenta en el desarrollo de cualquier diseño. De hecho nos muestran la metodología que debe seguirse a lo largo de todo el proceso. Lo anterior puede ser representado por la **figura (7)**.

#### *Reconocimiento de una necesidad.*

Generalmente el diseño comienza cuando nos damos cuenta de una necesidad y decidimos hacer algo al respecto. Una necesidad se identifica fácilmente después de que alguien la ha planteado.

#### *Definición del problema.*

Debe abarcar todas las condiciones para el objeto que se ha de diseñar. Tales condiciones o especificaciones son las cantidades de entrada y salida, las características y dimensiones que deberá ocupar el objeto y, todas las limitaciones a estas cantidades. Las especificaciones definen el costo, la cantidad de piezas a fabricar, la duración esperada, el intervalo o variedad de capacidades, la temperatura de trabajo y la confiabilidad.

#### *Síntesis.*

Este paso se refiere a la búsqueda de muchos procedimientos alternativos de diseños posibles, sin preocuparse de su valor o calidad. Este paso se conoce a veces como paso de ideas de invención, en el cual se genera en número mayor posible de soluciones creativas.

#### *Análisis y optimización.*

En esta etapa se requiere que se ideen o imaginen modelos abstractos del sistema que admitan alguna forma de análisis matemático. Tales modelos reciben el nombre de *modelos matemáticos*. Al crearlos se espera encontrar alguno que reproduzca lo mejor posible el sistema físico real.

#### *Evaluación.*

Esta fase es muy importante dentro del proceso total del diseño, pues es la demostración definitiva de que el diseño es acertado y, generalmente incluye pruebas con un prototipo en el laboratorio. En este punto es cuando se desea observar si el diseño satisface realmente las necesidades. Por ejemplo:

- ¿Es confiable?
- ¿Competirá con éxito contra productos semejantes?
- ¿Es fácil de mantener y ajustar?
- ¿Se obtendrán ganancias por su venta o uso?

#### *Presentación.*

La presentación del diseño a otras personas es el paso final y vital del diseño. Es indudable que muchos diseños importantes, inventos y trabajos creativos se han perdido en el tiempo, sencillamente porque los creadores se rehusaron o no fueron



capaces de explicar sus creaciones a otras personas. En esencia hay tres medios de comunicación que se pueden utilizar:

- a). Forma oral.
- b). Forma escrita.
- c). Representación gráfica.

Estas tres formas de comunicación, son habilidades o conocimientos que puede adquirir o desarrollar una persona inteligente. La habilidad o destreza se adquiere solo por la práctica. Por lo general las comunicaciones habladas o escritas requieren de estudio para comprenderlas, pero las imágenes pueden comprenderse con facilidad y deben usarse libremente.

El ingeniero competente no debe temer a la posibilidad de no tener éxito en una presentación. De hecho es de esperar que tenga fracasos ocasionales, porque generalmente, se encuentra con críticas negativas cada vez que surge una idea creativa. De cada fracaso puede aprender muchísimo y las mayores ganancias las obtienen quienes no rehúyen al riesgo de la derrota. A fin de cuentas el verdadero fracaso será abstenerse en absoluto de presentar ideas.

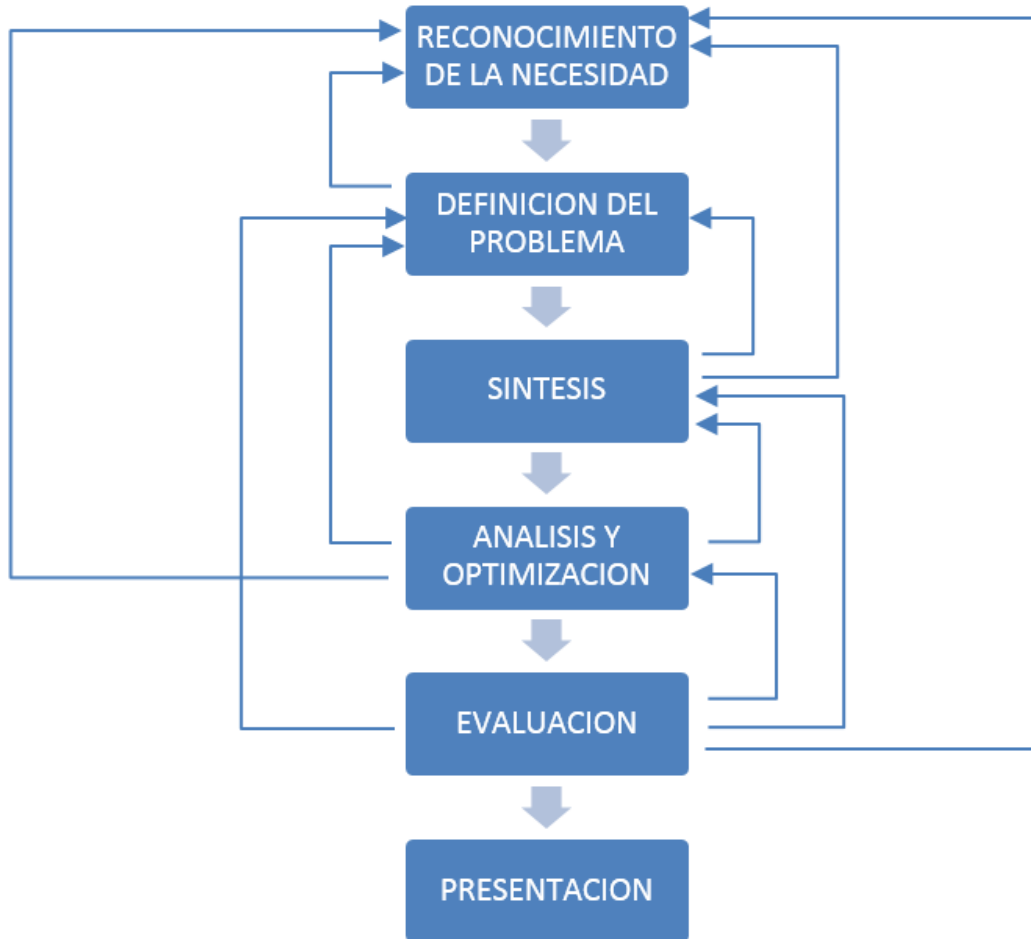


Ilustración 7: Etapas del diseño.

### 5.1.2.- Factores de diseño.

La expresión factor de diseño significa alguna característica o consideración que influye en el diseño de un elemento, o quizá en todo el sistema. Por lo general se tienen que tomar en cuenta varios de esos factores para un diseño determinado. En ocasiones algunos de esos factores serán críticos y, si se satisfacen sus condiciones no será necesario considerar los demás. A continuación se indican algunos de los factores que hay que tomar en cuenta:

- |                           |                       |
|---------------------------|-----------------------|
| 1.- Resistencia mecánica. | 7.- Vida útil.        |
| 2.- Confiabilidad.        | 8.- Forma.            |
| 3.- Rendimiento.          | 9.- Acabado exterior. |
| 4.- Cantidad de material. | 10.- Seguridad.       |
| 5.- Mantenimiento.        | 11.- Peso.            |
| 6.- Costo.                | 12.- Ruido.           |

Algunos de estos factores se refieren directamente a las dimensiones, al tipo de material, al proceso de fabricación, o bien a la unión o ensamble de los elementos del sistema. Otros se relacionan con la configuración total del sistema. Con el fin de tomar en cuenta en el diseño los factores anteriores, se emplea lo que se conoce como “*factor de seguridad*”.

Para materiales dúctiles en los cuales se considera que el esfuerzo último a la tensión y compresión tienen el mismo valor, se tiene:

$$n_{u(diseño)} = \frac{\text{Esfuerzo(último)}}{\text{Esfuerzo(trabajo)}} = \frac{\text{Resistencia(ultima)}}{\text{Esfuerrzo(trabajo)}}$$
$$n_{y(diseño)} = \frac{\text{Esfuerzo(cedencia)}}{\text{Esfuerzo(trabajo)}} = \frac{\text{Resistencia(fleuncia)}}{\text{Esfuerrzo(trabajo)}}$$

Resulta aparente que la relación del factor de seguridad apropiada es empírica y depende mucho de la experiencia que se tenga. Cuando un dispositivo tiene mucho tiempo de uso, los factores referentes a su comportamiento son confiables. De hecho se puede depender de tales datos aunque hayan tenido modificaciones en el diseño.

**Joseph P. Vidosic** considera razonables los siguientes factores de seguridad, los cuales están basados en la resistencia a la cedencia:

- 1.-  $n_s = 1.25 - 1.5$ , para materiales muy confiables usados bajo condiciones controladas y, sujetos a carga y esfuerzo que puedan determinarse con exactitud.
- 2.-  $n_s = 1.5 - 2$ , para materiales con características perfectamente conocidas con condiciones ambientales fijas y, sujetos a cargas y esfuerzos que puedan determinarse con facilidad.
- 3.-  $n_s = 2 - 2.5$ , para materiales que trabajan en condiciones normales y sujetos a carga y esfuerzo que puedan calcularse

- 4.-  $n_s = 2.5 - 3$ , para materiales poco experimentados o para materiales frágiles en condiciones normales de medio ambiente, carga y esfuerzo.
- 5.-  $n_s = 3 - 4$ , para materiales no experimentados en condiciones normales de medio ambiente, carga y esfuerzo.
- 6.-  $n_s = 2 - 4$ , para fuerzas de impacto, donde deberá incluirse un factor de impacto.
- 7.-  $n_s = 3 - 8$ , para materiales frágiles, considerando a la resistencia última como la máxima teórica.

## 5.2.- Piezoelectricidad. [6]

Piezoelectricidad es el término general que describe la propiedad que exhiben algunos cristales (redes cristalinas) para llegar a polarizarse eléctricamente cuando se les aplica una tensión, bien compresiva, bien extensiva. El cuarzo es un buen ejemplo de material piezoeléctrico. Si el esfuerzo de compresión se aplica al cristal, éste desarrolla un momento eléctrico proporcional a la fuerza aplicada (Efecto piezoeléctrico directo). Opuestamente, si el cristal se introduce en un campo eléctrico, la forma del cristal cambia levemente (Efecto piezoeléctrico opuesto), como consecuencia termodinámica del esfuerzo directo.

La piezoelectricidad se da también en las redes cristalinas metálicas, por ejemplo en la Turmalina<sup>4</sup> y las sales de Rochelle<sup>5</sup>. Éstos ya tienen una polarización espontánea de por sí, y el efecto piezoeléctrico nos muestra cambios en esta polarización.

Además de los materiales expuestos antes, existen un importante grupo de materiales piezoeléctricos, las llamadas cerámicas piezoeléctricas, por ejemplo el PXE (policristal de la forma  $A B O_3$ ; donde A es un metal divalente pesado como el Pb; B es un metal tetravalente ligero como el Zr o el Ti; y oxígeno), con estructura tetragonal o romboédrica.

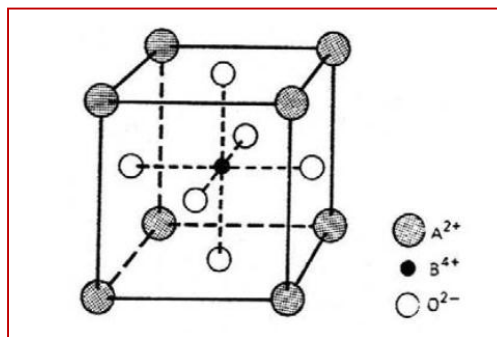


Ilustración 8: Estructura del PXE.

El PXE puede ser amoldado en forma y tamaño, y además posee las propiedades de dureza, mecánicamente inerte y no le afectan los cambios climáticos.

<sup>4</sup> Turmalina: silicato completo de boro y aluminio, con magnesio, hierro u otros materiales alcalinos y flúor en pequeñas cantidades, cristalizando en un sistema trigonal.

<sup>5</sup> Sales de Rochelle: Tartrato doble de sodio y potasio  $KNaC_4H_4O_6 + 4H_2O$

### 5.2.1.- Efectos piezoeléctricos en materiales cerámicos.

La tabla N° 1 analiza las propiedades de algunos de los materiales piezoeléctricos de uso más común. Históricamente el cuarzo fue el primer piezoeléctrico usado en dispositivos dada la existencia en la naturaleza de grandes monocristales lo cual hace de este material relativamente barato. Presenta como gran ventaja la poca variación con la temperatura de sus coeficientes piezoeléctricos.

En 1970 comenzó el desarrollo de polímeros piezoeléctricos, tales como el PVDF. En estos polímeros el fenómeno de la piezoelectricidad está asociado a fases cristalinas, donde las cadenas poliméricas están ordenadas presentando un alto momento dipolar, rodeadas de regiones amorfas. La importancia práctica de estos materiales reside en el hecho de su bajo costo de producción en láminas grandes.

Tabla 1: Materiales piezoeléctricos y propiedades.

MATERIAL	FORMULA	COEFICIENTE d(C/N)
Cuarzo	SiO <sub>2</sub>	d <sub>11</sub> =-2.25x10 <sup>-11</sup> d <sub>14</sub> =0.85x10 <sup>-12</sup>
ADP	NH <sub>4</sub> H <sub>2</sub> PO <sub>4</sub>	d <sub>36</sub> =5x10 <sup>-11</sup>
KDP	KH <sub>2</sub> PO <sub>4</sub>	d <sub>36</sub> =5x10 <sup>-11</sup>
Niobato de litio	LiNbO <sub>3</sub>	d <sub>33</sub> =1.6x10 <sup>-11</sup> d <sub>13</sub> =7.4x10 <sup>-12</sup>
PZT	PbTi <sub>0.48</sub> Zr <sub>0.52</sub> O <sub>3</sub>	d <sub>33</sub> =2.23x10 <sup>-10</sup>
PVDF	(CH <sub>2</sub> -CF <sub>2</sub> ) <sub>n</sub>	d <sub>32</sub> =3x10 <sup>-12</sup> d <sub>13</sub> =1.82x10 <sup>-11</sup>

En un cristal metálico, cada celdilla de la red cristalina espontáneamente está polarizada a lo largo de las distintas direcciones permitidas. Esta polarización desaparece a la temperatura crítica (Punto de Curie), por encima de la cual el cristal llega a ser paraeléctrico.

Si un cristal se solidifica alrededor de la temperatura de Curie en presencia de un campo eléctrico externo, los dipolos tienden a alinearse en la dirección paralela al campo externo. Si este cristal es comprimido la red cristalina tiende a distorsionarse, introduciendo cambios en el momento dipolar del cristal (efecto piezoeléctrico). El rango de tensión aplicado será específico al material y el cambio en el momento dipolar es lineal y reversible.

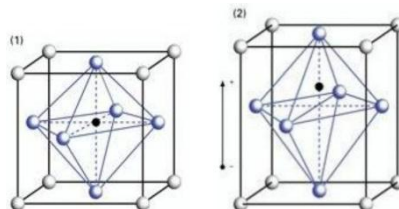


Ilustración 9: Celda PZT en estado simétrico (arriba de la temperatura de Curie) y no centro-simétrica (por debajo de la temperatura de Curie).

Un mismo PXE cerámico puede considerarse como una masa de diminutos cristales orientados aleatoriamente. Después de ser calentado el material se vuelve isotrópico y no exhibirá efecto piezoeléctrico con una orientación aleatoria. Pero la cerámica puede hacerse piezoeléctrica en una determinada dirección con un tratamiento de polarización exponiéndola a un fuerte campo eléctrico. Cuando quitamos el campo eléctrico los dipolos permanecen alineados y localizados, dando al material una polarización remanente, una deformación permanente y una piezoelectricidad permanente. El tratamiento final de polarización se hace en el momento final de la comercialización del PXE.

El PXE tiene dos electrodos metálicos situados en las caras opuestas de su eje de polarización, al aplicarle una tensión a través de ellos al PXE, el cuerpo se deforma en la dirección del eje de polarización. La orientación al azar de los cristales y el hecho de que sólo se permita la polarización en una dirección hace que no sea posible la alineación dipolar con el campo. Sin embargo existe un grado razonable de orientación en varias direcciones permitidas en el cristal.

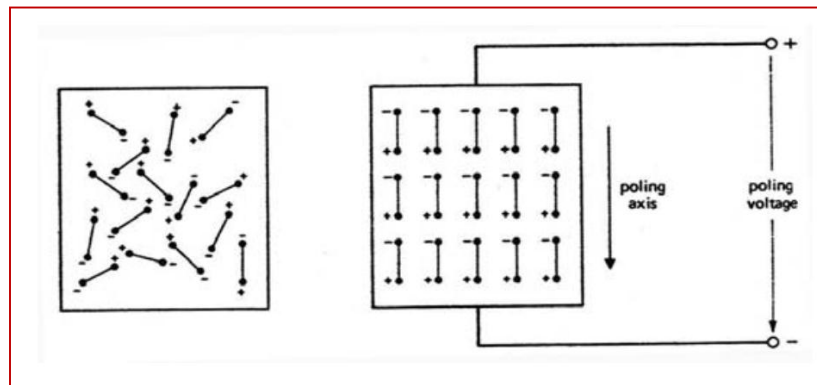


Ilustración 10: Izquierda: PXE en reposo; derecha: PXE bajo tensión.

En la figura 10 vemos un cilindro de cerámica PXE en las condiciones de reposo. Si aplicamos una fuerza extensora o una compresiva, el resultado será una variación en el momento dipolar, provocado que aparezca una tensión entre los electrodos. Si el cilindro se comprime la tensión tendrá la misma polaridad que la fuente. Si el cilindro se estira la tensión sobre los electrodos tendrá polaridad opuesta a la corriente (sentido real de los electrones). Estos son ejemplos de la acción generadora, donde transformamos una energía mecánica en energía eléctrica. Sería el ejemplo de los micrófonos, mecheros.

Si una tensión de polaridad inversa se aplica a los electrodos, el cilindro se acortará. Si la tensión aplicada es de la misma polaridad el cilindro se acortará. Finalmente si aplicamos una tensión alterna el cilindro se encogerá y se alargará con la misma frecuencia que la de la tensión aplicada. Este es el principio de generador, donde transformamos la energía eléctrica en mecánica.

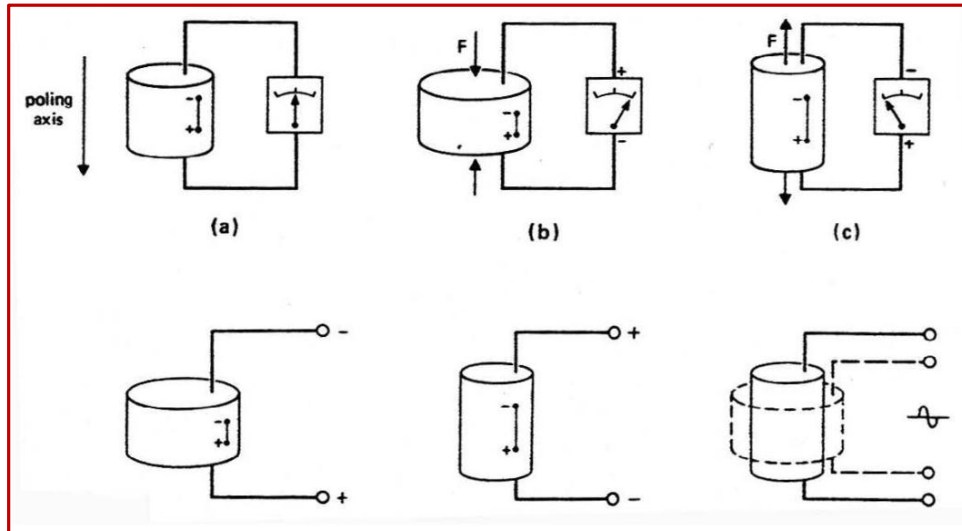


Ilustración 11: Variación del voltaje a esfuerzos de tensión y compresión.

La figura muestra como un generador libre de tensión de 20mm, de cerámica PXE varía al aplicarle un esfuerzo de compresión. La gráfica muestra como la tensión es directamente proporcional hasta 50000Kpa cuya tensión generada será de 25 Kv.

La máxima elongación piezoeléctrica inducida ( $\Delta l/l$ ), en un PXE estará en torno a  $1,5 \times 10^{-4}$  (para un campo de 450v/mm). En un cilindro de 20mm se podrá conseguir una deformación de  $3,3 \mu\text{m}$ .

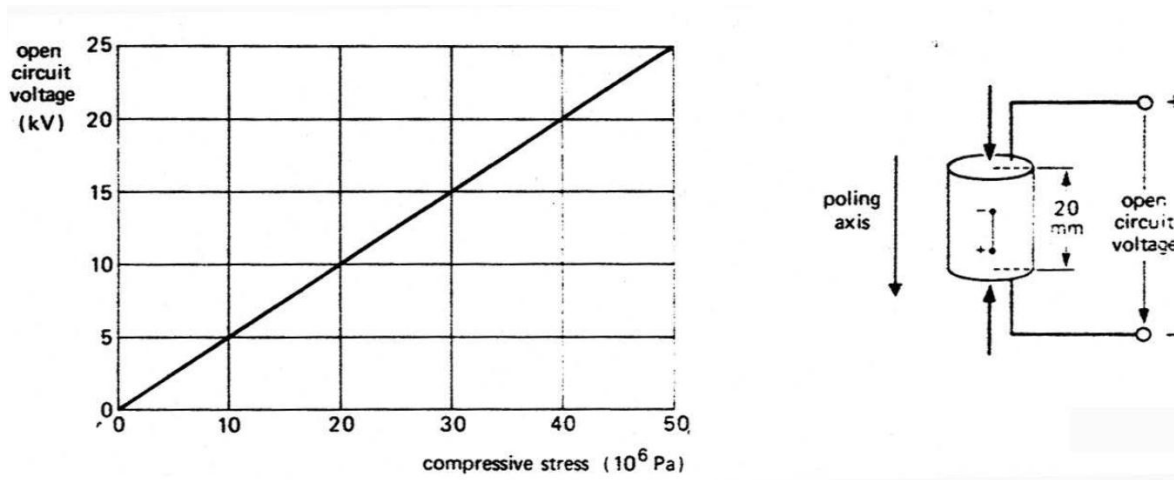


Ilustración 12: Gráfica que relación el voltaje con el esfuerzo de compresión.

El comportamiento dinámico del cilindro será diferente, a la frecuencia de resonancia mecánica, la amplitud inducida por el campo eléctrico alterno es mayor que el desplazamiento en condiciones estáticas.

Para no tener problemas de depolarización hemos de tener en cuenta:

- La temperatura del material debe estar por debajo de la temperatura de Curie.
- La cerámica no debe estar expuesta a campos alternos eléctricos fuertes opuestos al eje de polarización.
- Los esfuerzos extensivos y compresivos no deben exceder los límites permitidos.

### 5.2.2.- Ecuaciones de piezoelectricidad.

#### Efecto piezoelectrico directo.

El dipolo eléctrico medio (P) desarrollado por una tensión extensiva (T) paralela a su eje de polarización será:

$$P = dT \quad \text{Donde } d = \text{constante de voltaje piezoelectrica}$$

En función del campo eléctrico (E) y el desplazamiento eléctrico

$$P = D - \epsilon^T E \quad \text{Donde } \epsilon = \text{permitividad}$$

Relacionando ambas expresiones obtenemos:

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

Con g = constante de carga piezoelectrica

#### *Efecto piezoelectrico inverso.*

Ante la ausencia de tensiones mecánicas, el alargamiento medio experimentado por la cerámica piezoelectrica, cuando está sujeto a un campo eléctrico externo viene dado por:

$$S = dE \quad \text{Donde } d = \text{constante piezoelectrica a presión CTE}$$

$$S = gD \quad g = \frac{D}{\epsilon^T}, \text{ constante de carga piezoelectrica}$$

El alargamiento experimentado en un medio elástico sujeto a una tensión, sigue la ley de Hooke

$$S = sT \quad T = \text{fuerza, y } s = \text{compilación del medio}$$

Generalmente sin embargo, la respuesta de una tensión piezoeléctrica media será una compleja interacción entre las dos expresiones.

Una buena aproximación será:

$$S = s^E T + dE$$

Donde  $s^E$  Y  $s^D$  son específicas para un campo eléctrico CTE

$$S = s^D T + gD$$

Factor de acoplamiento en la expresión anterior  $s^E$  y  $s^D$  se relacionan de la siguiente forma:

$$s^D = (1 - K^2)s^E \quad \text{Con } K = \frac{d^2}{s^E \epsilon^T}$$

De esta forma K es una cantidad cuantificable, pero a frecuencias por debajo de la frecuencia de resonancia de un material cerámico K es una magnitud física:

$$K^2 = \frac{\text{energía convertida}}{\text{energía utilizada}}$$

Un estudio de la fórmula mostrada para ambas conversiones eléctrica en mecánica y mecánica en eléctrica nos revela que el 50% de la energía aportada puede ser transformada a bajas frecuencias, porque el factor de acoplamiento suele ser bajo. Sin embargo un alto  $K^2$  deseable para una eficiente transducción no debe ser considerado como eficiencia.



### 5.3.- Remaches. [7]

La mayoría de piezas que pueden ser mantenidas directamente unidas por medio de pernos, también pueden serlo por medio de remaches, pero naturalmente éstos no se utilizan a no ser que se prevea que las piezas no han de ser desunidas o únicamente en muy raras ocasiones. Lo mismo que para los elementos roscados, hay muchos estilos y tipos de roblones.

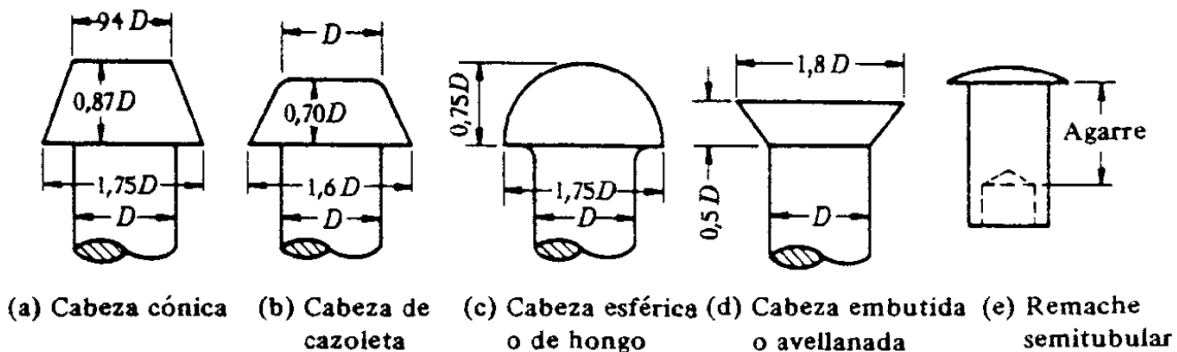



Ilustración 13: Remaches con algunas proporciones aproximadas.

Las cabezas representadas en las figuras 13(a-e) son de estilos «regulares»; estos remaches se insertan en los agujeros y luego se forma la cabeza a máquina en los extremos opuestos (martillo remachador o alta presión). El agrandamiento de una parte del agujero para la cabeza avellanada puede debilitar excesivamente la pieza unida; por ello este tipo de cabeza se emplea sólo cuando se desea enrasar una superficie, o ponerla casi al ras.

El remache semitubular de la figura 13e, dibujado aumentado, es un ejemplo de tamaños pequeños utilizados para material delgado, como chapa de aluminio. Hay numerosos estilos patentados que pueden ser aplicados y que únicamente se les debe formar cabeza en un lado de la unión.

El material de los remaches para construcción ordinaria de acero debe ser típicamente un acero suave o blando, como el 1010, pero también pueden emplearse cobre, latón, aluminio, titanio y otros materiales por alguna razón determinada. A causa de la posible acción galvánica, hay que ser precavido cuando se emplean diferentes materiales en contacto. El acero del Código de calderas ASME debe tener un valor mínimo  $S_u = 3867 \text{ kg/cm}^2$  (o bien 55 ksi); el esfuerzo de cálculo para cizalladura es  $773 \text{ kg/cm}^2$  (o bien 11 ksi). Las mínimas resistencias para remaches serán algo menores que los valores dados en la tabla 2. La figura 14 proporciona alguna información sobre resistencia a la fatiga para uniones solapadas, información que es aplicable tanto a los remaches como a los pernos.

Tabla 2: Valores de K<sub>t</sub> mínimo.



CLASE DE CHAVETERO	RECOCIDO		ENDURECIDO	
	Flección	Torsión	Flección	Torsión
Perfil	1,6	1,3	2,0	1,6
De patín	1,3	1,3	1,6	1,6

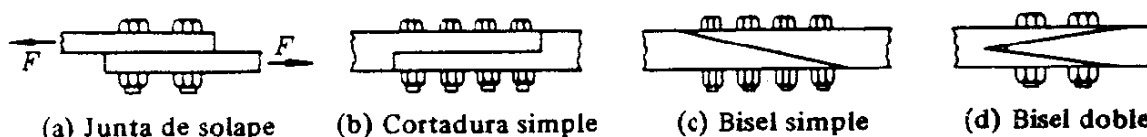


Ilustración 14: Uniones solapadas.

Fig. 14 Aumento de la resistencia a la fatiga mediante el diseño. La carga sobre (b), (e) y (d) varió de 752 a 1497 kg/cm<sup>2</sup> (10,7 a 21,3 kips); material, aleación de aluminio 7075-T6. Obsérvese que todas las superficies bajo presión pueden tener corrosión por ludimiento. El mecanizado en forma cónica o biselada es relativamente más caro. (a) Sin valores comparativos. (b) Falló a 42000 ciclos. (e) Falló a 210800 ciclos. (d) Falló a 26 914000 ciclos.

### 5.3.1.- Esfuerzos y resistencias en uniones remachadas. [8]

*Resistencia de una unión simple a solape.*

Las uniones remachadas se analizan como casos de esfuerzo uniforme en los que se verifica  $P = \sigma A$  o  $P = \tau A$ . La aplicación de éstas ecuaciones a los tipos fundamentales de ruptura de la unión se comprende fácilmente observando lo que pasa en una unión a traslape de una sola fila de remaches.

*Falla por cortante del remache.*

La carga de ruptura por cortante está dada por:

$$P_s = A_s \tau = \frac{\pi d^2}{4} \tau$$

en donde

d= diámetro de cálculo del remache (diámetro del orificio).

$\tau$ = esfuerzo de ruptura por cortante en el remache.

Lo anterior se puede observar en siguiente figura:

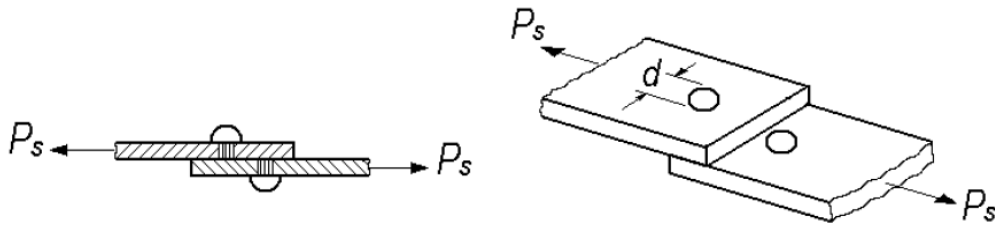


Ilustración 15: Falla por corte de remache.

*Falla por tensión en las placas que se unen.*

La carga por tensión en las placas se determina por:

$$P_t = A_t \sigma_t = (L - d)t \sigma_t$$

en donde

$t$  = espesor de la placa

$L$  = anchura de la placa

$D$  = diámetro del agujero.

$\sigma_t$  = esfuerzo de ruptura por tensión en la placa.

Lo anterior se puede observar en la siguiente figura:

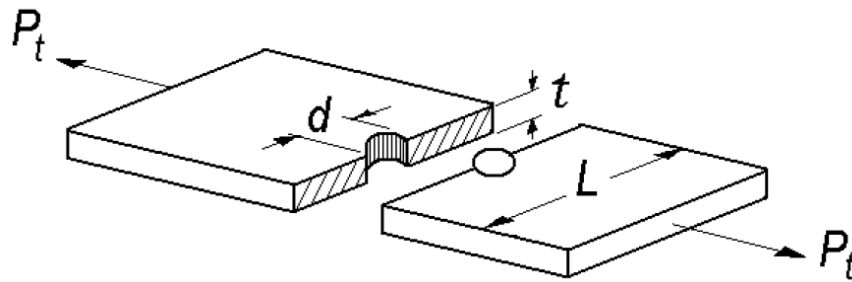


Ilustración 16: Falla por tensión en las placas.

*Falla por presión de contacto excesiva.*

La carga de contacto se expresa por:

$$P_b = A_b \sigma_b = (td) \sigma_b$$

en donde

$t$  = espesor de la placa más delgada.

$d$  = diámetro del remache.

$\sigma_b$  = esfuerzo de ruptura por contacto en el material.

Lo anterior se puede observar en la siguiente figura:

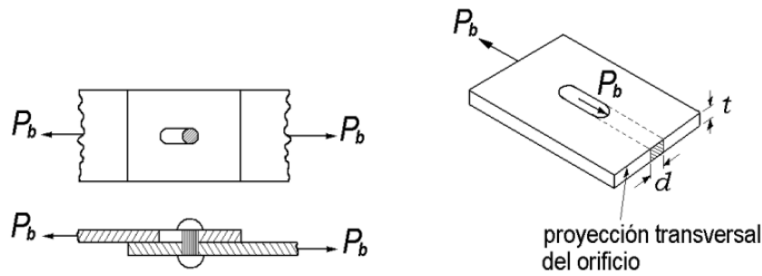


Ilustración 17: Falla por presión de contacto excesiva.

#### 5.4.- Resortes.

Los resortes son elementos flexibles que se utilizan en las máquinas con el objeto de ejercer fuerzas, proporcionar flexibilidad y almacenar o absorber energía.

Los resortes se clasifican de manera general en:

- a).- Helicoidales.
- b).- Planos.
- c).- Formas especiales.

Los helicoidales incluyen los resortes de sección circular o cuadrada, los cuales se fabrican para resistir cargas de tensión, compresión o torsión.

Dentro de los resortes planos se tienen los tipos en voladizo y elípticos.

Algunas formas especiales son usadas en maquinarias de reloj, y los cónicos en forma de rondana denominados arandelas o muelles de *Belleville*.

#### Resortes helicoidales de compresión.

La figura siguiente muestra un resorte helicoidal de compresión hecho de alambre redondo sometido a una carga axial  $F$ .

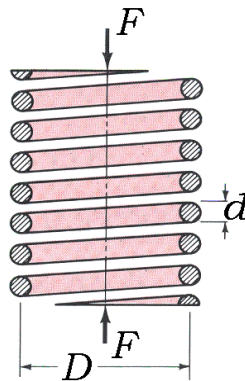


Ilustración 18: Resorte helicoidal con carga axial.

Si seccionamos el resorte anterior se observa lo siguiente:

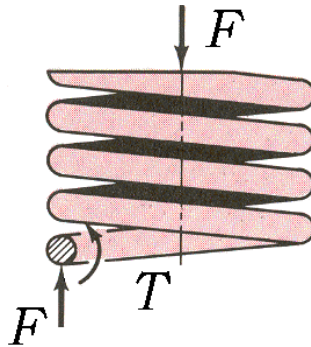


Ilustración 19: Diagrama de cuerpo libre del resorte helicoidal.

Podemos observar dos tipos de esfuerzos cortantes:

a).- Por carga:  $\tau_1 = \frac{F}{A} = \frac{4F}{\pi d^2}$

b).- Por torsión:  $\tau_2 = \frac{Tr}{J} = \frac{8FD}{\pi d^3}$

El esfuerzo cortante máximo es la suma de los esfuerzos cortantes anteriores:

$$\tau = \frac{8FD}{\pi d^3} + \frac{4F}{\pi d^2} \text{ ----- ec. 1.}$$

Si introducimos el término “índice del resorte”  $C = D/d$ , y substituyéndolo en la ecuación (1.) se obtiene lo siguiente:

$$\tau = \frac{8FD}{\pi d^3} \left(1 + \frac{d}{2D}\right) = \frac{8FD}{\pi d^3} \left(1 + \frac{1}{2C}\right) \therefore \tau = K_s \frac{8FD}{\pi d^3} \text{ ----- ec.2.}$$

$$K_s = 1 + \frac{1}{2C}$$

$K_s$  = Factor de corrección de esfuerzo cortante (solo se utiliza para condiciones estáticas).

En la mayoría de los casos  $C$  varía e 6 a 12. La ecuación (2.) es muy general y se aplica tanto para cargas estáticas como dinámicas.

### 5.4.1.- Efecto de la curvatura.

La curvatura del alambre intensifica el esfuerzo en la parte interna del resorte, pero lo reduce ligeramente en el exterior.

Tomando en cuenta el efecto de la curvatura, la ecuación (2.) se reemplaza por la expresión

$$\tau_{m\acute{a}x} = K_B \frac{8FD}{\pi d^3} \text{ ----- ec. 3.}$$

$$K_B = \frac{4C+2}{4C-3}$$

(“Factor de Bergstrasser”)

La ecuación (3.) se deberá usar para carga cíclica (esfuerzos por fatiga).

### 5.4.2.- Deflexión.

La relación fuerza deformación en un resorte helicoidal se puede obtener a partir del teorema de *Castigliano* el cual nos dice que: la deflexión en un resorte es igual con la derivada parcial de la energía de deformación con respecto a la fuerza aplicada.

Si la energía de deformación es:  $U = \frac{T^2L}{2GJ} + \frac{FL}{2AG}$ , en donde  $T = FD/2$ ,  $L = \pi DN$ ,  
 $J = \frac{\pi d^4}{32}$ , y  $A = \frac{\pi d^2}{4}$ ; por lo que:  $U = \frac{4F^2D^3N}{d^4G} + \frac{2F^2DN}{d^2G}$

Aplicando el teorema de *Castigliano* se tiene:  $\delta = \frac{\partial U}{\partial F} = \frac{8FD^3N}{d^4G} + \frac{4FDN}{d^2G}$  ----- ec. 4.

en donde  $N = N_a$  = número de espiras activas.

Puesto que  $C = D/d$ , la ecuación (4.) puede ordenarse de tal forma que:

$$\delta = \frac{8FD^3N_a}{d^4G} \left(1 + \frac{1}{2C^2}\right) = \frac{8FD^3N_a}{d^4G} \left(1 + \frac{0.5}{C^2}\right)$$

La constante del resorte es  $k = F/\delta$ , por lo que:

$$k = \frac{d^4G}{8D^3N_a \left(1 + \frac{0.5}{C^2}\right)} = \frac{Gd}{8C^3N_a \left(1 + \frac{0.5}{C^2}\right)}$$

### 5.4.3.- Carga por fatiga de resortes helicoidales en compresión.

Los resortes están sometidos casi siempre a cargas por fatiga. En muchos casos el número de ciclos de vida que se requiere debe ser pequeño, por ejemplo en los interruptores que es de algunos miles solamente. Sin embargo resortes como los de las válvulas de los motores están sometidos a millones de ciclos de operación sin falla, por lo que deben diseñarse para una vida infinita.

Para mejorar la resistencia a la fatiga de resortes cargados dinámicamente suele usarse el granallado. Este procedimiento puede incrementar en 20% o más la resistencia a la fatiga torsional.

El *granallado* es el trabajo en la superficie del material para causar esfuerzos residuales de compresión que refuerzan la superficie.

Se ha demostrado que la resistencia a la fatiga en los resortes para una vida infinita es:

Resortes sin granallar:  $S_{se} = k_a k_b k_c S'_e = 47.3 \text{ kpsi} (326 \text{ MPa})$

Resortes granallados:  $S_{se} = k_a k_b k_c S'_e = 70 \text{ kpsi} (483 \text{ MPa})$

En la elaboración del diagrama de Goodman o el diagrama  $S-N$ , es necesaria la resistencia máxima por cortante  $S_{su}$ . Para resortes de acero se tiene que:

$$S_{su} = 0.67 S_{ut}$$

Criterio de Goodman:  $\frac{\tau_a}{S_{se}} + \frac{\tau_m}{S_{su}} = \frac{1}{n_s} \therefore$

$$n_s = \frac{S_{se} S_{su}}{\tau_a S_{su} + \tau_m S_{se}}$$

Las fuerzas alternante y media se expresan como sigue:

$$F_a = \frac{F_{\max} - F_{\min}}{2}$$

$$F_m = \frac{F_{\max} + F_{\min}}{2}$$

$$\tau_a = K_B \frac{8F_a D}{\pi d^3}$$

$$\tau_m = K_B \frac{8F_m D}{\pi d^3}$$

en donde  $F_{m\acute{a}x}$  = fuerza máxima  
 $F_{m\acute{i}n}$  = fuerza mínima  
 $F_a$  = fuerza alternante  
 $F_m$  = fuerza media  
 $F_i$  = fuerza inicial o precarga  
 $\tau_a$  = esfuerzo alternante  
 $\tau_m$  = esfuerzo medio

Para resortes el factor de seguridad contra el *límite de durabilidad* por torsión es:

$$n_s = \frac{S_{se}}{\tau_a}$$

#### 5.4.4.- Materiales para resortes.

Los más comunes son **aceros de medio y alto carbono y de aleación** (laminados o estirados en frío o en caliente), también se utilizan aceros inoxidable, latón, bronce, cobre, El alambre más usado es el redondo.

**Aceros comunes:** ASTM A227 o SAE 1066 (estirado en frío), ASTM A228 o SAE 1085 (alambre de piano), ASTM A229 o SAE 1065 (alambre revenido al aceite), ASTM A230 o SAE 1070 (alambre revenido en aceite), ASTM A232 o SAE 6150 (Cromo vanadio)



Tabla 3: Aceros duros, aceros aleados y aceros inoxidables para resortes.

Material	Designaciones	Descripción
Alambre estirado en frío (estirado duro) (0.60 - 0.70 C)	UNS G10660 AISI/SAE 1066 ASTM A227-47	Es el acero de resorte de uso general de <b>menor costo</b> . Se usa cuando la exactitud, la deformación y la duración no son muy importantes (no adecuado para cargas variables o de impacto). Diámetros de 0.8 a 12 mm <sup>[3]</sup> (o 0.8 a 16 mm <sup>[1]</sup> ). Rango de temperaturas 0 a 120 °C.
Alambre revenido en aceite (0.60 - 0.70 C)	UNS G10650 AISI/SAE 1065 ASTM A229-41	Mayor costo que el del SAE 1066 pero menor que el del SAE 1085. No es adecuado para cargas variables o de impacto. Diámetros de 3 a 12 mm <sup>[3]</sup> , aunque es posible obtener otros tamaños (0.5 a 16 mm <sup>[1]</sup> ). Rango de temperaturas 0 a 180 °C.
Alambre para cuerda musical (0.80 - 0.95 C)	UNS G10850 AISI/SAE 1085 ASTM A228-51	Es el mejor, más resistente a la tracción, más resistente a la fatiga, más tenaz, y más utilizado para resortes pequeños. Diámetros de 0.12 a 3 mm <sup>[3]</sup> (o 0.10 a 6.5 mm <sup>[1]</sup> ). Rango de temperaturas 0 a 120 °C.
Alambre revenido en aceite	AISI/SAE 1070 ASTM A230	Calidad de resorte de válvula. Adecuado para cargas variables.
Al cromo-vanadio	UNS G61500 AISI/SAE 6150 ASTM A231-41	Es el acero aleado más utilizado para aplicaciones con esfuerzos más elevados que los que soportan los aceros duros al carbono, y aquellas donde se necesiten altas resistencia a la fatiga y durabilidad. Soportan cargas de impacto. Ampliamente utilizado en válvulas de motores de avión. Diámetros de 0.8 a 12 mm. Temperaturas hasta 220 °C.
Al cromo-silicio	UNS G92540 AISI/SAE 9254 ASTM A401	Es excelente para aplicaciones con altos esfuerzos, en las que se requiera tenacidad y gran duración. El segundo más resistente después del alambre para cuerda musical. Dureza Rockwell aproximadamente entre C50 y C53. Diámetros de 0.8 a 12 mm. Temperaturas hasta 220/250 °C.
Acero inoxidable	SAE 30302 ASTM A313 (302)	Adecuado para carga variable.

## 6.- MEMORIA DE CÁLCULO.

El proyecto tiene destinado implementarse en lugares donde transiten los autotransportes, las calles de una ciudad, para determinar las dimensiones del lugar donde el prototipo será instalado se tomaron la medida más de la distancia entre las aceras, en la siguiente imagen podemos ver lo más claramente:

### SECCIÓN TIPO PARA ANCHO DE 10.00 METROS

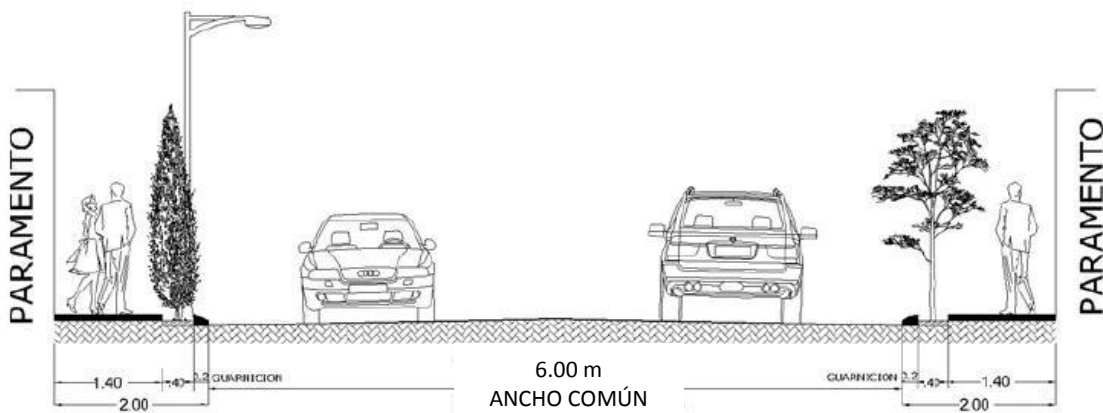


Ilustración 20: Ancho promedio de una calle.

Por motivos prácticos se tomaron la mitad de la anchura de la calle para determinar las dimensiones de la base del sistema recolector, con un margen de 0.25 m de cada lado, en cuanto al ancho de la base se considerará de 1.5 m, quedando como se muestra en la siguiente figura, al establecer las dimensiones obtenemos una ventaja ya que este modelo sería repetitivo como si fuera un patrón de mosaico pudiendo adaptarse a las circunstancias de la calle:

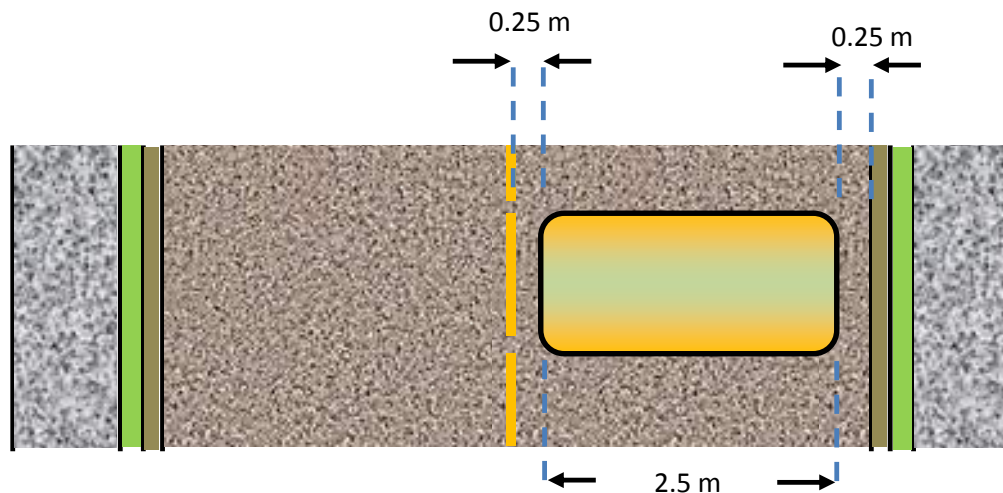


Ilustración 21: Dimensiones de la base del recolector.

### 6.1.- Bosquejo del mecanismo.

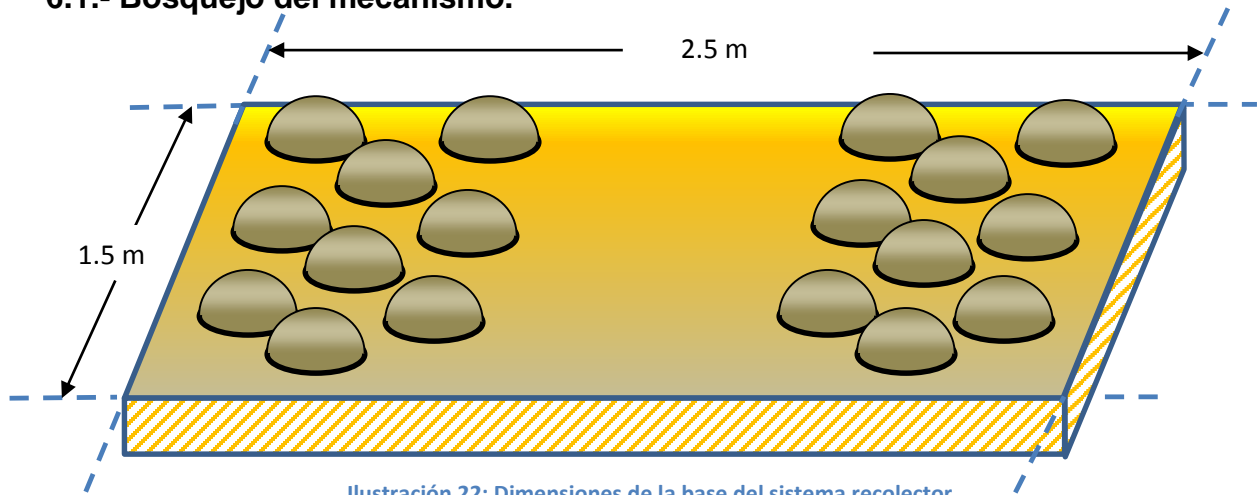


Ilustración 22: Dimensiones de la base del sistema recolector.

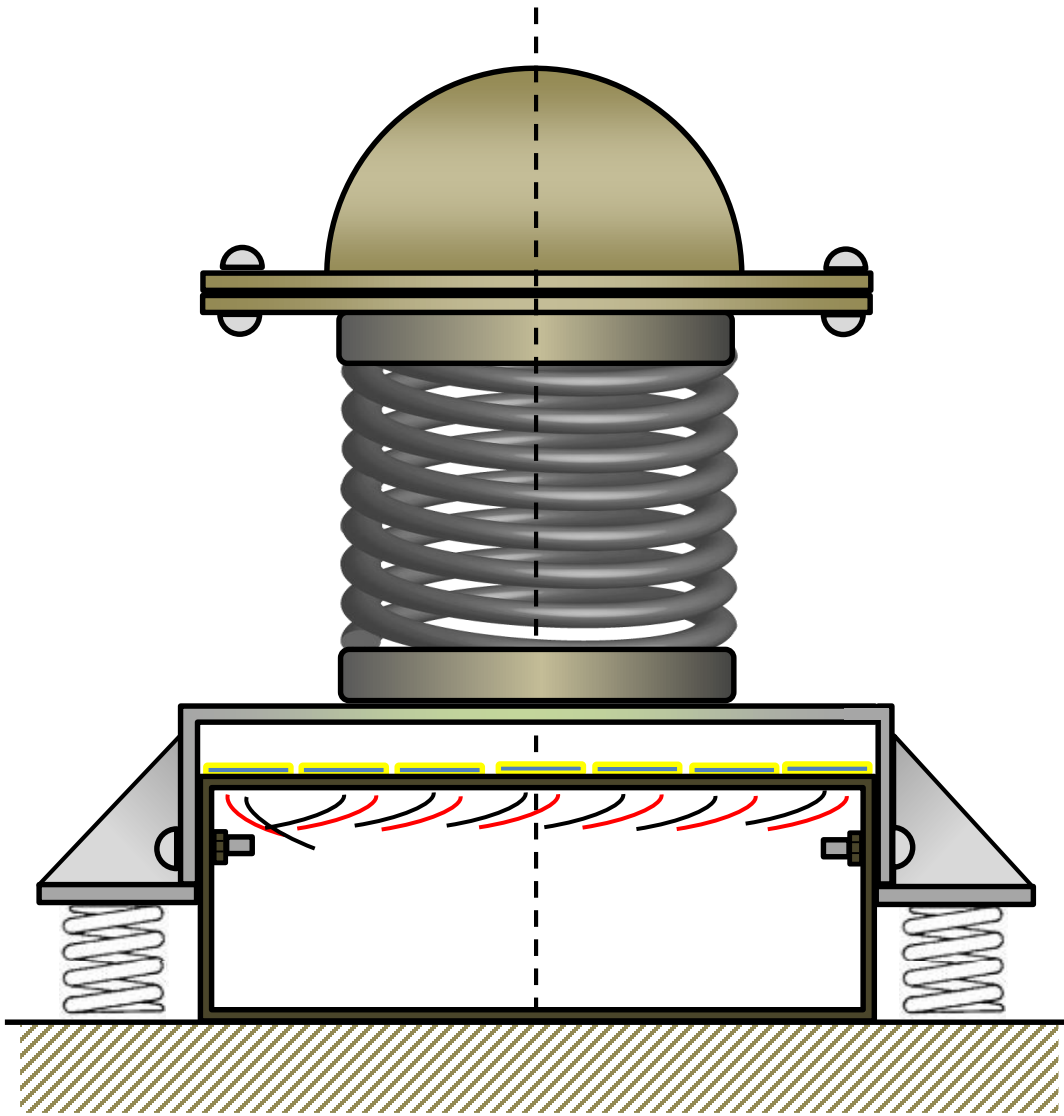


Ilustración 23: Bosquejo general del mecanismo recolector.

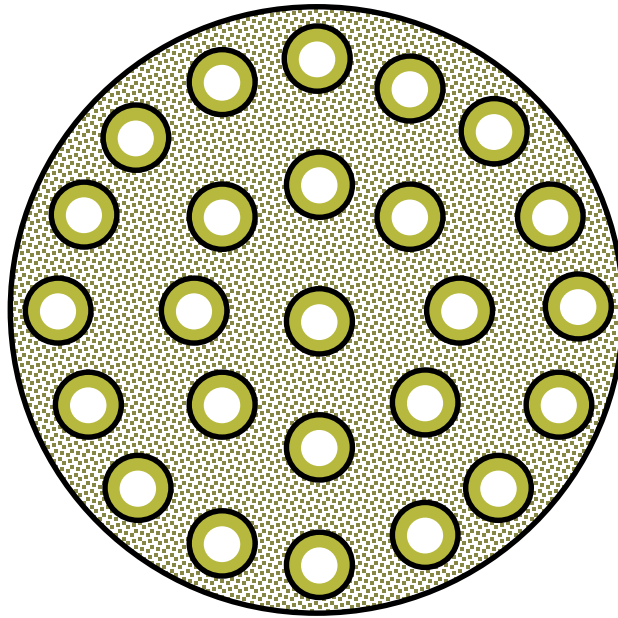


Ilustración 24: Distribución de los elementos piezoeléctricos.

En la base del resorte habrá un total de 58 elementos piezoeléctricos conectados en paralelo la cual la suma de sus áreas será el área total sobre el cual se ejercerá la presión. En la figura N° 23 podemos observar que la plataforma donde se instalaran los sensores esta hueca, ya que en la parte inferior se hará la conexión de todos los cables. En este elemento se harán 58 perforaciones sobre la superficie de alrededor de 3 mm de diámetro, esto con el fin de que los cables de los piezoeléctricos puedan atravesar el orificio y que las conexiones se realicen en el interior de la plataforma.

Para que los sensores no se sufran debido a factores del medio ambiente, se puede envolver con cubierta de poliuretano moldeado de alto rendimiento, que es impenetrable de ácidos, álcalis y ultravioleta, también es ampliamente utilizado como amortiguador, anti- presionando y de carga pesada partes.



Ilustración 25: Poliuretano

## 6.2.- Cálculos.

En base a la información del marco teórico podemos realizar un análisis de información pero antes hay que establecer ciertos parámetros físicos, para eso se supondrán los siguientes datos:

### Suponiendo



$$m = 1 \text{ ton}$$

$$V_i = 0 \text{ km/h}$$

$$V_f = 20 \text{ km/h}$$

$$t = 5 \text{ seg.}$$

### 6.2.1.- Voltaje teórico producido.

Primero tenemos que calcular aproximadamente que fuerza que lleva el automóvil, para eso supondremos que la aceleración será constante, se utilizara la fórmula de velocidad del MRUA.

$$V_f = V_i + at \qquad m a = F$$

$$\therefore F = (V_f + V_i) \frac{m}{t}$$

$$F = \left[ \left( \frac{20 \text{ km}}{h} \right) \left( \frac{1000 \text{ m}}{1 \text{ km}} \right) \left( \frac{1 \text{ hr}}{3600 \text{ s}} \right) \right] \left[ \frac{1000 \text{ kg}}{5 \text{ s}} \right]$$

$$F = \left( 5.555 \frac{\text{m}}{\text{s}} \right) \left( 200 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \right)$$

$$F = 1,111.11 \text{ N}$$

Peso del automóvil se determina mediante la siguiente ecuación:

$$W = m \cdot g$$

$$W = (1000 \text{ kg}) \left( 9.806 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \right)$$

$$W = 9,806 \text{ N}$$

## Repartos de cargas en el vehículo

El reparto de cargas sobre los ejes del vehículo, según la posición del grupo motopulsor, suele estar comprendido entre los siguientes valores:

- Motor delantero y propulsión trasera: el 50% para cada eje

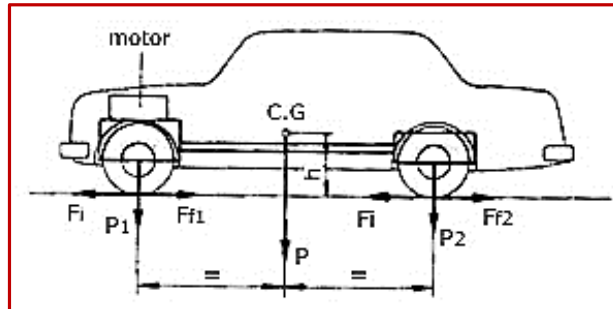


Ilustración 26: Motor delantero y propulsión trasera.

- Motor y tracción delantera: el 60% en el eje delantero y 40% en el trasero

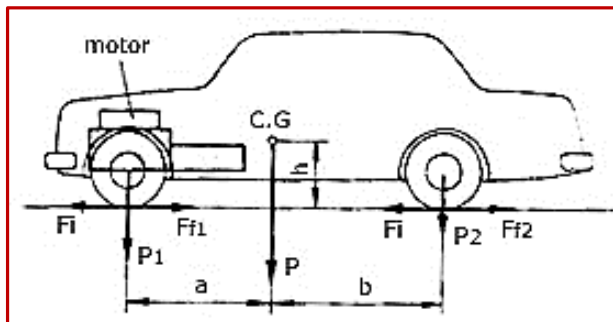


Ilustración 27: Motor y tracción delantera.

- Motor y propulsión traseros: el 40% en el eje delantero y el 60% en el trasero

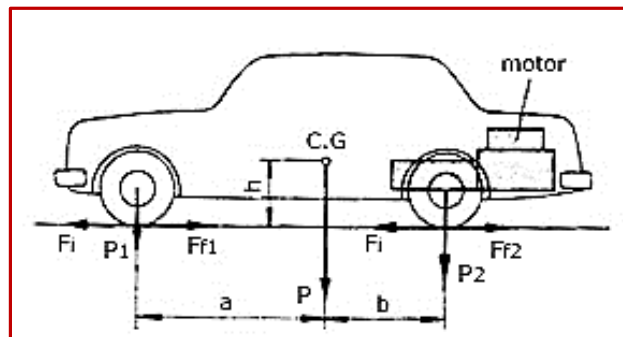


Ilustración 28: Motor y propulsión traseros.

Entonces la fuerza soportada por las llantas quedaría demostrado como el siguiente diagrama:

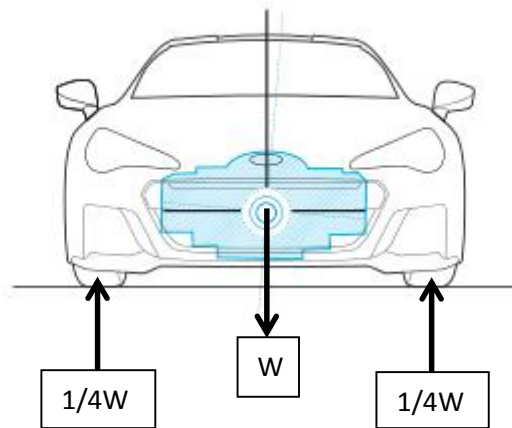


Ilustración 29: Reparto de cargas.

Entonces la fuerza soportada por cada neumático sería aproximadamente:

$$F_n = \frac{1}{4}W = 2,451.5 N$$

### Presión ejercida sobre los elementos

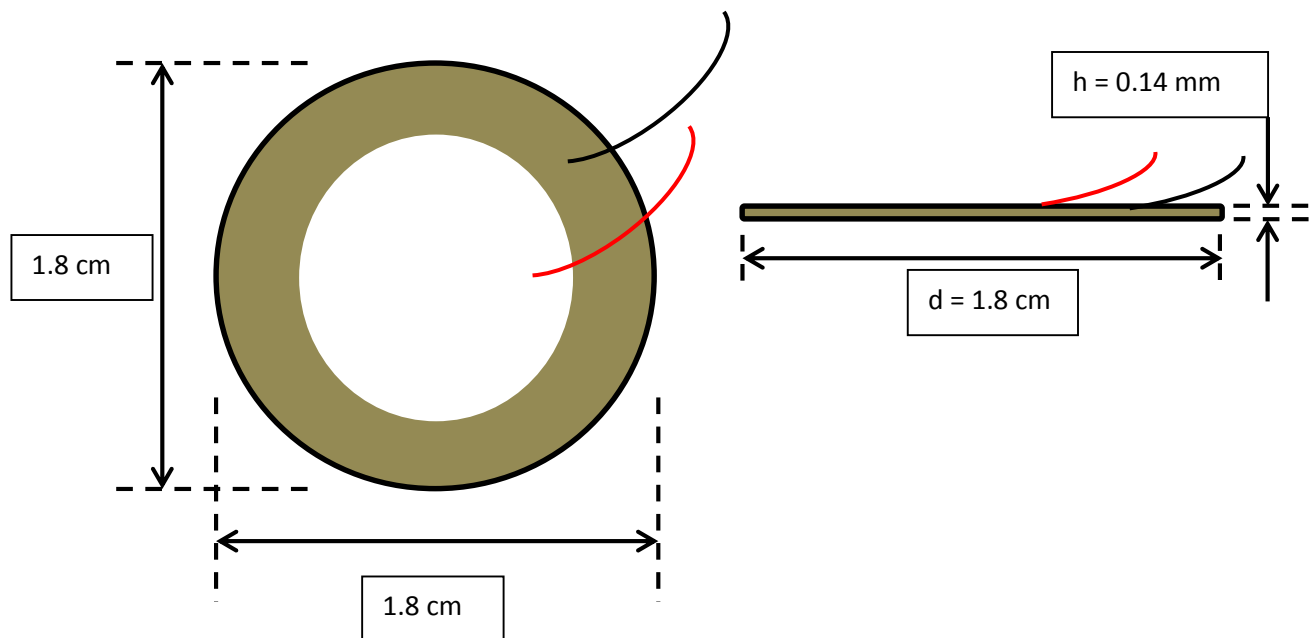


Ilustración 30: dimensiones de un elemento piezoeléctrico.

$$P = \frac{F_n}{A_t}$$

$$A = \pi \left(\frac{D}{2}\right)^2$$

$$A = \pi \left(\frac{0.018 \text{ m}}{2}\right)^2$$

$$A = 2.5447 \times 10^{-4} \text{ m}^2$$

$$P = \frac{2,451.5 \text{ N}}{(2.5447 \times 10^{-4} \text{ m}^2)} (58)$$

$$\mathbf{P = 166,099.1134 \text{ Pa}}$$

Voltaje real que se puede generar con los elementos piezoeléctricos

$$v = -(g33hT)$$

Dónde:

$v = \text{voltaje}$

$g33 = \text{constante de voltaje}$

$h = \text{altura del elemento piezoelectrico}$

$T = \text{presion sobre el elemento}$

Entonces el voltaje es producido por los elementos es aproximadamente

$$v = -(g33hT)$$

$$v = -(\mp 2)(0.00014 \text{ m})(166,099.1134 \text{ Pa})$$

$$\mathbf{v = 46.5 \text{ V}}$$



Como el valor del voltaje varía con respecto a la fuerza aplicada sobre los elemento y como en la práctica esta situación se dará mediante el software EES podemos observar como varía el voltaje con respecto a la fuerza:

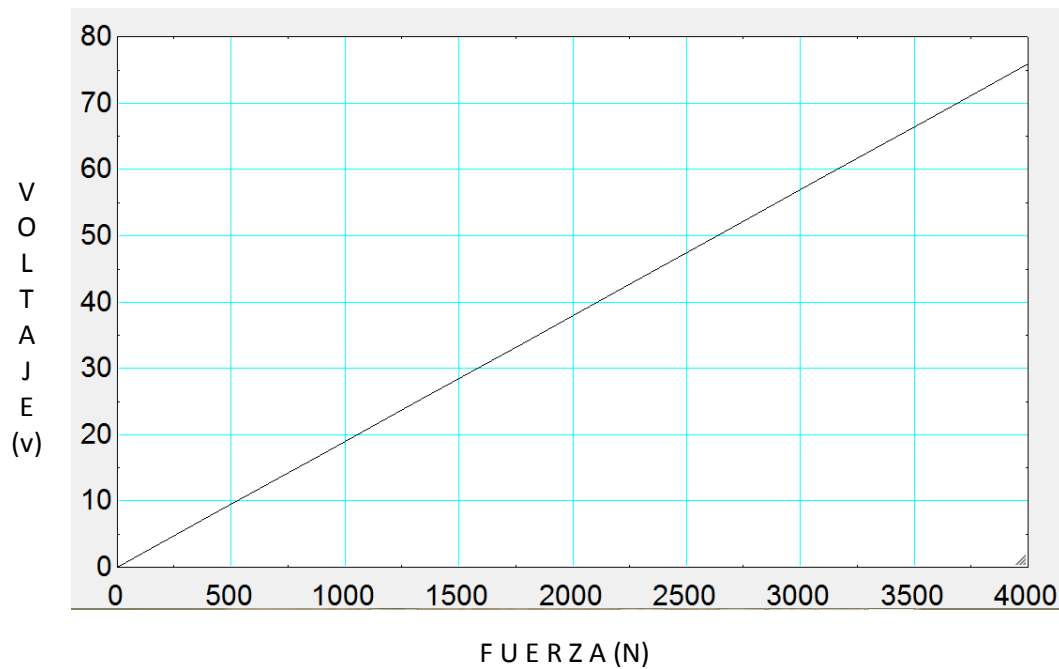
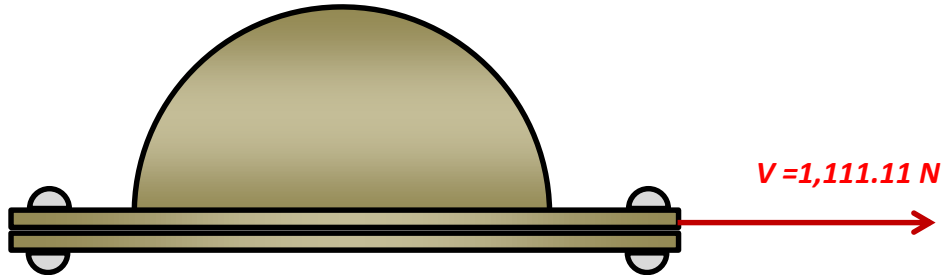


Ilustración 31: Grafica Voltaje-Fuerza.

Como podemos observar en la gráfica anterior en la parte horizontal se encuentra la escala de la fuerza que va aumentando en 500 N, por otra partes en la vertical tenemos la escala del voltaje que va aumentando en 10 V; con esto logramos apreciar que el voltaje producido es directamente proporcional a la fuerza aplicada.

### 6.2.2.- Cálculos de uniones remachadas.

La boya metálica estará unida a una placa del mismo espesor (1/4 in) por medio de cuatro remaches que estarán sometidos bajo la cortante v:



#### INFORMACION DE LOS MATERIALES

REMACHES A502

$$\tau_{perm} = 17.5 \text{ ksi}$$

PLACAS ASTM A36

$$\sigma_t = 23 \text{ ksi}$$

$$S_u = 58 \text{ ksi}$$

#### Esfuerzo por cortante

$$\tau = \frac{F_v}{A_v}$$

$$A_v = N\pi \frac{d^2}{4} = 4 \cdot \pi \frac{(3/8)^2}{4} = 0.441786 \text{ in}^2$$

$$F_v = \tau \cdot A_v = \tau_{perm} \cdot N\pi \frac{d^2}{4} = (17.5 \times 10^3)(0.441786 \text{ in}^2)$$

$$F_v = 7.7312 \text{ kips}$$

### Esfuerzo por aplastamiento

$$\sigma_b = \frac{F_b}{A_b}$$

$$A_b = N_b \cdot d \cdot t = (4)(3/8) \left(\frac{1}{4}\right) = 0.375 \text{ in}^2$$

$$\sigma_b = 1.2 \cdot S_u = 1.2(58 \times 10^3) = 69.6 \text{ ksi}$$

$$F_b = A_b \cdot \sigma_b = (0.375 \text{ in}^2)(69.6 \text{ ksi})$$

$$\mathbf{F_b = 26.1 kips}$$

### Esfuerzo por tension

$$\sigma_t = \frac{F_t}{A_t}$$

$$A_t = (W - N_t d_H) \cdot t = [10 - 4(3/8 + 1/16)] \cdot \frac{1}{4} = 2.0625 \text{ in}^2$$

$$\sigma_t = 0.6 \cdot S_y = 0.6(36 \times 10^3) = 21.6 \text{ ksi}$$

$$F_t = A_t \cdot \sigma_t = (2.0625 \text{ in}^2)(21.6 \text{ ksi})$$

$$\mathbf{F_t = 44.55 kips}$$

### 6.2.3.- Cálculos de los resortes.

INFORMACION DE LOS RESORTES

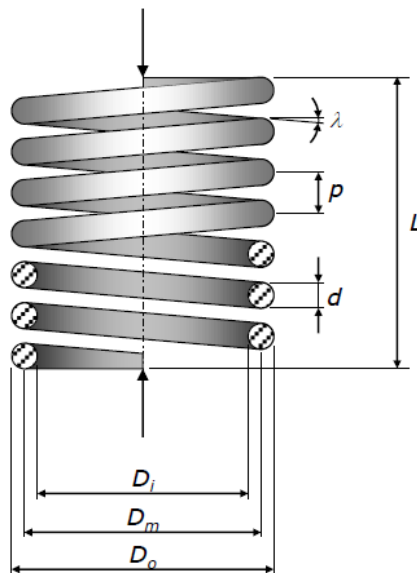
ASTM 207 Ó SAE 1066 (ESTIRADO EN FRIO)

RESISTENCIA MINIMA A LA TRACCION:

- CLASE 1 = 1014-1915 MPa
- CLASE 2 = 1179-2234 MPa

$E = 207 \text{ MPa} \times 10^3 = 30 \times 10^6 \text{ psi}$

$G = 79.3 \text{ MPa} \times 10^3 = 11.5 \times 10^6 \text{ psi}$



**Paso del resorte**

$$p = 4 \text{ cm}$$

**Diámetro medio**

$$D_m = 7 \text{ in} = 17.78 \text{ cm}$$

**Numero de espiras**

$$N_a = 4$$

**Diámetro del alambre**

$$d = 2 \text{ cm}$$

La información para siete materiales se puede ajustar cercanamente por la forma exponencial siguiente utilizando los datos de la tabla 4:

$$S_{ut} = \frac{A}{d^m} \text{----- ec. 5.}$$

$$S_{ut} = \frac{1783 \text{ MPa}}{(0.02 \text{ m})^{0.190}} = 3,749.347 \text{ MPa}$$

Tabla 4: Coeficientes usados en la ecuación (5.) para cinco materiales de resorte.

Material	ASTM Núm.	Rango del tamaño <i>pul</i> <i>mm</i>	Exponente <i>m</i>	Constante, <i>A</i> kpsi (Mpa)
Alambre de piano	A228	0.004-0.256    0.10- 6.5	0.145	201 (2211)
Alambre T y R en aceite	A229	0.020-0.500    0.50-12.7	0.187	147 (1855)
Alambre estirado duro	A227	0.028-0.500    0.70-12.7	0.190	140 (1783)
Alambre al cromo-vanadio	A232	0.032-0.437    0.80-11.1	0.168	169 (2005)
Alambre al cromo-silicio	A401	0.063-0.375    1.60- 9.5	0.108	202 (1974)
Alambre inoxidable 302	A313	0.013-0.10    0.30- 2.5	0.146	169(1867)
		0.100-0.20    2.50- 5.0	0.263	128(2065)
		0.200-0.40    5.00-10.0	0.478	90(2911)
Alambre de bronce fosforado	B159	0.004- 0.022    0.10- 0.6	0	145(1000)
		0.022-0.075    0.60- 2.0	0.028	121(913)
		0.075-0.30    2.70- 5.0	0.064	110(932)

En el diseño de resortes el esfuerzo permisible es la resistencia a la fluencia por torsión en vez de la resistencia a la rotura. Una vez que se conoce la resistencia a la rotura por medio de la ecuación (5.), el esfuerzo a la fluencia por cortante (esfuerzo cortante permisible) se obtiene mediante la siguiente relación:

$$S_{sy} = \tau_{perm} = 0.45S_{ut} \quad (\text{Alambre de piano y alambre para resorte de acero estirado duro})$$

$$S_{sy} = \tau_{perm} = 0.45(3,749.347 \text{ MPa})$$

$$S_{sy} = 1,687.206 \text{ MPa}$$

Como se utilizaran resortes sin granallar:  $S_{se} = k_a k_b k_c S'_e = 47.3 \text{ kpsi}(326 \text{ MPa})$

### Resistencia máxima cortante

$$S_{su} = 0.67S_{ut} = 0.67(3,749.347 \text{ MPa})$$

$$S_{su} = 2,512.0625 \text{ MPa}$$

## Fuerza máxima soportada

Para su determinación se utilizara el criterio de Goodman, suponiendo un factor de seguridad de  $n_s=2$ :

$$\frac{\tau_a}{S_{se}} + \frac{\tau_m}{S_{su}} = \frac{1}{n_s}$$

$$n_s = \frac{S_{se}S_{su}}{\tau_a S_{su} + \tau_m S_{se}}$$

$$n_s = \frac{S_{se}S_{su}}{\left(K_B \frac{8F_a D}{\pi d^3}\right) S_{su} + \left(K_B \frac{8F_m D}{\pi d^3}\right) S_{se}}$$

$$n_s = \frac{S_{se}S_{su}}{\left(K_B \frac{8\left(\frac{F_{max} - F_{min}}{2}\right) D}{\pi d^3}\right) S_{su} + \left(K_B \frac{8\left(\frac{F_{max} + F_{min}}{2}\right) D}{\pi d^3}\right) S_{se}}$$

Como la fuerza mínima será cuando el resorte esté sometido bajo ninguna carga se elimina de la ecuación, luego factorizamos, quedando de la siguiente manera:

$$n_s = \frac{S_{se}S_{su}}{\left(K_B \frac{8\left(\frac{F_{max}}{2}\right) D}{\pi d^3}\right) (S_{su} + S_{se})}$$

$$F_{max} = \frac{\pi d^3 S_{se} S_{su}}{4 K_B D (S_{su} + S_{se}) n_s}$$

$$K_B = \frac{4C + 2}{4C - 3} = \frac{4(8.89) + 2}{4(8.89) - 3} = 1.15356$$

$$F_{max} = \frac{\pi(0.02 \text{ m})^3 (326 \text{ MPa})(2,512.0625 \text{ MPa})}{4(1.15356)(0.1778 \text{ m})(2,512.0625 \text{ MPa} + 326 \text{ MPa})(2)}$$

$$\mathbf{F_{max} = 4,419.8142 \text{ N}}$$

Como vimos anteriormente la fuerza aplicada al resorte representa una cuarta parte del peso del autotransporte, con lo que podemos deducir que el mecanismo puede soportar un auto de 1.8 toneladas.

Cálculos de otras partes del resorte:

### Ángulo de paso

$$\lambda = \tan^{-1} \left( \frac{p}{\pi \cdot D_m} \right)$$

$$\lambda = \tan^{-1} \left( \frac{0.04 \text{ m}}{\pi \cdot 0.1778 \text{ m}} \right)$$

$$\lambda = 4.096^\circ$$

### Longitud del resorte

$$L = pN_a + d$$

$$L = (0.04 \text{ m})(4) + 0.02 \text{ m}$$

$$L = 0.18 \text{ m} = 18 \text{ cm}$$

### Numero de espiras totales

$$N_t = N_a = 4$$

### Longitud comprimida

$$L_c = dN_a + d$$

$$L_c = (0.02 \text{ m})(4) + 0.02 \text{ m}$$

$$L_c = 0.1 \text{ m} = 10 \text{ cm}$$

### Reacciones en el corte

$$T = \frac{F \cdot D_m}{2}$$

$$T = \frac{(2451.5 \text{ N})(0.1778 \text{ m})}{2}$$

$$T = 217.93835 \text{ N} \cdot \text{m}$$

**Esfuerzo cortante para la fuerza f**

$$S_{SF} = \frac{F}{A}$$

$$S_{SF} = \frac{F}{\pi \left(\frac{d}{2}\right)^2} = \frac{2451.5 \text{ N}}{\pi \left(\frac{0.02 \text{ m}}{2}\right)^2}$$

$$S_{SF} = 7.8034 \text{ MPa}$$

**Esfuerzos cortantes por el par torsor**

$$S_{ST} = \frac{T \cdot c}{J} = \frac{16T}{\pi \cdot d^3}$$

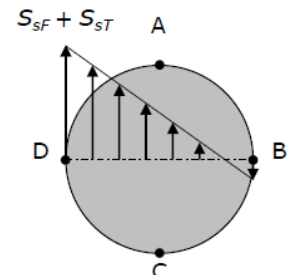
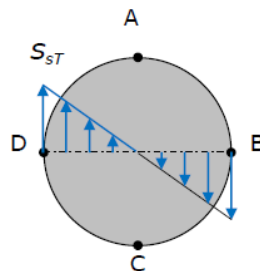
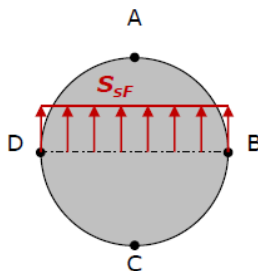
$$S_{ST} = \frac{16(217.93835 \text{ N} \cdot \text{m})}{\pi(0.02 \text{ m})^3}$$

$$S_{ST} = 138.7439 \text{ MPa}$$

$$S_{ST} = \frac{8 F D_m}{\pi d^3} = \frac{8(2451.5 \text{ N})(0.1778 \text{ m})}{\pi(0.02 \text{ m})^3}$$

$$S_{ST} = 138.7439 \text{ MPa}$$

**Esquema de distribución de los esfuerzos**





## Esfuerzo máximo

$$S_{Smax} = S_S = K_W \frac{8 F D_m}{\pi d^3} \quad , \quad \text{con } \lambda \leq 12^\circ$$

$$K_W = \frac{4C - 1}{4C - 4} + \frac{0.615}{C} \quad ; \text{ (coeficiente de Wahl)}$$

$$C = \frac{D_m}{d}; \quad \text{índice del resorte (agudeza de la curvatura)}$$

$$C = \frac{0.1778 \text{ m}}{0.02 \text{ m}} = 8.89$$

$$K_W = \frac{4(8.89) - 1}{4(8.89) - 4} + \frac{0.615}{8.89}$$

$$K_W = 1.164236$$

$$\therefore S_{Smax} = S_S = (1.164236) \frac{(8)(2451.5 \text{ N})(0.1778 \text{ m})}{\pi (0.02 \text{ m})^3}$$

$$S_{Smax} = 161.53 \text{ MPa}$$

## Deflexión

$$k = \frac{dF}{d\delta} \quad , \quad \text{si } k \text{ es constante} \quad k = \frac{F}{\delta}$$

$$\delta = \frac{8 F D_m^3 N_a}{G d^4} = \frac{8 F C^3 N_a}{G d}$$

$$\delta = \frac{8(2451.5 \text{ N})(8.89)^3(4)}{(79.3 \text{ GPa})(0.02 \text{ m})}$$

$$\delta = 0.03475 \text{ m}$$

## Tasa del resorte k

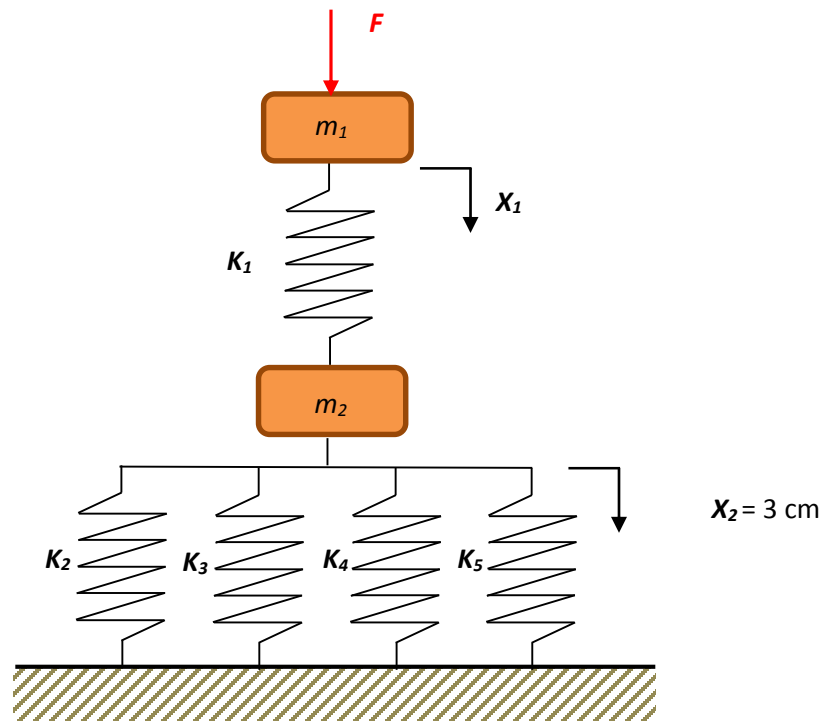
$$k = \frac{G d^4}{8 D_m^3 N_a} = \frac{G d}{8 C^3 N_a}$$

$$k = \frac{(79.3 \text{ GPa})(0.02 \text{ m})}{8(8.89)^3(4)}$$

$$k = 70,542.025 \text{ N/m}$$

### Resortes en paralelo

En la base de los sensores habrá 4 resortes idénticos que estarán en paralelo soportando el componente que comprimirá los elementos piezoeléctricos, en la siguiente ilustración podemos observarlo:



Para un análisis de estático de la figura anterior nos permite determinar las constante  $k$  de los resortes que se encuentran en paralelo, para eso se supondrá una masa de  $m_1 = 1000 \text{ gr}$  y  $m_2 = 1500 \text{ gr}$ .

$$kx = F$$

$$k_1 x_1 = F + m_1 g$$

$$(k_2 + k_3 + k_4 + k_5) x_2 - k_1 x_1 = m_2 g$$

Pero:  $k_2 + k_3 + k_4 + k_5 = k_{eq}$

$$k_{eq}x_2 - k_1x_1 = m_2g$$

$$k_{eq} = \frac{m_2g + k_1x_1}{x_2}$$

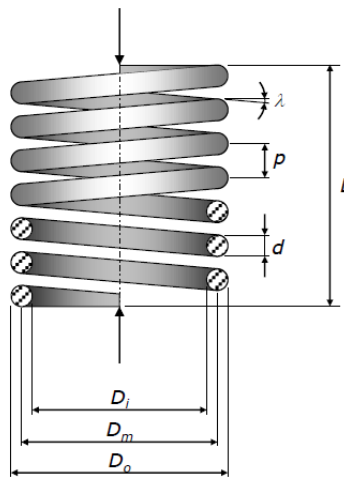
### Tasa de los resortes, k

Sustituyendo valores en la ecuación anterior:

$$k_{eq} = \frac{(1.5 \text{ kg})(9.81 \text{ m/s}^2) + \left(70,542.025 \frac{\text{N}}{\text{m}}\right)(0.03475 \text{ m})}{0.03 \text{ m}}$$

$$k_{eq} = 82,200 \text{ N/m}$$

$$\therefore k_2 = k_3 = k_4 = k_5 = \frac{1}{4}k_{eq} = 20,550 \text{ N/m}$$



### Paso del resorte

$$p = 1.5 \text{ cm}$$

### Diámetro medio

$$D_m = 1 \frac{1}{4} \text{ in} = .03175 \text{ cm}$$

### Numero de espiras

$$N_a = 6$$

### Diámetro del alambre

$$d = 1 \text{ cm}$$

### Ángulo de paso

$$\lambda = \tan^{-1} \left( \frac{p}{\pi \cdot D_m} \right)$$

$$\lambda = \tan^{-1} \left( \frac{0.015 \text{ m}}{\pi \cdot 0.03175 \text{ m}} \right)$$

$$\lambda = \mathbf{8.5522^\circ}$$

### Longitud del resorte

$$L = pN_a + d$$

$$L = (0.015 \text{ m})(6) + 0.01 \text{ m}$$

$$L = \mathbf{0.1 \text{ m} = 10 \text{ cm}}$$

### Numero de espiras totales

$$N_t = N_a = 6$$

### Longitud comprimida

$$L_c = dN_a + d$$

$$L_c = (0.01 \text{ m})(6) + 0.01 \text{ m}$$

$$L_c = \mathbf{0.07 \text{ m} = 7 \text{ cm}}$$

### Reacciones en el corte

$$T = \frac{F \cdot D_m}{2}$$

$$T = \frac{(2466 \text{ N})(0.03175 \text{ m})}{2}$$

$$T = \mathbf{39.14775 \text{ N} \cdot \text{m}}$$

### Esfuerzo cortante para la fuerza f

$$S_{SF} = \frac{F}{A}$$

$$S_{SF} = \frac{F}{\pi \left(\frac{d}{2}\right)^2} = \frac{2466 \text{ N}}{\pi \left(\frac{0.01 \text{ m}}{2}\right)^2}$$

$$S_{SF} = 31.398 \text{ MPa}$$

### Esfuerzos cortantes por el par torsor

$$S_{ST} = \frac{T \cdot c}{J} = \frac{16T}{\pi \cdot d^3}$$

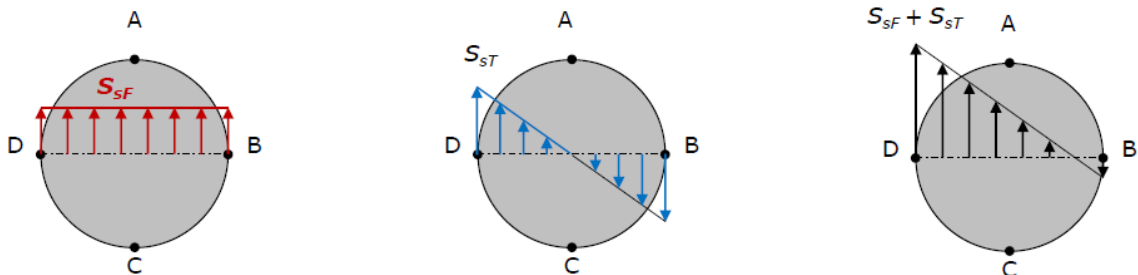
$$S_{ST} = \frac{16(39.14775 \text{ N} \cdot \text{m})}{\pi(0.01 \text{ m})^3}$$

$$S_{ST} = 199.377 \text{ MPa}$$

$$S_{ST} = \frac{8 F D_m}{\pi d^3} = \frac{8(2466 \text{ N})(0.03175 \text{ m})}{\pi(0.01 \text{ m})^3}$$

$$S_{ST} = 199.377 \text{ MPa}$$

### Esquema de distribución de los esfuerzos



## Esfuerzo máximo

$$S_{Smax} = S_S = K_W \frac{8 F D_m}{\pi d^3} \quad , \quad \text{con } \lambda \leq 12^\circ$$

$$K_W = \frac{4C - 1}{4C - 4} + \frac{0.615}{C} \quad , \quad C = \frac{D_m}{d}$$

$$C = \frac{0.03175 \text{ m}}{0.01 \text{ m}} = 3.175$$

$$K_W = \frac{4(3.175) - 1}{4(3.175) - 4} + \frac{0.615}{3.175}$$

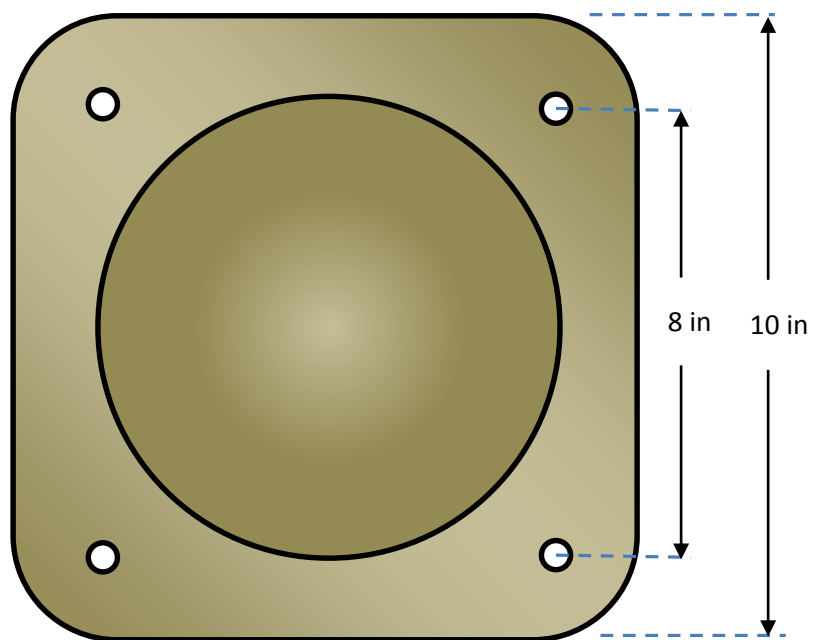
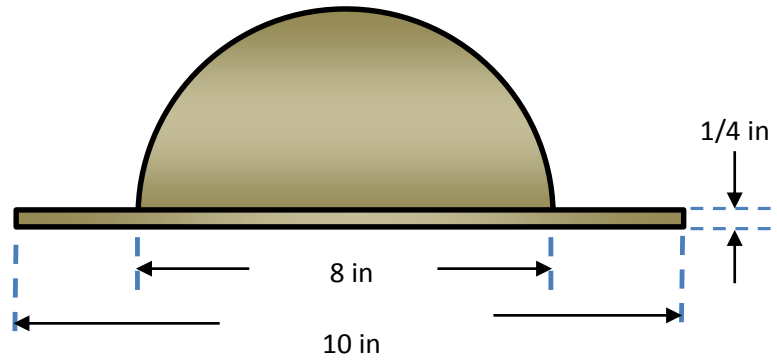
$$K_W = 1.53853$$

$$\therefore S_{Smax} = S_S = (1.53853) \frac{(8)(2466 \text{ N})(0.03175 \text{ m})}{\pi (0.01 \text{ m})^3}$$

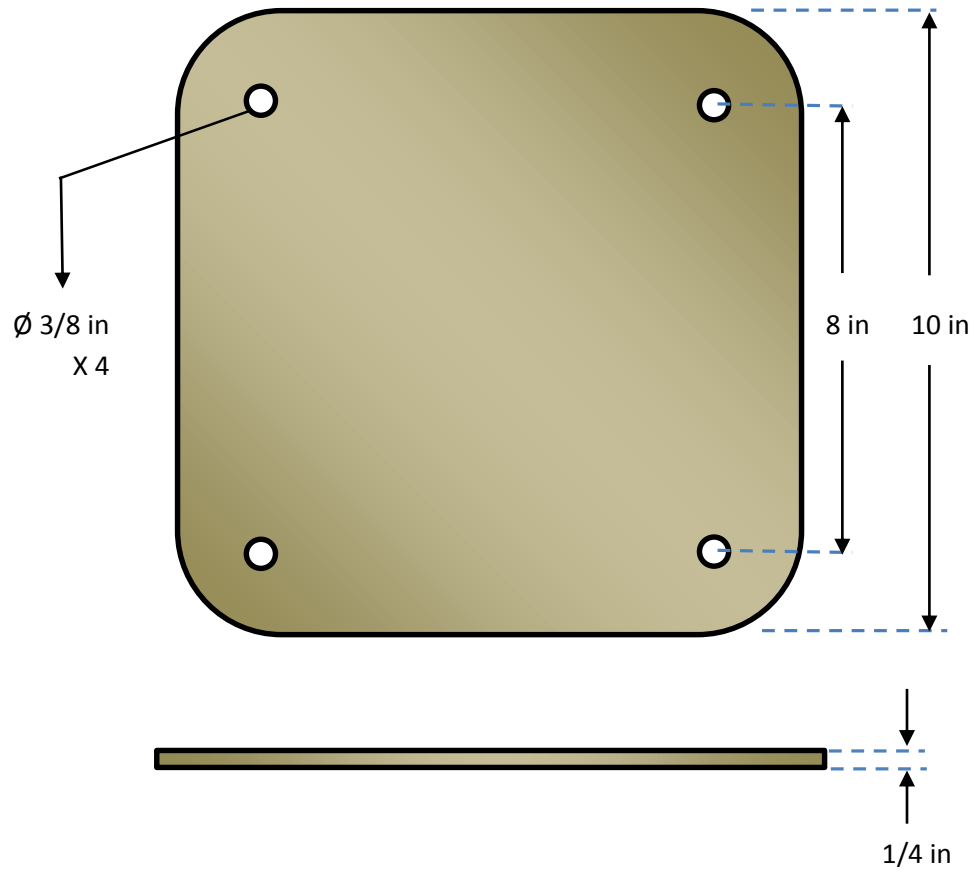
$$S_{Smax} = 306.749 \text{ MPa}$$

### 6.3.- Dimensiones y modelado.

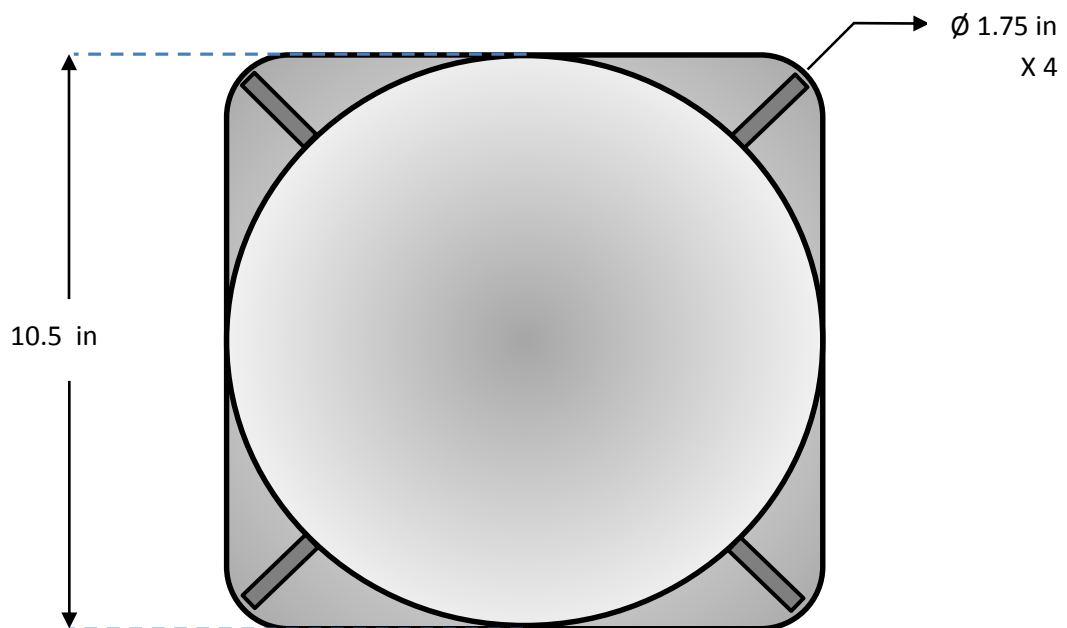
#### 1. Boya metálica.



2. Placa metálica.



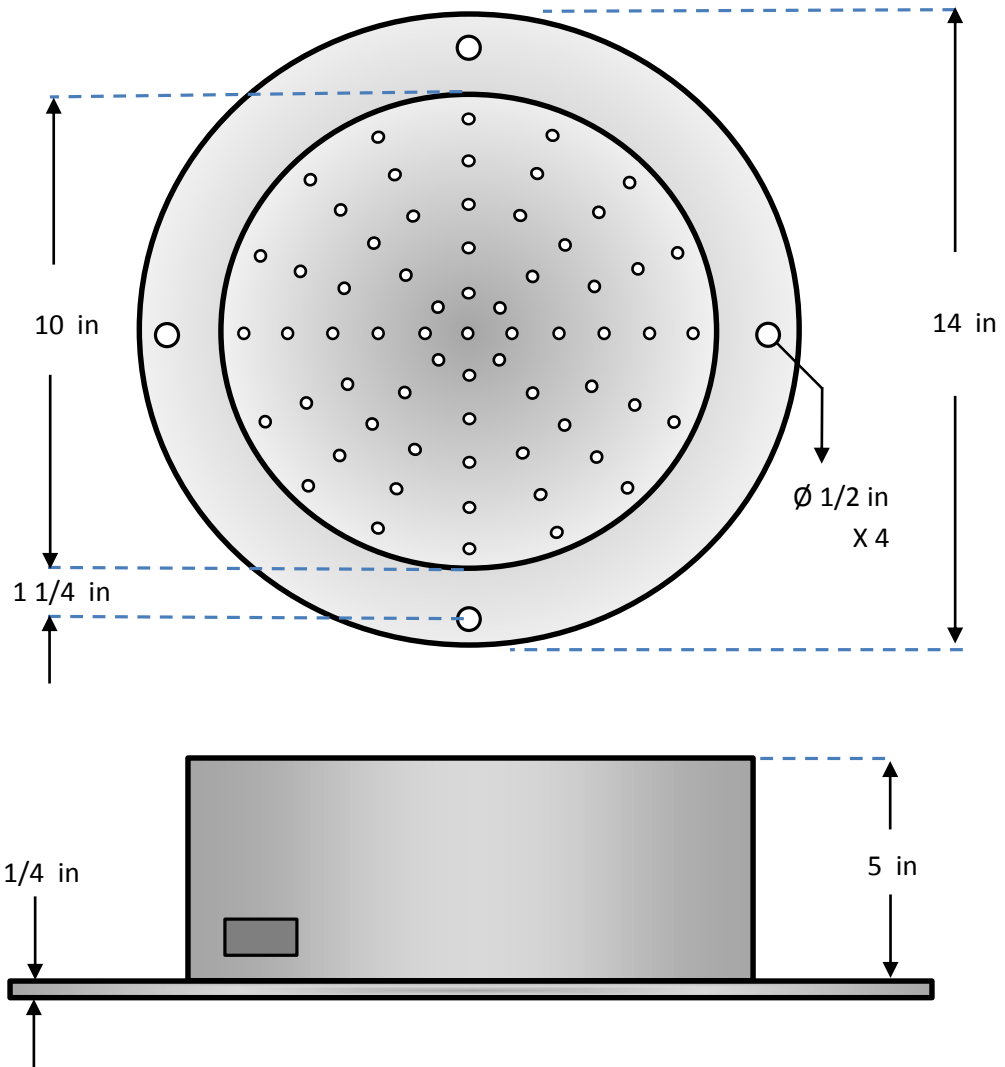
3. Base del resorte.



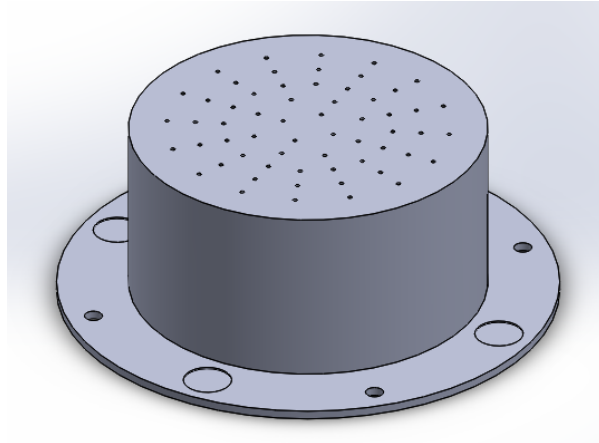




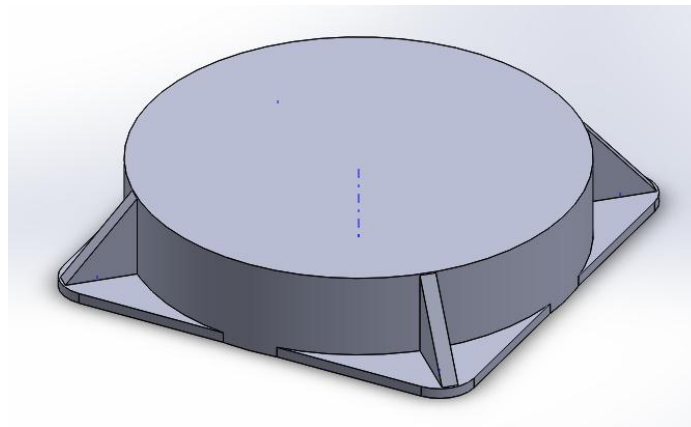
4. Plataforma de los elementos piezoeléctricos.



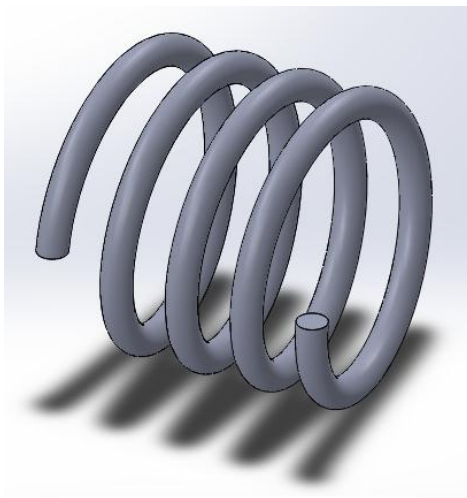
En base a las dimensiones dadas anteriormente y a los cálculos realizados podemos realizar las piezas modelándolos en el software SOLIDWORKS para tener una mejor perspectiva de cada uno de ellos:



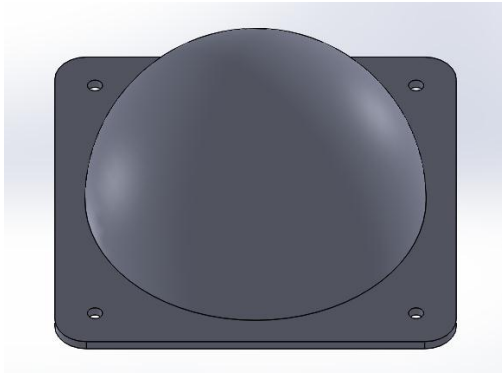
**Ilustración 32:** Plataforma de los elementos piezoeléctricos.



**Ilustración 33:** Base del resorte principal.



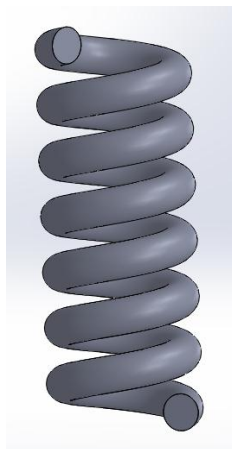
**Ilustración 34:** Resorte principal.



**Ilustración 35: Boya metálica**



**Ilustración 36: Placa de la boya metálica.**



**Ilustración 37: Resorte secundario.**

Una vez terminadas las piezas podemos realizar el ensamblaje como se muestra en la siguiente imagen:

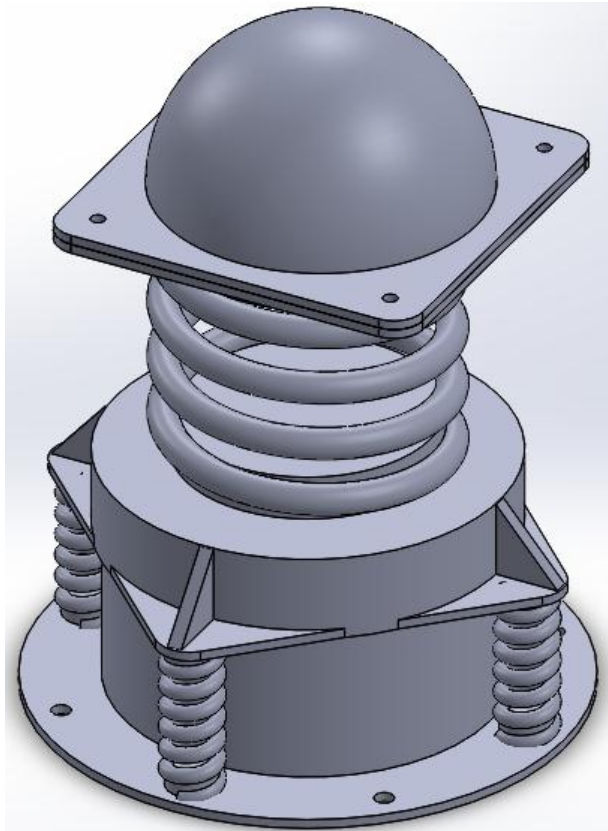


Ilustración 38: Vista isométrica del mecanismo.

Como cada ensamblaje es idéntico podemos instalarlos dentro de una base metálica que tenga las dimensiones ya establecidas anteriormente, y podemos obtener algo semejante a lo siguiente:

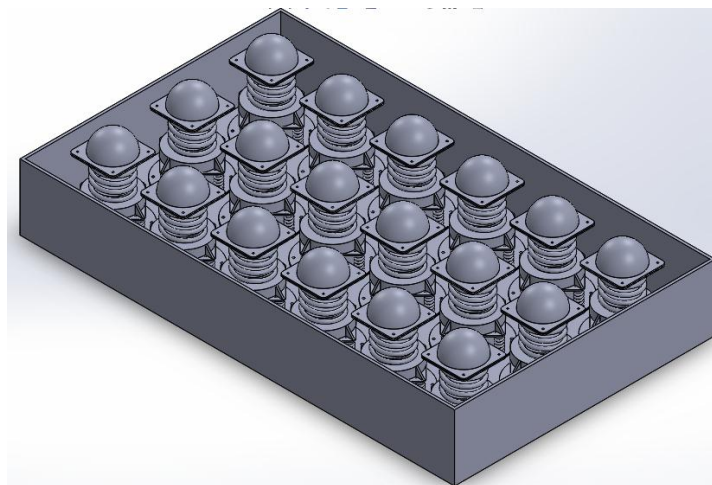


Ilustración 39: vista isométrica de la base con los mecanismos.

## **7.- ANÁLISIS DE RESULTADOS**

En base a los resultados obtenidos en la memoria de cálculo y las actividades desarrollados podemos realizar un análisis que nos permitirá determinar ciertos alcances y limitaciones, la cuales mas adelante se propondrán una seria de propuestas para optimizar el sistema y la implementación del mismo.

### **7.1.- Alcances**

Haciendo análisis en la información de los resultados obtenidos en los cálculos, se logró obtener un voltaje teórico de 46 V aproximadamente, este resultado fue en base a la suposición de variables físicas como el peso del automóvil y la velocidad, así también con la determinación de 58 elementos piezoeléctricos que estarán presentes en el mecanismo . Todo esto nos lleva a señalar que el voltaje dependerá de qué tipo de automóvil accione el mecanismo.

El proyecto tiene destinado, en el caso de ensamblarse realmente, a las principales calles de una ciudad o donde halla gran afluencia vehicular, ya que cada mecanismo produciría 46 V aproximadamente, si eso los multiplicamos por los 18 mecanismos que tendría en total el sistema, pues los valores obtenidos tomarían sentido, eso sin tomar en cuenta el número de vehículos que transitarían a lo largo de un día, entonces los beneficios serian muchos, como por ejemplo la implementación como fuente de energía para el alumbrado público, señalamientos, estacionamientos, casetas vehiculares, etc.

### **7.2.- Limitaciones.**

Para la construcción del sistema se propusieron ciertos materiales que ya se hablaron anteriormente, estos por decirlo de otra manera son los más comunes pero no por eso los más baratos, son materiales que se pueden conseguir de manera fácil relativamente, esto con la finalidad de que el proyecto fuera factible, que fuera posible construir con un pequeño presupuesto.

Esto nos limita en el trabajo a que dichos materiales soporten determinada carga, para ser precisos en base a los cálculos el sistema puede soportar como peso máximo de un vehículo de 1800 kg, también se podría mencionar que como el proyecto no se llevó físicamente, no se pudieron realizar pruebas físicas que comprobaran los cálculos previos.

Se trató de tomar en cuenta factores que pudieran que el proyecto no se pudiera realizar la construcción, pero es imposible proveer todas las contingencias, así que si se realiza un prototipo del proyecto puedan que salgan cosas que afecten al mismo.

### 7.3.- Propuestas.

Este proyecto puede ser mejorado y optimizado, que por cuestiones, técnicas, financiera y temporales no lo permite, por ese motivo se mencionan alguna propuestas sobre el proyecto:

- Realizar un análisis más exhaustivo de los parámetros físicos que intervienen en el sistema.
- Optimizar los materiales presentes en la construcción así como también la calidad y los costos de cada uno de ellos.
- Realizar un estudio del área o localización del proyecto para su comercialización y distribución.

Económicamente este tipo de plataformas serian relativamente baratas y podrían tener muchos usos como:

- ✓ En discotecas, para que estas puedan ser autosuficientes, (generar su propia electricidad a partir del baile de las personas ya que esto hace que se presione el material piezoeléctrico).
- ✓ En calles o avenidas donde transite mucha gente. Con las plataformas podríamos generar energía para proveer de corriente al alumbrado público o para la zona habitacional cercana al lugar.
- ✓ En carreteras o zonas muy transitadas por los autos, ya que no solo se puede generar presión con el peso de una personas si no también con el auto, ya que este al estar sobre un trayectoria podría generar esa presión sobre varias plataformas para generar una diferencia de potencial.
- ✓ Al igual que en carreteras también se podría aplicar en vías del tren, aunque el medio de transporte más usado es el automóvil.

## **8.- CONCLUSIÓN.**

En base al presente proyecto de investigación se planteó una idea innovadora de como recolectar la energía que lleva un vehículo al estar en movimiento, esta energía es convertida mediante unos sensores en energía eléctrica, para después su posterior almacenamiento. Vemos que esta forma de obtención tiene muchas ventajas ya que es amigable con el medio ambiente, podemos ver que por la naturaleza de los elementos y piezas mecánicas utilizadas para su elaboración e implementación no repercuten de una manera negativa, esto ha permitido que países más desarrollados ya lo tengan efectuado en diferentes locaciones y con resultados muy efectivos.

Como vimos anteriormente hay diversas aplicaciones de los materiales piezoeléctricos en diferentes campos. La idea de generar energía eléctrica a partir de discos e ignitores piezoeléctricos es viable y es una fuente limpia y económica sobre todo en países con una población densa o en regiones donde haya una concentración considerable de personas.

Comprobamos teóricamente que mediante un sistema de sistema elementos piezoeléctricos podemos obtener aproximadamente 46 V, este resultado es variable ya que va a depender de la cantidad de fuerza que se aplique a los sensores. Por ese motivo con la gráfica presentada en el trabajo podemos tener a una aproximación del voltaje resultante.

Entonces con este proyecto podremos percatarnos de que existen alternativas para obtener energía eléctrica. Por ejemplo lo tratado en este protocolo de investigación ósea una nueva fuente de energía la cual sería renovable, tomando en cuenta la vida media de los discos piezoeléctricos.

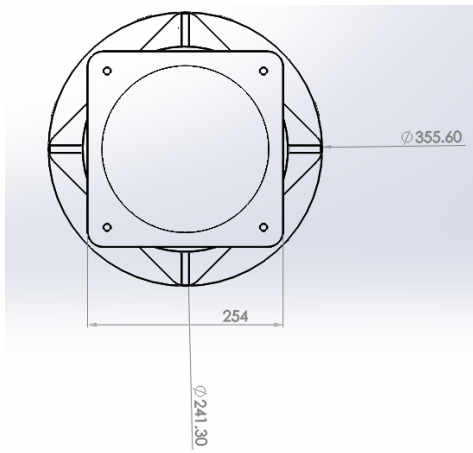
## 9.- FUENTES DE INFORMACION

- [1] [https://eva.fing.edu.uy/pluginfile.php/.../2012\\_Piezoelectricos.pdf](https://eva.fing.edu.uy/pluginfile.php/.../2012_Piezoelectricos.pdf)
- [2] <http://resenv.media.mit.edu/power/>
- [3] <http://www.inhabitat.com/2008/12/11/tokyo-subway-stations-get-piezoelectric-floors/>
- [4] [sirio.uacj.mx/.../electronicaComputacion/.../ForoEnergiaRenovable/.../Energia.pdf](http://sirio.uacj.mx/.../electronicaComputacion/.../ForoEnergiaRenovable/.../Energia.pdf)
- [5] Apuntes de diseño 1 unidad I: Metodología del diseño.
- [6] [www.csi-csif.es/.../modules/mod...28/FRANCISCO\\_GUTIERREZ\\_1.pdf](http://www.csi-csif.es/.../modules/mod...28/FRANCISCO_GUTIERREZ_1.pdf)
- [7] [Dise\\_o\\_de\\_elementos\\_de\\_maquinas\\_-\\_Faires.pdf](#)
- [8] apuntes de diseño 2 unidad I: uniones soldadas y remachadas
- [www.dem.feis.unesp.br](http://www.dem.feis.unesp.br)
- [shigley's mechanical engineering design 9th edition.pdf](#)
- [Schaum - A.S.Hall A.R. Holowenco H.G. Laughlin] [Diseño de Maquinas.pdf](#)
- <http://www2.inecc.gob.mx/publicaciones/libros/438/cap5.html>

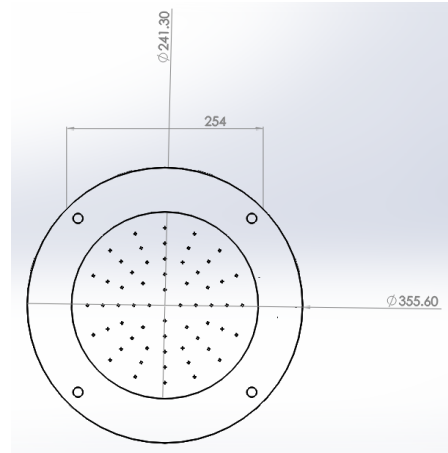


## 10. - ANEXOS

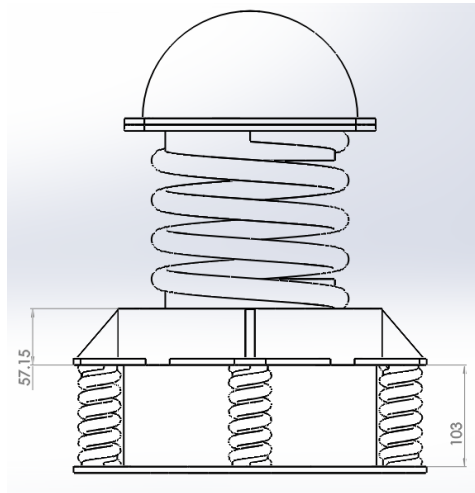
### Planos del ensamblaje



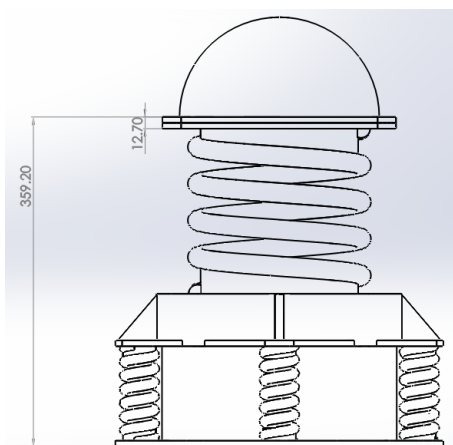
**VISTA SUPERIOR**



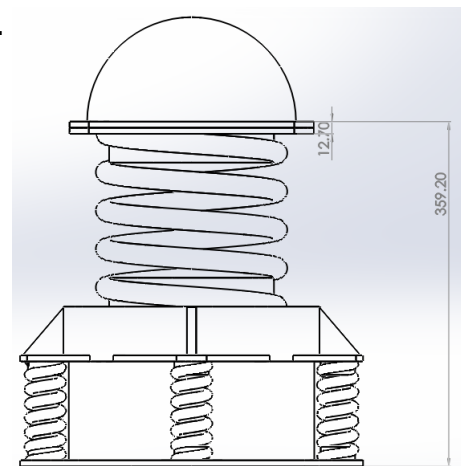
**VISTA INFERIOR**



**VISTA FRONTAL**



**VISTA L. IZQUIERDA**



**VISTA L. DERECHA**

**VISTAS ISOMÉTRICAS:**

