



UNIVERSIDAD  
**Finis Terrae**

UNIVERSIDAD FINIS TERRAE  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
INGENIERÍA CIVIL INDUSTRIAL

ESTUDIO DE FACTIBILIDAD PARA PRODUCCIÓN DE ENERGÍA  
MEDIANTE UNA RED DE AEROGENERADORES UBICADOS A LO  
LARGO DEL DE METRO DE SANTIAGO

ARIEL ANDRÉS LÓPEZ VARAS

Trabajo de título presentado a la Facultad de Ingeniería de la Universidad Finis Terrae,  
para optar al Título de Ingeniero Civil Industrial

Profesor Guía: Sergio Rozas

Santiago, Chile

2025

## **AGRADECIMIENTOS**

Quiero agradecer a mi hermano Cristóbal por siempre apoyarme emocionalmente en los momentos difíciles que tuvimos en la familia durante estos años, a los profesores Fernando Cifuentes que me ayudo a abordar la primera idea que tuve de la tesis, a los profesores Sergio Rozas y Francisco Herrera que me ayudaron a pulirla y terminarla de la mejor manera posible y finalmente agradecer a mis mejores amigos Fernanda y Bastián que siempre me dan apoyo y alegrías.

## Índice de contenidos

<b>Portada</b> .....	1
<b>Agradecimientos</b> .....	2
<b>Índice de contenidos</b> .....	3
<b>Resumen</b> .....	5
<b>Abstract</b> .....	6
<b>1. Introducción</b> .....	7
1.1 Objetivo Principal.....	8
1.2 Objetivos Específicos .....	8
1.3 Alcances y Limitaciones.....	8
<b>2. Estado del arte</b> .....	9
<b>3. Marco Teórico</b> .....	11
<b>4. Metodología</b> .....	16
<b>5. Desarrollo</b> .....	18
5.1 Tipos de aerogeneradores.....	19
5.1.1 Aerogeneradores de eje horizontal.....	19
5.1.2 Aerogeneradores de eje vertical .....	19
5.2 Características por considerar.....	20
5.3 Selección de instalaciones .....	24
5.3.1 Estaciones Subterráneas .....	24
5.3.2 Estaciones y vías en altura .....	27
5.3.3 Dentro de los vagones .....	28

5.4 Caudal de aire y sus velocidades .....	28
5.4.1 En estaciones subterráneas .....	29
5.4.2 Estaciones en altura y subterráneas .....	32
5.4.3 Dentro de los vagones .....	33
5.5 Cálculo de energía producida .....	34
5.5.1 Aerogenerador Windspire .....	38
5.5.2 Aerogenerador Southwest Windpower Air Brezze .....	39
5.5.3 Aerogenerador Honeywell WT 6500 .....	40
5.6 Estimación de costos .....	42
5.7 Reevaluación estratégica .....	48
5.7.1 Nuevo tramo de recorrido a evaluar .....	48
5.7.2 Periodo de funcionamiento .....	49
5.7.3 Caudal de aire .....	50
5.7.4 Aerogeneradores .....	51
5.7.5 Producción de energía .....	54
5.7.6 Posibles aplicaciones .....	56
5.7.8 Res interconectada y uso de baterías .....	59
5.7.9 Estimación de costos .....	60
<b>6. Conclusión .....</b>	<b>62</b>
<b>7. Listado de términos .....</b>	<b>65</b>
<b>8. Referencias Bibliográficas .....</b>	<b>67</b>

## RESUMEN

La energía eólica transforma el movimiento generado por el viento en energía eléctrica, es una alternativa renovable y limpia que cada día va creciendo más en todos sus ámbitos.

Este trabajo busca determinar la viabilidad de generación de energía con aerogeneradores en distintas áreas del metro de Santiago, para aprovechar las corrientes de aire que se encuentran presentes en ella. Para poder realizar esto se debieron realizar distintas actividades, tanto de investigación, como mediciones y cálculos, para poder determinar por ejemplo las estaciones en las cuales se ubicarían los aerogeneradores, las distintas velocidades de viento, la cantidad de energía que se podría llegar a producir y los costos/beneficios de esta misma.

El proyecto tiene dos etapas, la primera que enfatiza más el ámbito económico, es decir los beneficios monetarios que entregaría la energía producida al metro de Santiago, y la segunda etapa que se enfoca en el ámbito estratégico, es decir los beneficios que el proyecto le entregaría a los ciudadanos que utilizan este medio de transporte en el día a día.

**Palabras clave:** Aerogeneradores, Energía eólica, Metro de Santiago.

## **ABSTRACT**

Wind energy converts the motion generated by the wind into electrical energy. It is a renewable and clean alternative that continues to grow across all its applications.

This study aimed to determine the feasibility of installing wind turbines in different areas of the Santiago metro system to harness the existing airflow within the network. To achieve this, multiple activities were carried out, including research, measurements, and calculations, to determine factors such as suitable stations for turbine placement, wind speed variations, potential energy production, and the associated costs and benefits.

The project has two stages: the first one emphasizes the economic aspect, that is, the monetary benefits that the energy produced would provide to the Santiago Metro; and the second stage focuses on the strategic aspect, meaning the benefits that the project would offer to the citizens who use this means of transportation daily.

**Keywords:** Wind Turbines, Wind Energy, Santiago Metro

## **1. INTRODUCCIÓN**

Diariamente viajan en el metro de Santiago más de 2 millones de personas, a bordo de los vagones que recorren sus largas vías que se distribuyen a lo largo de toda la región metropolitana. Aquí es donde nace la idea de aprovechar estos viajes, ya que estos vagones generan ráfagas de viento al recorrer la vía e ir avanzando por las estaciones. Si bien la generación de vientos es intermitente, se podría encontrar un gran potencial al tomar en cuenta todas las estaciones y la cantidad de recorridos diarios que se efectúan.

Podemos encontrar distintas áreas en donde ubicar la red de aerogeneradores a lo largo del metro, como por ejemplo en las estaciones que se encuentran ubicadas en altura, a un costado de las vías, o en los pozos de compensación que se encuentran en las estaciones subterráneas. Es aquí donde se encuentra un recurso eólico que en estos momentos no se está aprovechando, ya que en estas áreas fluye viento naturalmente, generado por la circulación de los trenes a altas velocidades y por el efecto pistón en las estaciones subterráneas.

A medida que la sociedad avanza y los métodos de ingeniería se implementan cada vez más para encontrar soluciones a todo tipo de desafíos, es cada día más necesario innovar para poder salir adelante como sociedad. En esta problemática podemos observar principios fundamentales de la ingeniería como son la optimización de recursos, en este caso el viento que se encuentra disponible en la red de metro, la mecánica de fluidos, que es el actor principal de el por qué se producen los fenómenos eólicos; y el ámbito económico para determinar si es factible o no una posible realización del proyecto financieramente.

La solución propuesta consiste en la instalación de una red de aerogeneradores en determinadas estaciones a lo largo del Metro de Santiago, con el fin de aprovechar las corrientes generadas por este durante su funcionamiento, y de esta manera obtener energía eólica que pueda ser utilizada o almacenada.

Para poder ejecutar este proyecto se deben tomar en cuenta distintas áreas, como lo son el ámbito económico, energético, de interconexión, entre otros. Es

importante mencionar que son muchas las decisiones a tomar para la realización de este proyecto, como pueden ser el tipo de turbina a utilizar, el área en donde instalar los aerogeneradores para aprovechar al máximo las corrientes de viento, hacia donde irá la corriente generada, la comparación entre costos y producción energética, determinar si se cumplen los requisitos para poder implementar el proyecto, entre otras

### **1.1. Objetivo General**

Determinar la viabilidad de producción de energía eléctrica por medio de una red de aerogeneradores en el metro de Santiago.

### **1.2. Objetivos Específicos**

1. Investigar sobre el uso de aerogeneradores en redes de trenes
2. Definir las principales ubicaciones donde se instalarían los aerogeneradores
3. Determinar el caudal/velocidad de aire que llega a los aerogeneradores.
4. Calcular cuanta energía eléctrica se podría obtener del proceso.
5. Determinar los costos aproximados de instalación de la red de aerogeneradores.

### **1.3. Alcances y Limitaciones**

#### **Alcances**

Este trabajo se centra únicamente en determinar si es posible técnica y económicamente la generación de energía eólica por medio de aerogeneradores ubicados a lo largo de la red de Metro S.A.

#### **Limitaciones**

Restricciones de Metro S.A en el acceso a información para ser utilizada o proporcionada para el estudio. Acceso restringido a sectores de posible instalación de aerogeneradores debido a obras en ejecución. Debido a las condiciones del proyecto, se utilizará sólo la línea 1, 4, 5 y 6 del metro de Santiago.

## **2. ESTADO DEL ARTE**

Hoy en día ya hemos podido observar como la energía eólica trata de abarcar más áreas y no sólo la de los grandes aerogeneradores en los campos eólicos. Un ejemplo de esto sería el constante desarrollo que se ha efectuado en aerogeneradores de menor escala, para su implementación en espacios de circulación de vehículos, como carreteras o calles grandes dentro de las ciudades. En Estambul se encuentra en desarrollo un aerogenerador llamado ENLIL que, a diferencia de los aerogeneradores tradicionales, poseen pequeñas aspas en su interior, las cuales no distraen a los conductores, por temas de seguridad vial. Si bien el prototipo lleva unos años en desarrollo, se espera que este pueda llegar a generar suficiente energía eléctrica como para abastecer dos hogares durante un día (La Vanguardia. (2022, febrero 5). [1]

También podemos encontrar este tipo de iniciativas en Chile, donde para estudiar la factibilidad del uso de esta energía renovable, la Facultad de Ingeniería y la concesionaria Ruta de Maipo trabajaron en un proyecto piloto que constaba de la instalación de un aerogenerador que funcionaría a partir del flujo de aire generado por el paso de vehículos por la carretera, específicamente un bandejón central de la salida sur de Curicó. Esta turbina aprovechaba los flujos de aire creado por los vehículos que circulan en ambos sentidos de la carretera, y la cantidad de energía que producía se controla mediante un sensor que registra as revoluciones por minuto del giro de las aspas del generador, así como el voltaje generado (Universidad de Talca 2018). [2]

Otro ejemplo es la iniciativa planteada en el congreso Internacional de Madrid en el año 2016, donde se plantea aprovechar la energía eólica con las corrientes en los túneles de metro, como método de impulsar el rendimiento energético producido en el subsuelo. El director de la compañía Túnel Energy, Francisco Bugarín, presento un aerogenerador que permite explotar la energía de estos túneles, aprovechando el efecto pistón y pudiendo ser encajados en rieles en ciertas cantidades hasta obtener la energía que es requerida para la instalación. De esta

manera, la instalación se puede ampliar o reducir, a medida que cambien las necesidades del suministro eléctrico. La Vanguardia. (2016, octubre 17). [3]

Finalmente tenemos la campaña del metro de Francia (Paris) llamada "Turn to green" que busca demostrar que hay energía disponible a nuestro alrededor y muchas formas de generarla, buscando sensibilizar a la opinión pública sobre la importancia de las energías renovables.

El proyecto desarrollado en una colaboración con estudiantes de ingeniería de Lille, si bien no "utiliza" la energía eólica en sí misma, busca aprovechar el mismo principio de la energía cinética, utilizando aerogeneradores como torniquetes en las entradas de las estaciones del metro, los cuales están diseñados con un ingenioso sistema que permite transformar el movimiento generado por los usuarios, en un movimiento que se limita a segundos, en electricidad.

Su diseño es de forma de aspas y material de metal, se conectaron a baterías y la energía que produjeron durante 2 días fue capaz de alimentar las pantallas de los mismos torniquetes. En los dos días los usuarios produjeron 2.100Wh, lo que puede parecer poco, pero implementado a gran escala puede ser una gran fuente de energía. (Motorpasion, agosto 2023) [4]

### **3. MARCO TEÓRICO**

Energía Eólica: Es una fuente de energía renovable, en donde la energía cinética es transformada en energía mecánica gracias al movimiento que el viento produce sobre las aspas de los aerogeneradores, que son ubicados en espacios determinados para aprovechar de manera eficientemente las corrientes de aire.

Potencial eólico: Este se obtiene en función de la distribución de la velocidad del viento.

Anemómetro: Instrumento que se utiliza para medir la velocidad o rapidez de los gases, ya sea en un flujo contenido como el flujo de aire en un conducto, o en flujos no confinados, como un viento atmosférico. Este puede medir tanto la velocidad total, la magnitud de velocidad en un plano o el componente de velocidad en una dirección específica.

Aerogenerador: Este consta de una o más hélices sujetas al rotor de un generador eléctrico, estas ocupan la fuerza del viento para producir el giro del rotor del generador, produciendo que los campos magnéticos inherentes al generador eléctrico interactúen y produzcan energía eléctrica.

Aerodinámica: La aerodinámica estudia las fuerzas que un viento relativo ejerce sobre un "obstáculo" sumergido en él. La resistencia aerodinámica es la componente de la fuerza sobre el obstáculo en la dirección y sentido del viento relativo, esta se debe a distintas causas como lo pueden ser la presión o el roce.

Turbinas: Dispositivo mecánico que convierte la energía generada por el viento en electricidad. Las turbinas eólicas están hechas para convertir la energía del movimiento del viento (energía cinética) en energía mecánica, mediante el movimiento de un eje. Finalmente, los generadores de la turbina convierten la energía mecánica en electricidad, la cual puede almacenarse o ser utilizada directamente.

Caudal de Aire: Corresponde a la cantidad de aire que pasa por un lugar (canal, tubería, etc.) en un cierto periodo de tiempo, es decir, corresponde al volumen de aire por unidad de tiempo.

Pozos de Extracción: Este forma parte del sistema de ventilación pasiva del metro de Santiago, se sitúan en las proximidades del punto medio de los tramos del túnel inter-estación y su función es extraer el aire caliente desde el interior de los túneles hacia la superficie exterior.

Pozos de Compensación: Forma parte del sistema de ventilación pasiva del metro de Santiago, su función es evitar las molestias de aire generadas por el efecto pistón, fenómeno que ocurre cuando el tren, al circular por el túnel, empuja el aire que se encuentra a su paso de manera que se genera una capa de aire con una presión superior a la normal. Estos pozos se localizan en los nodos de ventilación de entrada y salida de cada estación.

Generador de Flujo axial: Consiste en un par de discos delgados de hierro que giran alrededor de un eje perpendicular al mismo, y en cuyo contorno se sitúan conjuntos de imanes, los cuales crean un campo magnético paralelo al eje de giro. La disposición axial para el corte del campo magnético es paralela respecto al embobinado, permitiendo así una excitación de los electrones sin fricción y oposición magnética, el corte que se realiza es de  $180^\circ$ , produciendo pérdidas de carga menores que la generación radia.

Generador Síncrono: Basa su funcionamiento en el principio de hacer girar una espira dentro de un campo magnético para que se induzca en aquella una fuerza electromotriz. También se puede utilizar dejando la espira fija y girando el campo, es decir los electroimanes que lo producen.

Efecto Pistón: Consiste en el desplazamiento forzado de aire en un área (cilindro, túnel, pozo) debido a una masa en movimiento. En este caso específico durante la

circulación del vagón del tren se genera una “bolsa” de aire con una presión superior a la normal, por lo que cuando el tren va casi llegando a la estación, llega antes aire generado por las corrientes.

Fluido: Sustancia que fluye y cambia su forma con relativa facilidad adaptándose a la de su recipiente, este incluye elementos líquidos, que cambian su forma, pero no su volumen y gases que cambian fácilmente de volumen y forma.

Mecánica de Fluidos: Se define como la ciencia especializada en el estudio y comportamiento de fluidos tanto en reposo como en movimiento, este fluido puede ser tanto líquido como gaseoso.

Perdidas de Carga: Esta ocurre normalmente cuando un fluido circula dentro de una tubería o conducto, debido al rozamiento de las paredes, también es producida por los fitting y piezas singulares (codos, válvulas, etc.).

Temperatura: Es una magnitud referida a las nociones comunes de calor o frío. Físicamente es una magnitud escalar dada por una función creciente de grado de agitación de las partículas, es decir, a mayor agitación mayor temperatura. De esta forma en escala microscópica, la temperatura se define como el promedio de la energía de los movimientos de una partícula individual por grado de libertad. En el caso particular de los gases se trata de los movimientos traslacionales, rotacionales y vibracionales de sus partículas.

Densidad: Se define como su masa por unidad de volumen,

$$\rho = \frac{m}{V}$$

Donde la letra griega  $\rho$  es el símbolo de la densidad,  $m$  es la masa y  $V$  es el volumen. Esta se suele medir en la unidad  $kg/m^3$ .

Presión: Se entiende por presión la aplicación de fuerza sobre una superficie, esta fuerza puede producir más o menos presión, si la superficie sobre la que se aplica es menor o mayor. Por lo que para calcular la presión debemos conocer la fuerza que se aplica y la superficie donde se aplica.

$$P = \frac{F}{A}$$

Donde P es la presión, F es la fuerza aplicada en la superficie y A es el área sobre la cual se aplica la fuerza.

Fuerza de arrastre: Cuando un objeto se mueve a través de un fluido, este mismo ejerce una fuerza de resistencia conocida como fuerza de arrastre, que tiende a reducir su velocidad. La fuerza de arrastre depende de propiedades del fluido (tamaño, forma, velocidad etc.)

Ley de Betz: La ley de Betz establece la máxima energía cinética teórica que puede ser extraída del viento, independientemente del diseño del rotor. Esta ley se obtiene a partir del principio de conservación de masa y momento de una corriente de aire que pasa a través de superficie idealizada que extrae energía del flujo.

Coefficiente de potencia: Es la relación entre la potencia extraída por la turbina y la potencia disponible en el viento a una velocidad no perturbada enfrente del rotor, con un área de referencia correspondiente al área frontal de la turbina.

$$C_p = \frac{P_{turbina}}{P_{viento}}$$

Donde P\_turbina es la potencia efectiva extraída por la turbina y P\_viento es la potencia del viento disponible. En las turbinas típicas suele variar entre 0,35 a 0,45, y el máximo que puede alcanzar este valor se conoce como Limite de Betz.

Límite de Betz: Es el límite teórico de extracción de energía eólica, es igual al 59,3% ya que la turbina no puede extraer el total de energía del viento, al dejar fluir la corriente de aire.

Efecto Venturi: Es un suceso que se produce cuando un fluido disminuye su presión al aumento de su velocidad, este efecto está dado por la ecuación de continuidad y el principio de Bernoulli.

Principio de Bernoulli: Establece que un aumento en la velocidad de un fluido ocurre simultáneamente con una disminución en la presión estática o una disminución en la energía potencial del fluido. El principio de Bernoulli se puede aplicar a varios tipos de Fluidos.

#### **4. METODOLOGÍA**

Para el desarrollo de este trabajo se utilizará una metodología secuencial explicativa, en donde primero se realizó una investigación documental, luego un trabajo de campo y análisis cuantitativo (mediciones, cálculos, costos) y finalmente se integraron los resultados para las conclusiones.

- Investigar sobre el uso de aerogeneradores en redes de trenes  
Se realizó una amplia búsqueda sobre el uso de aerogeneradores en redes de trenes u áreas similares que permita obtener información necesaria para entender el panorama general o estado actual de esta tecnología y sus aplicaciones. Esto se realizó mediante investigación en artículos académicos, internet, empresas especializadas en el área, etc.
- Definir las principales ubicaciones donde se instalarían los aerogeneradores  
Se realizó un análisis geográfico para determinar las mejores ubicaciones en donde se podrían aplicar los aerogeneradores, tomando en cuenta aspectos como topografía, velocidad del viento, infraestructura en áreas circundantes. Además, se hicieron visitas a terreno para tomar en cuenta los aspectos previamente mencionados u otros que se podrían pasar por alto al no ver las estaciones en tiempo real.
- Determinar el caudal/velocidad de aire que llega a los aerogeneradores.  
Para llevar a cabo este proceso, la mejor forma era a través de la metodología in situ, es decir, la recopilación y análisis de datos tomadas directamente desde el lugar donde se encuentra el fenómeno en estudio. Se realizaron mediciones de la velocidad del viento por medio de un instrumento llamado anemómetro, en distintos puntos de las instalaciones la red de metro de Santiago y se recopilarán los datos para su posterior análisis.

- Calcular cuanta energía eléctrica que se podría obtener del proceso.  
Para esto se realizaron cálculos matemáticos utilizando las fórmulas acordes a los procesos de generación de energía y utilizando los datos ya recopilados tanto de velocidades de viento, las especificaciones de los aerogeneradores, y los tiempos en los cuales estos trabajarían.
- Determinar los costos aproximados de una posible instalación.  
Mediante un análisis comparativo de costos de los distintos aerogeneradores posibles a utilizar, de su instalación y mantenimiento entre otros, se determina el beneficio que se produciría con la energía generada por los aerogeneradores y su costo total

## 5. DESARROLLO

La energía eléctrica es sin duda, uno de los elementos más utilizados y consumidos hoy en día por las personas, debido a que permite el funcionamiento de distintas áreas y elementos, abarcando un uso de todo tipo, por ejemplo, en la industria, en el comercio, el transporte, entretenimiento, en los hogares y por lo general en la mayoría de las cosas que se necesitan para un día común y corriente.

La energía eólica se basa en la transformación del movimiento generado por el viento (energía cinética de masas atmosféricas) en energía eléctrica mediante turbinas eólicas acopladas a generadores electrónicos síncronos o asíncronos, además es un recurso de carácter viable en el tiempo. (Comisión Nacional de Energía, 2020) [5]. La energía eólica es una de las renovables que más ha crecido en el último tiempo. Puede considerarse una alternativa notablemente limpia y sostenible, por lo que la tendencia probablemente continúe en los próximos años (Cartelle J, 2021) [6].

Estas características hacen que las fuentes de energía eólica se busquen cada vez más, ya que cuentan con el apoyo no sólo del gobierno con el fin de cumplir sus metas ambientales, sino que de las personas y ciudadanos que cada día toman más conciencia social sobre los problemas energéticos y del cambio climático. Es por esto que el uso de este tipo de energía ha tenido un crecimiento exponencial en la última década, debido principalmente al avance tecnológico en el diseño de los aerogeneradores y al cambio en las políticas económicas y ambientales (Otero F, 2017) [7].

En este trabajo se propone una red de aerogeneradores para la producción de energía eléctrica, la cual se evaluará si es viable o no, para su implementación y uso en el metro de Santiago.

La producción de energía que se realice por medio de los aerogeneradores se utilizará para suministrar dispositivos electrónicos que ayuden a tener una mejor experiencia de viaje a los pasajeros de metro, o también será almacenada en baterías para su posterior uso en otras tareas.

## **5.1. Tipos de aerogeneradores:**

### **5.1.1. Aerogeneradores de eje horizontal:**

En este tipo de aerogenerador las palas o astas giran en dirección perpendicular a la velocidad del viento y su principal ventaja es que posee una mayor generación de energía con respecto a los aerogeneradores de eje vertical.

El principio del funcionamiento de este aerogenerador es aprovechar la energía cinética del viento con el uso de sus palas o astas, las que mediante un multiplicador de velocidad transmitirán el movimiento a un eje a alta velocidad acoplado a un generador, el cual producirá la energía eléctrica para posteriormente ser utilizada, almacenada o distribuida. Para la óptima utilización de estos aerogeneradores y de la energía cinética del viento será necesario considerar aspectos como la densidad del aire, dimensiones de las palas, velocidad del viento, altura de ubicación, entre otras.

Estos se clasifican en Aeroturbinas rápidas o lentas, según la velocidad a la que giran sus rotores. Además, la velocidad de giro de las turbinas es inversamente proporcional al número de palas que esta posea. Otro aspecto que considerar es que cuando el componente de sustentación es mayor al componente de resistencia, se obtendrán resultados óptimos.

### **5.1.2. Aerogeneradores de eje vertical:**

Los aerogeneradores de eje vertical poseen características importantes como la flexibilidad y versatilidad, ya que los tipos existentes pueden combinarse entre sí pudiendo obtener mejores efectos y resultados, y a su vez complementando posibles falencias de alguna configuración que puede tener para un uso específico, además cuentan con la posibilidad de autoiniciar la generación y capacidad omnidireccional de los vientos para generar energía.

Estos se basan en dos principios físicos, el arrastre de una masa eólica para la generación y la fuerza de sustentación eólica para maximizar la energía recolectada. Otra de sus ventajas es su fácil integración al mercado, instalación en

áreas urbanas y capacidad de generación distribuida y micro generación. Es por esto que en los últimos años ha existido un alza en su demanda, buscando la oportunidad de aprovechar los recursos en entornos distintos a los convencionales o entornos limitados. Sin embargo, no todo es perfecto para estos dispositivos, ya que algunos de sus principales problemas suelen ser su baja eficacia, reducida posibilidad de aumentar el tamaño y bajo toque de inicio.

Existen dos tipos de aerogeneradores de eje vertical:

- Darrieus: Principios de sustentación aerodinámica.
- Savonius: Se basa principalmente en el arrastre.

Algunos aspectos que considerar para el uso de estos aerogeneradores son el coeficiente de potencia o “cp”, el cual entrega la eficiencia en forma de cociente de la energía recolectada respecto a aquella que está disponible a partir del viento para su generación. El Tip-Speed Ratio o “TSR”, se define como el cociente entre la velocidad de la punta de la hélice o la pala del aerogenerador respecto a la velocidad del viento.

El coeficiente de potencia y la capacidad de autoinicio de los aerogeneradores son inversamente proporcionales, ya que las nuevas investigaciones muestran componentes mecánicos que mejoran la relación, bajo el costo de un aumento en la dificultad de la construcción.

## **5.2. Características por considerar [8]**

El diseño y características de los trenes o vagones del Metro de Santiago influyen en el efecto pistón que se produce en las estaciones subterráneas, como también en el viento producido en las estaciones en altura. Al contar con un diseño aerodinámico, se reduce la resistencia del aire y se minimizan las turbulencias, mientras que las velocidades moderadas y discusiones ajustadas pueden disminuir la presión del aire desplazado por el tren. Además, la holgura del túnel y la ventilación afectan directamente al efecto pistón, que es mayor al ser al ser el tren más largo o contar con mayor cantidad de vagones. Por último, tenemos que en las

estaciones al aire libre la velocidad y el tamaño del vagón, aumentan el flujo y la presión de aire.

a) Velocidades de los trenes

El antiguo presidente de metro de Santiago (2018-2022), Luis de Grange, entregó la estadística de velocidad promedio de los trenes en cada una de las líneas de metro:

- Línea 1: 29,2 km/h
- Línea 2: 36,3 km/h
- Línea 3: 32 km/h
- Línea 4: 36,3 km/h
- Línea 4ª: 43,9 km/h
- Línea 5: 34,3 km/h
- Línea 6: 34.7 km/h

b) Frecuencia de los trenes

Para posteriormente realizar los cálculos o simulaciones necesarias, es necesario saber con cuanta frecuencia pasan los trenes por las estaciones en las cuales se realizará el estudio.

Los horarios de funcionamiento de metro de Santiago pueden obtenerse en su página web y se presentan a continuación:

**Figura 1. Horarios Metro Santiago**

Horarios		
Día Laboral	Sábado	Domingo y festivos
6:00 a 23:00 hrs.	6:30 a 23:00 hrs.	8:00 a 23:00 hrs.

- Horario Punta: Es el horario de mayor demanda, donde la tarifa es más alta. Corresponde a las horas de 7:00 a 8:59 y de 18:00 a 19:59.
- Horario Valle: Es el horario de menor demanda, donde la tarifa es más baja. Corresponde a las horas de 9:00 a 17:59 y de 20:00 a 20:44.
- Los sábados, el Metro de Santiago funciona de 6:30 a 23:00 horas, y se aplica el horario valle durante todo el día.
- Los domingos y festivos, el Metro de Santiago funciona de 8:00 a 23:00 horas, y se aplica el horario valle durante todo el día.

La frecuencia de paso por estaciones del Metro de Santiago depende de la línea, el horario y el día de la semana. Según la página oficial del Metro de Santiago, las frecuencias promedio en horario punta y valle son las siguientes:

- Línea 1: Entre 2 y 4 minutos en hora punta, y entre 4 y 6 minutos en hora valle.
- Línea 2: Entre 3 y 5 minutos en hora punta, y entre 5 y 7 minutos en hora valle.
- Línea 3: Entre 3 y 5 minutos en hora punta, y entre 5 y 7 minutos en hora valle.
- Línea 4: Entre 3 y 6 minutos en hora punta, y entre 6 y 8 minutos en hora valle.
- Línea 4A: Entre 6 y 8 minutos en hora punta, y entre 8 y 10 minutos en hora valle.
- Línea 5: Entre 3 y 5 minutos en hora punta, y entre 5 y 7 minutos en hora valle.
- Línea 6: Entre 3 y 5 minutos en hora punta, y entre 5 y 7 minutos en hora valle.

El horario bajo corresponde a las horas de 6:00 a 6:59 y de 20:45 a 23:00 de lunes a viernes, este es el horario donde menos frecuencia podemos encontrar ya que hay poco flujo de gente a esas horas.

- Línea 1: Entre 4 y 6 minutos de lunes a viernes, y entre 5 y 7 minutos los sábados, domingos y festivos.
- Línea 2: Entre 5 y 7 minutos de lunes a viernes, y entre 6 y 8 minutos los sábados, domingos y festivos.
- Línea 3: Entre 5 y 7 minutos de lunes a viernes, y entre 6 y 8 minutos los sábados, domingos y festivos.
- Línea 4: Entre 6 y 8 minutos de lunes a viernes, y entre 7 y 9 minutos los sábados, domingos y festivos.
- Línea 4A: Entre 8 y 10 minutos de lunes a viernes, y entre 9 y 11 minutos los sábados, domingos y festivos.
- Línea 5: Entre 5 y 7 minutos de lunes a viernes, y entre 6 y 8 minutos los sábados, domingos y festivos.
- Línea 6: Entre 5 y 7 minutos de lunes a viernes, y entre 6 y 8 minutos los sábados, domingos y festivos.

#### c) Dimensiones de los trenes

Las características de un tren del metro de Santiago dependen del modelo y la línea en que operan. A continuación, se presenta un resumen de algunas de las características más relevantes de cada tipo de tren:

- Trenes Alstom NS2016: Operan en la Línea 2 y la Línea 5. Tienen 7 coches, una longitud de 105 metros, un ancho de 2,9 metros y una capacidad de más de 1.300 pasajeros. Además, su peso es de 28 toneladas por coche, lo que da un peso total de 196 toneladas por tren de 7 coches.
- Trenes CAF AS2014: Operan en la Línea 3 y la Línea 6. Tienen 5 coches, una longitud de 120 metros, un ancho de 2,9 metros y una capacidad de 1.300 personas. Tiene un peso de 36 toneladas por coche, lo que da un peso total de 180 toneladas por tren de 5 coches.
- Trenes CAF NS2012: Operan en la Línea 1. Tienen 9 coches, una longitud de 153 metros, un ancho de 2,5 metros y una capacidad de 2.200 personas.

Tienen un peso de 32 toneladas por coche, lo que da un peso total de 288 toneladas por tren de 9 coches.

- Trenes Alstom NS93: Operan en la Línea 1, la Línea 2 y la Línea 5. Tienen 6 coches, una longitud de 108 metros, un ancho de 2,5 metros y una capacidad de 1.500 personas. Tienen un peso de 25 toneladas por coche, lo que da un peso total de 150 toneladas por un tren de 6 coches.
- Trenes Alstom NS74: Operan en la Línea 2 y la Línea 5. Tienen 5 coches, una longitud de 90 metros, un ancho de 2,5 metros y una capacidad de 1.250 personas. Tienen un peso de 23 toneladas por coche, lo que da un peso total de 115 toneladas por tren de 5 coches.
- Trenes Alstom NS04: Operan en la Línea 4 y la Línea 4A. Tienen 8 coches, una longitud de 134 metros, un ancho de 2,9 metros y una capacidad de 1.800 personas. Tienen un peso de 30 toneladas por coche, lo que da un peso de 240 toneladas por tren de 8 coches.

### **5.3. Selección de instalaciones**

#### **5.3.1. Estaciones subterráneas**

Una gran cantidad de estaciones del Metro de Santiago forman parte de la red subterránea, principalmente en donde se encuentra ubicada una alta densidad urbana como sería el centro de Santiago. Cabe destacar que tanto la línea 6 como la línea 3 que fueron las últimas en añadirse a la red de Metro, cuentan solamente con estaciones subterráneas y sumándole las estaciones de las otras líneas se obtiene un total de 79 estaciones.

**Figura 2.** Estación subterránea Línea 6 Metro Santiago

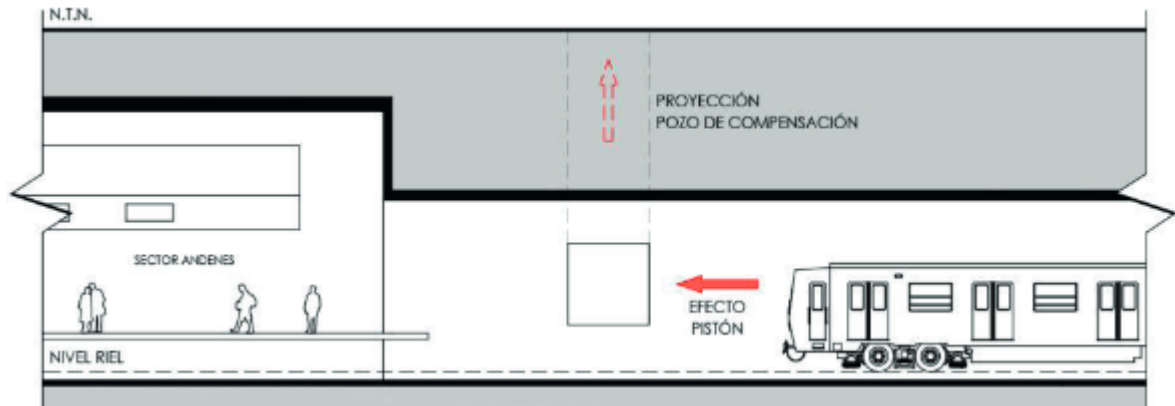


Es en algunas de estas estaciones subterráneas en donde entra la función de los pozos de compensación, que forman parte de un sistema de ventilación del Metro de Santiago, ya que en las estaciones subterráneas existe la problemática de las temperaturas de manera más severa, y el calor que es generado por una alta variedad de elementos debe ser extraído o disipado para el cuidado y la comodidad de los usuarios. Su función consiste en evitar las molestias de aire producidas por el efecto pistón sin requerir uso energético adicional, este proceso ocurre cuando el tren circula por el andén en el túnel, empuja el aire que se encuentra en su camino y la presión positiva formada en la cabeza expulsa el aire, mientras que la presión negativa formada en la cola aspira el aire fresco desde la superficie.

El efecto pistón posee un mecanismo de formación que se basa en la formación del viento del pistón y la distribución vertical del flujo de aire cuando el tren pasa por el túnel. Al avanzar por el andén, el aire que está delante del tren es empujado hacia ambos lados y hacia arriba del tren, antes de fluir por la parte trasera de este. Al pasar por el túnel, la pared del túnel forma una restricción de espacio, por lo que el aire del tren no puede fluir por la parte trasera del tren, esto provoca que parte del aire fluya hacia adelante y se descargue cuando el tren sale del túnel. Finalmente, la parte trasera del tren forma un vórtice de presión negativa,

y como resultado de esto se aspira fresco hacia el túnel, lo que genera el viento de pistón.

**Figura 3.** Efecto cilindro pistón en metro subterráneo [9]



El viento de pistón es uno de los factores importantes en el entorno del metro y es influyente en el consumo de energía. Dentro de los factores que afectan mayormente a este fenómeno se encuentran:

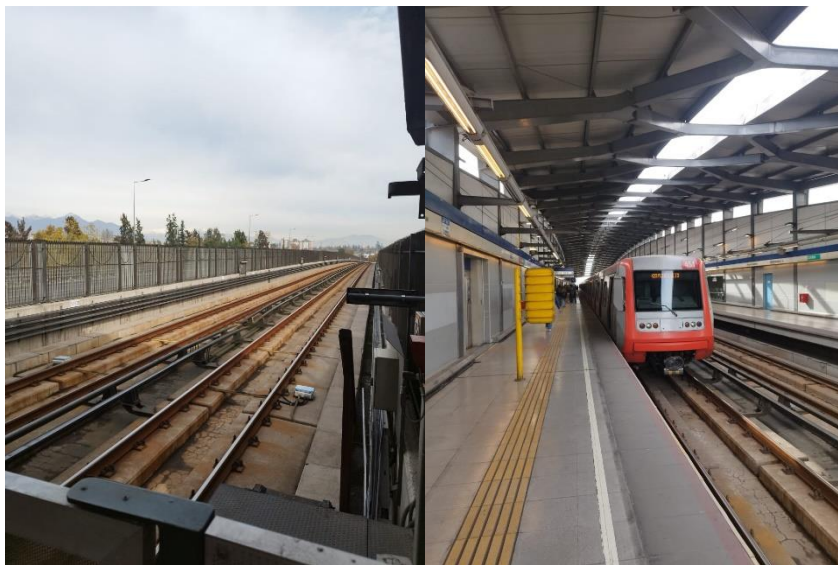
- La velocidad del tren
- Coeficiente de bloqueo
- Longitud del tren
- Longitud del túnel
- Entrada y salida del túnel
- Efecto Venturi
- Principio de conservación de la masa

### 5.3.2. Estaciones y vías en altura

Estas se encuentran en menor cantidad a lo largo de la red de Metro de Santiago, principalmente en zonas más alejadas del centro y con más espacio para este tipo de infraestructura. La mayoría se encuentran en el tramo de las líneas 4, 4A y línea 5 y juntas suman 31 estaciones.

Las estaciones elevadas generalmente se ubican a una altura que varía entre los 5 y los 15 metros sobre el nivel del suelo, con el fin de permitir sin problemas el libre tránsito de vehículos por debajo de las instalaciones.

**Figura 4.** Estación Macul, línea 4 del Metro de Santiago.



Es en estas estaciones donde se encuentra la otra opción para la posible instalación de aerogeneradores, pudiendo ser en la misma estación (donde se sube la gente) o en las orillas de las vías que juntan dos estaciones en altura.

En esta opción estamos aprovechando la infraestructura de Metro de Santiago para ocupar el viento que corre naturalmente y además se podría “potenciar” con el paso de los trenes durante su recorrido diario, ya que estos al pasar a fuertes velocidades, de igual manera generan fuertes ondas de viento.

Cabe destacar que esta opción se beneficiada principalmente para las estaciones en altura, ya que estas están ubicadas en áreas más periféricas y

abiertas, donde las velocidades de los vientos suelen ser mejores debido a la menor cantidad de obstrucciones, a diferencia de lo que se podría obtener en una ubicación como el centro de Santiago.

También se debe tener en cuenta el factor climatológico, como por ejemplo como varia el viento según las estaciones del año. Durante la primavera y verano los vientos tienden a ser más fuertes por la actividad térmica y durante el otoño e invierno los vientos suelen ser más sueves en su mayoría, pero también puede haber vientos fuertes por los frentes fríos.

### **5.3.3. Dentro de los vagones**

Dentro de los vagones del metro de Santiago, también se producen ráfagas de viento al tener las ventanas abiertas, estas pueden variar depende la velocidad a la que vaya el tren y el tipo de estación que este atravesando o recorriendo, pero suelen alcanzar velocidades que varían entre los 3 y los 5 m/s

**Figura 5.** *Interior vagón Metro de Santiago*



### **5.4. Caudal de aire y sus velocidades**

La generación de energía eólica por medio de aerogeneradores se basa en el aprovechamiento de la fuerza del viento para mover las aspas de los molinos y convertir la energía cinética en energía eléctrica. Para ello, se requiere de un emplazamiento adecuado, con una velocidad media anual del viento superior a los 5 m/s aproximadamente.

Para determinar la cantidad de aire que es producida en los distintos puntos del metro de Santiago, se realizaron mediciones en estas áreas por medio de un anemómetro, el cual nos permitía determinar las velocidades del viento en metros por segundo.

Algunas de las estaciones seleccionadas y en las cuales se logró realizar mediciones para la toma de datos fueron las siguientes:

- Estadio Nacional
- Ñuble
- Inés de Suarez
- Plaza Egaña
- Macul
- Elisa correa
- Hospital Sótero del Río

Cabe destacar que también se realizarían mediciones en las estaciones Ñuñoa y Los leones, pero no fue posible realizarlas, por temas de trabajos en el área y por no encontrar la ubicación de los pozos de salida de aire.

#### **5.4.1. En estaciones subterráneas (pozos de compensación)**

En las estaciones subterráneas (Estadio Nacional, Inés de Suarez y Plaza Egaña), se buscaron las salidas de aire de los pozos al exterior de la estación y se realizaron las mediciones con el anemómetro, tomando fotografías para que quedara registro. Cabe destacar que en la estación Inés de Suarez se encontraban dos salidas de aire distintas, a una distancia muy cercana, por lo que se realizaron mediciones en ambas.

**Tabla 1.** Mediciones de salida de aire en pozos de compensación (m/s)

Pozos compensación									Promedio
Estadio Nacional	1,5	2,5	1	1,3	1,5	2,1	2,6	0,9	1,7
Inés de Suarez 1	1,5	1,4	0,9	2,4	1,9	1,6	2,7	2,6	1,9
Inés de Suarez 2	4,5	4,2	2,1	3	3,4	3,9	4	4,1	3,7
Plaza Egaña	11,9	14,7	16,3	10	5,5	10,4	8	18,8	12,0

**Figura 6.** Salida de aire 1 Inés de Suarez.



**Figura 7.** Salida de aire 2 Inés de Suarez



**Figura 8.** Medición de aire 1 Inés de Suarez.



**Figura 9.** Medición de aire 2 Inés de Suarez.



Las salidas de aire del metro Inés de Suarez se encontraban ubicadas en la plaza que se encuentra a la salida de la estación, en la interacción de las calles Pedro de Valdivia y Francisco Bilbao. Cabe destacar que los periodos de salida de aire eran bastante constantes, pero existían picos en donde se alcanzaban las velocidades más altas, los cuales seguramente ocurrían al momento de pasar el tren por la ubicación del túnel donde se encuentra el pozo y ocurre el fenómeno del efecto cilindro pistón. Además, podemos observar que las velocidades en la salida 1 (por donde el aire sale de manera horizontal) son bastante menores que las de la salida 2 (por donde el aire sale directamente hacia arriba de manera vertical).

**Figura 10.** Salida de aire Plaza Egaña



**Figura 11.** Medición de aire de Plaza Egaña



Las salidas de aire del metro Plaza Egaña se encontraban de igual manera en una plaza que se encuentra a la salida de la estación, en la intersección de las calles Av. Irrázaval y Av. Ossa. En esta plaza se encontraban dos salidas de aire de igual tamaño (como la indicada en la Fig. 9), ubicadas a una cierta distancia y presentando mediciones de salida de aire casi del mismo rango. Además, podemos destacar que en esta área fue donde se presentó la mayor velocidad de salida de aire, alcanzando casi los 20 m/s, por lo que sería una de las principales candidatas a realizar instalación de aerogeneradores.

### 5.4.2. Estaciones en altura y subterráneas (Andén)

Agregando a las estaciones subterráneas, se agregaron a las mediciones las estaciones ubicadas en altura (Macul y Elisa Correa), de la línea 4 del Metro de Santiago, se realizaron mediciones con el anemómetro, pero esta vez la ubicación fue en el mismo andén, principalmente ubicados en la entrada y salida de la estación, para determinar si se producía una mayor de velocidad del viento cuando el metro llegaba o cuando iba saliendo de la estación. Llegando a la conclusión que se lograban mayores mediciones cuando el metro iba saliendo de la estación, lo que puede ser debido a que va acelerando para llegar a una mayor velocidad, a diferencia de cuándo va llegando que debe ir frenando para detenerse.

**Tabla 2.** Mediciones de aire en andén (m/s)

	Andén								Promedio
Ñuble	3,5	2,9	3,9	4,3	4,1	3,9	4,4	4,2	3,9
Plaza Egaña	3,4	4	4,3	4,5	3,9	4,4	4,1	3,9	4,1
Macul	3,2	3,6	3,7	4	2,9	3,5	4,1	4,5	3,7
Elisa Correa	4	4,5	4,3	4,6	4,1	4,5	4,2	4,5	4,3
Hospital Sotero del Río	3,2	3,3	3,9	4,3	4	4,1	3,9	4	3,8

**Figura 12.** Estación Macul



**Figura 13.** Medición salida de Macul



De estas mediciones podemos concluir que en las estaciones en altura se presentan velocidades del viento que podrían ser aprovechadas tanto en el andén de la estación, como también sería posible ubicar aerogeneradores a lo largo de las vías entre estaciones, puesto que se podría asumir que en esa área se presentan mejores mediciones, ya que los trenes pasan a mayores velocidades. Lamentablemente no podemos acceder a esta ubicación para poder medir ya que se necesita permiso y resguardo de Metro de Santiago, dado el peligro que conlleva estar ahí.

### 5.4.3. Dentro de los vagones

Finalmente contamos con el viento que se genera dentro de los vagones del tren cuando este va en movimiento, este ingresa por las ventanas y puede variar según las velocidades a las que se va, o según si nos encontramos en estaciones subterráneas o en altura. Si bien esta sección registro valores bastante prometedores, tiene el contra en que dependerá completamente de los usuarios del metro para su funcionamiento, ya que el uso de las ventanas está a su disposición, y su uso suele variar dependiendo de la estación del año y el clima o temperatura que se encuentre presente.

**Tabla 3.** Mediciones de aire dentro de los vagones (m/s)

Dentro del vagón									Promedio
Nuble	4,3	3,5	4,6	3,3	4,1	4,1	3,3	4,6	4,0
Plaza Egaña	3,8	4,2	3,6	4,5	4,7	4,3	3,6	4,6	4,2
Macul	3,9	4,6	4,3	3,7	4,6	4	3,7	3,9	4,1
Elisa Correa	3,8	3,6	4,6	4,7	3,9	4	4,4	4,6	4,2
Hospital Sotero del Río	4,5	3,9	4,2	4,7	3,8	4,6	3,6	4	4,2

**Figura 14.** *Medición baja dentro vagón*



**Figura 15.** *Medición alta dentro de vagón*



## 5.5. Cálculo de energía producida

Para poder determinar cuanta energía produce un aerogenerador, debemos considerar algunos parámetros principales tales como:

**Potencia nominal del aerogenerador:** Es la máxima potencia eléctrica que el aerogenerador puede generar a una velocidad de viento determinada. Esta se mide en kilovatios (kW) o megavatios (MW) y depende del diseño y la tecnología del aerogenerador.

**La velocidad del viento:** Se considera como la rapidez con la que se mueve el aire en el lugar donde se instala el aerogenerador. Se mide en metros por segundo (m/s) o kilómetros por hora (km/h) y varía según la altura, el relieve, la orientación y el clima. La velocidad del viento influye en la cantidad de energía cinética que el aerogenerador puede aprovechar para girar su rotor y generar electricidad.

**La curva de potencia del aerogenerador:** Es la relación entre la potencia eléctrica generada por el aerogenerador y la velocidad del viento. Se presenta gráficamente con una curva que muestra como varia la potencia en función del viento. La curva de potencia del aerogenerador tiene tres regiones: la región en la

que la velocidad es insuficiente para arrancar la producción, el rango de velocidad desde la velocidad en la que se produce la sincronización con la red y la máxima potencia, y el rango de velocidades a partir de las cuales el aerogenerador debe pararse.

Dado que hay una gran variedad de aerogeneradores que se podrían utilizar, se realizaron los cálculos con 3 tipos, para determinar cuál aprovecha de mejor manera el viento de la red de metro y cual podría ser el mejor económicamente. Cabe destacar que se van a utilizar aerogeneradores de baja potencia de tamaño pequeño, los cuales están diseñados para ser compactos y eficientes, lo que se adapta perfectamente a las necesidades de este trabajo. A continuación, se presentarán algunos de estos con sus especificaciones.

Algunos de los aerogeneradores que se consideraron son los siguientes:

1. Primus Wind Power Air 40:

- Potencia: 40W
- Diámetro del Rotor: 1.17m
- Velocidad de Arranque: 3.1 m/s
- Características: Ligero, fácil de instalar, diseño robusto para condiciones adversas.

2. Windspire:

- Potencia: 1kW
- Diámetro del Rotor: 1.2m
- Velocidad de Arranque: 3.3 m/s
- Características: Eje vertical estéticamente agradable y silencioso, funciona bien en áreas con turbulencias y vientos cambiantes.

3. Southwest Windpower Air Breeze:

- Potencia: 200W
- Diámetro del Rotor: 1.17m
- Velocidad de Arranque: 3.1 m/s

- Características: Buena durabilidad y eficiencia, efectivo en condiciones de viento variables, compacto, fácil de instalar e ideal para la carga de baterías.
4. Honeywell WT6500:
- Potencia: 1.5kW
  - Diámetro del Rotor: 1.8m
  - Velocidad de Arranque: 3 m/s
  - Características: Eje magnético sin engranajes, lo que reduce el mantenimiento y mejora la eficiencia. Diseño compacto y modular facilita instalación en techos y estructuras ya existentes.
5. Bornay Wind +600:
- Potencia: 600W
  - Diámetro del Rotor: 2.1m
  - Velocidad de Arranque: 3 m/s
  - Características: Compacto, eficiente, fácil de mantener y entrega una buena relación costo-beneficio.

Los 3 aerogeneradores seleccionados para realizar los cálculos de energía producida son el Windspire, Southwestr Windpower Air Breeze y Honeywell WT6500. Estos fueron seleccionados debido principalmente a su potencia y diámetro del rotor. La potencia de un aerogenerador afecta diferentes aspectos de su uso, como son la capacidad de carga, la eficiencia, los costos de operación, calidad de energía, entre otras.

Para calcular cuanta energía produce un aerogenerador se puede utilizar la siguiente formula:

$$E = P_e \times t$$

Donde E es la energía total producida en un periodo de tiempo t,  $P_e$  es la potencia eléctrica que produce el generador o “potencial eólico” y t es el tiempo de funcionamiento en horas (h).

Además,

$$P_e = C_p \times P_{viento}$$

Donde  $C_p$  es el coeficiente de potencia

Y finalmente tenemos que  $P_{viento}$  es igual a

$$P_{viento} = \frac{1}{2} \times \rho \times A \times v^3$$

Donde  $P_{viento}$  es la energía cinética del viento que pasa por el rotor del aerogenerador,  $\rho$  es la densidad del aire, A es el área del rotor y v es la velocidad del viento.

Datos generales

- Densidad del aire = 1,225 kg/m<sup>3</sup>
- Velocidades promedio en estaciones:

• **Tabla 4.** Promedio velocidades en m/s

Promedio vel. en m/s	Pozos	Anden	Vagón
Estadio Nacional	1,68	N/A	N/A
Ñuble	N/A	3,90	4,04
Inés de Suarez	3,65	N/A	N/A
Plaza Egaña	11,95	4,06	4,16
Macul	N/A	3,69	4,09
Elisa Correa	N/A	4,34	4,20
Hospital Sótero del Río	N/A	3,8	4,16

### 5.5.1. Aerogenerador Windspire

**Tabla 5. Datos generales Windspire**

Windspire		
Potencia	1000	Watts (W)
Diametro del rotor	1,2	Metros (m)
Velocidad Arranque	3,3	m/s
Área del rotor	1,13	m <sup>2</sup>

**Tabla 6. P\_viento de Windspire (W)**

P_viento (W)			
	Pozos	Anden	Vagón
Estadio Nacional	3,25	N/A	N/A
Ñuble	N/A	41,06	45,74
Inés de Suarez	33,66	N/A	N/A
Plaza Egaña	1181,10	46,40	49,92
Macul	N/A	34,70	47,27
Elisa Correa	N/A	56,48	51,28
Hospital Sótero del Río	N/A	39,11	49,92

**Tabla 7. P\_eólico de Windspire(W)**

P_eólico (W)			
	Pozos	Anden	Vagón
Estadio Nacional	1,06	N/A	N/A
Ñuble	N/A	13,34	14,86
Inés de Suarez	10,94	N/A	N/A
Plaza Egaña	383,86	15,08	16,22
Macul	N/A	11,28	15,36
Elisa Correa	N/A	18,36	16,67
Hospital Sótero del Río	N/A	12,71	16,22

## 5.5.2. Aerogenerador Southwest Windpower Air Brezze

**Tabla 8.** Datos generales S.W. Air Brezze

Southwest Windpower Air Brezze		
Potencia	200	Watts (W)
Diámetro del rotor	1,17	Metros (m)
Velocidad Arranque	3,1	m/s
Área del rotor	1,08	m <sup>2</sup>

**Tabla 9.** P\_viento de S.W. Air Brezze (W)

P_viento (W)			
	Pozos	Anden	Vagón
Estadio Nacional	3,11	N/A	N/A
Ñuble	N/A	39,24	43,71
Inés de Suarez	32,17	N/A	N/A
Plaza Egaña	1128,84	44,35	47,71
Macul	N/A	33,17	45,18
Elisa Correa	N/A	53,98	49,01
Hospital Sótero del Río	N/A	37,38	47,71

**Tabla 10.** P\_eólico de S.W. Air Brezze (W)

P_eólico (W)			
	Pozos	Anden	Vagón
Estadio Nacional	0,93	N/A	N/A
Ñuble	N/A	11,77	13,11
Inés de Suarez	9,65	N/A	N/A
Plaza Egaña	338,65	13,31	14,31
Macul	N/A	9,95	13,55
Elisa Correa	N/A	16,19	14,70
Hospital Sótero del Río	N/A	11,21	14,31

### 5.5.3. Aerogenerador Honeywell WT6500

**Tabla 11.** Datos generales Honeywell WT6500

Honeywell WT6500		
Potencia	1500	Watts (W)
Diámetro del rotor	1,2	Metros (m)
Velocidad Arranque	3,3	m/s
Área del rotor	2,54	m <sup>2</sup>

**Tabla 12.** P<sub>viento</sub> de Honeywell WT6500 (W)

P <sub>viento</sub> (W)			
	Pozos	Anden	Vagón
Estadio Nacional	7,31	N/A	N/A
Ñuble	N/A	92,29	102,80
Inés de Suarez	75,65	N/A	N/A
Plaza Egaña	2654,87	104,31	112,20
Macul	N/A	78,01	106,25
Elisa Correa	N/A	126,96	115,26
Hospital Sótero del Río	N/A	87,92	112,20

**Tabla 13.** P<sub>eólico</sub> de Honeywell WT6500

P <sub>eólico</sub> (W)			
	Pozos	Anden	Vagón
Estadio Nacional	2,19	N/A	N/A
Ñuble	N/A	27,69	30,84
Inés de Suarez	22,70	N/A	N/A
Plaza Egaña	796,46	31,29	33,66
Macul	N/A	23,40	31,87
Elisa Correa	N/A	38,09	34,58
Hospital Sótero del Río	N/A	26,38	33,66

A continuación, podemos observar la comparación entre los distintos aerogeneradores y sus ubicaciones.

**Tabla 14.** Comparación de aerogeneradores en pozos.

P_eólico (W)	Aerogenerador		
	Windspire	Air Brezze	Honeywell
Estadio Nacional	1,06	0,93	2,19
Ñuble	N/A	N/A	N/A
Inés de Suarez	10,94	9,65	22,7
Plaza Egaña	383,86	338,65	796,46
Macul	N/A	N/A	N/A
Elisa Correa	N/A	N/A	N/A
Hospital Sótero del Río	N/A	N/A	N/A

**Tabla 15.** Comparación de aerogeneradores en andén.

P_eólico (W)	Aerogenerador		
	Windspire	Air Brezze	Honeywell
Estadio Nacional	N/A	N/A	N/A
Ñuble	13,34	11,77	27,69
Inés de Suarez	N/A	N/A	N/A
Plaza Egaña	15,08	13,31	31,29
Macul	11,28	9,95	23,4
Elisa Correa	18,36	16,19	38,09
Hospital Sótero del Río	12,71	11,21	26,38

**Tabla 16.** Comparación de aerogeneradores en vagón.

P_eólico (W)	Aerogenerador		
	Windspire	Air Brezze	Honeywell
Estadio Nacional	N/A	N/A	N/A
Ñuble	14,86	13,11	30,84
Inés de Suarez	N/A	N/A	N/A
Plaza Egaña	16,22	14,31	33,66
Macul	15,36	13,55	31,87
Elisa Correa	16,67	14,7	34,58
Hospital Sótero del Río	16,22	14,31	33,66

## 5.6. Estimación de costos

Para determinar la viabilidad de la instalación de los aerogeneradores a lo largo de la red de Metro de Santiago, es necesario conocer todos los costos que estos abarcarían, como el costo del aerogenerador, el costo de instalación, el costo de mantenimiento, entre otros. Estos datos fueron investigados, basados en datos de distribuidores y fabricantes de aerogeneradores, y un análisis de aerogeneradores residenciales con potencias y características similares. [10]

Además de los costos de los aerogeneradores, debemos tomar en cuenta el costo de la electricidad, en este caso para la empresa Metro S.A debemos tomar en cuenta ciertos aspectos.

Metro S.A es uno de los mayores consumidores de electricidad en el país, debido a la alta carga energética que requieren su red de trenes y sistemas auxiliares para su funcionamiento diario. La demanda de Metro S.A puede llegar a los 1.500 kW de potencia necesaria en un momento específico para operar sus sistemas y anualmente acumula un consumo de 725 GWh, lo que equivale a 1.986.000 kWh diarios.

Las empresas grandes como Metro S.A, suelen negociar los precios directamente con los que brindan el suministro, en un mercado de precios libres, o

pueden comprar a precio nudo si es destinado a clientes regulados. El precio nudo son los precios a nivel de generación y transporte, y son establecidos para todas las subestaciones de generación y transporte.

El costo promedio de electricidad en Chile para este tipo de empresas industriales y comerciales de alto calibre es significativamente más bajo que el precio residencial. A la fecha, los precios de estas empresas variaban dependiendo de la zona y contratos, pero eran más bajos que los precios residenciales de ese entonces, que variaba entre los 195 CLP/kWh. Esta es la mejor información que se logró encontrar, puesto que, para una información más específica y exacta, sería necesario conocer los contratos de Metro S.A con sus respectivos proveedores.

Una vez calculado los costos para cada aerogenerador, se realizó el cálculo de cuanta energía sería generada anualmente, para la cual se toma en cuenta las horas totales del año multiplicando las 24 horas del día por los 365 días del año, lo que da un total de 8760 horas, obteniendo así la capacidad anual energética. Posteriormente se multiplica por el factor de capacidad del aerogenerador, para transformar la capacidad nominal en la capacidad promedio, es decir, una estimación más real que se obtiene del aerogenerador, ya que sabemos que este no estaría trabajando las 24 horas del día los 365 días del año. Luego de esto se procede a calcular los “ingresos” anuales, que vendría siendo el cálculo de los kW/h producidos en el año, multiplicado por el precio del kW/h que se estimo tiene Metro S.A.

Para determinar el número de años requeridos para la recuperación de la inversión, se ha contemplado que la generación y los ingresos anuales son constantes.

A continuación, se entregan los datos para el aerogenerador Honeywell WT6500:

**Tabla 17.** Datos aerogenerador Honeywell WT6500

Costo Instalación	\$3.668.480
Costo Mantenición	\$10.580.400
Costo Total	\$14.248.880
Costo kW/h	\$ 195
Vida útil (años)	22,5
Eficiencia	35%
Cap. Energética (W/h)	796,5
Horas Anuales Operación	8.760

- Capacidad nominal:

$$\text{Capacidad energética} \times t \text{ (horas)}$$

$$796W/h \times 8.760 = 6.977.003 W/h = 6.977,003 kW/h$$

- Energía anual producida:

$$\text{Capacidad nominal} \times \text{Factor de capacidad}$$

$$6.977,003kW/h \times 0,5 = 3.489 kW/h$$

- Valor de la producción anual de energía:

$$3.489 kW/h \times 195 CLP/kWh = \$680.258 CLP$$

- Finalmente, el tiempo de recuperación de la inversión sería:

$$\frac{\text{Inversión total}}{\text{Valor de producción anual}}$$

$$\frac{\$14.248.880}{\$680.258} = 20,95 \text{ años}$$

A continuación, se deja el ejemplo del aerogenerador Southwest Windpower Air Breeze:

**Tabla 18. Datos Aerogenerador Southwest Windpower Air Breeze**

Costo Instalación	\$1.414.125
Costo Mantenición	\$5.764.911
Costo Total	\$7.179.036
Costo kW/h	\$ 195
Vida útil (años)	17,5
Eficiencia	25%
Cap. Energética (W/h)	338
Horas Anuales Operación	8.760

- Capacidad nominal:

$$\text{Capacidad energética} \times t \text{ (horas)}$$

$$338W/h \times 8.760 = 2.960.880W/h = 2.960,8 kW/h$$

- Energía anual producida:

$$\text{Capacidad nominal} \times \text{Factor de capacidad}$$

$$2.960,88 kW/h \times 0,5 = 1.480,4 kW/h$$

- Valor de la producción anual de energía:

$$1.480,44 kW/h \times 195 CLP/kWh = \$288.685CLP$$

- Finalmente, el tiempo de recuperación de la inversión sería:

$$\frac{\text{Inversión total}}{\text{Valor de producción anual}}$$

$$\frac{\$7.179.036}{\$288.685} = 24,86 \text{ años}$$

A continuación, se deja el ejemplo del aerogenerador Windspire:

**Tabla 19. Datos Aerogenerador Windspire**

Costo Instalación	\$ \$3.382.960
Costo Mantención	\$ \$9.412.100
Costo Total	\$12.795.060
Costo kW/h	\$ 195
Vida útil (años)	20
Eficiencia	30%
Cap. Energética (W/h)	383
Horas Anuales Operación	8.760

- Capacidad nominal:

$$\text{Capacidad energética} \times t \text{ (horas)}$$

$$383W/h \times 8.760 = 3.355.080W/h = 3.355,08 kW/h$$

- Energía anual producida:

$$\text{Capacidad nominal} \times \text{Factor de capacidad}$$

$$2.960,88 kW/h \times 0,5 = 1.677,54 kW/h$$

- Valor de la producción anual de energía:

$$1.677,54 kW/h \times 195 CLP/kWh = \$327.120CLP$$

- Finalmente, el tiempo de recuperación de la inversión sería:

$$\frac{\text{Inversión total}}{\text{Valor de producción anual}}$$

$$\frac{\$12.795.060}{\$327.120,3} = 39,11 \text{ años}$$

Estos ejemplos se realizaron con los datos de las velocidades más fuertes y constantes que se registraron durante el periodo de recolección de datos, en la salida de aire de los pozos de compensación de la estación Plaza Egaña y con los tres aerogeneradores. A continuación, podemos observar un resumen de los datos obtenidos en los 3 aerogeneradores.

**Tabla 20.** Comparación entre aerogeneradores

Aerogenerador	Costo Total	Generación anual	Ingreso esperado anual	Tiempo de recuperación de la inversión
Honeywell WT6500	\$14.248.880	3.489 kW/h	\$680.258	20,95 años
Southwest Windpower Air Breeze	\$7.179.036	1.480,44 kW/h	\$288.685	24,86 años
Windspire	\$12.795.060	1.677,54 kW/h	\$327.120	39,11 años

Dado que la primera parte de este estudio no muestra resultados muy prometedores en cuanto a la cantidad de energía generada, debido a los costos que representan, ahora se realiza una reevaluación estratégica centrada en aplicaciones para la mejora del servicio.

Además, tomando en cuenta que si en vez de utilizar los recursos del metro o inversionistas, se realizara por medio de una inversión pública, es decir que el estado entregara los fondos para la realización del proyecto, la viabilidad económica de un proyecto energético puede cambiar significativamente. Algunos de los puntos que podrían variar son el riesgo financiero, reduciendo la presión por la rentabilidad, menor costo de capital por condiciones favorables como tasas más bajas o

subvenciones, reduciendo el costo del proyecto. También se podrían obtener subsidios directos del gobierno que pueden incluir subvenciones para la instalación de turbinas eólicas o para la investigación y desarrollo. Algunos ejemplos de esto son proyectos eólicos en Europa que han sido viables gracias a subsidios y mecanismos de apoyo gubernamental ((EWEA (European Wind Energy Association) Report on Support Scheme), o programas de energía limpia de EE. UU donde los créditos fiscales para producción de energía eólica y solar son cruciales para la viabilidad de los proyectos ((U.S. Department of Energy - Wind Energy Technologies Office).

## **5.7. Reevaluación estratégica centrada en aplicaciones para la mejora del servicio**

### **5.7.1 Nuevo tramo de recorrido a evaluar**

En este contexto, se propuso un enfoque en la línea 1 del metro de Santiago, donde se evaluó la posibilidad de instalar aerogeneradores pequeños en los pozos de compensación para aprovechar el viento generado por el efecto pistón. Aunque la producción de energía no sería suficiente para cubrir grandes demandas, sí podría ser utilizada para alimentar dispositivos como purificadores de aire, iluminación LED o pantallas informativas, las cuales funcionarían mediante una red de aerogeneradores instalados a lo largo de ciertas estaciones de la línea 1 del metro de Santiago, mejorando la experiencia de los usuarios y contribuyendo a un entorno más limpio y sostenible.

Para realizar este nuevo enfoque del proyecto se eligió la línea 1 del metro de Santiago, que cuenta con una amplia red de líneas subterráneas, por lo que se definió un tramo para el desarrollo desde la estación Los Dominicos, hasta la estación Tobalaba, abarcando un total de 8 estaciones ubicadas entre Providencia y Las Condes, en donde dos de las estaciones más concurridas a diario son las estaciones Los Leones y Tobalaba, por sus respectivas combinaciones.

Se determinó que la mejor opción sería un sistema de aerogeneradores pequeños con el fin de obtener de mejor manera el viento que sale de los pozos de

extracción, estos pueden ser instalados en la parte exterior de los pozos, o en la parte interior si es que se consiguiera la aprobación de Metro de Santiago, lo cual sería lo más óptimo debido a que hay algunas salidas de aire que se encuentran en áreas con poca disponibilidad de espacio o se encuentran tapadas con tierra y/o basura, lo que podría dificultar el funcionamiento de los aerogeneradores.

### 5.7.2 Periodo de funcionamiento:

En la primera parte de este proyecto, para ajustar el periodo de funcionamiento se utilizó un porcentaje llamado factor de capacidad, para que este estudio fuera más preciso aún, se intentó ajustar específicamente el funcionamiento de los aerogeneradores al periodo de operación de la red de metro, para lo cual se calculó las horas de funcionamiento en sus respectivos horarios y días de la semana y determinar un aproximado de cuantas veces pasan los trenes por las estaciones en donde se produciría el efecto pistón y la recolección de energía.

Tomando en cuenta los horarios con los que cuenta el metro de Santiago publicados en su página web, se construyó la siguiente tabla:

**Tabla 21.** *Tiempo de funcionamiento del metro de Santiago*

	Días hábiles	Sábados	Domingos
	260	52	52
Horas de funcionamiento	17	16,5	15
Minutos de funcionamiento	1020	990	900
Frecuencia de trenes (min)	4	5	5
Veces que pasa el tren por estación	255	198	180

Si bien estos valores son aproximados, al momento de realizar las mediciones de la velocidad del viento en las salidas de aire de los pozos de compensación, se realizó una parada de una hora en una de las estaciones para contar cuantas veces pasaban los trenes y así determinar si el cálculo realizado era realmente aproximado o no, lo que nos entregó una respuesta positiva, ya que los pozos se encontraban en funcionamiento constantemente.

### 5.7.3 Caudal de aire

Como se mencionó previamente, para calcular la energía que producirán los aerogeneradores, debemos determinar el caudal de aire que pasará a través de ellos y cuál será su velocidad. A continuación, podemos observar algunas imágenes de las salidas de aire ubicadas en algunas de las estaciones seleccionadas de la línea 1 del metro de Santiago.

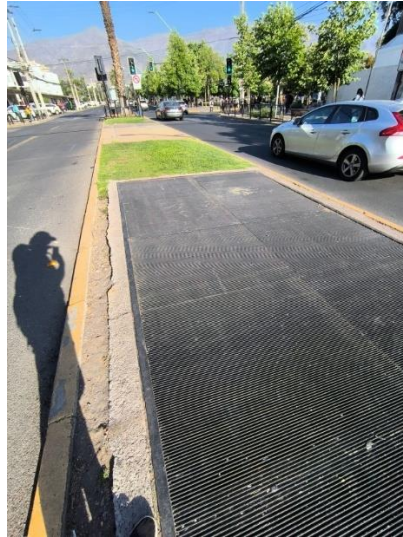
**Figura 16.** *Metro el Golf*



**Figura 17.** *Metro Los Dominicos*



**Figura 18.** *Metro Hernando de Magallanes*



Las velocidades de aire obtenidas mediante la medición de estos pozos en las estaciones de la línea 1 fueron bastante constantes entre sí, variando entre los 3 y 5 m/s. Sin embargo, se podría interpretar que dentro de estos pozos (debajo de la rejilla), por donde sale previamente el viento las velocidades pueden ser considerablemente más altas. Si bien esto no puede ser comprobado debido a las limitaciones del proyecto, posteriormente en los cálculos de energía se utilizará el escenario real que tenemos y además un posible escenario considerando que se pudieran instalar los aerogeneradores dentro de los pozos donde recibirían mayores velocidades de viento.

#### **5.7.4 Aerogeneradores**

La selección de aerogeneradores para la realización de este proyecto se basa en ciertos factores clave, como lo son:

- **Espacio disponible:** Las estaciones de metro, especialmente en los pozos de compensación, cuentan con espacios reducidos, por lo que los aerogeneradores deben ser lo más compactos posibles.
- **Velocidades de viento:** Las mediciones de las velocidades de salida de aire entregadas por los pozos de compensación son relativamente bajas, por lo

que los aerogeneradores deben tener una velocidad de arranque baja y ser lo más eficiente posibles en condiciones de viento moderado.

- Costo y mantenimiento: Si bien esta parte del proyecto no considera su énfasis en lo económico, siempre se busca encontrar un equilibrio en el costo y la eficiencia, para no malgastar los recursos.
- Integración con el sistema de almacenamiento: Los aerogeneradores deben ser compatibles con el sistema de almacenamiento que se utilizará para guardar la energía, para maximizar la eficiencia del sistema.

Utilizando la investigación de aerogeneradores realizada previamente, y tomando aún más en cuenta los puntos recién mencionados, se seleccionó el aerogenerador Southwest Air Breeze como el más adecuado para la utilización del proyecto, ya que cumple con la mayor cantidad de requerimientos como:

- Potencia: Si bien no posee una alta potencia, es el que cuenta con la mayor dentro de los requerimientos de espacio disponible, siendo 200W suficientes para alimentar algunos dispositivos purificadores de aire, pantallas de anuncios no muy grandes o iluminación.
- Velocidades: Cuenta con una velocidad de arranque baja, lo que permite la generación en la mayoría de los pozos.
- Diseño: Con una altura de no más de 1,5 metros y un diámetro del rotor de 1,17 metros, este aerogenerador es fácil de instalar en los espacios reducidos, además su diseño (marine) este hecho para resistir condiciones adversas de humedad y corrosión y debido a sus materiales requiere poco mantenimiento.
- Integración con baterías: Es compatible con sistemas de almacenamiento de energía, como el caso de las baterías ion-litio, permitiendo el almacenamiento para su uso posterior.

Si bien el aerogenerador Honeywell WT 6500 tenía mejores resultados debido al mayor área del rotor, se decidió utilizar este aerogenerador debido a su tamaño más compacto, lo que lo hace más susceptible a poder ser instalado en ubicaciones más pequeñas, además de que su valor total es considerablemente menor.

A continuación, se presentan las especificaciones técnicas detalladas del aerogenerador:

**Tabla 22.** Especificaciones aerogenerador Southwest Air Breeze Marine

Potencia nominal	200W
Diámetro del rotor	1.17 metros
Altura total	1.5 metros
Velocidad de arranque	3.1 m/s
Velocidad de operación	3.1–25 m/s
Velocidad de corte	25 m/s
Tipo de generador	Generador de imanes permanentes (sin engranajes)
Orientación del viento	Omnidireccional
Materiales	Estructura resistente a la corrosión
Nivel de ruido	< 40 dB (muy silencioso)
Peso	~15 kg
Vida útil	20 años
Aplicaciones	Carga de baterías, sistemas de energía para barcos, iluminación, etc.
Costo aproximado	USD 1,500 - 3000(dependiendo de la instalación y accesorios)

### 5.7.5 Producción de energía

Para calcular la energía producida se utilizarán las mismas fórmulas de la etapa anterior del proyecto, donde:

$$E = P_e \times t$$

Donde E es la energía total producida en un periodo de tiempo t,  $P_e$  es la potencia eléctrica que produce el generador o “potencial eólico” y t es el tiempo de funcionamiento en horas (h).

Además,

$$P_e = C_p \times P_{viento}$$

Donde  $C_p$  es el coeficiente de potencia

Y finalmente tenemos que  $P_{viento}$  es igual a

$$P_{viento} = \frac{1}{2} \times \rho \times A \times v^3$$

Donde  $P_{viento}$  es la energía cinética del viento que pasa por el rotor del aerogenerador,  $\rho$  es la densidad del aire, A es el área del rotor y v es la velocidad del viento.

Además, Para el Southwest Windpower Air Breeze Marine, el  $C_p$  típico es de 0.25 -0.35 (25–35%), por lo que se utilizara un promedio de 0,3.

Para realizar el primer cálculo de energía producida, se utilizará un aproximado diario de horas de funcionamiento del metro de Santiago de 16 horas, para acercarse al promedio de los siete días de la semana. Además, se utilizará un promedio de velocidad del viento de 4 m/s.

Potencia de viento disponible:

$$P_{viento} = \frac{1}{2} \times 1,225 \times 1,08 \times 4^3$$

$$P_{viento} = 42,34 W$$

Potencia Eléctrica generada:

$$P_{eléctrica} = 0,3 \times 42,34W$$

$$P_{eléctrica} = 12,7W$$

Energía generada al día (16h):

$$E = 12,7 \times 16$$

$$E = 203,2 Wh/día$$

A continuación, podemos observar una tabla con las distintas velocidades de viento desde que el aerogenerador empieza su funcionamiento a una velocidad de 3m/s y como va aumentando la energía producida mientras aumenta las velocidades del viento.

**Tabla 23.** Variación de energía generada con relación a la velocidad del viento.

Velocidad del Viento (m/s)	Potencia Eléctrica (W)	Energía Diaria (Wh/día)
3.0	5.34	85.4
3.5	8.49	135.8
4.0	12.7	203.2
4.5	18.1	289.6

Como se comentó previamente, hay una alta posibilidad de que más al interior de los pozos la velocidad del viento pueda ser mayor de la que llega afuera de las rejillas donde se realizaron las mediciones, por lo que se realizara un cálculo estimado con una suposición de que las velocidades pudieran llegar a 8 m/s.

Potencia de viento disponible:

$$P_{viento} = \frac{1}{2} \times 1,225 \times 1,08 \times 8^3$$

$$P_{viento} = 339,1W$$

Potencia Eléctrica generada:

$$P_{eléctrica} = 0,3 \times 339,1W$$

$$P_{eléctrica} = 101,7W$$

Energía generada al día (16h):

$$E = 101,7 \times 16$$

$$E = 1627,2Wh/día$$

### 5.7.6 Posibles aplicaciones

Algunas posibles aplicaciones para el uso de la energía generada podrían ser por ejemplo un purificador de aire. Estos dispositivos están diseñados para mejorar la calidad del aire en espacios interiores mediante la eliminación de partículas, alérgenos, contaminantes y microorganismos como bacterias y virus. Este artefacto se adapta perfectamente a las necesidades del metro en las redes subterráneas, ya que en estas suele haber problemas en la calidad del aire o transmisión de enfermedades respiratorias por la alta cantidad de gente que transcurre y se encuentra aglomerada.

El tipo de purificador de aire que se utilizaría sería uno por ionización, el cual genera iones negativos (aniones) para mejorar la calidad del aire. Estos iones se adhieren a las partículas en suspensión, como pueden serlo el polvo, polen, esporas de moho, microorganismos, entre otras, cargándolos eléctricamente y produciendo que estas se aglutinen y caigan al suelo, evitando que permanezcan en el aire que la gente respira.

Características de los ionizadores:

- Funcionamiento silencioso: No requieren ventiladores potentes, lo que los hace ideales para entornos sensibles al ruido.

- Bajo mantenimiento: A diferencia de los filtros HEPA, no necesitan reemplazos frecuentes, aunque sí limpieza periódica de las superficies donde se acumulan las partículas.
- Reducción de microorganismos: Algunos modelos emiten ozono en pequeñas cantidades, lo que puede descomponer ciertos contaminantes y microorganismos, aunque el uso de ozono debe regularse estrictamente en espacios cerrados.

Que beneficios me entrega:

- Reducción de energía requerida al proveedor de electricidad, lo que se puede convertir en ahorros en costos energéticos a largo plazo.
- Reducción de huella de carbono, además de operar con un suministro eléctrico más limpio, contribuyendo a los objetivos de sostenibilidad del país y combatiendo el cambio climático.
- Mejora de la imagen pública, ya que Metro de Santiago ya es un referente de transporte público sostenible en Latinoamérica.

A continuación, se realizará un análisis para comprar las producciones de energía con las posibles aplicaciones y el consumo que requieren:

- a) Purificadores de aire por ionización: Consumo: 50-100W aproximadamente, su funcionamiento no necesariamente tendría que ser todo el día, ya que se podría limitar a las horas más concurridas de las estaciones, por lo que podríamos definir un funcionamiento aproximado de 8hrs diarias.

Ejemplo: Un purificador de 75W funcionando 8 horas al día consume:

$$E = 75 \times 8 = 600Wh/día$$

Energía requerida: 600Wh/día

Energía producida (4m/s): 203,2 Wh/día

Energía producida (8m/s): 1627,2Wh/día

Por lo tanto, podemos concluir que para velocidades de 4 m/s no sería suficiente con un aerogenerador para cubrir el consumo de los purificadores de aire, mientras que con velocidades de 8 m/s si se logra cubrir el consumo, pudiendo almacenar la energía restante en las baterías, o ocupando dos purificadores para mejorar el efecto en el ambiente.

- b) Iluminación LED: Consumo 5-10W aproximadamente, su funcionamiento estaría limitado a las horas de funcionamiento del metro en la cual no se cuenta con luz natural (aproximadamente 3 horas), ya que se utilizarían luces de piso empotradas para iluminar la salida de los pozos de compensación para evitar accidentes.

Ejemplo: 10 luminarias LED de 10W funcionando 3 horas al día consumen:

$$E = 10 \times 10 \times 3$$

$$E = 300 \text{ Wh/día}$$

Energía requerida: 300Wh/día

Energía producida (4m/s): 203,2 Wh/día

Energía producida (8m/s): 1627,2Wh/día

Por lo tanto, podemos concluir que con velocidades de 4m/s haría falta de dos ventiladores para poder suministrar energía necesaria para las luces LED, mientras que con velocidades de 8m/s sería suficiente para cubrir muchas más de 10 luminarias, funcionar por un periodo más largo de tiempo o almacenar el excedente de energía en las baterías.

- c) Pantallas para anuncios: Consumo 50-100W, aproximadamente, su funcionamiento podría ser durante todo el funcionamiento del metro, o limitarse a las horas punta, ya que es más concurrido y se llega a más personas.

Ejemplo: Una pantalla LED de 100W funcionando 8 horas al día.

$$E = 100 \times 8$$

$$E = 800 \text{ Wh/día}$$

Energía requerida:  $800Wh/día$

Energía producida (4m/s):  $203,2 Wh/día$

Energía producida (8m/s):  $1627,2Wh/día$

Por lo tanto, podemos concluir que con velocidades de 4m/s sería insuficiente para suministrar energía a las pantallas, ya que haría falta 4 aerogeneradores, mientras que con velocidades de 8 m/s sería suficiente para iluminar 2 pantallas LED durante 8 horas al día.

### **5.7.7 Red interconectada y uso de baterías [11]**

El almacenamiento de la energía producida por los aerogeneradores es un aspecto crucial para maximizar la eficiencia y viabilidad del proyecto. Esto debido a que la generación de energía es intermitente, y es necesario contar con un sistema de almacenamiento que permita acumular la energía para su posterior uso, especialmente en los momentos que no haya suficiente viento para generar electricidad.

Para este proyecto, se utilizarían las baterías de Ion-Litio, que son unas de las opciones más populares y eficientes para el almacenamiento de energía en aplicaciones renovables. Estas son ampliamente utilizadas debido a su alta densidad energética, su larga vida útil y su capacidad de carga rápida. Además, su tamaño compacto las hace ideales para instalaciones en espacios reducidos y no requieren mantenimiento frecuente, lo que reduce los costos operativos y facilita su integración en la infraestructura del metro.

Además del almacenamiento en baterías, es importante considerar cómo se integrará la energía generada por los aerogeneradores con la red eléctrica del metro. Algunas opciones para este proceso son:

➤ **Uso directo en las estaciones**

La energía generada podría utilizarse directamente para alimentar sistemas de iluminación, los purificadores de aire que fueron mencionados previamente en el proyecto u otros sistemas de ventilación.

➤ Alimentación de la red de metro

La energía podría inyectarse a la red eléctrica de metro, reduciendo la dependencia de fuentes externas de energía y disminuyendo costos operativos.

➤ Sistemas híbridos.

Combinar el almacenamiento de baterías con otros sistemas de energía renovable, como paneles solares, para buscar maximizar la eficiencia energética.

Algunas consideraciones adicionales para el mejor funcionamiento de estas baterías podrían ser:

Determinar la capacidad de almacenamiento, es decir, dimensionar correctamente la capacidad de las baterías en función a la energía producida. Precauciones de seguridad ya que, si bien son seguras, requieren de sistemas de protección de sobrecargas, cortocircuitos o temperaturas.

### 5.7.8 Estimación de costos

El precio del aerogenerador Southwest Windpower Air Breeze Marine ronda entre los 1500 y los 3000 dólares, por lo que un aproximado a su precio podrían ser \$2.000.000 CLP, sus costos de instalación son de aproximadamente \$750.000 CLP, y su mantenimiento anual sería de alrededor de \$200.000CLP.

- Energía generada: 0,2032 kWh/día.
- Producción anual: 0,2032 kWh/día x 365 días = 74,168kWh/año.
- Precio de la electricidad para grandes consumidores: 160 CLP aprox. (ya que el precio específico del metro no se encuentra públicamente)

Por lo tanto, los ingresos anuales serían:

$$74,168 \frac{\text{kWh}}{\text{año}} \times 160 \text{ CLP/kWh} = 11.800 \text{ CLP/año.}$$

Por otra parte, en el caso hipotético que se planteó de que las velocidades fueran de 8 m/s los ingresos serían:

- Energía generada: 1,6272 kWh/día.
- Producción anual: 1,6272 kWh/día x 365 días = 593,928 kWh/año.

$$593,928 \text{ kWh/año} \times 160 \text{ CLP/kWh} = 95.028 \text{ CLP/año.}$$

**Tabla 24.** Comparación de ingresos por velocidad del viento

Velocidad del viento (m/s)	Generación diaria (Wh/día)	Generación Anual (kWh/día)	Ingresos Anuales
4	203,2	74,168	\$ 11.867
8	1627,2	593,928	\$ 95.028
12	5486,7456	2002,662144	\$ 320.426

Al obtener el valor monetario de la energía que sería producida anualmente por un aerogenerador, podemos concluir que es un valor demasiado bajo, ya que el tiempo de retorno de la inversión sería demasiado alto en comparación con los costos del producto en sí, ya que sólo el comprar e instalar el aerogenerador costaría aproximadamente \$3.000.000 CLP, y ni siquiera alcanza a cubrir los costos de mantención anual que sería de \$200.000 CLP aprox.

## **6. CONCLUSION**

En el presente estudio se abordó la viabilidad de generar energía eólica mediante la instalación de una red de aerogeneradores a lo largo de la red de metro de Santiago. El estudio se dividió en dos partes, la primera en donde los resultados se miden tomando en cuenta el enfoque económico de la instalación y la producción de energía generada, y la segunda parte donde se toma en cuenta más el enfoque estratégico en aplicaciones y como contribuirían a las personas que utilizan la red de metro.

Durante la primera parte del proyecto se probaron distintas áreas para determinar cuáles eran las mejores ubicaciones para la posible instalación de los aerogeneradores, llegando a la conclusión que eran los pozos de compensación de aire, ya que en estos se lograban las mayores velocidades de viento. Sin embargo, debido a los costos de los aerogeneradores, su instalación, mantenimiento, la cantidad de energía que podrían llegar a generar y el valor de esta, se llegó a la conclusión de que no era viable bajo las condiciones actuales, ya que la inversión necesaria era demasiado alta para los beneficios que entregaba, es decir, no se llegaría a producir la cantidad suficiente de energía para poder hacer que los costos de la inversión sean justificados para la empresa de Metro S.A.

En la segunda parte del proyecto, donde se tomó en cuenta el enfoque estratégico y sus posibles aplicaciones para mejorar la calidad del servicio para los usuarios, se determinó que, mediante la instalación de una red de aerogeneradores, es posible alimentar elementos electrónicos como ionizadores de aire, luces de iluminación LED, o pantallas led de anuncios. Si bien es posible alimentar los requerimientos energéticos de estos artefactos, en algunos casos es necesaria la energía de más de un aerogenerador para su funcionamiento. Además, si se compara la energía producida por los aerogeneradores y la totalidad de sus costos, con el valor de la energía que ya se le es suministrada, se concluye que es mucho más económico el suministro actual con el que cuenta el metro de Santiago. Sin embargo, pese a las limitaciones económicas que implica el proyecto, siempre puede verse viable desde otros puntos de vista, como es el marketing o buena

propaganda que recibiría el metro de Santiago al apoyar e incentivar el uso de energías renovables para mejorar el medio ambiente.

Los resultados obtenidos muestran que la generación de energía eólica en la red de metro de Santiago presenta desafíos significativos. Entre los factores que contribuyen a esta inviabilidad se encuentran:

- **Factor de capacidad:** Dado que nuestro trabajo se encontraba limitado al tiempo de funcionamiento del metro de Santiago, y además dependía de las distintas ubicaciones seleccionadas, el factor de capacidad no fue suficiente, debido a que había demasiados periodos de tiempo en los que el aerogenerador no funcionaría.
- **Tamaño del aerogenerador/aspas:** Este afecta directamente a su capacidad de producción energética, y en este caso no podían ser de un gran tamaño debido a los espacios reducidos de instalación.
- **Infraestructura:** Dado a la integración de los aerogeneradores en espacios en donde hay circulación de personas, se deberían tomar medidas necesarias de cierres perimetrales para resguardar tanto la seguridad de las personas como el funcionamiento de los aerogeneradores sin inconvenientes.

Si bien los costos en general de la energía eólica han disminuido en los últimos años, podemos observar que aún no es apta para su instalación en cualquier medio, ya que hay muchos factores que pueden afectar negativa o positivamente a sus costos y su producción de energía. Puede que más adelante con el avance de la tecnología se logren crear aerogeneradores más pequeños que logren generar cantidades de energía suficientes para poder ser instaladas en áreas de menor espacio, por lo que la puerta queda abierta a oportunidades en el futuro.

Aunque la generación de energía eólica a lo largo de la red de Metro de Santiago no resulta viable “económicamente hablando” en las condiciones actuales, este estudio entrega conocimientos que pueden ser aplicados a futuras

investigaciones y proyectos de energía renovable subsidiados por el gobierno. A continuación, se proponen algunas recomendaciones:

- **Exploración de Otras Ubicaciones:** Trabajar en conjunto con la empresa de Metro para poder acceder a más información y otras ubicaciones en donde se pudiese aprovechar de mejor manera las corrientes de viento. Se sugiere investigar la viabilidad de instalar aerogeneradores en otras ubicaciones urbanas o suburbanas de Santiago, donde las condiciones del viento sean más favorables.
- **Investigación Adicional:** Se anima a realizar estudios adicionales que analicen la viabilidad de soluciones híbridas o la combinación de diferentes fuentes de energía renovable para mejorar la sostenibilidad del sistema de transporte, como por ejemplo combinar energía solar fotovoltaica con energía eólica, ubicando paneles solares y aerogeneradores sobre las estaciones de metro.

## **7. LISTADO DE TERMINOS**

- Estaciones subterráneas: Estaciones ubicadas bajo tierra, comunes en áreas urbanas densas como el centro de Santiago. Ejemplo: Estación Los Héroes.
- Estaciones en altura: Estaciones elevadas sobre estructuras o viaductos, típicas en zonas periféricas. Ejemplo: Estación Macul (Línea
- Pozos de compensación: Estructuras de ventilación que regulan el flujo de aire en túneles subterráneos, mitigando el efecto pistón causado por el movimiento de los trenes.
- Pozos de extracción: Conductos que expulsan aire caliente desde los túneles hacia el exterior, ubicados cerca del punto medio entre estaciones.
- Andén: Plataforma donde los pasajeros esperan y abordan los trenes. Puede ser subterráneo o elevado.
- Vías: Rieles por donde circulan los trenes. En altura, suelen estar sobre viaductos; subterráneas, dentro de túneles.
- Túneles: Pasos subterráneos que conectan estaciones. Diseñados para minimizar resistencia aerodinámica de los trenes.
- Efecto pistón: Fenómeno donde el tren desplaza aire al moverse en túneles, generando corrientes de alta presión (frente) y baja presión (atrás).
- Sistema de ventilación pasiva: Mecanismo que usa pozos de compensación y extracción para regular temperatura y aire sin energía adicional.
- Nodos de ventilación: Zonas cercanas a las estaciones donde se ubican pozos de compensación para manejar el flujo de aire.
- Red de Metro de Santiago: Sistema integrado de líneas (1-6 y 4A) que cubre la Región Metropolitana, con estaciones subterráneas y elevadas.
- Infraestructura elevada: Viaductos y estructuras que soportan vías y estaciones en altura, como en Línea 5.
- Salidas de aire/rejillas: Rejillas visibles en superficie (ej: Plaza Egaña) que permiten la salida del aire de los pozos de compensación.
- Tramos inter-estación: Segmentos de túnel o vía entre dos estaciones consecutivas, donde se miden velocidades de viento.

- Estaciones combinadas: Estaciones con conexión entre líneas, como Tobalaba (L1 y L4).

## 8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] Universidad de Talca. (2018, marzo 29). *Generador eólico aprovecha energía producida por vehículos en carretera.*

Recuperado de: <https://www.otalca.cl/noticias/generador-eolico-aprovecha-energia-producida-por-vehiculos-en-carretera/>

[2] La Vanguardia. (2022, febrero 5). *Convierten el tráfico en energía renovable: las turbinas que están revolucionando Turquía.*

Recuperado de: <https://www.lavanguardia.com/natural/20220205/8032858/trafico-energia-renovable-turbina-enlil-turquia-pmv.html>

[3] La Vanguardia. (2016, octubre 17). Viento en túneles metro o pisadas peatones, fuentes de energía del subsuelo.

Recuperado de: <https://www.lavanguardia.com/vida/20161017/411070661966/viento-en-tuneles-metro-o-pisadas-peatones-fuentes-de-energia-del-subsuelo.html>

[4] Motorpasion (2023, agosto). Tornos de metro reconvertidos en turbinas para generar energía limpia: el experimento de París que podría extenderse por Europa

Recuperado de: <https://www.motorpasion.com/futuro-movimiento/tornos-metro-paris-generar-turbinas-energia-limpia>

[5] Comisión Nacional de Energía, (2020). “Informe de costos de tecnologías de generación”

Recuperado de: “<https://www.cne.cl/wp-content/uploads/2020/06/ICTG-Marzo-2020.pdf>”

[6] Cartelle J, Lara M, López M, Del Caño A. (2021). “Probabilistic assessment of offshore wind energy potential along the spanish coast for 10-mw wind turbines”. DYNA. Vol. 96, no. 3, o. 290-295

Recuperado de: “<https://eds.b.ebscohost.com/eds/pdfviewer/pdfviewer?vid=1&sid=73afeac4-f8d4-4dcd-9d1e-0ac0eadd1ca5%40pdc-v-sessmgr01>”

[7] Otero F, Cerne B, Campetella C. (2017). “Estudio preliminar de la velocidad del viento en San Julián en referencia a la generación de energía eólica”.

Recuperado de: <http://eds.a.ebscohost.com/eds/pdfviewer/pdfviewer?vid=1&sid=b5708a79-a9e2-48ae-9e7d-53c4ebd50e42%40sessionmgr4006>

[8] Metro S.A, (2019)

Recuperado de: “<https://www.metro.cl/>”

[9] Buguño E. (2019), “Oasis Urbano: Una propuesta de acondicionamiento térmico para el metro de Santiago”.

Recuperado de: [https://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0719-07002019000200016#B11](https://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0719-07002019000200016#B11)

[10] Datos recuperados de:

<https://www.windspireenergy.com/5kW-wind-turbine.htm>

<https://www.uti.edu/blog/wind-turbine/wind-turbine-maintenance>

<https://www.energysage.com/about-clean-energy/wind/small-wind-turbines-overview/>

<https://www.primuswindpower.com/>

<https://www.honeywellstore.com/store/images/pdf/honeywell-wind-turbine-system.pdf>

<https://www.bid-on-equipment.com/generators/electric-generators/201843~honeywell-wt6500-wind-turbine.htm>

[11] U.S Department of Energy (2020). Energy Storage Handbook.

Recuperado de: <https://www.energy.gov/>

International Energy Agency (IEA). Disponible en: <https://www.iea.org/>

Marco teórico:

Recuperado de “[https://www.dipres.gob.cl/598/articles-140852\\_doc\\_pdf.pdf](https://www.dipres.gob.cl/598/articles-140852_doc_pdf.pdf)”

Recuperado de: <https://www.textoscientificos.com/energia/turbinas>

Recuperado de: [https://repositorio.aemet.es/bitstream/20.500.11765/2124/1/TyC\\_1987\\_9\\_04.pdf](https://repositorio.aemet.es/bitstream/20.500.11765/2124/1/TyC_1987_9_04.pdf) /

Revista Tecnológica ESPOL, Vol. 20, N. 1, 123-130, (Octubre, 2007), ISSN : 0257-1749 Recuperado de:file:///C:/Users/alope/OneDrive/Documentos/Ariel/

Universidad/Universidad%202022/Trabajo%20de%20Titulaci%C3%B3n/Info%20tesis/170-429-1-PB.pdf

Recuperado de: <https://oa.upm.es/13758/1/C14.pdf>

Recuperado de: [https://bibliotecadigital.ciren.cl/bitstream/handle/20.500.13082/32174/Boletin\\_INIA\\_28.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://bibliotecadigital.ciren.cl/bitstream/handle/20.500.13082/32174/Boletin_INIA_28.pdf?sequence=1&isAllowed=y)

Recuperado de: [https://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0719-07002019000200016#B11](https://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0719-07002019000200016#B11)

Recuperado de: <http://redferroviariabcn.blogspot.com/2011/03/el-efecto-piston-1.html>

Recuperado de: <http://www.termosistemas.com.ar/sitio/vernota.php?nota=247&cat=1#:~:text=En%20el%20Sistema%20Internacional%20de,pa%C3%ADses%20anglosajones%2C%20la%20escala%20Fahrenheit.>

Recuperado de: [https://bibliotecadigital.ciren.cl/bitstream/handle/20.500.13082/32174/Boletin\\_INIA\\_28.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://bibliotecadigital.ciren.cl/bitstream/handle/20.500.13082/32174/Boletin_INIA_28.pdf?sequence=1&isAllowed=y)

Recuperado de: [https://bibliotecadigital.ciren.cl/bitstream/handle/20.500.13082/32174/Boletin\\_INIA\\_28.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://bibliotecadigital.ciren.cl/bitstream/handle/20.500.13082/32174/Boletin_INIA_28.pdf?sequence=1&isAllowed=y)

Recuperado de: [https://sisbib.unmsm.edu.pe/bibvirtual/publicaciones/actualidad/a%C3%B1o2\\_n15\\_2002/mecanica\\_fluidos.htm](https://sisbib.unmsm.edu.pe/bibvirtual/publicaciones/actualidad/a%C3%B1o2_n15_2002/mecanica_fluidos.htm)

Recuperado

de:

[https://repositorio.pucp.edu.pe/index/bitstream/handle/123456789/28690/maquinas\\_electricas\\_cap06.pdf?sequence=19&isAllowed=y](https://repositorio.pucp.edu.pe/index/bitstream/handle/123456789/28690/maquinas_electricas_cap06.pdf?sequence=19&isAllowed=y)