



UNIVERSIDAD DE TALCA

INSTITUTO INTERDISCIPLINARIO PARA LA INNOVACIÓN
MAGÍSTER EN GESTIÓN TECNOLÓGICA

***EVALUACIÓN TÉCNICO-ECONÓMICA DEL USO DE ALFOMBRAS
PEATONALES Y REDUCTORES DE VELOCIDAD CON PIEZOELÉCTRICOS EN
CENTROS COMERCIALES PARA LA GENERACIÓN DE ELECTRICIDAD***

DARIÁN RÓBINSON MARTÍNEZ DÍAZ

PROFESOR GUÍA: MAURICIO ARENAS SALINAS

PROFESOR COGUÍA: MARCO RIVERA ABARCA

PROFESOR INFORMANTE: RICARDO BAETTIG PALMA

CURICÓ - CHILE

2022

CONSTANCIA

La Dirección del Sistema de Bibliotecas a través de su unidad de procesos técnicos certifica que el autor del siguiente trabajo de titulación ha firmado su autorización para la reproducción en forma total o parcial e ilimitada del mismo.



Talca, 2022

TÍTULO

Evaluación técnico-económica del uso de alfombras peatonales y reductores de velocidad con piezoeléctricos en centros comerciales para la generación de electricidad.

TITLE

Technical-economic evaluation of the use of pedestrian mats and piezoelectric speed reducers in shopping centers for the generation of electricity.

RESUMEN

Los cambios globales en los últimos años han impulsado fuertemente la búsqueda de nuevas fuentes de generación de energía y las técnicas con bajo impacto ambiental. Este viaje en búsqueda de nuevas fuentes ha llevado a considerar la utilización de materiales no convencionales en el área de generación de energía.

Las nuevas formas de generación deben tener un proceso de maduración consolidación y masificación, pero sin ninguna duda, pueden en el futuro cubrir la demanda de energía que presenta la sociedad. En este sentido, se considera el uso de materiales piezoeléctricos como el elemento principal para la generación de energía eléctrica mediante la presión que se genera sobre los materiales. En esta tesis se analiza la implementación de piezoeléctricos en una alfombra de caucho para tránsito peatonal y en reductores de velocidad para la circulación de los autos en lugares de alta afluencia como el centro comercial Mall Curicó, concluyendo tras analizar los componentes piezoeléctricos la factibilidad técnica de su implementación y encontrando que los dispositivos usados en alfombras muestran un buen desempeño y resultados relevantes cuando se utilizan aquellos de mayor corriente máxima nominal. Por su parte, los reductores de velocidad muestran un retorno bajo 1% en consideración a la demanda energética del Mall Curicó.

ABSTRACT

Global changes in recent years have strongly driven the search for new sources of energy generation and techniques with low environmental impact. This journey in search of new sources has led to consider the use of non-conventional materials in the area of power generation.

The new forms of generation must have a process of maturation, consolidation and massification, but without any doubt, they can in the future cover the demand for energy that society presents. In this sense, the use of piezoelectric materials is considered as the main element for the generation of electrical energy through the pressure generated on the materials. This thesis analyzes the implementation of piezoelectrics in a rubber mat for pedestrian traffic and in speed reducers for the circulation of cars in places of high affluence such as the Mall Curicó shopping center, concluding after analyzing the piezoelectric components the technical feasibility of its implementation and finding that the devices used in carpets show a good performance and relevant results when those with higher rated maximum current are used. For their part, the speed reducers show a return of less than 1% in consideration of the energy demand of Mall Curicó.

PALABRAS CLAVES

- Energía eléctrica, energía renovable, costos de la energía, piezoeléctrico, generación de energía.

KEYWORDS

- Electrical energy, renewable energy, energy costs, piezoelectric, power generation.

ÍNDICE CONTENIDO

1.	INTRODUCCIÓN	7
2.	OBJETIVOS	10
2.1	OBJETIVO GENERAL.....	10
2.2	OBJETIVO ESPECÍFICOS.....	10
3.	ESTADO DEL ARTE	11
4.	DISEÑO METODOLÓGICO	17
4.1	FASE I - LEVANTAMIENTO DE INFORMACIÓN PRIMARIA Y SECUNDARIA	17
4.2	FASE II - ESTANDARIZACIÓN Y ESTIMACIÓN DE GENERACIÓN DE ENERGÍA PIEZOELÉCTRICA	17
4.3	FASE III – DETERMINACIÓN DE RUTAS, AFOROS Y PEAK DE GENERACIÓN, EN UN CENTRO COMERCIAL	18
4.4	FASE IV – EVALUACIÓN TÉCNICA Y ECONÓMICA DEL USO DE ALFOMBRAS PIEZOELÉCTRICAS PEATONALES Y LOS REDUCTORES DE VELOCIDAD, EN LOS CENTROS COMERCIALES	18
4.5	FASE V - DISCUSIÓN DE RESULTADOS	18
4.6	FASE VI - FORMULACIÓN DE CONCLUSIONES Y APORTES.....	18
5.	RESULTADOS.....	19
5.1	ESTANDARIZACIÓN Y ESTIMACIÓN DE GENERACIÓN DE ENERGÍA	19
5.1.1	ALFOMBRAS PIEZOELÉCTRICAS.....	19
5.1.2	REDUCTORES DE VELOCIDAD	26
5.2	RUTAS Y AFOROS	33
5.2.1	EFFECTO DE LAS RUTAS Y AFOROS EN LAS ALFOMBRAS PIEZOELÉCTRICAS	35
5.2.2	EFFECTO DE LAS RUTAS Y AFOROS EN LOS REDUCTORES DE VELOCIDAD	38
5.3	EVALUACIÓN TÉCNICA DE LAS ALFOMBRAS PEATONAL Y REDUCTORES DE VELOCIDAD	41
5.4	EVALUACIÓN ECONÓMICA DE LAS ALFOMBRAS PEATONAL Y REDUCTORES DE VELOCIDAD	43
6.	CONCLUSIONES.....	46
7.	BIBLIOGRAFÍA CITADA.....	48

ÍNDICE GRÁFICO

GRÁFICO 1: NÚMERO DE PATENTES A LO LARGO DEL TIEMPO, SOBRE GENERACIÓN DE ENERGIA RENOVABLE	11
GRÁFICO 2: VOLTAJE VPP GENERADO EN UN PIEZOELECTRICO.....	21
GRÁFICO 3: CORRIENTE GENERADA EN UN PIEZOELECTRICO	22
GRÁFICO 4: VOLTAJE VPP EN UN PLANCHA CON 81 PIEZOELÉCTRICO	24
GRÁFICO 5: CORRIENTE EN UN PLANCHA CON 81 PIEZOELÉCTRICO	25
GRÁFICO 6: VENTAS DE VEHÍCULOS POR SEGMENTO	27
GRÁFICO 7: CONSUMO ENERGÉTICO DEL CENTRO COMERCIAL MALL VALLE CURICÓ ENTRE SEPTIEMBRE DEL 2020 A FEBRERO DEL 2021.....	43

ÍNDICE TABLAS

TABLA 1: RESUMEN DE VOLTAJE VPP EN UN PIEZOELECTRICO	22
TABLA 2: CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DEL PIEZOELÉCTRICO DE 27MM ECONÓMICO	24
TABLA 3: CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DEL PIEZOELÉCTRICO DE 25MM MAYOR CALIDAD ..	26
TABLA 4: ELEMENTOS ECONÓMICOS SEGÚN PROPUESTA.....	44

ÍNDICE ILUSTRACIÓN

ILUSTRACIÓN 1: PIEZOELÉCTRICO CERÁMICO DE 27MM DE DIÁMETRO	19
ILUSTRACIÓN 2: OSCILOSCOPIO DIGITAL INTRUSTAR ISDS220B	20
ILUSTRACIÓN 3: ONDA DE TENSIÓN GENÉRICA.....	21
ILUSTRACIÓN 4: PALMETA CAUCHO GRIS.....	23
ILUSTRACIÓN 5: ONDA DE TENSIÓN GENÉRICA.....	28
ILUSTRACIÓN 6: REDUCTOR DE VELOCIDAD	29
ILUSTRACIÓN 7: REDUCTOR DE VELOCIDAD CON PIEZOELÉCTRICOS	30
ILUSTRACIÓN 8: PROPIEDADES DEL PIEZOCERÁMICO NCE51	31
ILUSTRACIÓN 9: DISTRIBUCIÓN CASO A.....	32
ILUSTRACIÓN 10: PLANO MALL VALLE CURICO INGRESOS VEHICULARES	34
ILUSTRACIÓN 11: PLANO MALL VALLE CURICO	35
ILUSTRACIÓN 12: BATERÍA DE CICLO PROFUNDO, ROSEN SOLAR.....	42

1. INTRODUCCIÓN

La diversificación de la matriz energética y la búsqueda de nuevas fuentes y técnicas para la generación de energías limpias, se han impulsado por el hecho que las energías renovables han presentado con los años un descenso de su costo correspondiente a los kilowatts-hora (kWh) de generación versus otros procesos más convencionales. Esto ha permitido impulsar fuertemente la búsqueda de fuentes alternativas y sostenibles de generación de energía. La innovación tecnológica en los últimos años ha tomado un rol importante en la búsqueda de nuevas soluciones de generación de energía, lo que se ve reflejado en los distintos lineamientos presentes en instrumentos de financiamiento de investigaciones básicas, aplicadas y de desarrollo experimental (CEP, 2017).

En el año 2018, Chile presentó una demanda en el sistema eléctrico nacional de 10.529 MW, mientras en el 2008 la demanda eléctrica fue solamente de 154 MW lo que significó un crecimiento de la demanda eléctrica del 71% en tan solo 10 años, siendo un dato que es abordado con importancia en la elaboración de los planes y estrategias nacionales del Ministerio de Energía (MinEnergía, 2022).

El cambio climático ha provocado que, en la actualidad, la generación de energía sea uno de los temas en la opinión pública y en las agendas de política pública. En 2022 el informe del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático señalaba que los países deben generar los diversos cambios internos con urgencia, en términos políticos legales para reducir los niveles de emisión gases de efecto invernadero, pero esto no será suficiente para evitar que el calentamiento global sobrepase los 1,5°C (IPCC, 2022).

Por otra parte, de acuerdo con el Bloomberg New Energy Finance, Chile en el año 2014 ocupaba el quinto lugar en proyectos de energías basadas en paneles solares, luego en el año 2015 sube al primer lugar a nivel latinoamericano y segundo a nivel mundial con una inversión de 18,5 mil millones de dólares en esta materia, siendo sólo superados por China. En el año 2021 Chile consolida su liderazgo a nivel latinoamericano y logra la posición número uno a nivel mundial (BNEF, 2021), lo que se debe a las diversas políticas gubernamentales, tales como la ley 20/25 que buscaba que el año 2025 el 20% de la matriz energética de Chile sean energías renovables no

convencionales (Ley N°20.698, 2013) y que fue logrado el año 2019 llegando a 23% (Trictec, 2019).

Chile es considerado a nivel mundial como un foco del desarrollo de energías renovables y de nuevas tecnologías verdes, por su riqueza en fuentes renovables como la tierra, el mar, el sol y el desarrollo de nuevas fuentes. ENEL marcará un hito este año 2022 por que cerrará Bocamina II, 18 años antes de lo estipulado, logro que corresponde al departamento de investigación, desarrollo e innovación, como también su desarrollo con ENAP de utilización de energía geotérmica (ENEL, 2021).

La gran evolución que ha presentado Chile en el corto plazo, en relación con la inversión de nuevas fuentes de energías renovables no convencionales trata de responder a las nuevas políticas de la Agenda de Energía. En donde el gobierno, crea la estrategia Energía 2050, con detalles de hitos de corto, mediano y largo plazo como un modelo eficiente y competitivo para una conversión total del modelo energético de Chile (MinEnergía, 2022).

Lo anterior también se enmarca como respuesta, de las demandas sociales, geográficas, requerimientos y propuestas internacionales, entre otros puntos, es que nacen las políticas de Chile difundidas por el Ministerio de Energía, que buscan con urgencia explorar, descubrir e implementar nuevas formas de generación de energía limpia, dado que es necesario alcanzar el 70% de la generación a través de fuentes renovables según lo estipulado en la política energética de Chile, denominada Energía 2050. En la actualidad el 71% de la generación total de energía en Chile, está basada exclusivamente de carbón y petróleo, Chile debe importar el 90% de los requerimientos de fuentes fósiles para poder cubrir su demanda, lo que muestra un alto grado de dependencia externa (MinEnergía, 2022).

La mencionada estrategia Energía 2050 define y utiliza los siguientes pilares como ejes fundamentales:

- 1.- Seguridad, calidad y suministro
- 2.- Energía como motor de desarrollo
- 3.- Energía compatible con el medio ambiente
- 4.- Eficiencia y educación energética

En esta tesis se estudia la posibilidad de aprovechar la energía mecánica producida por las personas al caminar y el paso de vehículos sobre reductores de velocidad, ya que ejercen presión en la superficie sobre la que se desplazan que contendrá los diversos piezoeléctricos. Además, se tratará de responder algunas preguntas como:

- ¿Qué opciones basadas en piezoeléctricos permiten una mayor generación de energía que impacte a los centros comerciales?
- ¿Qué lugares de alto flujo se disponen en los centros comerciales para implementar la tecnología de alfombras piezoeléctricas o reductores de velocidad?
- ¿Qué impacto se podría generar al implementar energía basada en alfombras piezoeléctricas en los centros comerciales?

Con el uso de esta tecnología, el ser humano se convierte en un elemento activo, que no utiliza un esfuerzo distinto al que requiere para su desplazamiento de un lugar a otro. La mayoría de las actividades que son realizadas por las personas se encuentran asociadas a un caminar de baja intensidad y bajo este sistema, se aprovecharía esa energía para transformarla en electricidad.

El presente proyecto de titulación desarrolla una propuesta basada en materiales piezoeléctricos, para la generación y recolección de energía, que se pueden aplicar en soluciones vehiculares y peatonales, particularmente en reductores de velocidad automovilísticos y en alfombras peatonales, en locaciones de alta concurrencia, satisfaciendo la generación de energías limpias y sostenibles.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo General

Evaluar técnica y económicamente el uso de alfombras piezoeléctricas peatonales y reductores de velocidad en centros comerciales para la generación de electricidad.

2.2 Objetivo Específicos

Los objetivos específicos involucrados en la tesis son:

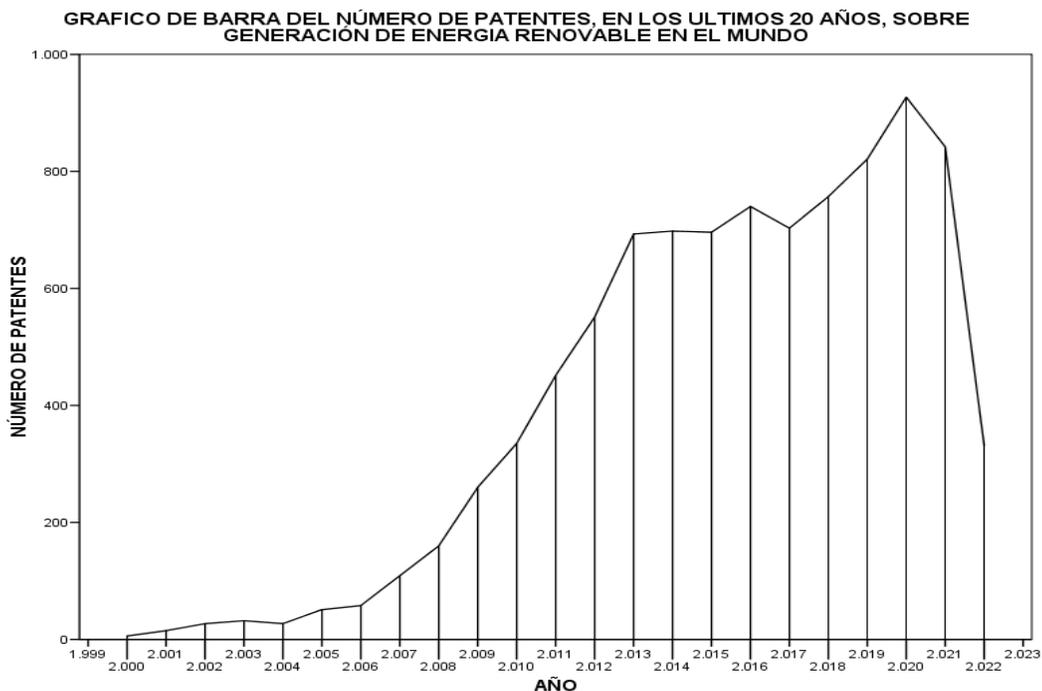
1. Cuantificar la capacidad de generación eléctrica de las alfombras piezoeléctricas peatonales y de los reductores de velocidad, para su uso en centros comerciales.
2. Determinar las rutas y los aforos en conjunto con los peak de generación, en centros comerciales.
3. Evaluar técnica y económicamente la utilización de las alfombras piezoeléctricas peatonales y los reductores de velocidad, para un centro comercial.

3. ESTADO DEL ARTE

La sociedad se encuentra desarrollando diversas formas de generación de energía buscando disminuir su impacto ambiental. Chile se ha comprometido a reducir en un 30% sus emisiones hacia 2030 y que el 30% de la energía inyectada al sistema a 2030 sea renovable (MINREL, 2015).

Todo esto, se enmarca en los grandes avances en la carrera del conocimiento e innovación, al realizar una búsqueda en la plataforma de base de datos de patentes Patentinspiration, con la ecuación de *generation and energy and renewable* se logró visualizar un incremento fuerte de las patentes asociados a la generación de energía renovables y publicaciones de descubrimientos de nuevas características de materiales que reemplazan a los tradicionales alcanzando 12.132 patentes, de los cuales 87 son con respecto de la utilización de los piezoeléctrico en la generación de energía renovables, donde China consta de 54 patentes, otorgándole el primer puesto a nivel mundial en dicha categoría búsqueda (Patentinspiration, 2022).

GRÁFICO 1: NÚMERO DE PATENTES A LO LARGO DEL TIEMPO, SOBRE GENERACIÓN DE ENERGÍA RENOVABLE



Fuente: Patentinspiration – keywords “*generation and energy and renewable*”

Fuente: *Elaboración propia*

Uno de los elementos más importantes a utilizar en el proyecto propuesto en la tesis, son los materiales piezoeléctricos. En 1880, los hermanos Pierre y Jacques Curie descubrieron que si se les aplica una presión se crean pequeños arcos eléctricos, que es definido como el efecto piezoeléctrico, obteniéndose una energía eléctrica a partir de una carga mecánica (Mokry, 2016).

Las alternativas presentes en el mercado poseen características invasivas y utilizan sólo sistemas mecánicos, con piolas o sistemas de paneles, que no han logrado llegar con éxito al mercado por sus limitaciones y grandes requerimientos funcionales e invasivos. En México se ha propuesto un sistema que *“integraría una rampa-escalón a cinco centímetros sobre el nivel del concreto, que al recibir el impacto provocado por el peso y la inercia del vehículo, podría generar electricidad para iluminar hogares”* (Macías, 2014). También existen otros prototipos en investigación y desarrollo que son financiados por el gobierno de Estados Unidos y que enfrentan el desafío de hacer más resistente las placas solares, para ser instaladas en las carreteras de alto y mediano flujo.

Las técnicas de recolección de energía piezoeléctrica enfocadas para uso en carreteras buscan convertir la energía de vibración mecánica del pavimento en energía eléctrica a través del efecto piezoeléctrico. La electricidad generada de las técnicas de recolección de energía piezoeléctrica para pavimento se suministra directamente a las fuentes de energía circundantes, como las instalaciones auxiliares de la vía, o se almacena acumulativamente para alimentar vehículos eléctricos. Actualmente, los enfoques técnicos de los pavimentos de energía piezoeléctrica se dividen principalmente en dos tipos de la siguiente manera: la tecnología de pavimento de energía basada en dispositivo de energía y la tecnología de pavimento de energía basada en recolector de energía enterrado. En el primero de los casos, se utiliza tecnología que absorbe energía desde la parte superficial de la carretera, mientras que el segundo sistema absorbe energía mediante un sistema bajo tierra (Cardozo & Tamayo , 2017).

Hay una patente que utiliza las carreteras hechas de hormigón asfáltico, para iluminar el borde de la carretera, mediante dispositivos piezoeléctricas incrustada en la capa estructural de la carretera y conectada a la recolección un dispositivo recolector de energía para su iluminación, es un patente activa con fecha de caducidad el 4 de enero del 2030 (Wu et al, 2010).

Existen diversos proyectos aplicados al desplazamiento del ser humano en su habilidad de marcha, en los que, gracias al efecto piezoeléctrico, se aprovecha lo que hasta ahora no era lógico de pensar, es decir la posibilidad de poder disponer de lo que eran pérdidas energéticas. Por ejemplo, existen *“paneles que se iluminan al paso de los peatones, zapatos con dispositivos capaces de generar electricidad para cargar el teléfono móvil o incluso una pista de baile piezoeléctricas, que consiguen aprovechar la energía de las personas que se encuentran bailando sobre ella”* (Malmcrona, 2018).

Existe un proyecto denominado Pavegen, que, a través de las pisadas de los transeúntes sobre unas baldosas, logra aprovechar la energía generada por las pisadas del ser humano, destinando la energía para usos en la iluminación de pasillos, vía pública, etc. En la actualidad lleva más de 30 proyectos de carácter fijo y temporales en Alemania y en otros países de Europa, constando con el apoyo de la compañía siemens para impulsar con mayor fuerza la tecnología (Pavegen Systems Ltd, 2022).

Otra propuesta tecnológica que aprovecha el flujo de rodado vehicular es denominada Electro Kinetic Road Ramp, que corresponde a una rampa colocada sobre las carreteras con velocidades que oscilan entre los 5 a 90 kilómetros/hora, permitiendo recuperar energía mediante las vibraciones de los vehículos al circular por la rampa bajo los principios de trabajo de las centrales hidroeléctricas (Zarkeshev & Csiszar, 2019).

Una patente tecnología bastante particular e inusual en el uso piezoeléctricos, que es divulgada en el informe de tecnologías de dominio público por parte de INAPI, corresponde a una boya capaz de generar su propia energía, utilizando oleaje para generar presiones variables en un material piezoeléctrico sintetizado y así proveer de energía a sonares (INAPI, 2019).

También los piezoeléctricos se están implementado en la obtención de energía eólica, por la empresa Vortex Bladeless, que utilizan el efecto piezoeléctrico por la resonancia aeroelástica, transformando la energía eólica con el uso de aerogeneradores sin aspas, logrando más de 300W según lo expuesto en la patente WO2012017106A1 (Yañéz, 2010).

En el ámbito de la investigación se analiza el proceso de carga de un vehículo en un transductor piezoeléctrico y se establecen las principales variables que afectan los resultados de energía, como es el tamaño de material piezoeléctrico, la carga y velocidad del vehículo. Además, que se debe contemplar su fragilidad y no se pueden incrustar directamente en el pavimento; por lo tanto, para utilizarlos en la generación de energía deben encapsularse (Wang et al, 2019).

Otro gran objetivo en los estudios existentes corresponde a evaluar la producción de energía y el comportamiento a posibles fatigas mediante pruebas de laboratorio y simulación numérica. Evaluando un transductor Bridge con polos, que es una placa cerámica cuadrada con siete secciones de celdas de polos horizontales, envuelta en su cara superior e inferior por dos placas de acero recocido de 0,6 mm con una característica de cuando se aplica la fuerza, está será paralela a la dirección polarizada permitiendo duplicar coeficiente piezoeléctrico, en comparación a la fuerza aplicada de forma perpendicular, el que se probó con un recolector de energía con múltiples transductores apilados bajo eventos de carga cíclica y de pulso único, aumentando la vida útil de los transductores (Jasim et al, 2018).

Algunos modelos o procesos de generación de energía eléctrica, que utilizan el transitar de los vehículos han presentado gran diversidad de resultados, que son considerados muy bajos y otros más razonables en relación con la inversión y la electricidad que se pudiese generar, para ser fuente de alimentación. Muchos de los modelos han coincidido y determinado que las condiciones de tráfico, el peso y la alta velocidad que se desplazan los automóviles, pueden aumentar considerablemente la generación eléctrica con los piezoeléctricos.

En un estudio preliminar realizado en China, se utilizó la técnica de energía piezoeléctrica del pavimento, el que consiste en utilizar matrices

piezoeléctricas incrustadas en la carretera y que fueron puestos a prueba en la autopista Ma-Zhao, en uno de los seis carriles abarcando 50 metros lineales, donde se analizó el desempeño del sistema con una SUV Toyota Highlander que tiene un peso de 1800 kilos con una carga de 4,5 kN por eje, a una velocidad de 20 km/h, 40 km/h, 60km/h y 80 km/h. Logrando voltajes que oscilaron según la velocidad entre los 250 V y 400 V, lo que fue considerado un excelente desempeño en condiciones reales por parte del equipo investigador (Yang et al, 2018).

Respecto a otros sistemas de generación eléctrica con características de enterrados, también llamados procesos de *Energy Harvesting* bajo tierra o colectores de energía bajo tierra, estipulan que con una velocidad de 62 km/h de un auto sedan – berlinga de unos 1.400 kilos, que es simulado en un plataforma vibratoria se produce aproximadamente una vibración a 14 Hz al instante que la rueda sobrepasa la zona, lo que permite establecer que entre mayor sea el rango de captación del piezoeléctrico mejor es el rendimiento del sistema y establece que se logra captar energía no solamente por vibración, sino también por el impacto generado al momento de pasar por la zona (Jiménez et al, 2015).

Por otra parte, en los últimos 13 años numerosos estudios de entornos viales, ya sea tanto de las carreteras como en los ferrocarriles, permitieron a la empresa Innowattech, generar diversos prototipos y afirmar que son capaces de generar 200 kWh en un kilómetro de carretera de una sola vía, bajo el contexto de un flujo vehicular de 600 autos por cada hora, destacando por el uso de los piezoeléctricos (Martínez & Muñoz, 2019).

Otra propuesta denominada Speed Bump Power Generator SBPG que busca la transformación de la energía mecánica en energía eléctrica utilizando el tráfico de vehículos, que permite la conversión de la energía que pierden los automóviles cada vez que desaceleran en un cruce peatonal, semáforos, intersección de calles, baches, entre otros casos. Se realizaron pruebas con el sistema implementado en el circuito de freno con tres masas diferentes, 41 kg, 65 kg y 80 kg, logrando 5V, 15,6V y 21,5V respectivamente, permitiendo determinar que a medida que aumenta la masa, crece el voltaje producido de manera lineal (Ramadan et al, 2015).

En cuanto a la eficiencia energética de los efectos piezoeléctricos, se debe analizar la relación que existe entre la energía recuperada y la energía requerida para el desplazamiento de las personas o de los vehículos, ya que el efecto piezoeléctrico otorga distintos niveles de energía, según los materiales que lo componen (Paraíso, 2006). Finalmente, otro factor muy relevante para la cantidad de energía que se logra recuperar es identificar los aforos peatonales y las tasas de flujo vehicular, dado que se tendría la cantidad de personas que pasan por las alfombras piezoeléctricas y la cantidad de autos que circulan sobre los reductores de velocidad.

4. DISEÑO METODOLÓGICO

En el presente capítulo se detalla el método utilizado para el objetivo de la tesis enfocado en una investigación longitudinal cuantitativa y cualitativa, con recolección de datos. Las fases utilizadas en la presente tesis son:

4.1 Fase I - Levantamiento de información primaria y secundaria

Se enfoca en el estado del arte, profundizando en la localización, las consultas y el análisis de las distintas fuentes de información relacionadas con generación eléctrica basada en piezoeléctricos instalados en áreas peatonales y flujos vehicular, capacidad de generación, requerimientos de funcionamiento, patentes y proyectos asociados a la tecnología piezoeléctrica.

Algunas fuentes de información a utilizar y de recolección de datos son: Mall Valle Curicó, Centro de Innovación y Fomento de Energías Sustentables (CIFES), Agencia Internacional de Energía (IEA), Balances de Gestión Integral (BGI - SEC), LENS.ORG, CORDIS, Patentinspiration, Carrot2, etc.

Los resultados de esta primera fase permiten establecer los principales problemas que existen en los procedimientos de generación de energía basada en piezoeléctricos. Se ha logrado detectar y establecer los problemas desde el punto de vista técnico y económico que impiden el desarrollo de la tecnología.

4.2 Fase II - Estandarización y estimación de generación de energía piezoeléctrica

Se detallan las pruebas con piezoeléctricos y mediciones de voltaje con un osciloscopio digital. Además, se definen los parámetros utilizar en la estimación de generación de energía eléctrica.

4.3 Fase III – Determinación de rutas, aforos y peak de generación, en un centro comercial

A partir de entrevistas y visitas a terreno se levantará información en el Mall Curicó, para poder analizar y determinar el movimiento de las personas que frecuentan en centro comercial como también el flujo vehicular. Además, determinar la generación de energía eléctrica, según las tasas de afluencia.

4.4 Fase IV – Evaluación técnica y económica del uso de alfombras piezoeléctricas peatonales y los reductores de velocidad, en los centros comerciales.

Utilizando una comparación de la capacidad de generación de energía para las alfombras y reductores de velocidad, en función de los piezoeléctricos y su diagrama de disposición, se establecen los indicadores económicos de los costos del proyecto, como generación eléctrica mensual, periodo de recuperación de la inversión - PRI, ahorro energético basados en las proyecciones de sus históricos, entre otros.

4.5 Fase V - Discusión de resultados

Se concentra en el análisis de resultados obtenidos del proceso de levantamiento de información y evaluación técnico-económica.

4.6 Fase VI - Formulación de conclusiones y aportes

Se detallan las conclusiones, aportes y mejoras aplicar en nuevas etapas de estudio del proyecto en centros comerciales.

5. RESULTADOS

Los resultados obtenidos los podemos separar en la estandarización y estimación de resultados de los piezoeléctricos utilizados, el efecto del flujos de personas y tránsito vehicular en el desempeño de los modelos con piezoeléctricos y su evaluación técnica económica, en donde las temáticas se dividen en las alfombras piezoeléctricas y los reductores de velocidad.

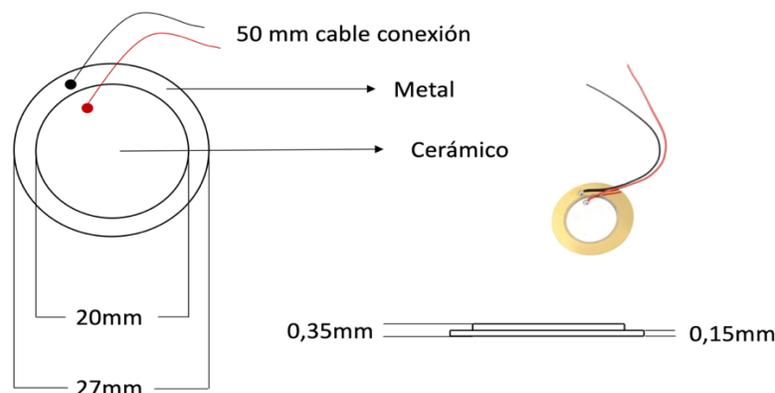
5.1 Estandarización y estimación de generación de energía

La información se detalla en dos grandes puntos, enfocados en las alfombras piezoeléctricas y los reductores de velocidad, en donde se analizan piezoeléctricos y se definen los parámetros a utilizar en la estimación de la generación de energía eléctrica.

5.1.1 Alfombras Piezoeléctricas

En primer lugar, se llevó a cabo la estandarización de capacidad de generación de energía con patrones específicos. Para lo anterior fue necesaria la realización de pruebas a un material piezoeléctrico representado en la ilustración 1, fabricado por KY Win Robot; se debe establecer la fuerza que se ejercerá al piezoeléctrico y se considera la fuerza en Newtons (N), que es la unidad de medida de fuerza en el Sistema Internacional de Unidades.

ILUSTRACIÓN 1: PIEZOELÉCTRICO CERÁMICO DE 27MM DE DIÁMETRO



Fuente: <https://www.mechatronicstore.cl/sensor-piezoelctrico-27mm-con-cable/>

Fuente: Elaboración propia

Teniendo en cuenta, que el peso es la fuerza en Newtons (N) aplicada al piezoeléctrico tiene una relación directa con la masa, ya que se determina por la multiplicación de la aceleración de la gravedad y la masa, pero se contempla que la masa no es constante, sino más bien cambia en cada individuo, ya que no todas las personas presentan la misma cantidad de materia en los cuerpos, pero para fines del estudio se propone una masa de 85 kilogramos.

Considerando que la aceleración de la gravedad en la superficie de la tierra es de $9,80665 \text{ m/s}^2$ se logra determinar la fuerza que se aplicará al piezoeléctrico en estudio, considerando los 85 kg es de 833,56 N

La prueba que se realizó al piezoeléctrico fue para así observar el comportamiento de un elemento piezoeléctrico, tomando 20 datos de los valores de volts correspondiente al valor máximo de un ciclo utilizando un osciloscopio digital Instrustar de doble paso ISDS220B que se puede apreciar en la siguiente imagen.

ILUSTRACIÓN 2: OSCILOSCOPIO DIGITAL INSTRUSTAR ISDS220B



Fuente: https://www.teknistore.com/1452773-large_default/isds220b-virtual-pc-usb-oscilloscope-200m-sample-rate-60m-bandwidth-with-spectrum-analyzer---dds-signal-source-generator.jpg

Para obtener los valores de tensiones rms o tensiones eficaces para una señal se presenta las siguientes fórmulas:

$$V_p = V_{pp} / 2$$
$$V_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T V_{pp}^2 dt}$$

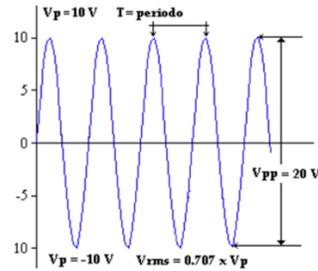
V_{pp} = voltaje pico-pico, es el valor máximo de un ciclo.

V_p = voltaje pico, es el valor máximo que obtiene la onda.

V_{rms} = voltaje eficaz.

T = periodo

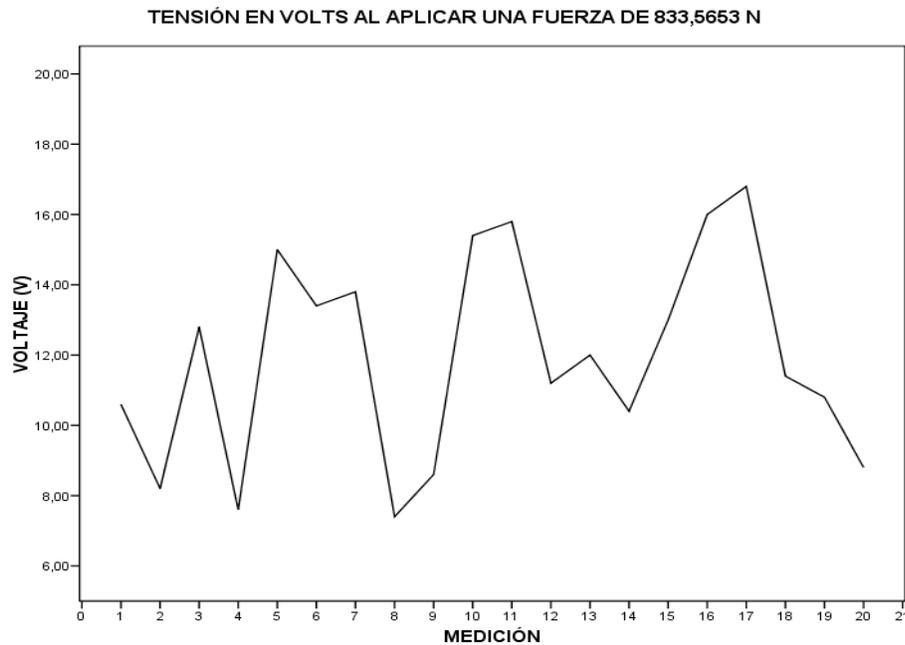
ILUSTRACIÓN 3: ONDA DE TENSIÓN GENÉRICA



Fuente: <https://unicrom.com/corriente-alterna-ca/>

La prueba se realizó aplicando de 833,56 N de fuerza en 20 oportunidades y se obtuvieron los siguientes datos:

GRÁFICO 2: VOLTAJE VPP GENERADO EN UN PIEZOELECTRICO



Fuente: Elaboración propia

Con los datos obtenidos tras la prueba realizada, se procede a realizar el cálculo de la media aritmética por la simetría de los datos, que conlleva hacer la mejor medida de tendencia central y poder identificar estadísticamente el valor de voltaje que genera el piezoeléctrico.

Como resultado se obtienen 11,95 V_{pp} , con esto se procede a obtener el voltaje rms.

TABLA 1: RESUMEN DE VOLTAJE VPP EN UN PIEZOELECTRICO

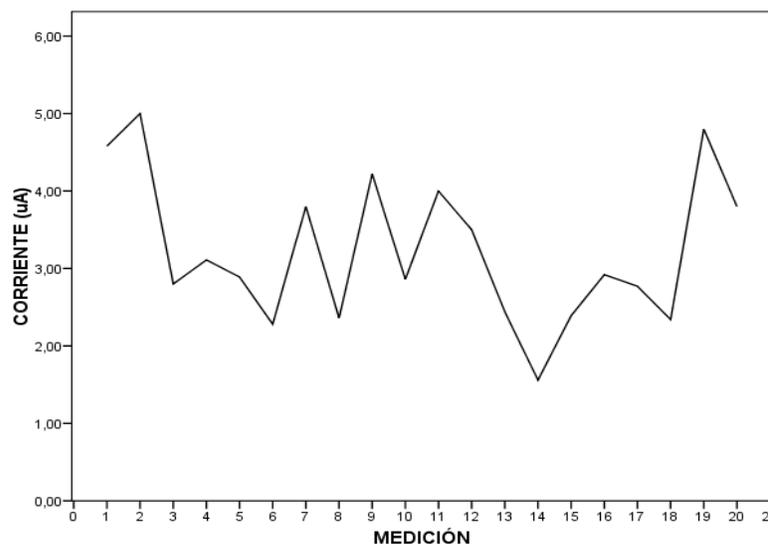
Persona 85kg		
Voltaje pico-pico V_{pp} (volts)	Voltaje pico V_p (volts)	Voltaje eficaz V_{rms} (volts)
11,95	5,975	11.95

Fuente: Elaboración Propia

Con esto, se observa que al aplicar 833,56 N fuerza al piezoeléctrico se obtiene un voltaje de 11,95 volts. Además, tras la prueba realizada con 20 repeticiones, se procede a graficar los resultados de corriente obtenida:

GRÁFICO 3: CORRIENTE GENERADA EN UN PIEZOELECTRICO

CORRIENTE EN MICROAMPERIO AL APLICAR UNA FUERZA DE 833,5653 N



Fuente: Elaboración propia

Se debe destacar que el piezoeléctrico, aunque está diseñado para una corriente máxima nominal de 0,5mA solamente se obtuvo 3,22 μA una corriente equivalente al 0,644% al aplicar 833,56 N de fuerza al piezoeléctrico.

Con los resultados logrados se propone una estructura de 50x50x2,5 cm correspondiente a las medidas más utilizadas en los pisos de alto tráfico de centros comerciales, que en este caso contendrá en su interior 81 piezoeléctricos de 27 mm

que se reparten la fuerza de la pisada de una persona. La distribución es en 9 grupos de 9 piezoeléctricos, entre los grupos existe una conexión de paralelo y en el caso intra-grupo la conexión es en serie y la palmeta que contendrá los piezoeléctricos se puede apreciar en la ilustración 4, que por su composición de caucho otorga una de alta resistencia al desgaste, ayuda a prevenir accidentes por caídas o golpes, es antideslizante, entre otras características.

ILUSTRACIÓN 4: PALMETA CAUCHO GRIS



Fuente: https://www.paris.cl/dw/image/v2/BCHW_PRD/on/demandware.static/-/Sites-cencosud-master-catalog/default/dwf6b59bad/images/imagenes-productos/649/289318-0000-003.jpg?sw=1480&sh=2000&sm=fit

Basándose en el diseño de prototipo de alfombra piezoeléctrica peatonal, permite realizar un estimado del costo total de la plancha de caucho con los piezoeléctricos de 6.335, el que se conforma principalmente por los 81 piezoeléctricos con un costo de 35 pesos unitarios y el costo de la palmeta de caucho de 3.500 pesos.

Además, los parámetros fijos de tensión, corriente y potencia para determinar la generación final de energía para el centro comercial dependen de los aspectos técnicos del piezoeléctrico que se reflejan en la Tabla 2, donde también se puede observar la constante de voltaje piezoeléctrico en milivoltios por metro/Newton correspondiente a una relación de una diferencia de potencial generada a la fuerza F aplicada para un elemento piezoeléctrico de 1 metro de largo, definida como constante g_{33} .

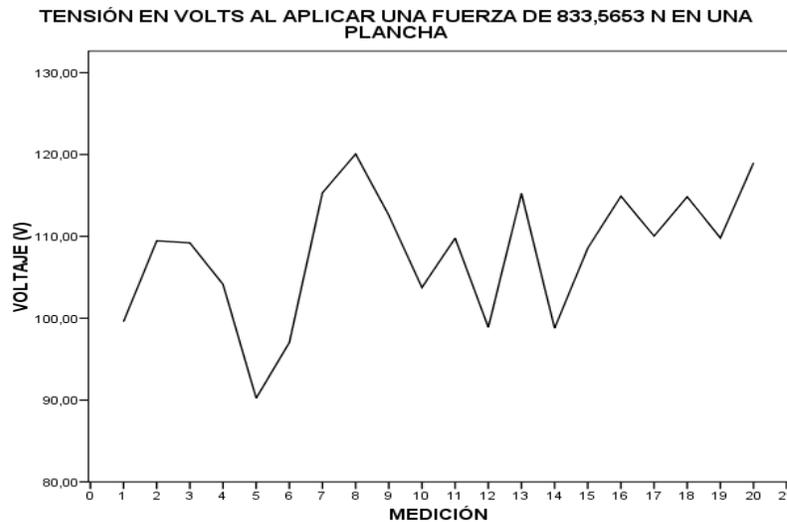
TABLA 2: CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DEL PIEZOELÉCTRICO DE 27MM ECONÓMICO

Costo de un piezoeléctrico	Costo de una plancha con piezoeléctricos	Marca	Dimensiones Externas	Constante g33
35 pesos	6.335 pesos	KY WIN ROBOT	27mm	$22 * 10^{-3} Vm/N$
Peso	Voltaje máximo admisible	Frecuencia resonante	Corriente máxima nominal	Temperatura de funcionamiento
2,1g	Onda cuadrada 30V	$3,5 \pm 0,5 kHz$	0,5mA	-30~ + 70C

Fuente: Elaboración propia

Para poder realizar una estimación para el centro comercial con el modelo propuesto, se realizaron 20 repeticiones con una plancha de 0,25m², aplicando una constante de 833,56 N de fuerza y se lograron obtener los siguientes datos de voltaje y corriente que se pueden apreciar en los siguientes gráficos:

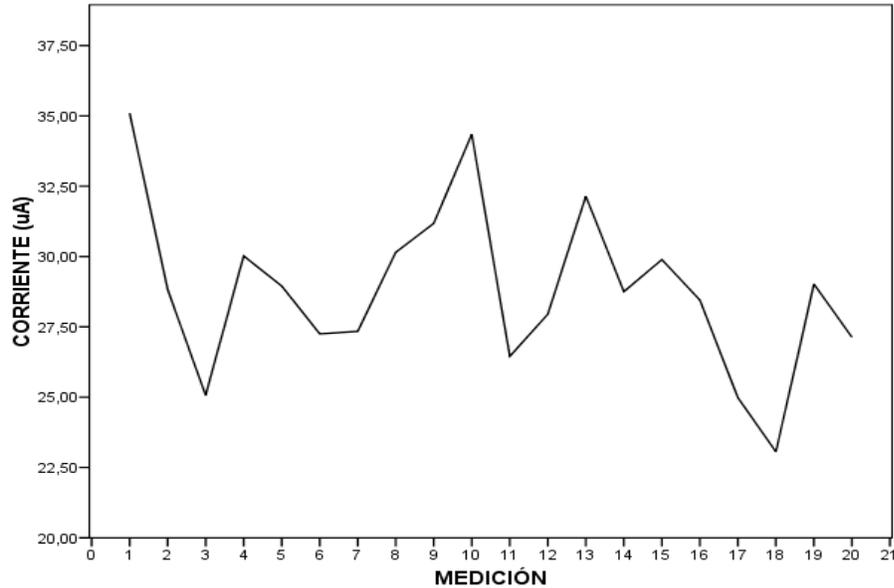
GRÁFICO 4: VOLTAJE VPP EN UN PLANCHA CON 81 PIEZOELÉCTRICO



Fuente: Elaboración propia

GRÁFICO 5: CORRIENTE EN UN PLANCHA CON 81 PIEZOELÉCTRICO

CORRIENTE EN MICROAMPERIO AL APLICAR UNA FUERZA DE 833,5653 N EN UNA PLANCHA



Fuente: Elaboración propia

Con esto, se observa que al pisar una persona de 85 kilogramos sobre la plancha se obtiene una corriente de 28,80 μA y una tensión de 108,04 volts.

Con la información recopilada en las pruebas individuales en un piezoeléctrico y en la plancha con el circuito de los 81 piezoeléctricos, podemos establecer un comportamiento lineal, permitiendo realizar el cálculo general, extrapolando la situación a todos los pasillos de uso común del centro comercial.

$$V_{promedio\ por\ piezoeléctrico} = 11,95\ V \rightarrow V_{promedio\ por\ plancha} = 108,04\ V$$

$$I_{promedio\ por\ piezoeléctrico} = 3,22\ \mu A \rightarrow I_{promedio\ por\ plancha} = 28,80\ \mu A$$

En segundo lugar, es evaluado otro piezoeléctrico, para identificar su efecto y variación de resultados en la capacidad de generación eléctrica en la alfombra piezoeléctrica donde se sustituye el piezoeléctricos por uno de mejor calidad y con mejores características que se detallan en la Tabla 3:

TABLA 3: CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DEL PIEZOELECTRICO DE 25MM MAYOR CALIDAD

Costo de un piezoelectrico	Costo de una plancha con piezoelectricos	Marca	Dimensiones Externas	Constante g33
350 pesos	31.850 pesos	KY WIN ROBOT	25mm	$22 * 10^{-3} Vm/N$
Peso	Voltaje máximo admisible	Frecuencia resonante	Corriente máxima nominal	Temperatura de funcionamiento
2,9g	Onda cuadrada 30V	$6,8 \mp 0,7 kHz$	1,5mA	-30~ + 70C

Fuente: Elaboración propia

Utilizando la fórmula para determinar el voltaje, dado que en este caso se realiza el análisis teórico, se determina con la fuerza de una persona que pesa 85 kg, al caminar sobre 0,25m² de alfombra:

$$V = g_{33} \frac{Largo}{Superficie} F$$

$$V = (22 * 10^{-3} Vm/N) \frac{0,0025m}{0,0019m^2} (833,56N) = 23,39 V$$

Además, con la corriente nominal máxima que expone el fabricante en el detalle del producto piezoelectrico y que se puede ver en la Tabla 3, se procede a comparar con otras marcas los valores detectando el más conveniente, pero afectándolo a una tasa del 0,644% de efectividad, obtenido en el caso del piezoelectrico económico.

$$I = 1,5 mA * 0,00644 = 0,00966 mA$$

$$V_{promedio por plancha} = 23,39 V * 9 = 210,51V$$

$$I_{promedio por plancha} = 0,00966 mA * 9 = 0,08694 mA$$

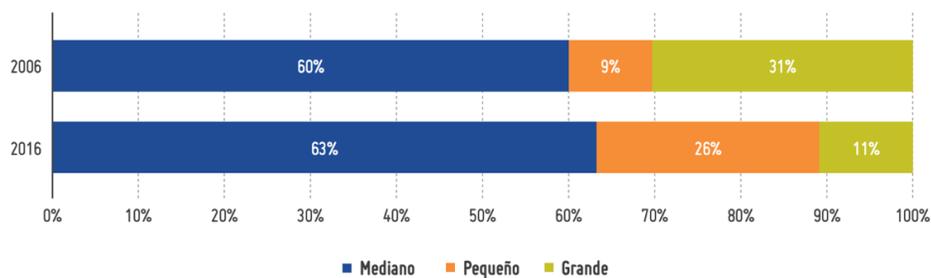
Se observa con los datos teóricos, que al momento que una persona pisa la plancha se obtendría una tensión de 108,04 V y una corriente de 0,08694 mA.

5.1.2 Reductores de Velocidad

Por otra parte, se propone la generación con reductores de velocidad, conocidos tradicionalmente como lomos de toro que incluyen piezoelectricos. Dicho reductor permite la reutilización de la energía producida por el paso de los vehículos en los pórticos de entrada y salida del centro comercial Mall Curicó.

El tipo de vehículos que se utilizará para los análisis corresponde a los pequeños y medianos, dado que estos en conjunto componen el 90% aproximadamente de las ventas el año 2016 y por consecuencia el 90% del tráfico en las calles de Chile. Se puede apreciar en el comportamiento del parque automovilístico a nivel nacional desde el 2006 cuando ha sufrido el mayor cambio en los últimos 15 años y que se ha mantenido hoy, lo que se puede ver en los siguientes gráficos presentado por la Asociación Nacional Automotriz de Chile (ANAC, 2017).

GRÁFICO 6: VENTAS DE VEHÍCULOS POR SEGMENTO



Fuente: ANAC

Otra información que se debe contemplar corresponde a la variable peso, dado que los vehículos pequeños y medianos varían entre los 800 Kg y los 3.500 Kg, generando distintas fuerzas y por lo cual, complejo de estimar si no se realiza la elección de un valor referencial o puntual, tras analizar las características principales de los distintos modelos que llegan al mercado chileno, se estima el peso medio de un vehículo pequeño y mediano es 1.500 Kg en carga. Lo que también se respalda por los datos expuestos por el INE en la base de datos de licencias de conducir por clase tramitadas en el 2019, en donde el 63,20% de las licencias corresponden a no profesionales B, las que permiten el manejo de los vehículos livianos y medianos a nivel nacional (INE, 2022).

Con la información anterior, se pueden realizar los cálculos de la fuerza total ejercida por un vehículo sobre el reductor de velocidad que es de 14,7099 kN.

Conocer el peso específico del auto no logra ser suficiente, dado que, para conocer la fuerza sobre el piezoeléctrico, se requiere establecer que los vehículos al pasar por algún sector como los reductores de velocidad generan una presión específica en cada

una de las ruedas sobre la superficie en contacto con la rueda, por lo tanto, se considerará que el peso se reparte de manera homogénea en los dos ejes y en las cuatro ruedas típicamente, obteniéndose una fuerza promedio por rueda de 3,6774 kN.

Otro factor que se debe tener en cuenta es el área o zona de contacto del neumático con el suelo, el que tiene una forma elipsoidal de dimensiones inferiores al ancho de la rueda:

ILUSTRACIÓN 5: ONDA DE TENSIÓN GENÉRICA



Fuente: <https://estructurando.net/wp-content/uploads/2016/09/huella-neum%C3%A1tico.jpg>

Incluso, las dimensiones de dicha huella dependen mucho de la propia presión del neumático, pero normalmente se puede estimar que un neumático 205/55 R16 posee una superficie de 200cm² en contacto con cualquier superficie en el proceso de rodadura (Agudelo, 2016).

Contemplando el área de contacto de cada neumático, la fuerza promedio por rueda se concentra en tan solo 0,02 m², provocando una presión de:

$$\text{Presión por rueda} = \frac{3,6774 \text{ kN}}{0,02 \text{ m}^2} = 0,1838 \text{ MPa}$$

Se establece que la presión por rueda comparado con valores técnicos es 0,2 MPa (C. Gutiérrez). Otras características importantes que se debe contemplar es la distancia existente entre el eje delantero del vehículo con el trasero, y la velocidad con la que se desplaza el vehículo, dado que estos valores permiten establecer el tiempo entre los pulsos que se provocarían en el reductor por el paso del auto e incluso saber la cantidad de autos que pudieran pasar por los puntos. Para esto, se utilizará como referente el Suzuki Baleno, ya que fue el más popular de los vehículos de pasajeros con una participación de más de 5.600 unidades vendidas en el año 2020 y una

longitud de 2,480m entre los ejes, según el catálogo del auto y de acuerdo con los datos entregados por la Asociación Nacional Automotriz de Chile (ANAC, 2020).

Otro dato relevante es la velocidad media de los automóviles que ingresan a los pórticos de entrada y salida del centro comercial, lo que se establece en 10 km/h por las barreras que hacen necesario detenerse para ingresar o salir del mall. Además, se determina el tiempo entre que las ruedas del eje delantero y trasero del vehículo pasan sobre el reductor de velocidad:

$$\text{Velocidad media} = 10 \frac{\text{km}}{\text{h}} = 2,7\text{m/s}$$

$$\text{Distancia entre eje} / \text{Velocidad media} = \frac{2,480\text{m}}{2,7\text{m/s}} = 0,91\text{s}$$

Para entender el paso de los automóviles por los reductores de velocidad, es necesario revisar el Decreto 228/96, que entró en vigor el 2010 y se actualizó el 2015, donde se encuentran las características técnicas que deben cumplir los reductores, por lo cual se utilizaría el modelo con superficie lisa de 7,5 cm de altura máxima, con un ancho de 3,70 metros (conformado de 6 bloques en paralelo). Su forma será según se muestra en la ilustración 6, que cumple lo establecido en el decreto 228/96 (Decreto 228, 1996)

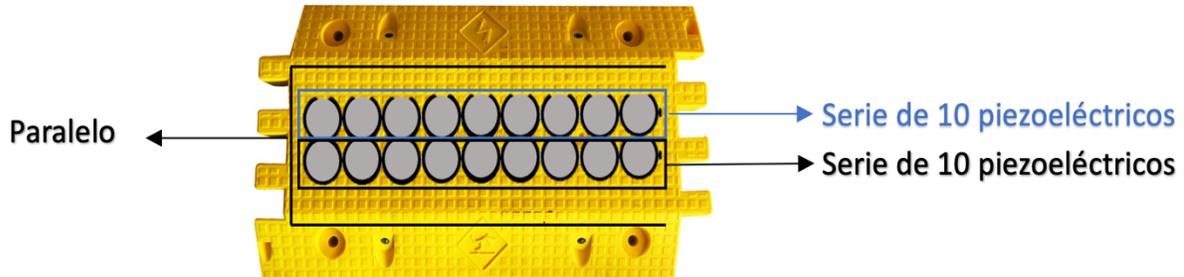
ILUSTRACIÓN 6: REDUCTOR DE VELOCIDAD



Fuente: <https://www.baupark.com.ar/wp-content/uploads/2018/09/16.jpg>

Con la finalidad de optimizar el área a cubrir con los piezoeléctricos y así poder aprovechar una gran cantidad de energía que se logra obtener por los autos al momento de circular por los reductores de velocidad, se dispone a introducir en el modelo una cantidad de 20 piezoeléctricos que se conectarán en serie y paralelo como se puede ejemplificar en la ilustración 7, permitiendo cubrir gran parte del área superior de los reductores.

ILUSTRACIÓN 7: REDUCTOR DE VELOCIDAD CON PIEZOELÉCTRICOS



Fuente: Elaboración propia

Un motivo de disponer de piezoeléctricos en toda la zona superior lisa del reductor es que existe una mayor chance de que los neumáticos estarán en contacto directo, pero también es de suma importancia las diversas distancias entre ruedas, o ancho del vehículo, ya que los autos tienen dimensiones distintas y además que no todos circulan por la parte central de la calzada, lo que dificulta el saber los puntos de paso de contacto, así que es conveniente aplicar la tecnología a todo el largo del reductor y poder aprovechar la energía producida por cada uno de los vehículos al circular por los reductores de velocidad que son puntos de transformación de energía.

Al pasar el vehículo sobre los reductores de velocidad, cada neumático podrá generar un voltaje correspondiente al 25% del peso del auto, luego los 3,6774 kN se aplican sobre los 20 piezoeléctricos obteniendo una fuerza teórica homogénea por cada uno de los piezoeléctricos:

$$\text{Fuerza por cada piezoeléctrico} = \frac{3,6774 \text{ kN}}{20} = 183,87 \text{ N}$$

Tras revisar diversos fabricantes como Acromag, FOX Electronics, Siemens Milltronics, Sinocera y Noliac, se propone utilizar el NCE51 piezoeléctrico de la compañía Noliac. En la ilustración 8 se pueden apreciar algunas de las características técnicas expuestas por la empresa en su plataforma de internet (Noliac, 2017).

ILUSTRACIÓN 8: PROPIEDADES DEL PIEZOCERÁMICO NCE51

Dieléctricas

Constante dieléctrica relativa	$\epsilon_{33}^T / \epsilon_0$	1850
--------------------------------	--------------------------------	------

Electromecánicas

Constante de carga piezoeléctrica	d_{33}	$460 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{N}$
Constante de tensión piezoeléctrica	g_{33}	$27 \cdot 10^{-3} \text{ Vm}/\text{N}$

Físicas

Densidad	ρ	$7,8 \cdot 10^{-3} \text{ kg}/\text{m}^3$
Conformidad elástica	S_{33}^T	$19 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{N}$
Diámetro	d	0,03 m
Espesor	t	0,001 m
Temperatura de Curie	T_c	340 °C



Fuente: <http://www.noliac.com/products/materials/nce51/>

Utilizando la información del fabricante, se puede establecer el valor para el voltaje de cada piezoeléctrico cerámico y la corriente teórica estimada por cada piezoeléctrico con una carga de 183,87 N, información entregada por Noliac, América del Sur.

$$V = \frac{4}{3,1416} g_{33} \frac{\text{espesor}}{\text{Superficie}} F = \frac{4}{3,1416} (27 \cdot 10^{-3} \text{ Vm}/\text{N}) \frac{0,001\text{m}}{0,03\text{m}^2} 183,87\text{N} = 7,02 \text{ V}$$

$$I = 0,18 \mu\text{A}$$

Pero teniendo en cuenta el circuito de 2 series de 10 piezoeléctricos se obtiene:

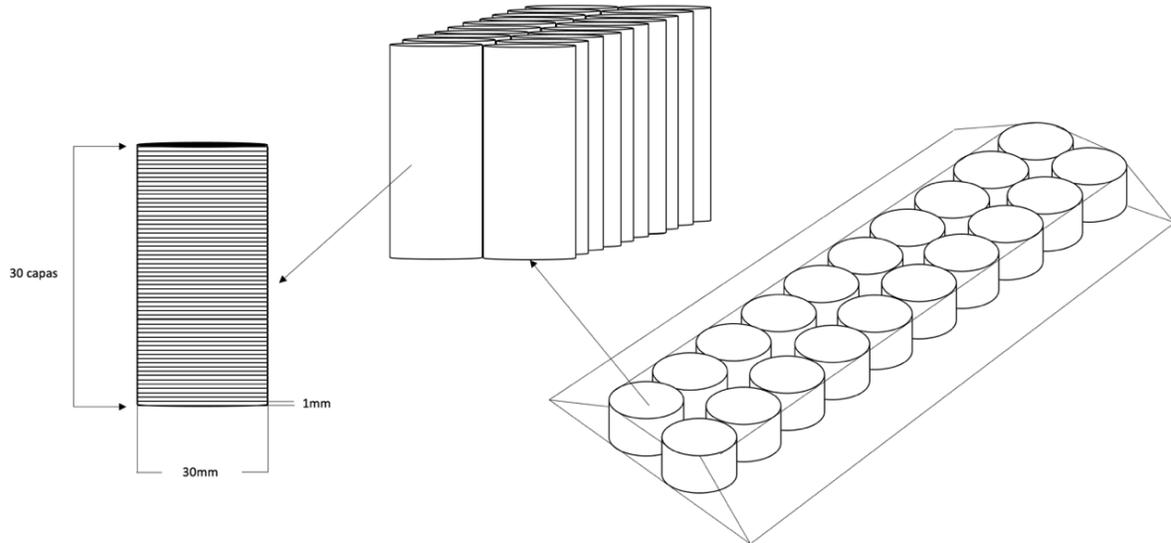
$$V = 2 * 7,02 \text{ V} = 14,04 \text{ V}$$

$$I = 10 * 0,18 \mu\text{A} = 1,80 \mu\text{A}$$

$$P = VI = 14,04\text{V} * 1,80 \mu\text{A} = 25,272 \mu\text{Ws}$$

Además, por las dimensiones de los piezoeléctricos se podría concentrar la energía producida, proponiendo la misma distribución, pero con 30 capas estilo “Sándwich”, como se puede apreciar en la ilustración 9.

ILUSTRACIÓN 9: DISTRIBUCIÓN CASO A



Fuente: Elaboración propia

En el caso A, considerando que todas las capas de piezoeléctricos se encuentren conectadas en paralelo, se obtienen los siguientes valores de voltaje, corriente y potencia:

$$V_{\text{reductor-sándwich}} = 14,04 \text{ V}$$

$$I_{\text{reductor-sándwich}} = 1,80 \mu\text{A} * 30 = 54,0 \mu\text{A}$$

$$P_{\text{reductor-sándwich}} = VI = 14,04\text{V} * 54,0 \mu\text{A} = 758,16 \mu\text{Ws}$$

Se debe comprender que los valores expuestos son por un vehículo, específicamente en una sola rueda de contacto.

5.2 Rutas y aforos

Es necesario iniciar el proceso de recopilación de información, específicamente flujos, tiempos, entre otros, mediante las siguientes actividades a realizar:

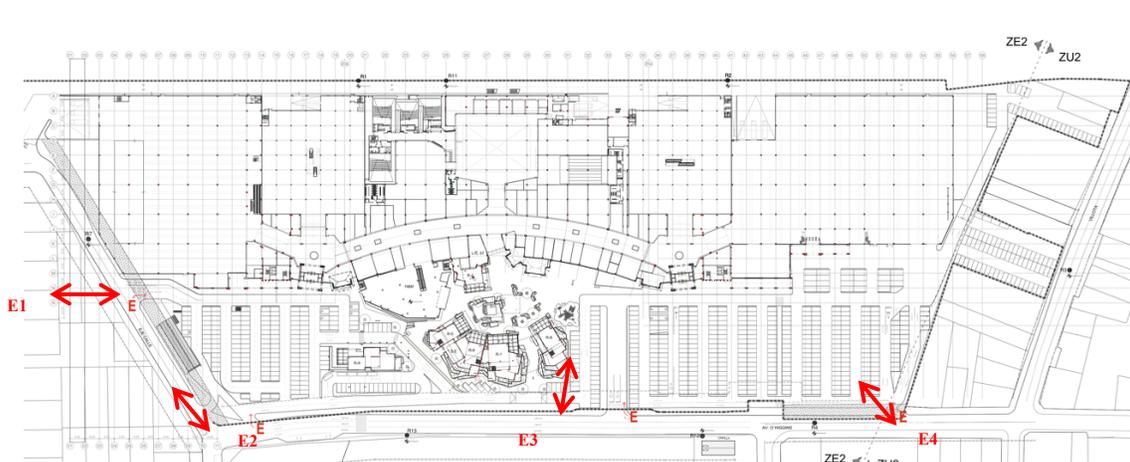
- Recopilación visual para detectar las horas punta, sectores de desplazamiento dentro y fuera del mall, etc.
- Una vez identificadas las zonas y los lapsos de hora de mayor importancia para el estudio, se determina el aforo del público desde la mirada peatonal.
- Recopilación del consumo energético de los centros comerciales, enfocado en luminaria y ventilación de la institución en distintos horarios y temporadas estivales.

La tasa de afluencia de clientes al centro comercial se evaluó en un tiempo de 4 minutos, para lograr obtener esa cuantificación se consideró trabajar recolectar datos durante dos horas por día, por un tiempo de tres días a la semana, en un total de dos semanas.

Se obtuvo en promedio un conteo de 540 personas ingresando al centro comercial en un periodo de 2 horas en cada punto de acceso, este resultado contempla únicamente las personas que ingresan, entendiendo que también existe un flujo de salida o abandono del centro comercial.

También se realizó un trabajo con los flujos vehiculares diarios y su tiempo de permanencia en las zonas de estacionamiento oficiales del Mall desde septiembre del 2020 a febrero del 2021. Con la información entregada por parte del área de administración del Mall, el flujo histórico de 6 meses registrado por los puntos de acceso y salida, donde se esclarece que circulan diariamente 5.000 vehículos por sus recintos de estacionamiento, entre las 8:00 hasta las 21:00 horas principalmente, dado que el funcionamiento de los estacionamientos es hasta las 23:30 horas, mayor al tiempo de apertura y cierre de las tiendas.

ILUSTRACIÓN 10: PLANO MALL VALLE CURICO INGRESOS VEHICULARES



Fuente: Gerente General del Mall-Propia

La distribución de ingreso puede variar, dado que:

- En el ingreso E1 se tiene un punto de acceso y uno de salida.
- En el ingreso E2 se tienen dos puntos de acceso y uno de salida.
- En el ingreso E3 se tienen un punto de acceso y dos de salida.
- En el ingreso E4 se tienen dos puntos de acceso y uno de salida.

Se obtiene una distribución de los 5.000 autos registrados con una permanencia promedio de 54 min, en un periodo de 13 horas de funcionamiento y 11 puntos de flujo vehicular (6 de ingreso y 5 de salida). Comprendiendo que los autos circulan indistintamente por los diversos puntos, con lleva a un total de 833 autos por punto de ingreso y 1000 autos por punto salida.

De esta forma se logró establecer el número de peatones y la cantidad de autos que circulan por un punto de ingreso/salida, evaluado por una cantidad determinada de tiempo y así poder estimar en kWh/m²/día, la posible generación de energía correspondiente a los centros comerciales especificados. Los sectores comunes cumplen con recomendaciones para instalar las alfombras piezoeléctricas con los reductores de velocidad y ganar en eficiencia por su distribución.

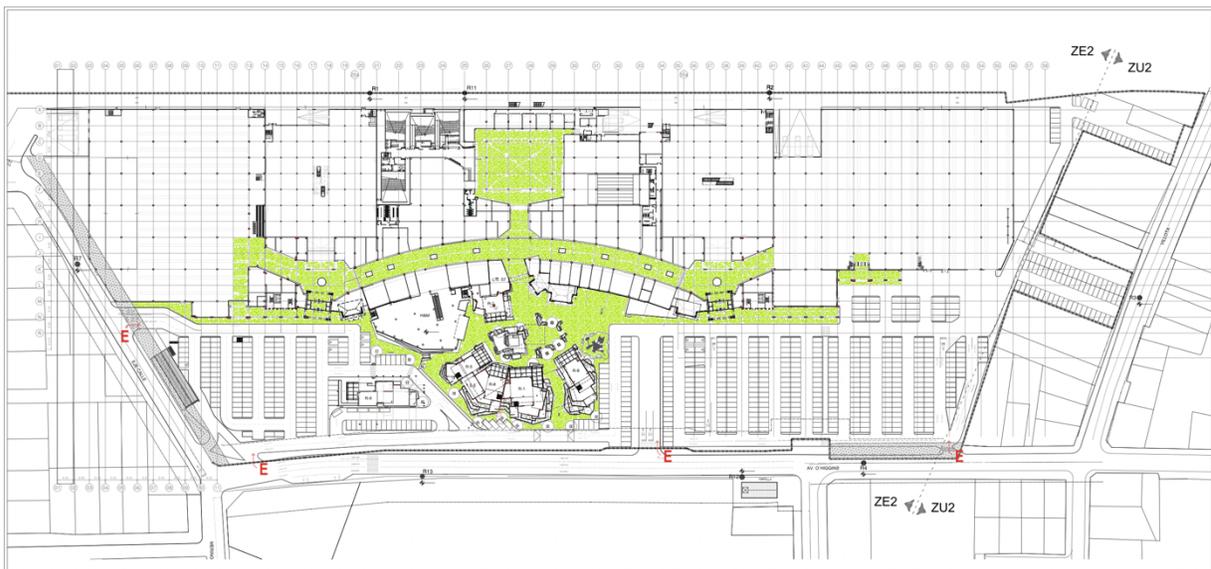
En otro tema, la potencia comentada anteriormente para las alfombras se ve directamente incrementada por la afluencia de personas, basado en los cálculos ya

realizados en promedio durante 4 minutos en el centro comercial se tiene un flujo de 18 personas en promedio por entrada y existen 5 puntos de ingreso, obteniendo un flujo de 22,5 personas por cada minuto (*noviembre 2021*), contando con un aforo máximo cercano a las 2400 personas definido por la gerencia del Mall Don Carlos y por las autoridades de la seremi de Trabajo y Previsión Social del Maule que establecen una capacidad del 80% para su funcionamiento en tiempos de pandemia.

5.2.1 Efecto de las rutas y aforos en las Alfombras Piezoeléctricas

Si se implementa la alfombra en los centros comerciales, como el Mall Curicó en las áreas comunes de las tiendas, se consideraría superficie de 2.600m², las que constituyen todos los pasillos internos del mall, como también las zonas de tránsito peatonal externas y adyacentes a las tiendas que delimitan con los estacionamientos, destacado de color verde en la ilustración 5. Se utilizarían 10.400 planchas de alfombras piezoeléctricas en la que se distribuyen 81 piezoeléctricos en una superficie de 0,25m².

ILUSTRACIÓN 11: PLANO MALL VALLE CURICO



Fuente: Gerente General del Mall

Entonces se requiere determinar cuántas planchas se deben contemplar, para toda el área a cubrir. El pasillo se encuentra dividido en dos sentidos direccionales, lo que se comprenderá como sectores A y sector B, con una superficie sectorial de 1.300 m².

$$\text{área por plancha} = 2.500 \text{ cm}^2 \rightarrow \text{área por sector} = 13.000.000 \text{ cm}^2$$

Lo que conlleva a considerar un total de 5.200 planchas por sector, generando para el caso uno (C1), sin considerar el flujo peatonal:

$$I_{\text{total sector A}} = I_{\text{total sector B}} = 28,8 \mu\text{A} * 5.200 \text{ planchas} = 149.760,00 \mu\text{A}$$

$$I_{\text{total sector A+B}} = 28,8 \mu\text{A} * 5.200 * 2 \text{ paralelo} = 299.520,00 \mu\text{A}$$

$$P_{\text{total sector A}} = P_{\text{total sector B}} = VI = 108,04\text{V} * 149.760,00 \mu\text{A} = 14.935,4496 \mu\text{Ws} = 14,935 \text{ mWs}$$

$$P_{\text{total sector A+B}} = VI = 108,04\text{V} * 149.520,00 \mu\text{A} * 2 \text{ paralelo} = 32.308.281,6 \mu\text{Ws} = 32,308 \text{ mWs}$$

Por otra parte, con los datos obtenidos en el caso dos (C2) se dispone a calcular el resultado general, lo que comprende el sector A y sector B.

$$I_{\text{total sector A}} = I_{\text{total sector B}} = 0,08694 \text{ mA} * 5.200 \text{ planchas} = 452,088 \text{ mA}$$

$$I_{\text{total sector A+B}} = 904,176 \text{ mA}$$

$$P_{\text{total sector A}} = P_{\text{total sector B}} = VI = 210,51\text{V} * 452,088 \text{ mA} = 95.169,0448 \text{ mWs}$$

$$P_{\text{total sector A+B}} = VI = 210,51\text{V} * 452,088 \text{ mA} * 2 \text{ paralelo} = 190.338,0898 \text{ mWs}$$

Se utilizará la tasa peatonal obtenida para determinar los resultados con el piezoeléctrico económico, caso C1 para un funcionamiento pleno durante una hora, que logra una potencia de:

$$P_{\text{caso C1}} = 32,308 \text{ mWs} * 60\text{seg} * 60\text{min} = 116.308,80 \text{ mWh} = 0,1163 \text{ kWh}$$

Los resultados con el piezoeléctrico de mayor calidad, caso C2 en funcionamiento total durante una hora, se logra una potencia de:

$$P_{\text{caso C2}} = 190.338,0898 \text{ mWs} * 60\text{seg} * 60\text{min} = 685,2171 \text{ kWh}$$

Se procede a determinar la energía eléctrica que se genera en el centro comercial tras un día de funcionamiento, aproximadamente el tiempo de 11 horas de funcionamiento,

dado que en momentos de normalidad el mall tiene un horario de funcionamiento de la mayoría de sus tiendas que va desde las 9:30 horas hasta las 20:30 horas, es decir, su día operativo consta de 11 horas.

$$(22,5 \text{ personas por minuto})(60 \text{ min}) = 1.350 \text{ personas por hora}$$

Las 1.350 personas por hora representan al 56,25% del aforo normal del centro comercial, por lo cual se utilizará este porcentaje como medida de rendimiento del sistema completo.

$$P_{Total-Caso C1} = (\text{rendimiento } 56,25\%)(0,1163 \text{ kWh})(11 \text{ horas}) = 0,7196 \frac{\text{kWh}}{\text{día}}$$

$$P_{Total-Caso C2} = (\text{rendimiento } 56,25\%)(685,2171 \text{ kWh})(11 \text{ horas}) = 4.239,7808 \frac{\text{kWh}}{\text{día}}$$

Con los datos calculados anteriormente, se puede determinar la generación de energía, (kWh/m²/día).

$$P_{Total-Caso C1}(\text{kWh/m}^2/\text{día}) = \frac{0,7196 \frac{\text{kWh}}{\text{día}}}{2.600 \text{m}^2} = 0,000276(\text{kWh/m}^2/\text{día})$$

$$P_{Total-Caso C2}(\text{kWh/m}^2/\text{día}) = \frac{4.239,7808 \frac{\text{kWh}}{\text{día}}}{2.600 \text{m}^2} = 1,63068(\text{kWh/m}^2/\text{día})$$

Estos resultados, permiten determinar el ingreso mensual utilizando como valor kWh para negocio de 104,270 pesos (GlobalPetrolPrices, 2022). Este monto corresponde al costo energético para empresas, que difiere del costo para los hogares, por lo que el monto total final sería un ahorro para el centro comercial.

$$Ingreso_{m^2-Caso C1} = 0,000276 \left(\frac{\text{kWh}}{\text{m}^2/\text{día}} \right) * \$104,270 \text{kWh} * 30 \text{día} = \$0.8634 \text{mensual/m}^2$$

$$Ingreso_{m^2-Caso C2} = 1,63068 \left(\frac{\text{kWh}}{\text{m}^2/\text{día}} \right) * \$104,270 \text{kWh} * 30 \text{día} = \$5.100,9301 \text{mensual/m}^2$$

$$Ingreso_{Total-Caso C1} = 0,000276 \left(\frac{\text{kWh}}{\text{m}^2/\text{día}} \right) * \$104,270 \text{kWh} * 30 \text{día} * 2.600 \text{m}^2 = \$2.244,84 \text{ mensual}$$

$$Ingreso_{Total-Caso C2} = 1,63068 \left(\frac{\text{kWh}}{\text{m}^2/\text{día}} \right) * \$104,270 \text{kWh} * 30 \text{día} * 2.600 \text{m}^2 = \$13.262.418,28 \text{ mensual}$$

5.2.2 Efecto de las rutas y aforos en los Reductores de Velocidad

Para el análisis de los reductores de velocidad se utilizan los datos entregados por administración y se establece que pasan 1,06 y 1,28 vehículos cada minuto, lo que se traduce a 1,06 vehículos ingresando cada 60 segundos al mall y 1,26 vehículos salen cada 60 segundos de los estacionamientos. Lo que permite definir un auto por cada punto y que cada vez que ingresa o sale un vehículo se crean 8 pulsos de generación de energía en un minuto, considerando dos reductores por punto.

Los resultados con el piezoeléctrico NCE51 en funcionamiento total durante un minuto (un auto), se logra una potencia por tren delantero o trasero de:

$$V_{\text{reductor-sándwich } x 2 \text{ ruedas}} = 14,04 V * (\text{tren delantero}) = 14,04 V$$

$$I_{\text{reductor-sándwich } x 2 \text{ ruedas}} = 54,0 \mu A * 2 (\text{Par de ruedas de impacto}) = 108,0 \mu A$$

$$P_{\text{reductor-sándwich } x 2 \text{ ruedas}} = VI = 14,04V * 108,0 \mu A = 1.516,32 \mu Wm$$

Los resultados al analizar los 11 puntos en una hora, con los dos reductores por punto en el caso A1, se podría lograr una potencia de:

$$P_{\text{Total Accesos y Salidas-caso A1}} = 1.516,32 \mu Wm * 60 \text{min} * 11(\text{punto}) * 2(\text{reductores}) * 2(\text{tren trasero y delantero})$$

$$= 4.003.084,8 \mu Wh$$

$$P_{\text{Total Accesos y Salidas-caso A1}} = 4.003,0848 mWh$$

Se procede a determinar la energía eléctrica que se genera en el centro comercial con el uso de los reductores de velocidad tras un día de funcionamiento, que es aproximadamente el tiempo de 13 horas, dado que los estacionamientos funcionan principalmente entre las 8:00 hasta las 21:00 horas.

$$(1 \text{ vehículo por minuto})(60 \text{ min})(11 \text{ puntos}) = 660 \text{ vehículos por hora}$$

Los 660 vehículos por hora representan el 64,08% de la capacidad total, correspondiente a 700 al aire libre y 330 subterráneos, por lo cual se utilizará este porcentaje como medida de rendimiento del sistema completo.

$$P_{Total-vehicular-caso A1} = (\text{rendimiento } 64,08\%)(4.003,0848mWh)(13 \text{ horas}) = 0,03334 \frac{kWh}{\text{día}}$$

Con los datos calculados anteriormente, se puede determinar la generación de energía, kilowatt-hora por punto (acceso o salida) por día (kWh/punto/día).

$$P_{Total(kWh/punto/día)-caso A1} = \frac{0,03334 \frac{kWh}{\text{día}}}{11 \text{ puntos}} = 0,00303(kWh/punto/día)$$

Estos resultados, permiten determinar el ingreso mensual utilizando como valor kWh para negocio de 104,270 pesos (GlobalPetrolPrices, 2022).

$$Ingreso_{punto.-caso A1} = 0,00303 \left(\frac{kWh}{\text{punto}} \right) * \$104,270kWh * 30\text{día} = \$9,478/\text{punto}$$

$$Ingreso_{Total-caso A1} = 0,0303 \left(\frac{kWh}{\text{día}} \right) * \$104,270kWh * 30\text{día} * 11\text{puntos} = \$104,2595 \text{ mensual}$$

Como los valores del sistema de reductores de velocidad, generan resultados muy bajos, se propone una nueva combinación del circuito. Se presenta un caso A2, un sistema de 5 piezoeléctricos con una fuerza teórica homogénea por piezoeléctrico:

$$Fuerza \text{ por cada piezoelectrico} = \frac{3,6774 \text{ kN}}{5} = 735,48N$$

Utilizando la información del fabricante, se puede establecer el valor para el voltaje de cada piezoeléctrico cerámico y la corriente teórica estimada.

$$V = \frac{4}{3,1416} g_{33} \frac{\text{espesor}}{\text{Superficie}} F = \frac{4}{3,1416} (27 * 10^{-3} Vm/N) \frac{0,001m}{0,03m^2} 735,48 N = 27,95 V$$

$$I = 0,46 \mu A$$

Pero teniendo en cuenta el circuito es de 5 piezoeléctricos en paralelo se obtiene:

$$V = 27,95 V$$

$$I = 5 * 0,46 \mu A = 2,30 \mu A$$

$$P = VI = 27,95V * 2,30 \mu A = 64,285 \mu Ws$$

Además, podríamos repetir la propuesta de 30 capas estilo “Sándwich”, en el que todas las capas de piezoeléctricos se encuentren conectadas en paralelo:

$$\begin{aligned} V_{\text{reductor-sándwich-caso A2}} &= 27,95 \text{ V} \\ I_{\text{reductor-sándwich-caso A2}} &= 2,30 \mu\text{A} * 30 = 69,0 \mu\text{A} \\ P_{\text{reductor-sándwich-caso A2}} &= VI = 27,95\text{V} * 69,0 \mu\text{A} = 1.928,55 \mu\text{Ws} \end{aligned}$$

Se debe comprender que los valores expuestos son para una rueda del vehículo, específicamente, generalizando el caso se obtiene:

$$\begin{aligned} V_{\text{reductor-sándwich x 2 ruedas-caso A2}} &= 27,95 \text{ V} * (\text{tren delantero}) = 27,95 \text{ V} \\ I_{\text{reductor-sándwich x 2 ruedas-caso A2}} &= 69,0 \mu\text{A} * 2 (\text{Par de ruedas de impacto}) = 138,0 \mu\text{A} \\ P_{\text{reductor-sándwich x 2 ruedas-caso A2}} &= VI = 27,95\text{V} * 138,0 \mu\text{A} = 3.857,10 \mu\text{Wm} \end{aligned}$$

Los resultados al analizar los 11 puntos en una hora, con los dos reductores por punto y las cuatro ruedas, se podría lograr una potencia de:

$$\begin{aligned} P_{\text{Total Accesos y Salidas-caso A2}} &= 3.857,10 \mu\text{Wm} * 60\text{min} * 11(\text{punto}) * 2(\text{reductores}) * 2(\text{tren trasero y delantero}) \\ &= 10.182.744,0\mu\text{Wh} \end{aligned}$$

$$P_{\text{Total Accesos y Salidas-caso A2}} = 10.182,744\text{mWh}$$

Se determina la energía eléctrica diaria con una tasa de efectividad del 64,08%, determinada por la capacidad utilizada en relación con lo total disponible de estacionamientos.

$$P_{\text{Total-vehicular-caso A2}} = (\text{rendimiento } 64,08\%) (10.182,744\text{mWh})(13 \text{ horas}) = 0,08482 \frac{\text{kWh}}{\text{día}}$$

Con los datos calculados anteriormente, podremos determinar la generación de energía, kilowatt-hora por punto (acceso o salida) por día (kWh/punto/día).

$$P_{\text{Total(kWh/punto/día)-caso A2}} = \frac{0,08482 \frac{\text{kWh}}{\text{día}}}{11 \text{ puntos}} = 0,0077(\text{kWh/punto/día})$$

Estos resultados, permiten determinar el ingreso mensual:

$$Ingreso_{\text{punto-caso A2}} = 0,0077 \left(\frac{\text{kWh}}{\text{punto día}} \right) * \$104,270\text{kWh} * 30\text{día} = \$24,0864\text{mensual/punto}$$

$$Ingreso_{\text{Total-caso A2}} = 0,0077 \left(\frac{\text{kWh}}{\text{punto día}} \right) * \$104,270\text{kWh} * 30\text{día} * 11\text{puntos} = \$264,95 \text{ mensual}$$

Como los valores de los sistema propuestos, generan ingresos económicos bajos, se comprende que las necesidades a satisfacer son mayores y deben tratar de ser cubiertas con materiales piezoeléctrico con características de mayor rendimiento, que conllevan a un precio mayor, dado que es muy relevantes la obtención de mejores resultados, es decir de un voltaje y corriente con un mínimo esfuerzo por parte de las personas y el andar de los autos, ya que la intención es que las alfombras o reductores de velocidad no generen resistencia o impedimento al desplazarse sobre ellos.

5.3 Evaluación Técnica de las Alfombras Peatonal y Reductores de velocidad

Desde el punto de vista técnico, se ha podido determinar la factibilidad de uso de las alfombras peatonales y reductores de velocidad en el establecimiento comercial, para lo cual es un requisito conocer la cantidad de energía que se puede generar en los 2.600m² y 11 puntos de reductores de velocidad.

En el caso de las alfombras se obtienen los siguientes resultados de generación de energía en términos mensuales

$$P_{\text{Total-caso C1}} = (0,1163 \text{ kWh})(11 \text{ horas})(30 \text{ día}) = 21,5888 \frac{\text{kWh}}{\text{mensual}}$$

$$P_{\text{Total-caso C2}} = (685,2171 \text{ kWh})(11 \text{ horas})(30 \text{ día}) = 127.193,424 \frac{\text{kWh}}{\text{mensual}}$$

Con los anteriores datos, se puede establecer en el caso C1 se generan 21,5888kWh mensuales. En cambio, el caso C2 se generan 127.193,424 kWh mensuales.

En el caso de los reductores los datos mensuales son:

$$P_{Total-Caso A1} = \left(0,03334 \frac{kWh}{día}\right) (30 día) = 1,0002 \frac{kWh}{mensual}$$
$$P_{Total-Caso A2} = \left(0,08482 \frac{kWh}{día}\right) (30 día) = 2,5446 \frac{kWh}{mensual}$$

Se puede establecer con la generación mensual por parte de los reductores en el caso A1 y A2, el aporte es bajo los 2,6kWh, otorgando un aporte despreciable.

Las propuestas de generación eléctrica señaladas anteriormente son fuentes alternativas de energía que por su característica pueden ser parte o combinación de otros sistemas de generación de energía eléctrica como los paneles solares, permitiendo un ahorro para el centro comercial en su consumo interno o inclusive inyectar el excedente a la red.

Otra instancia relevante en el proceso es, qué realizar con la energía eléctrica, lo que significa que debe ser almacenada en baterías de ciclo profundo que permiten ser cargadas y descargadas repetidamente en el tiempo, para la utilización de la energía eléctrica cuando sea necesario.

ILUSTRACIÓN 12: BATERÍA DE CICLO PROFUNDO, ROSEN SOLAR



Fuente: https://http2.mlstatic.com/D_NQ_NP_2X_993515-MLC44472455992_012021-F.webp

Estas baterías se fabrican generalmente con una carga de 6 kilowatt/hora o mayor según los requerimientos de los proyectos. Que permiten el uso de la energía eléctrica en lámparas de tecnología led, poder encender publicidades a lo largo de los pasillos, los letreros de salidas de emergencia, relojes digitales, entre otras aplicaciones o usos que se requieran, por sus valores de luminosidad y brillantes.

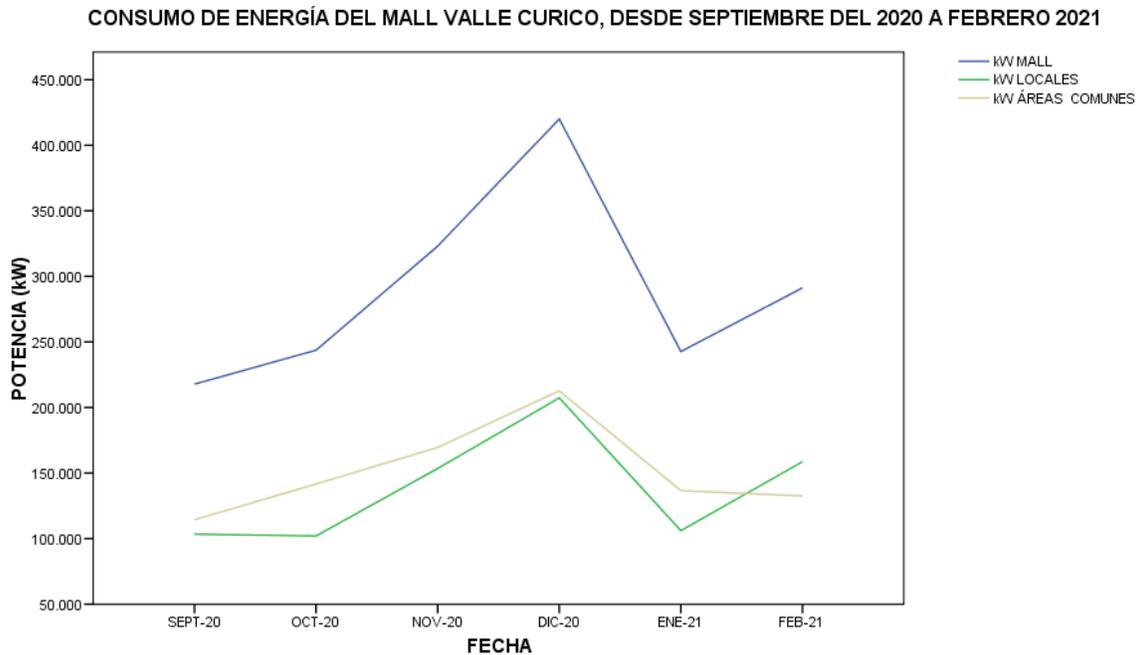
La tecnología led, otorga un ahorro sustancial del 80 del alto consumo de las ampollitas de filamento, siendo las ampollitas led las más eficientes y comprometidas

con el medio ambiente, ya que no tienen generación de CO₂ como las ampollas normales. Otro factor importante, corresponde a que las ampollas led pueden ser alimentadas directamente con las baterías de 12 volts y su larga vida útil que es aproximadamente 50.000 horas versus las 3.000 horas de las ampollas incandescentes (Avella et al, 2010).

5.4 Evaluación Económica de las Alfombras Peatonal y Reductores de velocidad

El establecimiento de la tecnología piezoeléctrica en áreas peatonales y reductores de velocidad vehicular, implican determinar la cantidad de ahorro energético que se logra alcanzar con el proyecto y la cantidad monetaria de su implementación, para lo cual es un requisito conocer el consumo energético mensual del centro comercial.

GRÁFICO 7: CONSUMO ENERGÉTICO DEL CENTRO COMERCIAL MALL VALLE CURICÓ ENTRE SEPTIEMBRE DEL 2020 A FEBRERO DEL 2021



Fuente: Elaboración propia

Con la información solicitada a Gerencia del Mall Curicó, sobre la energía eléctrica, se logra establecer por su histórico, el consumo energético promedio mensual entre

septiembre del 2020 a febrero del 2021, basado en la demanda energética es de 289.779 KW/h.

De esta forma se puede conocer el porcentaje de la demanda energética, que se podría cubrir parcialmente con la implementación de alfombras y reductores de velocidad, para establecer el ahorro energético y monetario, considerando el costo de las alfombras de 6.335 pesos por plancha para el C1 tendrá costo de inversión de 65.884.000 pesos para cubrir un área de 2.600m². En cambio, para el C2, que contiene el piezoeléctricos de mayor calidad es de 331.240.000 pesos para las 10.400 planchas, que tienen un costo unitario de 31.850, que se conforma por los 81 piezoeléctricos con un costo de 350 pesos unitarios y el costo de la palmeta de caucho de 3.500 pesos.

Respecto a los reductores de velocidad, el dinero estimado requerido para el caso A1, para su implementación, considera en cada punto 6 bloques compuesto por 600 piezoeléctricos cada uno, y que tienen un costo unitario de 1.851 pesos, más un costo estimación de bloque reductor de 2.500 pesos, se necesita una inversión de 146.929.200 pesos, donde se consideran los 11 puntos con dos reductores. Como los valores del sistema de reductores de velocidad, generan ingresos muy bajos, respecto al costo de inversión, se propone una nueva combinación del circuito. En cambio, el costo de inversión para el caso A2 es de \$36.979.800 pesos, considerando los 22 reductor, que se conforman cada uno por 6 bloques con 150 piezoeléctricos, permitiendo toda esta información conformar la tabla 4.

TABLA 4: ELEMENTOS ECONÓMICOS SEGÚN PROPUESTA

ALFOMBRAS PIEZOELÉCTRICAS	INVERSIÓN	GENERACIÓN ELÉCTRICA (KWH/MES)	AHORRO (\$/MES)	PRI (AÑOS)
C1	65.884.000	21,5888	2.244,84	MÁS DE 50
C2	331.240.000	127.193,424	13.262.418,28	2,08
REDUCTORES DE VELOCIDAD				
A1	146.929.200	1,0002	104,2595	MÁS DE 50
A2	36.979.800	2,5446	264,95	MÁS DE 50

Fuente: Elaboración propia

Como se puede ver en la tabla anterior, para los casos de las alfombras los resultados de generación de energía en el C1 representan un ahorro potencial del 0.0074% del consumo mensual del centro comercial. En cambio, el caso C2 un ahorro potencial del 43,89%. En cambio, para los reductores de velocidad, el aporte es bajo del 1% del consumo mensual.

Al establecer el costo total de inversión para la opción de mayor generación eléctrica es de 331.240.000 pesos logrando un periodo de recuperación de inversión de 24,98 meses, otorgando una menor incertidumbre de inversión, principalmente por el potencial ahorro energético del centro comercial y/o la posibilidad de inyectar al sistema interconectado la energía eléctrica, lo que hace que el proyecto sea rentable en el tiempo. En cambio, en las otras propuestas, los valores del PRI superan los 30 a 40 años, que corresponden a los periodos más esperados de recuperación de la inversión en la industria de generación eléctrica (AchEE, 2014).

6. CONCLUSIONES

Los materiales piezoeléctricos son productos que poseen una característica, que les permite indirectamente la posibilidad generar energía eléctrica tras una compresión de su estructura, esta característica se utiliza para el desarrollo de las alfombras y los reductores de velocidad, al otorgarles estas cualidades por la conformación de los piezoeléctricos en la estructura interna de los mismos.

Con el uso de piezoeléctricos se puede recuperar la energía mecánica que es producida por el desplazamiento de los seres vivos y con el andar de los vehículos, energía que es transformada en energía eléctrica.

Como se puede evidenciar en los capítulos anteriores, se establece que la cantidad de energía mecánica que se puede transformar en energía eléctrica depende de calidad de los piezoeléctricos, en este caso se han realizado pruebas con materiales de bajo costo y cálculos de generación basado en datos técnicos de piezoeléctricos de mayor calidad, entregando la visión y oportunidad para realizar nuevas pruebas con dispositivos de mayor rendimiento.

Aunque ambas iniciativas tanto peatonales y de reductores de velocidad, tienen una factibilidad técnica, el uso de alfombras resulta más rentable y ofrece un potencial ahorro del consumo eléctrico promedio mensual del 43,89% del centro comercial o desde la perspectiva de inyectar al sistema interconectado la energía generada, un ingreso potencial de 13.262.418,28 pesos mensuales.

Un punto relevante dentro de este proyecto es la durabilidad de los piezoeléctricos, ya que es incierto o difícil de poder determinar, debido a que el desgaste que estos tienen con el pasar del tiempo, está en el interior de su estructura, lo que dificulta estimarlo por su cubierta del piezoeléctrico y más aún que están instalados en el interior de una palmeta de caucho. Esto implica, cierta desventaja con versus otros sistemas de generación de energía, pero a su vez es una gran oportunidad, ya que su mantenimiento es simple, desde la perspectiva que no necesita mantención y solo debe reemplazar plancha que este defectuosa o dañada, presentando un costo bajo en procesos de instalación o reemplazo, otorgando la característica que las planchas

dañadas se pueden reciclar para la misma finalidad siendo que sea una fuente de generación de energía eléctrica de carácter limpia y práctica.

Otras líneas para investigar, se relaciona con la evaluación de otras alternativas disponibles en el mercado y la posibilidad de optimizar el sistema de fabricación de las alfombras y reductores, para lograr una mayor capacidad de transformación energética a un menor costo. Analizar la factibilidad y rentabilidad en otros lugares para su aplicación como por ejemplo supermercados, ferretería, estaciones de metro, terminales de buses, escaleras, hospitales, canchas de futbol, entre otros lugares, que presentan puntos muy transitados siendo lo requerido para esta tecnología.

Transformar la tecnología para escenarios de un gran tránsito vehicular, ya que los reductores de velocidad no logran cubrir una gran área, pero si fuera muy conveniente las calles internas de los estacionamientos del centro comercial, pues a mayor presión ejercida y mayor área de cobertura, mayor es la energía que se estaría generando, dado que se aprovecharía todo flujo de tráfico rodado en el centro comercial.

Finalmente, se puede establecer que no todos los escenarios propuestos entregan una cantidad de energía importante o relevante para el centro comercial o inclusive el no ofrecer un gran beneficio económico, pero si se obtiene un gran beneficio medio ambiental con la disminución de emisiones de CO₂ a la atmosfera y la reutilización del caucho, que presenta una descomposición cercana a los 100 años.

7. BIBLIOGRAFÍA CITADA

- CEP. (2017). *Energías renovables en Chile: Hacia una inserción eficiente en la matriz eléctrica*. Santiago: Centro de Estudios Públicos.
- IPCC. (2022). *Cambio Climático 2022: Impactos, Adaptación y Vulnerabilidad*. Ginebra: El Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático.
- MinEnergía. (2022). *Transición Energética de Chile Política Energética Nacional*. Santiago: Ministerio de Energía, Gobierno de Chile.
- MinEnergía. (2022). *Plan Nacional de Eficiencia Energética 2022-2026*. Santiago: Ministerio de Energía, Gobierno de Chile.
- BNEF. (2021). *ClimateScope 2020I*. Nueva York: Bloomberg New Energy Finance.
- Tritec. (26 de Diciembre de 2019). *TRITEC - Intervento*. Obtenido de Chile, La segunda mejor economía emergente para invertir en energías renovables: <https://tritec-intervento.cl/chile-la-segunda-mejor-economia-emergente-para-invertir-en-energias-renovables/>
- MINREL. (07 de diciembre de 2015). *La OCDE en la COP21*. Obtenido de Ministerio de Relaciones Exteriores: <https://chile.gob.cl/chile/blog/todos/la-ocde-en-la-cop21>
- ENEL. (6 de mayo de 2021). *Enel Chile*. Obtenido de Las 4 innovaciones que están cambiando la generación de energía en Chile: <https://www.enel.cl/es/historias/a202105-4-innovaciones-que-estan-cambiando-la-generacion-de-energia-en-chile.html>
- Patentinspiration. (6 de Junio de 2022). *Reporte de búsqueda*. Obtenido de Patentinspiration: <https://app.patentinspiration.com/#report/fb8B630C939a/filter>
- Mokry, P. (2016). *100 years of piezoelectric materials in acoustics: From a sonar to active metasurfaces*. República Checa: International Congress on Acoustics.
- Macías, H. (25 de Febrero de 2014). Generan electricidad con el tránsito vehicular. *EL avance en la información*, pág. 4.
- Cardozo, N., & Tamayo, D. (2017). El uso de piezoeléctricos para la generación de energía sostenible como proyecto piloto en un perfil vial de Bogotá (tesis de pregrado). Bogotá, Colombia: Universidad Católica de Colombia.
- Malmcrona, A. (2018). *Aplicaciones del efecto piezoeléctrico para la generación de energía (tesis de pregrado)*. Madrid, España: Universidad Carlos III.
- Pavegen Systems Ltd. (2022). *Estudio de Casos*. Obtenido de Pavegen: <https://www.pavegen.com/en/case-studies?hsLang=en>
- INAPI. (2019). *Energías Renovables Marinas*. Santiago: Ministerio de Economía, Fomento y Turismo, Gobierno de Chile.
- Castillo, J., Espinoza, V., & Barozet, E. (2022). *Cohesión social en Chile en tiempos de cambio: indicadores, perfiles y factores asociados*. Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL)/Centro de Estudios de Conflicto y Cohesión Social (COES). Santiago: Naciones Unidas.
- Zarkeshev, A., & Csiszar, C. (2019). Hydroelectric Road Ramp. *Science and Transport Progress*, 3(81), 36-43.
- Wu, S., Tang, N., Sun, H., Chen, W., Lin, W., Zhou, J., . . . Zhu, J. (2010). *China Patente n° CN101792996A*.

- Yañez, D. (2010). *España Patente n° WO2012017106A1*.
- Wang, C., Wang, S., & Wang, Z. G. (2019). Applicability evaluation of embedded piezoelectric energy harvester applied in pavement structures. *Applied Energy*, 251.
- Jasim, A., Yesner, G., Wang, H., Safari, A., Maher, A., & Basily, B. (2018). Laboratory testing and numerical simulation of piezoelectric energy harvester for roadway applications. *Applied Energy*, 224, 438-447.
- Yang, H., Wang, L., Zhou, B., Wei, Y., & Zhao, Q. (2018). A preliminary study on the highway piezoelectric power supply system. *International Journal of Pavement Research and Technology*, 11(2), 168-175.
- Jiménez, F., Frutos, J., Alonso, D., & Vázquez, M. (2015). Optimización piezoeléctricos comerciales para su uso m sistemas de Energy Harvesting. *Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio*, 54(6), 247-253.
- Martínez, E., & Muñoz, M. (2019). Use of kinetic energy for the obtaining of electrical power for road signs type leds and public lighting applied in the City of la Venta, Tabasco. *Ingeniería Eléctrica*, 3(9), 10-20.
- Paraíso, J. (2006). Systems for Human-Powered Mobile Computing. *Proceeding - Design Automation Conference*, 645-650.
- Agudelo, J. (2016). Cómo estimar la huella de un neumático para nuestros cálculos estructurales. *Estructurando*, 5, 192-195.
- ANAC. (2017). *Anuario Automotriz 2016/2017*. Asociación Nacional Automotriz de Chile A.G.
- INE. (2022). *Licencias de Conducir 2020*. *Licencias de Conducir*. Santiago, Chile: Instituto Nacional de Estadística.
- ANAC. (2020). *Informe del Mercado Automotor Diciembre 2020*. Santiago: Asociación Nacional Automotriz de Chile A.G.
- Noliac. (2017). NCE51. *Especificaciones Materiales*. CTS Corporation.
- Avella, M., Souza, T., & Silveira, J. (2015). A comparative analysis between fluorescent and LED illumination for improve energy efficiency at IPBEN building. *Electricity Generation and Transmission*, 448-456.
- AchEE. (2014). *Guía Metodológica de Eficiencia Energética en Proyectos de Inversión*. Santiago: Agencia Chilena de Eficiencia Energética.
- GlobalPetrolPrices. (5 de Marzo de 2022). *Chile precios de la electricidad*. Obtenido de GlobalPetrolPrices.com:
https://es.globalpetrolprices.com/Chile/electricity_prices/#h115
- Ley N°20.698. (22 de octubre de 2013). *Propicia la ampliación de la matriz energética, mediante fuentes renovables no convencionales*. Obtenido de Biblioteca del Congreso Nacional de Chile: <https://www.bcn.cl/leychile/N?i=1055402&t=0>
- Decreto 228. (01 de Agosto de 1996). *Reglamenta instalación, diseño y señalización de resaltos reductores de velocidad*. Obtenido de Biblioteca del Congreso Nacional de Chile: <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?i=11296&f=1996-09-05>
- Ramadan, M., Khaled, M., & Hage, H. E. (2015). Using Speed Bump for Power Generation – Experimental Study. *Energy Procedia*, 75, 867-872.