



UNIVERSIDAD NACIONAL
DE MAR DEL PLATA



FACULTAD
DE INGENIERIA

Proyecto Trabajo Final

Noviembre. 2018

GENERACIÓN DE ENERGÍA CON MATERIALES PIEZOELÉCTRICOS

CODIGO

Autores

Alumno: FISCHER, Eric Andrés.

Carrera: Ing. Eléctrica.

Alumno: DUARTE, Gastón Ezequiel.

Carrera: Ing. Eléctrica.

Tutor: AGÜERO, Carlos.

Co-Tutor:

Evaluadores: Ing. JACOB, Susana.

Ing. DIMENNA, Claudio.

Ing. MURCIA, Guillermo.



RINFI se desarrolla en forma conjunta entre el INTEMA y la Biblioteca de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Mar del Plata.

Tiene como objetivo recopilar, organizar, gestionar, difundir y preservar documentos digitales en Ingeniería, Ciencia y Tecnología de Materiales y Ciencias Afines.

A través del Acceso Abierto, se pretende aumentar la visibilidad y el impacto de los resultados de la investigación, asumiendo las políticas y cumpliendo con los protocolos y estándares internacionales para la interoperabilidad entre repositorios



Esta obra está bajo una [Licencia Creative Commons Atribución-
NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/).

Índice

1	Introducción.....	8
1.1	Objetivo del trabajo	9
2	Antecedentes	10
2.1	Matriz energética.	10
2.1.1	Evolución de la matriz de energía primaria en la Argentina.....	13
2.1.2	Balance eléctrico	17
2.1.3	Potencia Instalada	19
2.1.4	Demanda de energía eléctrica.....	21
2.1.5	Crisis energética Argentina.....	22
2.2	Las energías renovables en la Argentina.....	26
2.3	El posible aporte de los piezoeléctricos	33
3	Estado del arte.....	35
3.1	Historia.....	35
3.2	Visión actual.....	36
3.2.1	Publicaciones.....	36
3.2.2	Patentes.....	54
4	Generalidades y Fundamentos	56
4.1	Fundamentos de los materiales ferroeléctricos [25].....	56
4.1.1	Dieléctricos	56
4.1.2	Ferroeléctricidad	59
4.2	Efecto piezoeléctrico	65
4.2.1	Generadores de alta tensión (magiclick):	66
4.2.2	Transductores de ultrasonido de alta intensidad:	67
4.2.3	Transductores ultrasónicos de baja intensidad:.....	67
4.2.4	Sistemas de flexión:.....	68
4.2.5	Otras aplicaciones:	68
4.3	Las cerámicas piezoeléctricas	69
4.3.1	Polarización Ferroeléctrica	71
4.3.2	Ecuaciones fundamentales.....	72
4.3.3	Método de fabricación de las cerámicas piezoeléctricas	76
4.3.4	Comportamiento de las cerámicas piezoeléctricas.....	78
4.3.5	Cerámica PZT.....	79

4.3.6	Fabricación del PZT	80
4.3.7	Popularidad de cerámica PZT	81
4.3.8	Cerámicas blandas vs cerámicas duras	81
4.4	Resumen de Materiales y Aplicaciones	82
4.5	Comportamiento de un material piezoeléctrico	83
4.5.1	Determinación de la frecuencia de resonancia	84
4.5.2	Modelo eléctrico de un piezoeléctrico generador de energía.....	85
4.5.3	Comportamiento del piezoeléctrico bajo carga cuasi-estática	87
4.5.4	Comportamiento del piezoeléctrico bajo carga dinámica.....	87
4.5.5	Comportamiento del paso humano	87
4.5.6	Conclusión del modelo	89
5	Aplicaciones de las cerámicas piezoeléctricas.....	89
5.1	Generadores piezoeléctricos	89
5.2	Sensores Piezoeléctricos.....	90
5.3	Piezo actuadores	90
5.4	Transductores piezoeléctricos	90
5.5	La energía piezoeléctrica aplicada a suelos generadores de energía	91
5.6	Energía eólica piezoeléctrica	91
5.7	Motores piezoeléctricos para unos helicópteros más ecológicos.....	95
5.8	Fabricantes	95
5.8.1	Pavegen.....	95
5.8.2	Samsung, Sud África	98
5.8.3	Innowattech	100
5.8.4	East Japan Railway Company	104
6	Cálculo económico de implementación de energía eléctrica mediante baldosas piezoeléctricas	105
6.1	Objetivos del proyecto económico:	105
6.2	Resumen de la metodología utilizada	106
6.3	Etapa 1: Determinación de la potencia eléctrica	107
6.3.1	Cálculo de potencia	107
6.4	Etapa 2: Evaluación de fabricantes de baldosas	108
6.4.1	Evaluación de alternativas	108
6.4.2	Elección	108

6.4.3 Características de las baldosas	108
6.5 Etapa 3: Determinación del banco de baterías e inversor.....	115
6.6 Resumen de equipamiento necesario.....	117
6.7 Etapa 4: Evaluación de rentabilidad del proyecto	117
6.7.1 Inversión Total	117
6.7.2 Gastos de estudio e investigaciones previas del proyecto	118
6.7.3 Costo de kit de baldosas Pavegen FOB (free on board).	118
6.7.4 Costo de flete y seguros	119
6.7.5 Aranceles aduaneros de importación para generadores de energías renovables	119
6.7.6 Costo de inversor.....	119
6.7.7 Costo de banco de baterías.....	119
6.7.8 Costo de insumos y consumibles.	119
6.7.9 Costo de mano de obra y servicios externos.....	119
6.7.10 Costo de mantenimiento.....	120
6.7.11 Costo de depreciación	120
6.7.12 Cálculo de la inversión.....	123
6.7.13 Análisis de la Rentabilidad.....	124
6.7.14 Cuadro de usos y fuentes.....	126
6.8 Comparación entre la inversión de un sistema de energía solar fotovoltaica y un sistema piezoeléctrico.....	129
6.8.1 Calculo de inversión para un sistema de energía solar fotovoltaica	129
7 Posibles nichos de aplicación	135
8 Conclusión	137
9 Anexo I: Detalles del cálculo económico	141
10 Anexo II: Publicaciones más citadas de materiales piezoeléctricos	143
11 Bibliografía	155

Índice de Figuras

ILUSTRACIÓN 1: EFECTO PIEZOELÉCTRICO [3].....	8
ILUSTRACIÓN 2: MATRIZ ENERGÉTICA MUNDIAL EN EL AÑO 2016. ELABORACIÓN PROPIA CON DATOS DE [5] .	11
ILUSTRACIÓN 3: MATRIZ ENERGÉTICA ARGENTINA AÑO 2016. ELABORACIÓN PROPIA CON DATOS DE [4]	12
ILUSTRACIÓN 4: MATRIZ DE GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA ARGENTINA EN EL AÑO 2017. ELABORACIÓN PROPIA CON DATOS DE [7].....	13
ILUSTRACIÓN 5:MATRIZ ENERGÉTICA ARGENTINA AÑO 1970 [6].....	14
ILUSTRACIÓN 6: MATRIZ ENERGÉTICA ARGENTINA AÑO 1980 [6]	14
ILUSTRACIÓN 7: MATRIZ ENERGÉTICA ARGENTINA AÑO 1990 [6]	15
ILUSTRACIÓN 8: MATRIZ ENERGÉTICA ARGENTINA AÑO 2000 [6]	15
ILUSTRACIÓN 9: MATRIZ ENERGÉTICA ARGENTINA AÑO 2010 [6]	16
ILUSTRACIÓN 10: DEMANDA DEL MERCADO ELÉCTRICO MAYORISTA 2016 [9]	18
ILUSTRACIÓN 11: OFERTA DEL MERCADO ELÉCTRICO MAYORISTA 2016 [9]	19
ILUSTRACIÓN 12: POTENCIA INSTALADA POR TECNOLOGÍA 2007-2016. [9]	20
ILUSTRACIÓN 13: POTENCIA INSTALADA POR TECNOLOGÍA 2016. [9]	20
ILUSTRACIÓN 14: POTENCIA INSTALADA POR REGIÓN 2016 [9].....	21
ILUSTRACIÓN 15: PRODUCCIÓN Y CONSUMO DE PETRÓLEO EN ARGENTINA [11].....	23
ILUSTRACIÓN 16: PRODUCCIÓN Y CONSUMO DE GAS NATURAL EN ARGENTINA [11].....	23
ILUSTRACIÓN 17: EVOLUCIÓN ANUAL DEL PRECIO MEDIO DEL PETRÓLEO CRUDO FIJADO POR LA OPEP. [14]	24
ILUSTRACIÓN 18: PAÍSES MIEMBROS DE LA OPEP	25
ILUSTRACIÓN 19: METAS ESTABLECIDAS PARA GENERACIÓN DE ENERGÍA RENOVABLE EN ARGENTINA (LEY N° 27191) [14]	28
ILUSTRACIÓN 20: POTENCIA INSTALADA DE CADA TECNOLOGÍA [18].....	29
ILUSTRACIÓN 21: POTENCIA INSTALADA POR REGIÓN [18].....	30
ILUSTRACIÓN 22: UBICACIÓN DE LOS PROYECTOS ADJUDICADOS DE ENERGÍAS RENOVABLES EN ARGENTINA. [19]	31
ILUSTRACIÓN 23: INVERSIÓN ACUMULADA EN EERR EN ARGENTINA (EN MILLONES DE USD) [14]	32
ILUSTRACIÓN 24: DENSIDAD DE POTENCIA EN FUNCIÓN DE LA TENSIÓN [2]	34
ILUSTRACIÓN 25: PIERRE CURIE [46].....	35
ILUSTRACIÓN 26: NUMERO DE PUBLICACIONES SOBRE PIEZOELÉCTRICO POR AÑO. ELABORACIÓN PROPIA CON DATOS DE [24].....	37
ILUSTRACIÓN 27: PORCENTAJE A NIVEL MUNDIAL DE PUBLICACIONES SOBRE PIEZOELÉCTRICO. ELABORACIÓN PROPIA CON DATOS DE [24].....	38
ILUSTRACIÓN 28: NUMERO DE PUBLICACIONES EN ARGENTINA SOBRE PIEZOELÉCTRICO POR AÑO. ELABORACIÓN PROPIA CON DATOS DE [24].....	40
ILUSTRACIÓN 29: PUBLICACIONES A NIVEL MUNDIAL PIEZOELÉCTRICO EN ING. ELÉCTRICA. ELABORACIÓN PROPIA CON DATOS DE [24].....	40
ILUSTRACIÓN 30: PUBLICACIONES ARGENTINAS SOBRE PIEZOELÉCTRICO EN ING. ELÉCTRICA. ELABORACIÓN PROPIA CON DATOS DE [24].....	41
ILUSTRACIÓN 31: PUBLICACIONES SOBRE PIEZOELECTRICIDAD. ELABORACIÓN PROPIA CON DATOS DE [24]..	42
ILUSTRACIÓN 32: PORCENTAJE A NIVEL MUNDIAL DE PUBLICACIONES SOBRE PIEZOELECTRICIDAD. ELABORACIÓN PROPIA CON DATOS DE [24].....	43
ILUSTRACIÓN 33: PUBLICACIONES PIEZOELECTRICIDAD ING. ELÉCTRICA. ELABORACIÓN PROPIA CON DATOS DE [24]	45
ILUSTRACIÓN 34: PUBLICACIONES PIEZOELECTRIC ENERGY HARVESTING. ELABORACIÓN PROPIA CON DATOS DE [24].....	46
ILUSTRACIÓN 35: PORCENTAJE A NIVEL MUNDIAL DE PUBLICACIONES SOBRE PIEZOELECTRIC ENERGY HARVESTING. ELABORACIÓN PROPIA CON DATOS DE [24].....	46
ILUSTRACIÓN 36: ELEMENTOS PUBLICADOS CADA AÑO [24]	48
ILUSTRACIÓN 37: CITAS CADA AÑO [24]	48
ILUSTRACIÓN 38: PUBLICACIONES PIEZOELECTRIC TILE. ELABORACIÓN PROPIA CON DATOS DE [24].....	50

ILUSTRACIÓN 39: PORCENTAJE A NIVEL MUNDIAL DE PUBLICACIONES SOBRE BALDOSAS PIEZOELECTRICAS. ELABORACIÓN PROPIA CON DATOS DE [24].....	50
ILUSTRACIÓN 40: ELEMENTOS PUBLICADOS CADA AÑO [24]	51
ILUSTRACIÓN 41: CITAS CADA AÑO [24]	52
ILUSTRACIÓN 42: EVOLUCIÓN DE PUBLICACIONES DE PATENTES SOBRE PIEZOELECTRICIDAD. ELABORACIÓN PROPIA CON DATOS DE [3].....	55
ILUSTRACIÓN 43: MECANISMO DE POLARIZACIÓN DENTRO DE UN DIELECTRICO.....	57
ILUSTRACIÓN 44: CURVA DE DISPERSIÓN ELÉCTRICA GENERADA POR LOS DIFERENTES MECANISMOS DE POLARIZACIÓN.....	59
ILUSTRACIÓN 45: ESQUEMA DE LOS GRUPOS PUNTUALES DE SIMETRÍA Y LA RELACIÓN CON LOS FENÓMENOS DE PIEZO-FERROELÉCTRICIDAD.	60
ILUSTRACIÓN 46: TRANSICIÓN DEL ESTADO FERROELÉCTRICO A PARAELECTRICO	61
ILUSTRACIÓN 47: POLARIZACIÓN DE LA CERÁMICA (A) ANTES Y (B) DE APLICAR UN CAMPO ELÉCTRICO.	62
ILUSTRACIÓN 48: CURVA DE HISTÉRESIS DE UN MATERIAL FERROELÉCTRICO.....	62
ILUSTRACIÓN 49: IMAGEN DE LA ESTRUCTURA CRISTALINA TIPO PEROVSKITA (A) EN ESTADO PARAELECTRICO, (CELDA CÚBICA) (B) EN ESTADO FERROELÉCTRICO (CELDA TETRAGONAL).....	63
ILUSTRACIÓN 50: DIAGRAMA DE FASES DEL ZIRCONATO-TITANATO DE PLOMO, PZT	64
ILUSTRACIÓN 51: UBICACIÓN DE DIPOLOS ANTES (A) Y DESPUÉS (B) DE LA POLARIZACIÓN [36]	69
ILUSTRACIÓN 52: SECCIÓN TRANSVERSAL DE UN MATERIAL FERROELÉCTRICO [32].....	70
ILUSTRACIÓN 53: POLARIZACIÓN DE UN MATERIAL PIEZOELECTRICO [32].....	71
ILUSTRACIÓN 54: ORIENTACIÓN DE DIPOLOS [32]	72
ILUSTRACIÓN 55: DEFINICIÓN DE LAS LÍNEAS DE LOS EJES DE UN MATERIAL PIEZOELECTRICO.....	73
ILUSTRACIÓN 56: MODO 33.....	73
ILUSTRACIÓN 57: MODO 31.....	74
ILUSTRACIÓN 59: CURVA DE HISTÉRESIS PARA LA POLARIZACIÓN. [40]	77
ILUSTRACIÓN 60: AUMENTO RELATIVO/ DISMINUCIÓN DE LA DIMENSIÓN EN LA DIRECCIÓN DE LA POLARIZACIÓN. [40]	78
ILUSTRACIÓN 61: COMPORTAMIENTO PIEZOELECTRICO. [40].....	79
ILUSTRACIÓN 62: PROCESO DE FABRICACIÓN DEL PZT [40].....	80
ILUSTRACIÓN 63: GRÁFICO PARA DETERMINAR LA FRECUENCIA DE RESONANCIA [40]	85
ILUSTRACIÓN 64: MODELO ELÉCTRICO DEL MATERIAL PIEZOELECTRICO.....	85
ILUSTRACIÓN 65: COMPORTAMIENTO PIEZOELECTRICO BAJO CARGA CUASI-ESTÁTICA	87
ILUSTRACIÓN 66: COMPORTAMIENTO PIEZOELECTRICO BAJO CARGA DINÁMICA	87
ILUSTRACIÓN 67: FASES DE PASOS HUMANOS.....	88
ILUSTRACIÓN 68: FRECUENCIA DE DOS PASOS DE DIFERENTES PERSONAS	89
ILUSTRACIÓN 69: PROYECTO DE GENERACIÓN PIEZOELECTRICA EN EL EDIFICIO SÖDER TORN [45].....	92
ILUSTRACIÓN 70: CAMBIO HISTÓRICO Y PROYECTO DE GENERACIÓN ELÉCTRICA DEL EDIFICIO SÖDER TORN EN ESTOCOLMO [45].....	92
ILUSTRACIÓN 71: EDIFICIO SÖDER TORN, ESTOCOLMO [45]	93
ILUSTRACIÓN 72: FILAMENTOS PIEZOELECTRICOS [45]	93
ILUSTRACIÓN 73: VISTA EN CORTE Y FOTOREALISMO DE LA TORRE SÖDER TORN [45].....	94
ILUSTRACIÓN 74: HELICÓPTERO CON USO DE MATERIALES PIEZOELECTRICOS [46].....	95
ILUSTRACIÓN 75: CAMPO DE FÚTBOL RIO DE JANEIRO [41].....	96
ILUSTRACIÓN 76: CAMPO DE FÚTBOL RIO DE JANEIRO [41].....	96
ILUSTRACIÓN 77: TERMINAL 3, AEROPUERTO DE HEATHROW [41].....	97
ILUSTRACIÓN 78: CAMPO DE FÚTBOL LAGOS, NIGERIA [41]	97
ILUSTRACIÓN 79: HARRODS, LONDRES [41].....	98
ILUSTRACIÓN 80: SANDTON CITY MALL, SUD ÁFRICA [41]	98
ILUSTRACIÓN 81: ESTACIÓN DE TREN DE ST. OMER, FRANCIA [41].....	99
ILUSTRACIÓN 82: WEST HAM STATION, JUEGOS OLÍMPICOS LONDRES 2012 [41].....	100
ILUSTRACIÓN 83: FEDERATION SQUARE, MELBOURNE AUSTRALIA [41]	100
ILUSTRACIÓN 84: TIPOS DE BALDOSAS GENERADORAS DE ENERGÍA [48].....	101

ILUSTRACIÓN 85: ESQUEMA DE INSTALACIÓN SISTEMA PIEZOELÉCTRICO DE TELECONTROL [48].....	102
ILUSTRACIÓN 86: FORMA DE INSTALACIÓN [48]	102
ILUSTRACIÓN 87: ELEMENTO PIEZOELÉCTRICO PARA VÍAS FÉRREAS [48]	103
ILUSTRACIÓN 88: SISTEMA PIEZOELÉCTRICO FERROVIARIO [48]	103
ILUSTRACIÓN 89: ESTACIÓN DE TOKIO EN LA QUE SE APRECIA EL USO DE MATERIALES PIEZOELÉCTRICOS EN LAS VALLAS DE ENTRADA PARA LA GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA. [46].....	105
ILUSTRACIÓN 90: LUMINARIAS DE SENDA PEATONAL	107
ILUSTRACIÓN 91: BALDOSA PAVEGEN V3	109
ILUSTRACIÓN 92: COMPOSICIÓN CONSTRUCTIVA DE BALDOSA PAVEGEN	109
ILUSTRACIÓN 93: ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DE BALDOSA PAVEGEN	110
ILUSTRACIÓN 94: DIAGRAMA DEL SISTEMA PAVEGEN	111
ILUSTRACIÓN 95: CONTROLADOR INTELIGENTE PAVEGEN.....	111
ILUSTRACIÓN 96: CARGADOR INTELIGENTE DE BATERÍAS PAVEGEN.....	112
ILUSTRACIÓN 97: INSTALACIÓN DE BALDOSAS PAVEGEN.....	112
ILUSTRACIÓN 98: INSTALACIÓN DE BALDOSAS PAVEGEN.....	113
ILUSTRACIÓN 99: MÓDULO DE BALDOSA PAVEGEN	115
ILUSTRACIÓN 100: DESPIECE DE BALDOSA PAVEGEN	115
ILUSTRACIÓN 101: CICLOS DE VIDA ÚTIL VS PORCENTAJE DE DESCARGA EN BATERÍAS TROJAN.....	116
ILUSTRACIÓN 102: SISTEMA DE ILUMINACIÓN SOLAR.....	130
ILUSTRACIÓN 103: MATERIALES PIEZOELÉCTRICOS EN CARRETERAS	136
ILUSTRACIÓN 104: MATERIALES PIEZOELÉCTRICOS EN VÍAS DE FERROCARRIL.....	136

Índice de tablas

TABLA 1: BALANCE DEL MERCADO ELÉCTRICO MAYORISTA 2007-2016 [9].	18
TABLA 2: POTENCIA INSTALADA POR TECNOLOGÍA 2007-2016 [9]	19
TABLA 3: DEMANDA DE ENERGÍA ELÉCTRICA POR DEMANDA DE USUARIO [9]	21
TABLA 4: RESULTADO DE LAS SUCESIVAS RONDAS DEL PROGRAMA ENOVAR A FEBRERO DE 2018 [14].....	29
TABLA 5: POTENCIA INSTALADA POR REGIÓN [18].....	30
TABLA 6: NÚMERO DE PUBLICACIONES A NIVEL MUNDIAL. ELABORACIÓN PROPIA CON DATOS DE [24].	39
TABLA 7: NÚMERO DE PUBLICACIONES A NIVEL MUNDIAL QUE CONTIENEN LA PALABRA PIEZOELECTRICIDAD. ELABORACIÓN PROPIA CON DATOS DE [24].....	44
TABLA 8: NÚMERO DE PUBLICACIONES A NIVEL MUNDIAL QUE CONTIENEN LA PALABRA PIEZOELECTRIC ENERGY HARVESTING. ELABORACIÓN PROPIA CON DATOS DE [24].	47
TABLA 9: LAS 10 PUBLICACIONES MÁS CITADAS SOBRE PIEZOELECTRIC ENERGY HARVESTING. ELABORACIÓN PROPIA CON DATOS DE [24].	49
TABLA 10: NUMERO DE PUBLICACIONES SOBRE BALDOSAS PIEZOELÉCTRICAS A NIVEL MUNDIAL. ELABORACIÓN PROPIA CON DATOS DE [24].	51
TABLA 11: LAS 10 PUBLICACIONES MÁS CITADAS SOBRE BALDOSAS PIEZOELÉCTRICAS. ELABORACIÓN PROPIA CON DATOS DE [24].	53
TABLA 12: PROPIEDADES PZT [29]	64
TABLA 13: PRINCIPALES MATERIALES PIEZOELÉCTRICOS COMERCIALES Y SUS RESPECTIVAS CONSTANTES ..	79
TABLA 14: COMPARACIÓN DE CERÁMICAS BLANDAS VS CERÁMICAS DURAS [40]	82
TABLA 15: CARACTERÍSTICAS DE DISTINTOS MATERIALES PIEZOELÉCTRICOS [22]	82
TABLA 16: COMPARATIVA ENTRE DISTINTAS TECNOLOGÍAS DE GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA [48] ...	104
TABLA 17: RESUMEN DE EQUIPAMIENTO NECESARIO. ELABORACIÓN PROPIA.	117
TABLA 18: CÁLCULO DE INVERSIÓN	123
TABLA 19: TABLA DE USOS Y FUENTES.....	127
TABLA 20: CALCULO DE INVERSIÓN ILUMINACIÓN UTILIZANDO PANELES SOLARES.....	132
TABLA 21: TABLA DE USOS Y FUENTES.....	134

Prefacio

La recolección de la energía que se disipa a diario en el ambiente ha sido de gran interés durante las últimas décadas, donde un aumento en el precio de los combustibles fósiles y nuevas regulaciones ambientales cada vez más estrictas han motivado el estudio en esta área en ámbitos académicos e industriales. En este sentido la recolección de energía proveniente de tensiones y deformaciones mecánicas ha tenido una explosión en investigación académica y desarrollo de nuevos productos en los últimos años. Una de las áreas de interés es el uso del efecto piezoeléctrico para convertir la deformación de un sólido en energía eléctrica útil. La mayoría de los productos actualmente disponibles para la recolección de energía están basados en el uso del efecto piezoeléctrico. Estos dispositivos impulsan aplicaciones eléctricas de baja potencia no conectadas a la red eléctrica, como por ejemplo la señalización lumínica mediante tecnología LED que incrementa la seguridad en rutas. Esta señalización utiliza como sensores y generadores pastillas de material piezoeléctrico, las cuales están insertas en la cinta asfáltica [1]. El objetivo de esta tecnología es el de proveer una fuente de energía eléctrica remota para recargar dispositivos de almacenamiento, tales como baterías y capacitores. Este concepto tiene una arista ecológica al reducir los residuos químicos sustituyendo baterías y una arista económica al reducir costos de operación y mantenimiento. Otra posible utilización de estos materiales es la de inyección a la red de energía eléctrica bajo el concepto de generación distribuida. Además, como ya fue ejemplificado, los dispositivos piezoeléctricos poseen el potencial de realizar un doble propósito en sistemas de monitoreo y control sin conexión a la red, tales como controles de barreras en pasos a nivel y distancias de seguridad en formaciones ferroviarias, actuando como sensores y suministrando la energía necesaria para hacer funcionar estos sistemas. También esta tecnología puede ser utilizada como fuente de energía de reserva en caso de fallos de suministro de la red eléctrica, como por ejemplo semáforos en intersecciones de alto tránsito, aumentando de esta forma la robustez del sistema. [2]

A lo anteriormente expuesto añadiremos que el deterioro medio ambiental, la coyuntura política, la presente deficiencia en infraestructura, los problemas económicos y sociales, el colapso de la matriz energética nacional nos brinda una fuerte responsabilidad y estímulo para que nosotros como futuros Ingenieros Electricistas busquemos nuevas soluciones innovadoras para el desarrollo de las energías renovables en la República Argentina.

1 Introducción

Definición: El efecto piezoeléctrico describe la relación entre una tensión mecánica y una tensión eléctrica en sólidos. Es la capacidad de ciertos materiales (minerales, cerámicos y algunos polímeros) para producir una carga eléctrica en respuesta a un esfuerzo mecánico aplicado. También puede observarse el efecto inverso, en el que los materiales piezoeléctricos se deforman por la aplicación de un campo eléctrico.

A continuación, se muestra esquemáticamente el efecto piezoeléctrico:

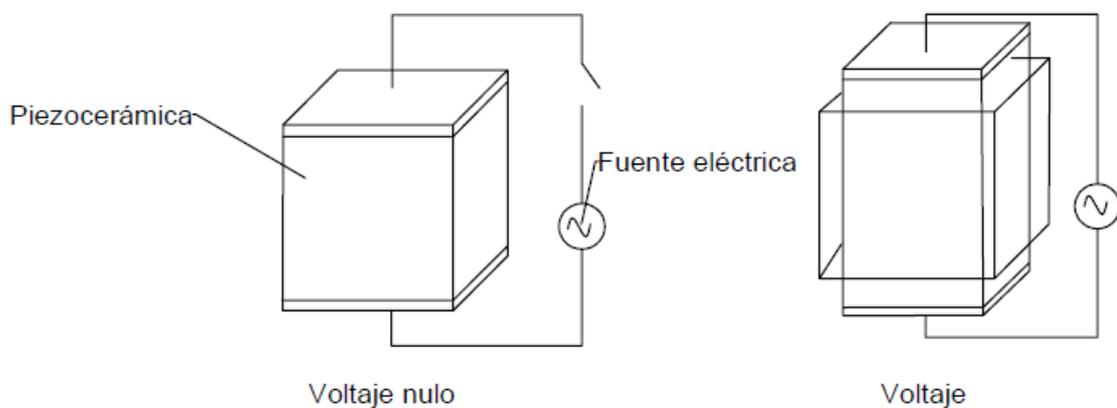


Ilustración 1: Efecto piezoeléctrico [3]

Este efecto se conoce hace más de un siglo y se usa hace décadas en aplicaciones cotidianas como calefactores, cocinas y encendedores, entre otros. Por ejemplo, cuando prendemos un calefactor accionando un pulsador, lo que sucede internamente es que se produce una deformación mecánica de un material piezoeléctrico (en este caso el cuarzo), y el mismo causa un arco eléctrico. Este efecto es aprovechado luego para iniciar la llama.

A pesar de esta cotidianidad, vemos que en la actualidad no existe en el país ningún dispositivo instalado para la generación de energía eléctrica que utilice el efecto piezoeléctrico. Fue esto lo que nos impulsó en un primer momento a desarrollar este trabajo, dado que en la Argentina cerca del 90% de la energía que se consume provienen de fuentes no renovables como el gas y el petróleo. Tanto la energía hidráulica y nuclear han crecido en los últimos cuarenta años, aunque no superan el 6% de la matriz energética total.

Las energías renovables aún no tienen un impacto considerable sobre la oferta total de energía en nuestro país. Sin embargo, gracias a las políticas de fomento como el Programa de Energías Renovables RenovAr, progresivamente adquieren mayor relevancia para la generación de energía eléctrica y se espera que en los próximos

años aumenten su participación en la matriz energética total hasta llegar al 20% en año 2025.

1.1 Objetivo del trabajo

El objetivo de este trabajo es la investigación del estado actual de la tecnología de recolección de energía utilizando materiales piezoeléctricos.

Uno de los puntos en los cuales nos centraremos es en la obtención de datos estadísticos de publicación y citas de trabajos académicos (papers) referentes a esta temática. Se evaluará la evolución de este tema a nivel global y regional.

Otro de los puntos a considerar será el estudio del comportamiento físico del material mediante la obtención del modelo matemático.

Luego realizaremos la investigación de las diferentes aplicaciones que se le da a este material en la actualidad.

Por último, se hará un estudio de prefactibilidad donde se evaluará la inversión y rentabilidad de la implementación de baldosas piezoeléctricas para la recolección de energía piezoeléctrica en una cuadra de la peatonal San Martín de la ciudad de Mar del Plata. Además, realizaremos una comparativa entre la inversión necesaria en tecnología piezoeléctrica y solar fotovoltaica como forma de evaluar la viabilidad del proyecto frente a una solución consolidada.

Nuestra motivación como futuros Ingenieros Electricista es la de buscar soluciones innovadoras a los problemas energéticos actuales. Creemos que de la misma forma que se resuelven las ecuaciones diferenciales con la suma de una solución general y soluciones particulares, se puede resolver un problema tan complejo como la generación y suministro de energía eléctrico limpia mediante la utilización de dispositivos piezoeléctricos para la recolección de energía eléctrica, siendo estos una de las soluciones particulares en ámbitos donde las soluciones generales de energías renovables no pueden ser aplicadas.

2 Antecedentes

2.1 Matriz energética.

La matriz energética es una representación cuantitativa de la totalidad de energía que utiliza un país, e indica la incidencia relativa de las fuentes de las que procede cada tipo de energía: nuclear, hidráulica, solar, eólica, biomasa, geotérmica o combustibles fósiles como el petróleo, el gas y el carbón mineral.

La matriz energética es útil para realizar análisis y comparaciones sobre los consumos energéticos de un país a lo largo del tiempo, o para comparar con otros países, y es una herramienta fundamental para la planificación.

La Argentina, al igual que la mayoría de los países del mundo, utiliza un alto porcentaje de hidrocarburos. El petróleo y el gas natural alcanzan el 85,5% del total de la oferta energética del país [4]. La Argentina no consume cantidades significativas de carbón (1,45% del total), a diferencia de otros países como China, los Estados Unidos o Alemania, donde el carbón es una de las fuentes más utilizadas. En China, por ejemplo, el 58,9% de la energía proviene del carbón. Desde el punto de vista ambiental, el uso de gas natural es una ventaja, ya que es un combustible más limpio que el carbón, dado que produce una emisión de dióxido de carbono menor (un tercio respecto al carbón). Hay que aclarar que, cuando se habla de carbón, se trata del carbón mineral o de origen fósil, ya que el carbón vegetal que se usa en nuestro país, por ejemplo, para hacer asado, forma parte de la biomasa.

El petróleo es actualmente la fuente de energía predominante en el mundo y es una materia prima fundamental para elaborar una gran cantidad de productos de uso cotidiano. Sus propiedades lo convierten en un material único por su alto contenido energético en relación con su volumen y peso, y la facilidad para extraerlo, transportarlo y almacenarlo. El petróleo representa alrededor del 33,3% de la oferta mundial de energía y su uso es indispensable para el transporte, ya que más del 95% depende de él.

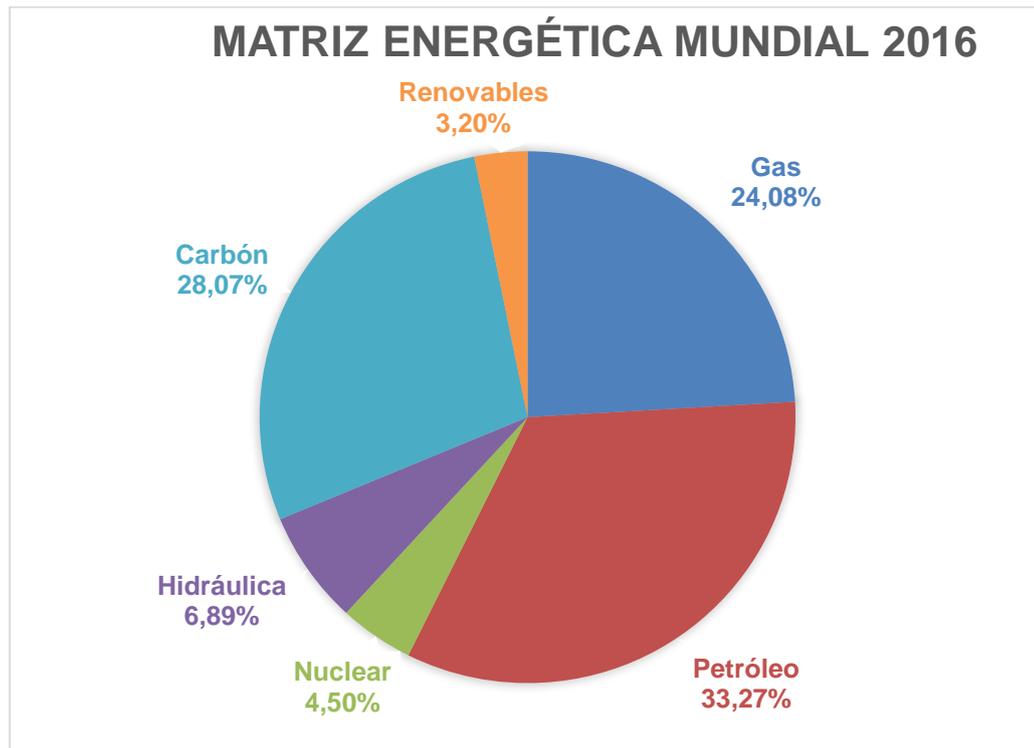


Ilustración 2: Matriz energética mundial en el año 2016. Elaboración propia con datos de [5]

En esta matriz se observa la gran dependencia de los combustibles fósiles a nivel mundial (85,42%). Se destaca una alta participación del carbón (28,07%), algo que como dijimos no ocurre en nuestro país. [6]

Argentina es el segundo productor de gas natural de América del Sur con 37.100 millones de metros cúbicos producidos en 2017 (debajo de Venezuela con 37.400 millones de metros cúbicos producidos en 2017) y un importante productor de petróleo con 593 mil barriles de crudo por día. El desarrollo del gas natural en nuestro país comenzó a fines de la década del cuarenta con la construcción del gasoducto entre Comodoro Rivadavia y Buenos Aires. Luego, en la década del setenta, con el descubrimiento del mega yacimiento de Loma la Lata en la provincia del Neuquén, comenzó el incremento del uso del gas y produjo un cambio significativo en la matriz energética nacional. Actualmente, el gas natural alcanza más de la mitad de los consumos energéticos del país (54,7%), y se utiliza como combustible en automóviles (GNC), en los hogares, la industria y la generación de energía eléctrica. [4]

El reciente desarrollo de los recursos no convencionales de gas y petróleo (shale gas y shale oil) en vaca muerta, provincia de Neuquén, permitirá abastecer la creciente demanda de energía. A nivel mundial, la Argentina tiene la segunda reserva de gas y la cuarta de petróleo no convencional, lo que posibilitaría aumentar nueve veces las reservas de petróleo y treinta veces las reservas de gas. Este potencial es fundamental para lograr el autoabastecimiento energético de manera sostenida.

Por otra parte, la energía hidráulica y la nuclear han crecido en los últimos cuarenta años debido a su gran potencial para generar electricidad. La energía eólica

y la energía solar son aún incipientes y no tienen un impacto considerable sobre la oferta total de energía del país. Sin embargo, progresivamente adquieren mayor relevancia para la generación de energía eléctrica y se espera que gracias a los programas de fomento nacionales aumente su participación en la matriz energética.

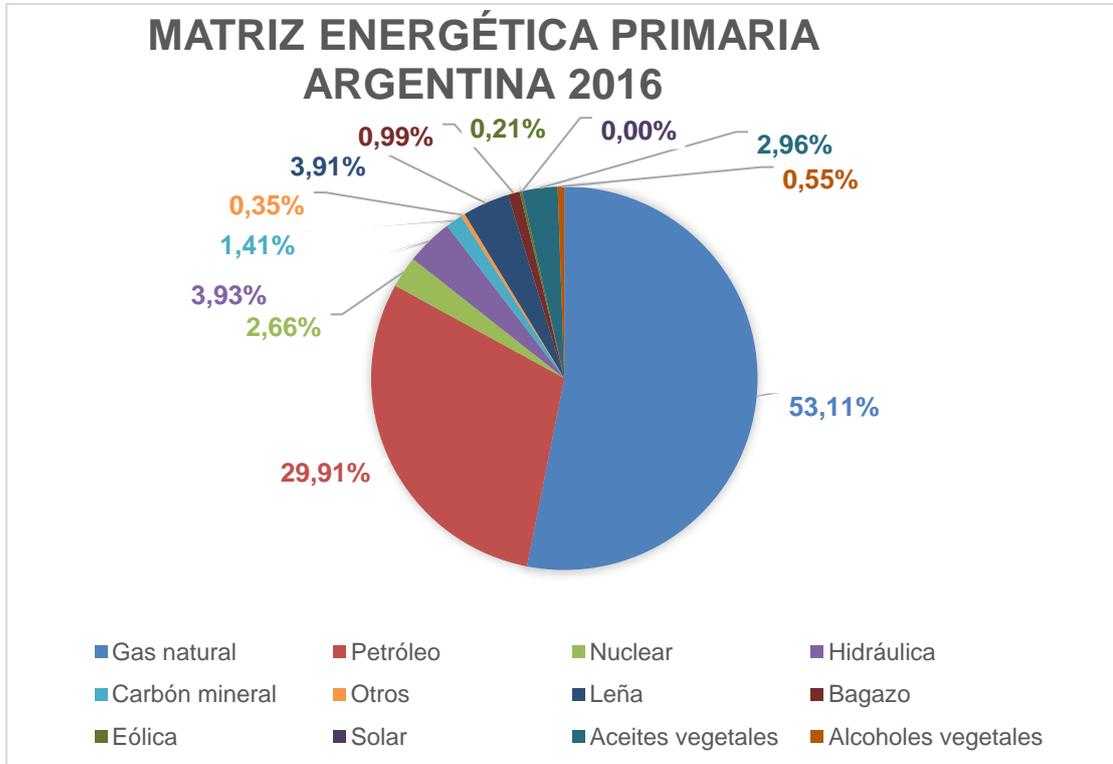


Ilustración 3: Matriz energética Argentina año 2016. Elaboración propia con datos de [4]

En esta matriz se observa la importancia del gas y el petróleo, que representan casi el 85,51% de la energía que se consume en la Argentina.

La matriz eléctrica hace referencia a las energías primarias que se utilizan en la generación de electricidad en un país. En el año 2017, en la Argentina, más del 65% de la electricidad se producía en centrales térmicas que funcionan principalmente a gas.

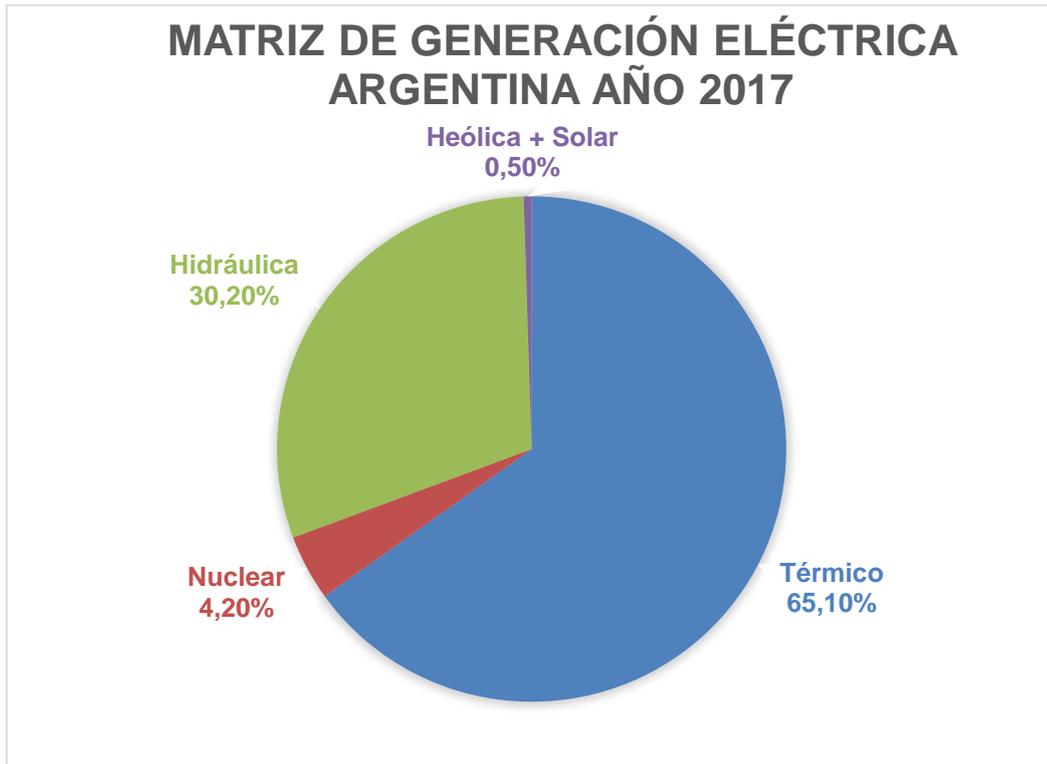


Ilustración 4: Matriz de generación de energía eléctrica Argentina en el año 2017. Elaboración propia con datos de [7]

En esta matriz se observa la actual importancia de la generación de energía térmica donde principalmente se utiliza gas natural y la destacada participación de la energía hidráulica para la generación eléctrica en el país. [7]

2.1.1 Evolución de la matriz de energía primaria en la Argentina.

A continuación, presentaremos gráficos donde se observa cómo evolucionaron los consumos energéticos en el país, se destaca la creciente participación del gas a partir de la década del setenta y la disminución de la participación del petróleo desde entonces. Esto indica la importancia que han tenido en conjunto los hidrocarburos durante los últimos cuarenta años, ya que representan casi el 90% de la los consumos. También se observa la gradual incorporación de la energía hidráulica y la energía nuclear, además de la reducción en el uso del carbón. Es importante destacar que de 1970 a la actualidad se duplicó la demanda total de energía en el país, ya que aumentó de 31.879.000 TEP a 79.543.000 TEP (toneladas equivalentes de petróleo). [6]

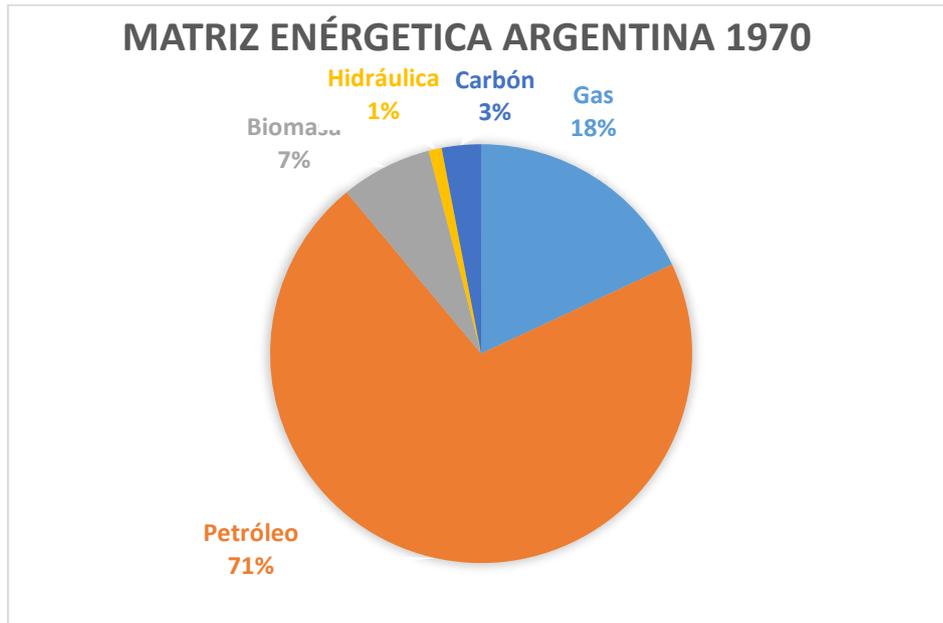


Ilustración 5: Matriz energética Argentina año 1970 [6]

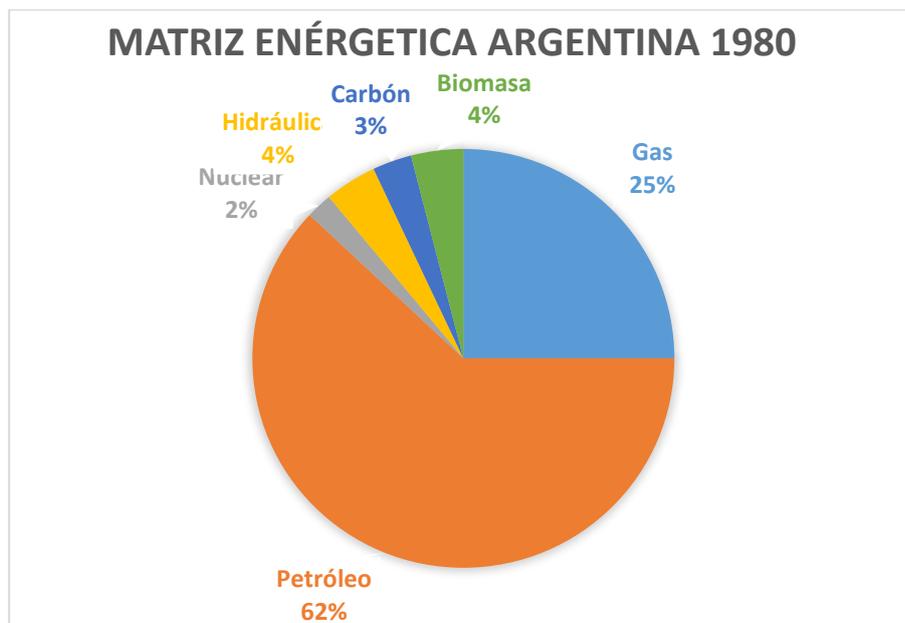


Ilustración 6: Matriz energética Argentina año 1980 [6]

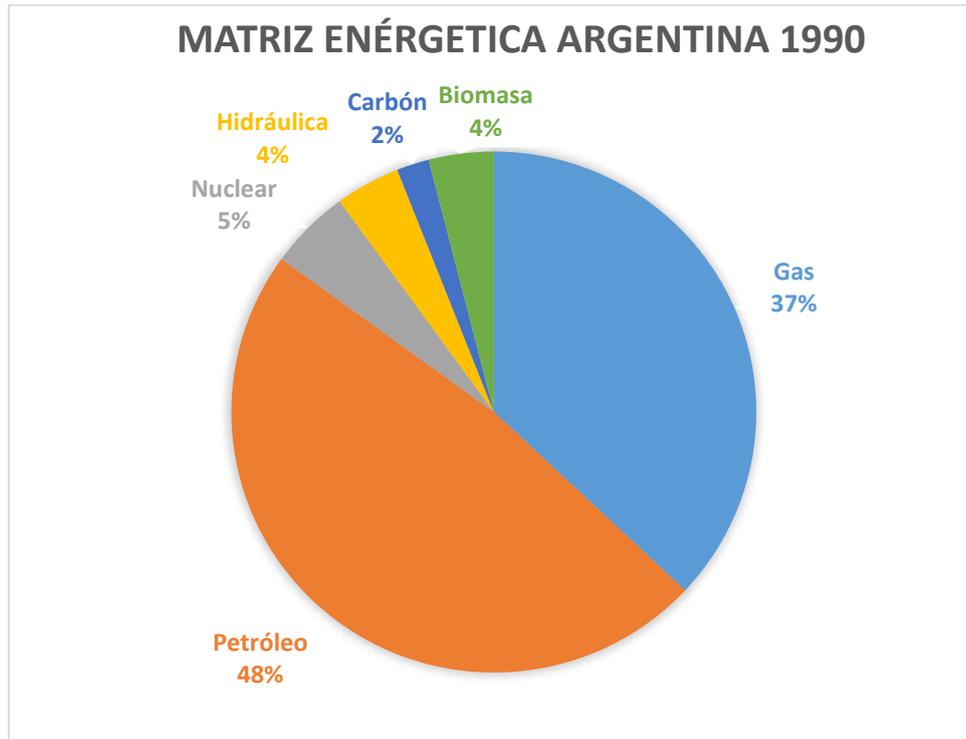


Ilustración 7: Matriz energética Argentina año 1990 [6]

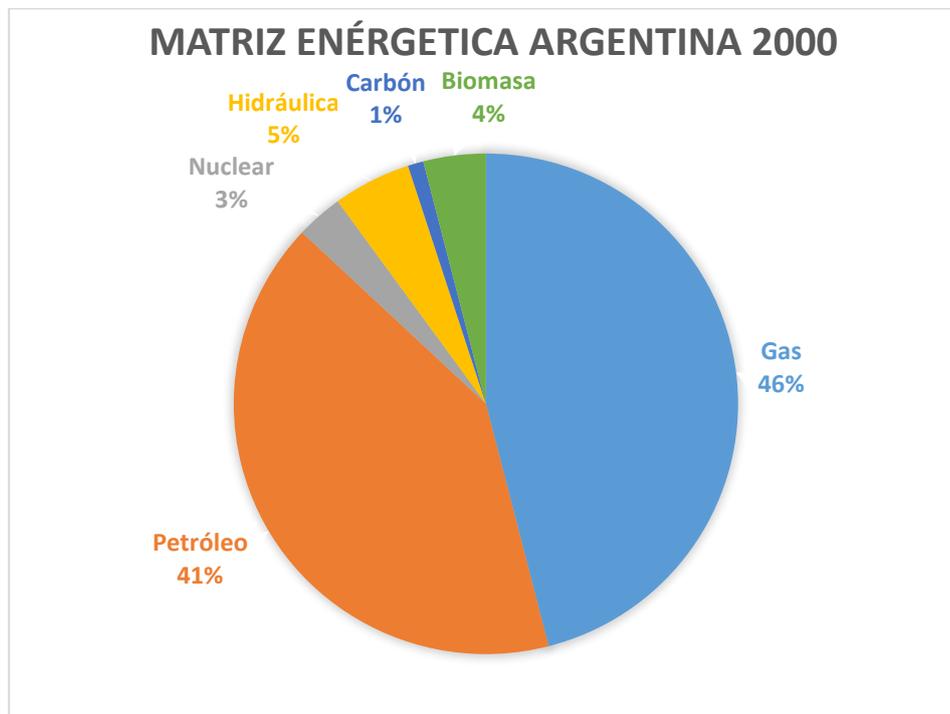


Ilustración 8: Matriz energética Argentina año 2000 [6]

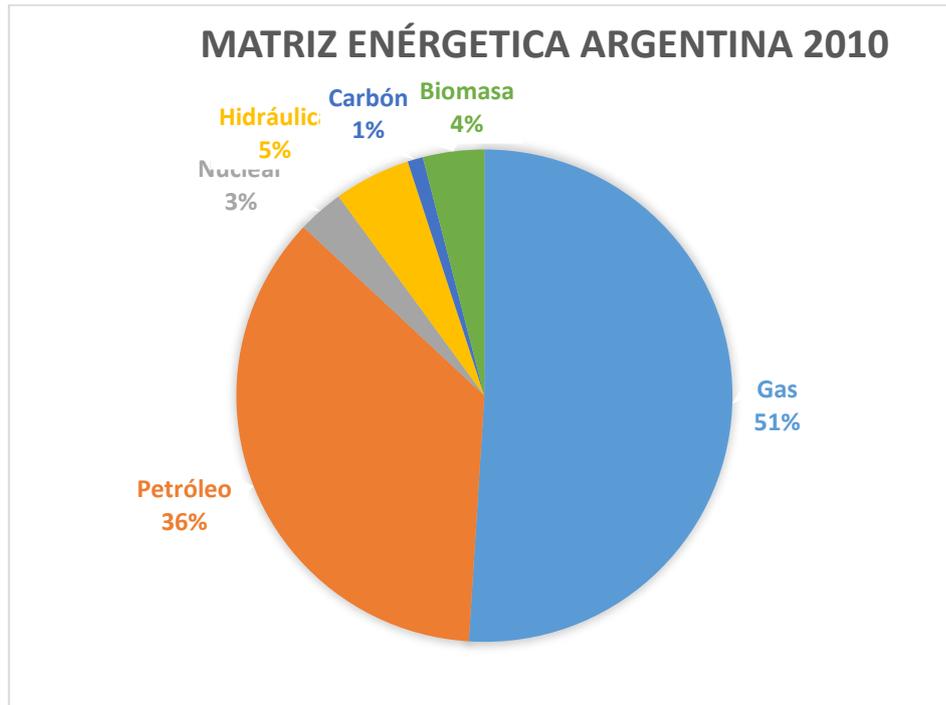


Ilustración 9: Matriz energética Argentina año 2010 [6]

En el año 2010, la demanda de energía eléctrica se ubicó alrededor de los 110.000 Giga Watt horas (GWh), representando un incremento aproximado del 6% con respecto al año anterior.

Para satisfacer dicha demanda, se utilizaron prácticamente un 100% de fuentes energéticas convencionales, las cuales incluyeron:

- Generación térmica (57%)
- Hidráulica (35%)
- Nuclear (6%)
- Importaciones de energía (2%).

La generación con fuentes renovables fue muy baja.

Argentina consumió aproximadamente 3.3 miles de billones de BTu (unidad térmica británica) según el último dato registrado en el 2009, en relación a 3.5 miles de billones de BTu de energía total producida.

Generación de energía eléctrica

La electricidad es producida por 62 compañías generadoras privadas, 7 estatales, 2 plantas de generación nuclear y 2 plantas hidroeléctricas binacionales: Yacyreta (Argentina-Paraguay) y Salto Grande (Argentina-Uruguay) y 23 grupos privados. La potencia instalada en el sistema, a finales del año 2011, era de unos 29.500 MW, de los cuales el 37.6% hidroeléctrico, el 58.9% térmico y el 3.4% nuclear. El combustible

más utilizado para la generación térmica es el gas natural. El carbón, fuel oil y gas oil, se utilizan en situaciones de restricciones, principalmente en los meses de invierno, cuando el gas se prioriza para el consumo residencial. Todas las empresas generadoras venden su producción al mercado mayorista (mercado spot o mercado a término), el cual es administrado por la Compañía Administradora del Mercado Mayorista Eléctrico (CAMMESA).

Transmisión de energía eléctrica

La transmisión de la energía está regulada. La compañía de Transporte de Energía Eléctrica en Alta Tensión (Transener) opera la red de transmisión eléctrica nacional por una concesión otorgada por el Gobierno Nacional. La transmisión regional (líneas de 132kV mayoritariamente) se realiza por empresas regionales, las cuales están concesionadas.

Distribución de energía eléctrica

La distribución eléctrica también se encuentra regulada. Entre las principales empresas se puede mencionar a la Empresa Distribuidora y Comercializadora Norte (Edenor), Empresa Distribuidora Sur (Edesur) y Empresa Distribuidora La Plata (Edelap), las cuales concentran cerca del 50% de la demanda. Existen adicionalmente, empresas distribuidoras a nivel provincial, las cuales pueden ser públicas como Córdoba (EPEC), Santa Fe (EPE); y privadas como el caso de Tucumán, Salta, Jujuy, y cooperativas que tienen a su cargo la provisión del servicio de distribución de áreas con un número menor de clientes. [8]

2.1.2 Balance eléctrico

A continuación, mostraremos datos oficiales obtenidos del Ministro de Minería y Energía del año 2016. [9]

Tabla 1: Balance del Mercado Eléctrico Mayorista 2007-2016 [9].

Año		2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
Demanda (GWh)	Agentes MEM	102960	105934	104605	110775	116507	121191	125220	126421	132102	132970
	Exportación	578	1618	1292	359	265	280	0	6	55	329
	Bombeo	571	537	714	554	566	723	500	485	578	465
	Perdidas y consumos	4373	4293	4722	4046	3894	3610	4099	4293	4136	4306
	Total demanda	108482	112382	111333	115734	121232	125804	129819	131205	136871	138070
Oferta (GWh)	Térmica	61012	66877	61386	66465	73573	82495	82953	83265	86625	90349
	hidráulica	37290	36882	40318	40226	39339	36626	40330	40663	41464	38013
	Nuclear	6721	6849	7589	6692	5892	5904	5732	5258	6519	7677
	Eólica + Solar	-	-	-	-	16	356	462	629	608	561
	Importación	3459	1774	2040	2351	2412	423	342	1390	1655	1470
	Total oferta	108482	112382	111333	115734	121232	125804	129819	131205	136871	138070

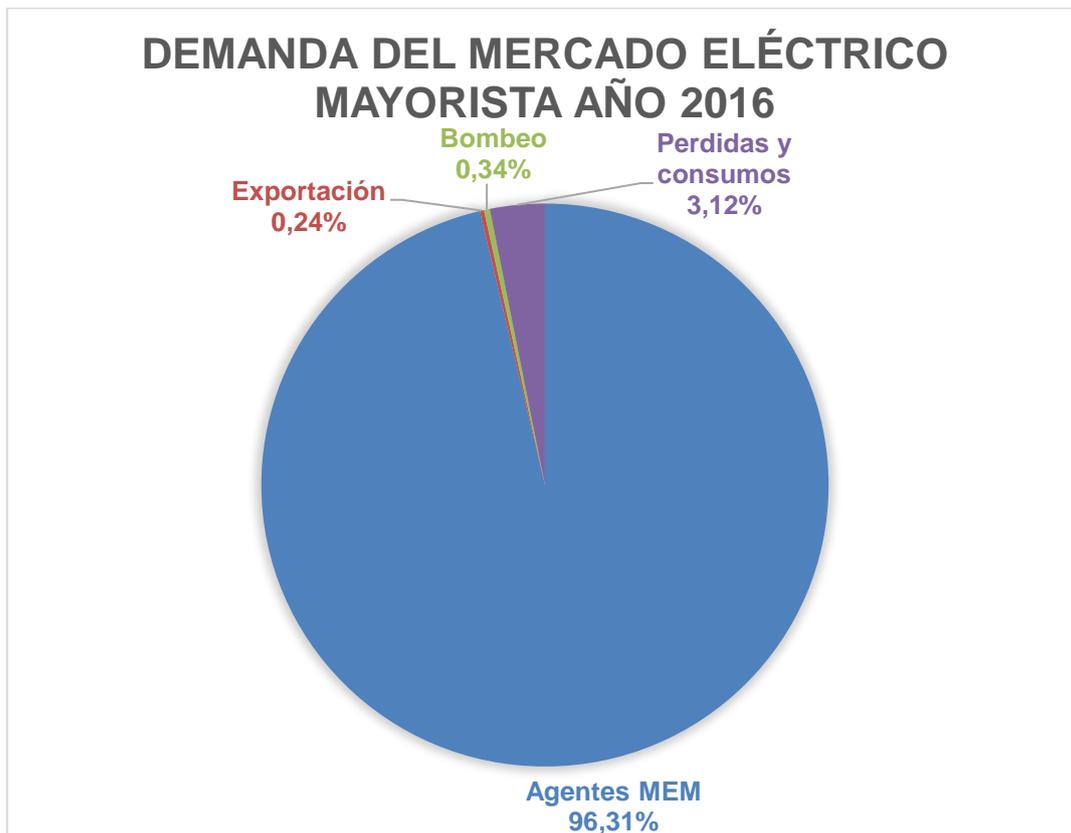


Ilustración 10: Demanda del Mercado Eléctrico Mayorista 2016 [9]

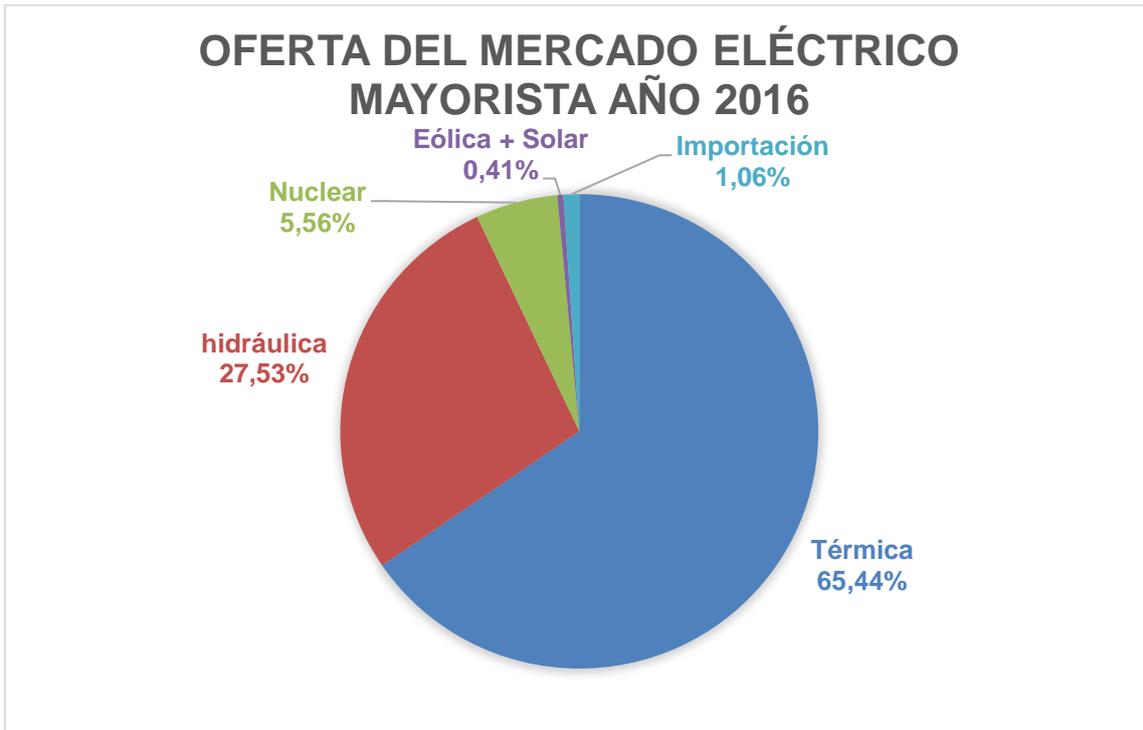


Ilustración 11: Oferta del Mercado Eléctrico Mayorista 2016 [9]

2.1.3 Potencia Instalada

Tabla 2: Potencia instalada por tecnología 2007-2016 [9]

Año	TV (MW)	TG (MW)	CC (MW)	DI (MW)	TERMICA (MW)	EO (MW)	SOL (MW)	PAH (MW)	BG (MW)	RENOVABLES (MW)	NUCLEAR (MW)	HIDRAULICA (MW)	TOTAL (MW)
2007	4573	2359	6363	26	13321	-	-	473	-	473	1005	9683	24482
2008	4438	3512	6935	267	15152	-	-	473	-	473	1005	9690	26320
2009	4438	3744	7046	398	15626	-	-	482	-	482	1005	10052	27165
2010	4438	3588	8185	607	16818	-	-	482	-	482	1005	10052	28357
2011	4445	3493	8725	1131	17794	7	1	502	-	510	1005	10563	29872
2012	4451	4036	9191	1347	19025	109	6	527	-	642	1005	10578	31250
2013	4451	4061	9191	1388	19091	162	8	528	-	698	1010	10578	31377
2014	4451	4018	9191	1416	19076	187	8	528	17	740	1010	10578	31404
2015	4451	4968	9227	1783	20429	187	8	530	17	742	1730	10578	33479
2016	4451	5251	9227	1834	20763	187	8	488	17	700	1755	10682	33900

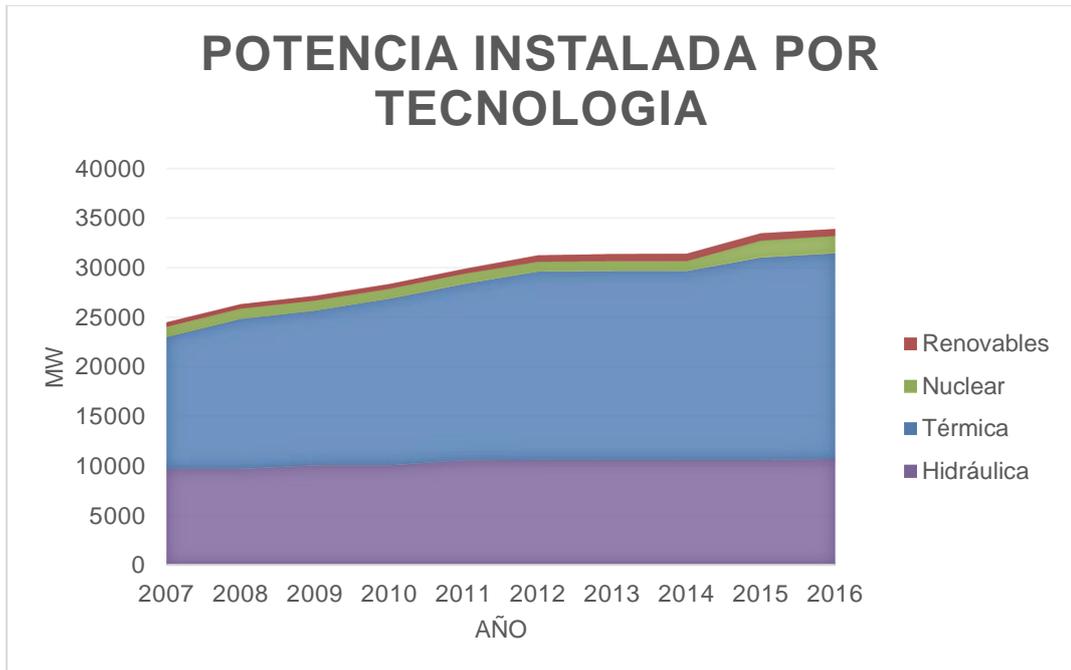


Ilustración 12: Potencia instalada por tecnología 2007-2016. [9]

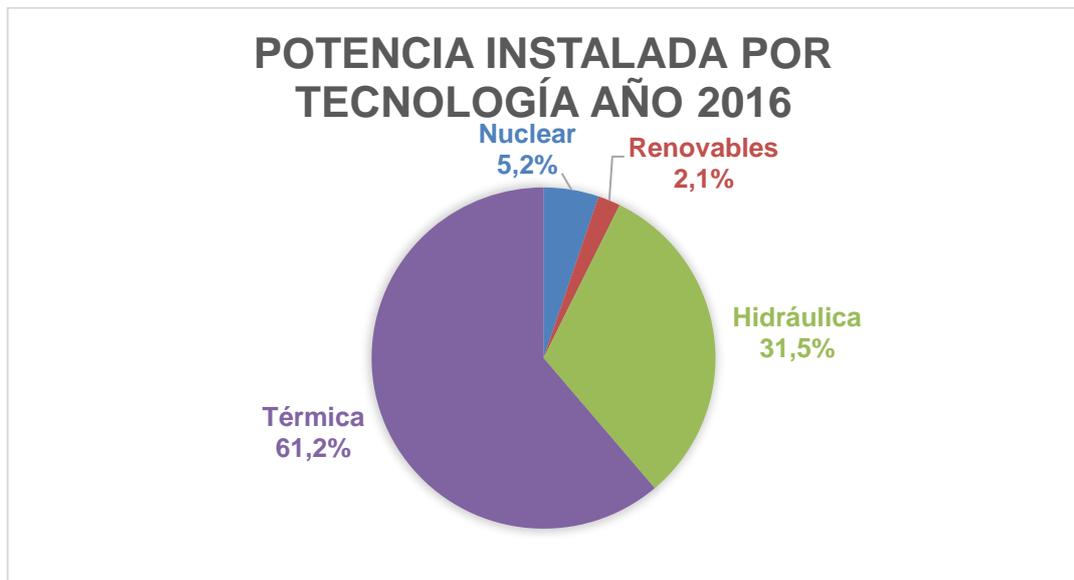


Ilustración 13: Potencia instalada por tecnología 2016. [9]

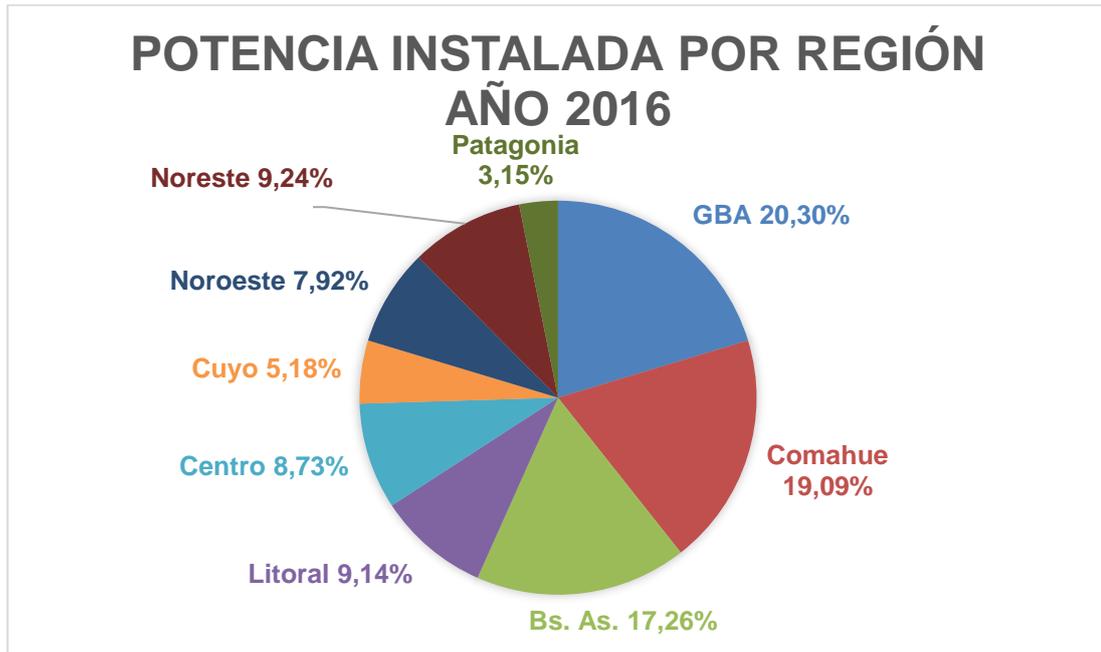


Ilustración 14: Potencia instalada por región 2016 [9]

2.1.4 Demanda de energía eléctrica

Tabla 3: Demanda de energía eléctrica por demanda de usuario [9]

Año	Residencial GWh	Consumos intermedios (de 10kW a 300 kW) GWh	Grandes demandas (más de 300 kW) GWh	Total GWh
2007	37339	30050	35580	102969
2008	39114	31387	35476	105977
2009	40122	32361	32174	104657
2010	42881	33755	34140	110776
2011	44879	35655	35973	116507
2012	47722	37696	35809	121227
2013	50381	36453	38405	125239
2014	51444	36475	38504	126423
2015	55424	37869	38816	132109
2016	57034	38909	37028	132971

2.1.5 Crisis energética Argentina

La crisis energética argentina que comenzó a manifestarse a comienzos del año 2004, puede ser interpretada como una consecuencia previsible de las políticas energéticas de los años noventa. Las reformas estructurales iniciadas durante ese periodo de tiempo implicaron el traspaso al sector privado de la casi totalidad de los servicios públicos, entre ellos los correspondientes al sector energético. En consecuencia, el Estado perdió el control de la política energética.

Los procesos de privatización de YPF, Gas del Estado, Hidronor, Agua y Energía Eléctrica y Servicios Eléctricos del Gran Buenos Aires (Segba), la creación de los Marcos Regulatorios de Electricidad y Gas, la conformación de los Entes Reguladores y la modificación de la legislación en materia de hidrocarburos a través de los llamados decretos de "desregulación petrolera", constituyeron no sólo el abandono del rol empresario del Estado, sino que en la práctica dejaron a éste con muy pocos instrumentos para conducir el rumbo de la política energética.

Tras los objetivos declarados de desmonopolizar al sector y lograr una mayor competencia en sectores donde ello muy difícilmente hubiese podido ocurrir, se instauró una hábil arquitectura de transferencia de renta hacia el sector privado. Dicha arquitectura implicó, por una parte, una relación entre la Convertibilidad en un contexto de sobrevaluación del peso, y por otra, un esquema de regulación permisivo y débil.

Luego de la salida de la convertibilidad, las contradicciones de las nuevas reglas se hicieron claras. El segmento desregulado del mercado pudo aprovechar las cláusulas de dolarización, mientras que los sectores regulados (aspirando a igual trato) demandaron a la Argentina frente al CIADI (Centro Internacional de Arreglo de Diferencias Relativas a Inversiones, foro de arbitraje y conciliación del Banco Mundial) amparándose en el Tratado Bilateral de Inversiones suscrito con los Estados Unidos.

De este modo los procesos de renegociación de tarifas se vieron obstruidos desde un principio por una actitud negativa de las empresas concesionarias y licenciatarias de electricidad y de gas que aspiraban a mantener dolarizadas sus tarifas luego de la devaluación del año 2002.

Dado que la pesificación alcanzó también al precio de gas en boca de pozo para el mercado interno, y habida cuenta de la distribución regional de reservas de gas, las restricciones de oferta no tardaron en aparecer como elemento de presión para obtener mejoras en los precios del gas. [10]

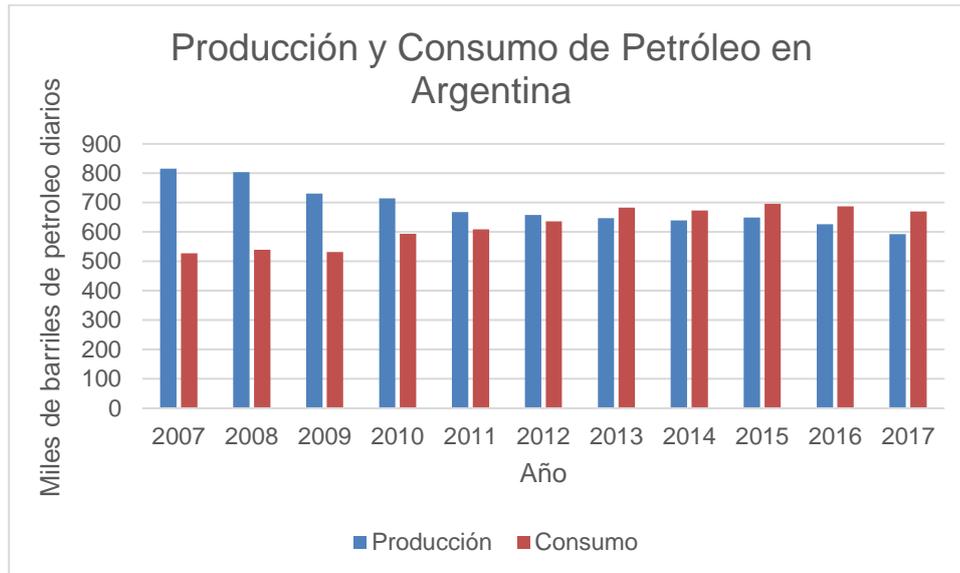


Ilustración 15: Producción y Consumo de Petróleo en Argentina [11]

En cuanto a la producción de petróleo, esta viene cayendo desde 1998, dejando de ser la Argentina exportadora de petróleo el año 2013. En la última década la producción de petróleo pasó de 816.000 barriles al día en 2007 a un valor de 593.000 en 2017 (es decir, una caída del 27,32%).

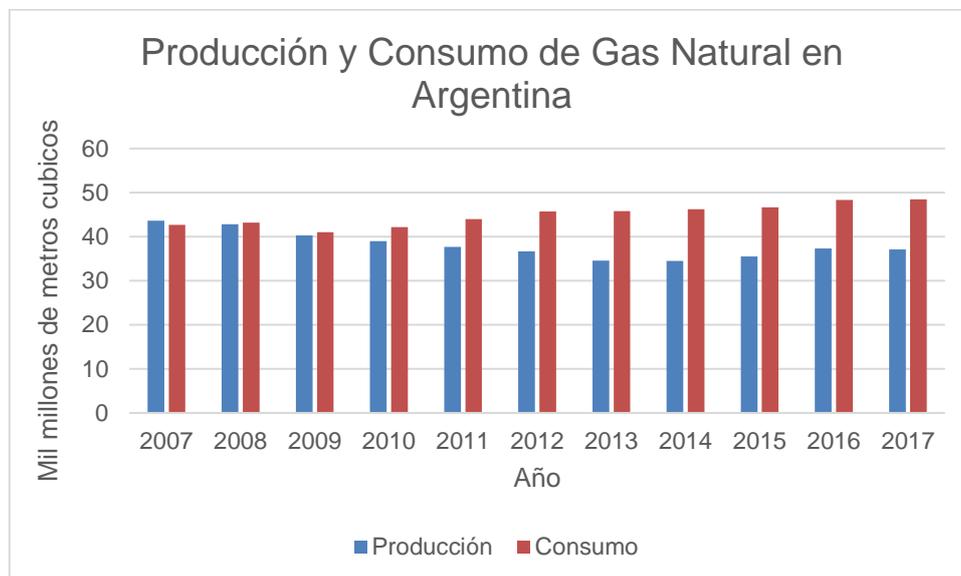


Ilustración 16: Producción y Consumo de Gas Natural en Argentina [11]

En el caso del gas, la caída de la producción ha sido constante desde 2004. En la última década la producción de gas natural se ha desplomado en 14,9 % pasando de 43.600 millones de m³ producidos en 2007 a 37.100 millones de m³ en 2017. Por esta razón desde 2011 la Argentina dejó de ser exportador a un importador neto de energía.

Las señales asimétricas (subsidio a la demanda, desincentivo a la oferta) generaron un importante desfase. En el caso de la oferta, las señales de precios y la incertidumbre desmotivaron las inversiones. Por el lado de la demanda, el congelamiento de tarifas a los servicios energéticos luego de la crisis del 2001 se tradujo en un fuerte incremento del consumo de energía hasta el año 2016. A partir de las últimas políticas de quita de subsidios se generó una baja en el consumo energético debido al fuerte aumento del precio de la energía.

En lo que respecta al consumo es a partir de 2008, en el caso del gas, y de 2012, en el del petróleo, Argentina comienza a observar un déficit en la oferta. [12]

A la actual caída en la producción de gas y petróleo se introdujeron dos nuevas variables: la caída en el precio internacional del petróleo y la modificación de la Ley de Hidrocarburos. [13]

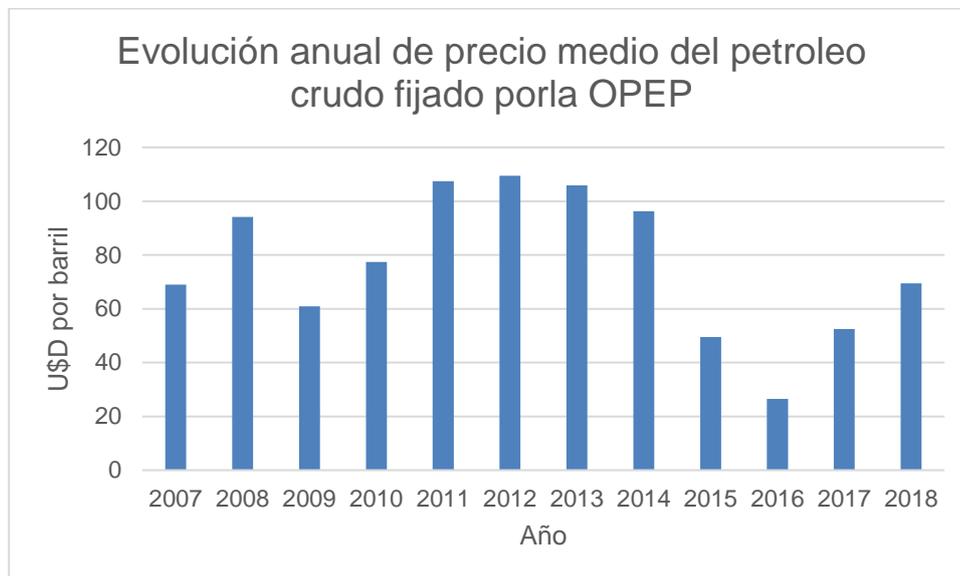


Ilustración 17: Evolución anual del precio medio del petróleo crudo fijado por la OPEP. [14]

En primer lugar, la caída internacional en el precio del barril de crudo (descenso observado desde mediados de 2014, con un repunte desde 2017) obedece a distintos factores:

El aumento de la oferta de petróleo:

- El fracking implosionó el mercado. La fracturación hidráulica, la cual tritura rocas subterráneas para extraer hidrocarburos (el llamado shale oil, o petróleo de esquisto) ha permitido a Estados Unidos, en apenas cinco años, pasar de ser el mayor importador neto del mundo a convertirse en el primer productor mundial de petróleo por delante de Arabia Saudita.
- La OPEP (Organización de Países Exportadores de Petróleo), consciente de la competencia estadounidense, decidió en 2014 sacrificar el precio del crudo a cambio de mantener su cuota de mercado. Ese exceso de oferta

hidrocarburos para calentarlo, la materia más utilizada para la calefacción.
[15]

Otro importante elemento que entra en juego es la reciente modificación de la Ley de Hidrocarburos, originalmente promulgada en 1967. En líneas generales, la nueva Ley extiende el período de concesión de explotación de yacimientos en particular para el caso de los no convencionales, se reducen las regalías que deben pagar las empresas y fomenta la inversión en los yacimientos vía la libre disponibilidad de las divisas de exportación, entre otras modificaciones.

Desde la nacionalización de YPF en abril de 2012, se han implementado medidas para revertir la pérdida del autoabastecimiento energético y los desequilibrios que esto conlleva: la creación de la Comisión Nacional de Hidrocarburos, la mejora en el precio en boca de pozo para los productores de gas, la quita de subsidios al consumo residencial de gas, etc.

La crisis que atraviesa el sector energético además generó desequilibrios en el resto de la economía. Por un lado, el deterioro fiscal de los últimos años en parte obedeció al monto creciente de subsidios que el Tesoro Nacional destinó al sector energético producto del congelamiento de tarifas y, por otro lado, la caída en la producción de hidrocarburos incrementó las importaciones de energía incidiendo sobre el saldo energético.

Sin embargo, pese a los intentos por revertir el deterioro energético, la tendencia declinante en la producción de petróleo y gas persistió.

Finalmente, los conflictos entre los países de la OPEP (Organización de Países Exportadores de Petróleo) incidieron sobre el precio del crudo. Esta caída en el precio internacional del petróleo tiene un impacto negativo tanto en la producción local como mundial no sólo por su incidencia sobre la actual producción de petróleo sino por las potenciales inversiones destinadas a yacimientos no convencionales. De hecho, las proyecciones de YPF para fomentar las inversiones en Vaca Muerta contemplaban un precio del barril de crudo que oscilaba entre los US\$ 80 y los US\$100. Más allá del impacto negativo sobre la producción actual y futura, la caída del precio del petróleo mejora el saldo comercial. El menor costo de las importaciones de energía redundó en una mejora del déficit energético aliviando las presiones sobre el frente cambiario (menor demanda de divisas). [13]

2.2 Las energías renovables en la Argentina

En el año 2006 el Congreso Nacional aprobó, el 6 de diciembre, la Ley N° 26.190 que fuera sancionada de hecho el día 27 de ese mes, de Fomento de las Energías Renovables. Por ella se declaró de interés nacional la Generación de Energía Eléctrica a partir del uso de fuentes renovables con destino a la prestación de servicio público, como así también la investigación para el desarrollo tecnológico y fabricación de equipos con esa finalidad.

Las fuentes de energía renovables incluidas son las no fósiles: energía eólica, solar, geotérmica, mareomotriz, hidráulica, biomasa, gases de vertedero, gases de plantas de depuración, y biogás. En el caso de las hidráulicas, a los efectos de incluirlas en los beneficios de la ley, aquellas que no superaran los 30 MW de potencia. [16] Las centrales hidroeléctricas de más de 50 MW de potencia, no son consideradas debido a que, si bien la fuente de energía es renovable, el costo de instalación de una gran represa, en términos de deforestación, desplazamiento de personas y comunidades, descomposición de la vegetación (y la consiguiente generación de gases de efecto invernadero) y destrucción de las cuencas representa un aspecto muy cuestionado a nivel ambiental y climático. [17]

El objetivo de ese régimen es lograr una contribución de las fuentes de energía renovables hasta alcanzar el 8% del consumo de energía eléctrica nacional, en el plazo de diez años a partir de su puesta en vigencia y el atractivo eran las facilidades de tipo fiscal (exenciones impositivas) para favorecer las inversiones.

Esta ley recién se reglamentó en el año 2009, mediante el Decreto N° 562, que puso como autoridad al Ministerio de Planificación Federal, Inversión Pública y Servicios, a través de la Secretaría de Energía, para que en coordinación con las provincias por intermedio del Consejo Federal de la Energía Eléctrica (CFEE), instrumentara el Fondo Fiduciario de Energías Renovables.

Prácticamente no se había avanzado casi nada en la materia hasta el año 2014, donde no se llegaba al 1,5% del consumo, abastecido por este tipo de energías.

Es cierto que la generación mediante estas fuentes resulta más cara que las convencionales, el costo del kWh instalado es más alto que los de un ciclo combinado, pero incomparablemente menor que lo que ha costado la terminación de Atucha II o la central de carbón de Río Turbio, y si bien en el caso nuclear permitió al país consolidar conocimientos tecnológicos en ese rubro, no es menos cierto que si se hubieran dedicado recursos al desarrollo de centrales eólicas o fotovoltaicas, también nuestra industria podría haber alcanzado niveles de conocimiento y de eficiencia considerables. [16]

Argentina presenta potencialidad para crecer en esta industria dado que para un correcto aprovechamiento del recurso eólico para la generación de energía es necesario contar con vientos medios superiores a 5 m/s, y en el caso argentino el 70% del territorio nacional tiene vientos de una velocidad promedio de 6m/s, mientras que en zonas patagónicas pueden alcanzar los 9m/s.

La ley N° 27191 del 2015, que busca fomentar la generación de energía eléctrica a partir de fuentes renovables, establece de manera específica la meta de alcanzar un 8% de generación de energías limpias para fines del año 2018, y de un 20% para fines del 2025.

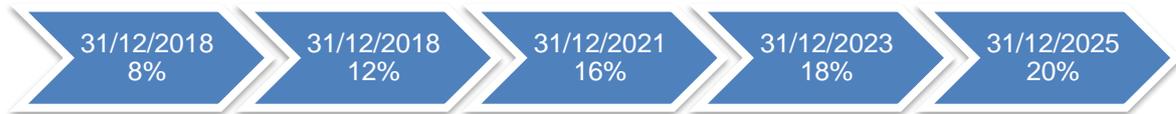


Ilustración 19: Metas establecidas para generación de energía renovable en Argentina (ley N° 27191) [14]

Con la mira en atraer capitales que invirtieran en el desarrollo del sector y permitieran alcanzar las nuevas metas previstas, el Ministerio de Energía y Minería (MINEM) lanzó en mayo de 2016 un llamado a licitaciones públicas en el marco del Programa RenovAr para adicionar 1000 MW de energía limpia a la matriz energética nacional. Fueron recibidas 123 ofertas, la generación de energía de tipo eólica representó el 60% mientras que la solar un 30% del total de presentaciones.

Inmediatamente después de la publicación de los proyectos adjudicados para esta licitación, el MINEM convocó a una nueva ronda, el RenovAr 1.5, para captar aquellos proyectos eólicos y solares fotovoltaicos que quedaron fuera de las adjudicaciones del RenovAr 1. El objetivo era incorporar a la matriz energética nacional 600 MW de energía limpia, adicionales a los 1000 MW de la ronda anterior. El RenovAr 1.5 buscaba regionalizar diversos proyectos, dotando al programa de un carácter más federal que su versión anterior. Para esta ronda, el MINEM recibió 47 ofertas por un total de 2486 MW (1561 MW para proyectos eólicos, 925 MW para solares), de los cuales se seleccionaron 30 proyectos que representarían un incremento de la capacidad nacional mayor a los 1280 MW, es decir más del doble del monto inicial licitado por el Gobierno. De las propuestas adjudicadas, 10 correspondían a proyectos eólicos por más de 760 MW y 20 a desarrollos solares, por alrededor de 516 MW. Entre los 59 proyectos adjudicados en ambas rondas (29 de la Ronda 1, por 1142 MW, y 30 de la Ronda 1.5, por 1281 MW), Argentina adquirió en total casi 2500 MW de capacidad en energías renovables durante 2016.

A partir de los buenos resultados obtenidos en las dos rondas licitatorias publicadas el año anterior, durante 2017 se lanzó el RenovAr 2.0. En noviembre de ese año se conocieron las ofertas económicas para esta ronda, a través de la cual se preveía aportar 1200 MW de energías limpias adicionales a la matriz energética nacional. El objetivo era distribuir la adjudicación por zonas: 200 MW para Comahue, Patagonia y Buenos Aires, con un tope de 450 MW, y 100 MW para el resto del país en lo referente a energía eólica. En tanto, en lo que respecta a energía solar, 200 MW para la región del NOA y Cuyo (con un monto máximo de 350 MW) y 100 MW para el resto del territorio nacional.

Tabla 4: Resultado de las sucesivas rondas del programa EnovAr a febrero de 2018 [14]

Ronda	Fecha	Cantidad de proyectos adjudicados	Potencia adjudicada
1	may-16	29	1142 MW
1.5	nov-16	30	1281,5 MW
2	nov-17	66	1400 MW
2.5	dic-17	22	634 MW
Total		147	4457,5 MW

Se recibieron 228 proyectos por 9321 MW, de los cuales se calificaron 192 (que representaron una potencia de alrededor de 7500 MW) y adjudicaron 66, que aportarán aproximadamente 1400 MW.

Hacia finales de diciembre de 2017, el MINEM publicó los resultados de la última ronda del Programa RenovAr, la llamada 2.5. En el marco de la misma, se adjudicaron 22 proyectos que acumulan 634 MW de potencia proyectada: cuatro propuestas de energía eólica, cinco de energía solar y 13 proyectos relacionados a biomasa y biogás.

De esta manera, según la Subsecretaría de Energías Renovables, el Programa RenovAr adjudicó, en su totalidad, 147 proyectos en 21 provincias por 4.457,5 MW.

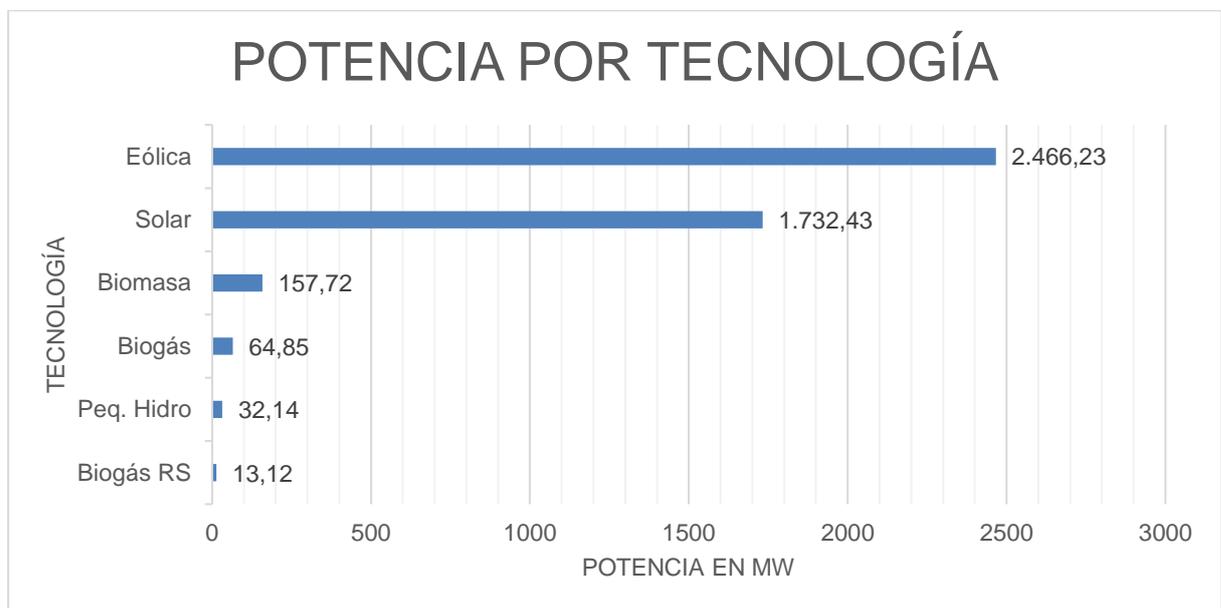


Ilustración 20: Potencia instalada de cada tecnología [18]

Tabla 5: Potencia instalada por región [18]

Región	Potencia	
NOA	1189	MW
Bs As	1045	MW
Cuyo	788	MW
Comahue	331	MW
Patagonia	741	MW
Centro	238	MW
NEA	103	MW
Litoral	32	MW

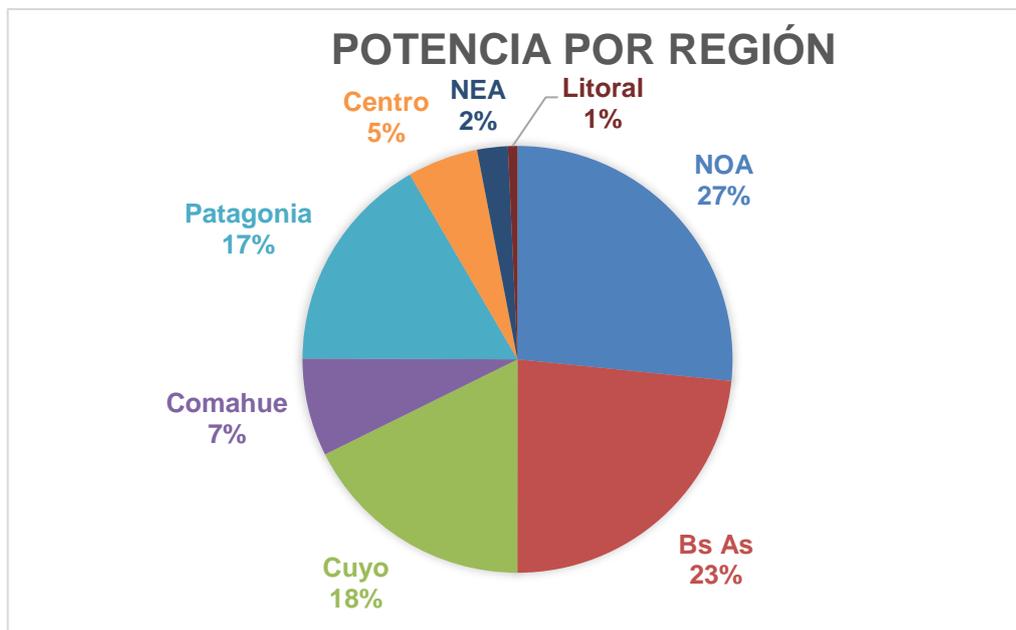


Ilustración 21: Potencia instalada por región [18]

Mapa con la ubicación de los proyectos adjudicados de energías renovables en Argentina (actualizado periódicamente por el MINEM):

<https://www.google.com/maps/d/viewer?mid=1UysUb8FChApZinkp6a30jq6G08-IBnPM&ll=-39.54123521034036%2C-55.57379953697182&z=4>

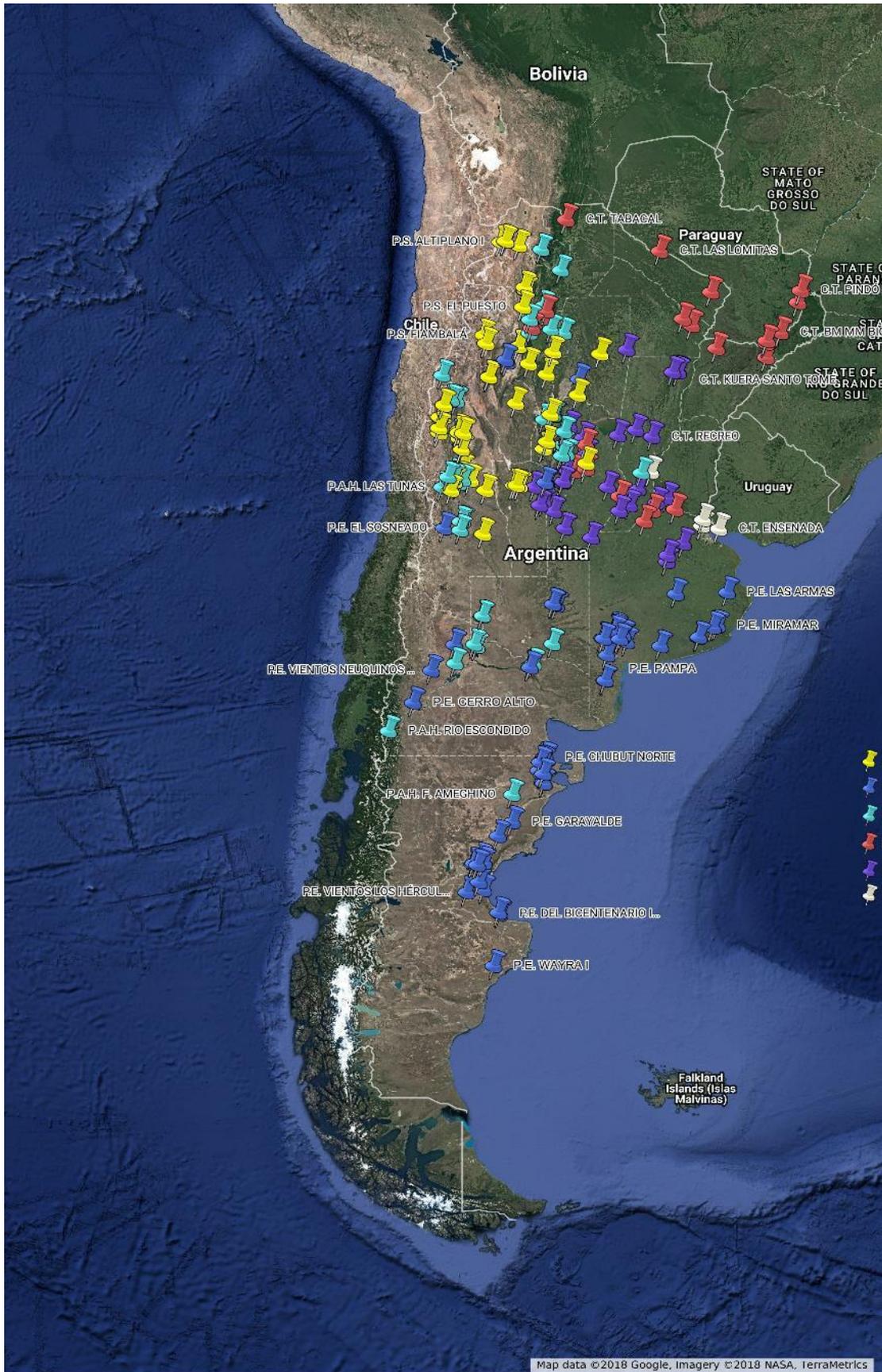


Ilustración 22: Ubicación de los proyectos adjudicados de energías renovables en Argentina. [19]

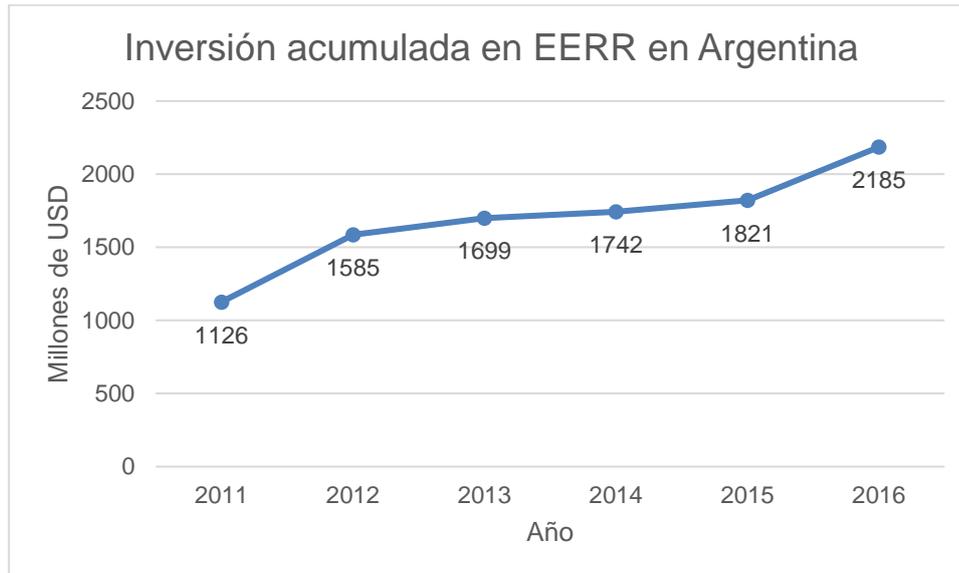


Ilustración 23: Inversión acumulada en EERR en Argentina (en millones de USD) [14]

El año 2017, nombrado por el Gobierno argentino como “Año de las Energías Renovables”, sentó varios precedentes para lo que se espera sea el plan más ambicioso en la historia nacional en la materia. Si bien no se cumplió con el objetivo establecido en 2015 para finales de ese año (la meta de alcanzar el 8% de generación de energía renovable, proyectada originalmente para el 31/12/2017, se pospuso para el 31/12/2018), las experiencias de las rondas RenovAr arrojaron resultados que pueden considerarse alentadores, allanando el camino para inversiones futuras y posicionando a la Argentina como uno de los destinos preferidos para los capitales foráneos de la industria. Asimismo, tanto la creación del Fondo para el Desarrollo de las Energías Renovables como el aval del Banco Mundial y los beneficios fiscales e impositivos previstos en la ley N° 27.191 aportaron seguridad financiera y económica para los participantes de las licitaciones, haciendo que Argentina se consolide como uno de los países más destacados a nivel global en la promoción de la generación de energía proveniente de fuentes limpias.

Es preciso continuar con el desarrollo de este tipo de políticas si Argentina se propone alcanzar una proporción del 20% de la matriz eléctrica nacional de generación de energías renovables para el último plazo contemplado en el plan, el 31/12/2025. Tomando como parámetro la situación energética nacional actual, ello implicaría la incorporación de 10.000 MW provenientes de este tipo de energías en 10 años, obligando a los grandes consumidores (aproximadamente 8.000 usuarios cuya demanda es mayor a 300 KW) a diversificar su matriz energética y adecuarse a lo estipulado por la ley.

A su vez, proyectos legislativos asociados a esta temática, como la reciente aprobación por parte del Senado del “Régimen de Fomento a la Generación Distribuida de Energía Renovable Integrada a la Red Eléctrica Pública” Ley 27.424, aportan impulso a la industria e involucran al conjunto de la sociedad en la transición

hacia un uso de la energía más responsable y limpio. La nueva ley, que permite a cualquier usuario (una vivienda, un comercio, una fábrica) inyectar energía a la red nacional, convirtiéndose a su vez en productor de la energía que consume y ahorrando costos en materia de traslado, almacenamiento e infraestructura, estipula además que a partir de su reglamentación todo proyecto de construcción de un edificio público deberá incorporar el uso de algún sistema de generación de energía distribuida proveniente de fuentes renovables. En este sentido, el MINEM autorizó recientemente a once nuevos emprendimientos de energías renovables y a una central térmica a ingresar energía al mercado mayorista como generadores. En conjunto, representarán una adición a la potencia instalada de 1300 MW

Además, aunque Argentina es un país que recientemente se ha incorporado a la preocupación global por el cuidado del medioambiente, uno de los beneficios colaterales de enfocar las políticas públicas en este sentido puede leerse en términos meramente económicos. Desde el MINEM, informaron que, previendo una inversión de capitales privados de US\$ 4000 millones en el sector durante el plazo contemplado por la ley, se estima que podría obtenerse un ahorro de alrededor de US\$ 300 millones anuales en la importación de combustibles, al tiempo que la emisión de dióxido de carbono podría reducirse en el equivalente a 2 millones de toneladas al año, aproximadamente la contaminación producida por 900.000 autos.

Por otra parte, una mayor relevancia de las energías renovables en la matriz energética nacional permitiría reducir notoriamente el presupuesto destinado a las importaciones de hidrocarburos, componente que durante 2016 superó los US\$ 3900 millones y que hasta noviembre de 2017 se había reducido a poco más de US\$ 2200 millones. [14]

2.3 El posible aporte de los piezoeléctricos

A pesar de los notables avances en el desarrollo de tecnologías de energías renovables (solar, hidroeléctrica de baja escala, eólica, biocombustibles y geotermia), aproximadamente el 86% de la energía consumida por los Estados Unidos se deriva de los combustibles fósiles, y sólo el 14% procede de energías renovables [20] [21], porcentaje que en Europa es algo mayor sin llegar al 20% y lejos de reducirse, el consumo de energía en el mundo, aumenta de manera continua.

En la figura siguiente, se representan diversos sistemas de captación de energía limpia que se están utilizando como alternativa a las energías fósiles. Para una mejor comparación de la fuente de generación de energía, se representa la densidad de potencia en función de la tensión generada. El tipo de fuentes consideradas corresponde a las pilas de Litio e Ion-Litio, paneles solares, celdas de combustible, dispositivos termoeléctricos, dispositivos termo-fotovoltaicos, dispositivos piezoeléctricos, y dispositivos electromagnéticos [22]

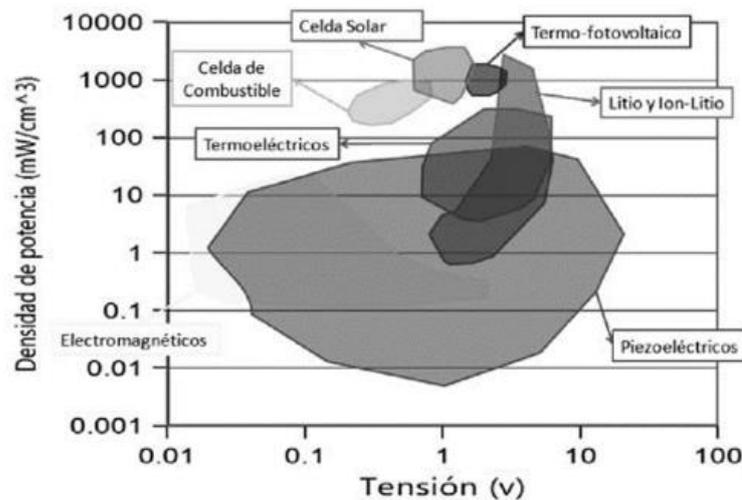


Ilustración 24: Densidad de potencia en función de la tensión [2]

Los dispositivos piezoeléctricos presentan valores de densidad de potencia que son comparables a otras tecnologías de generación de energía, tales como las baterías de ion-litio y los generadores de potencia electromagnéticos, pero tienen menor densidad de potencia que las celdas solares avanzadas.

En los últimos años se ha despertado un gran interés por el aprovechamiento de la energía mecánica y de impacto del tránsito en rutas y autopistas, así como también la energía de peatones. Uno de los problemas fundamentales a la hora de conseguir el aprovechamiento energético es disponer de dispositivos que aprovechen la forma de la energía disipada y permitan su uso como parte activa de fuentes de alimentación. Por lo tanto, encontramos que el primer obstáculo importante a salvar para realizar este estudio, es disponer de un modelo eléctrico equivalente de dichos materiales piezoeléctricos, para elegir la solución que responda correctamente a la excitación provocada por el tránsito peatonal, fuente de energía mecánica generadora.

3 Estado del arte.

3.1 Historia

La propiedad de la piezoelectricidad fue observada por primera vez por Pierre y Jacques Curie en 1880 estudiando la compresión del cuarzo. Al someterlo a la acción mecánica de la compresión, las cargas de la materia se separan. Esto propicia una polarización de la carga, lo cual causa que se produzca un arco eléctrico.



Ilustración 25: Pierre Curie [46]

La palabra “piezo” se deriva del griego que significa “presionar” o “presionar” y el efecto piezoeléctrico es la producción de electricidad mediante la presión.

El efecto piezoeléctrico fue descubierto en 1880 por los hermanos Jacques y Pierre Curie. Sus experimentos consistieron en la medición de cargas que aparecen en las superficies de los cristales especialmente preparados (entre ellos cuarzo, Topacio, sales de Rochelle, azúcar de caña y Turmalina) los cuales fueron sujetos a tensiones mecánicas. [3]

Jacques y Pierre Curie no predijeron que los cristales que presentan el efecto piezoeléctrico directo (estrés mecánico produce cargas eléctricas) mostraran también un efecto piezoeléctrico inverso (campo eléctrico produce tensión mecánica). Esta propiedad fue deducida matemáticamente utilizando principios termodinámicos fundamentales deducidos por el físico Gabriel Lippman en 1881. Ante esto los hermanos Curie inmediatamente comprobaron experimentalmente la existencia del “efecto inverso” y continuaron hasta obtener pruebas cuantitativas de la reversibilidad completa de las deformaciones electro-elástico-mecánicas de los cristales piezoeléctricos.

Durante los años siguientes la comunidad científica europea continuó las investigaciones para las aplicaciones piezoeléctricas en la ciencia y establecieron la identificación de cristales piezoeléctricos en base a las estructuras asimétricas de los cristales y el cambio reversible de la energía eléctrica y mecánica y la utilidad de la termodinámica en cuantificar relaciones entre las variables mecánicas, térmicas y eléctricas. Muchos trabajos fueron realizados hasta que en 1910 Woldemar Voigt publicó su libro “Lehrbuch der Kristallphysik” (libro de textos en la física cristalina) que se convirtió en un estándar de referencia sobre todo lo relacionado sobre este tema hasta entonces.

La primera aplicación seria de dispositivos piezoeléctricos tuvo lugar durante la Primera Guerra Mundial. En Francia hacia el año 1917 Paul Langevin desarrollo un detector de submarinos por ultrasónido (sonar). Su transductor consistía de láminas delgadas de cuarzo pegadas entre dos placas de acero y montadas en un soporte capaz de resistir la inmersión. Dicho sonar tenía una frecuencia de resonancia de 50 kHz.

Luego de la primera guerra mundial, debido a la complejidad de operar transductores contruidos con cristales de cuarzo, dado que éstos demandaban generadores de alta tensión para ser excitados, se inició la búsqueda de materiales piezoeléctricos sintéticos. Estos esfuerzos llevaron al descubrimiento y perfeccionamiento, durante las décadas del 40 y 50, de las cerámicas piezoeléctricas de Titanato de Bario por la entonces URSS y Japón, y de las cerámicas piezoeléctricas de Titanato Zirconato de Plomo (PZT's) por los Estados Unidos.

El desarrollo de las cerámicas piezoeléctricas fue revolucionario. Los nuevos materiales además de presentar mejores propiedades que los cristales, después de “polarizados”, también permiten geometrías y dimensiones flexibles por ser fabricadas a través de sinterización de polvos cerámicos y conformados vía prensado o extrusión. Actualmente las cerámicas piezoeléctricas tipo PZT, en sus diversas variaciones, son las cerámicas predominantes en el mercado. También podemos encontrar otros materiales, como por ejemplo el PT (PbTiO_3) y el PMN ($\text{Pb}(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3$), utilizados en dispositivos que exigen propiedades especiales, como transductores para alta temperatura. [23]

3.2 Visión actual

El propósito de esta sección es evaluar en qué estado se encuentra actualmente y como fueron evolucionando las publicaciones y aplicaciones con respecto al efecto piezoeléctrico.

3.2.1 Publicaciones

Para ver la evolución que ha tenido el estudio de los materiales piezoeléctricos en los últimos años, se han seleccionado los datos correspondientes a la publicación de artículos y publicaciones de conferencias entre el año 1912 y 2017. Para la realización de las búsquedas se ha utilizado la base de datos de la Web of Knowledge / Web of Science. [24] Utilizamos palabras claves para realizar la búsqueda, yendo de lo general a lo específico.

A continuación, se presentan una serie de gráficos con los resultados obtenidos.

Primero realizamos la búsqueda utilizando la palabra clave Piezoelectric (Piezoeléctrico).

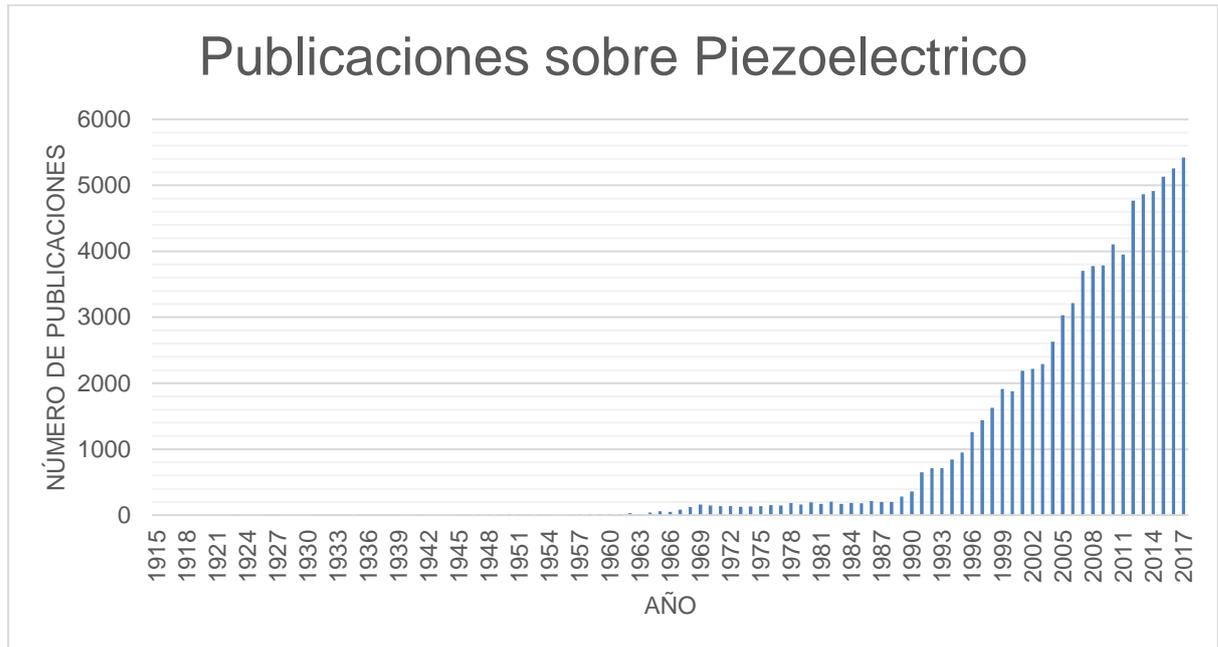


Ilustración 26: Numero de publicaciones sobre piezoeléctrico por año. Elaboración propia con datos de [24].

Como resultado de la búsqueda se han obtenido un total de 81.931 publicaciones de distintas especialidades.

Podemos observar que, aunque este tipo de materiales fueron descubiertos en el año 1880, cien años después aún no habían tenido un gran desarrollo. Es en el año 1991 es cuando se observa un incremento en el estudio de estos materiales.

Para analizar con más profundidad cuáles son los países que más están investigando en este campo se ha realizado el siguiente gráfico, que corresponde al porcentaje de publicaciones por países:

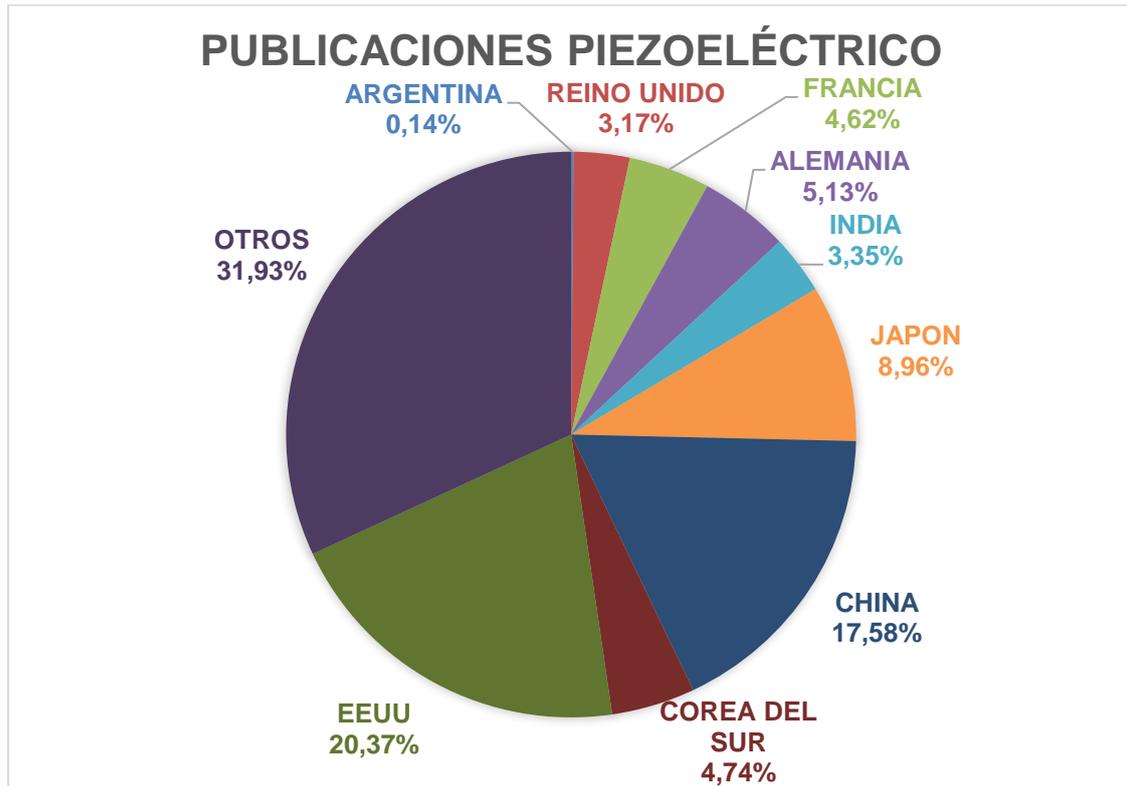


Ilustración 27: Porcentaje a nivel mundial de publicaciones sobre piezoeléctrico. Elaboración propia con datos de [24].

Según los datos obtenidos, Estados Unidos es el país a lo largo de los años más ha publicado e investigado en este tema, seguido de China y Japón. La Argentina ha tenido una participación menor, solo con un 0,14% (115 publicaciones).

Tabla 6: Número de publicaciones a nivel mundial. Elaboración propia con datos de [24].

País	Publicaciones	País	Publicaciones	País	Publicaciones
ALGERIA	141	ICELAND	6	PORTUGAL	607
ARGENTINA	115	INDIA	2810	QATAR	22
ARMENIA	37	INDONESIA	21	REP OF GEORGIA	9
AUSTRALIA	1326	IRAN	897	ROMANIA	371
AUSTRIA	514	IRAQ	25	RUSIA	2157
AZERBAIJAN	29	IRELAND	200	SAUDI ARABIA	202
BANGLADESH	43	ISRAEL	431	SCOTLAND	435
BELGIUM	356	ITALIA	1845	SERBIA	34
BESSR	7	JAPON	7524	SINGAPUR	1156
BRAZIL	763	JORDAN	36	SLOVAKIA	100
BULGARIA	101	KAZAKHSTAN	6	SLOVENIA	205
BYELARUS	94	KUWAIT	21	SOUTH AFRICA	143
CAMEROON	5	LATVIA	61	COREA DEL SUR	3980
CANADA	1640	LEBANON	15	ESPAÑA	1383
CHILE	65	LIECHTENSTEIN	6	SWEDEN	452
COLOMBIA	45	LISSR	16	SUIZA	953
CROATIA	33	LITHUANIA	269	TAIWAN	2416
CUBA	131	LUXEMBOURG	38	THAILAND	472
CYPRUS	13	MADAGASCAR	6	TUNISIA	135
CZECH REPUBLIC	409	MALAYSIA	261	TURKEY	409
CZECHOSLOVAKIA	23	MEXICO	339	ARAB EMIRATES	74
DENMARK	249	MOLDOVA	9	UKRAINE	512
ECUADOR	13	MOROCCO	108	UKSSR	35
EGYPT	167	MOSSR	14	URUGUAY	34
REINO UNIDO	2663	NETHERLANDS	499	EEUU	17099
ESTONIA	10	NEW ZEALAND	90	USSR	623
FED REP GER	120	NIGERIA	8	UZBEKISTAN	6
FINLAND	239	NORTH IRELAND	13	VENEZUELA	25
FRANCIA	3877	NORWAY	124	VIETNAM	96
GER DEM REP	16	OMAN	18	WALES	166
ALEMANIA	4302	PAKISTAN	97	WEST GERMANY	19
GREECE	199	CHINA	14759	YUGOSLAVIA	30
HONG KONG	64	PHILIPPINES	19		
HUNGARY	75	POLONIA	1095		

Luego nos enfocamos a las publicaciones argentinas con la palabra clave piezoeléctrico, obteniendo los siguientes resultados



Ilustración 28: Numero de publicaciones en Argentina sobre piezoeléctrico por año. Elaboración propia con datos de [24].

Luego aplicamos un filtro a la búsqueda, quedándonos solo con los resultados referidos a nuestra área de interés (ingeniería eléctrica y electrónica). Los resultados obtenidos fueron los siguientes: 18.199 publicaciones.

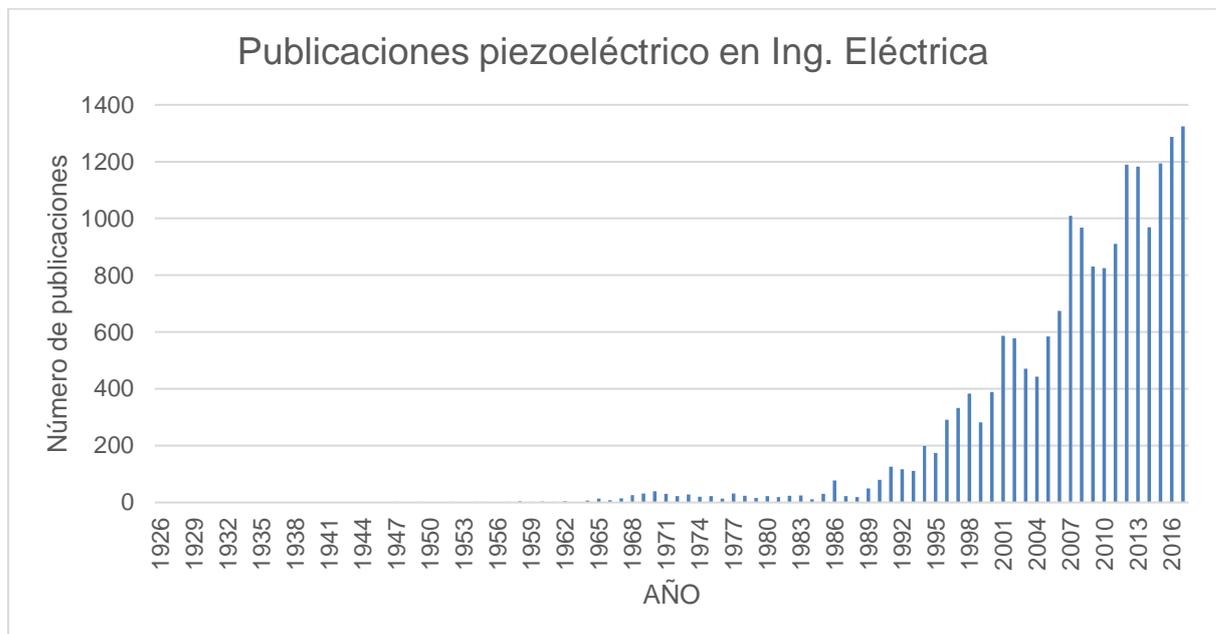


Ilustración 29: Publicaciones a nivel mundial piezoeléctrico en Ing. Eléctrica. Elaboración propia con datos de [24].

A nivel nacional solo se encontraron 13 publicaciones aplicando los filtros de Ingeniería Eléctrica y Electrónica en el buscador de Web of Science.

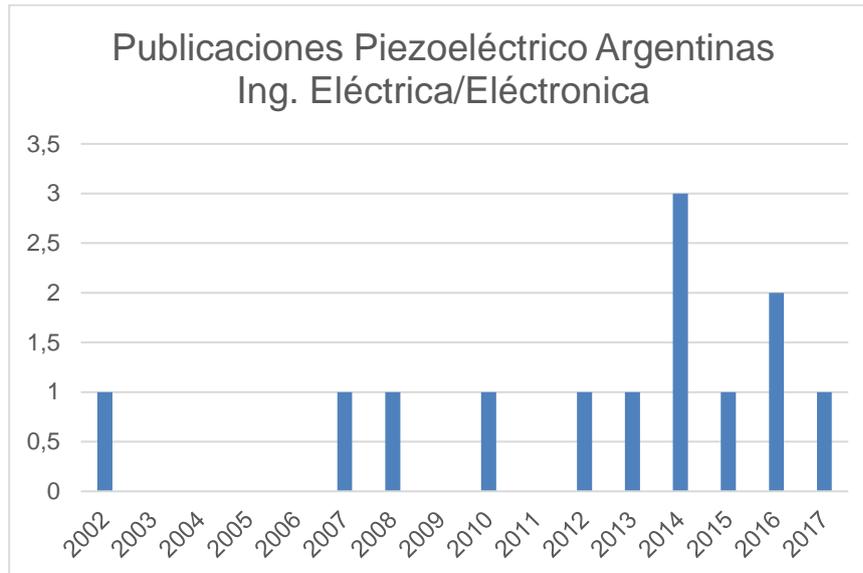


Ilustración 30: Publicaciones argentinas sobre piezoeléctrico en Ing. Eléctrica. Elaboración propia con datos de [24].

De las cuales la más relevante con respecto a nuestro tema de investigación es la publicación “*Thick film PZT arrays vibration modes*” de los autores Gwirc, S; García, F; Pérez, N; Negreira, C; INTI, San Martín, Buenos Aires, Argentina. En este trabajo los autores describieron algunas características electroacústicas de los transductores ultrasónicos piezoeléctricos miniatura, fabricados mediante serigrafía y uso tecnología de película gruesa. Para fabricar las muestras de los transductores, se empleó tinta con polvo PZT y un “glass frit” (vidrio tratado térmicamente). Las películas PZT de 100-130 nm de espesor fueron serografiadas entre dos electrodos de oro sobre alúmina (óxido de aluminio). El análisis de la impedancia eléctrica y la emisión acústica de una onda continua en el rango de 1-10 MHz muestra dos modos de vibración, uno de la capa PZT y otro con sustrato y PZT vibrando como un todo con características de acoplamiento de un conjunto de dos elementos y una matriz.

Como una segunda etapa realizamos la búsqueda utilizando la palabra clave Piezoelectricity (Piezoelectricidad).

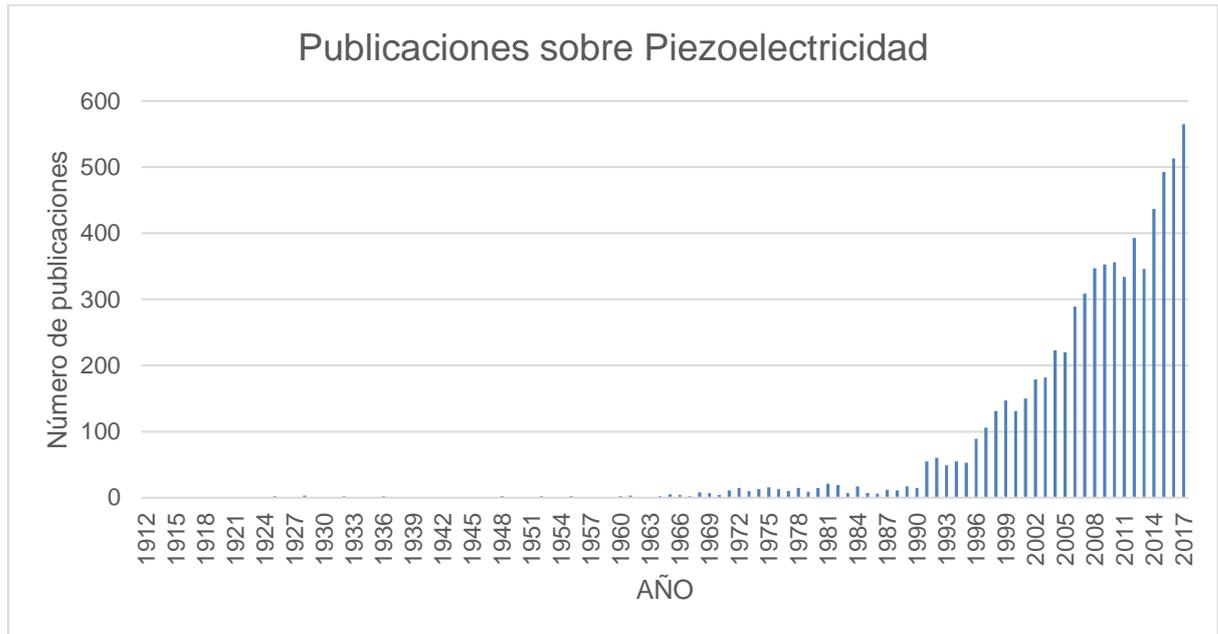


Ilustración 31: Publicaciones sobre piezoelectricidad. Elaboración propia con datos de [24].

Como resultado de la búsqueda se han obtenido un total de 6.884 publicaciones de distintas especialidades.

Sobre estos datos hemos realizado un gráfico mostrando el porcentaje de publicaciones por país con respecto al total de publicaciones que incluyen la palabra piezoelectricity a nivel mundial.

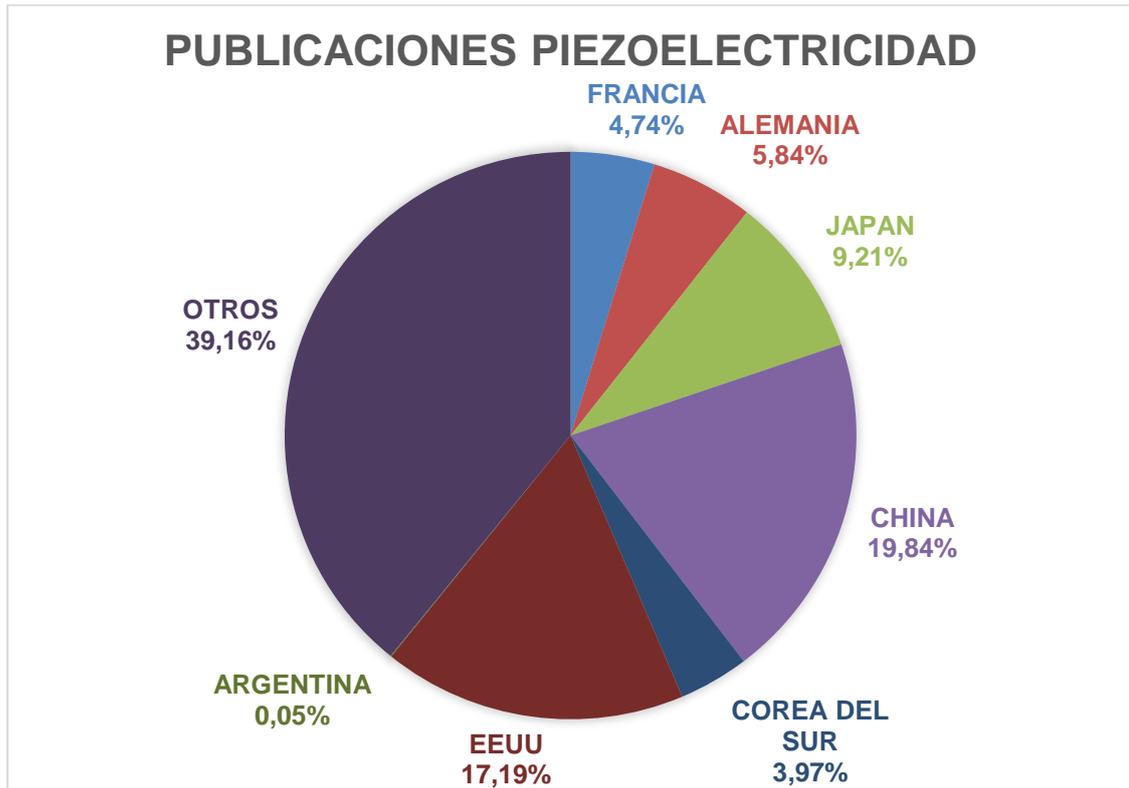


Ilustración 32: Porcentaje a nivel mundial de publicaciones sobre piezoelectricidad. Elaboración propia con datos de [24].

Tabla 7: Número de publicaciones a nivel mundial que contienen la palabra Piezoelectricidad. Elaboración propia con datos de [24].

País	Publicaciones	País	Publicaciones	País	Publicaciones
ALGERIA	22	HONG KONG	3	ROMANIA	36
ARGENTINA	4	HUNGARY	15	RUSSIA	115
ARMENIA	4	INDIA	254	SAUDI ARABIA	23
AUSTRALIA	94	INDONESIA	2	SCOTLAND	15
AUSTRIA	66	IRAN	49	SERBIA	3
AZERBAIJAN	2	IRAQ	3	SINGAPORE	63
BANGLADESH	2	IRELAND	28	SLOVAKIA	12
BELGIUM	25	ISRAEL	85	SLOVENIA	14
BRAZIL	100	ITALY	150	SOUTH AFRICA	8
BULGARIA	8	JAPAN	724	SOUTH KOREA	312
BYELARUS	4	JORDAN	4	SPAIN	135
CANADA	139	LATVIA	3	SWEDEN	34
CHILE	10	LITHUANIA	17	SWITZERLAND	65
COLOMBIA	2	LUXEMBOURG	7	TAIWAN	176
CUBA	18	MACEDONIA	1	THAILAND	24
CYPRUS	1	MADAGASCAR	1	TUNISIA	13
CZECH REPUBLIC	35	MALAYSIA	17	TURKEY	31
CZECHOSLOVAKIA	1	MEXICO	36	U ARAB EMIRATES	5
DENMARK	18	MOLDOVA	1	UKRAINE	46
EAST GERMANY	1	MOROCCO	7	URUGUAY	1
ECUADOR	1	NETHERLANDS	29	USA	1351
EGYPT	27	NEW ZEALAND	8	USSR	19
ENGLAND	146	NORWAY	8	UZBEKISTAN	1
FED REP GER	13	OMAN	2	VENEZUELA	4
FINLAND	29	PAKISTAN	8	VIETNAM	11
FRANCE	373	PEOPLES R CHINA	1560	WALES	26
GER DEM REP	5	POLAND	123	YUGOSLAVIA	1
GERMANY	459	PORTUGAL	81	ZAMBIA	1
GHANA	1	QATAR	1		
GREECE	12	REP OF GEORGIA	4		

Nuevamente aplicamos un filtro a la búsqueda, quedándonos solo con los resultados referidos a nuestra área de interés (Ingeniería Eléctrica y Electrónica). Los resultados obtenidos fueron los siguientes: 1.060 publicaciones.

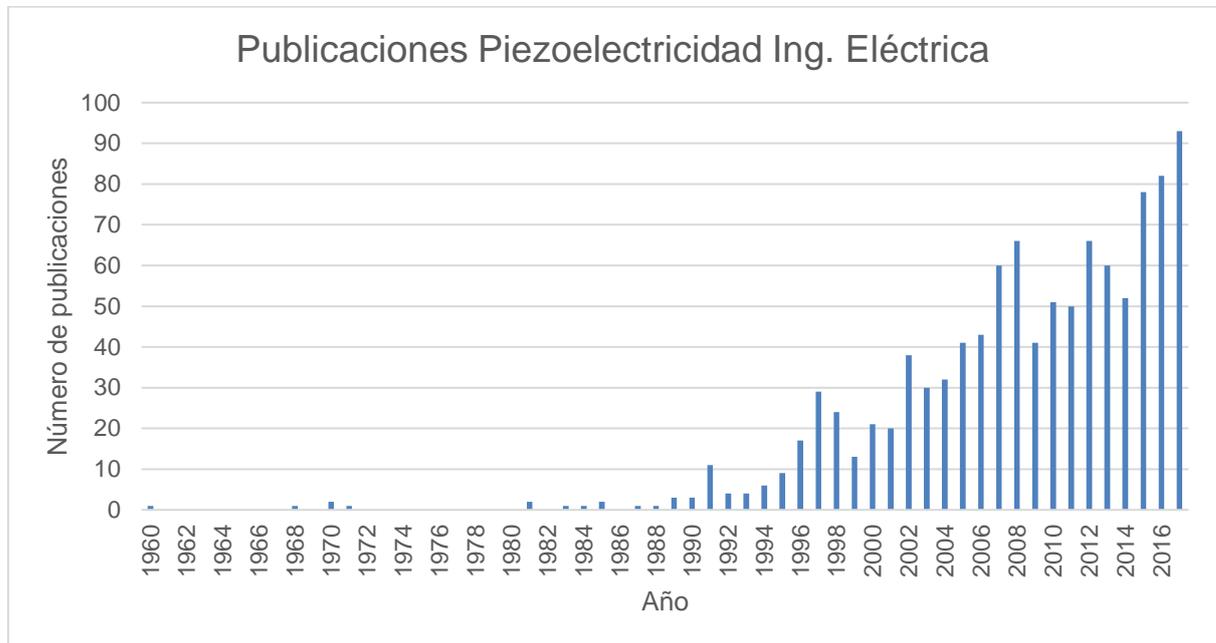


Ilustración 33: Publicaciones Piezoelectricidad Ing. Eléctrica. Elaboración propia con datos de [24].

La única publicación encontrada respecto al área de Ingeniería Eléctrica y Electrónica es “Optimum design of flextensional piezoelectric actuators into two spatial dimensions” de los autores Amigo, R; Giusti, SM; Novotny, A. A.; Silva, E.C.N.; Sokolowski, J. UTN Facultad Regional Córdoba, CONICET Córdoba Argentina. En este trabajo los autores se interesaron en el diseño óptimo de actuadores piezoeléctricos, que consisten en estructuras multi-flexibles accionadas por dispositivos piezocerámicos que generan un desplazamiento en una dirección específica en el límite de la parte accionada. La estructura multi-flexible transforma el desplazamiento piezocerámico amplificándolo y cambiando su dirección. Este tipo de mecanismo se puede fabricar a una escala muy pequeña. Por lo tanto, el espectro de aplicaciones de tales “microtools” se vuelve más amplio en los últimos años, incluida la microcirugía, procesamiento de nanotecnología, manipulación celular, entre otros.

La siguiente etapa de nuestra búsqueda fue centrarnos en el área específica de nuestra investigación: piezoelectric energy harvesting (recolección de energía mediante dispositivos piezoeléctricos).

Para esta búsqueda se obtuvieron 4.378 publicaciones.

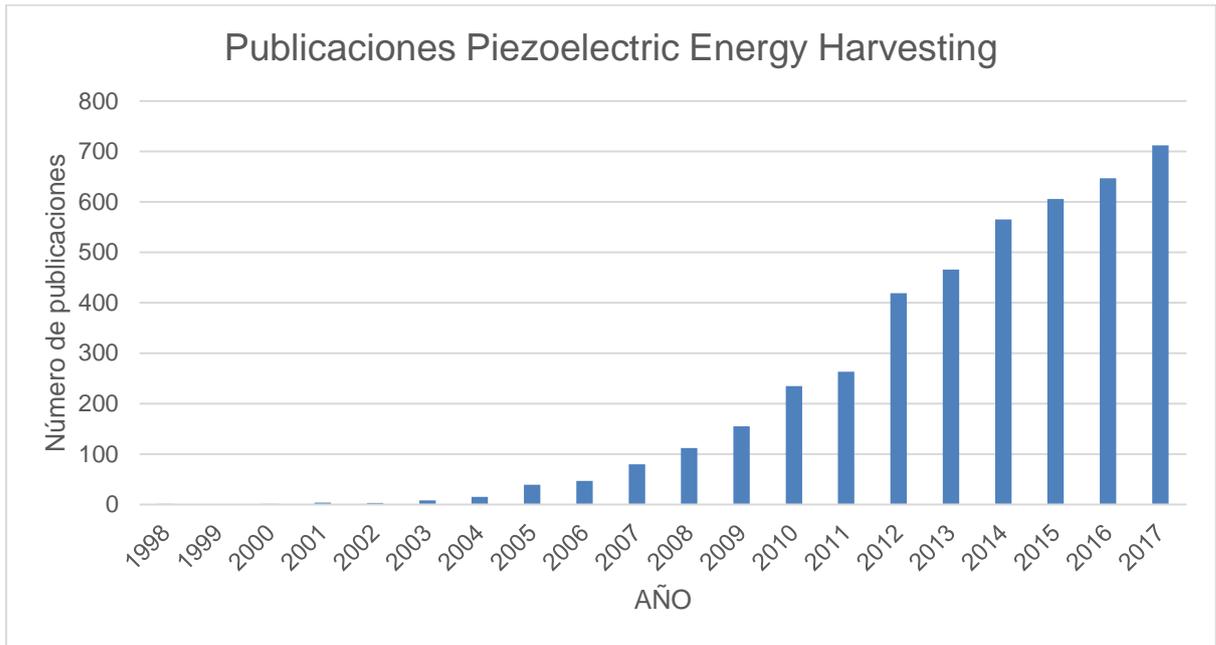


Ilustración 34: Publicaciones Piezoelectric Energy Harvesting. Elaboración propia con datos de [24].

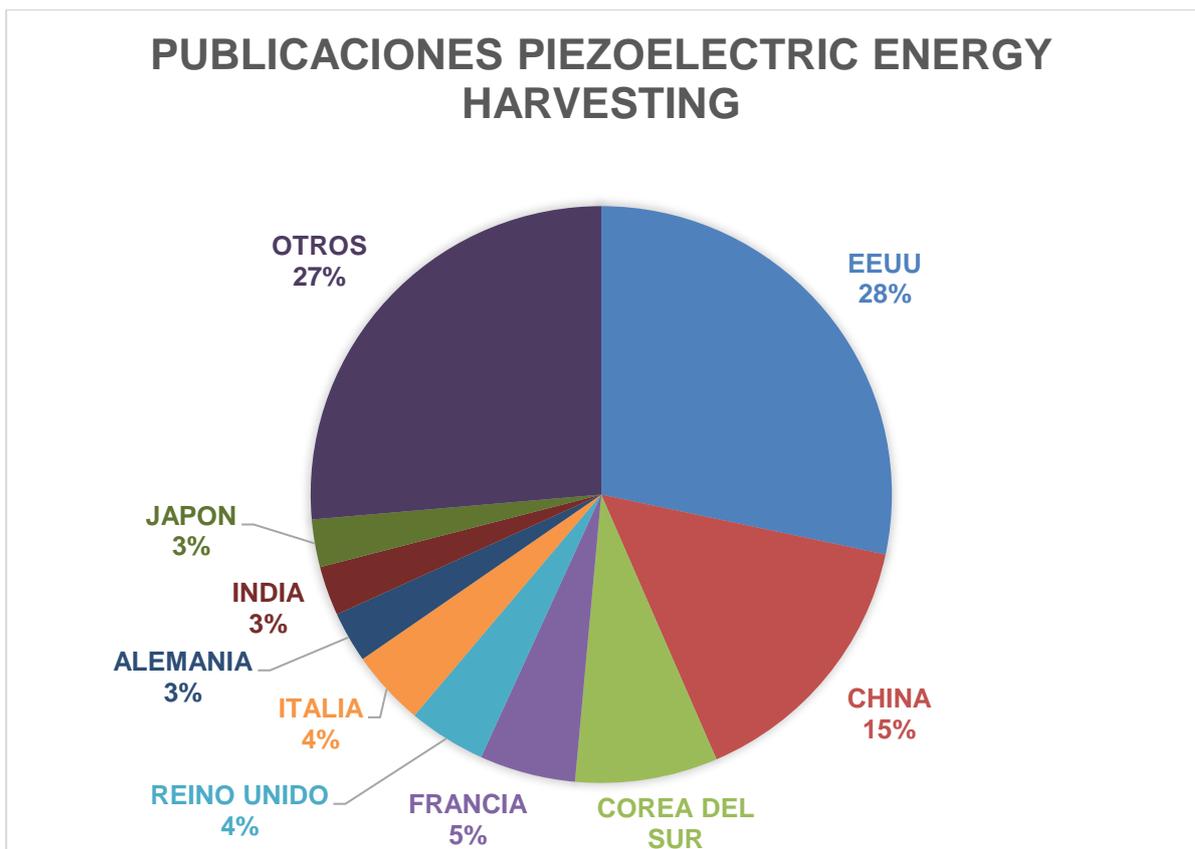


Ilustración 35: Porcentaje a nivel mundial de publicaciones sobre Piezoelectric energy harvesting. Elaboración propia con datos de [24].

Tabla 8: Número de publicaciones a nivel mundial que contienen la palabra Piezoelectric Energy Harvesting. Elaboración propia con datos de [24].

País	Publicaciones	País	Publicaciones	País	Publicaciones
USA	1146	SWEDEN	22	CROATIA	5
PEOPLES R CHINA	614	RUSSIA	22	CHILE	5
SOUTH KOREA	321	LITHUANIA	20	BANGLADESH	5
FRANCE	216	IRELAND	20	SLOVAKIA	4
ENGLAND	175	PORTUGAL	17	MEXICO	4
ITALY	171	NEW ZEALAND	15	QATAR	3
GERMANY	115	THAILAND	14	COLOMBIA	3
INDIA	112	MOROCCO	14	ARGENTINA	3
JAPAN	108	EGYPT	14	VIETNAM	2
TAIWAN	103	TUNISIA	13	UKRAINE	2
CANADA	94	NORWAY	13	SCOTLAND	2
SINGAPORE	84	BELGIUM	13	PHILIPPINES	2
AUSTRALIA	80	U ARAB EMIRATES	12	KUWAIT	2
BRAZIL	51	AUSTRIA	11	IRAQ	2
MALAYSIA	50	SOUTH AFRICA	10	CAMEROON	2
SPAIN	42	ISRAEL	10	VENEZUELA	1
WALES	39	CZECH REPUBLIC	9	OMAN	1
POLAND	36	PAKISTAN	8	LUXEMBOURG	1
TURKEY	32	GREECE	8	LEBANON	1
IRAN	31	FINLAND	7	INDONESIA	1
NETHERLANDS	29	DENMARK	6	ECUADOR	1
SWITZERLAND	27	ALGERIA	6	BYELARUS	1
SAUDI ARABIA	26	ROMANIA	5	BULGARIA	1

Como dicha área resulta ser el tema del presente trabajo, realizamos una búsqueda de las publicaciones más citadas y sus respectivos autores, obteniendo los siguientes resultados:

Tema: piezoelectric energy harvesting

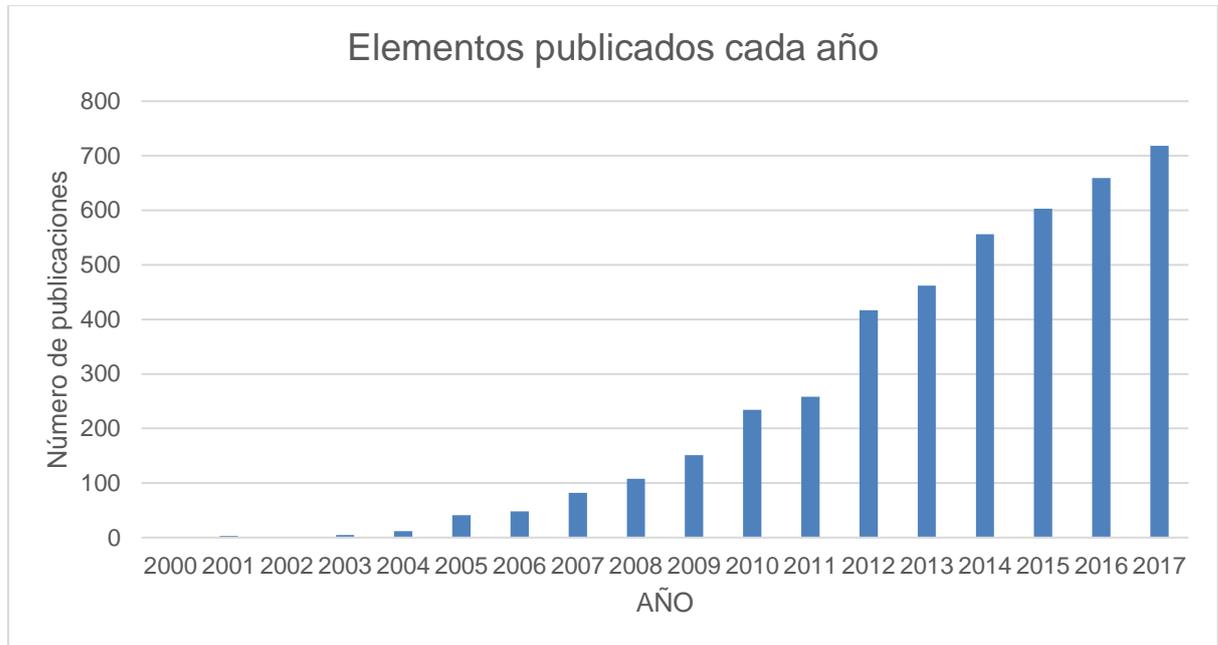


Ilustración 36: Elementos publicados cada año [24]



Ilustración 37: Citas cada año [24]

Tabla 9: Las 10 publicaciones más citadas sobre piezoelectric energy harvesting. Elaboración propia con datos de [24].

Título del Paper	Autores	Publicado en	Año	N° citas	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017
Direct-current nanogenerator driven by ultrasonic waves	Wang, Xudong; Song, Jinhui; Liu, Jin; Wang, Zhong Lin	SCIENCE	2007	1518	0	0	0	0	27	105	138	151	124	163	155	154	150	172	179
Energy harvesting vibration sources for microsystems applications	Beeby, S. P.; Tudor, M. J.; White, N. M.	MEASUREMENT SCIENCE AND TECHNOLOGY	2006	1175	0	0	0	0	16	45	67	86	112	113	119	150	141	167	159
A review of power harvesting using piezoelectric materials (2003-2006)	Anton, Steven R.; Sodano, Henry A.	SMART MATERIALS & STRUCTURES	2007	1071	0	0	0	0	1	24	55	95	92	111	123	153	131	148	138
Microfibre-nanowire hybrid structure for energy scavenging	Qin, Yong; Wang, Xudong; Wang, Zhong Lin	NATURE	2008	929	0	0	0	0	0	40	101	88	75	102	109	102	102	94	116
Functional nanowires	Lieber, Charles M.; Wang, Zhong Lin	MRS BULLETIN	2007	841	0	0	0	0	14	90	104	109	95	95	70	64	49	69	82
Self-powered nanowire devices	Xu, Sheng; Qin, Yong; Xu, Chen; Wei, Yaguang; Yang, Rusen; Wang, Zhong Lin	NATURE NANOTECHNOLOGY	2010	816	0	0	0	0	0	0	0	25	70	111	134	127	114	121	114
Adaptive piezoelectric energy harvesting circuit for wireless remote power supply	Ottman, GK; Hofmann, HF; Bhatt, AC; Lesieutre, GA	IEEE TRANSACTIONS ON POWER ELECTRONICS	2002	615	2	9	17	25	30	39	41	59	46	57	46	49	56	63	76
Piezoelectric Energy Harvesting	Kim, Hyunuk; Tadesse, Yonas; Priya, Shashank	ENERGY HARVESTING TECHNOLOGIES	2009	611	0	0	0	0	0	0	9	28	42	61	67	91	94	112	107
MEMS power generator with transverse mode thin film PZT	Jeon, YB; Sood, R; Jeong, JH; Kim, SG	SENSORS AND ACTUATORS A-PHYSICAL	2005	544	0	0	0	9	16	41	35	29	63	55	48	44	59	78	67
Direct-Write Piezoelectric Polymeric Nanogenerator with High Energy Conversion Efficiency	Chang, Chieh; Tran, Van H.; Wang, Junbo; Fuh, Yiin-Kuen; Lin, Liwei	NANO LETTERS	2010	528	0	0	0	0	0	0	0	17	35	52	75	92	93	81	83

Por último, realizamos una búsqueda de publicaciones referidas a Piezoelectric tile (baldosa piezoeléctrica). Se obtuvieron 64 publicaciones.

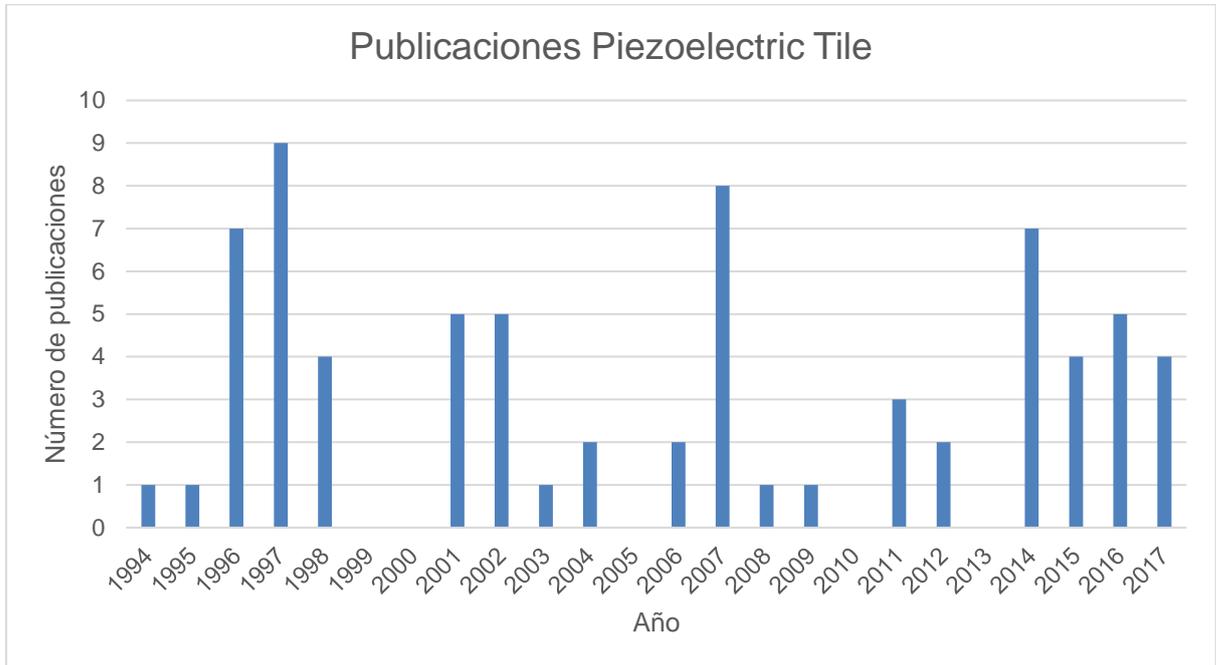


Ilustración 38: Publicaciones Piezoelectric Tile. Elaboración propia con datos de [24].

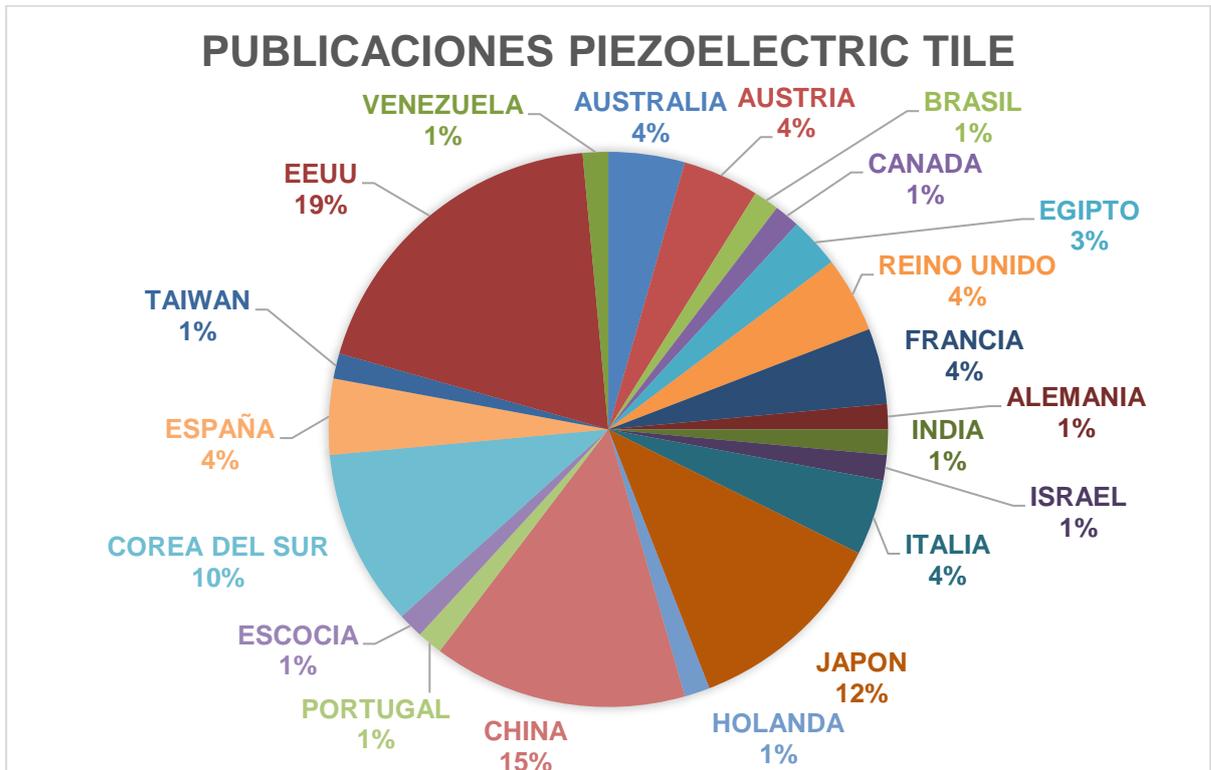


Ilustración 39: Porcentaje a nivel mundial de publicaciones sobre baldosas piezoeléctricas. Elaboración propia con datos de [24].

Tabla 10: Numero de publicaciones sobre baldosas piezoeléctricas a nivel mundial. Elaboración propia con datos de [24].

País	Publicaciones	País	Publicaciones
AUSTRALIA	3	JAPON	8
AUSTRIA	3	HOLANDA	1
BRASIL	1	CHINA	10
CANADA	1	PORTUGAL	1
EGIPTO	2	ESCOCIA	1
REINO UNIDO	3	COREA DEL SUR	7
FRANCIA	3	ESPAÑA	3
ALEMANIA	1	TAIWAN	1
INDIA	1	EEUU	13
ISRAEL	1	VENEZUELA	1
ITALIA	3		

Como se puede observar, Argentina aún no ha realizado ninguna investigación con referencia a este tema.

De igual manera que con el tema anterior, realizamos una búsqueda de las publicaciones más citadas y sus respectivos autores, obteniendo los siguientes resultados:

Tema: piezoelectric tile



Ilustración 40: Elementos publicados cada año [24]



Ilustración 41: Citas cada año [24]

Tabla 11: Las 10 publicaciones más citadas sobre baldosas piezoeléctricas. Elaboración propia con datos de [24].

Título del Paper	Autores	Publicado en	Año	N° citas	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017
Orientational aspects of antibody immobilization and immunological activity on quartz crystal microbalance electrodes	Caruso, F; Rodda, E; Furlong, DN	JOURNAL OF COLLOID AND INTERFACE SCIENCE	1996	133	1	8	7	4	5	6	3	4	6	7	5	7	6	3	8	10	6	14	7	2	5	9
Guided wave signal processing and image fusion for in situ damage localization in plates	Michaels, Jennifer E.; Michaels, Thomas E.	WAVE MOTION	2007	127	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6	7	14	17	11	18	15	15	13	11
Three-dimensional solutions of smart functionally graded plates	Reddy, JN; Cheng, ZQ	JOURNAL OF APPLIED MECHANICS-TRANSACTIONS OF THE ASME	2001	115	0	0	0	0	0	0	2	8	6	7	11	7	13	15	9	4	4	7	4	6	5	7
Drag reduction in wall-bounded turbulence via a transverse travelling wave	Du, YQ; Symeonidis, V; Karniadakis, GE	JOURNAL OF FLUID MECHANICS	2002	107	0	0	0	0	0	0	0	6	4	4	7	6	11	9	8	9	3	7	9	7	8	9
Effects of pore shape and porosity on the properties of porous PZT 95/5 ceramics	Zeng, Tao; Dong, XianLin; Mao, ChaoLiang; Zhou, ZhiYong; Yang, Hong	JOURNAL OF THE EUROPEAN CERAMIC SOCIETY	2007	89	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	2	12	4	7	12	16	10	13	12
A SELF-TUNING PIEZOELECTRIC VIBRATION ABSORBER	HOLLKAMP, JJ; STARCHVILLE, TF	JOURNAL OF INTELLIGENT MATERIAL SYSTEMS AND STRUCTURES	1994	76	2	2	1	1	2	5	5	4	4	3	0	1	2	3	3	3	6	1	6	7	8	7
Ink-jet printing of gold conductive tracks	Nur, HM; Song, JH; Evans, JRG; Edirisinghe, MJ	JOURNAL OF MATERIALS SCIENCE-MATERIALS IN ELECTRONICS	2002	56	0	0	0	0	0	0	0	3	1	4	5	2	2	6	2	2	5	1	2	3	8	10
Nonlinear thermomechanical post-buckling of circular FGM plate with geometric imperfection	Li, Shi-Rong; Zhang, Jing-Hua; Zhao, Yong-Gang	THIN-WALLED STRUCTURES	2007	55	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	3	1	3	2	4	6	11	12	11
Slip resistance of casual footwear: Implications for falls in older adults	Menz, HB; Lord, SR; McIntosh, AS	GERONTOLOGY	2001	34	0	0	0	0	0	0	0	2	3	0	2	2	4	5	0	1	2	4	2	2	3	2
Modeling of piezoelectric multilayer ceramics using finite element analysis	Goldberg, RL; Jurgens, MJ; Mills, DM; Henriquez, CS; Vaughan, D; Smith, SW	IEEE TRANSACTIONS ON ULTRASONICS FERROELECTRICS AND FREQUENCY CONTROL	1997	30	0	0	1	4	0	0	1	1	0	3	0	2	4	2	1	0	2	4	0	0	2	3

Como se puede observar en la tabla anterior, en los primeros puestos se encuentran instituciones chinas y estadounidenses.

3.2.2 Patentes

La primera aplicación que se obtuvo a partir de un material piezoeléctrico, tuvo lugar durante la Primera Guerra Mundial. En 1917, P. Langevin empezó a perfeccionar los detectores ultrasónicos submarinos. Éste hecho estimuló una intensa actividad en el desarrollo de todo tipo de dispositivos piezoeléctricos. No obstante, los materiales disponibles en esa época a menudo limitaban el rendimiento de los dispositivos y su explotación comercial.

Durante la Segunda Guerra Mundial, en Estados Unidos, Japón y la Unión Soviética, grupos de trabajo aislados se dedicaron a investigar y mejorar los materiales utilizados en condensadores, descubrieron que ciertos materiales cerámicos (preparados por sinterizado de polvos de óxido metálico) mostraban constantes dieléctricas hasta 100 veces mayores que los cristales comunes. Además, estos materiales llamados ferroeléctricos, fueron producidos de forma que mejoraron sus propiedades piezoeléctricas. El descubrimiento de un método simple de fabricación de cerámicas piezoeléctricas con características de excelente rendimiento provocó el resurgimiento de la investigación y el desarrollo de los dispositivos piezoeléctricos.

El desarrollo de los materiales y dispositivos piezoeléctricos que se extendió por todo el mundo fue claramente dominado por los grupos industriales de los EE. UU, los cuales se aseguraron el liderazgo mediante el registro de patentes. Fue debido a esto que el desarrollo de materiales y dispositivos se llevó a cabo bajo una estricta política de confidencialidad en los Estados Unidos.

En contraste, varias compañías y universidades japonesas formaron, en 1951, una asociación llamada Barium Titanate Application Research Committe. Esta asociación estableció un precedente de organización para superar con éxito no sólo desafíos técnicos y obstáculos de fabricación, sino también la definición de nuevas áreas de negocio para este tipo de materiales. A partir de 1965, las empresas japonesas comenzaron a obtener los primeros beneficios del constante trabajo de desarrollo de nuevos materiales y aplicaciones iniciado en 1951. Desde una perspectiva internacional, Japón pasó a liderar este campo, desarrollando nuevos conocimientos, nuevas aplicaciones, nuevos procesos y nuevas áreas de negocio.

El éxito comercial de los esfuerzos japoneses atrajo la atención de la industria en muchas otras naciones y estimuló un nuevo esfuerzo para desarrollar con éxito productos piezocerámicos. Éste hecho se demuestra con el gran aumento del número de patentes registradas en las últimas décadas. Otra evidencia de la gran actividad que se desarrolla alrededor de los materiales y dispositivos piezoeléctricos es el gran número de artículos publicados en los últimos años por países como China, Rusia o

la India, quienes experimentan un crecimiento sostenido en el número de publicaciones en los últimos años. A juzgar por el incremento de la actividad mundial, y por los éxitos hallados en el último cuarto del siglo XX y la primera década del siglo XXI, la búsqueda de nuevas oportunidades aún está en proceso.

A continuación, se muestra la evolución producida durante los años 1980 y 2010 en la publicación de patentes [3]. Se han obtenido un total de 116.694 patentes publicadas durante este periodo de tiempo. Este gráfico muestra una tendencia positiva.

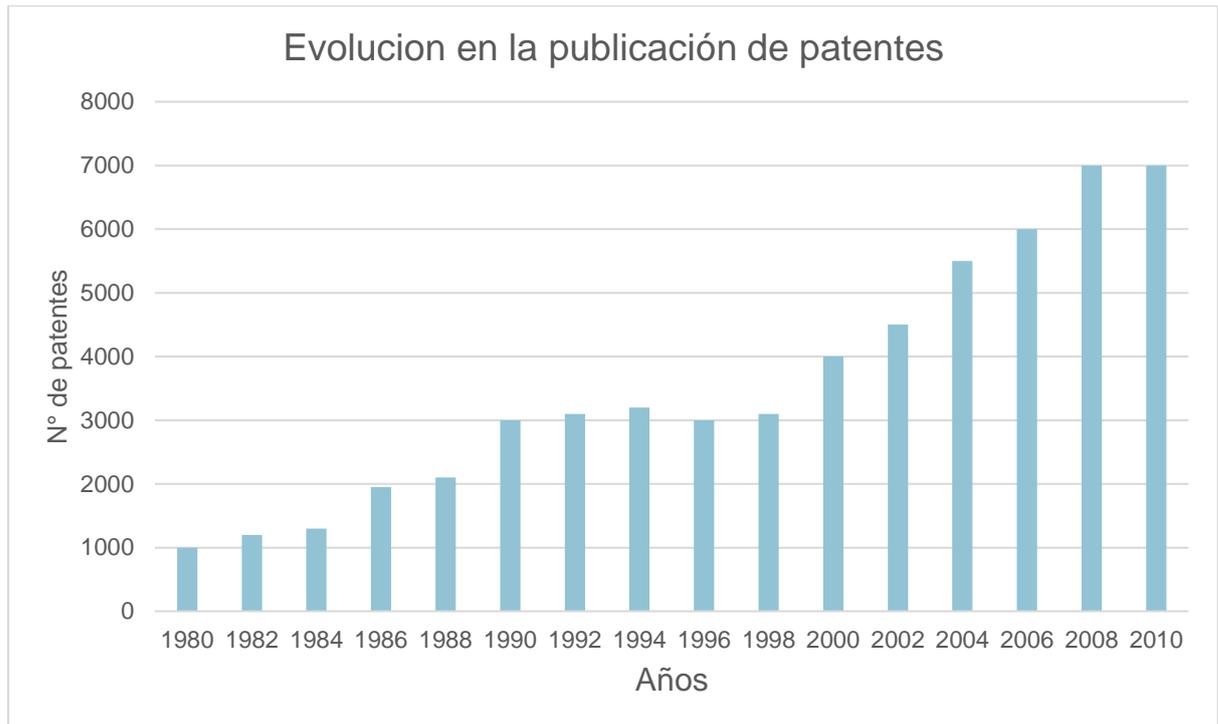


Ilustración 42: Evolución de publicaciones de patentes sobre piezoelectricidad. Elaboración propia con datos de [3]

4 Generalidades y Fundamentos

4.1 Fundamentos de los materiales ferroeléctricos [25]

Un material ferroeléctrico se define como un dieléctrico que posee un momento dipolar, polarización espontánea P_s , en ausencia de un campo eléctrico, la cual puede orientarse mediante la aplicación de un campo eléctrico. De esta forma, se hace necesario definir primeramente el concepto de dieléctrico para introducirnos posteriormente en el tema de ferroelectricidad.

4.1.1 Dieléctricos

Un material dieléctrico se define como aquel que está constituido por átomos que poseen una estructura electrónica fuertemente ligada a los núcleos atómicos, de esta forma cuando se aplica un campo eléctrico, no se produce migración de carga a través del material, como sucede en los materiales conductores. La única manifestación del dieléctrico al ser expuesto a un campo eléctrico, es un cambio en la distribución de cargas, debido a un ligero desplazamiento de las cargas negativas con respecto a las positivas, dando lugar a una estructura eléctrica dipolar.

4.1.1.1 Respuesta dieléctrica

Al aplicar un campo eléctrico sobre un dieléctrico, la polarización que se origina como consecuencia del desplazamiento de dichas cargas (dipolos eléctricos) [26], está dado por:

$$\vec{P} = \chi \varepsilon_0 \vec{E} \quad 1$$

Donde, P es la polarización inducida en la dirección del campo por unidad de volumen, E es el campo eléctrico externo, χ es la susceptibilidad dieléctrica del material y ε_0 es la constante dieléctrica en el vacío.

Por otro lado, la densidad de carga superficial en un material dieléctrico, también conocido como desplazamiento dieléctrico D , permite ver la relación que existe entre la constante dieléctrica y la polarización. De esta manera, se obtiene:

$$\vec{D} = \varepsilon_0 \vec{E} + \vec{P} \quad 2$$

La cantidad $\varepsilon_0 E$, se le conoce como el desplazamiento dieléctrico en el vacío D_0 . Reemplazando la polarización P en la ecuación anterior, se tiene:

$$\vec{D} = \varepsilon_0 (1 + \chi) \vec{E} = \varepsilon_0 \varepsilon_r \vec{E} = \varepsilon \vec{E} \quad 3$$

Donde, la permitividad dieléctrica relativa ε_r , se define como la relación entre la constante dieléctrica del material respecto a la constante dieléctrica en el vacío:

$$\varepsilon_r = (1 + \chi) = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} \quad 4$$

Por último, la relación que existe entre la polarización y la constante dieléctrica del material se obtiene de:

$$\vec{P} = \vec{D}_0 - \epsilon_0 \vec{E} = \epsilon_0 (\epsilon_r - 1) \vec{E} \quad 5$$

4.1.1.2 *Dispersión dieléctrica*

Prácticamente la constante dieléctrica ϵ_r , indica el grado de polarización que tiene lugar en un material dieléctrico.

Cuando un material dieléctrico se somete bajo un campo eléctrico alterno, la respuesta del material depende de la frecuencia del campo con la que se es estimulado. Esto se debe a que la respuesta está determinada por diferentes mecanismos de polarización, los cuales se originan o se manifiestan en diferentes rangos de frecuencia, como se muestra en la figura

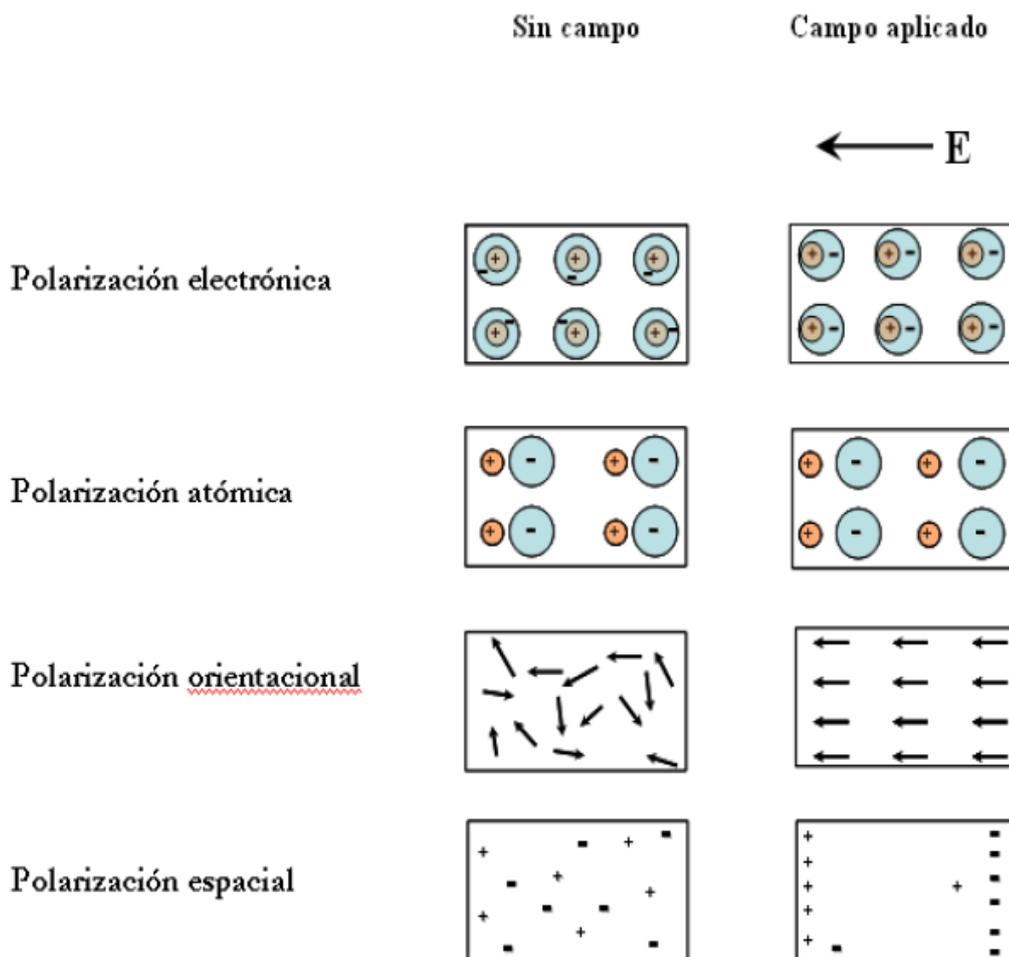


Ilustración 43: Mecanismo de Polarización dentro de un dieléctrico.

Las diferentes polarizaciones se definen como:

- **La polarización electrónica α_e :** Surge del desplazamiento producido por el campo eléctrico, de la nube de electrones de los átomos con respecto al núcleo, formando así un dipolo.

- **La polarización iónica o atómica α :** Se genera cuando un campo eléctrico produce un desplazamiento de los cationes en una dirección y los aniones en la dirección opuesta, induciéndose así un dipolo.
- **La polarización orientacional o dipolar α_d :** Involucra la presencia de momentos bipolares en el material en ausencia de un campo externo, los cuales, al aplicar un campo eléctrico, lo que se genera únicamente es un cambio de orientación de dichos dipolos permanentes de las moléculas.
- **Polarización interfacial o Maxwell-Wagner α_s :** Este tipo de polarización tiene origen en la acumulación de cargas libres localizadas en las interfaces dentro del material (haciendo referencia a regiones límites que separan diferentes fases que componen un dieléctrico, como por ejemplo bordes de granos) o entre diferentes materiales (ejemplo, interfaz sustrato-película).

Un cerámico está conformado por igual número de iones positivos y negativos. En la ausencia de un campo eléctrico externo no hay separación de cargas entre estos iones opuestos. Sin embargo, cuando el dieléctrico es sometido a un determinado campo eléctrico, las cargas que presentan mayor movilidad se desplazan, quedando atrapadas en las zonas límite que hay dentro del material o muchas veces migrando hacia la superficie de este. Por lo general, aquellas cargas que se depositan en la interfaz sustrato película (o interfase electrodo-material), pueden llegar a generar capacidades aparentes del orden de 10^{-6} F, y como este valor no tiene un significado dieléctrico, el material se considera como un conductor.

Por otro lado, el comportamiento dinámico de la polarización orientacional y espacial, responden a un proceso de reorientación llamado proceso de relajación, mientras que el comportamiento dinámico de la polarización inducida, tal como la polarización iónica y electrónica, responden a procesos de resonancia, en los cuales se absorbe energía cuando la excitación del campo entra en resonancia con la vibración de las cargas eléctricas a una frecuencia crítica, como se muestra a continuación.

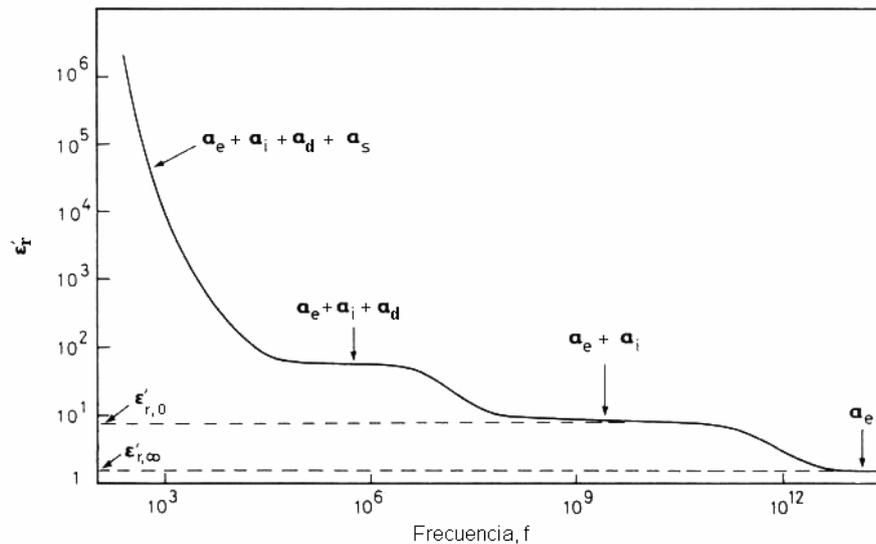


Ilustración 44: Curva de dispersión eléctrica generada por los diferentes mecanismos de polarización.

Por último, la polarización total presente en un material dieléctrico α , es la suma de todas las contribuciones de cada una de estas polarizaciones mencionadas anteriormente.

$$\alpha = \alpha_e + \alpha_i + \alpha_d + \alpha_s \quad 6$$

4.1.1.3 Tipos de dieléctricos

Los materiales dieléctricos pueden ser clasificados según el comportamiento y el valor de la constante dieléctrica, ϵ_r , de la siguiente manera:

- **Materiales dieléctricos convencionales:** Se define como aquellos dieléctricos que presentan una respuesta lineal en la polarización cuando un campo eléctrico es aplicado. Los valores de la constante dieléctrica de estos materiales están entre 1 y 10 (aproximadamente).
 - **Materiales ferroeléctricos:** En estos materiales, a diferencia de los anteriores, cuando un campo eléctrico es aplicado la polarización del dieléctrico muestra una respuesta no lineal, denominada curva de histéresis. Dicha curva exhibe una característica propia de estos materiales, que es la presencia de una polarización espontánea en ausencia de un campo eléctrico externo, cuya polarización es invertible con la aplicación de un campo externo. Estos materiales exhiben constantes dieléctricas ϵ_r muy elevadas, las cuales pueden ser mayores 1000 (aproximadamente).

4.1.2 Ferroeléctricidad

El fenómeno de ferroelectricidad aparece en ciertos materiales cerámicos, como consecuencia de la baja simetría que presenta su estructura cristalina. Propiedades como la piezoelectricidad, piroelectricidad y ferroelectricidad, son fenómenos que se

deben precisamente a que algunos materiales poseen una estructura cristalina no centrosimétrica.

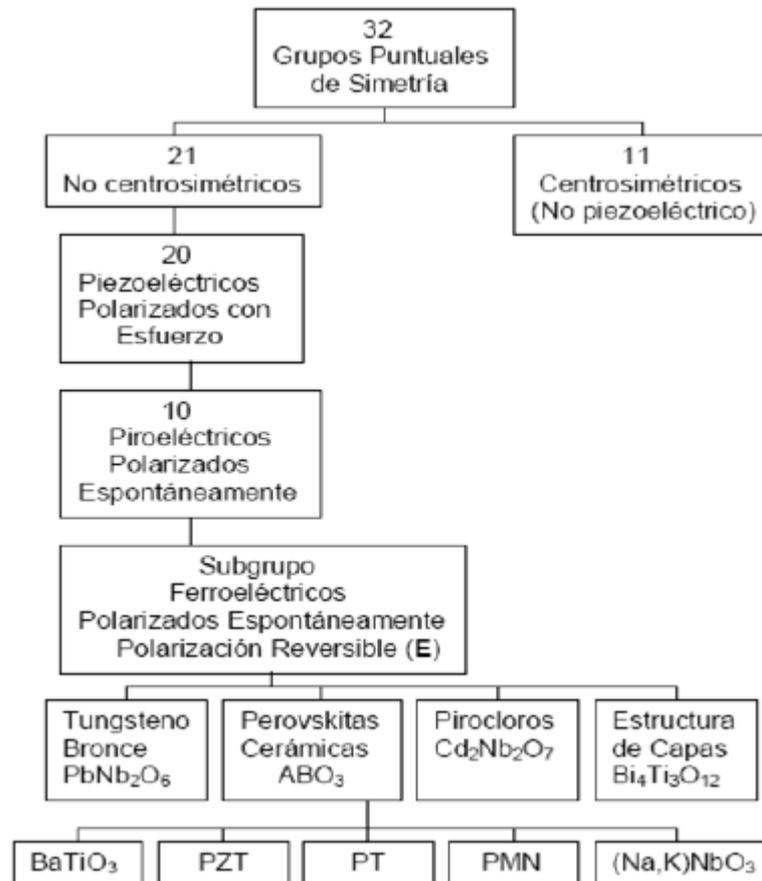


Ilustración 45: Esquema de los grupos puntuales de simetría y la relación con los fenómenos de piezo-ferroelectricidad.

Desde el punto de vista cristalográfico, existen 32 grupos puntuales de simetría, dentro de los que puede ser clasificado un sólido cristalino, como se muestra en la ilustración anterior. De los cuales 20 son no centrosimétricos, y en los que aparece un momento dipolar al aplicar una tensión mecánica. Los materiales que presentan dicha propiedad se denominan piezoelectricos.

Solo 10 grupos puntuales de estos últimos 20, presentan un solo eje polar, el cual es originado por la disposición de los iones dentro de la celda unitaria. El ordenamiento atómico en los extremos de este eje es diferente, de tal forma que los centros de carga positiva y negativa no coinciden, dando lugar a un momento dipolar neto, inclusive en ausencia de un esfuerzo externo o de tensión mecánica, originando una polarización espontánea dentro del material. Los materiales cuya polarización puede cambiar de sentido con la aplicación de un campo eléctrico externo son denominados ferroelectricos. Prácticamente, la ferroelectricidad es un fenómeno cooperativo que está asociado al alineamiento de dipolos eléctricos con el campo eléctrico aplicado. De esta forma, un material ferroelectrico, se define como aquel material que presenta una polarización espontánea en ausencia de un campo

eléctrico exterior, y cuya dirección de polarización es posible revertir aplicando un campo eléctrico exterior inverso.

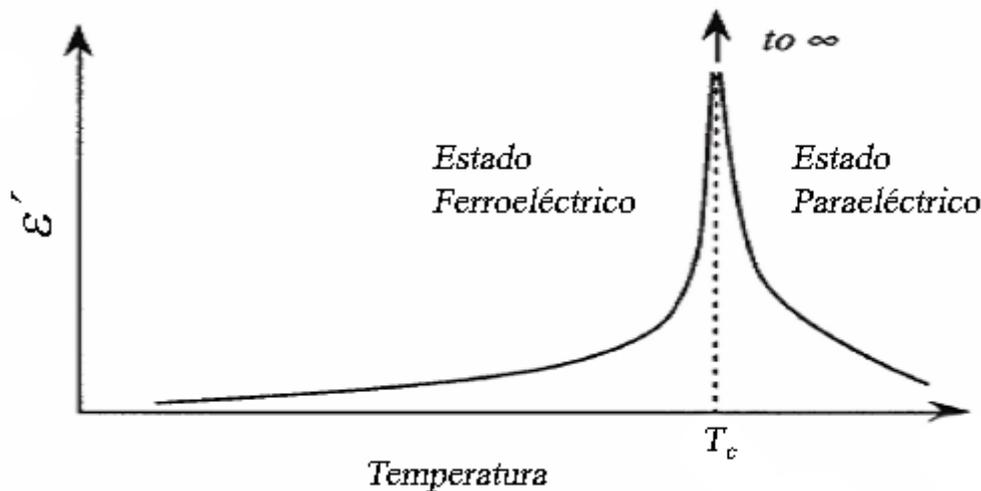


Ilustración 46: Transición del estado ferroeléctrico a paraeléctrico

Además, las propiedades ferroeléctricas en un material solo tienen lugar en un intervalo de temperatura, en el cual se tiene la asimetría de la celda unitaria que origina el momento dipolar y por tanto la polarización espontánea. Cuando el material es sometido a una temperatura más allá de este intervalo, una transición de fase se hace presente y la celda unitaria se transforma en una estructura cristalina de mayor simetría (centrosimétrica), donde el vector de polarización se hace nulo y la polarización espontánea se pierde. Este estado donde se pierden las propiedades ferroeléctricas se conoce como paraeléctrico y la temperatura de transición a la cual el material pasa del estado ferroeléctrico a paraeléctrico, se le conoce como temperatura de Curie (T_c) como se observa en la Ilustración anterior.

4.1.2.1 Dominios ferroeléctricos

Los materiales ferroeléctricos tienen la característica de conseguir el estado de mínima energía mediante la existencia de paredes de dominios (planos macla). Los dominios ferroeléctricos son pequeñas regiones del material donde las celdas que las conforman tienen un ordenamiento cristalográfico definido, de forma tal que los dipolos de cada celda se encuentran orientados en la misma dirección, y como consecuencia se forman estas pequeñas regiones con una polarización diferente a cero.

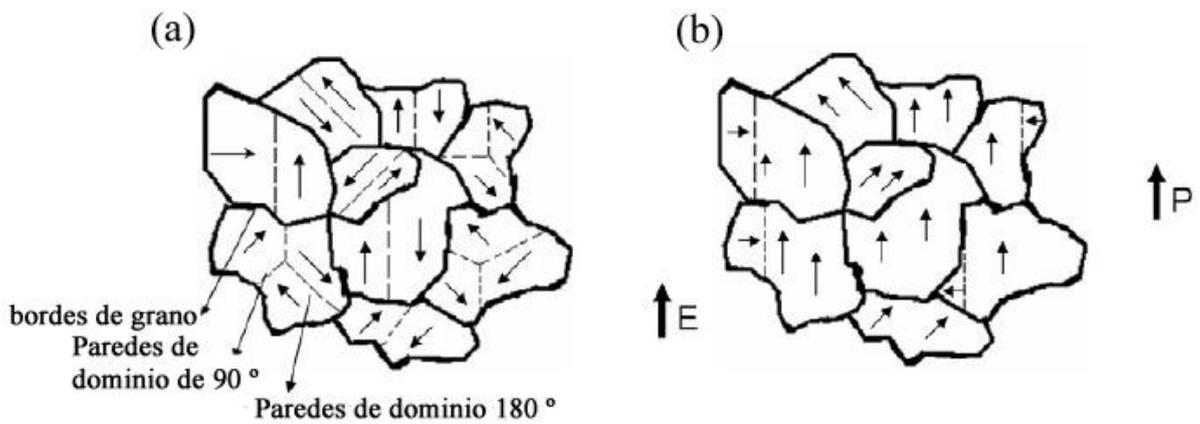


Ilustración 47: Polarización de la cerámica (a) antes y (b) de aplicar un campo eléctrico.

En la Ilustración se muestra como está conformado un material policristalino, donde cada grano cristalino está distribuido espacialmente al azar y ligado con otros granos, mediante bordes de grano. Cada grano tiene una polarización diferente de cero, pero la polarización total de la cerámica es nula en ausencia de un campo eléctrico aplicado ya que se cancelan las contribuciones de cada grano. Cuando al material policristalino se le aplica un campo eléctrico, una polarización es inducida a través del movimiento de las paredes de dominio [27].

4.1.2.2 Curva de Histéresis

Una curva de histéresis ferroeléctrica describe la dependencia de la polarización respecto a un campo eléctrico externo aplicado en un material. Un esquema de dicha curva se observa en la Ilustración siguiente, en esta se muestra la distribución y orientación de los dominios.

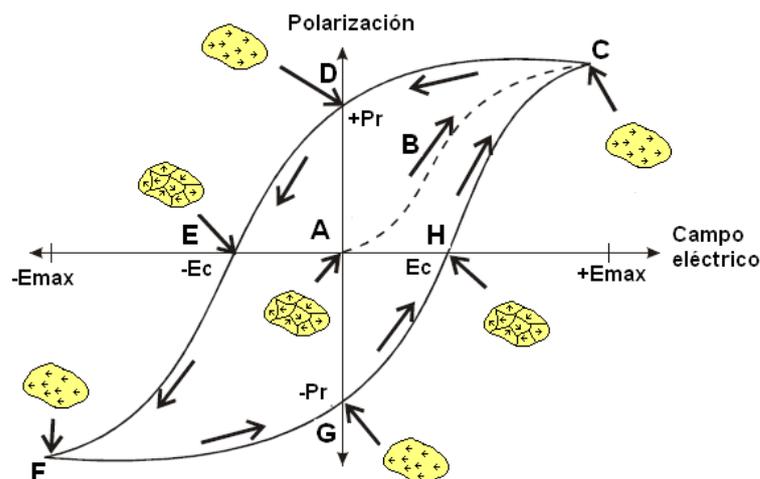


Ilustración 48: Curva de histéresis de un material ferroeléctrico.

En el segmento A-B de la curva, se muestra que al aplicar un campo eléctrico la polarización empieza a aumentar orientando los dominios, una vez que todos estos se encuentran orientados en la misma dirección del campo eléctrico aplicado (punto

C), se ha alcanzado la polarización de saturación P_s . Luego, a medida que el campo disminuye algunos dominios se reorientan de tal forma que, al tener un campo eléctrico aplicado igual a cero, la polarización no es nula. Esta polarización es llamada remanente P_r (punto D), pues los dominios conmutados tienden a mantenerse. La reorientación de los dominios continúa mientras el campo eléctrico aumenta en dirección negativa hasta conseguir que la polarización neta vuelva a un valor de cero (punto E). El campo necesario para anular dicha polarización se conoce como campo coercitivo E_c . Por último, el ciclo de histéresis se cierra con los segmentos F – G – H – C [28].

4.1.2.3 Ferroeléctricos tipo Perovskita (ABO_3)

En la Ilustración siguiente, se observa la estructura cristalina que presentan algunos materiales ferroeléctricos conocida como perovskita, cuya fórmula general es ABO_3 .

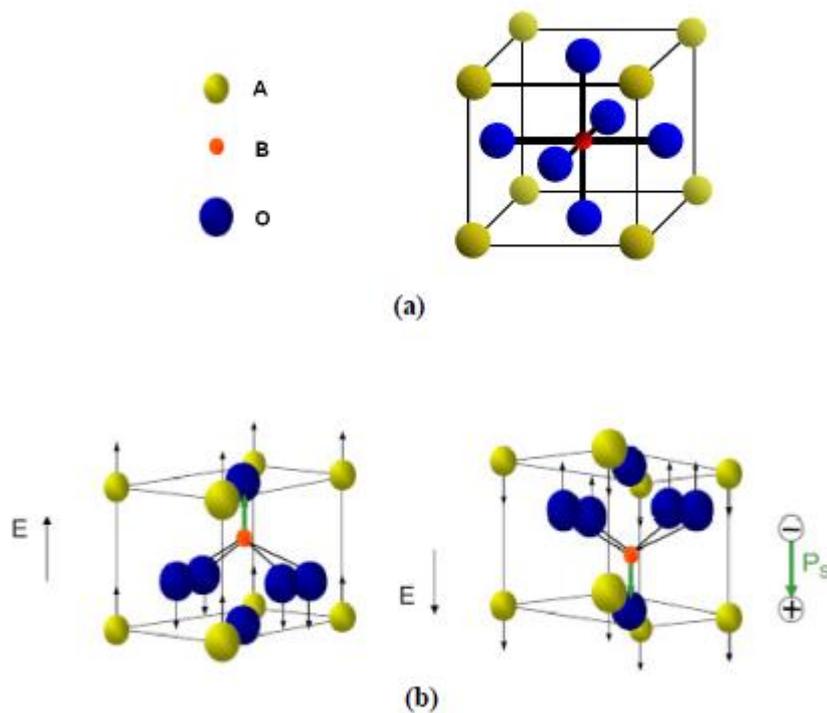


Ilustración 49: Imagen de la estructura cristalina tipo perovskita (a) en estado paraeléctrico, (celda cúbica) (b) en estado ferroeléctrico (celda tetragonal).

Esta estructura cristalina en su estado paraeléctrico es cúbica ($Pmm3$), ver Ilustración anterior (a). La red cristalina tiene dos sitios catiónicos, donde los cationes más grandes se localizan en las esquinas de la celda unitaria, posición A y el catión más pequeño ocupa el centro de esta, posición B. Los iones oxígeno (aniones) se hallan en los centros de las caras de la celda unitaria. En algunos casos, hay múltiples cationes en los sitios A o B. Por ejemplo, en los cerámicos de zirconato-titanato de plomo el sitio catiónico B puede ser ocupado por iones de Zr o Ti.

En el estado ferroeléctrico, Ilustración anterior (b), la celda unitaria sufre pequeñas distorsiones (desplazamientos) y la disposición de los iones se encuentra de forma tal, que generan un momento dipolar (eje polar), el cual puede ser reorientado con un campo eléctrico aplicado, dando como resultado la conmutación entre dos estados [28] [29].

4.1.2.4 Cerámicos ferroeléctricos PZT

Los cerámicos pseudo-binarios de zirconato-titanato de plomo $Pb(Ti_x Zr_{1-x})O_3$ o más comúnmente conocidos como PZT, son considerados unos de los materiales ferroeléctricos tipo perovskita más importantes, ya que estos presentan muy buenas propiedades piezoeléctricas, dieléctricas y electro-ópticas. Esto ha hecho que sean muy utilizados en la fabricación de dispositivos electrónicos como actuadores piezoeléctricos, sensores y transductores, debido a la gran versatilidad que presentan para ser utilizados como materiales de alta potencia o alta sensibilidad [29], dadas sus propiedades, como se observa en la tabla.

Tabla 12: Propiedades PZT [29]

	Temperatura Curie (°C)	d_{33} (pC/N)	Kp	Constante dieléctrica
PZT	300~400 [30] [31] [32]	190~700 [30] [31] [32]	0,52~0,63 [30] [31]	425~4000 [30] [31]

No obstante, las mejores propiedades de estos cerámicos se encuentran en la composición $Pb (Zr 0.52 Ti 0.48) O_3$, ya que en esta aparece un límite de frontera morfotrópica de fase (MPB), que se mantiene inclusive en un amplio cambio de temperatura, preservando las propiedades del material durante todo este rango de temperatura.

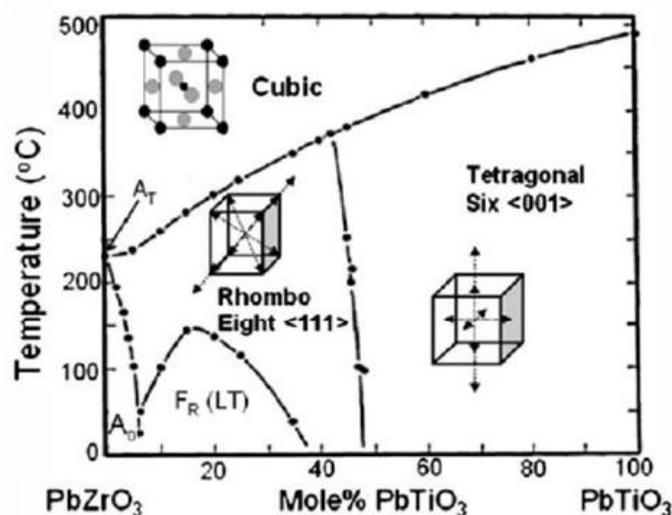


Ilustración 50: Diagrama de fases del zirconato-titanato de plomo, PZT

Este límite de frontera morfofotrópica de fase es de importancia en estos cerámicos, ya que en este se observa la coexistencia de dos fases cristalinas, la tetragonal y la romboédrica, es decir, dos estados de energía equivalentes que facilitan una mayor y mejor reorientación de los dominios, generando un aumento en la polarizabilidad de los ferroeléctricos PZT.

Sin embargo, la fabricación de dispositivos electrónicos con base en estas composiciones tiene como resultado la formación y evaporación de óxidos de plomo durante el proceso de obtención del material, siendo este metal una de las sustancias más tóxicas del planeta, que ocasiona graves impactos al medio ambiente y que conjuntamente pone en riesgo la salud humana. Además, no solo se ha convertido en una problemática la generación de este óxido durante el proceso de elaboración de los cerámicos, sino que el mismo dispositivo ferroeléctrico obtenido se convierte en un futuro desecho electrónico. Muchos de estos dispositivos que contienen plomo se encuentran insertados en aparatos electrónicos tales como celulares, computadoras y televisores, los cuales mientras se encuentran en uso no generan contaminación, pero una vez cumplen su vida útil o quedando obsoletos se convierten en residuos electrónicos [33]. Si estos compuestos son fundidos liberan toxinas al aire, tierra y agua, las cuales pueden afectar el desarrollo del sistema reproductor del ser humano, así como alterar el desarrollo cerebral y el sistema nervioso [34]. En la actualidad, la falta de aplicación o severidad de normativas que generen una conciencia ambiental ha desencadenado uno de los mayores problemas ambientales entre los países subdesarrollados y las principales potencias, debido a que gran parte de estos residuos electrónicos que son generados en Estados Unidos o en la comunidad de la Unión Europea están siendo exportados a países subdesarrollados para su disposición final. [34] [35]

Todo esto ha generado un gran interés en la búsqueda de nuevos materiales con propiedades piezo-ferroeléctricas libres de compuestos tóxicos como el plomo, que permitan la conservación del medio ambiente, pero que además posean propiedades eléctricas iguales o superiores a las del zirconato-titanato de plomo. Una de esas alternativas donde la comunidad científica ha mostrado gran interés, es en las composiciones de las familias tipo perovskita de los niobatos de sodio potasio.

4.2 Efecto piezoeléctrico

El efecto piezoeléctrico se produce tanto en materiales monocristalinos como en cerámicas ferroeléctricas policristalinas. En los materiales monocristalinos, una asimetría en la estructura de las celdas unitarias de la red cristalina, es decir, un eje polar que se forma debajo de la temperatura (T) de Curie (C). Esto es un requisito previo para que el efecto piezoeléctrico se produzca.

Una tensión mecánica genera cargas en la superficie de los materiales piezoeléctricos. Este efecto piezoeléctrico directo, también es llamado generador o el efecto del sensor, el cual convierte energía mecánica en energía eléctrica.

De forma opuesta, el efecto piezoeléctrico inverso provoca un cambio en la longitud de este tipo de materiales cuando se aplica una tensión eléctrica. Este efecto actuador convierte la energía eléctrica en energía mecánica.

Los materiales piezoeléctricos más comunes son cristales naturales como el cuarzo, la turmalina, la sal de Rochelle, etc., los cuales han servido durante muchos años como transductores de una cantidad de aplicaciones electromecánicas y mecanoeléctricas que seguramente seguirán encontrando nuevas aplicaciones en el futuro. Sin embargo, el descubrimiento de materiales cerámicos piezoeléctricos abrió el camino hacia numerosas aplicaciones. [36]

Los materiales cerámicos piezoeléctricos son químicamente inmunes a la humedad o cualquier otra condición atmosférica. Tienen propiedades mecánicas semejantes a las más conocidas cerámicas de aislación y son fabricadas en procesos similares, aunque se efectúa un control más estricto en la formación de propiedades eléctricas.

Por su naturaleza cerámica a estos materiales piezoeléctricos puede dárseles cualquier forma o tamaño con la dirección de polarización elegida libremente para cumplir con todas las necesidades de diseño del transductor. Además, son extremadamente resistentes, es decir, son capaces de producir o soportar grandes esfuerzos.

Con pequeños cambios de la composición química de los materiales es posible enfatizar una o más propiedades específicas de modo tal de cumplir especialmente los requerimientos de ciertas aplicaciones. [37]

Los numerosos campos de aplicación pueden ser divididos en los siguientes grupos:

4.2.1 Generadores de alta tensión (magiclick):

El magiclick es un producto inventado en Argentina por Hugo Kogan en 1963, mientras se desempeñaba como director del departamento de diseño de la empresa Aurora,¹ y debió su nombre a que encendía la llama con sólo pulsar un botón. "Magiclick" era originalmente el nombre comercial del producto, pero con el tiempo pasó a ser de uso común. La publicidad de la época de su lanzamiento se jactaba de su calidad y duración prometiendo que lo haría por 104 años.

Funcionamiento: Un generador de alta tensión piezoeléctrico consta de un pequeño martillo con un resorte que, al pulsar un botón, golpea con fuerza un cristal de PZT o un cristal de cuarzo. La deformación enérgica y repentina produce un voltaje elevado con la descarga eléctrica subsiguiente entre unos electrodos.

No se requiere ninguna conexión eléctrica externa, aunque a veces se utiliza un cable aislado para conducir la descarga eléctrica lejos del cristal que la genera.

Los generadores de alta tensión piezoeléctricos se pueden disparar con cualquier tipo de palanca, pulsador o incluso un relé. Lo más común es que la chispa eléctrica se genere girando una palanca o pulsando un botón.

Ejemplos de aplicación de generadores de alta tensión:

- Ignición o encendido de llama piloto en aparatos a gas.
- Encendedores.
- Encendido de bulbos de flash.
- Encendido de mecha de explosivos.

4.2.2 Transductores de ultrasonido de alta intensidad:

Funcionamiento: El ultrasonido se define como la energía generada por ondas sónicas con una frecuencia de 20 kHz o más. El ultrasonido de alta intensidad es un procedimiento que consiste en la aplicación de un onda ultrasonica de alta frecuencia y alta energía. Tiene sus principales aplicaciones dentro del campo medicinal e industrial.

En uso medicinal los ultrasonidos focalizados de alta intensidad (HIFU) en el tratamiento de los tumores sólidos dentro de las terapias mínimamente invasivas, habiéndose desarrollado en los últimos años transductores que permiten la aplicación de ultrasonidos desde un foco extracorpóreo [38].

Las aplicaciones industriales son diversas, la dispersión y desaglomeración de sólidos en líquidos constituye una aplicación importante de los dispositivos ultrasónicos. La cavitación acústica genera poderosas fuerzas de cizallamiento que rompen los aglomerados en partículas dispersas individualmente. También, utilizando este principio se destaca la limpieza por ultrasonido, la cual es un proceso de limpieza rápido, eficaz y ecológico.

Ejemplos de aplicación de transductores de ultrasonido de alta intensidad:

- Desgaste y limpieza por ultrasonido.
- Soldadores ultrasónicos de plástico y metales.
- Maquinados ultrasónicos, por ejemplo: taladrado.
- Proyectores sonares.
- Terapia médica ultrasónica (5 W/cm²).
- Humidificadores ultrasónicos.

4.2.3 Transductores ultrasónicos de baja intensidad:

Funcionamiento: Las ondas de ultrasonido son producidas por un transductor (una sonda portátil), el cual puede emitir ondas de ultrasonido, así como detectar los ecos reflejados del ultrasonido. En la mayoría de los casos, los elementos activos en los transductores están hechos de materiales piezoeléctricos. Cuando se usan en un escáner de ultrasonido, el transductor envía un haz dirigido de ondas sonoras y estas

luego se reflejan de regreso al transductor. Cuando estos ecos llegan al transductor, se generan señales eléctricas que el escáner de ultrasonido convierte en imágenes.

Ejemplos de aplicación de transductores ultrasónicos de baja intensidad:

- Ensayos no destructivos ultrasónicos.
- Diagnósticos médicos ultrasónicos (0,5 W/cm²).
- Sonares.
- Aparatos para exploración sísmica.
- Transductores de retardo acústico (reverberadores).

4.2.4 Sistemas de flexión:

Funcionamiento: Son dispositivos que convierten las ondas mecánicas en señales eléctricas y viceversa. En los micrófonos, por ejemplo, las ondas sonoras hacen vibrar un diafragma y el movimiento de este deforma el material piezoeléctrico el cual genera una tensión eléctrica. La señal eléctrica de salida es análoga en cuanto a forma (amplitud y frecuencia) a la onda sonora que la generó.

Ejemplos de aplicación de sistemas de flexión:

- Cápsulas Pick Up (tocabiscos).
- Timbres piezoeléctricos (buzzer).
- Sensores aéreos ultrasónicos.
- Micrófonos.
- Telecomandos.

4.2.5 Otras aplicaciones:

- Filtros pasa banda cerámicos de F.I.
- Detectores ultrasónicos de nivel de líquido.
- Medidores ultrasónicos de flujo.
- Detectores ultrasónicos de solidez o dureza.
- Acelerómetros.
- Detectores de esfuerzo.
- Control de movimientos leves.

4.3 Las cerámicas piezoeléctricas

El efecto piezoeléctrico de materiales monocristalinos naturales, tales como cuarzo, turmalina y sal de Rochelle es relativamente pequeño. Los materiales policristalinos, tales como titanato de bario (BaTiO_3) y titanato de zirconato de plomo (PZT) exhiben desplazamientos más grandes o inducen tensiones eléctricas más grandes. Hoy en día los materiales cerámicos piezoeléctricos PZT están disponibles en muchas variedades y son los más utilizados para aplicaciones como el actuador o el sensor piezoeléctrico. Algunos agregados especiales de las cerámicas PZT como, por ejemplo, níquel (Ni), bismuto (Bi), lantano (La), neodimio (Nd), iones de niobio (Nb) hacen posible optimizar parámetros piezoeléctricos y dieléctricos.

Para ayudar entender el efecto piezoeléctrico debemos considerar primero la micro estructura del material. Desde el punto de vista eléctrico, la cerámica piezoeléctrica puede considerarse como que contiene dipolos elementales, como indica la ilustración 48, consistentes en una carga positiva y una negativa a una cierta distancia. [37]

Antes del proceso de fabricación los dipolos no muestran preferencia por alguna dirección en particular, de modo que en el material cerámico están orientados al azar (ilustración 48.a). Cuando se aplica una tensión mecánica, la suma de los desplazamientos de carga es cero tal que bajo estas condiciones el material no exhibirá un efecto piezoeléctrico. [36]

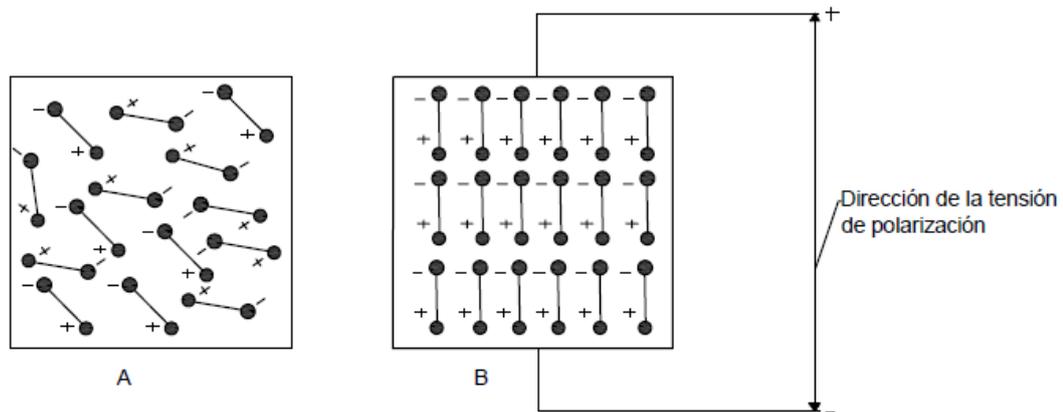


Ilustración 51: Ubicación de dipolos antes (a) y después (b) de la polarización [36]



Ilustración 52: Sección transversal de un material ferroeléctrico [32]

Una vista en sección transversal de un material cerámico ferroeléctrico muestra claramente los dominios polarizados de manera diferente dentro de los cristalitas individuales. [32]

Para obtener un efecto piezoeléctrico los dipolos deben primero ser orientados, lo que se hace exponiendo al material cerámico a un fuerte campo eléctrico externo a alta temperatura, no más allá de la llamada temperatura Curie (Se denomina temperatura de Curie, o en ocasiones punto de Curie, a la temperatura por encima de la cual un cuerpo ferromagnético pierde su magnetismo, comportándose como un material puramente paramagnético).

A esta temperatura los dipolos naturales desaparecen y son creados nuevamente en forma espontánea cuando disminuye la temperatura. Bajo estas condiciones polares los dipolos toman una dirección correspondiente a la dirección del campo de polarización (ilustración 48.b), con el resultado que el cuerpo de la cerámica muestra una elongación en la misma dirección (en realidad los dipolos nunca se orientan como idealmente sugiere la ilustración 6.b; la estructura cerámica admite solo ciertas rotaciones a los dipolos).

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

Prácticamente las cerámicas piezoeléctricas están constituidas por mezclas policristalinas: titanatos de bario, de calcio, de plomo o de titanozirconatos de plomo. Se obtienen por compresión del polvo a alta temperatura, siendo moldeadas y cocidas en un horno.

Las cerámicas pueden ser producidas en forma de discos, de bastones, de paralelepípedos, de tubos, de sectores cilíndricos y de semiesferas, que pueden ser ensambladas luego como esferas.

Las piezas terminadas son provistas de electrodos de plata, cocidos a horno. Para ciertas aplicaciones la cara activa plateada de la cerámica es protegida por un esmalte vitrificado. [39]

4.3.1 Polarización Ferroeléctrica

Para reducir al mínimo la energía interna del material, los dominios ferroeléctricos se forman en los cristales de la cerámica. Dentro de estos volúmenes, las orientaciones de la polarización espontánea es la misma.

Las diferentes orientaciones de dominios limítrofes están separadas por paredes de dominio. [32]

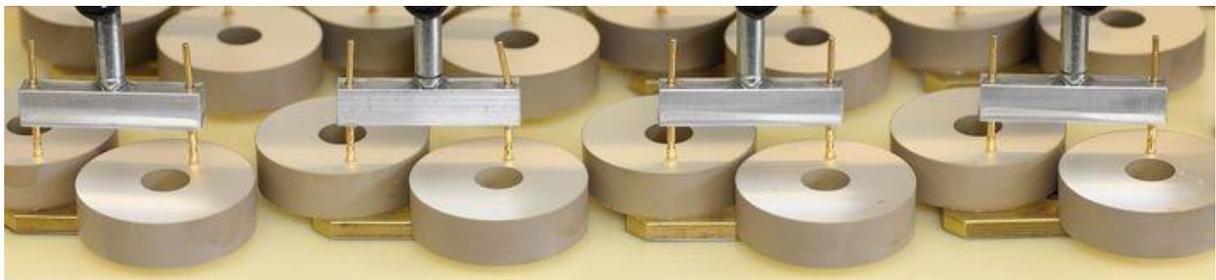


Ilustración 53: Polarización de un material piezoeléctrico [32]

Para este propósito, se aplica un fuerte campo eléctrico de varios kV/mm para crear una asimetría en el compuesto de cerámica previamente desorganizado. El campo eléctrico hace que se genere una reorientación de la polarización espontánea. Al mismo tiempo, los dominios con una orientación favorable a la dirección del campo de polaridad crecen y aquellos con una orientación de contracción desfavorable disminuyen. Las paredes de dominio se desplazan en la red cristalina.

Después de la polarización, la mayoría de las reorientaciones se conservan incluso sin la aplicación de un campo eléctrico. Sin embargo, un pequeño número de las paredes de dominio se desplazan de nuevo a su posición original, por ejemplo, debido a los esfuerzos mecánicos internos.

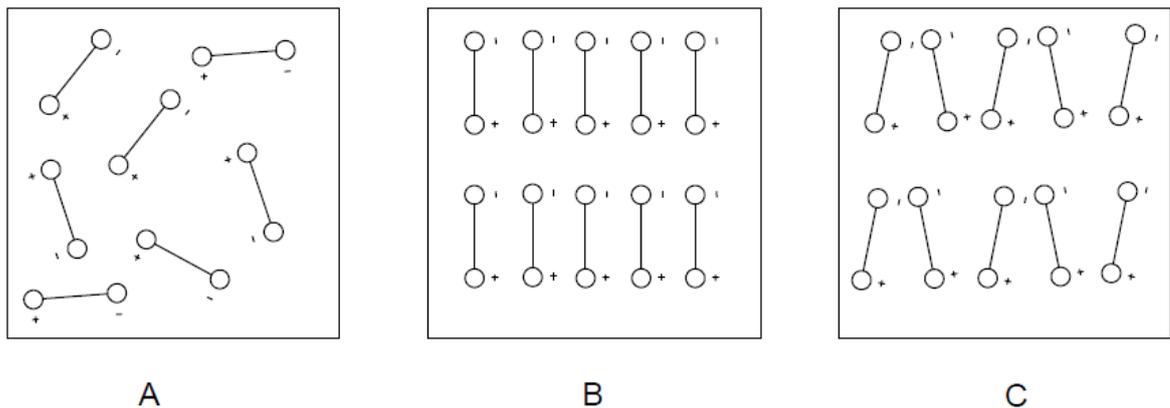


Ilustración 54: Orientación de dipolos [32]

En la ilustración anterior, en A se aprecian los dominios orientados de forma aleatoria. En B se representa la orientación de los dominios durante el proceso de polarización y por último en C se muestra la orientación final, una vez finalizada la polarización.

4.3.2 Ecuaciones fundamentales

Los materiales piezoeléctricos polarizados se caracterizan por varios coeficientes y relaciones.

En forma simplificada, las relaciones básicas entre las propiedades eléctricas y elásticas pueden ser representados de la siguiente forma:

$$D = d \times T + \varepsilon^T \times E \quad 7$$

$$S = s^E \times T + d \times E \quad 8$$

D : Densidad de flujo eléctrico

T : Tensión mecánica

E : Campo eléctrico

S : Deformación mecánica

d : Coeficiente de carga piezoeléctrica

ε^T : Permitividad (para $T = constante$)

s^E : Coeficiente de elasticidad (para $E = constante$)

Estas relaciones sólo se aplican a las pequeñas amplitudes eléctricas y mecánicas. En este rango, las relaciones entre S o T y E o D son lineales, y los valores de los coeficientes son constantes.

Estos coeficientes de pequeña señal se pueden encontrar en tablas de datos de cada material. [40]

4.3.2.1 Convención de signos

La convención de signos para los materiales piezoeléctricos se puede generalizar en 2 casos. La primera es llamada configuración de “apilamiento”, la cual opera en la dirección 33. La segunda es la configuración “doblada”, que opera en la dirección 31. La convención de signos asume que la polarización del material siempre ocurre en la dirección “3”. En la ilustración siguiente, se puede observar con mayor claridad las direcciones de las que se está hablando. Los giros están determinados de acuerdo con la regla de la mano derecha.

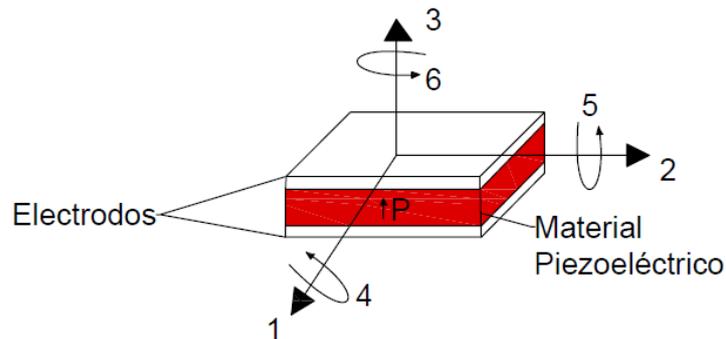


Ilustración 55: Definición de las líneas de los ejes de un material piezoeléctrico

En la dirección 33 (ilustración siguiente), la tensión eléctrica es generada en la dirección “3” y el material es forzado en la dirección de polarización que es la misma dirección “3”.

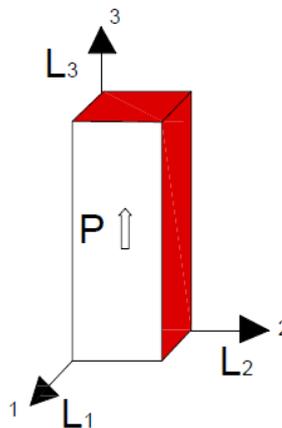


Ilustración 56: Modo 33

Por otro lado, en la dirección 31 (ilustración siguiente), la tensión eléctrica se encuentra en la dirección “3”, mientras que el material es forzado en la dirección “1”, la cual es perpendicular a la dirección de polarización [41]. Estos dos modos de operación son muy importantes a la hora de definir los coeficientes de acoplamiento electromecánico como d . Así, d_{31} se refiere al coeficiente para un elemento que se encuentra polarizado en la dirección “3” y tensionado a través de “1”.

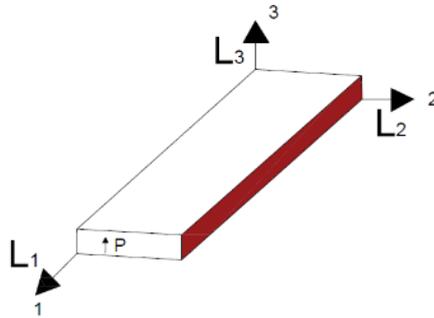


Ilustración 57: Modo 31

Teniendo claro el concepto anterior, se debe decir entonces que, para la baldosa piezoeléctrica del proyecto, se trabajará con la dirección 33, ya que, al recibir la presión por el paso de los peatones, la baldosa será forzada en la dirección “3” y a su vez, el material piezoeléctrico se polarizará en la dirección “3”. [40]

4.3.2.2 Principales constantes

A continuación, se expresan las principales constantes piezoeléctricas, con sus unidades correspondientes, significado y valores típicos. [42]

d: Constante de carga piezoeléctrica

$$\text{Unidad: } \frac{m}{V} \left[\frac{\text{metros}}{\text{Volt}} \right] \text{ ó } \frac{C}{N} \left[\frac{\text{Coulomb}}{\text{Newton}} \right]$$

- **Qué significa:** Informa cuál es la proporción entre la variación dimensional (Δl) del material piezoeléctrico (en metros) y la diferencia de potencial aplicada (en Volts), y entre la generación de cargas eléctricas (en Coulombs) y la fuerza aplicada en el material (en Newtons).
- **Valores típicos:** De 0,2 a 8 Angstrom (10^{-10} metros) por Volt aplicado, y de 20 a 800 pico Coulomb por Newton aplicado, para cerámicas piezoeléctricas de PZT.
- **Cuándo/Dónde es una información indispensable:** En el proyecto de posicionadores piezoeléctricos y sensores de fuerza/deformación.

g: Constante de tensión piezoeléctrica

$$\text{Unidad: } \frac{V \times m}{N} \left[\frac{\text{Volts} \times \text{metros}}{\text{Newton}} \right]$$

- **Qué significa:** Informa cual es la proporción entre la diferencia de potencial generada (en Volts) y la fuerza aplicada (en Newton) para una cerámica con una longitud de 1 metro.

- **Valores típicos:** De -1 a 60 Volts para cada Newton aplicado (considerando la dimensión del elemento en cuestión de 1 metro), para cerámicas piezoeléctricas de PZT. Disminuyendo la dimensión de la cerámica o aumentando la fuerza, el módulo de la tensión generada también aumenta.
- **Cuándo/Donde es una información indispensable:** En el proyecto de detonadores de impacto y “magic clicks”.

k: Coeficientes de acoplamiento

Unidad: Adimensional.

- **Qué significa:** Eficiencia del material en la transducción/conversión de energía eléctrica en mecánica y viceversa.
- **Valores típicos:** De 0.02 (equivalente a 2% de eficiencia) a 0.75 (equivalente a 75% de eficiencia), para cerámicas piezoeléctricas de PZT.
- **Cuándo/Dónde es una información indispensable:** En el control de calidad de las cerámicas piezoeléctricas y en el proyecto de dispositivos donde no se realiza conversión cruzada de energía, o sea, que una vibración o deformación en un eje no genere cargas eléctricas o diferencia de potencial en otro eje. En este caso, cuanto menor sea el respectivo factor de acoplamiento mejor.

Q: Factor de calidad mecánico

Unidad: Adimensional.

- **Qué significa:** Es una medida relacionada con la disminución mecánica (amortiguamiento) del material. Decir que el factor de calidad mecánico de un dispositivo resonante es 100 (de una campana, por ejemplo), significa que, si excitado momentáneamente en su frecuencia de resonancia, irá oscilar $100/2\pi$ veces antes de alcanzar el reposo.
- **Valores típicos:** De 50 a 1500, para cerámicas piezoeléctricas de PZT.
- **Cuándo/Donde es una información indispensable:** En el proyecto de dispositivos dinámicos de alta potencia.

Tan δ - Factor de disipación dieléctrica

Unidad: Adimensional.

- **Qué significa:** Es la medida relacionada con las disminuciones dieléctricas del material. Valores típicos: De 2×10^{-3} a 25×10^{-3} para cerámicas piezoeléctricas de PZT.

- **Cuándo/Donde es una información indispensable:** En el proyecto de dispositivos dinámicos de alta potencia y/o sometidos a altos campos eléctricos.

TC – Temperatura de Curie

Unidad: Grados Celsius (°C)

- **Qué significa:** Es la temperatura en la cual la estructura cristalina del material sufre una transición de fase dejando de presentar propiedades piezoeléctricas. Después de superar esta temperatura, el material pierde la polarización remanente inducida tornándose inútil para la utilización como elemento transductor de energía eléctrica en mecánica.
- **Valores típicos:** De 150 a 350 °C, para cerámicas piezoeléctricas de PZT.
- **Cuándo/Dónde es una información indispensable:** En los proyectos de dispositivos que deberán funcionar en altas temperaturas y de alta potencia.

Límite de tracción dinámico

Es el límite máximo de tracción a que el material puede ser sometido dinámicamente sin romperse. Este límite debe ser tomado en cuenta principalmente al proyectar transductores de potencia, donde las cerámicas piezoeléctricas son sometidas a altos campos eléctricos que provocan tanto la compresión como la tracción del material.

Constante dieléctrica (K o ϵ_r)

La constante dieléctrica relaciona la permisividad dieléctrica del material con relación a la permisividad eléctrica del vacío, la cual es de aproximadamente $8,85 \times 10^{-12}$ [Fm].

Tasa de envejecimiento

Es la tasa con que las propiedades piezoeléctricas del material se alteran con el tiempo a medida que la orientación de los dominios de los dipolos, creada por el proceso de polarización, desaparece.

4.3.3 Método de fabricación de las cerámicas piezoeléctricas

Una cerámica piezoeléctrica tradicional es un conjunto de cristales de cerámica perovskita, cada uno formado por un pequeño ion metálico tetravalente, generalmente de titanio o zirconio, en una red de mayor tamaño, iones metálicos divalentes, generalmente de plomo o bario, e iones de O₂. En condiciones que confieren simetría tetragonal o romboédrica en los cristales, cada cristal tiene un momento dipolar.

Para preparar un polvo de cerámica piezoeléctrica PZT, los óxidos metálicos de diferentes componentes se mezclan en proporciones específicas, después se calienta

para formar un polvo uniforme. El polvo piezoeléctrico es mezclado con un aglutinante orgánico y se forma en elementos estructurales que tienen la forma deseada (discos, barras, placas, etc.). Los elementos son cocinados de acuerdo en un tiempo específico y a un programa de temperaturas, durante el cual el polvo piezoeléctrico es sinterizado y el material alcanza una estructura cristalina densa. A continuación, los elementos son enfriados según las especificaciones y los electrodos se unen a las superficies correspondientes. [40]

Por encima de una temperatura crítica, el punto de Curie, cada cristal de perovskita en el elemento de cerámica cocida presenta una simetría cúbica simple, sin momento dipolar. A temperaturas por debajo del punto de Curie cada cristal tiene simetría tetragonal o romboédrica y un momento dipolar. Los dipolos adyacentes forman regiones de los dominios de alineación llamada local. La alineación da un momento dipolar neto al dominio, y por lo tanto una polarización neta. La dirección de polarización entre los dominios vecinos es aleatoria, sin embargo, el elemento cerámico no tiene polarización en general.

Los dominios en un elemento de cerámica piezoeléctrica están alineados mediante la exposición del elemento a un campo eléctrico fuerte generado por una corriente eléctrica continua y por lo general a una temperatura ligeramente por debajo del punto de Curie. A través de este tratamiento de polarización los dominios más alineados con el campo eléctrico se expanden a expensas de dominios que no están alineados con el campo, y el elemento se alarga en la dirección del campo. Cuando se elimina el campo eléctrico la mayoría de los dipolos están encerrados en una configuración de alineación. El elemento tiene ahora una polarización permanente, la polarización remanente, y se alarga de forma permanente.

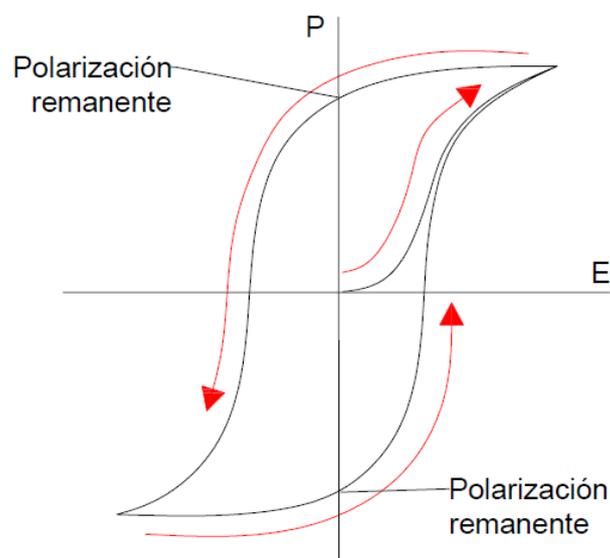


Ilustración 58: Curva de histéresis para la polarización. [40]

Análogamente a las características correspondientes de los materiales ferromagnéticos, un material ferroeléctrico polarizado exhibe un ciclo de histéresis.

La ilustración anterior muestra una curva de histéresis típica creada mediante la aplicación de un campo eléctrico a un elemento cerámico piezoelectrico hasta la máxima polarización. Luego se reduce el campo a cero para determinar la polarización remanente, P_r . Invertiendo el campo se logra una polarización negativa máxima y una polarización negativa remanente, y por último se vuelve a invertir el campo para restaurar la polarización remanente positiva.

El rastreo por debajo de la curva de histéresis traza el cambio relativo en la dimensión del elemento de cerámica a lo largo de la dirección de polarización, correspondiente al cambio en el campo eléctrico.

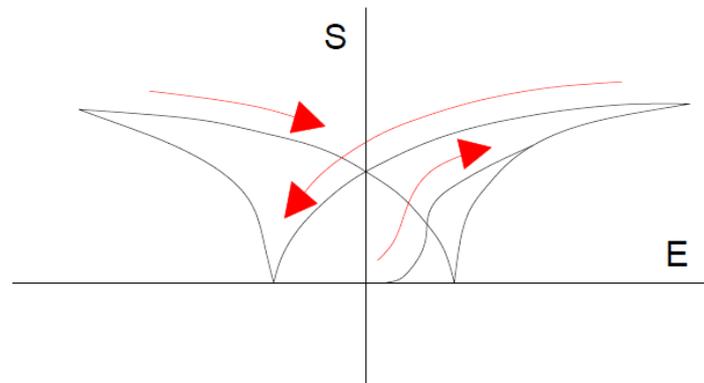


Ilustración 59: Aumento relativo/ disminución de la dimensión en la dirección de la polarización. [40]

La relación de incremento/disminución de la dimensión paralela a la dirección del campo eléctrico es aproximadamente el 50% más pequeño en relación a una disminución/incremento en la dimensión perpendicular al campo eléctrico.

4.3.4 Comportamiento de las cerámicas piezoelectricas

La compresión mecánica o la tensión en un elemento cerámico piezoelectrico polarizado cambia el momento dipolar. La compresión a lo largo de la dirección de polarización, genera tensión eléctrica de la misma polaridad. La tracción mecánica a lo largo de la dirección de polarización, o la compresión perpendicular a la dirección de polarización, genera tensión eléctrica con polaridad opuesta a la de la tracción mecánica de polarización. Estas son acciones del material comportándose como generador (la cerámica convierte la energía mecánica de compresión o tracción en energía eléctrica). [40]

Si se aplica una tensión eléctrica de la misma polaridad que el voltaje de polarización a un elemento de cerámica, en la dirección de la tensión de polarización, el elemento se alargará y reduciendo su diámetro. Si se aplica una tensión eléctrica de polaridad opuesta a la de la tensión de polarización, el elemento será más corto aumentando su diámetro. Si se aplica una tensión alterna, el elemento se alarga y

acorta de forma cíclica, en la frecuencia de la tensión aplicada. Esta es la acción de actuador (la energía eléctrica se convierte en energía mecánica).

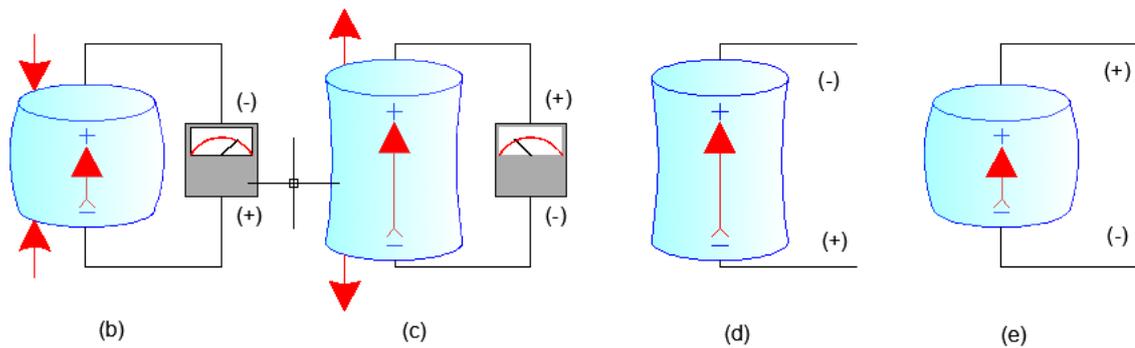


Ilustración 60: Comportamiento piezoelectrico. [40]

Las figuras (a) y (b) representan al elemento piezoelectrico como generador, las figuras (d) y (e) representan al elemento piezoelectrico como motor.

4.3.5 Cerámica PZT

El PZT, o plomo zirconatotitanato ($Pb [Zr (x) Ti (1 - x)] O_3$), es uno de los materiales cerámicos piezoelectricos más utilizados en el mundo. El PZT tiene una estructura cristalina de perovskita, cada unidad de las cuales consta de una pequeña estructura de iones de metal tetravalente en un enrejado de iones metálicos divalentes grandes. En el caso de PZT, la pequeña estructura de iones de metal tetravalente es generalmente de titanio o de circonio. En condiciones que confieren una simetría tetragonal o romboédrica en los cristales PZT, cada cristal tiene un momento dipolar.

El PZT es un material piezoelectrico a base de óxido metálico desarrollado por científicos del Instituto de Tecnología de Tokio en el año 1952. En comparación con el material piezoelectrico a base de óxido metálico previamente descubierto Bario titanato ($BaTiO_3$), estos materiales exhiben una mayor sensibilidad y tienen una temperatura de funcionamiento más alta. [40]

En la siguiente tabla se presentan las constantes de los materiales PZT comerciales.

Tabla 13: Principales materiales piezoelectricos comerciales y sus respectivas constantes

Material	PZT-4	PZT-8	PZT-5A	PZT-5J	PZT-5H
K_P	0,60	0,50	0,61	0,60	0,63
K_{33}	0,68	0,63	0,70	0,71	0,73
$D_{33} (10^{-12} C/N)$	300	215	4000	460	550
$D_{31} (10^{-12} C/N)$	-11,5	-9,5	-170	-210	-265
$G_{33} (x10^{-3} Vm/N)$	26	25	25	22	19
$G_{31} (x10^{-3} Vm/N)$	-11	-11	-11	-9	-9
K^T_3 (señal baja)	1250	100	1750	2450	3100
C. Dieléctrica relativa					
Factor de disipación $\tan \delta$ (campo bajo)	0,004	0,004	0,020	0,020	0,020
Densidad (kg/m^3)	7600	7600	7650	7500	7500
Temp. De Curie ($^{\circ}C$)	325	330	360	260	190

Factor de calidad Q_m	500	1000	75	70	65
sE_{11} ($\times 10^{-12}$ m²/N)	12	11	19	23	21
sE_{33} ($\times 10^{-12}$ m²/N)	16	14	16	16	15
N_p (Hz-m) (modo planar)	2200	2270	1950	2000	1950
N_t (Hz-m) (modo espesura)	1905	2032	1800	1950	2000

4.3.6 Fabricación del PZT

El proceso de fabricación de polvos PZT consta de siete operaciones distintas (ilustración siguiente). Las materias primas de alta pureza se evalúan y seleccionan. A los criterios de selección, además de la pureza, se incluyen límites específicos para las impurezas perjudiciales.

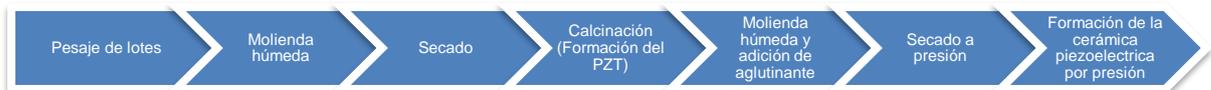


Ilustración 61: Proceso de fabricación del PZT [40]

Una vez que se selecciona cada material y está aprobado para su uso, se pesa con precisión, de acuerdo con la formulación que se esté fabricado. Estos ingredientes son molidos en estado húmedo en sus proporciones correctas para lograr una distribución uniforme del tamaño de partícula. Es necesario un control preciso sobre la distribución de tamaño de partículas para asegurar la calidad necesaria durante la cocción.

Tras el proceso de molienda en húmedo, el producto se seca y se prepara para la cocción. El producto debe ser cocido en crisoles de alta pureza para garantizar que los contaminantes químicos no estén presentes en el producto final. Esta operación se lleva a cabo en aire a aproximadamente 1000 ° C, donde se forma la fase de PZT deseada.

Es importante recordar que el principal ingrediente en el material de PZT es óxido de plomo, que es un material peligroso con una presión de vapor relativamente alta a temperaturas de cocción. Por lo tanto, es posible alterar la composición deseada al permitir que demasiado plomo se evapore durante las operaciones de cocción. Se emplean medidas propias para asegurar que la pérdida de plomo no sea un factor determinante.

Después de la cocción, el polvo de PZT se devuelve a la fábrica para asegurar la homogeneidad y para preparar el material para la adición de un agente aglutinante orgánico. Una vez realizado esto se procede a un secado por pulverización, donde se evapora el agua. Una operación de secado por pulverización con éxito requiere operadores experimentados que pueden regular las temperaturas dentro de la unidad en conformidad con el contenido de sólidos del material, así como el volumen de suspensión de aglutinante que entra en el secador.

El propósito de secar por pulverización el material en polvo de PZT es proporcionar un producto de flujo libre en la forma de esferas huecas que contienen

aglutinante con una distribución de tamaño de partícula estrecha. La morfología del material PZT es crucial para llenar constantemente cavidades de la matriz en el proceso de prensado en seco en la fabricación de estas cerámicas piezoeléctricas. [40]

4.3.7 Popularidad de cerámica PZT

El PZT, titanato de zirconato de plomo, es la cerámica piezoeléctrica más utilizada debido a que son físicamente fuerte, químicamente inerte y relativamente barato de fabricar. Además, pueden ser fácilmente adaptados para satisfacer los requisitos de una aplicación específica. Las cerámicas de PZT son reconocidas, ya que tienen una mayor sensibilidad y mayor temperatura de operación que otras cerámicas piezoeléctricas.

Algunas de las compañías fabricantes de PZT son:

- PI Piezo technology de EEUU.
- APC American Piezo Ceramics International LTD de EE. UU.
- ATCP Engenharia Física de Brasil.
- Sinocera Piezotronics INC de China.

4.3.8 Cerámicas blandas vs cerámicas duras

Pequeñas cantidades de un material determinado añaden a una formulación de cerámica cationes en la estructura cristalina. Los productos de tales formulaciones (cerámica blanda) se caracterizan por grandes factores de acoplamiento electromecánico, grandes constantes piezoeléctricas, alta permisividad, grandes constantes dieléctricas, altas pérdidas dieléctricas, factores mecánicos de baja calidad y escasa linealidad. Las cerámicas blandas producen desplazamientos más grandes y amplio ancho de banda de la señal, en relación con la cerámica dura, pero exhiben una mayor histéresis, y son más susceptibles a la despolarización u otro deterioro.

Las cerámicas blandas presentan puntos de Curie bajos (generalmente por debajo de 300 ° C) por lo que pueden usarse a temperaturas más bajas. En general debido a los grandes valores de permitividad y el factor de disipación dieléctrica, las cerámicas blandas no son aptas en aplicaciones que requieren excitaciones de alta frecuencia y campos eléctricos elevados. En consecuencia, estas cerámicas se utilizan principalmente en aplicaciones de detección, en lugar de aplicaciones de potencia.

Las cerámicas duras en cambio se producen debido a que aceptan un anión en su estructura cristalina. Estas cerámicas tienen características generalmente opuesta a las de la cerámica blandas, incluyendo los puntos Curie por encima de 300 ° C, pequeñas constantes piezoeléctricas de carga, grandes factores de acoplamiento electromecánicos, y grandes factores de calidad mecánicas. También son más difíciles de polarizar o despolarizar, aunque generalmente son más estables que las

cerámicas blandas. Las cerámicas duras son compatibles con las altas cargas mecánicas y alta tensión.

Comparación de características de Cerámicas blandas y duras. [40] [2]

Tabla 14: Comparación de cerámicas blandas vs cerámicas duras [40]

Característica	Cerámica Blanda	Cerámica Dura
Piezoeléctrico Constantes	Mayor	Menor
Permitividad	Mayor	Inferior
Constantes dieléctricas	Mayor	Menor
Las pérdidas dieléctricas	Mayor	Inferior
Factores de acoplamiento electromecánico	Mayor	Menor
Resistencia Eléctrica	Muy alta	Inferior
Factores de calidad mecánica	Bajo	Alto
El campo coercitivo	Bajo	Mayor
Linealidad	Pobre	Mejor
Polarización / despolarización	Fácil	Más difícil

4.4 Resumen de Materiales y Aplicaciones

A modo de resumen se presenta la siguiente tabla comparativa entre distintos tipos de materiales.

Tabla 15: Características de distintos materiales piezoeléctricos [22]

Material	Aplicaciones	Dimensiones	Potencia [μ W]	Densidad de Potencia [μ W/cm ³]	Voltaje [V]	Resistencia [k Ω]	Referencias
Composites de PZT, d₃₃ 39 MPa compresión	Composite		2,4	1200			2,3
PVF₂ Compresión	Rotor de aerogenerador	500 μ m x 90mm x 70mm	1300	0,76	1	400	10
BIMORFO PVDF. Modo d₃₁	Elemento en zapatos		8400		18	50	11
PZT DIMORFO, d₃₁	Elemento en zapatos		10200		64,8	500	11
PVDF bimorfo. Rotor de aerogenerador. 12 cantilevers bimorfos. Carga d₃₁ rotor	Rotor de aerogenerador	Cada bimorfo 60x20x0,5mm	2,3	1420	6,8	4,6	12
MEMBRANA DE PZT-5 A. CARGA; PRESIÓN SANGRE	Biomédica	Sup. 1cm ² Esp. 9 μ m	4800	2600			13
Estructura rectangular de PZT	Implante de rodilla	1x1x1,8 cm ³	1700	890			14
Membrana transductora sometida a la vibración de un agitador	Sensores de baja potencia	Radio total: 20,5 mm (12,5 mm de radio PZT), espesor 230 μ m, Espesor de sujeción: 400 μ m	1	106	9	47	2,3
Lámina delgada de PZT. Generador Cantilever	MEMS	(170x260) μ m ²	2	740	2,2	5200	15

Lámina gruesa de PZT a 80 Hz	MEMS	Capas de 20 μm	1200		0,81	333	16
PZT con 1,5 MPa tensión lateral a 15Hz	Trasmisor autónomo wireless	Volumen: 0,2 cm^3	690	6000	9		17
Generador de apilamiento de PZT (164 capas a 1 Hz y 250 N)	Potencia de activación del músculo	5x5x80 mm^3	56	345	19,3	540	2,3
Membrana de PZT en lámina delgada acoplada al calor del motor.	Híbrido	Sup: 3 mm^2 Esp: 3,4 μm	39000	5,5x10 ⁶			18
Dispositivo címbalo con carga d_{33}	Címbalo	Diam: 29 mm Esp: 1mm	25x10 ⁹	43900		400	19
Pulsador PZT (ignición) carga d_{33}	Generador de pulsos	Diam:1,27 cm Esp 1,3 mm		1,51x10 ⁶	500	0,01	20
PMN-PT composites. d_{33} carga compresiva de 40,4 MPa	Composite		11000	22100			21
PZT entre acero y latón sometidos a ciclos de tensión de 0,7 N a 590 Hz		0,51 cm^3		21570	4,7	18	
Arrays de nanohilos de piezoeléctrico y ZnO semiconductor	Biosensores y electrónica auto alimentada	300 nm diámetro hilo. Arrays de 6,5x3,2 μm^2	~10-20 pW por hilo	100-200	0,02		23

4.5 Comportamiento de un material piezoeléctrico

Frecuencia de resonancia: Un elemento cerámico piezoeléctrico expuesto a un campo eléctrico alterno cambia cíclicamente sus dimensiones, a la frecuencia del campo. La frecuencia natural a la que vibra el elemento más fácilmente en respuesta a la entrada eléctrica (frecuencia de resonancia), está determinada por la composición del material cerámico y por la forma y el volumen del elemento.

A medida que aumenta la frecuencia de los ciclos, las oscilaciones del elemento primero se acercan a una frecuencia a la que la impedancia es mínima (frecuencia de resonancia). A medida que aumenta aún más la frecuencia, la impedancia aumenta hasta un máximo (admitancia mínima), que es conocida como la frecuencia de anti-resonancia. Estas frecuencias son determinadas experimentalmente.

Los valores de frecuencia de impedancia mínima y la frecuencia máxima de impedancia se pueden utilizar para calcular el factor de acoplamiento electromecánico k , un indicador de la eficacia con la que un material piezoeléctrico convierte la energía eléctrica en energía mecánica o energía mecánica en energía eléctrica. Las pérdidas dieléctricas y las pérdidas mecánicas también afectan la eficiencia de conversión de energía. Las pérdidas dieléctricas generalmente son más importantes que las pérdidas mecánicas.

Estabilidad: La mayoría de las propiedades de un elemento cerámico piezoeléctrico disminuyen gradualmente, en una relación logarítmica con el tiempo después de la polarización. Existen tasas exactas de envejecimiento que dependen

de la composición del elemento de cerámica y el proceso de fabricación utilizado para prepararlo. El mal uso del elemento al exceder sus limitaciones eléctricas, mecánicas o térmicas puede acelerar este proceso.

Limitaciones eléctricas: La exposición a un fuerte campo eléctrico, de polaridad opuesta a la del campo de polarización, ocasionará la despolarización del material piezoeléctrico. El grado de despolarización depende de la calidad del material, el tiempo de exposición, la temperatura, y otros factores, pero los campos de 200-500 V/mm o superior típicamente tienen un efecto despolarizante significativo. Una corriente alterna tendrá un efecto despolarizante durante cada medio ciclo en el que la polaridad es opuesta a la del campo de polarización.

Limitaciones mecánicas: Es el estrés mecánico suficiente para perturbar la orientación de los dominios en un material piezoeléctrico que puede destruir la alineación de los dipolos. Al igual que la susceptibilidad a la despolarización eléctrica, la capacidad de soportar la tensión mecánica difiere entre los distintos grados y fabricantes de los materiales piezoeléctricos.

Limitaciones térmicas: Si un material cerámico piezoeléctrico se calienta a su punto de Curie, los dominios se desordenarán y el material será despolarizado. Dentro del rango de temperatura de funcionamiento recomendado, los cambios de temperatura asociada con la orientación de los dominios son reversibles. Por otro lado, estos cambios pueden crear desplazamientos de carga y campos eléctricos. Además, las fluctuaciones de temperatura repentinas pueden generar tensiones relativamente altas, capaces de despolarizar el elemento cerámico.

4.5.1 Determinación de la frecuencia de resonancia

Como se explicó anteriormente, cuando un elemento piezoeléctrico se expone a un campo eléctrico, el mismo cambiará sus dimensiones cíclicamente según el período del campo. La frecuencia a la que el elemento cerámico vibra más fácilmente, y de manera más eficiente, es la frecuencia de resonancia.

El patrón de respuestas de un elemento se representa en la siguiente ilustración. A medida que aumenta la frecuencia de los ciclos, las oscilaciones del elemento primero se acercan a una frecuencia a la que la impedancia es mínima. Esta frecuencia de impedancia mínima, f_m , se aproxima a la frecuencia de resonancia serie, f_s . La frecuencia mínima de impedancia también es la frecuencia de resonancia, f_r . La composición del material cerámico, la forma y el volumen del elemento determinan la frecuencia de resonancia. En general, un elemento más grueso tiene una frecuencia de resonancia más baja que un elemento delgado de la misma forma.

A medida que aumenta aún más la frecuencia de los ciclos, la impedancia aumenta hasta un máximo (admitancia mínima). La frecuencia máxima de impedancia, f_n , se aproxima a la frecuencia de resonancia paralelo, f_p . La frecuencia máxima de impedancia también es conocida como frecuencia de anti-resonancia. La respuesta máxima del elemento será en un punto entre f_m y f_n .

Los valores para la frecuencia de mínima impedancia, f_m , y la frecuencia de máxima impedancia, f_n , son determinadas experimentalmente.

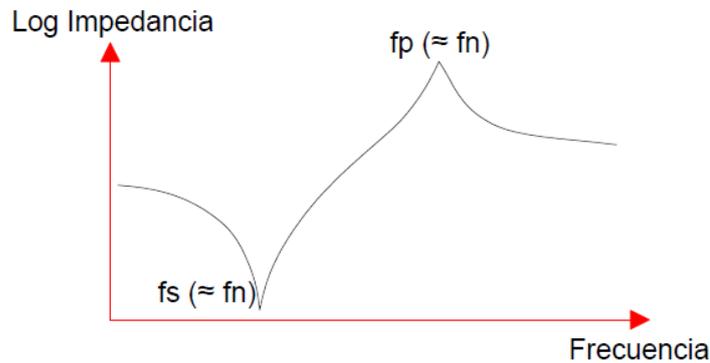


Ilustración 62: Gráfico para determinar la frecuencia de resonancia [40]

4.5.2 Modelo eléctrico de un piezoeléctrico generador de energía

En esta etapa se procede a realizar un modelo eléctrico del material piezoeléctrico, para poder analizar las distintas variables en su funcionamiento como generador de energía eléctrica.

Por otra parte, se analizará la forma de onda en estado de carga cuasi-estático y en un estado de carga dinámico. Luego de esto se evaluará cuál de las dos alternativas es mejor para nuestra aplicación. [43]

El circuito eléctrico de un material piezoeléctrico se puede demostrar como:

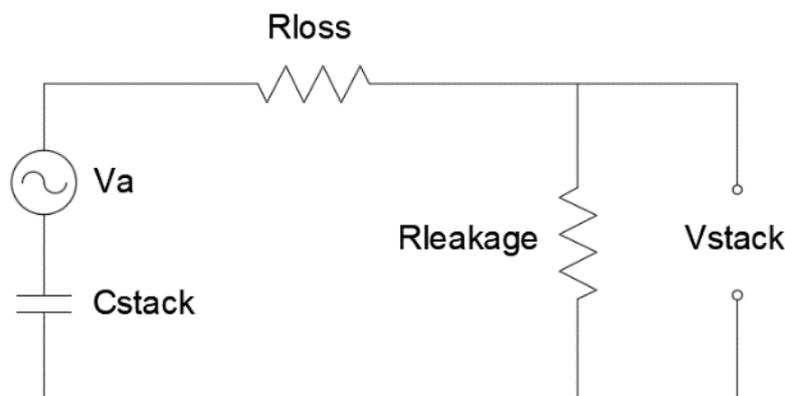


Ilustración 63: Modelo eléctrico del material piezoeléctrico.

En donde:

C_{stack} : Capacitancia de apilamiento

R_{loss} : Resistencia por pérdidas

$R_{leakage}$: Resistencia por fuga

V_a : Tensión en circuito abierto producido en el piezoeléctrico como resultado de una fuerza aplicada

Se puede expresar la capacitancia de apilamiento como:

$$C_{stack} = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r A}{h_{piezo}} \quad 9$$

Dónde:

ϵ_0 : Permisividad libre del espacio = $8.85 \times 10^{-12} [Fm]$

ϵ_r : Permisividad relativa del material piezoeléctrico

A : Área transversal del piezoeléctrico

h_{piezo} : Espesor del piezoeléctrico

Por otra parte, el material piezoeléctrico presenta una resistencia serie que representa las pérdidas dieléctricas del material.

$$R_{loss} = \frac{\tan \delta}{\omega C_{stack}} \quad 10$$

Dónde:

ω : Frecuencia angular de operación del generador

$\tan \delta$: Factor de disipación

De esta manera la energía eléctrica almacenada en el piezoeléctrico como resultado de la compresión mecánica se puede expresar como:

$$W_{eléctrica} = \frac{q^2}{2 C_{stack}} \quad 11$$

Dónde:

$q = C_{stack} \times V_a$: Es la carga eléctrica almacenada en el material.

Por último, se expresa una ecuación general para hallar V_a .

$$V_a = \frac{k_{33} F h_{piezo}}{A} \frac{1}{\sqrt{0.5 Y \epsilon_0 \epsilon_r}} \quad 12$$

4.5.3 Comportamiento del piezoeléctrico bajo carga cuasi-estática

Los resultados hallados para el caso de una carga de duración mayor que el tiempo de carga del capacitor se muestran en la siguiente ilustración. Se producen dos picos de tensión, uno positivo al aplicarse la fuerza y uno negativo en el momento en que se la retira.

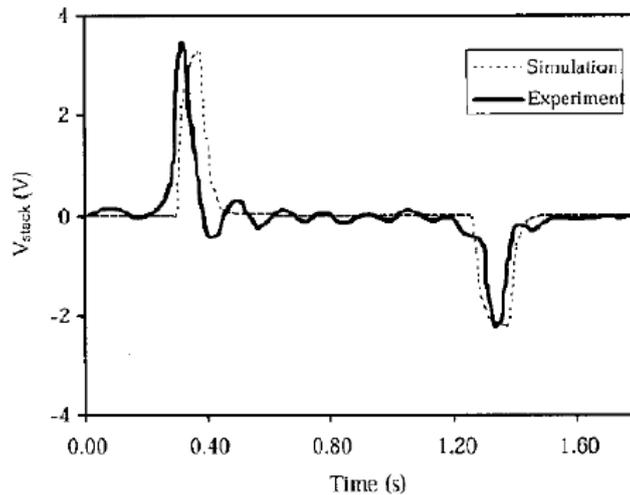


Ilustración 64: Comportamiento piezoeléctrico bajo carga cuasi-estática

4.5.4 Comportamiento del piezoeléctrico bajo carga dinámica

En este caso la carga se aplica en un tiempo menor a la constante de carga del capacitor, por lo que se observa que solo presenta un pico positivo de tensión y además de un valor 10 veces mayor al obtenido en el ensayo anterior. Los resultados se ilustran en la siguiente ilustración.

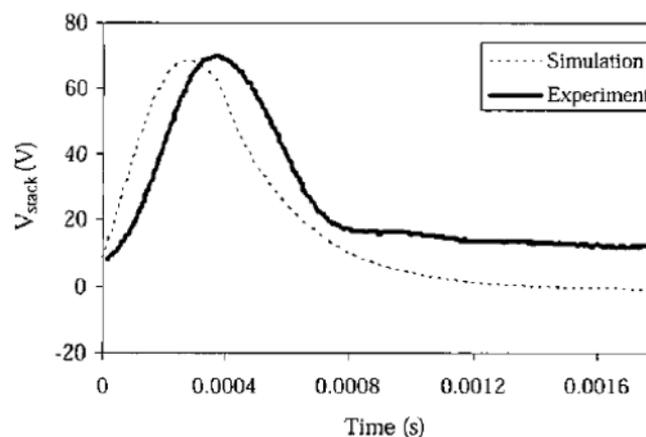


Ilustración 65: Comportamiento piezoeléctrico bajo carga dinámica

4.5.5 Comportamiento del paso humano

Es de suma importancia para este proyecto conocer con precisión el comportamiento del paso humano. Tanto su frecuencia, como la fuerza ejercida sobre

el suelo, serán de vital importancia para evaluar el comportamiento del material piezoeléctrico.

Para realizar esta evaluación nos basamos en un estudio realizado por JCR European Commission, llamado “*Design of floor structures for human induced vibrations*”. [44]

El caminar de una persona se diferencia de correr debido a que en el primer caso siempre hay un pie en contacto con el suelo. Cuando se corre, hay momentos en que ambos pies no tocan el suelo. Centrándonos en el caminar, las fases se podrían describir como siguen:

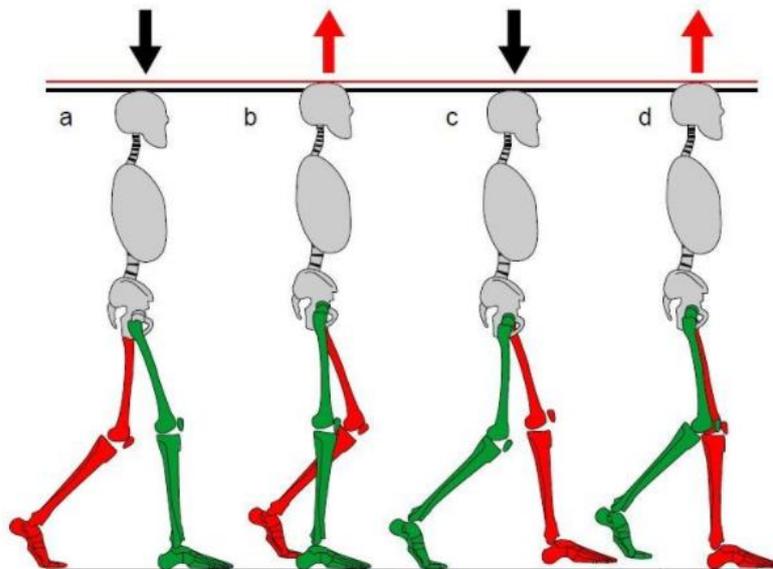


Ilustración 66: Fases de pasos humanos

- a) El punto de partida es cuando el pie derecho (verde) toca el suelo con el talón.
- b) En esta fase, la pierna derecha, que transmite el peso del cuerpo, se estira.
- c) En esta fase hay un intercambio de carga en los pies, pasando del derecho al izquierdo en un balanceo. La pierna izquierda se balancea hacia adelante.
- d) El pie izquierdo asume la carga mientras el derecho empieza a balancearse hacia adelante para completar el ciclo.

La duración del paso y la distribución del peso de la persona sobre el suelo en el tiempo dependen exclusivamente de la frecuencia de paso de la persona.

En la siguiente figura se ilustran dos frecuencias de paso diferentes, en donde las amplitudes están relacionadas al peso relativo de cada persona.

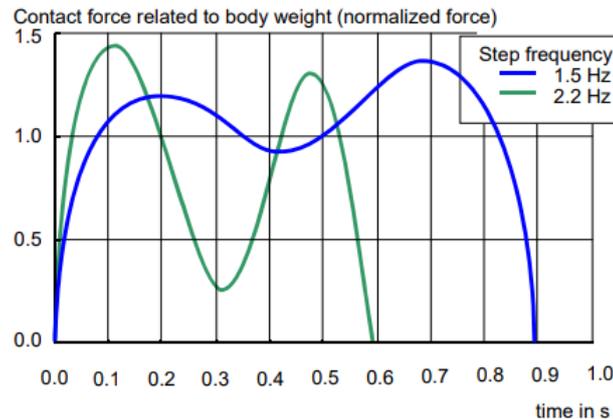


Ilustración 67: Frecuencia de dos pasos de diferentes personas

Como se puede apreciar, la forma de onda varía considerablemente con la frecuencia del paso humano. Se estima que la velocidad promedio de cada ciclo de pasos es de 1m/s a 1,2m/s. y que la duración de cada pie en un ciclo de pasos completo es entre el 60 y 90% del total del ciclo.

4.5.6 Conclusión del modelo

El tiempo de paso de una persona media se estima entre 0,6 y 0,9 segundos. Esto indica, según los gráficos mencionados, que el rango de trabajo será cuasi-estático.

5 Aplicaciones de las cerámicas piezoeléctricas

Las aplicaciones de las cerámicas piezoeléctricas son muy variadas. En esta sección se tratará de abarcar un resumen de cada una a modo informativo.

Los dispositivos piezocerámicos encajan en cuatro categorías generales:

- Generadores.
- Sensores.
- Actuadores
- Transductores.

Las características de cada grupo se resumen brevemente a continuación.

5.1 Generadores piezoeléctricos

Proporcionar energía eficiente y limpia es un reto tanto para dispositivos microelectrónicos como los dispositivos convencionales. En los últimos años hubo avances significativos en el desarrollo de fuentes de alimentación tales como cámaras de combustión, células solares, pilas de combustible, dispositivos termoeléctricos o microbaterías. La generación y consumo de energía siguen siendo un obstáculo en el avance de nuevos dispositivos, como por ejemplo las nuevas MEMS (sistemas

microelectromecánicos) como elementos complementarios a los CMOS (semiconductores de óxido metálico) puesto que el avance implicaría alejarse de la Ley de Moore que relaciona la capacidad de almacenamiento con el tamaño del dispositivo y su consumo de energía. Pero el reto de la energía no se limita a los dispositivos a microescala donde tanto el tamaño como la masa de las fuentes de alimentación convencionales, actúan como barreras de avance para el desarrollo de dispositivos electrónicos miniaturizados.

Las cerámicas piezoeléctricas pueden generar tensiones suficientes para ser usadas como dispositivos de ignición de los quemadores de combustible, estufas de gas, equipos de soldadura y otros aparatos. Los sistemas de encendido piezoeléctricos son pequeños y sencillos lo que ocasionan claras ventajas respecto a los sistemas alternativos que incluyen imanes permanentes o transformadores de alto voltaje y capacitores.

5.2 Sensores Piezoeléctricos

Un sensor piezoeléctrico convierte un parámetro físico, tal como la aceleración o la presión, en una señal eléctrica. En algunos sensores el parámetro físico actúa directamente sobre el elemento piezoeléctrico, en otros dispositivos una señal acústica establece vibraciones en el elemento y las vibraciones, a su vez, se convierten en una señal eléctrica. A menudo, el sistema proporciona una respuesta visual, audible, o física a la entrada desde el sensor piezoeléctrico, por ejemplo: bloqueo de cinturones de seguridad en automóviles en respuesta a una desaceleración rápida.

5.3 Piezo actuadores

Un actuador piezoeléctrico convierte una señal eléctrica en un desplazamiento físico controlado con precisión, como por ejemplo, para ajustar finamente las herramientas de mecanizado de precisión, lentes, o espejos. Los actuadores piezoeléctricos también se utilizan para controlar las válvulas hidráulicas, actuar como bombas de pequeño volumen o motores de propósito especial, y en otras aplicaciones. Los motores piezoeléctricos son afectados por las pérdidas de eficiencia de energía que limitan la miniaturización de los motores electromagnéticos, y se han construido en tamaños de menos de 1 cm³. Una ventaja adicional potencialmente importante para los motores piezoeléctricos es la ausencia de ruido electromagnético.

Además, si se impide el desplazamiento físico, un actuador piezoeléctrico desarrollará una fuerza utilizable.

5.4 Transductores piezoeléctricos

Los transductores piezoeléctricos convierten la energía eléctrica en energía mecánica de vibración, frecuencia de sonido o ultrasonido, que se utilizan para realizar una determinada tarea.

Los transductores piezoeléctricos que generan sonidos audibles ofrecen ventajas significativas con respecto a los dispositivos electromagnéticos alternativos (son

compactos, sencillos, fiables, una energía mínima puede producir un alto nivel de sonido). Debido a que el efecto piezoeléctrico es reversible, un transductor puede tanto generar una señal de ultrasonido a partir de energía eléctrica o convertir el sonido entrante en una señal eléctrica.

Los transductores piezoeléctricos también se utilizan para generar vibraciones ultrasónicas para la limpieza, atomización de líquidos, perforación, fresado, soldadura de plásticos, diagnósticos médicos, etc.

5.5 La energía piezoeléctrica aplicada a suelos generadores de energía

El sector industrial del transporte y los sectores comerciales siguen siendo áreas críticas de investigación en el consumo de energía para dispositivos convencionales, motivado en gran parte por el fuerte incremento del precio del petróleo, los efectos del calentamiento global y la contaminación.

El aprovechamiento de la energía ambiental que está constantemente disponible y es desperdiciada, como la energía que se genera por la deformación del suelo por el tránsito de personas, vehículos o vibraciones de las máquinas, es una fuente de energía renovable con alto potencial de aplicación.

Las placas piezoeléctricas son una tecnología que permite generar energía eléctrica a partir de energía mecánica. Este fenómeno funciona de forma que al ser sometidos determinados cristales a tensiones mecánicas (presión) adquieren una polarización eléctrica, creándose una diferencia de potencial y apareciendo cargas eléctricas en su superficie. Por lo tanto, esta tecnología permite convertir pisadas, saltos y pasos de las personas, vehículos y vibraciones, en energía eléctrica que se puede almacenar y utilizar para diferentes usos.

5.6 Energía eólica piezoeléctrica

Un proyecto de ampliación de la Torre Söder en Estocolmo propone una fachada que recolecta la energía del viento a través de filamentos piezoeléctricos que emulan la hierba en movimiento.

El laboratorio Belatchew Labs, creado por los arquitectos del estudio sueco Belatchew Arkitekter, desarrolla nuevos enfoques y soluciones sostenibles a los problemas urbanos y arquitectónicos actuales tratando de ser inspiradores y novedosos.



Ilustración 68: Proyecto de generación piezoeléctrica en el edificio Söder Torn [45]

[Video edificio Söder Torn](#)

El primer proyecto de este laboratorio es el proyecto de ampliación en altura del Edificio Söder Torn (Torre Sur) ubicado en el barrio de Södermalm, en Estocolmo. La originalidad del mismo radica en un nuevo revestimiento exterior que cubrirá la torre y será capaz de producir de energía mediante unos filamentos piezoeléctricos que aprovecharán la energía del viento.

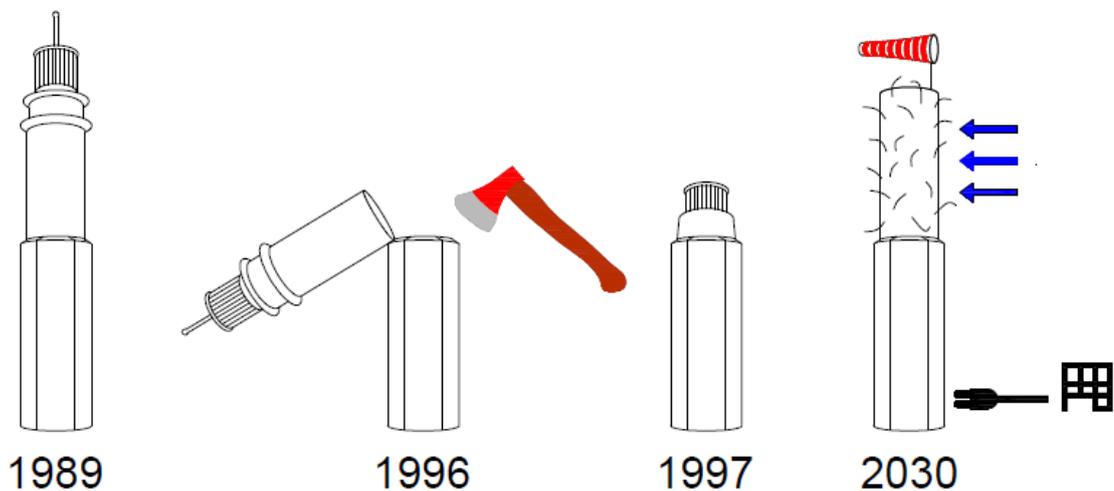


Ilustración 69: Cambio histórico y proyecto de generación eléctrica del edificio Söder Torn en Estocolmo [45]

El proyecto original del edificio consistía en una torre de 40 pisos, pero finalmente la obra concluyó en 1997, con solo 26, después de que el arquitecto, Henning Larsen, abandonara el proyecto al haber perdido influencia en el diseño de la torre.



Ilustración 70: Edificio Söder Torn, Estocolmo [45]

Ubicación geográfica edificio Söder Torn

Los nuevos arquitectos de Belatchew Arkitekter quieren dotar a Söder Torn de sus proporciones originales y al mismo tiempo explorar nuevas técnicas que podrían crear el parque eólico urbano del futuro.

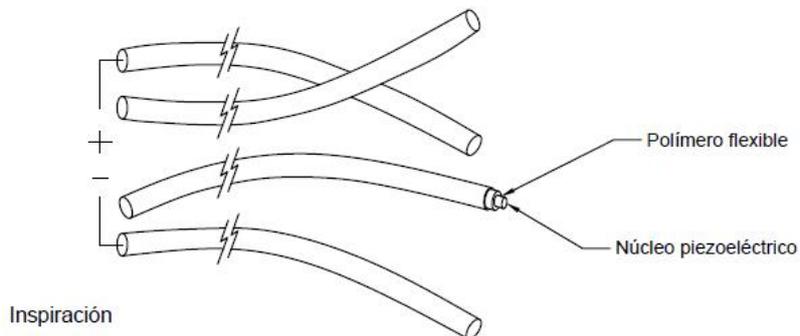


Ilustración 71: Filamentos piezoeléctricos [45]

Mediante el uso de la tecnología piezoeléctrica en un gran número de delgados filamentos, se puede producir electricidad simplemente con los pequeños movimientos generados por el viento. Los filamentos que captan la energía del viento están inspirados en la naturaleza y están formados por un núcleo piezocerámico cubierto de un polímero flexible en forma de caña.

Todos los filamentos de la fachada se componen de este material con propiedades piezoeléctricas que pueden convertir el movimiento producido por el viento en energía eléctrica. Este sistema tiene ventajas, en comparación con las turbinas de viento tradicionales, ya que es bastante silenciosa y no perturba la vida silvestre. Además, funciona a baja velocidad del viento, ya que una ligera brisa es suficiente para para iniciar balanceo de los filamentos y empezar a generar energía.

Otra de las ventajas respecto a las turbinas eólicas, es que las condiciones del viento en las ciudades, con frecuencia, varían en intensidad y dirección y las turbinas tradicionales de energía eólica requieren una corriente de viento fuerte y constante, lo que hace que el ruido y las vibraciones sean molestas para las personas y la vida silvestre. En invierno también existe el riesgo de que el hielo impida el funcionamiento de los rotores, lo que hace que las turbinas sean inadecuadas para las zonas urbanas.

Las investigaciones recientes están demostrando el potencial de captación de energía del viento turbulento con este tipo de materiales con propiedades piezoeléctricas.

Además, un aspecto adicional es el estético ya que se crea un paisaje ondulado en las fachadas con el movimiento constante de los filamentos. Lo que se suele considerar como uno de los elementos más estáticos de las ciudades, los edificios, se llenan así de vida simulando un cuerpo que está respirando. Este paisaje urbano de fachadas cambiantes y ondulantes se puede ver reforzado con distintas tonalidades de iluminación nocturna que se pueden aplicar a las fachadas.

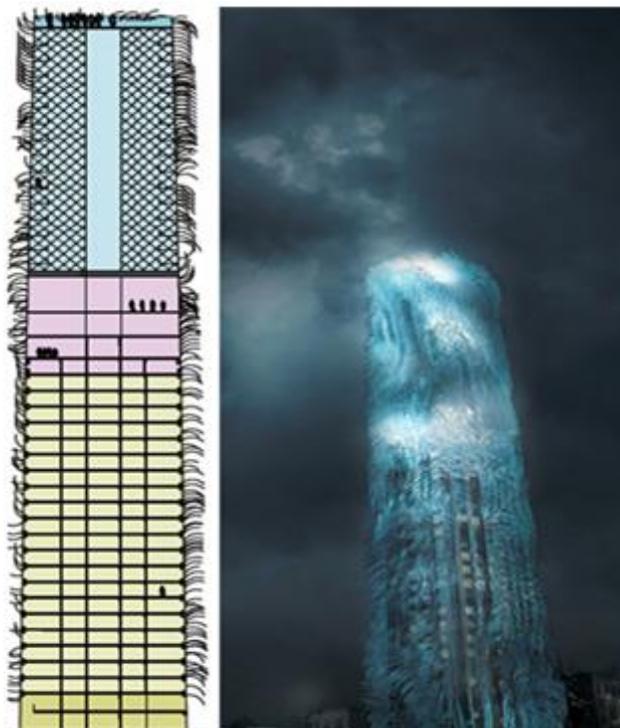


Ilustración 72: Vista en corte y fotorealismo de la torre Söder Torn [45]

5.7 Motores piezoeléctricos para unos helicópteros más ecológicos



Ilustración 73: Helicóptero con uso de materiales piezoeléctricos [46]

Investigadores de la U. E. están desarrollando sistemas piezoeléctricos para la fabricación de helicópteros más silenciosos y respetuosos con el medio ambiente. Estos sistemas son capaces de generar una deformación de las palas de los rotores del helicóptero durante el giro sin ningún tipo de fricción ni desgaste.

El consorcio de investigación sobre giroaviones ecológicos, dentro del programa europeo de investigación Clean Sky (Cielo Limpio), está desarrollando distintas tecnologías para reducir de forma significativa el ruido de los rotores y el consumo de combustible de los helicópteros. Uno de los enfoques más prometedores implica el uso de actuadores piezoeléctricos integrados en el revestimiento de la pala del rotor.

Sin embargo, no es posible emplear los piezoactuadores actuales. Por ello, el proyecto “Piezo power supply module for piezo actuator bench” (P. P. S. M. P. A. B.), financiado con fondos comunitarios, se propuso desarrollar nuevas tecnologías en este campo. Mediante este proyecto se pretendía crear una fuente de alimentación piezoeléctrica (F A P.) para helicópteros, capaz de proporcionar la potencia necesaria y una gran eficiencia para accionar los piezoactuadores. Ello requería, en primer lugar, el desarrollo de un transformador de corriente continua, un amplificador de conmutación y una interfaz hombre-máquina (HMI).

5.8 Fabricantes

5.8.1 Pavegen

Pavegen es una empresa dedicada a la generación de energía eléctrica de forma sustentable fundada en el año 2009. Desde sus inicios han realizado con éxito más de 100 instalaciones en los 5 continentes a través de diversas áreas, tales como estaciones de tren, centros comerciales, aeropuertos y espacios públicos.

Esta empresa desarrolla suelos multifuncionales a partir de un arreglo de baldosas las cuales generan electricidad proveniente de la energía mecánica disipada del tránsito que circula sobre ellas. Estas baldosas al estar interconectadas de forma inalámbrica con un sistema de control, además de generar energía, proporcionan una herramienta de análisis de datos en tiempo real sobre distintas variables de interés. Estos sistemas de control son capaces de conectarse a una amplia gama de dispositivos móviles y sistemas de gestión.

www.pavegen.com

A continuación, se muestran algunas de las instalaciones realizadas por esta empresa.

5.8.1.1 Campo de fútbol, Río de Janeiro, 2014

Las baldosas Pavegen junto con paneles solares suministran la energía necesaria para la iluminación del campo de juego hasta 10 horas con una carga de batería completa, creando el primer campo de fútbol de este tipo en el mundo.

La aplicación de esta tecnología permite a la comunidad convertirse en parte del proceso de generación de energía. La tecnología Pavegen tiene más características que el simple hecho de generación de energía. El uso de la interfaz de programación de aplicaciones inalámbricas (API), permite el análisis de datos en tiempo real, la representación de pisadas en vivo y la posibilidad de incorporar el sistema en las tomas de decisiones a nivel deportivo (información adicional para árbitros y jueces de línea).

[Video campo de fútbol, Rio de Janeiro](#)



Ilustración 74: Campo de Fútbol Rio de Janeiro [41]



Ilustración 75: Campo de Fútbol Rio de Janeiro [41]

5.8.1.2 Terminal 3, Aeropuerto de Heathrow, Londres

Pavegen han instalado 51 baldosas en la Terminal 3 del aeropuerto de Heathrow, para encender las luces LED situadas a lo largo del corredor.

El aeropuerto de Heathrow recibió el Premio Innovación por el concepto de corredores inteligentes.

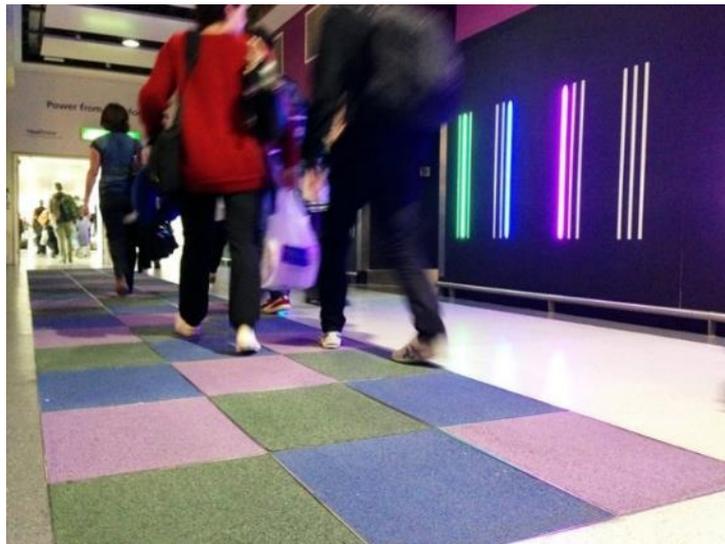


Ilustración 76: Terminal 3, Aeropuerto de Heathrow [41]

5.8.1.3 Lagos, Nigeria

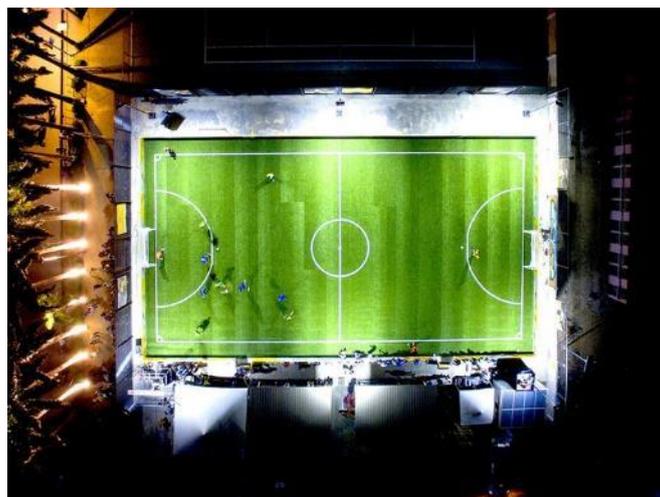


Ilustración 77: Campo de Fútbol Lagos, Nigeria [41]

Pavegen colaboró con Shell para crear el primer campo de fútbol de este tipo en África. Se instalaron cien baldosas en el campo de futbol situado en Lagos, Nigeria, las cuales proveen la alimentación de los reflectores que rodean la zona de juego.

El proyecto puesto en marcha en diciembre de 2015, y fue inaugurado por el cantante y activista Akon.

[Video campo de futbol, Lagos Nigeria.](#)

5.8.1.4 Harrods, Londres

Pavegen instaló 10 baldosas en la tienda insignia de Harrods, situado en el corazón de Londres. Harrods es el tercer destino más visitado en el Reino Unido (15 millones de compradores al año).

Las baldosas no solo proporcionan energía a la iluminación led de cada exhibidor, sino también brinda una experiencia interactiva con los clientes, inaugurando una nueva estrategia de venta.



Ilustración 78: Harrods, Londres [41]

5.8.2 Samsung, Sud África

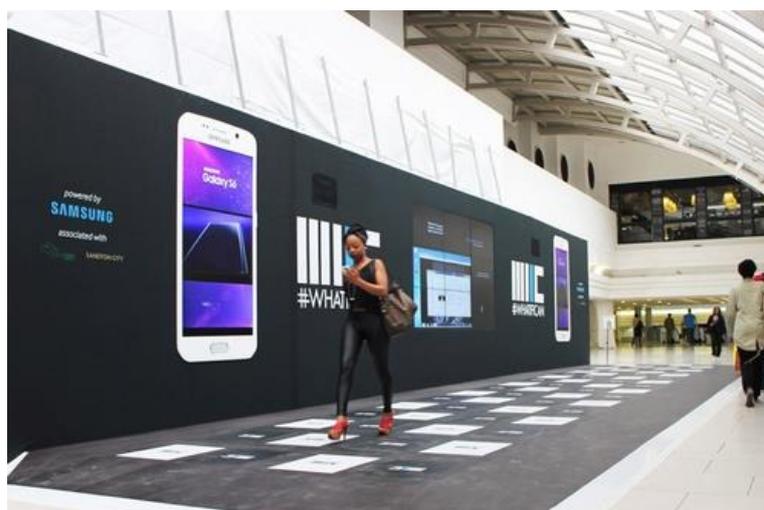


Ilustración 79: Sandton City Mall, Sud África [41]

Pavegen en asociación con Samsung Electronics África, realizaron la instalación de una pasarela de 68 baldosas situada en uno de los centros comerciales más prestigiosos de África, ubicada dentro del corredor principal de Sandton City Mall.

La energía es extraída de un promedio mensual de más de 2 millones de pisadas. Ésta se almacena en baterías, y se distribuirá entre las comunidades africanas desfavorecidas, como la Escuela Secundaria the Sunrise en la ciudad de Diepsloot.

[Video Sandton City Mall, Sud Africa](#)

5.8.2.1 Estación de tren de St. Omer, Francia

Inaugurada en marzo de 2014, fue la mayor instalación permanente de Pavegen en una vereda, en la estación de tren de St. Omer, situada al norte de Francia. Catorce baldosas recolectan la energía proveniente de las pisadas de los viajeros diarios para abastecer la iluminación LED, así como también puertos USB que permiten a los viajeros cargar sus dispositivos electrónicos.

[Video estación de tren de St. Omer, Francia.](#)



Ilustración 80: Estación de tren de St. Omer, Francia [41]

5.8.2.2 West Ham Station, Juegos Olímpicos Londres 2012

Pavegen fue contratado para la instalación de la pasarela peatonal que conecta la estación del metro West Ham con la Villa Olímpica en el año 2012. Esta pasarela recibió una cuarta parte de todo el tráfico peatonal a la Villa Olímpica. Registró más de un millón de pasos a través de los juegos. La instalación demostró que las unidades se pueden utilizar de manera efectiva tanto como una fuente de energía fuera de la red y como baldosas inteligentes, las cuales pueden proporcionar datos de cada pisada.



Ilustración 81: West Ham Station, Juegos Olímpicos Londres 2012 [41]

[Video estación del metro West Ham, Londres](#)

5.8.2.3 Federation Square, Melbourne Australia

En asociación con Siemens, Pavegen ha instalado 5 baldosas en la Plaza Federal. El objetivo es la implementación de una tecnología limpia para la generación de energía en un espacio público. La Plaza Federal se encuentra en el corazón de Melbourne, una ciudad icónica que se está convirtiendo rápidamente en una de las más sostenibles de Australia.



Ilustración 82: Federation Square, Melbourne Australia [41]

5.8.3 Innowattech

Innowattech es una empresa con sede en Ra'anana Israel, con instalaciones de investigación y desarrollo en el Technion, Instituto de Tecnología de Israel, Haifa, Israel.

Esta empresa ha desarrollado sistemas de recolección de la energía mecánica que se disipa en rutas, vías férreas, pistas de aterrizaje y sendas peatonales.

Una nota publicada en el portal “The Jerusalem Post” en agosto del 2017 revela que se trataba de un fraude y los resultados no eran los que se expresaban en los informes presentados [47].

Consideramos que es importante mencionar las posibles aplicaciones que presentaba esta empresa, debido a que fue la impulsora de esta tecnología y abrió el camino al estudio e investigación de esta nueva fuente energética. Además de proporcionar diferentes campos de aplicaciones creemos que lo novedoso del estudio de esta empresa es la posibilidad de generar una fuente de datos valioso durante la generación de energía eléctrica. Esto le proporciona a esta fuente de energía renovable un valor agregado frente a las fuentes de energía convencionales para poder competir en el mercado.

Los datos y resultados no serán tenidos en cuenta en este trabajo, debido a su falsedad comprobada.

El sistema está basado en generadores piezoeléctricos y se puede instalar sin necesidad de modificar el entorno.

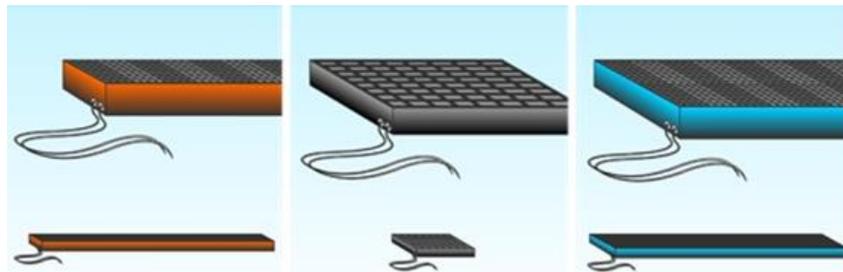


Ilustración 83: Tipos de baldosas generadoras de energía [48]

En esta figura se aprecian tres tipos de baldosas generadoras de energía diferentes. En el primer caso es para uso en pavimento (tránsito vehicular), en el segundo caso es para uso en vías férreas y por último para el tránsito de peatones.

5.8.3.1 Aplicación en rutas y autopistas

El sistema consta de elementos piezoeléctricos colocados a tres centímetros bajo el asfalto. Estos generadores se conectan a baterías situadas fuera de la ruta o autopista de forma que la energía queda almacenada y pueda ser utilizada para las aplicaciones locales o inyectarse a la red eléctrica.

Además, esta tecnología permite la adquisición de datos en tiempo real de:

- El peso de los distintos tipos de vehículos.
- La velocidad de los vehículos.
- La distancia entre vehículos.
- La densidad del tráfico.

- La posición a lo largo del carril, etc.

[Video telecontrol](#)

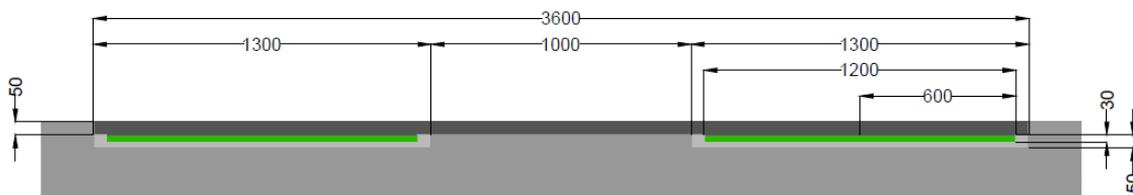


Ilustración 84: Esquema de instalación sistema piezoeléctrico de telecontrol [48]

[Video sistema de captación de energía en carreteras](#)



Ilustración 85: Forma de instalación [48]

5.8.3.2 Aplicación en ferrocarriles

En la mayoría de los rieles de todo el mundo se utilizan unas almohadillas de plástico ensambladas en los durmientes para reducir el impacto de las fluctuaciones durante el viaje en tren y al mismo tiempo reducir el ruido ambiental. El sistema que ha desarrollado Innowatech tiene un tamaño y geometría similar a la almohadilla original, así que una vez que el tren pasa por él, un pulso eléctrico genera energía capaz de analizar y procesar.



Ilustración 86: Elemento piezoeléctrico para vías férreas [48]

Innowatech, a parte del sistema de obtención de energía por tráfico ferroviario, también ha desarrollado un sistema de monitoreo que permite proporcionar datos de alta precisión en tiempo real. Algunas de las variables recolectadas son:

- Velocidad del tren.
- Longitud de la formación.
- Número de vagones.
- Cantidad de ejes.
- Peso de ejes, vagones y trenes.
- La distancia entre dos trenes consecutivos u opuestos.
- Control de defecto, diámetro y perfil de cada rueda.



Ilustración 87: Sistema piezoeléctrico ferroviario [48]

[Video sistema de captación de energía aplicado a vías férreas.](#)

A continuación, se presenta un cuadro comparativo extraído de la página web de Innowatech.

Tabla 16: comparativa entre distintas tecnologías de generación de energía eléctrica [48]

	Energía eólica	Energía solar	Energía geotermal	Energía hidráulica	Carbón	Petróleo y gas	Energía Piezoeléctrica*
Costo ¢ (U\$D) por kWh	3-10	10-20	2-10	2-10	8-10	8-16	3-10**
Recuperación de la inversión***	12-30	20-30	10-20	12-15	15-20	10-13****	6-12**
Confiabilidad	✗	✗	✓	✓	✓	✓	✓
Limpia	✓	✓	✓	✓	✗	✗	✓
Probada	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✗
Despliegue disponibilidad	✗	✗	✗	✗	✓	✓	✓
Implementación en áreas urbanas	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✓
Bajo mantenimiento	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✓
Conserva el estado original del ambiente	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✓
La generación de energía coincide con horario pico de consumo	✗	✗	✗	✗	✓	✓	✓

*Generador piezoeléctrico Innowattech.

**Dependiendo del volumen de tráfico.

***Suponiendo que el beneficio sea de 10 ¢ (U\$D) por kWh.

****Suponiendo que el costo es de U\$D 60 por barril de petróleo.

Si bien estos datos son de una procedencia dudosa, servirán como iniciativa para despertar el interés de la investigación y así en un futuro lograr reducir los costos de esta tecnología y optimizarla para lograr su competitividad en el mercado de las energías renovables.

5.8.4 East Japan Railway Company

La compañía East Japan Railway ha instalado un pavimento piezoeléctrico para generación de energía eléctrica en los molinetes y puertas de entrada al subte. 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 88: Estación de Tokio en la que se aprecia el uso de materiales piezoeléctricos en las vallas de entrada para la generación de energía eléctrica. [46]

6 Cálculo económico de implementación de energía eléctrica mediante baldosas piezoeléctricas

6.1 Objetivos del proyecto económico:

El objetivo general del proyecto es analizar la rentabilidad de la implementación de un sistema de generación de energía eléctrica sustentable en un entorno urbano utilizando materiales piezoeléctricos. Se realizará un estudio técnico económico para evaluar la factibilidad del mismo.

Hoy en día la crisis energética es un importante problema en nuestro país, y creemos que la solución no es única, sino que sería conveniente poder generar en varios sectores de forma independiente. De ahí nuestra idea de poder aprovechar la energía mecánica producida por los peatones en las veredas de la peatonal, para recuperarla y transformarla en energía eléctrica, capaz de abastecer la iluminación pública de dicha zona.

Se evaluarán distintas alternativas de baldosas presentes en el mercado actual, se realizará un estudio de la iluminación pública, es decir, la cantidad de potencia eléctrica necesaria para abastecer la iluminación de una cuadra en la peatonal San Martín de la ciudad de Mar del Plata. Teniendo estos datos, se calcularán los costos totales de la instalación y con esto se determinará la factibilidad económica. Con estos resultados por cuadra, dada la similitud entre cuerdas se puede fácilmente evaluar la totalidad de extensión de la peatonal.

Cabe destacar, que también se podría aplicar este método de evaluación a otros escenarios como, por ejemplo, para abastecer de iluminación, barreras de paso de ferrocarril, semáforos, señalizaciones y demás en zonas donde no existe tendido eléctrico en la actualidad, ya que, al tener en cuenta el valor económico del tendido eléctrico, este factor determinante cambiará totalmente la matriz de factibilidad del proyecto.

6.2 Resumen de la metodología utilizada

Para la realización del proyecto se llevarán a cabo las siguientes etapas de trabajo:

Recopilación de información

Es muy importante obtener información de diferentes fuentes confiables, con el objetivo de tener un soporte fundamentado, y así lograr un correcto desarrollo del proyecto.

Consiste básicamente en la consulta e investigación en revistas o publicaciones obtenidas a partir del portal Web of Science, diferentes fabricantes que brindan información técnica, y demás investigaciones relacionadas con el tema a abordar.

La recopilación de información es un trabajo que se lleva a cabo durante todo el desarrollo de la tesis de grado, ya que esta, es una actividad que va de la mano con todas y cada una de las etapas que se proponen en cualquier proyecto.

Etapas 1: Determinación de potencia eléctrica

- **Cálculo de potencia:** se realiza el cálculo de potencia eléctrica necesaria para abastecer de iluminación peatonal LED de baja potencia. Este cálculo será por cuadra de senda peatonal, conservando la cantidad y tipo de luminarias actualmente instaladas.

Etapas 2: Evaluación de fabricantes de baldosas

- **Evaluación de alternativas:** se evalúan los diferentes proveedores de baldosas piezoeléctricas, teniendo como base la potencia a generar, calculada en la etapa anterior.
- **Elección:** luego de analizar las alternativas y compararlas por medio de matrices de selección, se debe elegir la que mejor encaje a lo requerido en el proyecto. Con estos datos será posible obtener los costos de producción y evaluar la rentabilidad del proyecto.

Etapas 3: Determinación del banco de baterías e inversor

- **Cálculo del banco de baterías:** en esta etapa se calcula la capacidad necesaria del banco de baterías, así como también el tipo y modelo necesario para esta aplicación.
- **Cálculo del inversor:** teniendo la capacidad del banco de baterías y la potencia de la carga a alimentar, se procede a calcular y determinar el inversor necesario.

Etapa 4: Evaluación de rentabilidad del proyecto.

En esta etapa se aplicará lo aprendido en la cátedra de Ingeniería económica.

- **Cálculo de inversión:** Se estimará la inversión necesaria en equipos e instalaciones.
- **Cálculo de costos:** Se realizará un estudio de costos.
- **Rentabilidad del proyecto:** Se evaluarán las diferentes variables que son determinantes en saber si el proyecto es rentable.

6.3 Etapa 1: Determinación de la potencia eléctrica

6.3.1 Cálculo de potencia

Para el cálculo de potencia se pretende conservar el tipo y cantidad de luminarias presentes actualmente en la peatonal.

En la actualidad se encuentran instaladas 10 columnas con luminarias LED de 60W cada una, y 4 reflectores de 50W cada uno.



Ilustración 89: Luminarias de senda peatonal

Por lo tanto, la potencia eléctrica por cuadra será:

$$P = 10 \times 60W + 4 \times 50W = 800W \text{ }^{13}$$

Dado el carácter comercial de la zona la mayor circulación peatonal se presenta en las cercanías de las vidrieras de los locales comerciales. Este comportamiento se ve reflejado en la traza urbanística, donde se pueden encontrar obstáculos ubicados en el centro de la misma (bancos, mesas de cafés, columnas de iluminación, tachos

de residuos, etc.). Teniendo esto en cuenta, se propone que la instalación de las baldosas piezoeléctricas aproveche el tránsito de las personas. Por este motivo se dispondrán dos módulos, uno a cada lado a una distancia de 1,5 metros respecto de la línea municipal (vidrieras). Cada uno de los módulos será señalado, de esta manera buscamos incentivar el tránsito sobre ellas. De esta forma optimizaremos la recolección de energía.

6.4 Etapa 2: Evaluación de fabricantes de baldosas

6.4.1 Evaluación de alternativas

Conforme a lo escrito en la sección de fabricantes de este trabajo, procedimos a realizar un contacto comercial con cada una de las empresas citadas. Solamente tuvimos éxito con la empresa Pavegen. En cuanto a las otras empresas nos encontramos con que la empresa israelí Innowatech, que en su momento fue líder en estas alternativas energéticas, hoy no se encuentra en el mercado. En tanto East Japan Railway Company no desarrolla este tipo de proyectos.

Es por ello que en la actualidad la única empresa capaz de proveer un kit completo para la generación de energía mediante baldosas piezoeléctricas y dar soporte es Pavegen, quedando como única alternativa viable.

6.4.2 Elección

Como ya se mencionó anteriormente, la única empresa que hoy en día provee este tipo de soluciones es Pavegen. Además de esto, la empresa Londinense cuenta con vasta experiencia y numerosas instalaciones realizadas hasta el momento. Cabe destacar también que, a lo largo de su trayectoria, han ido modificando y mejorando las baldosas, para hacer de estas lo más eficiente posible.

6.4.3 Características de las baldosas

Los componentes claves del sistema Pavegen V3 son una superficie de mosaico compuesta triangular y los generadores de energía. A medida que las personas pisan las baldosas, su peso hace que la superficie superior se desplace verticalmente entre 5 mm y 10 mm. Esto crea una presión sobre los generadores que se encuentran por debajo, para producir corriente y datos. La disposición triangular asegura que la tecnología V3 maximice la producción de energía y datos en tiempo real de cada paso. [49]



Ilustración 90: Baldosa Pavegen V3

El sistema está diseñado para tomar un punto significativo y una carga distribuida.

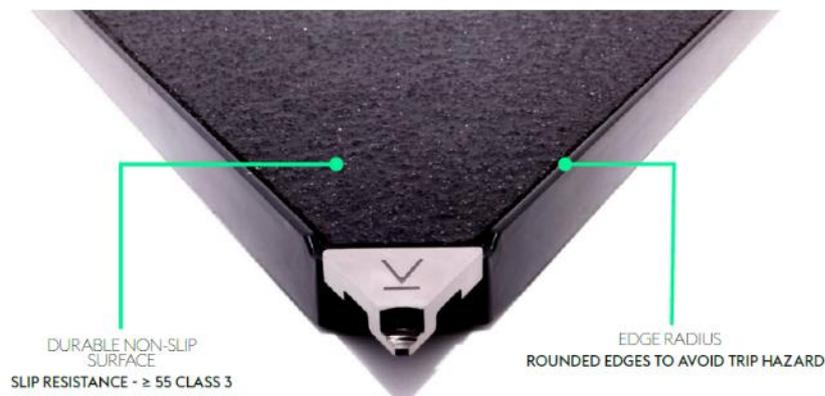


Ilustración 91: Composición constructiva de baldosa Pavegen

En la ilustración anterior se observa que se diseñó el mosaico compuesto para que sea liviano, sin comprometer su resistencia, durabilidad y resistencia a cargas pesadas. Se usó plástico reforzado con vidrio (GRP) y resina poliéster. La parte interior tiene un intrincado diseño de costillas para garantizar la estabilidad y rigidez.

La construcción asegura la máxima transferencia de energía por paso y asegura un rendimiento óptimo para instalaciones interiores y exteriores.

WEIGHT

1 square metre = 54.98kg (121.21 lbs)

- 3.8 generators/11.78kg (25.97 lbs)
- 9.25 tiles/23.12kg (50.97 lbs)
- 22kg (48.5 lbs) of support structure



= 2.5kg (5.51 lbs)



= 3.1kg (6.83 lbs)

MATERIAL

Top sheet

Altro Stronghold 30. Density: 0.0039g/cc (0.24 lb/ft³)



- Thickness: 3mm (0.12")
- Slip resistance: ≥ 55 Class 3
- Fire performance: Class Bfl-s1: 8kW/m² pass

Toe-caps

304L Stainless steel. Density: 8.03 g/cc (501.3 lb/ft³)



Tiles

Glass Reinforced Plastic (GRP) - Density of 7.8 g/cc (486.94lb/ft³)



- Material Code - Menzolit® SMC 0200 1500-9005
- Flexural strength (MPa): 155 BS EN ISO 14125:1998
 - Flexural modulus (GPa): 9.5 BS EN ISO 14125:1998
 - Tensile strength (MPa): 65 BS EN ISO 527-4:1997

Generator housing

Aluminum Alloy 2024 - Density of Al 2.7g/cc (168.56 lb/ft³)



- Ultimate tensile strength: 210-140MPa (130-21ksi)
- Maximum yield strength: no more than 97 MPa (14,069psi)
- Elongation: 10-25%

Ilustración 92: Especificaciones técnicas de baldosa Pavegen

El sistema que ofrece Pavegen consiste en módulos de baldosas, que serán instaladas con un controlador inteligente proporcionado por la misma empresa. Además de esto, cada baldosa cuenta con conexión Bluetooth. Por lo tanto, a la salida del controlador se obtiene un BUS de continua para conectar el banco de baterías, y un BUS de datos.

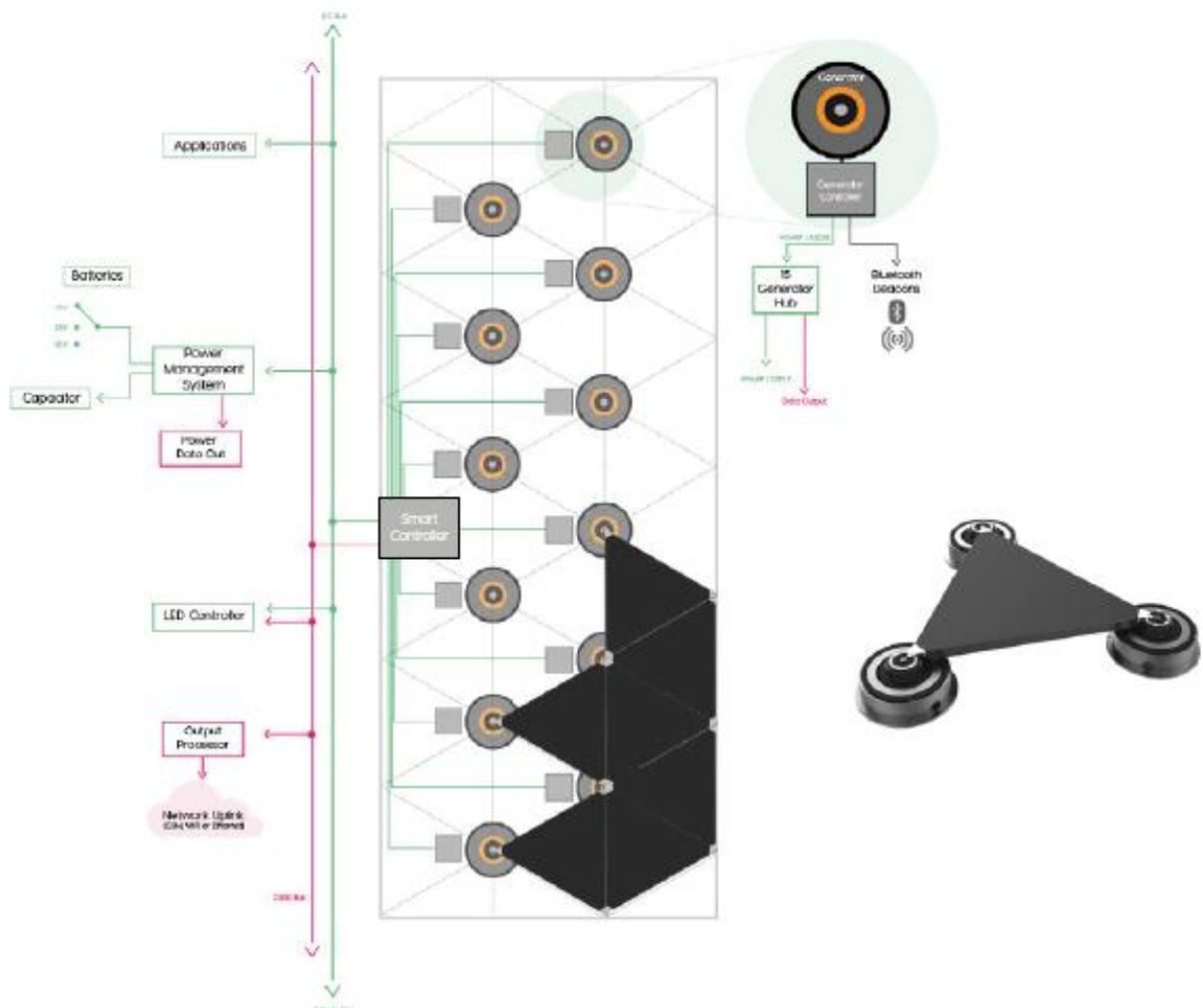


Ilustración 93: diagrama del sistema Pavegen

El controlador inteligente es de una arquitectura flexible y es un sistema informático de baja energía que amplía significativamente la gama de funciones para las instalaciones de Pavegen. El dispositivo permite al equipo configurar sistemas con una gama de capacidades de batería, para controlar la iluminación e informa los puntos de datos de uno o varios grupos de unidades.

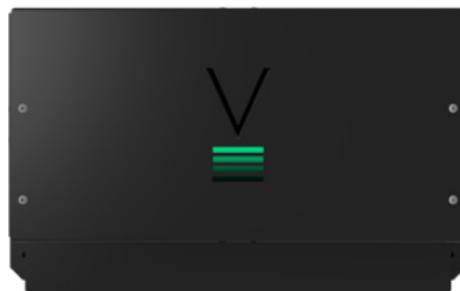


Ilustración 94: Controlador inteligente Pavegen

Voltage Range (Battery): 12-36V
Voltage (Capacitor): 48V

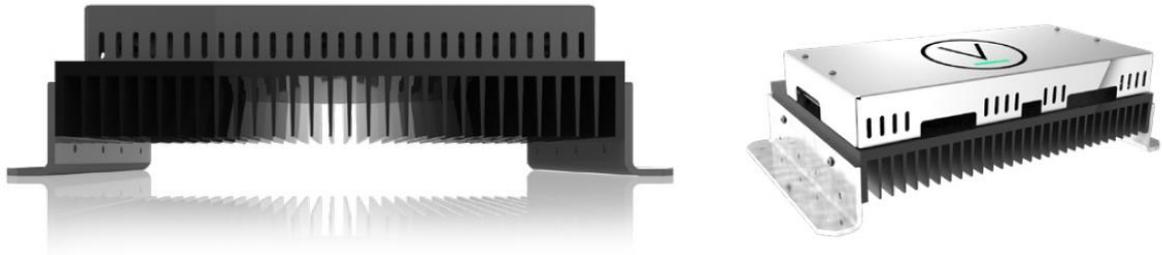


Ilustración 95: Cargador inteligente de baterías Pavegen

El cargador de baterías inteligente que proporciona Pavegen, cuenta con 5 funciones, en las cuales se puede modificar la tensión de carga del banco de baterías. Además de esto, el cargador gestiona tanto la carga como la descarga, pudiendo almacenar la energía excedente en grandes capacitores.

Por otra parte, permite el monitoreo del flujo de energía y el estado de carga de las baterías. Esta información se proporciona en un BUS de datos digitales. Este cargador cuenta con salidas auxiliares para el control de cargas de iluminación LED, las cuales podrán prenderse o apagarse según la configuración que se programe. Esto último será muy útil para nuestra aplicación.

6.4.3.1 Guía de instalación

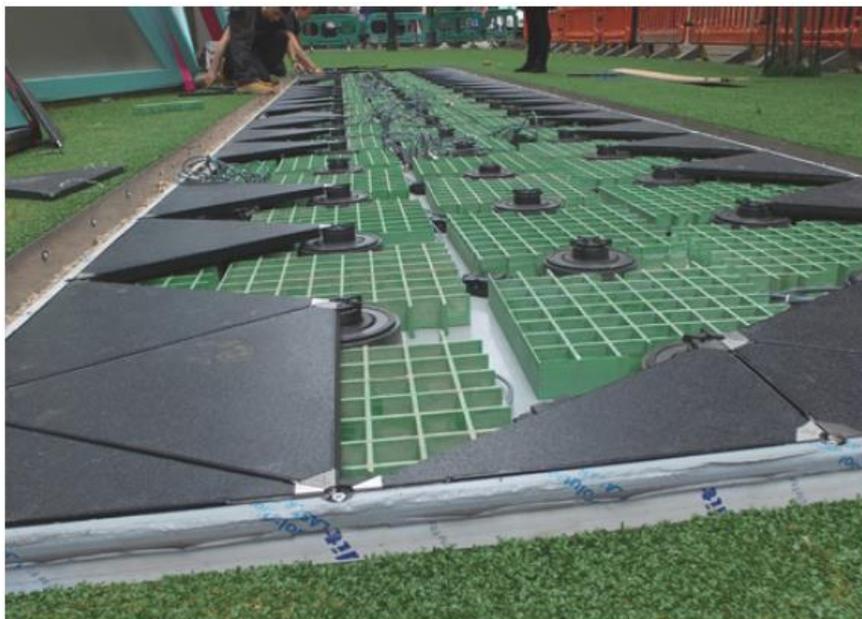


Ilustración 96: Instalación de baldosas Pavegen



Ilustración 97: Instalación de baldosas Pavegen

Procedimiento:

- 1) **Preparación del área:** Dado que la matriz se va a instalar en un piso existente formado por adoquines de hormigón, es necesario retirar todos los adoquines en el área de instalación, para luego limpiar y nivelar la zona. Se recomienda que los adoquines circundantes al armazón se eliminen para crear una zona de trabajo de al menos 200 mm alrededor del contorno del marco. Esto debe exponer las vías del conducto de cable y drenaje.
- 2) **Colocación de la cama de arena:** La superficie de la cama de ajuste debe establecerse paralela a la superficie del entorno adoquines a una profundidad de 92 mm. La pendiente de la cama debe coincidir con la de los adoquines circundantes. La capa de arena debe ser compactada y tener al menos 8 mm de espesor. La superficie debe extenderse más allá de los límites de la matriz Pavegen. La superficie superior de la placa base debe estar a 80 mm por debajo del nivel de la superficie de adoquines adyacentes. La alineación de la placa se establece con la plantilla de pin Pavegen.
- 3) **Montaje de las secciones del marco en placas base:** El marco se construye usando secciones modulares y consiste en un marco superior e inferior. El marco inferior monta las almohadillas de borde y es la sección principal de soporte de carga. Se debe colocar temporalmente la fila externa de generadores para que sirvan de referencia para la posición del marco. Las secciones del marco se atornillan y se colocan con la ayuda de plantillas de configuración Pavegen para establecer la cuadratura, la posición y el espacio de drenaje establecido en el borde del nivel inferior.
- 4) **Asegurar el marco al concreto:** Se debe perforar los agujeros preformados en el marco a través de la placa base en el concreto, utilizando anclajes químicos. Para esto se recomiendan espárragos de anclaje M8, Fischer FIS

VW 360S o equivalente. Se requiere la pistola de aplicación de resina Fischer FIS AM. Se debe colocar los conductos de cableado entre la matriz y el armario de control.

- 5) **Instalación de conductos de drenaje:** Se debe instalar el conducto de drenaje del borde a lo largo del borde inferior. Luego se cortará el conducto de tubería de PVC de sección rectangular y se pondrá en concreto. Se debe alinear el borde del conducto con las ranuras de drenaje en la placa base. Por último, se conectarán los canales de drenaje al desagote pluvial existente.
- 6) **Sello contra el ingreso de agua:** Se recomienda sellar la matriz para minimizar el daño causado por el agua en la plataforma. Para evitar que el agua se filtre debajo de la placa base, se debe colocar la masilla de polisulfuro entre la placa de base y la interfaz de hormigón y conducto. Se recomienda el uso de pistola de un componente, una base de caucho sintético sellante conforme a BS2515 / BSEN ISO 11600 F-12.5P. Por último, se debe pasar una tira de sellador de RTV de silicona alrededor de todas las juntas del marco.
- 7) **Colocación de la cama de ajuste:** Se debe colocar los adoquines alrededor del marco con un espacio de 15mm y luego colocar sellador de silicona entre estos y el marco de las baldosas piezoeléctricas. Luego de esto se deberán probar los drenajes.
- 8) **Colocación e instalación de gabinete de equipos:** Se debe seleccionar un gabinete de equipo IP56 adecuado para el sitio. Se recomienda acero inoxidable o un color claro para reflejar la radiación solar. Como la disipación de potencia del equipo para alojar en el gabinete es baja, no es necesario un sistema de enfriamiento activo. Se recomienda que el gabinete del equipo esté equipado y que el controlador de carga esté conectado a la matriz antes de que se instalen los generadores. Estos pueden dañarse si se activan sin conexión a una carga. Luego se deberá tender el cableado DC-Bus desde la matriz hasta el gabinete del equipo. Se deberá instalar el sensor de luz ambiental en una posición apropiada. El controlador de salida carga las baterías, mide la potencia y controla la iluminación. Se instalarán las baterías; no se deberá conectar al controlador de carga en esta etapa. Luego se instalará el enlace de celular si es necesario y sus respectivas aplicaciones.
- 9) **Instalación de generadores:** Se procede a instalar los generadores en la base instalada. Se deberá respetar los márgenes establecidos con la plantilla proporcionada por Pavegen. Una vez instalados los generadores se tenderán y conexionará el cableado de los mismos. Se debe colocar grasa siliconada en cada punto de conexión. Cada cable estará provisto de enchufes y terminales adecuados.
- 10) **Pruebas:** Mecánicas: se tendrá que comprobar el movimiento libre y el retorno de las fichas. Luego se ajustará la posición de la almohadilla si la loseta se está pegando o no está corriendo libremente. Eléctricas: se medirá la energía de prueba y alimentación de datos. Luego se retirarán los tornillos, y se aplicará el compuesto de bloqueo (Locktite 2400) y se ajustaran nuevamente

los tornillos. Por último, se apretarán los tornillos con la herramienta anti manipulación Pavegen.

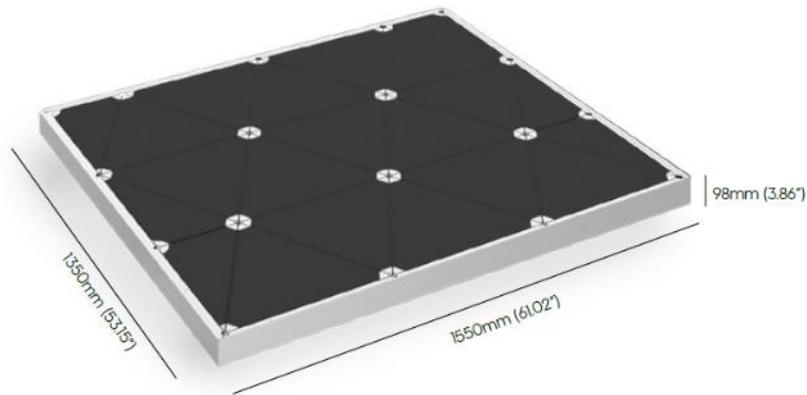


Ilustración 98: Módulo de baldosa Pavegen

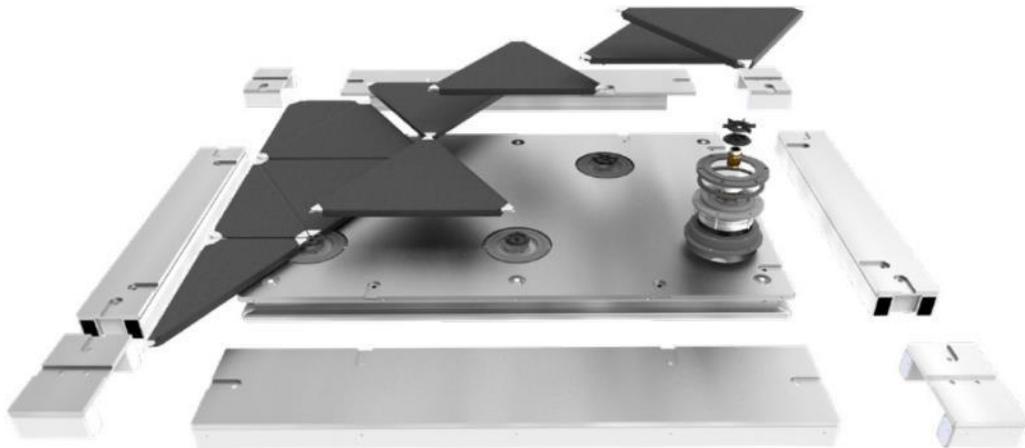


Ilustración 99: Despiece de baldosa Pavegen

6.5 Etapa 3: Determinación del banco de baterías e inversor

Para determinar el banco de baterías nos basamos en la potencia necesaria calculada en la etapa 1 del presente proyecto.

Se considera que la potencia de 800W estará presente durante 14hs diarias y será constante.

$$E = P \times t = 800W \times 14hs = 11200Wh \quad 14$$

Adoptamos una tensión de diseño de 24V, por lo que la capacidad del banco será:

$$C = \frac{11200Wh}{24V} = 467Ah \quad 15$$

Esto sería válido si el ciclo de la batería es del 100%, es decir, si se pudiera descargar y cargar completamente.

Según el fabricante, para aumentar la vida útil de las mismas, se podrá descargar solo el 50% del ciclo. Con este porcentaje se tendrán aproximadamente 2750 ciclos.

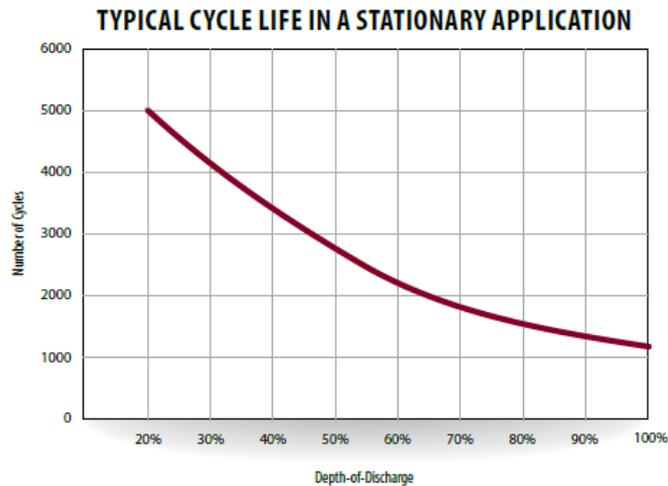


Ilustración 100: Ciclos de vida útil VS porcentaje de descarga en baterías Trojan

Por lo tanto, la capacidad del banco de baterías deberá aumentar al doble, para aumentar la vida útil de las mismas y será de 933Ah.

Otro dato relevante a tener en cuenta, es que se tendrá que adicionar un 10% debido a la energía consumida por el inversor de potencia.

Finalmente, la capacidad debe ser de 1026Ah.

Se seleccionan baterías de 695Ah y 6V. Para lograr la capacidad y tensión necesaria se adopta una configuración de 4 baterías en serie y otras 4 en paralelo. Así obtenemos 1390Ah y 24V. Por lo tanto, se requieren 8 baterías, para alimentar la carga requerida.

Considerando este banco de baterías se obtiene una autonomía de 19hs, con lo cual cubriría la necesidad energética en días de poca carga.

El inversor elegido deberá ser de 24V y una potencia superior a 1000W.

6.6 Resumen de equipamiento necesario.

Tabla 17: Resumen de equipamiento necesario. Elaboración propia.

Equipo	Cantidad		Descripción
Kit Pavegen	4	Unid.	Marco soporte. Baldosas. Generadores. Controladores. Desagües.
Banco de baterías	8	Unid.	695Ah 6V
Inversor	1	Unid.	24V 2000W
Insumos	N/A		Cableado, bulonería, gabinetes, etc.

6.7 Etapa 4: Evaluación de rentabilidad del proyecto

Como principio de orden general se establece que todo estudio de prefactibilidad está basado en un análisis previo del mercado, que es el que deberá dar la respuesta a las siguientes preguntas:

- ¿Cuánto se puede vender? En nuestro caso, solo se pretende poder alimentar el consumo eléctrico de la iluminación peatonal, por lo que el consumo se mantendrá constante durante la vida útil del proyecto, unos 15 años.
- ¿A qué precio se puede vender? El precio final al cual se puede vender será comparado con el valor del kWh para iluminación pública proporcionado por la empresa distribuidora EDEA al mes de febrero de 2018 (cuadro tarifario vigente).

6.7.1 Inversión Total

La cantidad de dinero necesaria para poner el proyecto en operación, ya sea de bienes o servicios, es conocida como "inversión". Dicha inversión se puede integrar por capital propio, créditos de organismos financieros nacionales y/o internacionales, y de proveedores.

Para la evaluación de rentabilidad, lo primero que se calculará es la inversión necesaria implicada en la instalación. La Inversión Fija Total se divide en: Componentes directos y Componentes indirectos. Cada uno de estos rubros debe estimarse por separado.

Componentes directos:

- Gastos de estudio e investigaciones previas del proyecto.
- Equipos principales:
 - Kit de baldosas Pavegen FOB (free on board).
 - Costo de flete y seguros.
 - Aranceles aduaneros de importación.
 - Inversor.
 - Banco de baterías.
- Instalación de equipos.
 - Costo de mano de obra y servicios externos.

- Insumos y consumibles.
- Instalación eléctrica.
- Facilidades.
- Mejoras del terreno.
- Gastos de puesta en marcha.

Componentes indirectos:

- Ingeniería y supervisión.
- Gastos de construcción.
- Honorarios del contratista.
- Contingencias.

6.7.2 Gastos de estudio e investigaciones previas del proyecto

Antes de decidir o apoyar la construcción del proyecto se deben efectuar los estudios económicos correspondientes. En rigor, deberán considerarse en el proyecto los gastos de todos los recursos que se asignen a él, incluso los necesarios en la etapa de investigación preliminar, que comprende los gastos de estudio del anteproyecto mismo.

6.7.3 Costo de kit de baldosas Pavegen FOB (free on board).

El proveedor Pavegen impone una compra mínima de USD 33856 y el precio del kit por metro cuadrado es de USD 5417, por lo que la compra mínima será de 6,25m² de baldosas.

Pavegen asegura generar 3W por cada paso. En nuestro caso tenemos un banco de baterías de 1390Ah y 24V, lo cual nos da una energía necesaria de 33360Wh para cargar por completo desde una carga nula al banco de baterías, pero como mencionamos anteriormente, el banco solo se descargará al 50%, por lo que se necesita 16680Wh.

Consideramos que el horario de carga será de 12hs (considerando que nadie transita durante las 12 hs restantes).

Si cada baldosa genera 3W, se requieren 5560 pasos por hora.

Se estima que en la senda peatonal transita una persona cada 5 segundos (en temporada baja), lo que daría 720 personas por hora. Si cada persona tiene una longitud de paso de aproximadamente 0,7m, tendremos que recolectar 8 pasos por cada persona que transite.

Para lograr esto se necesitan 5,6m lineales de baldosas, que serán dispuestas en dos tramos, a cada lado de la senda peatonal.

Las dimensiones de los módulos son de 1,35m x 1,55m, por lo que se requieren 4 módulos en total, lo que equivale a 8,37m² lo cual supera al monto mínimo de compra.

6.7.4 Costo de flete y seguros

El costo de flete se determina a partir de las dimensiones de la encomienda, y el peso de la misma. Otro factor determinante es el tipo de flete elegido (marítimo o aéreo). En nuestro caso el costo del flete es del 12% del costo de las baldosas FOB.

Para el caso del costo de seguros, es un porcentaje del valor asegurado, dependiendo de la prima que se elija. En nuestro caso es del 2,5% del costo de las baldosas FOB.

6.7.5 Aranceles aduaneros de importación para generadores de energías renovables

El Decreto 814/2017 establece la reducción al cero por ciento (0%) de las alícuotas correspondientes al Derecho de Importación Extrazona (D.I.E.) de aquellos bienes que no tienen producción local o aquellos que resultan necesarios para la integración con bienes de fabricación local, destinados al plan oficial de energías renovables.

6.7.6 Costo de inversor

Para el caso del inversor se cotizó un equipo de 2kW y 24Vcc en Argentina. El costo del mismo es de USD 899.

6.7.7 Costo de banco de baterías.

Para las baterías se cotizaron de la marca Trojan de ciclo profundo. Se armó el banco con 8 baterías de 6V y 695Ah. El costo de las mismas es de USD 7616.

6.7.8 Costo de insumos y consumibles.

En cuanto a los insumos se tuvo en cuenta los terminales, cables de interconexión, bulonería en general, elementos de limpieza y demás consumibles menores de instalación. El costo estimado es de USD 1540.

6.7.9 Costo de mano de obra y servicios externos.

Para el cálculo de la mano de obra se tuvieron en cuenta las siguientes etapas:

- Ingeniería previa: Incluye la elaboración de planos típicos de montaje, ingeniería de detalles, lista de materiales y consumibles, documentación a presentar, etc.
- Montaje: Incluye el personal destinado a la hora de realizar el montaje de las baldosas piezoeléctricas.
- Puesta en marcha: Tiene en cuenta el personal dedicado a la puesta en marcha, ensayos y pruebas para verificar el correcto funcionamiento de la instalación.

En el caso de los servicios externos se tuvo en cuenta la maquinaria necesaria (bobcat con minipala), baños químicos, servicio de vigilancia, etc.

El costo total es de USD 20840.

6.7.10 Costo de mantenimiento

En el cálculo de este costo se tuvo en cuenta el costo de los materiales y mano de obra directa y de supervisión que se emplean en los planes de mantenimiento preventivos y correctivos debidos a desperfectos en el normal funcionamiento.

Si bien el costo de mantenimiento se incrementa según la vida útil de la instalación va llegando a su fin, en la realización del cálculo económico tomamos este costo como un costo fijo anual, asignando al mismo un valor del 6% de la inversión fija de forma de simplificar la interpretación del cálculo. Con este valor se cubre el costo del reemplazo del banco de baterías, necesario a la mitad de vida útil del proyecto.

6.7.11 Costo de depreciación

La depreciación significa una disminución en valor. La mayoría de los bienes van perdiendo valor a medida que aumenta su antigüedad. Los bienes de producción adquiridos recientemente, poseen un diseño con mayor tecnología y mejoras respecto de las versiones anteriores, además, por ser nuevos tienen menor probabilidad de falla. En general, y debido al desgaste, los equipos gradualmente se transforman en menos valiosos con el uso. En la práctica, esta pérdida en valor se reconoce como un gasto de operación, y en lugar de cargar el precio de compra completo de un nuevo bien como un gasto de una sola vez, este se distribuye durante la vida útil del bien.

Los principales objetivos para cargar un costo de depreciación pueden resumirse en:

- La recuperación del capital invertido en bienes de producción.
- La determinación de costos indirectos de producción para registro de costos.
- La inclusión del costo de depreciación en gastos de operación con propósitos impositivos.

A continuación, explicaremos brevemente las causas de declinación de valor de un bien, en nuestro caso el conjunto generador piezoeléctrico:

- a) **Depreciación física:** El desgaste debido al uso de cada día de operación disminuye gradualmente la habilidad física del bien para llevar a cabo su función. Un buen programa de mantenimiento retarda la velocidad de declinación, pero difícilmente mantiene las condiciones esperadas por una instalación nueva. Además del uso habitual, el daño físico accidental puede también disminuir el rendimiento. Se estima una vida útil del kit de baldosas piezoeléctricas de unos 20 años. [50]

Debido a que el lugar de instalación presenta condiciones atmosféricas marítimas consideramos una vida útil de unos 15 años a modo conservador.

- b) **Depreciación funcional:** Las demandas energéticas realizadas sobre una instalación pueden incrementarse más allá de su capacidad de producción de energía eléctrica. Por ejemplo, en nuestro caso un aumento en la demanda

puede hacer que el inversor elegido sea de una potencia insuficiente, por lo cual será necesario la compra de uno de mayor potencia, haciendo que el inversor inicialmente instalado tenga un valor residual.

- c) **Depreciación tecnológica:** Medios novedosos desarrollados para llevar a cabo una función pueden hacer que los medios presentes sean antieconómicos. Por ejemplo, las locomotoras de vapor perdieron valor rápidamente con el advenimiento de las locomotoras Diesel. Los nuevos materiales piezoeléctricos y las mejoras en la calidad a menor costo a partir de nuevos desarrollos hacen que los diseños de las baldosas actuales se vuelvan obsoletos.
- d) **Agotamiento:** El consumo de un recurso natural agotable para producir productos o servicios se denomina agotamiento. La extracción de los minerales necesarios para fabricar el PZT de un sitio aminoran el valor de lo sin explotar. Esta disminución se compensa por una reducción proporcional en ganancias derivadas del recurso. Teóricamente, la carga de agotamiento por unidad del recurso extraído se determina mediante la siguiente ecuación:

$$\text{Valor presente del recurso} = \frac{\text{Valor presente del recurso}}{\text{Unidades remanentes del recurso}} = \text{tasa de agotamiento (\$/unidad)} \quad 16$$

- e) **Depreciación monetaria:** Un cambio en los niveles de precio es una causa problemática de decrecimiento en el valor de las reservas de depreciación. Las prácticas contables habituales relacionan la depreciación con el precio original de un bien, no con el de su reemplazo. Sin embargo, se permite la revaluación con fines impositivos cuando se producen altas tasas de inflación, como en la actualidad.

6.7.11.1 Método de depreciación utilizado:

Cada método de depreciación posee características únicas que lo hacen atractivo de acuerdo a las diferentes filosofías de administración. Un método por medio del cual el total del dinero invertido se recupera tempranamente en la vida de un bien es un punto de vista conservador. Una cancelación temprana previene contra cambios súbitos que pueden hacer que el equipo pierda valor. Sin embargo, los métodos en los cuales la carga anual es constante simplifican el procedimiento contable.

En general, el comportamiento deseable de un método de depreciación obedece a:

- Recuperación del capital invertido en un bien.
- Mantener un valor de libro cercano al verdadero valor del bien a lo largo de su vida.
- Ser fácil en su aplicación.
- Ser aceptable por la legislación.

Existen dos aspectos en cuanto a la aplicación de los métodos de depreciación:

- **El aspecto interno de la compañía:** por medio del cual se aplica el método que la dirección considera más adecuado.
- **El aspecto impositivo:** donde se deberá aplicar el método permitido por la legislación vigente, que en Argentina es el método de la línea recta.

El costo de depreciación depende de la vida útil, del capital invertido, del valor residual y del método seleccionado. En general, el costo de depreciación anual responde a la ecuación:

$$\text{Costo de depreciación anual} = e \times (I_F - L) = e \times I_{F \text{depreciable}} \quad 17$$

donde:

e = factor de depreciación anual (depende del método utilizado).

I_F = inversión fija.

L = valor residual o de reventa al final de la vida útil de un bien

En aquellos casos en que el valor residual se considere nulo ($L = 0$), el costo de depreciación se obtiene aplicando la ecuación:

$$\text{Costo de depreciación anual} = e \times I_F \quad 18$$

Para conocer el valor de libros en el año k , dentro del período de vida útil del bien, se utiliza la ecuación:

$$V_L = I_F - D \quad 19$$

Dónde:

V_L es el valor de libros en el año k

D es la depreciación acumulada en k años.

6.7.11.1.1 Método de la línea recta

Utilizaremos este método en nuestro cálculo dado que la depreciación por línea recta es la más simple en la aplicación y es el método más ampliamente usado, además de ser el único aceptado por la legislación impositiva Argentina. En este método, la depreciación anual es constante y el factor de depreciación anual se calcula utilizando la ecuación:

$$e = \frac{1}{n} \quad 20$$

Donde n es la vida útil del bien expresada en años

En consecuencia, el costo de depreciación anual resulta:

$$\text{Costo de depreciación anual} = \frac{1}{n} \times (I_F - L) \quad 21$$

La depreciación acumulada (D) y el valor de libros (V_L) se calculan de acuerdo a la ecuación:

$$D = (I_F - L) \times \frac{k}{n} \quad 22$$

$$V_L = (I_F - L) \times \left(1 - \frac{k}{n}\right) + L \quad 23$$

Donde k es un año cualquiera en la vida del bien.

6.7.12 Cálculo de la inversión

Inversión Fija: Para el cálculo de la inversión fija se comenzó calculando los costos de los equipos necesarios para realizar la instalación. Los precios fueron tomados en dólares americanos y todo el equipamiento puesto en Mar del Plata (se incluyó transporte, impuestos, etc.).

Luego se procedió a calcular los costos de mano de obra para realizar la ingeniería previa, que incluye realizar los cálculos, compra de materiales, planos, programación de la obra, ingeniería de detalle y coordinación de la obra en general. Además de esto se incluye las horas hombre para realizar el montaje y puesta en marcha de la instalación. Por último, se estimaron los costos de las facilidades y maquinarias como servicios externos durante el periodo de obra.

Una vez calculada la inversión fija, se calculan tanto los costos fijos como los variables del proyecto, los cuales fueron detallados anteriormente.

Con estos valores ya se pudo obtener los costos totales y unitarios del kWh para así poder compararlo con el costo de kWh de EDEA.

Tabla 18: Cálculo de inversión

Baldosas piezoeléctricas					
Inversión Fija					
Ítem	Sub ítem	Cantidad	Unidad	Valor	
Costo de equipos	Baldosas	8,37	m ²	USD 45.340,29	
	Baterías	8	Baterías de 6V 695Ah	USD 7.616,00	
	Inversor	1	2kW 24Vcc	USD 899,28	
	Cables			USD 839,21	
	Terminales			USD 200,00	
	Insumos			USD 500,00	
Costo de mano de obra	Ingeniería previa	Ingeniero Electricista	90	Horas hombre	USD 971,22
		Oficial electricista	540	Horas hombre	USD 4.856,12
	Montaje	Oficial mecánico	540	Horas hombre	USD 4.856,12
		Seguridad e higiene	180	Horas hombre	USD 1.618,71
		Ingeniero Electricista	180	Horas hombre	USD 1.942,45
	Puesta en marcha	Oficial electricista	27	Horas hombre	USD 388,49
		Ingeniero Electricista	27	Horas hombre	USD 388,49
		Seguridad e higiene	27	Horas hombre	USD 388,49
Costo de servicios externos	Maquinaria	Minipala (bobcat)	10	Días	USD 1.798,56

		Autoelevador	10	Días	USD 719,42
	Facilidades	Obrador	1	Mes	USD 269,78
		Baños	1	Mes	USD 161,87
		Vigilancia	345	Horas	USD 2.482,01
					IF
		Valorresidual L=	0,1	IF	USD 7.623,65
				kWh por año	3504
Costos variables					
Ítem		Sub ítem	Cantidad		Valor
Costo de mantenimiento		Mantenimiento general	6%	IF	USD 3.323,69
Total de costos variables					USD 3.323,69
Costos fijos					
Ítem		Criterio			Valor
Costos de inversión	Costo de depreciación	e=1/n			0,06666667
		(IF-L) x 1/n			USD 4.574,19
	Costo de impuestos	Libre de impuestos			USD 0,00
	Costo de seguros	0,5% IF			USD 3.811,83
Total de costos fijos					USD 8.386,02
Costos totales (CT)					USD 11.709,70
Costo total unitario kWh					USD 0,16
Costo total unitario sin depreciación					USD 0,10
Costo kWh alumbrado público cuadro tarifario EDEA febrero 2018 sin impuestos					USD 0,13
Costo kWh alumbrado público cuadro tarifario EDEA febrero 2018 con impuestos					USD 0,17
Costos anuales fijos de suministro de EDEA					USD 79,40
Beneficio bruto					USD 0,10
Beneficio neto antes de impuestos					-USD 11.018,09
Beneficio neto					-USD 11.018,09

6.7.13 Análisis de la Rentabilidad

El análisis de proyectos de inversión se realiza a través de la evaluación de la rentabilidad. En función de los resultados obtenidos en comparación con los criterios de decisión que se definan previamente, el proyecto se acepta, se rechaza, o bien se proponen cambios para ajustar los puntos que determinan un retorno sobre la inversión.

6.7.13.1 Estimación del beneficio

Existen dos flujos principales. El primero es el ahorro en energía eléctrica que proporciona el proyecto. El segundo está dado por los gastos y es el total de costos fijos y variables. El beneficio es la diferencia entre las entradas y las salidas. El ahorro de dinero lo podemos considerar como una entrada por venta de energía eléctrica (V), al cual si le restamos los costos de producción de dicha energía sin incluir la depreciación (C) da como resultado el Beneficio Bruto (BB) del proyecto.

$$BB = V - C \quad 24$$

Dónde:

BB: Beneficio Bruto

V: Ventas totales

C: Costos de producción sin depreciación

Cuando se consideran los costos de depreciación, el Beneficio Neto Antes de Impuestos (BNAI) resulta:

$$BNAI = V - C - e.(IF - L) \quad 25$$

Donde:

e: Es el factor de depreciación interno

If: Inversión fija

L: Valor residual

6.7.13.2 Estimación del Flujo de Caja

El movimiento de dinero hacia o desde un proyecto productivo se denomina flujo de caja (FC) y se define como la diferencia entre los ingresos por ventas y los costos operativos (sin los costos de depreciación), y descontando el pago de impuestos.

El flujo de caja puede calcularse como:

$$FC = BN + e.(IF - L) \quad 26$$

El Flujo de Caja o el Beneficio Neto no son una medida de la rentabilidad, pero estos valores se utilizan para calcular la rentabilidad de un proyecto particular. El objetivo de un inversor es siempre maximizar las ganancias respecto a la inversión de capital necesaria para generar dichos ingresos. Si el propósito fuera sólo el de maximizar las ganancias, cualquier inversión que diera beneficios sería aceptable, no importando los bajos retornos o los altos costos. En consecuencia, conceptualmente, la rentabilidad es una medida de la ganancia obtenida por una actividad en relación a la inversión de capital necesaria para que esa actividad se realice. Por otra parte, el estudio de la rentabilidad de un proyecto puede ser realizado en dos niveles.

- **Rentabilidad económica o del activo:** esta es una medida del rendimiento del activo total del proyecto independientemente de la financiación del mismo, esto permite la comparación de la rentabilidad entre proyectos sin que la diferencia de su estructura financiera afecte el resultado.
- **Rentabilidad financiera o de los propietarios:** en este caso se considera que la inversión de capital está financiada por recursos propios y externos a la organización, es decir, que se toma en cuenta la estructura financiera de la

empresa. Por este motivo, la rentabilidad financiera es una medida referida al rendimiento de los fondos propios de la empresa.

6.7.14 Cuadro de usos y fuentes

La presentación de la evaluación se facilita mediante la integración de los datos en los denominados "cuadros de fuentes y usos de fondos". Tales cuadros muestran cuál es el origen o fuente de los fondos y cuál es su destino final. En el caso de la evaluación de la rentabilidad económica de este proyecto, se considerará que tanto el activo fijo como el activo de trabajo serán afrontados en su totalidad con fondos propios. Los datos básicos para la preparación del cuadro de fuentes y usos de fondos para el período de instalación del sistema de recolección de energía provienen del calendario de inversiones (15 años), considerando el año como período de tiempo.

Para evaluar la rentabilidad del proyecto procedemos a la realización del cuadro de fuentes y usos de fondo.

Tabla 19: Tabla de usos y fuentes

Baldosas																
		Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5	Año 6	Año 7	Año 8	Año 9	Año 10	Año 11	Año 12	Año 13	Año 14	Año 15
Fuentes	Capital propio	USD 76.236	USD 0,00													
	Ahorro de energía	USD 691,62														
	Total (a)	USD 76.928	USD 691,62													
Usos	Activo fijo	USD 76.236	USD 0,00													
	Activo de trabajo	USD 0,00														
	Costos de producción	USD 11.709	USD 7.135,51													
	Total (b)	USD 87.946	USD 7.135,51													
BNAI = Saldo (a)-(b)	-USD 11.018	-USD 6.443,90														
Impuestos	USD 0,00	USD 0,00	USD 0,00	USD 0,00	USD 0,00	USD 0,00	USD 0,00	USD 0,00	USD 0,00	USD 0,00	USD 0,00	USD 0,00	USD 0,00	USD 0,00	USD 0,00	USD 0,00
Beneficio neto= BNAI - Impuestos	-USD 11.018	-USD 6.443,90														
Depreciación	USD 4.574,19	USD 4.574,19	USD 4.574,19	USD 4.574,19	USD 4.574,19	USD 4.574,19	USD 4.574,19	USD 4.574,19	USD 4.574,19	USD 4.574,19	USD 4.574,19	USD 4.574,19	USD 4.574,19	USD 4.574,19	USD 4.574,19	USD 4.574,19
Flujo de caja	-USD 6.443,90	-USD 1.869,71														

Al cálculo de rentabilidad optamos hacerlo por un método dinámico en donde se considere el valor temporal del dinero. Por este motivo se calculó el valor presente.

Este método compara los valores presentes de todos los flujos de caja con la inversión original. Supone igualdad de oportunidades para la reinversión de los flujos de caja a una tasa de interés asignada previamente. Esta tasa puede tomarse como el valor promedio de la tasa de retorno que o tiene la compañía con su inversión de capital o seleccionar una TRMA para el proyecto. El valor presente del proyecto es igual a la diferencia entre el valor presente de los flujos anuales de fondos y la inversión inicial total. El valor presente neto es un monto de dinero referido a tiempo cero calculado con la tasa de interés elegida.

$$VP = \sum_{j=1}^N \frac{FC_j}{(1+i)^j} - IT \quad 27$$

Siendo:

FC: Flujo de caja

IT: Inversión total

i: Estándar financiero= 0,15

Al calcular el valor presente, se debe sumar al último flujo de caja del proyecto las cantidades de capital que se recuperan al finalizar la vida económica del proyecto, es decir, el capital de trabajo, el valor del terreno y el valor residual. Conceptualmente, el valor presente es la cantidad de dinero requerida al comienzo del proyecto, además de la inversión total, que, invertida a una tasa de interés preasignada, pueda producir ingresos iguales a, y al mismo tiempo que, los flujos de caja del proyecto. Se puede afirmar que, si el valor presente de los flujos de caja es mayor que el valor de la inversión total, entonces el proyecto es aceptable. Es decir, este método plantea que el proyecto debe aceptarse cuando su VP es superior a cero, ya que indica que genera ese monto de dinero remanente sobre lo mínimo exigido, y si fuese menor a cero se debe rechazar, ya que esa es la cantidad de dinero faltante para que el proyecto reditúe lo exigido por el inversionista. Por lo tanto, cuando se aplica el método de Valor Presente, el criterio de decisión para la aceptación de un proyecto es:

- Si $VP \geq 0$ entonces se acepta el proyecto
- Si $VP < 0$ entonces se rechaza el proyecto

Los resultados obtenidos del cálculo fueron:

$$VP = -USD 90.210$$

$$VP' = \frac{VP}{IT} \quad 28$$

$$VP' = -1,18$$

Por lo tanto, $VP < 0$ y el proyecto no es rentable.

A nuestro entender, la no rentabilidad del proyecto se debe principalmente los siguientes puntos:

- Costo tecnológico elevado.
- Implementación urbana. Red eléctrica disponible con un muy bajo valor actual de la energía.
- Escasa oferta en este tipo de tecnologías. Actualmente existe un único proveedor.

Estos puntos serán ampliados en las conclusiones del trabajo.

Esta conclusión deja abierta la interrogante ¿Será rentable la utilización de energía renovable en este escenario dadas las condiciones actuales? Para responder esta interrogante decidimos realizar una comparativa con la energía solar fotovoltaica, dado que esta sería la más conveniente en esta aplicación urbana por los siguientes motivos:

- Bajo costo.
- Bajo mantenimiento.
- Fácil montaje.
- Amplia oferta en el mercado actual.
- Tecnología probada.
- Baja contaminación visual.
- Nula contaminación sonora.

6.8 Comparación entre la inversión de un sistema de energía solar fotovoltaica y un sistema piezoeléctrico.

A continuación, plantearemos una propuesta técnico económica utilizando energía solar fotovoltaica en lugar de un sistema piezoeléctrico. Destacamos para esta comparativa mantendremos el mismo escenario planteado en la propuesta anterior, es decir, se pretende iluminar una cuadra de la peatonal de la Ciudad de Mar del Plata de forma independiente a la red eléctrica.

Dado el avance tecnológico actual de la energía solar, se encuentra disponible en el mercado una solución integral de iluminación peatonal que incluye todo lo necesario para tal fin, es decir, columna, luminaria, fotocélula, panel solar, cargador y baterías. Este kit fue desarrollado con el fin de reducir el tiempo de montaje y facilitar la instalación.

6.8.1 Cálculo de inversión para un sistema de energía solar fotovoltaica

A continuación, y a modo de comparación, realizaremos el cálculo de la inversión necesaria para un sistema de iluminación basado en energía solar fotovoltaica dado que con esta tecnología se logra generar energía eléctrica limpia y silenciosa, de bajo mantenimiento, lo que los convierte en una de las alternativas más ampliamente utilizadas en zonas urbanas.

6.8.1.1 Sistemas de iluminación aislados de la red eléctrica

Se trata de sistemas asociados a baterías que alimentan el consumo eléctrico de las luminarias durante la noche. Los sistemas se suelen dimensionar con el fin de contar con autonomía suficiente.



Ilustración 101: Sistema de iluminación solar.

6.8.1.1.1 Componentes del sistema

- Luminaria LED: Es la encargada de generar y proyectar el haz de luz en la dirección requerida. La tecnología LED permite un ahorro significativo de energía eléctrica, lo cual conlleva a una reducción significativa del costo y volumen del equipo.
- Panel Solar: Sirve para generar la energía eléctrica, en corriente continua entre 12 y 24 V generalmente.
- Regulador de Carga: Limita la carga de la batería para que esta no se dañe prematuramente.
- Batería: Almacena la energía para ser utilizada cuando no hay sol.
- Cables: Conectan las diferentes partes del sistema.
- Fotocélula: Enciende la luminaria cuando cae el sol.

6.8.1.1.2 Vida útil

- Paneles solares: Se estima que la vida útil de los paneles solares es de 30 años. Estos paneles ofrecen una garantía internacional de una eficiencia superior al 80%, aún transcurridos los 25 años. Sin embargo, la vida útil de los mismos es indefinida, es decir, luego de su vida útil continúan generando energía eléctrica cada vez con menor eficiencia.
 - Luminarias LED: Su vida útil según fabricante es de 50.000 horas, alrededor de 16 años.
 - Batería: Con un adecuado control durante el ciclo de carga y descarga la vida útil de las baterías es de unos 1000 ciclos, es decir, alrededor de unos 3 a 4 años.

- Regulador de carga: En condiciones normales de funcionamiento (sin soportar cortocircuitos o descargas atmosféricas) y realizando el cambio de las baterías luego de que estas finalicen su vida útil para no sobrecargar los mismos, los componentes electrónicos presentes en el sistema presentan una vida útil similar a las lámparas LED, es decir, alrededor de unos 15 años.

6.8.1.2 Equipo

El equipo elegido consta de las siguientes características:

- Luminaria LED: 100W
- Panel solar 235W
- Regulador: 24Vcc
- Baterías: 2 unidades de 105Ah
- Autonomía de batería con lámpara encendida: 20Hs
- Carga Máxima invierno (zona Buenos Aires): 705Wh
- Carga Máxima verano (zona Buenos Aires) 1850Wh

Su origen es China, se comercializa en distintos distribuidores de la Ciudad de Buenos Aires en un valor que ronda los u\$d 2.000. Cuenta con garantía a cargo del importador por 5 años.

6.8.1.3 Cálculo de inversión utilizando tecnología de paneles solares

De la misma forma que analizamos la inversión para las baldosas piezoeléctricas, realizaremos un estudio del capital necesario para realizar la instalación de los equipos necesarios para suministrar la iluminación en la misma área bajo las mismas condiciones.

Los resultados obtenidos se muestran a continuación:

Tabla 20: Cálculo de inversión iluminación utilizando paneles solares.

Paneles solares					
Inversión Fija					
Ítem	Sub ítem	Cantidad	Unidad	Valor	
Costo de equipos	Luminaria LED 100W	8	Unid.	USD 16.122,96	
	Panel solar 235W	8	Unid.		
	Regulador de Carga 24V	8	Unid.		
	Baterías 105 Ah	16	Unid.		
	Insumos				USD 200,00
Costo de mano de obra	Ingeniería previa	Ingeniero Electricista	64	Horas hombre	USD 690,65
		Montaje	Oficial electricista	64	Horas hombre
	Oficial mecánico		64	Horas hombre	USD 575,54
	Seguridad e higiene		64	Horas hombre	USD 575,54
	Ingeniero Electricista		64	Horas hombre	USD 690,65
	Puesta en marcha	Oficial electricista	8	Horas hombre	USD 115,11
		Ingeniero Electricista	8	Horas hombre	USD 115,11
		Seguridad e higiene	8	Horas hombre	USD 115,11
	Costo de servicios externos	Maquinaria	Camión con hidrogúa	9	Días
Manlift			9	Días	USD 809,35
Facilidades		Obrador	9	Días	USD 269,78
		Baños	9	Días	USD 161,87
		Vigilancia	9	Noches	USD 64,75
					IF
	Valorresidual L=	0,1	IF	USD 2.221,50	
			kWh por año	3504	
Costos variables					
Ítem	Sub ítem	Cantidad	Unidad	Valor	
Costo de mantenimiento	Mantenimiento general.	1%	IF	USD 163,23	
	Batería 105 Ah ciclo profundo	16	Unid.	USD 3.838,23	
				Total de costos variables	USD 1.442,64
Costos fijos					
Ítem	Criterio	Valor			
Costos de inversión	Costo de depreciación	$e=1/n$	0,066666667		
		$(IF-L) \times 1/n$	USD 1.332,90		
	Costo de impuestos	Libre de impuestos	USD 0,00		
	Costo de seguros	0,5% IF	USD 1.110,75		
				Total de costos fijos	USD 2.443,66
				Costos totales (CT)	USD 3.886,29
				Costo total unitario kWh	USD 0,05
				Costo total unitario sin depreciación	USD 0,03
				Costo kWh alumbrado público cuadro tarifario EDEA febrero 2018 sin impuestos	USD 0,13
				Costo kWh alumbrado público cuadro tarifario EDEA febrero 2018 con impuestos	USD 0,17
				Costos anuales fijos de suministro de EDEA	USD 79,40

	Beneficio bruto	USD 0,16
	Beneficio neto antes de impuestos	-USD 1.915,27
	Beneficio neto	-USD 1.915,27

Tabla 21: Tabla de usos y fuentes

		Paneles solares														
		Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5	Año 6	Año 7	Año 8	Año 9	Año 10	Año 11	Año 12	Año 13	Año 14	Año 15
Fuentes	Capital propio	USD 22.215	USD 0													
	Ahorro de energía	USD 692	USD 692	USD 692	USD 692	USD 692	USD 692	USD 692	USD 692	USD 692	USD 692	USD 692	USD 692	USD 692	USD 692	USD 692
	Total (a)	USD 22.907	USD 692													
Usos	Activo fijo	USD 22.215	USD 0													
	Activo de trabajo	USD 0	USD 0	USD 0	USD 0	USD 0	USD 0	USD 0	USD 0	USD 0	USD 0	USD 0	USD 0	USD 0	USD 0	USD 0
	Costos de producción	USD 3.886	USD 2.553													
	Total (b)	USD 26.101	USD 2.553													
BNAI = Saldo (a)-(b)		-USD 3.195	-USD 1.862													
Impuestos		USD 0	USD 0	USD 0	USD 0	USD 0	USD 0	USD 0	USD 0	USD 0	USD 0	USD 0	USD 0	USD 0	USD 0	USD 0
Beneficio neto= BNAI - Impuestos		-USD 3.195	-USD 1.862													
Depreciación		USD 1.333	USD 1.333	USD 1.333	USD 1.333	USD 1.333	USD 1.333	USD 1.333	USD 1.333	USD 1.333	USD 1.333	USD 1.333	USD 1.333	USD 1.333	USD 1.333	USD 1.333
Flujo de caja		-USD 1.862	-USD 529													

El cálculo para esta variante nos arroja los siguientes resultados de valor presente:

$$VP = -USD 26.193$$

$$VP' = \frac{VP}{IT} = -1,18$$

Como se puede observar, el valor presente sigue siendo negativo, por lo que esta alternativa tampoco es rentable.

7 Posibles nichos de aplicación

Debido a los resultados obtenidos en el análisis de factibilidad del proyecto haremos mención a posibles nichos en donde la generación de energía piezoeléctrica sea rentable y tenga ventajas notorias frente a otras tecnologías.

Entendemos que la generación de energía eléctrica de potencia con materiales piezoeléctricos no será rentable frente a otras energías renovables, como por ejemplo la energía solar, debido a que esta última está mucho más desarrollada y avanzada, por lo que el costo de aplicación es cada día menor. Esta es una variable que nos impacta directamente en el estudio de rentabilidad.

La ventaja del material piezoeléctrico, frente a otras tecnologías, es que además de generar electricidad aprovechando movimientos mecánicos, tiene la posibilidad de sensar [51]los. Teniendo en cuenta esta ventaja se abre un abanico de posibilidades de aplicaciones en donde es de sumo interés conocer, por ejemplo: cantidad de pulsos generados, fuerza ejercida en el material, frecuencia de pulsos y demás.

Por lo tanto, los materiales piezoeléctricos nos pueden brindar una solución integral a diferentes problemáticas de forma tal que puedan generar energía eléctrica suficiente para cierta carga y además sensar variables de control para una determinada problemática.

El primer caso a mencionar será la generación de energía eléctrica en rutas, utilizando materiales piezoeléctricos. La idea de este proyecto es generar energía haciendo uso del paso vehicular sobre las carreteras. Esto hace que, a diferencia de nuestro proyecto, la fuerza aplicada a cada piezoeléctrico sea mayor debido al peso de los vehículos, y así se logre recolectar una mayor cantidad de energía eléctrica. Ésta será utilizada para alimentar circuitos de iluminación de baja potencia, señales viales activas y se podrá tener un control del tránsito vehicular.

Según estudios realizados [51]sería posible generar 1kWh por cada 12 metros de carretera. No todas las carreteras serán aptas para este proyecto, debido a que la cantidad de energía producida será directamente proporcional al número de impactos vehiculares que reciban los materiales piezoeléctricos, por este motivo deberán ser autopistas con mucho tránsito.

El segundo escenario está orientado a la alimentación de sensores donde se requiera un uso autónomo sin necesidad de baterías y cableado.

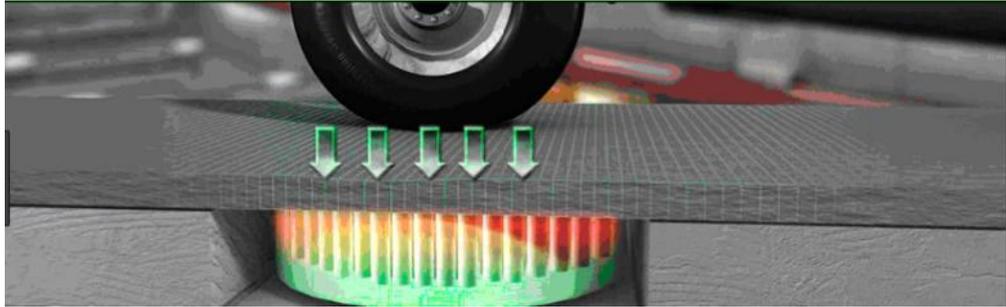


Ilustración 102: Materiales Piezoeléctricos en carreteras

Otro de las aplicaciones en donde los materiales piezoeléctricos tienen un valor agregado es en la generación de energía eléctrica producida por el paso de trenes sobre los durmientes de las vías.

En este caso los materiales piezoeléctricos se colocan bajo los rieles del tren, y este ejerce al pasar una fuerza sobre los durmientes de la vía. El uso de esta energía servirá para alimentar los circuitos de iluminación y señalización activa, circuitos de apertura y cierre de barreras en pasos a nivel y circuitos de control de tránsito ferroviario.

Quizá éste último mencionado sea el de mayor importancia, ya que implementando estos materiales se podrá tener un control de la posición en la que se encuentra cada tren, cantidad de vagones, peso de los mismos y velocidad entre otras variables. De esta forma se podrían automatizar las barreras de paso a nivel y tener un control del tránsito y de esta forma evitar accidentes



Ilustración 103: Materiales Piezoeléctricos en vías de ferrocarril

Otra de las aplicaciones posibles es la posible alimentación de sensores autónomos en máquinas donde se produzcan vibraciones, y se utilice para generar la energía suficiente y necesaria requerida por los sensores.

Es decir, que en la máquina que produzca vibraciones se podrán colocar elementos piezoeléctricos para la generación de energía y la toma de datos de las vibraciones generadas.

Como se pudo observar, esta tecnología será relevante en donde no haya tendido de red eléctrica y además se pueda aprovechar el valor agregado del material piezoeléctrico desde el punto de vista de control. Esto último marca una diferencia atractiva frente a las energías renovables convencionales y hacen de los materiales piezoeléctricos una posibilidad rentable y novedosa.

8 Conclusión

En cuanto a lo investigado se observa un avance consistente en la investigación académica desde los años noventa, teniendo crecimiento exponencial durante la última década debido, entre otras cosas, al auge general de las energías limpias impulsado desde las políticas gubernamentales en los países más desarrollados.

Los resultados más relevantes de cada palabra clave fueron:

- Piezoeléctrico:
 - Numero de publicaciones totales: 81.931
 - Publicaciones 2017: 5.422
 - Publicaciones argentinas totales: 115
- Piezoeléctrico en área Ingeniería Eléctrica y Electrónica:
 - Numero de publicaciones totales: 18.199
 - Publicaciones 2017: 1.324
 - Publicaciones argentinas totales: 13
- Piezoelectricidad:
 - Numero de publicaciones totales: 6.884
 - Publicaciones 2017: 565
 - Publicaciones argentinas totales: 4
- Piezoelectricidad en área Ingeniería Eléctrica y Electrónica:
 - Numero de publicaciones totales: 1.060
 - Publicaciones 2017: 93
 - Publicaciones argentinas totales: 1
- Piezoelectric energy harvesting:
 - Numero de publicaciones totales: 4.378
 - Publicaciones 2017: 712
 - Publicaciones argentinas totales: 3
- Piezoelectric tile:
 - Numero de publicaciones totales: 74
 - Publicaciones 2017: 4

- Publicaciones argentinas totales: 0

En nuestro país durante los años 2014 y 2016 se notó un incremento en la cantidad de publicaciones referidas al tema, aunque el número de publicaciones sigue siendo muy escaso comparada con los países industrializados.

El campo de aplicación de los materiales piezoeléctricos es tan amplio que abarca desde la recolección de energía, procesos industriales tales como ultrasonido, la utilización en electromedicina y el desarrollo de nanotecnología, entre otros. De todos ellos, el menos explotado es el de recolección de energía eléctrica. Solo pocas empresas se encuentran en proceso de investigación y desarrollo en esta aplicación, siendo la más relevante la empresa inglesa Pavegen, los cuales distribuyen y promocionan sus baldosas. Otra empresa pionera fue la israelí Innwattech, la cual vio el cierre definitivo de sus actividades en 2016. Fue debido a la promoción en redes sociales de estas empresas que se despertó nuestro interés por esta tecnología.

Para la evaluación del proyecto de inversión se tuvieron las siguientes consideraciones:

- Cálculo de potencia eléctrica: 800 W
- Evaluación de fabricante de baldosas: Se seleccionó al fabricante Pavegen debido a su trayectoria y a la facilidad de implementación e instalación de su producto.
- Cálculo de superficie de generación: 8,37 m² que equivale a 4 módulos completos.
- Estimación de tránsito peatonal: 1 persona cada 5 segundos durante 12 horas diarias.
- Determinación del banco de baterías: Se eligieron baterías de ciclo profundo, las cuales requieren un ciclo de carga y descarga del 50% para maximizar su vida útil. Con estas consideraciones se obtienen 2750 ciclos (7,5 años). Se seleccionó para dicho banco 8 baterías de 6V y 695Ah de capacidad, resultando el banco de 24V y 1390Ah.
- Selección del inversor: Se elige un inversor de 24/220V con una potencia de 2kW, dado que por recomendaciones del fabricante se debe dejar un margen de potencia para asegurar el correcto funcionamiento.

En cuanto al cálculo inversión, costos y rentabilidad podemos hacer el siguiente detalle:

- Se calculo el costo total de los módulos de baldosas en puerto de origen (valor CIF).
- Se estimó los costos de despachante de aduana (1%), flete y seguro (0,5% del valor CIF), despacho (0% de tasas aduaneras y derechos adquiridos).
- Costo de inversor.
- Costo de banco de baterías.
- Costo de insumos y consumibles.
- Costo de mano de obra y servicios externos.

- Costo de mantenimiento (6% inversión fija).
- Costo de depreciación calculado por el método de línea recta (vida útil de 15 años).
- Costo de seguros.
- Valor residual (10% de la inversión fija).
- Valor del kWh para alumbrado público con impuestos según cuadro tarifario vigente.
- Inversión total: U\$D 76.236.

Con estos datos calculamos el flujo de caja durante los 15 años de vida útil del proyecto para luego calcular la rentabilidad por el método dinámico del valor presente.

De este análisis resultó que el proyecto no es rentable con los precios actuales de la energía, dada la magnitud en la inversión. A nuestro entender este resultado se debe a:

- Costo tecnológico: Este tipo de tecnologías aún se encuentran en proceso de investigación y desarrollo. Debido a esto es necesario que los fabricantes inviertan una importante suma de recursos, lo que ocasiona en la estructura de costos de fabricación un gran impacto.
- Escasa oferta: En la actualidad, la única empresa que produce este tipo de kits es Pavegen. Al no existir una competencia en el mercado, el mismo solamente se regula por la elasticidad del mercado.
- Escala de producción: Al ser en la actualidad un nicho de mercado, las baldosas piezoeléctricas se fabrican a baja escala, aumentando así los costos de producción. Consideramos que, en un futuro, debido a la promoción, se comenzará a fabricar en mediana a gran escala, lo que traerá aparejado una importante reducción de costos.
- Implementación urbana: Dado que en el lugar de implementación existe un tendido eléctrico, el costo del kWh es económico. Esto cambia drásticamente en zonas donde no existe tendido.
- Valor kWh para alumbrado público: Si bien dicho cuadro tarifario se encuentra vigente, este no refleja el valor real del costo de generación, transporte y distribución de la energía eléctrica.

La comparación con otra energía alternativa viable, en este caso fotovoltaica, nos brinda los siguientes resultados:

- El costo de los equipos es directamente en el distribuidor en la Ciudad de Buenos Aires.
- El equipo viene formado por un kit, el cual consta de:
 - Luminaria LED.
 - Panel solar.
 - Regulador de carga.
 - Cables.
 - Fotocélula.
 - Poste y pescante.

- Costo de insumos y consumibles.
- Costo de mano de obra y servicios externos.
- Costo de mantenimiento (10% de la inversión fija más el costo de reemplazo del banco de baterías cada 3 años).
 - Costo de depreciación calculado por el método de la línea recta (vida útil de 15 años).
 - Costo de seguros.
 - Valor residual.
 - Valor del kW para alumbrado público con impuestos según cuadro tarifario vigente.
- Inversión total: U\$D 22.215

Con estos datos se realizó el cálculo de los flujos de caja durante los 15 años del proyecto para luego calcular la rentabilidad por el método dinámico del valor presente.

De este análisis resulta no ser rentable el proyecto dado los precios actuales de la energía eléctrica.

Al estar disponible en la zona de implementación el tendido eléctrico y el bajo valor actual de la energía de red hace que las energías renovables en zonas urbanas no sean rentables.

Se espera que la quita de subsidios a la energía eléctrica y la disminución de los costos de adquisición de los equipos para generación de energía renovable brindaran condiciones económicas necesarias para la rentabilidad de los proyectos de este tipo.

Si bien ambas propuestas resultaron no ser rentables en este escenario, vemos una clara ventaja económica en la energía solar. Esta tecnología requiere una inversión tres veces y media menor respecto de la piezoeléctrica (U\$D 22.215 vs U\$D 76.236).

9 Anexo I: Detalles del cálculo económico

La primera aclaración que haremos es que debido a la fluctuación cambiaria todos los valores se expresan en dólares estadounidenses.

Costo de equipos: Los costos de equipos están integrados por todos aquellos materiales y componentes necesarios para realizar la instalación de forma completa. Lo conforman los siguientes ítems:

- Baldosas: Hace referencia al kit provisto por la empresa Pavegen, como se describe en el capítulo 6 de este trabajo.
- Baterías: Esta compuesto por un banco de 8 baterías de 6V 695Ah cada una, del tipo ciclo profundo.
- Inversor: Se considera un inversor de 2kW y 24VCC
- Cables: Se considera 130m de cable tipo subterráneo 3x2,5mm² el cual será utilizado desde el tablero de comando general hasta cada luminaria. El cableado entre las baldosas hasta el tablero de control, será proporcionado por la empresa Pavegen, por lo que no se considera dentro de este costo.
- Terminales: Se consideran terminales tipo tubulares de 1,5mm², 2,5mm², terminales tipo ojal para PAT de tablero y estructuras metálicas.
- Insumos: En este ítem se tuvo en cuenta los siguientes materiales:
 - UPN 50 para anclaje de tablero general a pared
 - Burlonería para anclaje de tablero y soportaría en general
 - Materiales de albañilería en general para terminaciones en la zona de instalación de las baldosas
 - EPP para personal (guantes vaqueta, gafas, casco y botines de seguridad)
 - Mechas de medidas varias
 - Discos de corte 4 ½", de desbaste y flap
 - Solvente dieléctrico para limpieza de tableros y luminarias

Costos de mano de obra: Los costos de mano de obra se calcularon por hora hombre trabajada. Además de esto se separaron en 3 etapas:

- Ingeniería previa: en esta etapa se hará revisión de planos provistos por Pavegen, establecer el lugar de emplazamiento del tablero general, revisión y pedido de materiales e insumos, etc. Para esta etapa se estimaron 10 jornadas laborales de 9hs cada una de un Ingeniero Eléctrico/ Electromecánico. El costo de hora estipulado es de USD10,78.
- Montaje: Para esta etapa se consideró:
 - 3 Oficiales electricistas, los cuales trabajarán durante 20 jornadas laborales de 9hs cada una y con un costo de hora trabajada de USD 9,00. Los oficiales electricistas serán los encargados de hacer los tendidos de cables eléctricos, conexiones, montaje de tableros y elementos de protección y control, etc.
 - 3 Oficiales mecánicos: Los cuales trabajaran la misma cantidad de horas que los oficiales electricistas con el mismo sueldo estipulado. Estarán a cargo del

montaje de las placas, nivelación del terreno, armado de desagotes pluviales y acondicionamiento de la zona.

- Seguridad e Higiene: Se considera una persona destinada a la seguridad e higiene de forma permanente en obra. Esta persona estará destinada a la supervisión durante la obra en cuanto al uso de elementos de protección personal, uso adecuado de herramientas, movimientos de carga e izaje, etc. Además, será la encargada de llenar los formularios de ATS, permisos de trabajo y toda aquella documentación necesaria para presentar en la Municipalidad. Se estiman 20 jornadas laborales de 9hs cada una con un costo de USD 9,00 la hora
- Ingeniero electricista: Es la persona encargada de supervisar la obra, hacer el contacto con la Municipalidad y el proveedor Pavegen en caso de ser necesario, etc. Estará de forma permanente durante toda la obra por lo que se estiman 180hs de trabajo a un valor de USD 10,79
- Puesta en marcha: Para la puesta en marcha se estima:
 - Oficial electricista: tendrá a su cargo la solución de posibles problemas de cableado y conexión o cualquier otra falla en el sistema que se pudiese presentar. Se estiman 3 jornadas laborales de 9hs cada una.
 - Ingeniero electricista: será el encargado de la puesta en marcha y verificación del correcto funcionamiento del sistema. Están consideradas 3 jornadas laborales de 9hs cada una.
 - Seguridad e Higiene: estará presente durante la puesta en marcha en obra. Se estiman 3 jornadas laborales de 9hs cada una.

Costos de servicios externos: estos servicios están divididos en:

- Maquinaria: comprende
 - Minipala o Bobcat: 10 días de alquiler para realizar el movimiento de terreno y nivelación. El costo incluye el alquiler de la máquina con maquinista y 1 tanque de combustible. El valor por 10 días es de USD 1798.
 - Autoelevador: será necesario para la descarga de materiales de los camiones y el acopio y movimiento de materiales diarios. Se consideran 10 días de uso y al igual que la minipala incluye el maquinista y un tanque de combustible. El costo por los 10 días es de USD719.
- **Facilidades:** Son los servicios necesarios para higiene y seguridad del personal y de los materiales. Está compuesto por:
 - Obrador: será el alquiler de un contenedor de 12 pies durante un mes, donde se acopiarán los materiales, se dispondrá de una mesa de trabajo, tablero eléctrico para uso de herramientas y demás. El costo mensual del obrador es de USD269.
 - Baños: serán 2 baños químicos con servicio de limpieza para uso del personal de trabajo en obra. El costo del servicio es de USD 161
 - Vigilancia: será necesario para vigilar las instalaciones, herramientas y materiales durante las horas no laborales y así evitar hechos vandálicos. El costo del servicio es de USD 2482

10 Anexo II: Publicaciones más citadas de materiales piezoeléctricos

Publicaciones más citadas (palabras claves Piezoelectric energy harvesting)

Nanogenerador de corriente continua Impulsado por ondas ultrasónicas [52]

Autores: Xudong Wang, Jinhui Song, Jin Liu y Zhong Lin Wang

Resumen

Los autores han desarrollado un nano generador vasado en nano hilos los cuales al ser perturbados por ondas ultrasónicas producen una salida continua de energía eléctrica en corriente continua. El nano generador se fabricó con una matriz de nano hilos de óxido de zinc alineados verticalmente que se colocaron debajo de un electrodo metálico en zigzag con un pequeño espacio entre ambos. Las ondas mueven el electrodo hacia arriba y abajo para deformar y/o hacer vibrar los nano hilos. Un proceso de acoplamiento mediante un semiconductor piezoeléctrico convierte la energía mecánica en electricidad. El electrodo en zigzag actúa como un arreglo integrado por puntas metálicas en paralelo las cuales colectan y conducen, continua y simultáneamente, la energía eléctrica creada por todos los nano hilos. Este artículo presenta una tecnología móvil rentable, adaptable a la recolección de energía del medio ambiente, y ofrecerá una solución potencial para alimentar nano dispositivos y nanosistemas.

Recolección de energía de fuentes de vibración para aplicaciones de microsistemas [53]

Autores: S. P. Beeby, M. J. Tudor y N. M. White

Resumen

Este artículo revisa el estado del arte en la recolección de energía de vibración para microsistemas inalámbricos autoalimentados. Los generadores de vibración son típicamente, aunque no exclusivamente, sistemas inerciales de masa-resorte. Se presentan las ecuaciones características para generadores basados en inercia, junto con las ecuaciones de amortiguación específicas que se relacionan con los tres principales mecanismos de transducción empleados para extraer energía del sistema.

Estos mecanismos de transducción son: piezoeléctrico, electromagnético y electrostático. Los generadores piezoeléctricos emplean materiales activos que generan una carga cuando están bajo estrés mecánico. Se presenta una revisión exhaustiva de los generadores piezoeléctricos existentes, incluyendo los impacto acoplados, resonantes y dispositivos basados en humanos. Los generadores electromagnéticos emplean inducción electromagnética que surge del movimiento relativo entre un gradiente de flujo magnético a través de un conductor. Los generadores electromagnéticos presentados en la literatura son revisados incluyendo dispositivos discretos a gran escala y versiones integradas a escala de oblea (muy delgados). Los generadores electrostáticos utilizan el movimiento relativo entre placas aisladas de condensadores cargadas eléctricamente para generar energía. El trabajo

realizado contra la fuerza electrostática entre las placas proporciona la energía cosechada. Los generadores electrostáticos son revisados bajo las clasificaciones de variación de la superposición en el plano, variación del espacio entre placas dentro y fuera del plano; también se abarca la fuerza de Coulomb en generadores paramétricos y generadores basados en electreto. El factor de acoplamiento de cada mecanismo de transducción se discute y todos los dispositivos presentados en la literatura se resumen en tablas clasificadas por tipo de transducción; se extraen conclusiones sobre la idoneidad de las diversas técnicas.

Una revisión de la cosecha de energía usando materiales piezoeléctricos (2003-2006) [54]

Autores: Steven R. Anton y Henry A. Sodano.

Resumen

El campo de la cosecha de energía ha experimentado un crecimiento significativo en los últimos años debido al deseo cada vez mayor de producir productos electrónicos portátiles e inalámbricos con mayor vida útil. Los dispositivos portátiles e inalámbricos actuales deben estar diseñados para incluir baterías electroquímicas como fuente de energía. El uso de baterías puede ser problemático debido a su limitada vida útil, por lo que es necesario reemplazarlas periódicamente. En el caso de los sensores inalámbricos que deben colocarse en ubicaciones remotas, el sensor debe ser fácilmente accesible o de naturaleza desechable para permitir que el dispositivo funcione durante largos períodos de tiempo. Los dispositivos de barrido de energía están diseñados para capturar la energía ambiental que rodea a los componentes electrónicos y convertirla en energía eléctrica útil. El concepto de recolección de energía funciona para desarrollar dispositivos autoalimentados que no requieren fuentes de alimentación reemplazables. Existen varias fuentes de energía ambiental aprovechable, que incluyen el calor residual, la vibración, las ondas electromagnéticas, el viento, el flujo de agua y la energía solar.

Si bien cada una de estas fuentes de energía se puede utilizar con eficacia para alimentar sensores remotos, las comunidades estructurales y biológicas han puesto énfasis en la recolección de energía vibratoria con materiales piezoeléctricos. Este artículo revisa la literatura reciente en el campo de la cosecha de energía y presenta el estado actual de la cosecha de energía y su impulso para crear dispositivos completamente autoalimentados.

Estructura híbrida de nano hilos de microfibra para la recolección de energía [55]

Autores: Yong Qin, Xudong Wang y Zhong Lin Wang

Resumen

Un nanosistema autoalimentado que recoge su energía de funcionamiento del entorno es una propuesta atractiva para sensores, la electrónica personal y la tecnología militar. Esto es factible en principio para nano dispositivos debido a su consumo de energía extremadamente bajo. La energía solar, térmica y mecánica (viento, fricción, movimiento del

cuerpo, etc.) son comunes y pueden ser recogidas del medio ambiente, pero el tipo de fuente de energía que se elija debe decidirse sobre la base de las aplicaciones específicas. La ubicación del nodo de detección en la vigilancia militar, por ejemplo, puede implicar lugares de difícil acceso, puede ser necesario esconderlo, y puede estar en entornos polvorientos, lluviosos, oscuros y / o en bosques profundos. En un vehículo la recolección de energía de una rueda que gira o el viento que sopla sobre el cuerpo en avión en movimiento es una opción posible para alimentar dispositivos inalámbricos implantados en la superficie del vehículo. Se demostró que los nano generadores construidos de nano hilos sobre sustratos duros recolectaban energía mecánica local producida por ondas ultrasónicas de alta frecuencia. Para extraer energía de la vibración o perturbación que se origina en pasos, latidos del corazón, ruido ambiental y flujo de aire, es importante explorar tecnologías innovadoras que funcionan a bajas frecuencias (<10 Hz) y que se basan en materiales blandos flexibles. Aquí presentamos un enfoque simple y de bajo costo que convierte la energía de vibración y/o fricción de baja frecuencia en electricidad usando nano hilos de óxido de zinc piezoeléctrico que crecen radialmente alrededor de las fibras textiles. Al enredar dos fibras y cepillar los nano hilos enraizados en ellas, la energía mecánica se convierte en electricidad gracias a un proceso de acoplamiento semiconductor-piezoeléctrico. Este trabajo establece una metodología para recolectar la energía del viento suave y la energía del movimiento corporal mediante el uso de telas.

Nanocables funcionales [56]

Autores: Charles M. Lieber y Zhong Lin Wang

Resumen

La nanotecnología ofrece la promesa de permitir avances revolucionarios en diversas áreas que van desde la electrónica, la optoelectrónica y la energía hasta la salud. La base de la realización de tales avances son los correspondientes materiales a nanoescala y los nanodispositivos, centrales para estas áreas de aplicación. Los nanocables y nanocintas de semiconductores están emergiendo como una de las clases más diversas y potentes de nanomateriales funcionales que están teniendo un impacto en la ciencia y la tecnología. En este artículo, varios líderes en este vibrante campo de investigación presentan reseñas breves que resaltan aspectos clave de la ciencia matemática subyacente de los nanohilos, las funciones básicas de los dispositivos que se pueden lograr con estos materiales y el desarrollo de aplicaciones en electrónica y en el interfaz con la biología. Este artículo presenta la síntesis controlada, el modelado, diseño y auto ensamblaje, además de las aplicaciones únicas de nanoalambres en nanoelectrónica, nanooptoelectrónica, nanosensores, nanobiotecnología y recolección de energía.

Dispositivos de nanocables autoalimentados [57]

Autores: Sheng Xu, Yong Qin, Chen Xu, Yaguang Wei, Rusen Yang y Zhong Lin Wang

Resumen

La recolección de energía mecánica de fuentes ambientales podría alimentar dispositivos eléctricos sin la necesidad de baterías. Sin embargo, aunque la eficiencia y la durabilidad de los materiales de recolección, como los nanocables piezoeléctricos, han mejorado constantemente, el voltaje y la potencia producidos por un único nanocable son insuficientes para los dispositivos reales. Por lo tanto, es necesario la integración de un gran número de recolectores de energía de nanocables en una única fuente de alimentación, lo que requiere la alineación de los nanohilos y la sincronización de sus procesos de carga y descarga. En este artículo, se demuestra la integración vertical y lateral de los nanocables de ZnO en matrices que son capaces de producir la potencia suficiente para operar dispositivos reales. Una integración lateral de 700 filas de nanocables de ZnO produce un voltaje máximo de 1.26 V con una disminución de tensión de 0.19%, que es potencialmente suficiente para recargar una batería AA. En un dispositivo separado, una integración vertical de tres capas de matrices de nanocables de ZnO produce una densidad de potencia máxima de 2.7 mW/cm³. Usamos el nanogenerador integrado verticalmente para alimentar un sensor de pH de nanocable y un sensor UV de nanocable, demostrando así un sistema autoalimentado compuesto completamente por nanocables.

Circuito adaptativo de recolección de energía piezoeléctrica para una fuente de alimentación remota inalámbrica [58]

Autores: Geoffrey K. Ottman, Heath F. Hofmann, Archin C. Bhatt y George A. Lesieutre.

Resumen

Este documento describe un enfoque para cosechar energía eléctrica de un elemento piezoeléctrico excitado mecánicamente. Un dispositivo piezoeléctrico vibrante difiere de una fuente de energía eléctrica típica en que tiene una impedancia de fuente capacitiva en lugar de inductiva, y puede ser accionado por vibraciones mecánicas de amplitud variable. Se obtiene una expresión analítica para el flujo de potencia óptimo de un dispositivo piezoeléctrico rectificado, y una "recolección de energía", se propone un circuito que puede lograr este flujo de potencia óptimo. El circuito de recolección consiste en un rectificador ca-cc con un condensador de salida, una batería electroquímica y un convertidor cc-cc en modo de conmutación que controla el flujo de energía en la batería. Se utiliza una técnica de control adaptativo para el convertidor cc-cc para implementar continuamente la teoría de transferencia de potencia óptima y maximizar la potencia almacenada por la batería. Los resultados experimentales revelan que el uso del convertidor cc-cc adaptativo aumenta la transferencia de potencia en más del 400% en comparación con cuando el convertidor cc-cc no se utiliza.

Cosecha de energía piezoeléctrica [59]

Autores: Hyunuk Kim, Yonas Tadesse y Shashank Priya.

Resumen

Este libro proporciona la información introductoria sobre la recolección de energía piezoeléctrica que cubre diversos aspectos tales como el modelado, la selección de materiales, el diseño de dispositivos de recolección de vibraciones usando enfoque masivo y MEMS, y los circuitos de recolección de energía. Todas estas características se ilustran a través de ejemplos selectivos. Se presenta un sencillo procedimiento paso a paso para diseñar la cosechadora de energía con vigas en voladizo incorporando material piezoeléctrico en los puntos de máxima tensión en los modos de resonancia primero y segundo. El material piezoeléctrico adecuado para la recolección de energía por vibración se caracteriza por la gran magnitud del producto de la constante de voltaje piezoeléctrico (g) y la constante de deformación piezoeléctrica (d) dada como $(d \cdot g)$. Se ha demostrado que la condición para obtener una gran magnitud de $d \cdot g$ es como $|d| = \epsilon^n$, donde ϵ es la permitividad del material y n es un parámetro de material que tiene un límite inferior de 0,5. El material puede estar en forma de cerámicas policristalinas, cerámicas texturizadas, películas delgadas y polímeros. Se proporciona una breve cobertura de varios sistemas de materiales en todas estas categorías. Usando estos materiales, se pueden fabricar diferentes estructuras de transductores dependiendo de la frecuencia deseada y la amplitud de la vibración, como multicapa, MFC, bimorfo, actuador piezoeléctrico amplificado, QuickPack, arco iris, platillo y moonie. El concepto de cosecha de energía multimodal se presenta al final del capítulo. Este concepto brinda la oportunidad de mejorar aún más la densidad de potencia mediante la combinación de dos esquemas de recolección de energía diferentes en un sistema de modo que uno ayude al otro.

Generador de energía MEMS con película delgada de modo transversal PZT [60]

Autores: Y.B. Jeon, R. Soodb, J. Jeong c y S. Kimd.

Resumen

Se desarrolla una película delgada de titanato de zirconato de plomo, $Pb(Zr, Ti)O_3$ (PZT), dispositivo generador de energía MEMS. Está diseñado para resonar a frecuencias específicas desde una fuente de energía vibratoria externa, creando así energía eléctrica a través del efecto piezoeléctrico. Este dispositivo en voladizo está diseñado para tener una estructura plana con una masa de prueba añadida al extremo. El electrodo superior Pt / Ti está modelado en una forma interdigitada en parte superior de la película delgada PZT recubierta con sol-gel-spin para emplear el modo d_{33} del transductor piezoeléctrico. Este diseño del modo d_{33} genera un voltaje 20 veces mayor que el del diseño en modo d_{31} de la misma dimensión del haz. Los experimentos de sacudimiento de la base en la primera frecuencia de resonancia (13.9 kHz) generan carga proporcional al desplazamiento de la punta del voladizo con un coeficiente de linealidad de $4.14 \text{ pC}/\mu\text{m}$. Una viga de PZT de $170\mu\text{m} \times 260\mu\text{m}$ genera $1\mu\text{W}$ de potencia eléctrica continua a una carga resistiva de $5,2 \text{ M}\Omega$ en 2.4V dc. La densidad de energía correspondiente es de $0,74 \text{ mWh}/\text{cm}^2$, que es comparable con los valores de las baterías de iones de litio. Los autores esperan que el diseño de próxima generación con frecuencias de resonancia más bajas recolecte suficiente energía de la vibración ambiental para redes de sensores miniatura inalámbricos.

Nanogenerador polimérico piezoeléctrico de escritura directa con alta eficiencia de conversión de energía [61]

Autores: Chieh Chang, Van H. Tran, Junbo Wang, Yiin-Kuen Fuh y Liwei Lin.

Resumen

Los nanogeneradores capaces de convertir la energía de fuentes mecánicas en electricidad con alta eficiencia utilizando nanomateriales orgánicos de bajo costo y no semiconductores son atractivos para muchas aplicaciones, incluidos los recolectores de energía. En este trabajo, el electrospinning de campo cercano se usa para escribir de forma directa nanofibras de fluoruro de polivinilideno (PVDF) con características de estiramiento mecánico in situ y poling eléctrico para producir propiedades piezoeléctricas. Bajo estiramiento mecánico, los nanogeneradores han mostrado salidas eléctricas repetibles y consistentes con eficiencia de conversión de energía en un orden de magnitud mayor que las hechas de películas delgadas de PVDF. Desde un inicio el comportamiento de movimientos de pared de dominio no lineal ha sido identificado como el mecanismo responsable de la aparente alta piezoelectricidad en nanofibras, lo que las hace potencialmente ventajosas para aplicaciones de detección y actuación.

Con respecto al ámbito nacional, existen tres publicaciones que incluyen las palabras piezoelectric energy harvesting de las cuales la más relevante es "Evaluation of the performance of a lead-free piezoelectric material for energy harvesting" de los autores: S. P. Machado, M. Febbo, F. Rubio-Marcos, L. A. Ramajo y M. S. Castro.

UTN Bahía Blanca, Buenos Aires, Argentina

CONICET Bahía Blanca, Buenos Aires, Argentina

UNS Bahía Blanca, Buenos Aires, Argentina

CSIC Madrid, España

CONICET UNMdP, INTEMA, División Cerámica, Buenos Aires, Argentina

En este trabajo se ha explorado la recolección de energía basada en la vibración como fuente de energía auxiliar, que puede proporcionar pequeñas cantidades de energía para alimentar sensores remotos instalados en lugares inaccesibles. Este artículo presenta un estudio experimental y analítico de un dispositivo de recolección de energía utilizando material piezoeléctrico sin aletas basado en Dopado con MoO₃ (K_{0.44} O_{0.52} O_{0.04} Na Li) (Nb Ta Sb 0.86 0.10 0.04) O₃KNL- (NTS) Mo. El modelo de cosecha corresponde a una viga en voladizo con un disco Mopiezoeléctrico KNL- (NTS) unido a ella. Analizamos el efecto del acoplamiento electromecánico y la resistencia a la carga en la potencia eléctrica generada. Las funciones de respuesta de frecuencia electromecánica que relacionan la salida de tensión con la aceleración de la base de traducción se muestran para resultados experimentales y analíticos.

Las publicaciones más citadas sobre piezoeléctricos

Aspectos orientativos de la inmovilización de anticuerpos y la actividad inmunológica en electrodos de una microbalanza de cristal de cuarzo [62]

Autores: Frank Caruso, Elke Rodda y D. Neil Furlong

Resumen

El desplazamiento de frecuencia resonante de una microbalanza de cristal de cuarzo (QCM) se ha utilizado para controlar la inmovilización de inmunoglobulina G (IgG) y anticuerpos anti-IgG en electrodos QCM de oro modificados y no modificados. Los anticuerpos IgG y anti-IgG se han inmovilizado en las superficies de oro QCM por cuatro métodos separados. En primer lugar, los anticuerpos se inmovilizaron directamente en superficies de QCM de oro sin modificar mediante adsorción física. En segundo lugar, se hizo reaccionar 12-mercaptododecan-1-ol con la superficie de oro, y después de la reacción con ácido bromoacético, los anticuerpos se acoplaron a la superficie tiolada usando un hidrocloreuro de carbodiimida soluble en agua y N-hidroxisuccinimida. En tercer lugar, los anticuerpos se modificaron mediante la unión directa de grupos tiol usando 2-iminotiolano y posteriormente se inmovilizaron en la superficie de oro. En cuarto lugar, la superficie QCM de oro se modificó mediante la adsorción directa de Proteína A, seguido de la adsorción de anticuerpos. La adsorción física de los anticuerpos sobre electrodos QCM de oro dio como resultado un 30% más de anticuerpo unido en comparación con la unión covalente y los métodos de inmovilización de Proteína A. Las imágenes de microscopía de fuerza atómica (AFM) de IgG adsorbida en mica recubierta de oro revelaron que los anticuerpos se agregan y se distribuyen aleatoriamente en la superficie. Las capas receptoras inmovilizadas, preparadas mediante los cuatro procedimientos anteriores, se dejaron interactuar con sus especies socioespecíficas. Los desplazamientos de frecuencia de QCM resultantes se usaron para evaluar tanto los aspectos de orientación de la inmovilización de anticuerpos como las actividades inmunológicas de las capas inmovilizadas. Las capas receptoras formadas por la inmovilización de anticuerpos sobre electrodos QCM tiolados no aumentaron la cantidad de anticuerpo posteriormente unida en comparación con las capas receptoras preparadas por adsorción física directa de anticuerpos. Las capas receptoras de anticuerpos tiolados produjeron diversas actividades inmunológicas. La capa de acoplamiento de Proteína A entre la capa receptora de anticuerpo y la superficie QCM dorada facilitó la posterior unión del anticuerpo.

Procesamiento de señal de onda guiada y fusión de imágenes para localización de daño in situ en placas [63]

Autores: Jennifer E. Michael - Thomas Michaels

Resumen

Se considera una matriz distribuida espacialmente de transductores piezoeléctricos de elemento único para monitorear la integridad de las estructuras similares a placas en grandes

áreas. Cuando estos transductores conectados permanentemente son impulsados con una excitación impulsiva, se generan ondas Lamb de banda ancha y las señales recibidas son complejas, que generalmente contienen múltiples modos, así como muchas reflexiones de límites. La complejidad de las señales, incluidos los efectos de dispersión, se puede reducir mediante el filtrado de paso de banda digital, y los cambios en estas señales filtradas a lo largo del tiempo se pueden controlar para detectar y localizar el daño. Aquí se informan los resultados de un estudio experimental mediante el cual se introdujo un daño artificial en una placa de aluminio en forma de agujeros pasantes perforados en varios lugares. Los algoritmos de promediado de cambio de tiempo se aplicaron a señales diferenciales filtradas a múltiples frecuencias, lo que dio como resultado muchas imágenes para el mismo estado estructural, y estas imágenes se fusionaron para mejorar la localización de daños y el ruido de fondo. Se analizaron imágenes individuales y fusionadas para cuantificar su capacidad de localizar el daño. Los resultados muestran la eficacia del método de imágenes, así como la mejora significativa resultante de la fusión de imágenes.

Reducción de arrastre en la turbulencia limitada a la pared a través de una onda transversal transitable [64]

Autores: Yiqing Du, V. Symeonidis y G. E. Karaniadakis.

Resumen

Los experimentos computacionales basados en la simulación numérica directa del flujo delimitado por la pared revelan que la producción de turbulencia puede ser suprimida por la acción de una onda transversal transitable. Las visualizaciones de flujo muestran que la estructura de flujo de pared cercana se altera sustancialmente, en comparación con otras técnicas de control de turbulencia, lo que conduce a una gran cantidad de reducción de tensión de corte (es decir, más de 30%). La onda que viaja puede ser inducida por una fuerza spanwise que está confinada dentro de la subcapa viscosa, tiene su máximo en la pared y se desintegra exponencialmente. Demostramos la solidez de este enfoque y su aplicación en agua salada utilizando matrices de placas electromagnéticas que pueden producir la excitación de ondas progresivas requerida. También estudiamos los resultados correspondientes de las oscilaciones de spanwise usando una fuerza similar, que también conduce a una gran reducción de resistencia. Aunque las estadísticas de turbulencia para los dos enfoques son similares, las estructuras cercanas a la pared parecen ser diferentes: en la excitación oscilatoria spanwise hay una clara presencia de rayas en la pared, mientras que en la excitación de ondas progresivas estas rayas han desaparecido. Desde el punto de vista fundamental, el nuevo hallazgo de este trabajo es que la mejora apropiada de los vórtices en sentido descendente conduce a un debilitamiento de la intensidad de la veta, medida por el componente de vorticidad normal, y una supresión correspondiente sustancial de la producción de turbulencia. Desde el punto de vista práctico, nuestros hallazgos proporcionan una guía para el diseño de diferentes técnicas de actuación basadas en la superficie que incluyen materiales piezoeléctricos, aleaciones con memoria de forma y placas electro-magnéticas.

Efectos de la forma de poros y la porosidad en las propiedades [65]

Autores: Zeng Tao, Dong XianLin, Mao ChaoLiang, Zhou ZhiYong y Yang Hong

Resumen

Las cerámicas ferroeléctricas de titanato de zirconato de plomo poroso (PZT 95/5) se prepararon por sinterización de compactos que consistían en PZT y formadores de poros. Las propiedades piezoeléctricas, dieléctricas y ferroeléctricas de las cerámicas PZT porosas se investigaron en función de la forma y la porosidad de los poros. El coeficiente piezoeléctrico (d_{33}), la constante dieléctrica (ϵ_{33}) y la polarización remanente (P_r) disminuyeron con un aumento en la porosidad, y las cerámicas PZT porosas con poros esféricos exhibieron mejores propiedades que las de los poros irregulares. Además, las conductividades eléctricas de las cerámicas PZT fueron investigadas para explicar el fenómeno.

Un amortiguador de vibración piezoeléctrico autoajustable [66]

Autores: Hollkamp J.J. y Starchville T. F.

Resumen

Se presenta un amortiguador de vibración piezoeléctrico autoajustable. Un absorbedor piezoeléctrico, similar a un amortiguador de vibraciones mecánico, debe ser ajustado a un modo de vibración estructural particular para que sea efectivo. El absorbedor presentado aquí se sintonizará a un modo particular y rastreará ese modo si varía en frecuencia. El diseño del absorbedor consiste en un par de baldosas de titanato de zirconato de plomo (PZT) unidas a la estructura y derivadas por un circuito inductor-resistor. Esto produce una resonancia eléctrica que puede ajustarse al modo estructural deseado mediante un sistema de control simple. El absorbedor se demuestra experimentalmente en una viga en voladizo. Los experimentos incluyen una evaluación de la respuesta del absorbente a un cambio abrupto en los parámetros del sistema.

Impresión por chorro de tinta de pistas conductoras de oro [67]

Autores: Nur H. M., Song J. H., Evans J. R. G. y Edirisghe M. J.

Resumen

Propósito - El propósito de este documento es presentar una revisión exhaustiva de los estudios de investigación y actividades en la impresión por chorro de tinta de materiales conductores.

Diseño / metodología / enfoque: este documento proporciona una encuesta bibliográfica detallada de la investigación llevada a cabo en la impresión por chorro de tinta de materiales conductores.

Resultados: este artículo explica el proceso de impresión de inyección de tinta y los distintos tipos de tintas conductoras. Luego examina los diversos factores que afectan la calidad de interconexiones impresas por inyección de tinta, tales como parámetros de impresión, materiales y tratamientos de sustrato. Métodos de caracterización de la inyección de tinta el proceso de impresión y las propiedades eléctricas de los materiales conductores impresos también se presentan. Finalmente, las aplicaciones relevantes de esta tecnología son descritos.

Originalidad / valor: la impresión de inyección de tinta es actualmente una de las técnicas de escritura directa más baratas para la fabricación. El uso de esta técnica en electrónica la fabricación, donde se requieren interconexiones y otras características conductoras, es un área de creciente relevancia para los campos de la electrónica fabricación, embalaje y montaje. Por lo tanto, este documento de revisión sería de gran valor e interés para esta comunidad.

Post-pandeo termomecánico no lineal de la placa circular de FGM con imperfección geométrica [68]

Autores: Li, Shi-Rong; Zhang, Jing-Hua; Zhao, Yong-Gang

Resumen

Se presenta post-pandeo termomecánico no lineal de una placa circular de material funcionalmente graduado imperfecto (FGM), sometido tanto a carga mecánica como a un aumento de temperatura transversal no uniforme. Se supone que las propiedades del material de las placas de FGM se clasifican en la dirección del espesor de acuerdo con una distribución simple de la ley de potencia en términos de las fracciones de volumen de los constituyentes. Con base en la teoría de placas de von Kármán, se derivan ecuaciones de equilibrio que gobiernan una gran deformación axi-simétrica de la placa circular de FGM bajo cargas termomecánicas. En el análisis, se tienen en cuenta las imperfecciones geométricas de la placa. Mediante el uso de un método de disparo, las ecuaciones diferenciales ordinarias no lineales con condiciones de contorno inmovilizadas se resuelven numéricamente. Se obtienen respuestas para las respuestas termomecánicas no lineales post-pandeo de la placa de FGM. Se presentan ejemplos numéricos que se relacionan con los rendimientos de placas perfectas e imperfectas, homogéneas y graduadas. Se trazan las curvas características de la deformación posterior al pandeo de la placa circular imperfecta de FGM que varía con las cargas térmicas, los parámetros de imperfección y el índice de fracción de volumen. Y luego se discuten en detalle los efectos de los parámetros de carga, la constitución de los materiales y la imperfección geométrica de la placa en la deformación.

Resistencia al deslizamiento del calzado informal: implicaciones para caídas en adultos mayores [69]

Autores: Menz, HB; Lord, SR; McIntosh, AS

Resumen

Fondo: Una gran proporción de caídas en personas mayores se debe a resbalones. Las investigaciones previas de seguridad ocupacional sugieren que el calzado inadecuado puede contribuir a accidentes por deslizamiento; sin embargo, ningún estudio ha evaluado la resistencia al deslizamiento del calzado informal.

Objetivo: Evaluar la resistencia al deslizamiento de los diferentes tipos de calzado casual en un rango de superficies domésticas comunes.

Método: La resistencia al deslizamiento de los zapatos Oxford para caballero y de moda femenina con diferentes configuraciones de talón se determinó midiendo el coeficiente de fricción dinámico (DCoF) en contacto con el talón (en condiciones secas y húmedas) en una baldosa de baño, hormigón, suelo de vinilo y terra baldosas de cotta utilizando un aparato de placa de fuerza piezoeléctrica especialmente diseñado.

Resultados: El análisis de la varianza reveló efectos importantes de interacción entre el calzado, la superficie y la superficie del calzado. Los zapatos Oxford para hombres exhibieron valores promedio más altos de DCoF que los zapatos de moda para mujeres, sin embargo, ninguno de los zapatos podría considerarse seguro en superficies mojadas. La aplicación de un material de suela con textura no mejoró la resistencia al deslizamiento de ninguno de los zapatos en superficies mojadas.

Conclusión: La geometría del talón influye en la resistencia al deslizamiento del calzado informal en superficies domésticas comunes. El rendimiento subóptimo de todos los calzados de prueba en superficies mojadas sugiere que se requiere un estándar de seguridad para calzado informal para ayudar en el desarrollo de calzado seguro para personas mayores.

Modelado de cerámicas piezoeléctricas multicapa utilizando análisis de elementos finitos [70]

Autores: Goldberg, RL; Jurgens, MJ; Mills, DM; Henriquez, CS; Vaughan, D; Smith, SW

Resumen

Los modelos convencionales unidimensionales proporcionan resultados precisos cuando se compara el rendimiento de cerámica de varias capas con los transductores de capa única. Sin embargo, estos modelos no son precisos cuando se comparan las simulaciones directamente con las mediciones. Debido a que las cerámicas multicapa tienen una estructura compleja, se necesita un modelo 3-D, como el análisis de elementos finitos, para realizar simulaciones precisas.

Modelamos cuatro matrices que fueron fabricadas previamente: una sola capa y multicapa de 1 MHz, elemento de matriz 2-D, y una sola capa y multicapa de 2.25 MHz, elemento de matriz 1.5-D que puede enfocar y dirigir en acimut pero solo dirigir en la elevación dimensión. Comparamos los diagramas de impedancia simulada y medida para cada transductor. Los diagramas de análisis de elementos finitos predijeron con precisión la impedancia para cada modo de vibración. Por otro lado, el modelo de línea de transmisión

KLM unidimensional podría simular solo las vibraciones del modo de espesor y los resultados fueron inexactos en comparación con las mediciones. También simulamos la presión de salida de transmisión para los arreglos de 2.25 MHz y comparamos los resultados con las mediciones. Los gráficos simulados de presión frente al tiempo y sus espectros fueron precisos cuando se compararon con las mediciones. Finalmente, obtuvimos una serie de imágenes que muestran las vibraciones de respuesta de impulso para los arreglos de 2.25 MHz. Estas animaciones muestran los modos de vibración en la estructura compleja de cerámica multicapa. Las mediciones no estaban disponibles para confirmar las animaciones. Nuestros resultados muestran que el análisis de elementos finitos en tres dimensiones es una herramienta valiosa para predecir el rendimiento de los transductores multicapa.

11 Bibliografía

- [1] U. P. d. Madrid, «Noticias de la Ciencia,» Amazings, 25 04 2017. [En línea]. Available: <https://noticiasdela ciencia.com/art/23990/sensores-piezo electricos-para-aumentar-la-seguridad-en-carreteras>. [Último acceso: 20 10 2018].
- [2] D. J. I. Alper Erturk, Piezoelectric Energy Harvesting, Georgia, USA: Wiley, 2011.
- [3] Ministerio de ciencia e innovación, Gobierno de España , *Materiales piezoeléctricos*, Madrid , 2010.
- [4] «Rumbo Energético,» Rumbo Energético, 11 12 2017. [En línea]. Available: <http://rumboenergetico.com/balance-energetico-nacional-y-las-renovables/>. [Último acceso: 03 11 2018].
- [5] B. Petroleum, «BP Statistical Review of Word Energy,» BP, Londres, 2017.
- [6] Educ.ar, «Energías de mi país,» Educ.ar e YPF, 2012. [En línea]. Available: energiasdemipais.educ.ar/la-matriz-energetica-argentina-y-su-evolucion-en-las-ultimas-decadas/. [Último acceso: 15 04 2018].
- [7] CAMMESA, «Informa Anual CAMMESA 2017,» Buenos Aires, 2017.
- [8] B. I. d. Desarrollo, «Nota técnica Sectorial Energía Eléctrica,» Argentina, 2015.
- [9] M. d. M. y. Energía, «Informe Estadístico Anual,» Argentina, 2016.
- [10] R. Kozulj, «La crisis energética de la Argentina: orígenes y perspectivas».
- [11] B. Petroleum, «BP Statistical Review of Word Energy 2018,» BP, Londres, 2018.
- [12] «Mercado,» 03 03 2016. [En línea]. Available: <http://www.mercado.com.ar/notas/para-entender/8020858/cmo-fue-que-dejamos-de-exportar-petroleo-y-gas-en-la-argentina>. [Último acceso: 15 04 2018].
- [13] «Fortuna Web,» 04 11 2014. [En línea]. Available: <http://fortunaweb.com.ar/20141104151335lacrisisenergeticaargentinacontinua/>. [Último acceso: 10 11 2016].
- [14] OPEP, «Statista.com,» 01 09 2018. [En línea]. Available: <https://es.statista.com/estadisticas/635114/precio-medio-del-crudo-fijado-por-la-opec/>. [Último acceso: 03 11 2018].
- [15] H. M. Garrido, «20 minutos,» 26 01 2016. [En línea]. Available: <https://www.20minutos.es/noticia/2653191/0/causas-efectos/crisis-petroleo-barato/perjudicados-beneficiados/>. [Último acceso: 16 04 2018].

- [16] J. C. A. A. E. D. R. E. A. A. G. J. L. D. G. M. y. R. A. O. Emilio Apud, *CONSENSOS ENERGÉTICOS 2015 La política para salir de la crisis energética*, Buenos Aires, Argentina: Instituto Argentino de la Energía General Mosconi, 2015.
- [17] M. C. y. F. M. Omar Díaz, *Evolución de las energías renovables en Argentina*, Buenos Aires: KPMG International Cooperative, 2018.
- [18] «www.minem.gob.ar,» Ministerio de Energía y Minería , [En línea]. Available: <https://www.minem.gob.ar/www/833/25897/proyectos-adjudicados-del-programa-renovar>. [Último acceso: 20 10 2018].
- [19] I. Romero, «Google Maps,» MINEM, [En línea]. Available: <https://www.google.com/maps/d/viewer?mid=1UysUb8FChApZinkp6a30jq6G08-IBnPM&ll=-39.54123521034036%2C-55.57379953697182&z=4>. [Último acceso: 23 10 2018].
- [20] D. d. e. d. EEUU, «energy.gov,» 2005. [En línea]. Available: www.energy.gov. [Último acceso: 14 10 18].
- [21] A. d. p. d. m. a. d. EEUU, «epa.gov,» 2005. [En línea]. Available: www.epa.gov. [Último acceso: 14 10 2018].
- [22] M. V. Rodriguez, «Modelización de Materiales Piezoelectricos como generadores de energía,» *Cerámica y Vidrio*, vol. 51, 2012.
- [23] Piezo systems, INC, «<http://www.piezo.com/>,» 1994. [En línea]. Available: <http://www.piezo.com/tech4history.html>. [Último acceso: 2016].
- [24] Web of Science, «<http://apps.webofknowledge.com>,» Thomson Reuters, 2016. [En línea]. Available: http://apps.webofknowledge.com/WOS_GeneralSearch_input.do?product=WOS&search_mode=GeneralSearch&SID=Z2w94stVaAayVP8e8jy&preferencesSaved=. [Último acceso: 2016].
- [25] I. A. M. F. Solarte, *Preparación de Materiales Ferroeléctricos Libres de Plomo*, Rosario, Argentina, 20013.
- [26] W. D. C. Jr, *Introducción a la Ciencia e Ingeniería de los Materiales*, Salt Lake City, Utha, USA: Reverté.
- [27] P. S. Ramos, *Estudio de la ferroelectricidad en láminas delgadas de titanato de plomo modificados, obtenidos por sol-gel*, 1997.
- [28] M. E. L. y. A. M. Glass, *Principles and applications of ferroelectrics and related material*, Oxford England, 1977.
- [29] K. L. y. W. W. W. Heywang, *Piezoelectricity: Elolution and future of a technology*, Springer, 2008.

- [30] P. Technologies, *Piezoelectric material specifications table*, 2012.
- [31] F. d. C. P. T. Technlogies, «TRS Technologies INC,» [En línea]. Available: www.trstechnologies.com/materials/piezoceramics.php.
- [32] Piezo Technology, «Piezo Technology,» 2014. [En línea]. Available: <https://www.piceramic.com/en/piezo-technology/>. [Último acceso: 12 10 2016].
- [33] L. H. Aguilera, «La basura electrónica y la contaminación ambiental».
- [34] A. d. p. a. d. EEUU, «EPA en español |,» US EPA, [En línea]. Available: <https://espanol.epa.gov/espanol/plomo>. [Último acceso: 11 11 2018].
- [35] R. B. mundo, «BBC mundo,» 04 agosto 2010. [En línea]. Available: http://www.bbc.com/mundo/ciencia_tecnologia/2010/08/100804_europa_exporta_basura_electronica_lh.shtml. [Último acceso: 30 marzo 2018].
- [36] F. G. Melero, «Principios de Piezoelectricidad,» *Innovacion y experiencias educativas*, nº 28, 2010.
- [37] I. A. Gonzalez, «Materiales Piezoelectricos y efectos piezoelectricos,» Universidad Tecnologica Nacional, Facultad Regional, Mendoza, 2009.
- [38] P. B. M. P. L. M. y. j. R. J. M. Caballero, *Ultrasonidos extracorpóreos de alta intensidad: Alternativa terapéutica del tumor renal*, Barcelona, España, 2010.
- [39] PHILIPS, Piezoelectric Ceramics, Holanda: Electronic components and materials division, 1968.
- [40] American Piezo, «American Piezo,» 2014. [En línea]. Available: www.americanpiezo.com. [Último acceso: 12 10 2016].
- [41] L. Kenball-Cook, «Pavegen,» 2009. [En línea]. Available: www.pavegen.com. [Último acceso: 2016].
- [42] ATCP Brasil, Soluciones piezoeléctricas, «Materiales Piezoeléctricos,» Sao Carlos, 2004.
- [43] B. L. G. J. K. K. D. S. H. a. D. J. I. Jina Kim, *Electrical Modeling of Piezoelectric Ceramics*, Atlanta, 2008.
- [44] C. H. C. B. E. C. A. C. F. G. A. G. M. Feldmann, *Design of floor structures for human*, Eurocodes, 2009.
- [45] B. arquitecto, «Belatchew,» [En línea]. Available: www.belatchew.com/en/strawscraper/. [Último acceso: 2016].
- [46] Google, «Google Imagenes,» [En línea]. Available: www.google.com.ar/imghp.
- [47] A. Hoffmann, «The Jerusalem Post,» 20 Agosto 2017. [En línea]. Available: <https://www.jpost.com/Business-and-Innovation/Tech/Green-dream-start-up-takes->

- Technion-to-court-over-deviuous-behavior-502952. [Último acceso: 07 Noviembre 2018].
- [48] Innowattech, «Innowattech,» [En línea]. Available: www.innowattech.co.il. [Último acceso: 2016].
- [49] Pavegen, *Technical guide*, Londres, 2018.
- [50] M. Y. M. G. M. E. A. M. Elhalwagy, *Feasibility Study for Using Piezoelectric Energy Harvesting Floor in Buildings Interior Spaces*, España, 2017.
- [51] M. P. D. Lema, «Generar Energía con las carreteras,» *Energética XXI*, nº 146, pp. 84-86, 2014.
- [52] J. S. J. L. y. Z. L. W. Xudong Wang, *Direct-current nanogenerator driven by ultrasonic waves*, 2007.
- [53] M. J. T. y. N. M. W. S. P. Beeby, *Energy harvesting vibration sources for microsystems applications*, Southampton SO17 1BJ, Reino Unido, 2006.
- [54] S. R. A. y. H. A. Sodano, *A review of power harvesting using piezoelectric materials (2003-2006)*, 2007.
- [55] X. W. y. Z. L. W. Yong Qin, *Microfibre-nanowire hybrid structure for energy scavenging*, 2008.
- [56] C. M. L. y. Z. L. Wang, *Functional nanowires*, 2007.
- [57] Y. Q. C. X. Y. W. R. Y. y. Z. L. W. Sheng Xu, *Self-powered nanowire devices*, 2010.
- [58] H. F. H. A. C. B. y. G. A. L. Geoffrey K. Ottman, *Adaptive piezoelectric energy harvesting circuit for wireless remote power supply*, 2002.
- [59] Y. T. y. S. P. Hyunuk Kim, *Piezoelectric Energy Harvesting*, 2009.
- [60] R. S. J. J. c. y. S. K. Y.B. Jeon, *MEMS power generator with transverse mode thin film PZT*, 2005.
- [61] V. H. T. J. W. Y.-K. F. y. L. L. Chieh Chang, *Direct-Write Piezoelectric Polymeric Nanogenerator with High Energy Conversion Efficiency*, 2010.
- [62] E. R. y. D. N. F. Frank Caruso, *Orientalional aspects of antibody immobilization and immunological activity on quartz crystal microbalance electrodes*, Australia, 1995.
- [63] J. E. M. y. T. Michaels, *Guided wave signal processing and image fusion for in situ damage localization in plates*, 2007.
- [64] S. y. G. E. K. Yiqing Du, 2002.
- [65] D. X. M. C. Z. Z. y. Y. H. Zeng Tao, *Effects of pore shape and porosity on the properties of porous pzt 95/5 ceramics*, 2007.

- [66] H. J. y. S. T. F., *A Self-Tuning Piezoelectric Vibration Absorber*, 1994.
- [67] S. J. H. E. J. R. G. y. E. M. J. Nur H. M., *Ink-jet printing of gold conductive tracks*, 2002.
- [68] S.-R. Li, J.-H. Zhang y Y.-G. Zhao, *Nonlinear thermomechanical post-buckling of circular FGM plate with geometric imperfection*, 2007.
- [69] H. Menz, S. Lord y A. McIntosh, *Slip resistance of casual footwear: Implications for falls in older adults*, 2001.
- [70] R. Goldberg, M. Jurgens, D. Mills, C. Henriquez, D. Vaughan y S. Smith, *Modeling of piezoelectric multilayer ceramics using finite element analysis*, 1997.
- [71] L. Lascano, *Revista de divulgación científica de Física y Matemática FISMAT*, vol. 13.
- [72] T. S. Z. J. M. y. F. B. L.B. Kong, «Progress in synthesis of ferroelectric ceramic materials via high-energy mechanochemical technique,» vol. 3, pp. 207-322, 2008.